

С. А. УЛЬЯНОВ

СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ЭЛЕКТРО-
МАГНИТНЫМ
ПЕРЕХОДНЫМ
ПРОЦЕССАМ



С. А. УЛЬЯНОВ

**СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ
ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования РСФСР в качестве учебного пособия
для электротехнических и энергетических вузов и факультетов



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1968

Ульянов С. А.

У 51 Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах. Учебное пособие для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. М., «Энергия», 1968.

496 с. с илл.

Книга предназначена для студентов и аспирантов электротехнических и энергетических вузов и факультетов. Она может быть использована также инженерно-техническими работниками, которые при проектировании и эксплуатации электрических систем (или отдельных их звеньев) связаны с необходимостью расчета и анализа возникающих в системах электромагнитных переходных процессов.

В книге приведено много характерных типовых задач, встречающихся на практике. К большей части этих задач даны их полные решения; к остальным задачам приведены ответы.

Основной целью книги является показ применения различных методов и приемов к исследованию и расчету электромагнитных переходных процессов.

3-3-9
71-07

6П2.1 + 6П2.13

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ	
Электромагнитные переходные процессы при сохранении симметрии системы	
Глава первая. Переходный процесс в цепи, питаемой источником бесконечной мощности	7
Глава вторая. Начальный момент внезапного нарушения режима	48
Глава третья. Установившийся режим короткого замыкания	110
Глава четвертая. Переходный процесс синхронной машины, работающей изолированно	128
Глава пятая. Переходный процесс в системе с несколькими источниками	207
ЧАСТЬ ВТОРАЯ	
Электромагнитные переходные процессы при нарушении симметрии системы	
Глава шестая. Переходный процесс при однократной поперечной несимметрии	257
Глава седьмая. Переходный процесс при однократной продольной несимметрии	388
Глава восьмая. Переходный процесс при сложных видах повреждений	423
Ответы к задачам без решений	467
Приложения:	
П-1. Формулы приведения отдельных величин при составлении схемы замещения	475
П-2. Основные формулы преобразования схем и нахождения токораспределения	477
П-3. Основные соотношения метода симметричных составляющих и выражения для симметричных составляющих токов и напряжений в месте поперечной и продольной несимметрии электрической системы	480
П-4. Вспомогательные графики и кривые для выполнения расчетов	483
Литература	494

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник содержит 218 задач, из которых 146 даны с полными решениями, а ко всем остальным в конце книги приведены ответы.

Весь теоретический материал, который необходим для решения помещенных в сборнике задач, изложен в книге автора «Электромагнитные переходные процессы в электрических системах», выпущенной издательством «Энергия» в 1964 г. Используемые в сборнике обозначения, терминология, отдельные выражения и формулы находятся в полном соответствии с материалом упомянутой книги.

Сборник разбит на две части. В первой из них помещены задачи, где рассматриваются электромагнитные переходные процессы при сохранении симметрии системы. Вторая часть объединяет задачи, в которых рассматриваются те же процессы, но сопровождаемые нарушением симметрии системы.

В свою очередь, первая часть сборника тематически разбита на пять глав, а вторая — на три главы. В начале каждой главы дано краткое введение, в котором отмечаются наиболее важные и принципиальные вопросы и приведены рекомендации, на что должно быть обращено особое внимание. Помещенный в пределах каждой главы материал расположен приблизительно в порядке возрастания трудности.

Автор надеется, что большое количество решенных задач поможет читателю самостоятельно решить предложенные в сборнике другие задачи и тем проверить, насколько им усвоен данный материал.

Следует заметить, что многие задачи, предлагаемые для самостоятельного решения, являются вариантами или развитием предыдущих задач, по которым даны полные решения. Это сделано для того, чтобы читатель мог сопоставить результаты решений, лучше понять влияние изменения условий или параметров и, наконец, частично использовать на некоторых этапах результаты уже выполненных вычислений (сопротивления и э. д. с. элементов схемы, промежуточные стадии преобразования схем и т. п.), что облегчит работу и уменьшит затраты времени.

Используемые в задачах схемы, как правило, достаточно просты. На них в полной мере можно проиллюстрировать все принципиальные вопросы при меньшем объеме вычислительной работы. Что касается сложных схем, то их расчет в современных условиях обычно выполняется с помощью специальных расчетных установок или моделей, знакомство с которыми выходит за рамки данной книги. В процессе решения задач часто приводятся в общем виде используемые выражения и формулы с последующей подстановкой в них числовых значений входящих в них величин. Для справок и нахождения числовых значений различных коэффициентов и расчетных параметров в конце книги помещены приложения, в которых даны таблицы основных формул, графики и номограммы.

Тематика предлагаемых в сборнике задач достаточно разнообразна. Автор стремился по возможности шире отразить вопросы, которые выдвигаются повседневной практикой и с решением которых часто сталкивается инженерно-технический персонал как при проектировании, так и при эксплуатации отдельных электрических установок и целых систем. Поэтому можно надеяться, что,

помимо чисто учебного назначения для студентов и аспирантов электротехнических и энергетических вузов, настоящий сборник задач принесет пользу инженерно-техническим работникам энергетической промышленности.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность коллективу кафедры «Электрические станции, сети и системы» Рижского политехнического института и доктору техн. наук, проф. А. И. Долгинову за рецензирование рукописи и сделанные ими замечания, которые учтены при окончательном редактировании.

Все предложения и замечания по данной книге автор примет с большой признательностью и просит их направлять в адрес издательства «Энергия» (Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10).

Москва, 1967

С. Ульянов

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СОХРАНЕНИИ СИММЕТРИИ СИСТЕМЫ

Глава первая

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЦЕПИ, ПИТАЕМОЙ ИСТОЧНИКОМ БЕСКОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ

Источник бесконечной мощности, как известно, характеризуется тем, что его синусоидальное напряжение сохраняется неизменным по амплитуде и частоте. В цепи с постоянными индуктивностями и активными сопротивлениями, питаемой таким источником, переходный процесс сопровождается возникновением свободных апериодических токов, которые в сумме с принужденными токами дают значения токов рассматриваемого переходного процесса. При этом в силу неизменности потокоцеплений индуктивностей в момент нарушения режима начальное значение тока переходного режима всегда равно предшествовавшему мгновенному значению.

Следует обратить особое внимание на условия, при которых возможно образование максимальных мгновенных значений токов переходного процесса, причем эти условия, очевидно, соблюдаются только в одной фазе трехфазной цепи.

В современных мощных системах допущение неизменности напряжения в каком-либо узле достаточно близко к действительности, когда переходный процесс рассматривается в цепи, имеющей сравнительно большую электрическую удаленность относительно данного узла системы. Поэтому в практических расчетах часто используется такое допущение.

Точность выполняемого расчета, конечно, не зависит от того, в какой системе единиц (относительных или именованных) выражаются величины. При составлении схемы замещения коэффициенты трансформации транс-

форматоров и автотрансформаторов могут быть учтены своими действительными значениями (т. е. точно) или приближенно как отношения средних номинальных напряжений соответствующих ступеней трансформации. Последнее допустимо в тех случаях, когда отсутствуют данные об истинных значениях коэффициентов трансформации или когда весь расчет носит ориентировочный характер. Вообще следует иметь в виду, что правильный учет коэффициентов трансформации особенно необходим при использовании трансформаторов с достаточно широким диапазоном регулирования напряжения.

Практический прием учета нелинейных параметров стальных проводов иллюстрирован в задаче 1-13.

При достаточно большой длине кабеля и относительно малом его сечении заметное влияние оказывает нагрев кабеля током короткого замыкания, что приводит к росту активного сопротивления кабеля и соответствующему снижению тока (тепловой спад тока короткого замыкания). Учет этого фактора рассмотрен в задаче 1-15.

Задача 1-1

По осциллограмме (рис. 1-1) тока и напряжения одной фазы цепи, где произошло трехфазное короткое замыкание, установлено, что амплитуда установившегося тока составляет 13,1 кА, а максимальное мгновенное значение тока 16,9 кА.

Первая амплитуда напряжения в данной фазе наступила через $\frac{1}{8}$ периода; установившийся ток отстает от напряжения на угол

$$\frac{0,00416}{0,01} \cdot 180 = 75^\circ.$$

Требуется определить максимальные мгновенные значения токов в двух других фазах, а также наибольшее действующее значение тока в каждой фазе.

Решение. Из условия следует, что в момент возникновения короткого замыкания вектор напряжения данной фазы составлял с осью времени угол $\alpha = 45^\circ$. Примем условие, что осциллографическая запись относится, например, к фазе С. Тогда векторная диаграмма до наступления момента короткого

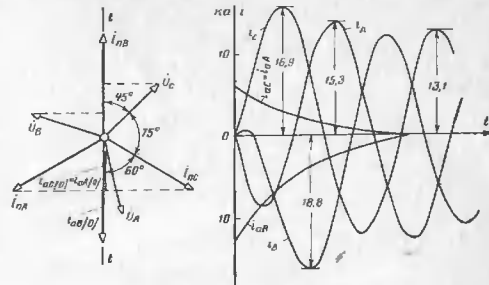


Рис. 1-2. К задаче 1-1. Векторная диаграмма токов и напряжений; кривые изменения фазных токов при коротком замыкании.

иметь вид, как это показано на рис. 1-2, откуда видно, что начальные значения аperiodических слагающих токов фаз С и А одинаковы и равны половине амплитуды периодической слагающей тока. Соответственно в фазе В эта слагающая в 2 раза больше (она равна и противоположна по знаку амплитуде периодической слагающей).

Поскольку сдвиг тока относительно напряжения известен, то по нему легко определить постоянную времени затухания аperiodической слагающей, а именно:

$$\operatorname{tg} 75^\circ = 3,73 = x/r; T_n = \frac{3,73}{314} = 0,012 \text{ сек.}$$

С другой стороны, зная что в максимальном мгновенном значении тока данной фазы аperiodическая слагающая равна $16,9 - 13,1 = 3,8$ кА

и значение этого тока наступает через $\frac{180 - 60}{180} \cdot 0,01 = 0,0067$ сек, то же постоянную времени можно получить из равенства:

$$\frac{13,1}{\sqrt{2}} e^{-0,0067/T_n} = 3,8, \text{ откуда } T_n \approx 0,012 \text{ сек.}$$

В фазе В максимальное мгновенное значение тока наступает практически через 0,01 сек, а в фазе А — через $\frac{180 + 60}{180} \cdot 0,01 = 0,0133$ сек.

Следовательно, искомые мгновенные значения токов будут в фазе В

$$i_{\text{мгн.в}} = 13,1 (1 + e^{-0,01/0,012}) = 18,8 \text{ кА;}$$

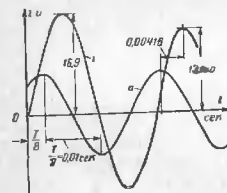


Рис. 1-1. К задаче 1-1. Осциллограмма тока и напряжения.

токов и напряжений в начальный момент короткого

¹ Здесь и далее слово «короткое» употребляется вместо «короткое замыкание».

в фазе А

$$i_{\text{макс}} = 13,1(1 + 0,5e^{-0,133/0,012}) = 15,3 \text{ кА.}$$

Наибольшие действующие значения токов в каждой фазе будут за первый период процесса короткого замыкания и составят:

в фазе В

$$I = \frac{13,1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + 2 \cdot 0,436^2} = 10,9 \text{ кА,}$$

где

$$e^{-0,1/0,012} = e^{-0,83} = 0,436;$$

в фазах А и С

$$I = \frac{13,1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{2}{4} \cdot 0,436^2} = 9,65 \text{ кА.}$$

В фазах А и С, как установлено выше, аperiodическая слагающая в 2 раза меньше, чем в фазе В.

Кривые на рис. 1-2 иллюстрируют полученные результаты.

Задача 1-2

К шинам, напряжение на которых практически поддерживается неизменным и равным 105 кВ, через одинаковые трансформаторы, каждый из которых характеризуется параметрами 6,3 МВА, 115/6,6 кВ, $\alpha_n = 10^\circ$, $R_n = 40,6$ кОм, присоединены две линии. Одна линия выполнена кабелем АСБ-3х95; $x = 0,069$ Ом/км и $r = 0,34$ Ом/км. Другая является воздушной линией с алюминиевым проводом того же сечения, т. е. А-95; ее реактивность $x = 0,3$ Ом/км. Протяженность каждой линии 4 км.

Требуется сравнить условия короткого замыкания на этих линиях в зависимости от положения места повреждения на них. С этой целью при коротком на каждой из указанных линий нужно построить кривые изменения относительного увеличения полного сопротивления цепи короткого замыкания и соответственно уменьшения величины тока короткого (его периодической слагающей), а также изменения угла φ_k , отношения x/r цепи короткого и ударного коэффициента k_y в функции от расстояния до места короткого. Из сопоставления построенных кривых сделать соответствующие выводы.

Решение. На основе заданных параметров найдем в именованных единицах на стороне низшего напряжения трансформатора его сопротивление:

$$x = \frac{10 \cdot 6,6^2}{100 \cdot 6,3} = 0,695 \text{ Ом;}$$

$$r = \frac{40,6 \cdot 10^{-3} \cdot 6,6^2}{6,3 \cdot 6,3} = 0,045 \text{ Ом.}$$

Их отношение $x/r = 0,695/0,045 = 15,4 = \lg \varphi_k$, чему соответствует $\varphi_k = 86,3^\circ$. Поскольку здесь $x \gg r$, то при коротком непосредствен

но трансформатором можно считать $z \approx x$ и тогда модуль периодической слагающей тока будет:

$$I_n = \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0,695} = 5 \text{ кА,}$$

где приведенное напряжение источника равно $105 \cdot \frac{6,6}{115} = 6 \text{ кВ.}$

Известно, что при коротком в цепи с индуктивным и активным сопротивлениями наибольшее мгновенное значение (ударный ток) имеет место при возникновении короткого в момент, когда напряжение источника проходит через нуль (рис. 1-3).

Следовательно, при отсутствии в цепи прешествующего тока начальное значение аperiodической слагающей тока при указанных условиях будет $i_{a1(0)} = \sqrt{2} I_n \sin \varphi_n$, что в данном случае дает

$$i_{a1(0)} = \sqrt{2} \cdot 5 \sin 86,3^\circ = 7,06 \text{ кА.}$$

Дополнительно отметим, что наступление во времени ударного тока, строго говоря, не совпадает с моментом прохождения периодической слагающей тока через амплитуду (того же знака, что и аperiodическая слагающая), а опережает его на интервал

$$\Delta t \approx \frac{1}{\omega \sqrt{2} A}, \text{ сек,}$$

величина которого при $f = 50$ Гц и реальных значениях T_n ничтожно мала (так, при $T_n = 0,1$ сек $\Delta t = 1 \cdot 10^{-4}$ сек) и с нею можно не считаться.

Таким образом, в соответствии с рис. 1-3 и сказанным выше практически можно принимать, что при частоте $f = 50$ Гц ударный ток наступает через $t' = 0,01 \cdot \frac{90^\circ \pm \varphi_k}{180}$, сек. Соответственно ударный коэффициент, определяемый как отношение ударного тока к амплитуде периодической слагающей, будет:

$$k_y = 1 + \sin \varphi_k e^{-t'/T_n}.$$

Для короткого непосредственно за трансформатором имеем:

$$t' = 0,01 \cdot \frac{90 + 86,3}{180} = 0,00975 \text{ сек; } T_n = \frac{15,4}{314} = 0,049 \text{ сек;}$$

$$k_y = 1 + \sin 86,3^\circ e^{-0,00975/0,049} = 1,813.$$

Рассмотрим короткое на кабельной линии на расстоянии l км.

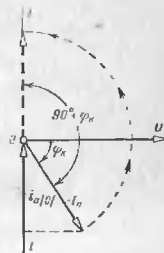


Рис. 1-3. К задаче 1-2. Векторная диаграмма напряжений и токов в начальный момент короткого замыкания.

Спротивление цепи короткого замыкания в этом случае будет:
 $x_{кз} = 0,695 + 0,069 = 0,764 \text{ Ом}; r_{кз} = 0,045 + 0,34 = 0,385 \text{ Ом};$

$$\frac{x_{кз}}{r_{кз}} = \frac{0,764}{0,385} = 1,99 = \operatorname{tg} \varphi_{кз}; \text{ соответственно}$$

$$\varphi_{кз} = 63,5^\circ; \sin \varphi_{кз} = \sin 63,5^\circ = 0,895;$$

$$z_{кз} = \sqrt{0,385^2 + 0,764^2} = 0,858 \text{ Ом}; \text{ отношение } \frac{0,858}{0,695} = 1,23;$$

$$I_{кз} = \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0,858} = 4,04 \text{ кА или в долях тока при } l = 0$$

$$\frac{4,04}{5} = 0,808; \text{ значение времени } t' = \frac{90 + 63,5^\circ}{180} =$$

$$= 0,00855 \text{ сек и ударный коэффициент}$$

$$k_{уз} = 1 + 0,895e^{-0,00855/0,00635} = 1,232,$$

где

$$T_{а} = \frac{1,99}{314} = 0,00635 \text{ сек.}$$

При коротком замыкании на том же расстоянии, но на воздушной линии имеем:

$$x_{кз} = 0,695 + 0,3 = 0,995 \text{ Ом}; r_{кз} = 0,045 + 0,34 = 0,385 \text{ Ом};$$

$$\frac{x_{кз}}{r_{кз}} = \frac{0,995}{0,385} = 2,59 = \operatorname{tg} \varphi_{кз}; \varphi_{кз} = 69^\circ;$$

$$\sin 69^\circ = 0,934; z_{кз} = \sqrt{0,385^2 + 0,995^2} = 1,07;$$

$$\text{отношение } \frac{1,07}{0,695} = 1,54; I_{кз} = \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 1,07} = 3,23 \text{ кА}; \text{ отношение токов}$$

$$\frac{3,23}{5} = 0,646; \text{ постоянная времени } T_{а} = \frac{2,59}{314} = 0,00825 \text{ сек}; \text{ время}$$

$$t' = 0,01 \cdot \frac{90 + 69}{180} = 0,00885 \text{ сек}; \text{ ударный коэффициент}$$

$$k_{уз} = 1 + 0,934e^{-0,00885/0,00825} = 1,324.$$

По результатам аналогичных подсчетов для других расстояний до места короткого на линии построены кривые, которые приведены на рис. 1-4. Правая часть графика относится к воздушной линии, а левая — к кабельной линии.

Как видно, благодаря тому, что воздушная линия обладает значительно большей индуктивностью, чем кабельная, с ростом удаленности короткого замыкания сопротивление цепи короткого при воздушной линии увеличивается быстрее, чем при кабельной. Соответственно этому снижены величины периодической слагающей тока при перемещении короткого по воздушной линии при более интесивно, чем по кабельной. Обратная закономерность имеет место в сравнении зависимостей изменения фазового угла $\varphi_{кз}$, отношения x/r и ударного коэффициента $k_{уз}$ при перемещении короткого по воз-

душной и кабельной линиям. Так, например, при $l=2 \text{ км}$ периодическая слагающая тока при коротком на воздушной линии в 1,34 раза меньше, чем при коротком на кабельной линии, но при этом ударный коэффициент, напротив, больше в 1,1 раза. Таким образом, ударный ток при коротком на кабельной линии в данном случае больше в $\frac{1,34}{1,1} = 1,22$ раза, чем при коротком на воздушной линии.

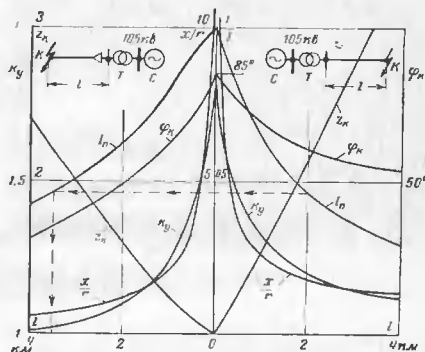


Рис. 1-4. К задаче 1-2. Кривые изменения тока $I_{кз}$, сопротивления $z_{кз}$, угла $\varphi_{кз}$, отношения x/r и ударного коэффициента $k_{уз}$ в зависимости от удаленности короткого замыкания на линии (воздушной — справа, кабельной — слева).

При сравняемых условиях токоограничивающее действие воздушной линии проявляется интенсивнее, чем кабельной, главным образом из-за быстрого нарастания сопротивления цепи короткого. По кривым на рис. 1-4 видно, что одинаковые величины периодической слагающей тока будут, если короткое на воздушной линии произойдет, например, при $l=2 \text{ км}$, а на кабельной линии — при $l = -3,5 \text{ км}$ (см. пункт 1). Правда, при этом вместо $k_{уз}=1,02$, который имеет место при коротком на воздушной линии, этот коэффициент падает до $k_{уз}=1,02$ при коротком на кабельной линии. Следовательно, в данном случае при равенстве периодической слагающей тока ударный ток при коротком в рассматриваемой точке кабельной линии будет в $\frac{1,2}{1,02} = 1,18$ меньше ударного тока при коротком в соответствующей точке воздушной линии.

Задача 1-3

На подстанции установлено два трансформатора, параметры которых следующие:

трансформатор Т-1 90 Мва, 220/11 кВ, $u_n=12\%$, $P_n=400$ кет;

трансформатор Т-2 180 Мва, 220/11 кВ, $u_n=12\%$, $P_n=760$ кет.

Питание подстанции осуществляется от системы С, эквивалентное сопротивление которой до места присоединения подстанции составляет $z=0,4+j8$ Ом. За этим сопротивлением напряжение поддерживается практически неизменным и равным 220 кВ.

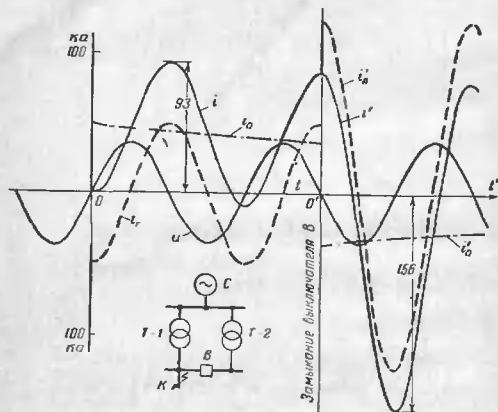


Рис. 1-5. К задаче 1-3. Схема подстанции и кривые изменения тока короткого замыкания.

На стороне нашего напряжения подстанции шины разделены выключателем В на две секции (см. схему на рис. 1-5).

Рассмотреть процесс трехфазного короткого замыкания в точке К при условии, когда:

- выключатель В предварительно был разомкнут и через 1,5 периода после возникновения короткого происходит его замыкание;
- выключатель В предварительно был замкнут и через 1,5 периода после возникновения короткого произошло его размыкание.

(Считать, что короткое замыкание происходит в момент, когда напряжение одной из фаз проходит через нуль.)

Решение. Выразим сопротивления всех элементов в процентах при базисных условиях, за которые примем номинальную мощность

и напряжения трансформатора Т-2, т. е. $S_b=180$ Мва, $U_{б1}=220$ кВ и $U_{б11}=11$ кВ.

Сопротивления системы

$$x = 8 \cdot \frac{180}{220^2} \cdot 100 = 3\%; \quad r = 0,15\%.$$

Сопротивления трансформатора Т-1:

$$x = 12 \cdot \frac{180}{90} = 24\%; \quad r = \frac{0,4}{90} \cdot \frac{180}{90} \cdot 100 = 0,89\%$$

и трансформатора Т-2:

$$r = \frac{0,76}{180} \cdot 100 = 0,42\%.$$

а) При разомкнутом выключателе В с последующим его замыканием

До замыкания выключателя В сопротивление цепи короткого замыкания составляет $x=3+24=27\%$ и $r=0,15+0,89=1,04\%$.

Постоянная времени затухания аperiodической слагающей тока короткого

$$T_a = \frac{27}{314 \cdot 1,64} = 0,083 \text{ сек.}$$

Поскольку активное сопротивление очень мало по сравнению с индуктивным, модуль периодической слагающей тока короткого можно определять как

$$I_a = \frac{100}{27} = 3,7,$$

где относительная базисная в. д. с. $E = \frac{220}{220} \cdot 100 = 100\%$.

В фазе, где напряжение в момент короткого проходит через нуль, периодическая слагающая практически равна своей амплитуде, и коль скоро предшествующий ток в цепи отсутствовал, аperiodическая слагающая в начальный момент равна амплитуде периодической слагающей с обратным знаком.

Максимальное мгновенное значение тока в данной фазе наступит практически через 0,5 периода, т. е. 0,01 сек, и в данных условиях составляет

$$I_{\text{макс}} = 3,7(1 + e^{-0,01/0,083}) = 3,7 \cdot 1,885 = 7$$

и в относительных единицах

$$I_{\text{макс}} = 7\sqrt{2} \cdot 9,42 = 93 \text{ кА},$$

где базисный ток на стороне нашего напряжения

$$I_b = \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 11} = 9,42 \text{ кА}.$$

Через 1,6 периода, т. е. 0,03 сек, периодическая слагающая снова проходит через свой максимум, имея тот же знак, что и аperiodическая. Поэтому мгновенное значение тока в рассматриваемой фазе в этот момент будет:

$$i = 3,7(1 + e^{-0,03/0,083}) = 3,7 \cdot 1,69 = 6,25.$$

После замыкания выключателя *B* сопротивление схемы до места короткого уменьшится и будет:

$$x = 3 + (24/12) = 11\% \text{ и } r = 0,15 + (0,89/0,42) = 0,44\%.$$

Пренебрегая активным сопротивлением цепи, найдем новое значение периодической слагающей¹

$$I_{\text{н}} = \frac{100}{11} = 9,1.$$

Начальное значение аperiodической слагающей, очевидно, будет:

$$i_{\text{а}}|_{t=0} = 6,25 - 9,1 = -2,85,$$

и ее постоянная времени затухания $T_{\text{а}} = \frac{11}{314 \cdot 0,44} = 0,08 \text{ сек.}$

Максимальное мгновенное значение тока в этой фазе наступит через 0,5 периода и составит:

$$i_{\text{макс}} = 9,1 + 2,85e^{-0,01/0,08} = 9,1 + 2,5 = 11,6$$

или в именованных единицах:

$$i_{\text{макс}} = 11,6 \sqrt{2} \cdot 9,42 = 156 \text{ ка.}$$

Для большей наглядности на рис. 1-5 показаны кривые изменения тока и ее слагающих за первые 2,5 периода.

б) При замыкании выключателя *B* с последующим его размыканием

Для решения задачи при этих условиях используем ряд величин, полученных ранее.

До размыкания выключателя *B* максимальное мгновенное значение тока (ударный ток), очевидно, будет:

$$i_{\text{макс}} = 9,1(1 + e^{-0,01/0,08}) = 17,2$$

или

$$i_{\text{макс}} = 17,2 \sqrt{2} \cdot 9,42 = 230 \text{ ка.}$$

К моменту размыкания выключателя *B* мгновенное значение тока будет:

$$i = 9,1(1 + e^{-0,03/0,08}) = 15,5.$$

¹ Все величины после замыкания выключателя *B* отмечены дополнительными индексами — штрихом (сверху).

и новое начальное значение аperiodической слагающей составит:

$$i_{\text{а}}|_{t=0} = 15,5 - 3,7 = 11,8,$$

так как после размыкания выключателя *B* периодическая слагающая тока $I'_{\text{н}} = 3,7$.

Поскольку знаки начальных значений тока $I'_{\text{н}}$ и $i_{\text{а}}|_{t=0}$ одинаковы, то следующий пик тока в данной фазе наступит через целый период (0,02 сек) и его величина будет:

$$i = 3,7 + 11,8e^{-0,02/0,083} = 3,7 + 9,2 = 12,9$$

или

$$i = 12,9 \sqrt{2} \cdot 9,42 = 172 \text{ ка.}$$

Таким образом, следует заметить, что после размыкания выключателя *B* максимальное мгновенное значение тока в цепи трансформатора *T-1* оказывается почти в 2 раза больше ударного тока, который получается в той же цепи, если выключатель *B* разомкнут.

По полученным данным трудно построить кривую изменения тока во времени (подобно рис. 1-5). Рекомендуется это сделать читателю.

Задача 1-4

Используя решение предыдущей задачи, найти наибольшее мгновенные значения токов в двух других фазах цепи короткого замыкания. Значения токов выразить в именованных единицах.

Задача 1-5

Известно, что при трехфазном коротком замыкании в некотором узле сети 115 кв электрической системы начальная мощность короткого замыкания составляет 2 000 *Мва*. К этому узлу предполагается присоединить понижающую подстанцию.

Требуется определить, какова может быть наибольшая номинальная мощность понижающего трансформатора этой подстанции ($\mu_{\text{н}} = 10,5\%$), чтобы при трехфазном коротком замыкании за ним начальная мощность короткого замыкания не превышала 350 *Мва*.

Решение. Примем $S_{\text{г}} = 1\ 000\ 000$. Тогда базисная реактивность системы будет $x_{\text{г}} = 1\ 000/2\ 000 = 0,5$. Если $x_{\text{т}}$ — базисная реактивность искомого трансформатора, то из поставленного условия, которое может быть записано как

$$350 = \frac{1\ 000}{0,5 + x_{\text{т}}}, \text{ находим } x_{\text{т}} = 2,36.$$

Следовательно, искомая номинальная мощность трансформатора будет:

$$S_{\text{н}} = \frac{10,5\ 1\ 000}{100 \cdot 2,36} = 44,5 \text{ Мва,}$$

т. е. может быть установлен ближайший меньший по мощности стандартный трансформатор 40 *Мва*.

Задача 1-6

Автотрансформатор АТ, имеющий параметры 120 Мва, 330/115/10,5 кВ, $u_{BC} = 10\%$, $u_{ВД} = 23,4\%$, $u_{CD} = 12\%$, связывает две системы С-1 и С-2 (рис. 1-6а). При этом известно, что в начальный момент трехфазного короткого замыкания в точке К-1

К-1 мощность короткого замыкания $S_{к1} = 6800$ Мва.

К-2 мощность короткого замыкания $S_{к2} = 3900$ Мва.

Определить мощность короткого замыкания при трехфазном коротком в точке К-3 заданной схемы.

Решение. Реактивности схемы замещения автотрансформатора будут

$$x_B = 0,5(10 + 23,4 - 12) = 10,7\%;$$

$$x_C = 10 - 10,7 = -0,7\%;$$

$$x_H = 23,4 - 10,7 = 12,7\%.$$

По заданным величинам мощностей короткого замыкания находим результирующие реактивности относительно точек:

$$K-1 \quad x_{\Sigma} = \frac{120}{6800} \cdot 100 = 1,77\%;$$

$$K-2 \quad x_{\Sigma} = \frac{120}{3900} \cdot 100 = 3,08\%.$$

Для определения неизвестных реактивностей обеих систем исходной замещения на рис. 1-6б два

рис. 1-6. К задаче 1-6.
а — исходная схема; б — схема замещения.

получаем в соответствии со схемой замещения на рис. 1-6б два

$$\frac{x_{C-1}(10 + x_{C-2})}{x_{C-1} + x_{C-2} + 10} = 1,77 \quad \text{и} \quad \frac{x_{C-2}(10 + x_{C-1})}{x_{C-1} + x_{C-2} + 10} = 3,08,$$

из которых после исключения x_{C-2} и алгебраических преобразований имеем:

$$x_{C-1}^2 + 5,7x_{C-1} - 15,7 = 0,$$

откуда

$$x_{C-1} = \frac{-5,7 \pm \sqrt{5,7^2 + 4 \cdot 15,7}}{2} = \frac{-5,7 \pm 9,76}{2},$$

т. е. $x_{C-1} = 2,03\%$ (так как отрицательный корень отпадает).

18

После подстановки этого значения x_{C-1} в одно из исходных уравнений получим $x_{C-2} = 4,15\%$.

Таким образом, результирующая реактивность схемы замещения на рис. 1-6, б относительно точки К-3 будет:

$$x_{\Sigma} = [(2,03 + 10,7) \parallel (4,15 - 0,7)] + 12,7 = 15,4\%.$$

и искомая мощность короткого замыкания

$$S_{к3} = \frac{100}{15,4} \cdot 120 = 780 \text{ Мва}.$$

Задача 1-7

Трансформатор с расщепленной на две ветви обмоткой низшего напряжения имеет следующие параметры:

25 Мва, 20/6,3/6,3 кВ, $u_{ВН1} = u_{ВН2} = 9,5\%$ и $u_{НН2} = 18\%$.

Обмотка высшего напряжения трансформатора имеет регулирование в пределах $\pm 8 \times 1,5\%$. Через реактивность $x = 0,42$ ом трансформатор подключен к источнику, напряжение которого 20 кВ поддерживается неизменным.

Произошло трехфазное короткое замыкание на выводах одной из обмоток низшего напряжения трансформатора. Требуется построить кривые изменения токов в обмотках трансформатора и остаточных напряжений за трансформатором и на выводах неповрежденной обмотки низшего напряжения в зависимости от положения переключателя регулируемой обмотки. При этом все величины выразить в относительных единицах от их значений при нулевом (среднем) положении переключателя.

Решение. Составим схему замещения (рис. 1-7), приведя реактивности трансформатора к стороне высшего напряжения. По заданному величинам находим напряжения короткого за-

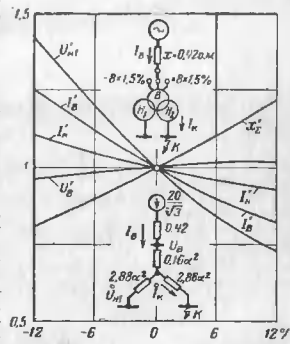


рис. 1-7. К задаче 1-7. Исходная схема и схема замещения; кривые изменения реактивности, токов и напряжений в зависимости от положения переключателя регулируемой обмотки трансформатора.

* Напряжения короткого замыкания отнесены к мощности расщепленной обмотки, т. е. в данном случае к 12,5 Мва.

мыкания отдельных обмоток трансформатора:

$$u_B = 0,5(9,5 + 9,5 - 18) = 0,5\%; \quad u_{H1} = u_{H2} = 8,5 - 0,5 = 9\%.$$

Напряжение регулируемой обмотки можно записать как

$$U_B = \alpha \cdot 20 \text{ кв.}$$

где в соответствии с заданием α изменяется от $(1 - 8 \cdot 0,015) = 0,88$ до $(1 + 8 \cdot 0,015) = 1,12$. Тогда реактивности лучей схемы замещения трансформатора будут:

$$x_B = \frac{0,5}{100} \cdot \frac{20^2}{125} \alpha^2 = 0,16\alpha^2 \text{ Ом}; \quad x_{H1} = x_{H2} = 2,88\alpha^2 \text{ Ом}.$$

Суммарная реактивность до места короткого замыкания:

$$x_{\Sigma} = 0,42 + (0,16 + 2,88)\alpha^2 = 0,42 + 3,04\alpha^2 \text{ Ом}.$$

в относительных единицах от x_{Σ} при $\alpha = 1$

$$x'_{\Sigma} = \frac{0,42 + 3,04\alpha^2}{0,42 + 3,04} = 0,12 + 0,88\alpha^2.$$

В аналогичных относительных единицах, очевидно, будем иметь: для тока на стороне высшего напряжения

$$I'_B = \frac{1}{0,12 + 0,88\alpha^2};$$

для тока в месте короткого (на стороне обмотки низшего напряжения)

$$I'_H = \frac{\alpha}{0,12 + 0,88\alpha^2};$$

для остаточного напряжения за трансформатором (на стороне высшего напряжения)

$$U'_B = \frac{\alpha^2}{0,12 + 0,88\alpha^2};$$

для остаточного напряжения на выводах неповрежденной обмотки низшего напряжения

$$U'_{H1} = \frac{1}{\alpha(0,12 + 0,88\alpha^2)}.$$

Все эти закономерности представлены соответствующими кривыми на рис. 1-7. Как видно, особенно сильно регулирование сказывается на величине остаточного напряжения неповрежденной обмотки низшего напряжения. Также существенно изменяется величина тока обмотки высшего напряжения, в то время как остаточное

напряжение за трансформатором меняется в очень узких пределах.

При рассматриваемом диапазоне регулирования напряжения изменение тока в месте короткого находится в пределах $\pm 10\%$. Из структуры выражения для I'_H следует, что эта величина имеет экстремум, который наступает при значении α , определяемом из уравнения

$$\frac{dI'_H}{d\alpha} = \frac{0,12 + 0,88\alpha^2 - 2 \cdot 0,88\alpha^2}{(0,12 + 0,88\alpha^2)^2} = 0,$$

откуда $\alpha = 0,37$, при этом достигается максимум $I'_H = 1,54$. Коль скоро такое значение α выходит за пределы практического диапазона регулирования напряжения у трансформаторов, то, очевидно, полученное для рассматриваемой схемы максимальное значение I'_H является лишь теоретическим пределом.

Задача 1-8

Относительно узла M сети 220 кв эквивалентная реактивность системы составляет 9,7 Ом. За этой реактивностью напряжение 220 кв практически можно считать неизменным. При трехфазном коротком замыкании в узле M ударный коэффициент $k_{\Sigma} \approx 1,8$.

К узлу M присоединен понижающий трансформатор 125 Мва, 220/110 кв, $u_k = 12\%$, $P_H = 620$ квт.

При трехфазном коротком замыкании за указанным трансформатором требуется определить наибольшее действующее значение тока короткого замыкания, действующее значение тока через 0,04 сек и время, при котором участие апериодической составляющей тока в действующем значении полного тока снижается менее 5%.

Решение. Выразим сопротивление системы в относительных единицах при номинальных условиях трансформатора. Ее реактивность будет:

$$x_c = 9,7 \cdot \frac{125}{220^2} = 0,225.$$

По заданной величине k_{Σ} имеем:

$$(1,8 - 1) = e^{-0,04/T_a}, \text{ откуда } T_a = 0,0455 \text{ сек.}$$

Следовательно, $x_c / r_c = 0,0455 \cdot 314 = 14,3$ и активное сопротивление системы $r_c = 0,025 / 14,3 = 1,75 \cdot 10^{-3}$.

Активное сопротивление трансформатора в относительных единицах

$$r = \frac{0,62}{125} = 4,96 \cdot 10^{-3}.$$

Суммарные сопротивления до короткого за трансформатором будут:

$$x_{\Sigma} = 0,225 + 0,12 = 0,145; \quad r_{\Sigma} = (1,75 + 4,96) 10^{-3} = 6,7 \cdot 10^{-3}.$$

Постоянная времени затухания аperiodической слагающей при этом будет:

$$T_a = \frac{0,145 \cdot 10^3}{314 \cdot 6,7} = 0,069 \text{ сек.}$$

Действующее значение периодической слагающей тока короткого замыкания $I_B = \frac{1}{0,145} \cdot \frac{125}{\sqrt{3} \cdot 11} = 45,2 \text{ кА.}$

Значение аperiodической слагающей в момент времени

$$i = 0,01 \text{ сек } i_a = \sqrt{2} \cdot 45,2 e^{-0,01/0,069} = 55,5 \text{ кА;}$$

$$i = 0,04 \text{ сек } i_a = \sqrt{2} \cdot 45,2 e^{-0,04/0,069} = 35,9 \text{ кА.}$$

Искомые действующие значения полного тока короткого замыкания для

$$i = 0,01 \text{ сек } I_{\Sigma} = \sqrt{45,2^2 + 55,5^2} = 71,7 \text{ кА,}$$

$$i = 0,04 \text{ сек } I = \sqrt{45,2^2 + 35,9^2} = 57,8 \text{ кА.}$$

Приняв действительное значение периодической слагающей тока за единицу, поставившие условия для нахождения искомого времени можно записать следующим образом:

$$\sqrt{1 + 2e^{-2t/0,069}} \leq 1,05,$$

откуда

$$t \geq \frac{0,069}{2} \ln \frac{2}{1,05^2 - 1} = 0,104 \text{ сек.}$$

Задача 1-9

Понижающий трансформатор T 63 Мва, 150/38,5/11 кВ, $u_{\text{ВП}} = 12,4\%$, $u_{\text{ВН}} = 17,6\%$, $u_{\text{СН}} = 5,2\%$, $P_{\Sigma \Sigma \Sigma} = 380 \text{ кат.}$, $P_{\text{КЗН}} = 460 \text{ кат.}$, $P_{\text{КЗС}} = 300 \text{ кат.}$ присоединен к узлу системы С, где на-

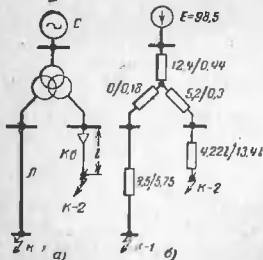


Рис. 1-8. К задаче 1-9.
а — исходная схема; б — схема замещения.

пряжение поддерживается практически неизменным и равным 148 кВ (линейное).

К среднему напряжению трансформатора присоединена воздушная линия, выполненная проводом АС-120 и имеющая $x = 0,4 \text{ ом/км}$ и $r = 0,27 \text{ ом/км}$. На стороне низкого напряжения трансформатора присоединена кабель АСБ-3 $\times 120$, у которого $x = 0,081 \text{ ом/км}$; $r = 0,258 \text{ ом/км}$. Схема установки дана на рис. 1-8 а.

На расстоянии 5 км от трансформатора на воздушной линии произошло трехфазное короткое замыкание (точка К-1). Требуется определить величину ударного тока при этом коротком замыкании. Кро-

ме того, найти, при какой длине кабеля постоянная времени затухания аperiodической слагающей T_a при коротком замыкании в точке К-2 будет такой же, что и при коротком в точке К-1.

Решение. Составим схему замещения (рис. 1-8 б), в которой все величины выразим в процентах при номинальных данных трансформатора.

Индуктивные и активные сопротивления обмоток трансформатора:

$$x_B = 0,5(12,4 + 17,6 - 5,2) = 12,4\%;$$

$$x_C = 12,4 - 12,4 = 0; \quad x_H = 17,6 - 12,4 = 5,2\%;$$

$$r_B = 0,5 \frac{(380 + 460 - 300)}{1000} \cdot \frac{100}{63} = 0,44\%;$$

аналогично

$$r_C = 0,18\%; \quad r_H = 0,3\%.$$

Для линии

$$x_L = 0,4 \cdot 5 \cdot \frac{63}{38,5^2} \cdot 100 = 8,5\% \quad \text{и} \quad r_L = 8,5 \cdot \frac{0,27}{0,4} = 5,75\%$$

Для кабеля

$$x = 0,081 \cdot \frac{63}{11^2} \cdot 100 = 4,22\%/\text{км} \quad \text{и} \quad r = 13,4\%/\text{км.}$$

При коротком в точке К-1 суммарные сопротивления равны:

$x_{\Sigma} = 12,4 + 8,5 = 20,9\%$, $r_{\Sigma} = 0,44 + 0,18 + 5,75 = 6,37\%$; их отношение

$$x/r = 20,9/6,37 = 3,28 \quad \text{и} \quad \alpha_x = 6,37 + j20,9 = 21,9\% \angle 73^\circ.$$

Модуль периодической слагающей тока короткого замыкания $I_B = \frac{98,5}{21,9} = 4,5$, где относительная э. д. с. $E = \frac{148}{150} \cdot 100 = 98,5\%$.

Постоянная времени затухания аperiodической слагающей

$$T_a = \frac{3,28}{314} = 0,0104 \text{ сек.}$$

Наибольшая относительная начальная величина аperiodической слагающей, при которой имеет место максимальное мгновенное значение тока короткого замыкания, будет при прохождении напряжения данной фазы через нуль, т. е. эта величина слагающей тока составляет в относительных единицах

$$i_{\text{н}} = 4,5 \sin 73^\circ = 4,5 \cdot 0,96 = 4,32.$$

Максимальное мгновенное значение тока наступит практически через $\frac{90 + 73}{180} \cdot 0,01 = 0,009 \text{ сек.}$, и величина его будет

$$i_y = \sqrt{2} \cdot \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 38,5} (4,5 + 4,32 e^{-0,009/0,0104}) = 8,4 \text{ кА.}$$

Задача 1-11

Определить, во сколько раз изменятся токи, найденные в решении задачи 1-10, если бы трансформатор Т-2 имел соединение обмоток не $\Delta/\Delta-12$, а $\Delta/\Delta-2$.

Задача 1-12

Понижающий трансформатор Т 40,5 Мва, 110/6,6 кВ, $u_n=10,5\%$, $P_n=222$ кВт присоединен к узлу системы С, где рабочее линейное напряжение 107 кВ поддерживается практически постоянным. От шин понижающего напряжения трансформатора отходит воздушная линия, выполненная проводом АС-120 с параметрами $x=0,33$ Ом/км и $r=0,27$ Ом/км, и кабельная линия А-3х120, у которой $x=0,081$ Ом/км и $r=0,258$ Ом/км. Протяженность каждой линии одинакова и равна 2 км. Схема установки приведена на рис. 1-11.

Рис. 1-11. Исходная схема к задаче 1-12.

Требуется определить, какой реактивности должен быть выбран реактор Р на 6 кВ и 400 А, включаемый в цепь кабельной линии, чтобы при трехфазных коротких замыканиях в конце каждой линии (точки К-1 и К-2) периодические слагающие токов были одинаковы. Определить также величину остаточного напряжения на шинах, выразив его в процентах от 6,3 кВ.

Задача 1-13

На рис. 1-12 показана схема понижающей подстанции с участком распределительных сетей 35, 6 и 3 кВ. Подстанция присоединена к узлу системы, которая может рассматриваться как источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 116 кВ, приложенным за реактивностью $x=8,8$ Ом.

Остальные элементы схемы характеризуются следующими данными:

трансформатор Т-1 31,5 Мва, 115/38,5/6,6 кВ, $u_{BC}=10,7\%$, $u_{BH}=17,7\%$, $u_{CZ}=6,2\%$, отношение $x/r=17$;

трансформатор Т-2 5,6 Мва, 35/3,3 кВ, $u_n=7,5\%$, $P_n=57$ кВт; линия: Л-1 15 км, провод АС-70, $x=0,4$ Ом/км, $r=0,45$ Ом/км;

Л-2 7 км, провод ПС-50; Л-3 2,5 км, провод ПС-35;

Л-4 2,5 км, провод ПС-35; Л-5 1,5 км, провод ПС-25.

Для линий с проводами марки ПС рекомендуются параметры: при токах от 20 до 200 А

для ПС-50 $z=3,75+j1,36$ Ом/км;

для ПС-35 $z=5,0+j1,80$ Ом/км;

для ПС-25 $z=6,1+j2,21$ Ом/км;

¹ При решении задачи пренебречь активным сопротивлением реактора.

при токах свыше 200 А

$$z = \frac{150}{q} + j0,5 \text{ Ом/км,}$$

где q — сечение провода, мм².

Требуется определить начальное значение периодической слагающей тока и ударный ток при трехфазном коротком замыкании поочередно в точках К-1—К-8.

Решение. Реактивность и напряжение системы С, приведенные к стороне среднего напряжения трансформатора, будут:

$$\dot{U}_C = 116 \cdot \frac{138,5}{115} = 38,5 \text{ кВ;}$$

$$x = 8,8 \left(\frac{38,5}{115} \right)^2 = 1 \text{ Ом.}$$

Находить реактивности лучшей схемы замещения трехмоточного трансформатора в данном случае не нужно, так как при коротком в любой из заданных точек ток протекать только по двум обмоткам этого трансформатора.

Реактивность обмоток высшего и среднего напряжений, отнесенная к стороне последнего, составляет:

$$x = \frac{10,7}{100} \cdot \frac{38,5^2}{31,5} = 5,04 \text{ Ом;}$$

и активное сопротивление $r = \frac{5,04}{17} = 0,3$ Ом.

При коротком в точке К-1 периодическая слагающая тока будет (если пренебречь малой величиной активного сопротивления)

$$I_n = \frac{38500}{\sqrt{3(1+5,04)}} = 3680 \text{ А.}$$

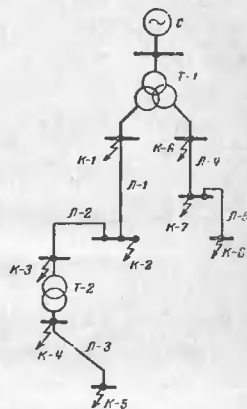


Рис. 1-12. Исходная схема к задаче 1-13.

Если не считаться с активным сопротивлением системы, то отношение

$$x/r = 6,04/0,3 = 20,1 = \operatorname{tg} \varphi_n, \text{ т. е. } \varphi_n = 87^\circ$$

и постоянная времени $T_n = 20,1/314 = 0,064 \text{ сек.}$

Ударный коэффициент будет:

$$k_y = 1 + \sin \varphi_n e^{-\frac{\varphi_n + 90}{180} - 0,01/T_n} = 1 + 0,999 e^{-0,01/0,064} = 1,86;$$

ударный ток

$$I_y = \sqrt{2} \cdot 1,86 \cdot 3680 = 9700 \text{ а.}$$

При коротком в точке $K-2$ $x_2 = 6,04 + 0,4 \cdot 15 = 12,04 \text{ ом; } r_2 = 0,3 + 0,45 \cdot 15 = 7,05 \text{ ом;}$ отношение $x_2/r_2 = 12,04/7,05 = 1,71 = \operatorname{tg} \varphi_2$; соответственно $\varphi_2 = 59,5^\circ$ и $\sin 59,5^\circ = 0,862$; $T_n = \frac{1,71}{314} = 0,0054 \text{ сек.}$

Ударный коэффициент при этом будет:

$$k_y = 1 + 0,862 e^{-\frac{59,5+90}{180} - 0,01/0,0054} = 1,19.$$

Напомним, что в цепи с индуктивностью и активным сопротивлением максимум мгновенного значения тока (ударный ток) имеет место при условии, если в момент возникновения короткого замыкания напряжение источника проходит через нуль. При этом начальное значение аperiodической слагающей

$$i_{a(0)} = \sqrt{2} I_n \sin \varphi_n.$$

в суммировании аperiodической слагающей с амплитудой периодической слагающей наступает при

$$t' = \frac{\varphi_n + 90}{180} \cdot 0,01 \text{ сек.}$$

Поскольку активное сопротивление цепи уже достаточно велико, значение периодической слагающей тока находим по полному сопротивлению цепи

$$I_n = \frac{38500}{\sqrt{3} \sqrt{12,04^2 + 7,05^2}} = 1580 \text{ а}$$

и ударный ток

$$I_y = \sqrt{2} \cdot 1,19 \cdot 1580 = 2670 \text{ а,}$$

При коротком в точке $K-3$ допустим, что ток короткого превышает 200 а. Тогда суммарные сопротивления цепи будут:

$$r_3 = 7,05 + \frac{1150}{50} \cdot 7 = 28,05 \text{ ом;}$$

$$x_3 = 12,04 + 0,5 \cdot 7 = 15,54 \text{ ом;}$$

отношение

$$x_3/r_3 = 15,54/28,05 = 0,555 = \operatorname{tg} \varphi_3, \varphi_3 = 29^\circ, \\ \sin 29^\circ = 0,485; T_n = 0,555/314 = 0,176 \cdot 10^{-3} \text{ сек;}$$

$$t' = \frac{29 + 90}{180} \cdot 0,01 = 0,0066 \text{ сек.}$$

Ударный коэффициент

$$k_y = 1 + 0,485 e^{-0,0066/0,176 \cdot 10^{-3}} = 1,01.$$

Значение периодической слагающей тока

$$I_n = \frac{38500}{\sqrt{3} \sqrt{15,54^2 + 28,05^2}} = 690 \text{ а,}$$

следовательно принятое допущение справедливо.

Ударный ток

$$I_y = \sqrt{2} \cdot 1,01 \cdot 690 = 990 \text{ а.}$$

Аналогичный подсчет при коротком в точке $K-4$ дает:

$$I_n = 5350 \text{ а;}$$

$$I_y = \sqrt{2} \cdot 1,074 \cdot 5350 = 8150 \text{ а,}$$

где, как видно, $k_y = 1,074$ больше, чем при коротком в точке $K-3$; последнее обусловлено тем, что увеличение удаленности короткого произошло главным образом за счет индуктивности трансформатора $T-2$.

Напряжение источника, приведенное к стороне низшего напряжения трансформатора $T-2$,

$$\hat{U}_C = 38,5 \left(\frac{3,3}{35} \right) = 3,63 \text{ кв.}$$

Составляющие полного сопротивления цепи до линии $Л-3$ будут $r = 0,32 \text{ ом}$ и $x = 0,34 \text{ ом}$. Полагая, что при коротком в точке $K-5$ ток будет меньше 200 а, для сопротивлений цепи короткого имеем:

$$r_2 = 0,32 + 5 \cdot 2,5 = 11,82 \text{ ом;}$$

$$x_2 = 0,34 + 1,8 \cdot 2,5 = 4,84 \text{ ом.}$$

Отношение $x_2/r_2 = 4,84/12,82 = 0,375 = \text{tg } \varphi_2$; $\varphi_2 = 20,5^\circ$. При этих условиях $k_2 \approx 1,002 \approx 1$.

Периодическая слагающая тока короткого

$$I_{\text{н}} = \frac{3630}{\sqrt{3} \sqrt{12,82^2 + 4,84^2}} = 150 \text{ а}$$

$$I_{\text{ф}} = \sqrt{2} \cdot 150 = 212 \text{ а.}$$

Подсчеты для случаев коротких замыканий в точках К-6, К-7 и К-8 рекомендуется выполнять читателю. Для проверки правильности подсчетов приведем конечные результаты:

при коротком в К-6

$$I_{\text{н}} = 13850 \text{ а; } I_{\text{ф}} = 35800 \text{ а;}$$

при коротком в К-7

$$I_{\text{н}} = 350 \text{ а, } I_{\text{ф}} = 495 \text{ а;}$$

при коротком в К-8

$$I_{\text{н}} = 165 \text{ а, } I_{\text{ф}} = 235 \text{ а.}$$

Задача 1-14

К трансформатору 31,5 Мва, 121/10,5 кВ, $u_{\text{н}} = 10,5\%$, $P_{\text{к}} = 200 \text{ кВт}$ на стороне высшего напряжения присоединена воздушная линия протяженностью 100 км. Трансформатор питается от источника бесконечной мощности, напряжение которого составляет 10,5 кВ.

Для случая трехфазного короткого замыкания в кошке воздушной линии требуется определить величину ударного тока, имея в виду, что линия выполнена проводом марки:

- АС-95 ($r = 0,33 \text{ ом/км}$);
- АС-150 ($r = 0,21 \text{ ом/км}$);
- АС-240 ($r = 0,13 \text{ ом/км}$).

Индуктивное сопротивление линии при указанных марках проводов практически считать одинаковым и равным $x = 0,4 \text{ ом/км}$.

Задача 1-15

Понижающий трансформатор 25 Мва, 110/6,6 кВ, $u_{\text{н}} = 10,5\%$ присоединен к системе С (рис. 1-13), напряжение которой практи-

чески неизменно и составляет 110 кВ. От шин пониженного напряжения трансформатора отходят к распределительным пунктам кабельные линии. Распределительные пункты расположены на расстоянии 0,5—1 км от данного трансформатора. Для питания каждого из них в нормальной рабочей режиме достаточно проложить кабель А-3×50 с изоляцией на 6 кВ, у которого $x = 0,083 \text{ ом/км}$ и $r = 0,62 \text{ ом/км}$ при температуре $\theta = 20^\circ \text{С}$.

Требуется определить наибольшее допустимое время отключения выключателем В распределительного пункта возникающего за этим выключателем короткого замыкания (точка К), чтобы указанный питающий кабель был термически устойчив, т. е. его температура при таких условиях не превышала бы 200°С . Определить также величину тока короткого замыкания и ударный момент времени.

Решение провести с учетом теплового спада тока короткого замыкания, используя для этой цели диаграмму на рис. П-5 (приложение П-4), и показать количественное влияние такого учета.

Решение. Напряжение системы, приведенное к стороне низшего напряжения трансформатора, будет:

$$\hat{U} = 110 \frac{6,6}{110} = 6,6 \text{ кВ.}$$

Реактивность трансформатора

$$x = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{6,6^2}{25} = 0,183 \text{ ом.}$$

Активное сопротивление кабеля при его нормальной рабочей температуре $\theta = 65^\circ \text{С}$ и температурном коэффициенте алюминия $\alpha = 0,004$ составит

$$r = 0,62 \frac{1 + 0,004 \cdot 65}{1 + 0,004 \cdot 20} = 0,726 \text{ ом/км.}$$

При протяженности кабеля $l = 0,5 \text{ км}$ сопротивление в начальный момент короткого будут:

$$x = 0,183 \frac{0,083}{2} = 0,225 \text{ ом; } r = \frac{0,726}{2} = 0,363 \text{ ом;}$$

$$z = \sqrt{0,363^2 + 0,225^2} = 0,428 \text{ ом.}$$

Начальное значение периодической слагающей тока короткого

$$I_{\text{н}} = \frac{6600}{\sqrt{3} \cdot 0,428} = 8900 \text{ а.}$$



Рис. 1-13. Исходная схема к задаче 1-15.

По диаграмме на рис. П-5 для

$$a = \left(\frac{r}{z}\right)^2 = \left(\frac{0,363}{0,428}\right)^2 = 0,73$$

и $\theta = 200^\circ\text{C}$ находим $\Delta = 1,02 \cdot 10^4$ и $n_{\theta} = 0,77$.

Искомое время определяем из равенства

$$\left(\frac{8900}{50}\right)^2 t = 1,02 \cdot 10^4, \text{ откуда } t = 0,32 \text{ сек},$$

ток в этот момент времени $I = 0,77 \cdot 8900 = 6850 \text{ а}$.

Если не учитывать спад тока от нагрева проводника при коротком замыкании, то наибольшее допустимое время для алюминиевого проводника определяется из выражения

$$t = \left(\frac{90}{8900/50}\right)^2 = 0,25 \text{ сек}, \text{ т. е. оно меньше на } 22\%.$$

При протяженности кабеля $l = 1 \text{ км}$ сопротивления в начальный момент короткого $x = 0,183 + 0,083 = 0,266 \text{ ом}$ и $r = 0,726 \text{ ом}$,

$$z = \sqrt{0,726^2 + 0,266^2} = 0,775 \text{ ом}.$$

Начальное значение периодической слагающей тока короткого

$$I_{n(0)} = \frac{6600}{\sqrt{3 \cdot 0,775}} = 4900 \text{ а}.$$

При $a = \left(\frac{0,726}{0,775}\right)^2 = 0,88$ и $\theta = 200^\circ\text{C}$ по диаграмме на рис П-5 находим $\Delta = 1,1 \cdot 10^4$ и $n_{\theta} = 0,74$. Тогда искомое время

$$t = \frac{1,1 \cdot 10^4}{(4900/50)^2} = 1,15 \text{ сек}$$

и соответствующее этому моменту времени значение тока

$$I = 0,74 \cdot 4900 = 3620 \text{ а}$$

При приближенном решении, т. е. без учета теплового спада тока, наибольшее допустимое время составляет

$$t = \left(\frac{90}{4900/50}\right)^2 = 0,84 \text{ сек},$$

т. е. меньше на 27%, а величина тока будет увеличена на $\frac{1-0,74}{0,74} \times 100 = 35\%$.

Пользуясь той же диаграммой, можно определить для разных моментов времени величину тока и температуру нагрева за-

данного кабеля за рассматриваемый промежуток времени. Результаты такого подсчета представлены на рис. 1-14 соответствующими кривыми при длине кабеля 0,5 и 1 км. Пуширом проведены кривые повышения температуры кабеля, если не учитывать уменьшения тока от роста активного сопротивления кабеля при его нагреве.

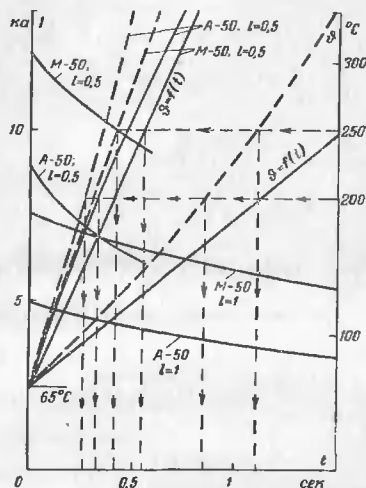


Рис. 1-14. К задаче 1-15. Кривые изменения тока короткого замыкания и температуры нагрева кабеля в функции времени.

На том же рисунке для сравнения показаны аналогичные кривые при использовании кабеля того же сечения, но с медными жилами, для которых активное сопротивление при $\theta = 20^\circ\text{C}$ составляет $r = 0,37 \text{ ом/км}$ и допустима наибольшая температура $\theta = 250^\circ\text{C}$. Естественно, благодаря меньшему сопротивлению цепи короткого замыкания кривые изменения тока при кабеле марки М-50 расположены выше; их спад сохраняется примерно тем же, что и при кабеле с алюминиевыми жилами. Что касается кривых изменения температуры нагрева, то при длине кабеля 0,5 км, как видно, они достаточно близки друг к другу, а при длине кабеля 1 км они практически сливаются вместе.

Величина тока короткого замыкания при использовании кабеля с медными жилами существенно больше, чем при кабеле с алюминиевыми жилами, тем не менее величина допустимого времени по термической устойчивости кабеля также больше. Последнее объясняется главным образом тем, что для кабеля с медными жилами допускается большая температура нагрева (250°C).

Читателю рекомендуется самостоятельно проверить расчетом для какого-либо момента времени точки соответствующих кривых рис. 1-14, отвечающих кабелю марки М-50. При этом считать, что начальная температура кабеля ($\theta = 65^{\circ}\text{C}$) и температурный коэффициент для меди ($\alpha = 0,004$) те же, что и для алюминия. В приближенном подсчете без учета теплового спада тока короткого замыкания наибольшее допустимое время по термической устойчивости кабеля с медными жилами определяются из выражения

$$t = \left(\frac{160}{I/q} \right)^2, \text{ сек.}$$

где $\frac{I}{q}$ — плотность тока короткого замыкания в кабеле, а/мм^2 .

Задача 1-16

К шинам пониженного напряжения трансформатора в схеме предыдущей задачи (рис. 1-13) предполагается присоединить через реактор кабель марки А-25. Параметры реактора: 6 кв, 300 а, $x = 5\%$; параметры кабеля: $x = 0,091 \text{ ом/км}$, $r = 1,24 \text{ ом/км}$ при 20°C .

Определить температуру кабеля, до которой он нагреется при трехфазном коротком замыкании на расстоянии 1 км, если отключение короткого произойдет через 1 сек и начальная температура кабеля была 65°C . Найти также ток в момент отключения.

Решение провести с использованием диаграммы на рис. П-5 (приложение П-4), учитывающей тепловой спад тока короткого замыкания.

Задача 1-17

Две системы С-1 и С-2 (рис. 1-15,а) связаны между собой через автотрансформаторы АТ-1 и АТ-2 и сеть 220 кв. Каждая из систем может рассматриваться как источник бесконечной мощности с неизменным напряжением соответственно 500 (у С-1) и 115 кв (у С-2). Остальные элементы схемы характеризуются следующими данными:

автотрансформатор АТ-1 250 Мва, $500/242/38,5 \text{ кв}$, $u_{\text{ВС}} = 10,4\%$,
 $R_{\text{квс}} = 750 \text{ кат}$;
 автотрансформатор АТ-2 180 Мва, $230/115/11 \text{ кв}$, $u_{\text{ВС}} = 12,2\%$,
 $R_{\text{квс}} = 715 \text{ кат}$;

трансформатор Т 90 Мва, $220/6,6 \text{ кв}$, $u_{\text{н}} = 14,5\%$, $R_{\text{н}} = 480 \text{ кат}$;
 линия Л-1 150 км, две цепи, провод АСО-300, $x = 0,407 \text{ ом/км}$,
 $r = 0,108 \text{ ом/км}$ (значения x и r даны для одной цепи);

линия Л-2 30 км, провод АС-240, $x = 0,4 \text{ ом/км}$, $r = 0,131 \text{ ом/км}$.
 При трехфазном коротком замыкании поочередно в точках К-1 и К-2 определить наибольшее действующее значение тока в месте

короткого, и также действующее значение тока через 2 и 1 секунду после возникновения короткого. Учет затухания апериодической составляющей тока производится с применением операторной метода, и полученные результаты сопоставить с приближенным решением, когда затухание этой составляющей тока учитывается по эквивалентной постоянной времени.

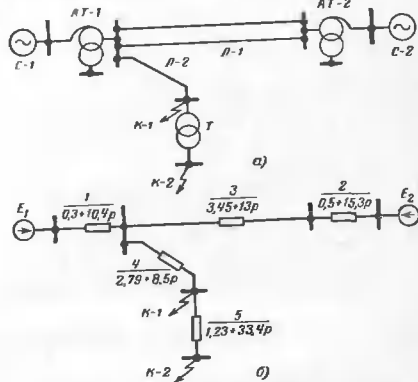


Рис. 1-15. К задаче 1-17.

а — исходная схема; б — схема замещения.

Решение. Выразим сопротивления элементов и напряжения источников питания в процентах при базисных условиях, за которые примем номинальные данные автотрансформатора АТ-1, т. е. $S_0 = 250 \text{ Мва}$, $U_{\text{бт}} = 500 \text{ кв}$, $U_{\text{бт}} = 242 \text{ кв}$.
 Активное сопротивление этого автотрансформатора

$$r = \frac{0,75}{250} \cdot 100 = 0,3\%$$

и полное сопротивление в операторной форме

$$z_1(p) = 0,3 + j0,4 p.$$

Для линии Л-1 имеем:

$$x = \frac{0,407}{2} \cdot 150 = 30,525 \text{ п.о.}$$

$$r = \frac{250}{242^2} \cdot 100 = 13\%$$

$$r = 13 \cdot \frac{0,108}{0,407} = 3,45\%$$

и в операторной форме $z_2(p) = 3,45 + j13 p$.

Операторные сопротивления всех остальных элементов указаны на схеме замещения на рис. 1-15.б.

Относительные э. д. с. источников составляют:

$$E_1 = \frac{500}{500} \cdot 100 = 100\%;$$

$$E_2 = \frac{115(230/115)}{242} \cdot 100 = 95\%.$$

Поскольку активные сопротивления элементов достаточно малы, то при определении периодической слагающей тока ими можно пренебречь. Тогда результирующие реактивности схемы при коротком в точке К-1 $x_2 = (10,4/(13+15,3)+8,5=16,1\%$ и в точке К-2 $x_2 = 16,1+33,4=49,5\%$.

Эквивалентная э. д. с. источников

$$E_{\Sigma} = \frac{100(13+15,3)+95 \cdot 10,4}{10,4+13+15,3} = 99\%.$$

Значения периодической слагающей тока при коротком в К-1

$$I_n = \frac{99}{16,1} = 6,15 \text{ или } I_n = 6,15 \cdot 0,595 = 3,65 \text{ ка,}$$

$$\text{где } I_{\text{оп}} = \frac{250}{\sqrt{3 \cdot 242}} = 0,595 \text{ ка;}$$

$$\text{в К-2 } I_n = \frac{99}{49,5} = 2 \text{ или } I_n = 2 \cdot 0,595 \cdot \frac{220}{6,6} = 39,6 \text{ ка.}$$

Найдем теперь постоянные времени затухания аперiodической слагающей, для чего используем операторные сопротивления элементов. При коротком замыкании в точке К-1 результирующее операторное сопротивление составляет:

$$z_2(p) = \frac{(0,3+10,4p)(3,45+13p+0,5+15,3p)}{0,3+10,4p+3,45+13p+0,5+15,3p} + 2,79 + \\ + 8,5p = \frac{3,06+45,5p+147p^2}{1+9,1p}.$$

Из $z_2(p) = 0$, т. е. $147p^2 + 45,5p + 3,06 = 0$, находим корни

$$p_{1,2} = \frac{-45,5 \pm \sqrt{45,5^2 - 4 \cdot 147 \cdot 3,06}}{2 \cdot 147} = \frac{-45,5 \pm 16,4}{294},$$

т. е. $p_1 = -0,1$ и соответственно

$$T_{\Sigma 1} = \frac{-1}{-0,1 \cdot 314} = 0,032 \text{ сек;}$$

$p_2 = -0,21$ и соответственно

$$T_{\Sigma 2} = \frac{-1}{-0,21 \cdot 314} = 0,015 \text{ сек.}$$

Начальные значения частных свободных токов произвольными величинами, определяемыми в соответствии с формулой переклада в переменный функции, т. е. в данном случае

$$\frac{F_1(p_n)}{p_n F_2(p_n)} = \frac{1+9,1p_n}{p_n(45,5+294p_n)},$$

что дает при $p_1 = -0,1$

$$\frac{1-9,1 \cdot 0,1}{-0,1(45,5-294 \cdot 0,1)} = -0,056;$$

или $p_2 = -0,21$

$$\frac{1-9,1 \cdot 0,21}{-0,21(45,5-294 \cdot 0,21)} = -0,266.$$

Сумма начальных свободных токов уравнивает амплитуду периодической слагающей тока, поскольку предшествующий ток в момент короткого отсутствовал и рассматривается наиболее тяжелый момент возникновения короткого. Следовательно, если амплитуду периодической слагающей принять за единицу, то частные свободные токи в долях от этой единицы будут:

$$I_{a1|0} = -\frac{0,056}{0,056+0,266} = -0,173; \quad I_{a2|0} = -0,827.$$

Таким образом, выражение для мгновенного значения тока при коротком в точке К-1 можно представить в следующем виде:

$$i_k = \sqrt{2} \cdot 3,65 (\cos \omega t - 0,173e^{-t/0,032} - 0,827e^{-t/0,015}), \text{ ка.}$$

При приближенном решении для определения эквивалентной постоянной времени находим результирующее активное сопротивление (полагая $x=0$)

$$r_{\Sigma} = (0,3/(3,45+0,5)) + 2,79 = 3,07\%,$$

и тогда

$$T_{\Sigma 0} = \frac{16,1}{3,07 \cdot 314} = 0,017 \text{ сек.}$$

Соответственно приближенное выражение для мгновенного значения тока будет:

$$i_k = \sqrt{2} \cdot 3,65 (\cos \omega t - e^{-t/0,017}), \text{ ка.}$$

Для момента возникновения ударного тока ($t=0,01$ сек) имеем:

$$i_k = i_{\text{в}} = \sqrt{2} \cdot 3,65 (-1 - 0,173e^{-0,01/0,032} - 0,827e^{-0,01/0,015}) = \\ = -\sqrt{2} \cdot 3,65 (1 + 0,126 + 0,428) = \\ = -\sqrt{2} \cdot 3,65 \cdot 1,554 = -8 \text{ ка.}$$

Аналогично выходя:

через 2 периода ($t = 0,04 \text{ сек}$)

$$i = -\sqrt{2} \cdot 3,65 \cdot 1,108 = -5,72 \text{ кА};$$

через 4 периода ($t = 0,08 \text{ сек}$)

$$i = -\sqrt{2} \cdot 3,65 \cdot 1,02 = -5,28 \text{ кА}.$$

Искомые наибольшие действующие значения токов будут: через 0,01 сек

$$I_y = 3,65 \sqrt{1+2(1,554-1)^2} = 3,65 \cdot 1,27 = 4,65 \text{ кА};$$

через 2 периода

$$I = 3,65 \sqrt{1+2(1,108-1)^2} = 3,65 \cdot 1,01 = 3,7 \text{ кА};$$

через 4 периода $I = 3,65$, так как к этому моменту аperiodическая слагающая ничтожно мала.

Приближенное решение дает следующие значения токов:

через 0,5 периода ($t = 0,01 \text{ сек}$)

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 3,65 (-1 - e^{-0,01/0,017}) = -\sqrt{2} \cdot 3,65 \cdot 1,554 = -8 \text{ кА};$$

через 2 периода

$$i = -\sqrt{2} \cdot 3,65 \cdot 1,094 = -5,65 \text{ кА};$$

через 4 периода

$$i = -\sqrt{2} \cdot 3,65 \cdot 1,009 = -5,2 \text{ кА}.$$

Соответственно действующие значения токов при этом полу-чаются такими:

$I_y = 4,65 \text{ кА}$; через 2 периода $I = 3,65 \cdot 1,007 = 3,68 \text{ кА}$ и через 4 периода $I = 3,65 \text{ кА}$.

Как видно, в данном случае приближенное решение приводит практически к тем же результатам, что и строгое решение.

Аналогичный подсчет при коротком замыкании в точке К-2 рекомендуется выполнить читателю. Для справки укажем, что искомые значения токов получаются следующими:

наибольшее значение $I_y = 58 \text{ кА}$, через 2 периода $I = 44 \text{ кА}$ и через 4 периода $I = 40 \text{ кА}$.

Задача 1-18

Для схемы предыдущей задачи (рис. 1-15,а) известен нормальный рабочий режим. Он представлен на схеме замещения на рис. 1-16,а и векторной диаграмме на рис. 1-17*. Как видно, все величины ориентированы относительно вектора напряжения системы С-1, который в комплексной плоскости направлен по оси положительных действительных величин. Рабочие токи (или мощно-

сти) выражены в процентах при принятых в решении задачи 1-17 базисных условиях, т. е. $S_{00} = 250 \text{ МВА}$, $U_{01} = 500 \text{ кВ}$, $U_{011} = 242 \text{ кВ}$.

За трансформатором выключено напряжение, выражение на которой составляет $\dot{U}_{00} = 84 \angle -8^\circ$. Ее сопротивление определено как отношение $z = 84 \angle -8^\circ / 0,32 \angle -65^\circ = 262 \angle 57^\circ$. У всех остальных элементов активные сопротивления исключены.

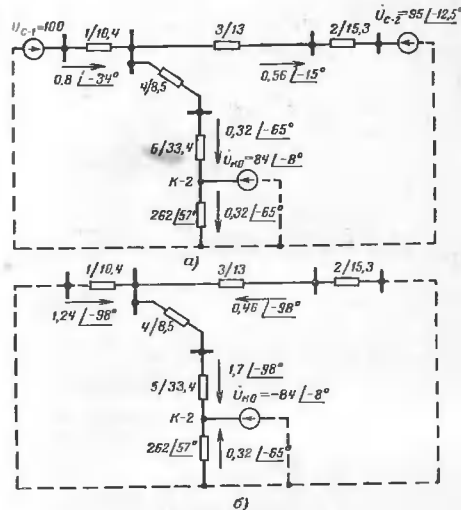


Рис. 1-16. К задаче 1-18.

а — схема замещения для нормального рабочего режима; б — то же для собственно аварийного режима.

В точке К-2 (за трансформатором) возникло трехфазное короткое замыкание. Требуется найти периодические слагающие токи в линиях Л-1 и Л-2 и автотрансформаторе АТ-1 (на стороне 220 кВ), используя для решения принцип включения собственно аварийных токов на предшествовавшие рабочие токи.

Решение. На рис. 1-16,б показана схема замещения для собственно аварийного режима. В ней исключены з. д. с. источников, и в месте короткого приложено напряжение, равное по величине

* Предшествующие величины отмечены индексом 0 без скобок.

До отключения выключателя *B-1* результирующие сопротивления схемы до места короткого замыкания составляют:

$$x_{\Sigma} = 0,318 + \frac{0,081}{3} = 0,345 \text{ ом};$$

$$r_{\Sigma} = 0,017 + \frac{0,286}{3} = 0,112 \text{ ом}; \quad z = 0,112 + j0,345 = 0,365 \angle 72^{\circ} \text{ ом}.$$

Модуль периодической слагающей тока короткого замыкания

$$I_{\text{и}} = \frac{6,35}{0,365} = 17,4 \text{ ка}.$$

Наибольшее мгновенное значение тока короткого будет в той фазе, напряжение которой в момент короткого проходит через нуль. Соответственно этому начальное значение аperiodической слагающей будет:

$$i_{\text{в}}|_{0+} = \sqrt{2} \cdot 17,4 \sin 72^{\circ} = \sqrt{2} \cdot 17,4 \cdot 0,95 = 23,4 \text{ ка},$$

а ее затухание будет происходить с постоянной времени

$$T_{\text{в}} = \frac{0,345}{314 \cdot 0,112} \approx 0,01 \text{ сек}.$$

Сложение аperiodической слагающей тока с амплитудой того же знака периодической слагающей наступит через

$$\frac{90 + 72}{180} \cdot 0,01 = 0,009 \text{ сек}.$$

Максимальное мгновенное значение тока в месте короткого соответственно будет:

$$i_{\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot 17,4 + 23,4 e^{-0,009/0,01} = 33,3 \text{ ка}.$$

Искомые токи (до отключения *B-1*): в выключателе *B-1* $i_{\text{макс}} = \frac{33,3}{3} = 11,1 \text{ ка}$ и в выключателе *B-2* $i_{\text{макс}} = 22,2 \text{ ка}$.

Теперь рассмотрим условия при отключении выключателя *B-1*. Сопротивление цепи при этом возрастает и достигает следующих значений:

$$x_{\Sigma} = 0,318 + \frac{0,081}{2} = 0,359 \text{ ом};$$

$$r_{\Sigma} = 0,017 + \frac{0,286}{2} = 0,16 \text{ ом}; \quad z = 0,16 + j0,359 = 0,394 \angle 66^{\circ} \text{ ом}.$$

Модуль периодической слагающей тока теперь равен:

$$I'_{\text{и}} = \frac{6,35}{0,394} = 16,1 \text{ ка}.$$

Как видно из векторной диаграммы на рис. 1-19, наибольшее значение периодической слагающей будет в том случае, если отключение выключателя *B-1* произойдет в момент, когда разность векторов $\frac{2}{3}(i_{\text{в}} - i'_{\text{в}})$ параллельна оси времени. При этом

$$i_{\text{в}}|_{0+} = \sqrt{2} \cdot 16,1 \cos(66 - 51)^{\circ} - \sqrt{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot 17,4 \cos(72 - 51)^{\circ} = 6,7 \text{ ка}.$$

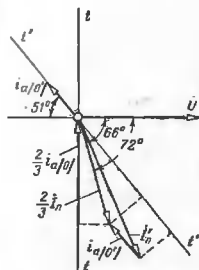


Рис. 1-19. Векторная диаграмма токов в выключателе *B-2* схемы задачи 1-19.

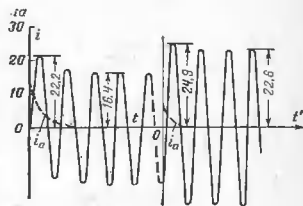


Рис. 1-20. Осциллограмма тока в выключателе *B-2* схемы задачи 1-19.

Сложение аperiodической слагающей с амплитудой того же знака периодической слагающей наступит через

$$\frac{180 + (66 - 51)}{180} \cdot 0,01 = 0,0108 \text{ сек},$$

и мгновенное значение тока в этот момент будет:

$$i_{\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot 16,1 + 6,7 e^{-0,0108/0,0072} = 24,9 \text{ ка},$$

где постоянная времени

$$T_{\text{в}} = \frac{0,359}{314 \cdot 0,16} = 0,0072 \text{ сек}.$$

Для большей наглядности на рис. 1-20 приведена осциллограмма тока в фазе выключателя *B-2*, которая находится в наиболее тяжелых условиях. После отключения выключателя *B-1* ток в выключателе *B-2* возрастает. Затухание аperiodической слагающей происходит очень быстро, так как в цепи имеется значительное активное сопротивление.

Задача 1-20

При исходных данных предыдущей задачи определить максимальное мгновенное значение тока в выключателе $B-1$, если через $0,5$ сек после возникновения короткого замыкания произойдет отключение вначале выключателя $B-2$. Все остальные условия сохраняются без изменения.

Задача 1-21

Автотрансформатор AT 125 MVA , 330/242/38,5 kV , $\mu_{330} = 9,7\%$, $\mu_{242} = 23,5\%$, $\mu_{38,5} = 12\%$ связывает две системы (рис. 1-21, а) Система $C-1$ характеризуется эквивалентной реактивностью $x = 12$ Ω и приложенным за ней неизменным напряжением 335 kA , си-

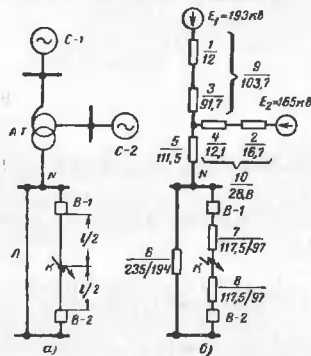


Рис. 1-21. К задаче 1-21.

а — исходная схема; б — схема замещения

стема $C-2$ — эквивалентной реактивностью $x = 9$ Ω и приложенным за ней неизменным напряжением 210 kA . К третьей обмотке автотрансформатора присоединена двухцепная линия протяженностью 8 km . Линия выполнена проводом АС-95, у которого $r = 0,33$ Ω/km ; индуктивное сопротивление линии $x = 0,4$ Ω/km одной цепи.

Посредние линии на одной из ее цепей произошло металлическое трехфазное короткое замыкание, отключение которого происходит каскадно, т. е. через $0,2$ сек отключения выключатель $B-1$ и затем еще через $0,5$ сек отключения выключатель $B-2$.

Требуется определить в цепи третьей обмотки автотрансформатора периодическую сглаживающую ток в момент короткого замыкания и после отключения выключателя $B-1$, максимальное

мгновенное значение тока в той же цепи до отключения выключателя $B-1$ и после его отключения. Кроме того, найти величину мгновенного напряжения в начале линии (узел N) до и после отключения выключателя $B-1$.

Всемы активными сопротивлениями, кроме линии, можно пренебречь.

Решение. Проведем расчет в именованных единицах, приняв в качестве основной (базисной) ступени сторону высшего напряжения автотрансформатора.

Реактивности и э. д. с. обеих систем в схеме замещения будут

$$x_1 = 12 \text{ } \Omega \text{ и } E_1 = \frac{335}{\sqrt{3}} = 193 \text{ } kA; \quad x_2 = 9 \left(\frac{330}{242} \right)^2 = 16,7 \text{ } \Omega$$

$$\text{и } E_2 = \frac{210}{\sqrt{3}} \left(\frac{330}{242} \right) = 165 \text{ } kA.$$

Реактивности элементов схемы замещения автотрансформатора:

$$x_3 = 0,5(9,7 + 23,5 - 12) \frac{330^2}{125} = 91,7 \text{ } \Omega;$$

$$x_4 = 0,5(9,7 - 23,5 + 12) \frac{330^2}{125} = 12,1 \text{ } \Omega;$$

$$x_5 = 0,5(-9,7 + 23,5 + 12) \frac{330^2}{125} = 111,5 \text{ } \Omega.$$

Сопротивления линии L : неповрежденной цепи

$$x_6 = 8 \cdot 0,4 \left(\frac{330}{38,5} \right)^2 = 235 \text{ } \Omega, \quad r_6 = \frac{0,33}{0,4} \cdot 235 = 194 \text{ } \Omega;$$

участков поврежденной цепи

$$x_7 = x_8 = \frac{235}{2} = 117,5 \text{ } \Omega, \quad r_7 = r_8 = \frac{194}{2} = 97 \text{ } \Omega.$$

Схема замещения приведена на рис. 1-21, б. У элементов 6, 7 и 8 в знаменателе указаны дробью значения реактивных и активных сопротивлений. Как видно, последовательно соединенные элементы ветвей каждой системы заменены соответствующими суммарными реактивностями (элементы 9 и 10). Их эквивалентная реактивность $x_{11} = x_9/x_{10} = 103,7/28,8 = 22,5$ Ω и результирующая э. д. с.

$$E_x = E_1/E_2 = \frac{193 \cdot 28,8 + 165 \cdot 103,7}{28,8 + 103,7} = 171 \text{ } kA.$$

Результирующее сопротивление схемы до отключения выключателя $B-1$:

$$x_2 = 22,5 + 111,5 + \frac{0,5 \cdot 1,5}{2} \cdot 235 = 222 \text{ } \Omega;$$

$$r_2 = \frac{0,5 \cdot 1,5}{2} \cdot 194 = 73 \text{ } \Omega.$$

Приведенная величина искомого тока

$$I_n^c = \frac{171}{73 + j222} = 0,73 \angle -71,5^\circ \text{ кА},$$

и его истинная величина (модуль)

$$I_n = 0,73 \cdot \frac{330}{38,5} = 6,26 \text{ кА}.$$

В данном случае отношение $x/r = 222/73 = 3,04$ находится на пределе, при котором, вообще говоря, можно было пренебречь

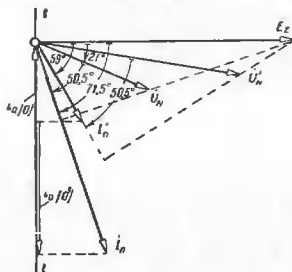


Рис. 1-22. К задаче 1-21. Векторная диаграмма токов и напряжений.

активным сопротивлением, поскольку это вызвало бы погрешность порядка 5%. Однако, коль скоро здесь для дальнейшего нужно знать и правильную фазу тока, необходимо учесть активное сопротивление цепи короткого замыкания.

Напряжение в узле N

$$\dot{U}_N = 114,2 \angle 50,5^\circ - 0,73 \angle -71,5^\circ = 83,5 \angle -21^\circ \text{ кВ}$$

(где эквивалентное полное сопротивление линий

$$Z = \frac{0,5 + j1,5}{2} (194 + j235) = 73 + j88 = 114,2 \angle 50,5^\circ),$$

и модуль его истинного значения

$$U_N = 83,5 \cdot \frac{38,5}{330} = 9,74 \text{ кВ}.$$

На рис. 1-22 показана векторная диаграмма, которая ориентирована относительно оси времени $t-t$ так, что мгновенное значение э. д. с. равно нулю. Именно при такой фазе возникновения короткого в цепи с индуктивностью и активным сопротивлением будет наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания.

Таким образом, начальное значение апериодической слагающей будет:

$$i_n |_{t=0} = \sqrt{2} \cdot 6,26 \sin 71,5^\circ = 8,42 \text{ кА}.$$

Постоянная времени затухания этой слагающей тока

$$T_a = \frac{222}{314 \cdot 73} \approx 0,01 \text{ сек.}$$

Максимальное магнитное значение полного тока практически наступит через $0,01 \cdot \frac{91 + 71,5}{180} = 0,009 \text{ сек.}$, т. е. когда периодическая слагающая тока I_n достигнет своей положительной амплитуды, и оно составит:

$$i_{n \text{ макс}} = \sqrt{2} \cdot 6,26 + 8,42 e^{-0,009/0,01} = 8,86 + 8,42 = 12,28 \text{ кА},$$

т. е. ударный коэффициент в данном случае составляет:

$$k_y = \frac{12,28}{8,86} = 1,39.$$

После отключения выключателя $B-I$ сопротивления цепи будут: $x_{\Sigma} = 22,5 + 111,5 + 1,5 \cdot 235 = 486 \text{ Ом}$, $r_{\Sigma} = 1,5 \cdot 194 = 291 \text{ Ом}$ и периодическая слагающая тока (приведенное значение)

$$\dot{I}_n^c = \frac{171}{291 + j486} = 0,302 \angle -59^\circ;$$

модуль ее истинного значения

$$I_n^c = 0,302 \cdot \frac{330}{38,5} = 2,59 \text{ кА}.$$

Здесь, как видно, активное сопротивление играет весьма существенную роль. Полное сопротивление линии

$$Z = 1,5 (194 + j235) = 457 \angle 50,5^\circ,$$

и напряжение в узле N

$$\dot{U}_N^c = 0,302 \angle -59^\circ \cdot 457 \angle 50,5^\circ = 138 \angle -8,5^\circ \text{ кВ};$$

модуль его истинного значения

$$U_N^c = 138 \cdot \frac{38,5}{330} = 16,1 \text{ кВ}.$$

Если отключение выключателя $B-I$ произойдет в момент, когда э. д. с. источника проходит через нуль, как это показано на век-

торной диаграмме на рис. 1-22, то начальное значение аperiodической слагающей будет:

$$i_{a(0)} = \sqrt{2}(6,26 \sin 71,5^\circ - 2,59 \sin 59^\circ) = 5,3 \text{ ка.}$$

Ее затухание будет происходить с постоянной времени

$$T_a = \frac{486}{314 \cdot 291} = 0,0053 \text{ сек.}$$

Суммирование амплитуд периодической слагающей с аperiodической слагающей произойдет через $0,02 \cdot \frac{270 + 59}{360} = 0,018 \text{ сек.}$, при этом за такой промежуток аperiodическая слагающая затухнет до

$$5,3e^{-0,018/0,0053} = 5,3e^{-3,4} = 0,16 \text{ ка.}$$

Следовательно, максимальное мгновенное значение тока после отключения выключателя В-1 будет:

$$i_{\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot 2,59 + 0,16 = 3,67 + 0,16 = 3,83 \text{ ка.}$$

т. е. в этом случае ударный коэффициент составляет всего лишь

$$k_{\text{в}} = \frac{3,83}{3,67} = 1,04.$$

Глава вторая

НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВНЕЗАПНОГО НАРУШЕНИЯ РЕЖИМА

В данной главе рассматривается начальный момент внезапного нарушения режима в различных случаях трехфазного короткого замыкания, несинхронного включения машин и пуска двигателей. Следует сразу предупредить читателя, что допустимость несинхронного включения машины по току является необходимым, но еще не достаточным условием. Другим критерием допустимости такого включения машины является величина возникающего электромагнитного момента, который создает механическое воздействие на вал машины, на крепление активного железа к корпусу статора, на фундаментные болты и т. п. Именно этот критерий в подавляющем числе случаев является определяющим допустимость несинхронного включения. Помимо того, нужно иметь в ви-

ду, что ограничение в несинхронном включении может быть и по величине допустимого тока для трансформатора, через который машина связана с другими источниками (задача 2-13).

Важным фактором в начальный момент внезапного нарушения режима является поведение приключенной нагрузки, особенно когда последняя состоит из крупных двигателей. Наглядный пример различного поведения обобщенной нагрузки при коротком замыкании приведен в решении задачи 2-16.

Большой практический интерес представляют оценка ударного коэффициента и его изменение в зависимости от положения точки короткого замыкания в схеме (задача 2-6).

Проводимая в задачах этой главы оценка пуска двигателей касается только начального момента, так как дальнейшее развертывание двигателя зависит от параметров и характеристик самого двигателя и сцепленного с ним механизма. Учет всех этих факторов представляет обычную задачу расчета электропривода.

Задача 2-1

Гидрогенератор, параметры которого 20 Мвт , $\cos \varphi = 0,85$, $10,5 \text{ ка}$, $1,29 \text{ ка}$, $x''_d = 0,23$, $x_d = 0,96$, $x''_q = 0,29$, $x_q = 0,57$, $T_a = 0,12 \text{ сек}$, работает с нагрузкой $14,5 \text{ Мвт}$ при $\cos \varphi = 0,8$ и напряжении на выводах, равном $10,8 \text{ кВ}$.

Непосредственно на выводах генератора произошло металлическое трехфазное короткое замыкание.

Требуется определить начальный сверхпереходный ток генератора и максимальные мгновенные значения токов в каждой фазе, считая, что короткое замыкание произошло в момент, когда напряжение фазы А проходило через нуль.

Решение. Проводим решение в относительных единицах при номинальных условиях генератора.

Рабочее напряжение генератора в относительных единицах составит $\bar{U} = 10,8/10,5 = 1,03$.

Номинальная полная мощность генератора

$$S_n = \frac{20}{0,85} = 23,5 \text{ Мва.}$$

Нагрузочный ток в относительных единицах

$$I = \frac{14,5}{0,8 \cdot 23,5 \cdot 1,03} = 0,75.$$

Найдем направление оси q , для чего определяем (рис. 2-1)

$$\text{tg } \xi = \frac{1,03 \cdot 0,6 + 0,75 \cdot 0,57}{1,03 \cdot 0,8} = 1,27,$$

чему соответствует $\xi = 51^\circ$.

Продольная и поперечная составляющие нагрузочного тока

$$I_d = 0,75 \sin 51^\circ = 0,75 \cdot 0,78 = 0,59;$$

$$I_q = 0,75 \cos 51^\circ = 0,75 \cdot 0,63 = 0,47.$$

Сдвиг напряжений относительно оси q $\delta = 51^\circ - 37^\circ = 14^\circ$, и составляющие напряжения

$$U_d = 1,03 \cos 14^\circ = 1,03 \cdot 0,97 = 1;$$

$$U_q = 1,03 \sin 14^\circ = 1,03 \cdot 0,25 = 0,26.$$

Составляющие сверхпереходной э. д. с.

$$E''_q = 1 + 0,69 \cdot 0,23 = 1,135 \text{ и } E''_d = 0,25 - 0,47 \cdot 0,29 = 0,11.$$

Составляющие сверхпереходного тока короткого замыкания

$$I''_d = \frac{1,135}{0,23} = 4,94 \text{ и } I''_q = \frac{0,11}{0,29} = 0,39,$$

в полной величина]

$$I'' = \sqrt{4,94^2 + 0,39^2} = 4,96$$

или

$$I'' = 4,96 \cdot 1,29 = 6,4 \text{ кА.}$$

Подсчет можно было также произвести путем наложения собственно аварийных слагающих токов

$$I''_{\text{авт}} = \frac{1}{0,23} = 4,35 \text{ и } I''_{q \text{ авт}} = \frac{0,25}{0,29} = 0,86$$

на предшествующие значения токов $I_d = 0,59$ и $I_q = 0,47$, что с учетом их направлений дает:

$$I''_d = 4,35 + 0,59 = 4,94 \text{ и } I''_q = 0,86 - 0,47 = 0,39.$$

Как видно из рис. 2-1 нетрудно установить, что, хотя цепь короткого замыкания чисто индуктивная, сдвиг между E'' и I'' не равен 90° , но, правда, очень близок к нему. Это объясняется различием реактивных генератора в его продольной и поперечной осях. В данном случае такое различие достаточно мало, поэтому если приближенно считать $X''_q = X''_d = 0,23$ и оценить E''_0 упрощенно как $E''_0 = 1,03 + 0,75 \cdot 0,23 = 0,6 = 1,133$, то, приближенная величина сверхпереходного тока была бы $I'' = \frac{1,133}{0,23} = 4,94$, т. е. меньше всего лишь на 0,5%.

Теперь найдем начальные значения аperiodической слагающей тока в каждой фазе. Для большей наглядности на рис. 2-2 приведена векторная диаграмма для трех фаз генератора. Она ориентирована относительно линии времени $t-t'$ в соответствии с заданным условием ($u_d|_0 = 0$), и на ней указаны значения требуемых в дальнейшем углов. Учитывая направление слагаемых вели-

чин, найдем начальные значения аperiodической слагающей тока в фазах:

$$i_{dA}|_0 = i_A - i''_A|_0 = -0,75 \cos 53^\circ - (-4,96 \cos 9,5^\circ) = 4,44;$$

$$i_{dB}|_0 = i_B - i''_B|_0 = -0,75 \cos 67^\circ - 4,96 \cos 69,5^\circ = -2,03$$

и аналогично $i_{dC}|_0 = -2,41$ (или иначе $i_{dC}|_0 = 2,03 - 4,44 = -2,41$)

Пренебрегая затуханием сверхпереходного тока в течение первого полуцикла, практически можно считать, что максимальные

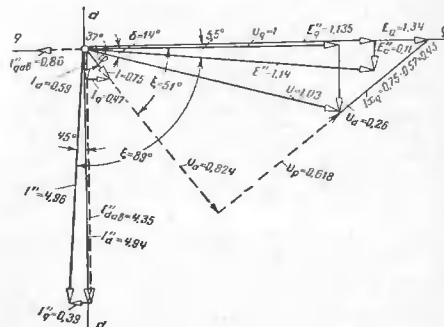


Рис. 2-1. К задаче 2-1. Векторная диаграмма генератора.

мгновенное значение тока наступает в момент, когда сверхпереходный ток в данной фазе имеет амплитудное значение того же знака, что и аperiodическая слагающая тока этой фазы.

Как следует из рис. 2-2, в фазе А это будет иметь место через $\frac{180 - 9,5}{180} \cdot 0,01 = 0,0095 \text{ сек}$, в фазе В — через $\frac{180 - 69,5}{180} \cdot 0,01 = 0,0062 \text{ сек}$ и в фазе С — через $\frac{180 + 50,5}{180} \cdot 0,01 = 0,013 \text{ сек}$.

Таким образом, искомые максимальные мгновенные значения токов, выраженные в именованных единицах, будут:

$$i_A = (4,96 + 4,44 e^{-0,0095/0,12}) \sqrt{2} \cdot 1,29 = 16,5 \text{ кА;}$$

$$i_B = (4,96 + 2,03 e^{-0,0062/0,12}) \sqrt{2} \cdot 1,29 = 12,6 \text{ кА,}$$

$$i_C = (4,96 + 2,41 e^{-0,013/0,12}) \sqrt{2} \cdot 1,29 = 13,0 \text{ кА.}$$

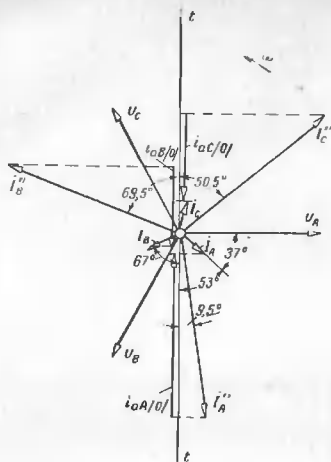


Рис. 2-2. К задаче 2-1. Векторная диаграмма токов.

Задача 2-2

Гидрогенератор, параметры которого $x_d=1$, $x_q=0,6$, $x'_d=0,25$, $x'_q=0,1$, $T_a=0,1$ сек, работает на холостом ходу с номинальным напряжением.

Требуется определить:

а) при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора наибольшие начальные величины аperiodической составляющей и второй гармоники тока, вызвав их в долях начального переходного тока генератора;

б) при какой удаленности трехфазного короткого замыкания от выводов генератора вторая гармоника составляет не более 10% начального переходного тока;

в) какую реактивность должна иметь поперечная демпферная обмотка генератора, чтобы его ротор был симметричен при переходном процессе, и в какой мере при этом изменится величина ударного коэффициента при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора.

Решение. а) Начальное значение переходного тока при коротком на выводах составляет $I' = 1/0,25 = 4$. Начальные значения аperiodической составляющей:

$$i_{B0} = \frac{U_{q0}(x_q + x'_d)}{2x'_d x_q} = \frac{1(0,6 + 0,25)}{2 \cdot 0,25 \cdot 0,6} = 2,83 \text{ или } \frac{2,83}{4} = 0,71;$$

$$i_{20} = \frac{U_{q0}(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q} = \frac{1(0,6 - 0,25)}{2 \cdot 0,25 \cdot 0,6} = 1,17 \text{ или } \frac{1,17}{4} = 0,29.$$

б) Чтобы удовлетворить поставленное условие, должно быть соблюдено следующее неравенство:

$$\frac{0,6 - 0,25}{2(0,25 + x)(0,6 + x)} \leq 0,1 \frac{1}{0,25 + x},$$

откуда искомая внешняя реактивность $x \geq 1,15$.

в) Реактивность реакции статора в поперечной оси составляет $x_{\sigma q} = 0,6 - 0,1 = 0,5$. Искомая реактивность поперечной демпферной обмотки может быть определена из выражения

$$x'_q = x'_d = 0,25 = 0,6 - \frac{0,5^2}{x'_{1q}},$$

откуда $x'_{1q} = 0,715$.

При отсутствии поперечной демпферной обмотки реактивность, определяемая значением постоянной времени T_a , составляет:

$$x_a = 1/2,83 = 0,354.$$

Следовательно, после того как будет выполнена поперечная демпферная обмотка, постоянная времени будет меньше и составит:

$$T_a = 0,1 \cdot \frac{0,25}{0,354} = 0,071 \text{ сек.}$$

Если без поперечной демпферной обмотки ударный коэффициент составлял:

$$k_{\sigma} = 1 + e^{-0,01/0,1} = 1,91,$$

то при наличии поперечной демпферной обмотки он будет:

$$k_{\sigma} = 1 + e^{-0,01/0,071} = 1,87,$$

т. е. меньше приблизительно на 2%.

Задача 2-3

Схема, представленная на рис. 2-3,а, содержит шесть ступеней напряжения, взаимно связанных тремя трансформаторами и одним автотрансформатором. Секционный выключатель В нормально

отключен. Данные элементов схемы следующие:
 генератор Г 176,5 Мва, 15,75 кв, $x''_d = 0,15$;
 трансформатор Т-1 180 Мва, 242/15,75 кв, $u_B = 12\%$;
 трансформатор Т-2 90 Мва, 220/38,5/11 кв,

$$u_{BC} = 12\%, u_{BH} = 20\%, u_{CH} = 8\%;$$

трансформатор Т-3 60 Мва, 110/6,6 кв, $u_B = 10,5\%$;
 автотрансформатор АТ-1 120 Мва, 220/121/11 кв,

$$u_{BC} = 9\%, u_{BH} = 27\%, u_{CH} = 18\%;$$

линия Л-1 200 км, $x = 0,4$ ом/км одной цепью;
 линия Л-2 50 км, $x = 0,4$ ом/км;
 кабель КБ-1 2,5 км, $x = 0,08$ ом/км;
 реактор Р 6 кв, 500 а, $x = 5\%$.

Требуется составить схему замещения, выразив ее элементы в а) именованных единицах, б) относительных единицах.

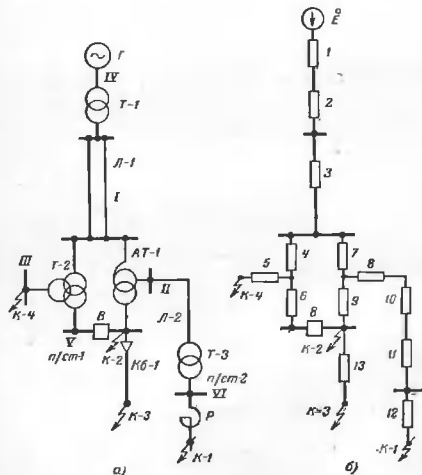


Рис. 2-3. К задаче 2-3.

а — исходная схема; б — схема замещения

При этом сделать точное и приближенное приведение элементов, т. е. с учетом действительных номинальных напряжений (относительно действительным коэффициентам трансформации трансформаторов и автотрансформатора) и приближению, когда эти напряжения принимаются равными установленным средним напряжениям соответствующих ступеней трансформации.

Помимо того, нужно определить начальный сверхпереходный ток при трехфазном коротком замыкании поочередно в точках К-1 и К-3, считая, что генератор предварительно работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Решение. На рис. 2-3, б приведена схема замещения с указанием порядковых номеров всех ее элементов.

а) Приведение в именованных единицах

Примем за основную ступень ту, где находится линия Л-1. Тогда при учете действительных номинальных напряжений получим следующие значения приведенных реактивностей отдельных элементов:

$$x_1 = 0,15 \cdot \frac{15,75^2}{176,5} \left(\frac{242}{15,75} \right)^2 = 49,5 \text{ ом}; \quad x_2 = \frac{12}{100} \cdot \frac{242^2}{180} = 39 \text{ ом};$$

$$x_3 = \frac{0,4}{2} \cdot 200 = 40 \text{ ом};$$

для трансформатора Т-2 $u_B = 0,5(12 + 20 - 8) = 12\%$; $u_C = 0$ и $u_H = 8\%$; следовательно,

$$x_4 = \frac{12}{100} \cdot \frac{220^2}{90} = 64,6 \text{ ом}; \quad x_5 = 0; \quad x_6 = \frac{8}{100} \cdot \frac{220^2}{90} = 43,1 \text{ ом};$$

для автотрансформатора АТ-1 $u_B = 0,5(9 + 27 - 18) = 9\%$; $u_C = 0$ и $u_H = 18\%$; следовательно,

$$x_7 = \frac{9}{100} \cdot \frac{220^2}{120} = 36,4 \text{ ом}; \quad x_8 = 0; \quad x_9 = 72,8 \text{ ом};$$

$$x_{10} = 0,4 \cdot 50 \left(\frac{220}{121} \right)^2 = 66 \text{ ом}; \quad x_{11} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{110^2}{60} \left(\frac{220}{121} \right)^2 = 70 \text{ ом};$$

$$x_{12} = \frac{5}{100} \cdot \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0,5} \left(\frac{110 \cdot 220}{6,6 \cdot 121} \right)^2 = 318 \text{ ом};$$

$$x_{13} = 0,08 \cdot 2,5 \left(\frac{220}{11} \right)^2 = 80 \text{ ом и фазная э. д. с. } E = \frac{15,75}{\sqrt{3}} \cdot \frac{242}{15,75} = 139 \text{ кв.}$$

При отключенном выключателе В суммарная реактивность схемы до точки К-1 составляет $x_2 = 49,5 + 39 + 40 + 36,4 + 66 + 70 + 318 =$

= 619 Ом, и сверхпереходный ток при коротком в К-1 будет:

$$I''_{к1} = \frac{139}{619} \left(\frac{200}{121} \cdot \frac{110}{6,6} \right) = 6,8 \text{ ка,}$$

при этом остаточное напряжение за реактором составит:

$$U = 5 \cdot \frac{6,8}{0,5} = 68\% \text{ (от } 6 \text{ кв.)}$$

При коротком в точке К-3 $x_{к3} = 49,5 + 39 + 40 + 36,4 + 72,8 + 80 = 317,7 \text{ Ом}$ и ток $I''_{к3} = \frac{139}{317,7} \left(\frac{220}{11} \right) = 8,8 \text{ ка}$, остаточное напряжение за кабелем (на шинах)

$$U = \frac{\sqrt{3} \cdot 8,8 \cdot 0,08 \cdot 2,5}{10} \cdot 100 = 17,6\% \text{ (от } 10 \text{ кв.)}$$

При приближенном приведении схемы используем средние значения номинальных напряжений, которые в соответствии с установочной шкалой для имеющихся в рассматриваемой схеме ступеней напряжения будут:

$$U_{срI} = 230 \text{ кв; } U_{срII} = 115 \text{ кв; } U_{срIII} = 37 \text{ кв; } U_{срIV} = 15,75 \text{ кв;}$$

$$U_{срV} = 10,5 \text{ кв и } U_{срVI} = 6,3 \text{ кв.}$$

Приводим все элементы к I ступени или к напряжению 230 кв:

$$x_1 = 0,15 \cdot \frac{230^2}{176,5} = 45 \text{ Ом; } x_2 = \frac{12 \cdot 230^2}{100 \cdot 180} = 35,4 \text{ Ом;}$$

$$x_3 = \frac{0,4}{2} \cdot 200 = 40 \text{ Ом; } x_4 = \frac{12 \cdot 230^2}{100 \cdot 90} = 70,7 \text{ Ом;}$$

$$x_5 = 0; x_6 = \frac{8 \cdot 230^2}{100 \cdot 90} = 47,1 \text{ Ом; } x_7 = \frac{9 \cdot 230^2}{100 \cdot 120} = 39,8 \text{ Ом;}$$

$$x_8 = 0; x_9 = 79,6 \text{ Ом; } x_{10} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{230^2}{115} = 80 \text{ Ом;}$$

$$x_{11} = \frac{10,5 \cdot 230^2}{100 \cdot 50} = 92,8 \text{ Ом; } x_{12} = \frac{5}{100} \cdot \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0,5} \left(\frac{230}{6,3} \right)^2 = 464 \text{ Ом}^*$$

$$x_{13} = 0,08 \cdot 2,5 \left(\frac{230}{10,5} \right)^2 = 96 \text{ Ом.}$$

Приведения фазная э. д. с., очевидно, будет

$$\dot{E} = 230 \sqrt{3} = 132,5 \text{ кв.}$$

Следовательно, при коротком в точке К-1

$$x_{к1} = 45 + 35,4 + 40 + 39,8 + 80 + 92,8 + 464 = 797 \text{ Ом}$$

и ток $I''_{к1} = \frac{132,5}{797} \left(\frac{230}{6,3} \right) = 6,1 \text{ ка}$ вместо 6,8 ка, т. е. меньше приблизительно на 10%.

При коротком в точке К-3

$$x_{к3} = 45 + 35,4 + 40 + 39,8 + 79,6 + 96 = 335,8 \text{ Ом}$$

и ток $I''_{к3} = \frac{132,5}{335,8} \left(\frac{230}{10,5} \right) = 8,7 \text{ ка}$ вместо 8,8 ка, т. е. меньше всего лишь примерно на 1%.

б) Приведение в относительных единицах

За базисную мощность примем $S_{б1} = 1000 \text{ Мва}$, а за базисное напряжение на I ступени $U_{б1} = 220 \text{ кв}$. Соответственно этому базисные напряжения на других ступенях схемы будут:

$$U_{бII} = 220 \cdot \frac{121}{220} = 121 \text{ кв; } U_{бIII} = 38,5 \text{ кв;}$$

$$U_{бIV} = 220 \cdot \frac{15,75}{242} = 14,3 \text{ кв; } U_{бV} = 11 \text{ кв;}$$

$$U_{бVI} = 121 \cdot \frac{6,6}{110} = 7,25 \text{ кв}$$

и базисные токи на ступенях, где рассматриваются короткие замыкания,

$$I_{бV} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 11} = 52,5 \text{ ка и } I_{бVI} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 7,26} = 79,5 \text{ ка.}$$

При точном приведении относительные реактивности элементов при базисных условиях будут:

$$x_1 = 0,15 \cdot \frac{1000}{176,5} \left(\frac{15,75}{14,3} \right)^2 = 1,08; x_2 = \frac{12 \cdot 1000}{100 \cdot 180} \left(\frac{242}{220} \right)^2 = 0,81;$$

$$x_3 = \frac{0,4 \cdot 1000}{2 \cdot 220^2} \cdot 200 = 0,83; x_4 = \frac{12 \cdot 1000}{100 \cdot 90} = 1,33; x_5 = 0;$$

$$x_6 = \frac{8 \cdot 1000}{100 \cdot 90} = 0,89; x_7 = \frac{9 \cdot 1000}{100 \cdot 120} = 0,75; x_8 = 0; x_9 = 1,5;$$

$$x_{10} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{1000}{121^2} = 1,37; x_{11} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 60} \left(\frac{110}{121} \right)^2 = 1,45;$$

$$x_{12} = \frac{5 \cdot 79,5}{100 \cdot 0,5} \left(\frac{6}{7,26} \right) = 6,56; x_{13} = 0,08 \cdot 2,5 \cdot \frac{1000}{11^2} = 1,65$$

Относительная величина э. д. с. $E = \frac{15,75}{14,3} = 1,1$.

* Здесь учтено действительное номинальное напряжение реактора, поскольку его сопротивление является преобладающим в суммарном сопротивлении схемы относительно точки К-1.

При коротком в точке $K-1$

$$x_{\Sigma} = 1,03 + 0,81 + 0,83 + 0,75 + 1,37 + 1,45 + 6,56 = 12,8$$

и ток $I''_K = \frac{1,1}{12,8} \cdot 79,5 = 6,8 \text{ кА}$, т. е., как и следовало ожидать, та же величина, что и полученная выше расчетом при точном приведении в именованных единицах.

Аналогично при коротком в точке $K-3$ $x_{\Sigma} = 6,57$ и ток $I''_K = \frac{1,1}{6,57} \cdot 52,5 = 8,8 \text{ кА}$ — тот же, что был получен ранее.

При приближенном приведении, выбрав на I ступени $U_{011} = 230 \text{ кВ}$, получим, что базисное напряжение на каждой ступени будет совпадать со средним номинальным напряжением той же ступени, т. е. в нашем случае $U_{011} = 115 \text{ кВ}$, $U_{0111} = 37 \text{ кВ}$, $U_{011V} = 15,75 \text{ кВ}$, $U_{06V} = 10,5 \text{ кВ}$ и $U_{06VI} = 6,3 \text{ кВ}$. Сохраняя $S_6 = 1000 \text{ Мва}$, найдем, что значения базисного тока

$$I_{06V} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55 \text{ кА} \text{ и } I_{06VI} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 91,5 \text{ кА}.$$

В этом случае пересчет к базисным условиям значительно упрощается. Так, для отдельных элементов будем иметь:

$$x_1 = 0,15 \cdot \frac{1000}{176,5} = 0,85; \quad x_2 = \frac{12 \cdot 1000}{100 \cdot 180} = 0,67;$$

$$x_3 = \frac{0,4}{2} \cdot 200 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,76;$$

для элементов 4—9 относительные реактивности остаются те же, что были получены выше, а для остальных элементов имеем:

$$x_{10} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1,52; \quad x_{11} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 60} = 1,75;$$

$$x_{12} = \frac{5}{100} \cdot \frac{91,5}{0,5} \cdot \left(\frac{6}{6,3} \right) = 8,7 \text{ и } x_{13} = 0,08 \cdot 2,5 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 1,82;$$

относительная величина э. д. с.

$$E = \frac{15,75}{15,75} = 1.$$

При коротком в точке $K-1$

$$x_{\Sigma} = 0,85 + 0,67 + 0,76 + 0,75 + 1,52 + 1,75 + 8,7 = 15,0$$

и ток $I''_K = \frac{1}{15} \cdot 91,5 = 6,1 \text{ кА}$.

При коротком в точке $K-3$

$$x_{\Sigma} = 0,85 + 0,67 + 0,76 + 0,75 + 1,5 + 1,82 = 6,35$$

$$\text{и ток } I''_K = \frac{1}{6,35} \cdot 55 = 8,7 \text{ кА}.$$

В обоих случаях величины тока короткого замыкания, как и должно быть, получались той же, что при расчете с приближенным приведением в именованных единицах.

Задача 2-4

У трансформаторов и автотрансформатора схемы на рис. 2-3,а установлены следующие значения напряжений холостого хода: у трансформатора $T-1$ 254,1/15,75 кВ, у трансформатора $T-2$ 231/38,5/11 кВ, у трансформатора $T-3$ 116,5/6 кВ и у автотрансформатора $AT-1$ 231/116,5/11 кВ. Все остальные параметры у всех элементов данной схемы сохранены те же, что в задаче 2-3.

Определить величину начального сверхпереходного тока при коротком замыкании в точке $K-1$, проведя решение с полным учетом коэффициентов трансформации. Составить полученную величину тока с найденной в решении задачи 2-3. Выключатель B считать отключенным.

Задача 2-5

Используя схему замещения на рис. 2-3,б, определить величины начального сверхпереходного тока при трехфазном коротком замыкании поочередно в точках $K-2$ и $K-4$. При этом оценить влияние секционирования шин высшего напряжения подстанции I , т. е. рассмотреть условия, когда выключатель B включен и отключен.

Решение провести при точном приведении элементов схемы замещения, а также оценить погрешности (в процентах), которые получаются в данных случаях при использовании приближенного приведения.

Задача 2-6

Для условий схемы на рис. 2-4,а определить ударные токи при трехфазных коротких замыканиях в точках $K-1$ и $K-2$. В последнем случае рассмотреть влияние длины поврежденного участка кабеля в пределах от 0 до 1 км и полученные результаты представить соответствующими кривыми.

Элементы схемы характеризуются следующими данными: система S — источник бесконечной мощности с номинальным напряжением 230 кВ;

генератор G 117,5 Мва, 10,5 кВ, $x''_d = 0,183$, $T_d = 0,417 \text{ сек}$; до короткого замыкания работал на холостом ходу с номинальным напряжением;

трансформатор T 90 Мва, 230/10,5 кВ, $u_k = 12\%$, $x/r = 27$;
линия L 100 км, провод АСО-300, $x = 0,407 \text{ Ом/км}$, $r = 0,108 \text{ Ом/км}$;
реактор P 10 кВ, 1500 а, $x = 6\%$, $P_k = 10,1 \text{ кет/фаза}$;
кабель $КБ$ А-3×120, $x = 0,076 \text{ Ом/км}$, $r = 0,27 \text{ Ом/км}$.

Решение. На рис. 2-4,б показана схема замещения, где для каждого элемента приведены их значения реактивностей (в числеле дроби) и относительных единиц при базисных условиях, выраженные в относительных единицах при базисных условиях, в квадратные корни приняты: $S_6 = 100 \text{ Мва}$, $U_6 = U_{\text{ср}}$ (в данном случае $U_{011} = 10,5 \text{ кВ}$ и $U_{0111} = 230 \text{ кВ}$) и, следовательно, на стороне генера-

торного напряжения $I_{011} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА}$. В соответствии с

условием относительные базисные э. д. с. обоих источников одинаковы и составляют $E=1$.

При коротком в точке $K-1$ ударный ток может быть найден как сумма независимых друг от друга токов от генератора и системы. Суммарные сопротивления со стороны системы составят:

$$x_{\Sigma} = 0,077 + 0,133 = 0,21 \text{ и } r_{\Sigma} = 2,04 \cdot 10^{-2} + 0,49 \cdot 10^{-2} = 2,53 \cdot 10^{-2}.$$

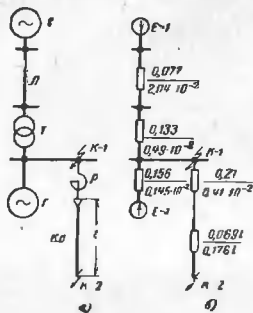


Рис. 2-4. К задаче 2-6.

а — входная схема; б — схема замещения.

Следовательно, постоянная времени цепи от системы

$$T_a = \frac{0,21 \cdot 10^2}{314 \cdot 2,53} = 0,264 \text{ сек}$$

и ударный коэффициент для тока от системы

$$k_{\text{ув}} = 1 + e^{-0,01/0,264} = 1,68.$$

Для генератора по заданной величине $T_a = 0,417 \text{ сек}$ находим значение ударного коэффициента

$$k_{\text{г}} = 1 + e^{-0,01/0,417} = 1,975.$$

Таким образом, ударный ток в месте короткого (точка $K-1$) будет:

$$I_{\text{ув}} = \left(1,975 \cdot \frac{1}{0,156} + 1,68 \cdot \frac{1}{0,21} \right) \cdot \sqrt{2} \cdot 5,5 = 160,3 \text{ кА.}$$

Разделив его по амплитуду суммарного сверхпереходного тока (она составляет 87 кА), найдем, что среднее значение ударного коэффициента в данном случае составляет $k_{\text{у}}=1,85$.

При коротком в точке $K-2$ составляющие сопротивления системы (определяемые приблизительно независимо друг от друга) будут:

$$x_{\Sigma} = (0,21/0,156) + 0,21 + 0,069i = 0,28 + 0,069i;$$

$$r_{\Sigma} = [(2,53/0,145) + 0,41] \cdot 10^{-2} + 0,176i = 0,547 \cdot 10^{-2} + 0,176i.$$

где l — в километрах.

При $I=0$ (короток непосредственно за реактором) постоянная времени

$$T_a = \frac{0,28 \cdot 10^2}{314 \cdot 0,547} = 0,163 \text{ сек, при которой } k_{\text{у}} = 1,94.$$

г. е. больше, чем при коротком в $K-1$, где снижение среднего значения ударного коэффициента получилось за счет значительного влияния активного сопротивления линии l .

Ударный ток при коротком в $K-2$ и $I=0$ составляет:

$$I_{\text{ув}} = \sqrt{2} \cdot 1,94 \cdot \frac{5,5}{0,28} = 53,8 \text{ кА.}$$

Задаваясь несколькими значениями l , нетрудно подсчитать для каждого из них интересующие нас величины. Результаты такого подсчета представлены кривыми на рис. 2-5. Здесь только нужно отметить, что при $l \geq 0,5$ км влияние активного сопротивления заметно сказывается также на начальной величине сверхпереходного тока, что приходится учитывать.

Так, при $l=1$ км имеем $x_{\Sigma} = 0,349$ и $r_{\Sigma} = 0,182$, соответственно $x_{\Sigma} = \sqrt{0,349^2 + 0,182^2} = 0,395$ и $T_a = 0,349/314 \cdot 0,182 = 0,006 \text{ сек}$. Сверхпереходный ток

$$I'' = \frac{5,5}{0,395} = 13,9 \text{ кА,}$$

причем поскольку фазовый угол

$$\varphi = \arctg \frac{0,349}{0,182} = 62,5^\circ,$$

то начальное значение аperiodической слагающей тока будет (имея в виду, что при $\delta=0$ напряжение этой фазы проходит через ноль):

$$I_{\text{а}} |_{t=0} = \sqrt{2} \cdot 13,9 \sin 62,5^\circ = 17,6 \text{ кА.}$$

Момент наступления максимального мгновенного значения тока в рассматриваемой фазе будет практически через

$$0,01 \cdot \frac{90 + 62,5}{180} = 0,0085 \text{ сек.}$$

и величина этого тока

$$i_{\text{квквс}} = \sqrt{2} \cdot 13,9 + 17,6 e^{-0,0085/0,006} = 19,7 + 4,4 = 24,1 \text{ кА, т. е. } k_y = 24,1/19,7 = 1,22.$$

По кривым на рис. 2-5 видно, что достаточно иметь небольшой участок кабеля в цепи короткого замыкания, чтобы это привело к существенному уменьшению ударного коэффициента. Что касается величины периодической составляющей тока короткого замыкания, то ее снижение с ростом длины участвующего кабеля значительно меньше.

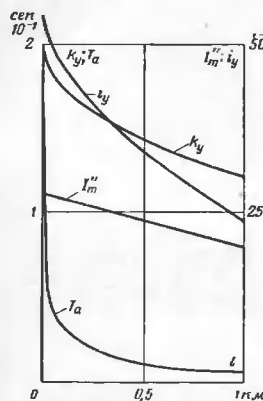


Рис. 2-5. К задаче 2-6. Кривые измененная I''_m , I_y , T_a и k_y в функции длины кабеля.

ся сборные шины 10,5 кВ разбить на три секции и смежные секции соединить через реакторы на номинальный ток 3000 А при номинальном напряжении 10 кВ. Получающаяся при этом схема станции представлена на рис. 2-6.а Секционный выключатель на шинах 37 кВ нормально включен.

Требуется определить, какой реактивности должны быть секционные реакторы $P-1$ и $P-2$ (на указанные параметры они изготовляются с реактивностью 8, 10 и 12%), чтобы при трехфазном коротком замыкании на любой из секций шин 10,5 кВ величины начальных сверхпереходных токов или пропорциональные им величины мощностей короткого замыкания были практически одинаковы.

Решение. Приняв $S_0 = 100 \text{ Мва}$ и $U_0 = U_{\text{ср}}$, найдем, что реактивности элементов схемы замещения на рис. 2-6.б составляют для

генераторов

$$x_1 = x_2 = x_3 = 0,135 \cdot \frac{100 \cdot 0,8}{50} = 0,216; \text{ для системы } C$$

$$x_4 = \frac{100}{1100} = 0,091; \text{ для трансформаторов } T-1 \text{ и } T-2$$

$$x_6 = x_8 = 0,5(10 + 17 - 7) \frac{100}{100 \cdot 40} = 0,25;$$

$$\text{аналогично } x_7 = x_9 = 0 \text{ и } x_5 = x_{10} = 0,175.$$

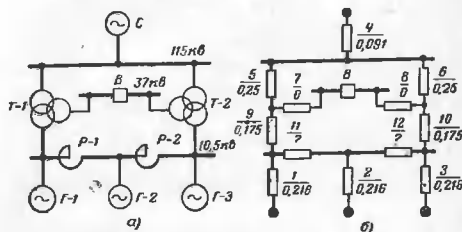


Рис. 2-6. К задаче 2-7.

а — исходная схема; б — схема замещения.

Коль скоро выключатель B включен и $x_7 = x_9 = 0$, то эквивалентная реактивность системы до элементов 9 и 10 будет:

$$x_{11} = 0,091 + \frac{0,25}{2} = 0,216,$$

т. е. та же величина, что и реактивность одного генератора.

Чтобы выполнить поставленное условие, очевидно, приведенные к базисным условиям реактивности секционных реакторов должны быть $x_{11} = x_{12} = 0,175$ для, переходя к номинальным условиям реактора, получим искомое значение реактивности

$$x = 0,175 \cdot \frac{3}{5,5} \cdot \frac{10,5}{10} \cdot 100 = 10\%.$$

где

$$I_0 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА.}$$

Следовательно, при коротком замыкании на любой секции шин 10,5 кВ эквивалентная реактивность всей схемы, кроме генератора

данной секции, составляет:

$$x_0 = \left(0,216 + \frac{0,175}{2} \right) // \left(\frac{0,216}{2} + \frac{0,175}{2} \right) = 0,168,$$

и начальный сверхпереходный ток в месте короткого будет:

$$I''_k = \frac{5,5}{0,168} + \frac{5,5}{0,216} = 32,8 + 25,4 = 58,2 \text{ кА.}$$

Нетрудно убедиться, что при отсутствии секционных реакторов этот ток был бы $I''_k = 95$ кА, т. е. больше в 1,63 раза.

Задача 2-8

Для схемы на рис. 2-6а при значениях реактивностей секционных реакторов, которые получены в решении предыдущей задачи, определить, насколько (в процентах) изменятся величины начальных сверхпереходных токов при коротких замыканиях на средней и крайних секциях шин 10,5 кВ, если секционный выключатель В на шинах 37 кВ станции отключен.

Задача 2-9

На рис. 2-7 показана принципиальная схема электрической станции Ст-1, которая работает параллельно с рядом других станций и линией 500 кВ связана с системой С, мощность которой практически бесконечно велика.

Требуется рассмотреть случай трехфазного короткого замыкания посередине в точках К-1, К-2 и К-3 заданной схемы и для каждого из них определить величину мощности короткого замыкания, соответствующую начальному сверхпереходному току короткого замыкания.

Необходимый расчет произвести приближенно, без учета нагрузок и действительных коэффициентов трансформации, принимая последние равными отношениям соответствующих значений средних номинальных напряжений по установленной шкале.

Элементы схемы на рис. 2-7 характеризуются следующими данными:

станция Ст-1 генераторы Г-1—Г-4 одинаковые, каждый 300 Мвт, $\cos \varphi = 0,85$, 20 кВ, $x''_d = 0,195$;

автотрансформаторы АТ-1 и АТ-2 одинаковые, каждый 750 Мва, 500/230/20 кВ, обмотка 20 кВ разделена на две цепи, $u_{\Sigma} = 11\%$, $u_{\text{ВН}} = 36\%$, $u_{\text{СН}} = 20\%$;

станция Ст-2 суммарная мощность 800 Мвт, $\cos \varphi = 0,9$, эквивалентная относительная реактивность при номинальных условиях $x'' = 0,485$;

станция Ст-8 суммарная мощность 800 Мвт, $\cos \varphi = 0,9$, $x'' = 0,4$;

станция Ст-4 суммарная мощность 300 Мвт, $\cos \varphi = 0,85$, $x'' = 0,36$;

станция Ст-5 суммарная мощность 165 Мвт, $\cos \varphi = 0,85$, $x'' = 0,35$;

подстанция п/ст-1: синхронный компенсатор СК 100 Мва, 10,5 кВ, $x''_d = 0,3$; автотрансформатор АТ-3 240 Мва, 230/115/10,5 кВ, $u_{\Sigma} = 10\%$, $u_{\text{ВН}} = 36\%$, $u_{\text{СН}} = 29\%$.

Линии передачи:
500 кВ Л-1 300 км, $x = 0,3$ Ом/км;
230 кВ Л-2 130 км, Л-3 35 км, Л-4 100 км, Л-5 75 км,
Л-6 45 км, Л-7 60 км, $x = 0,4$ Ом/км одной цепи;
115 кВ Л-8 60 км, $x = 0,4$ Ом/км одной цепи.

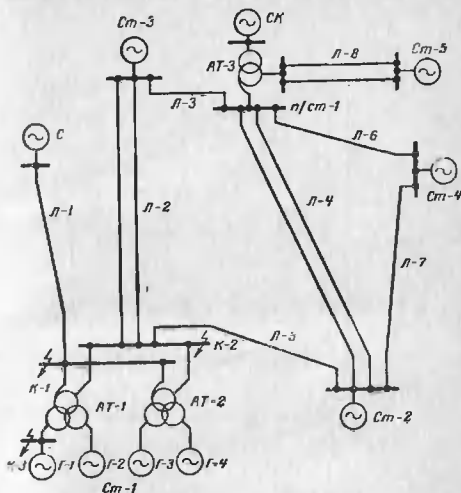


Рис. 2-7. Схема к задаче 2-9.

Решение. Проведем расчет в относительных единицах при $S_0 = 1000$ Мва и $U_0 = U_{\text{ср}}$ на каждой ступени напряжения.

Полная схема замещения представлена на рис. 2-8, где черные кружки указывают места приложенных э. д. с., относительные величины которых при базисных условиях одинаковы и равны единице.

Остановимся на подсчете реактивности отдельных элементов. Для генераторов Г-1 и Г-2

$$x_1 = x_2 = 0,195 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{300} = 0,55;$$

в силу полной симметрии положения генераторов Г-3 и Г-4 по отношению к коротким замыканиям за пределами цепи их напряжения эти

5 С. А. Устьясов

6, 25 и 26 заменить эквивалентным треугольником

$$x_{20} = 0,34 + 1,02 + \frac{0,34 \cdot 1,02}{0,45} = 2,13;$$

$$x_{10} = 0,45 + 1,02 + \frac{0,45 \cdot 1,02}{0,34} = 2,82;$$

$$x_{21} = 0,34 + 0,45 + \frac{0,34 \cdot 0,45}{1,02} = 0,94$$

и затем разрезать его в вершине, где приложена э. д. с. (рис. 2-9, а). Теперь, после сложения параллельных ветвей, получим схему на рис. 2-9, б (здесь станция Ст-1 и система С не показаны).

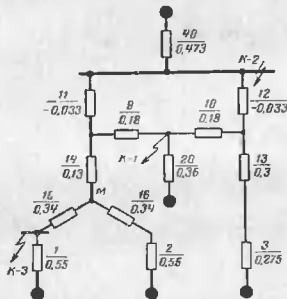


Рис. 2-10. Упрощенная схема замещения станции Ст-1 к задаче 2-9.

Нетрудно заметить, что получившаяся схема почти строго симметрична относительно шин 230 кВ станции Ст-1. Во всяком случае отклонение от симметрии столь незначительно, что им практически можно пренебречь, т. е. считать $x_{23} \approx x_6 = 0,45$ и $x_{34} \approx x_{22} = 0,26$. При этом эквивалентная реактивность всей этой части схемы относительно шин 230 кВ Ст-1 будет:

$$x_{40} = \left[\left(1,03 + \frac{0,26}{2} \right) // \frac{0,45}{2} \right] + \frac{0,57}{2} = 0,473.$$

Произведенные упрощения позволяют представить схему замещения в более простом виде, как это показано на рис. 2-10, где для лучшей наглядности устранили пересечения ветвей. Непосредственно из этой схемы видно, что по отношению к точкам К-1 и К-2 она строго симметрична, что резко облегчает нахождение ее результирующего сопротивления.

Так, при коротком в точке К-1 эквивалентная реактивность со стороны шин автотрансформаторов (АТ-1 и АТ-2) будет:

$$x_8 = \left[\left(\frac{0,3 + 0,275}{2} \right) // \left(0,473 + \frac{-0,033}{2} \right) \right] + \frac{0,18}{2} = 0,266.$$

Следовательно, искомая мощность короткого замыкания при коротком на шинах 500 кВ станции Ст-1 (точка К-1) будет:

$$S_{к1} = \frac{1000}{0,266} + \frac{1000}{0,36} = 3760 + 2780 = 6540 \text{ Мва.}$$

Аналогично эквивалентная реактивность со стороны АТ-1 и АТ-2 относительно точки К-2 будет:

$$x_8 = \left[\left(\frac{0,3 + 0,275}{2} \right) // \left(0,36 + \frac{0,18}{2} \right) \right] + \frac{-0,033}{2} = 0,150$$

и искомая мощность короткого замыкания при коротком на шинах 500 кВ станции Ст-1 (точка К-2) составит:

$$S_{к2} = \frac{1000}{0,159} + \frac{1000}{0,473} = 6300 + 2100 = 8400 \text{ Мва.}$$

По отношению в точке К-3 рассматриваемая схема уже не симметрична, и для ее приведения к элементарному виду, вообще говоря, нужно произвести ряд преобразований. Однако коль скоро сопротивления элементов 11 и 12 очень малы, то ими вполне можно пренебречь, т. е. принять $x_{11} = x_{12} = 0$. При этом реактивность схемы относительно точки М без учета ветви генератора Г-2 будет:

$$x_{11} = \left[0,473 // \left(0,3 + 0,275 \right) // \left(0,36 + \frac{0,18}{2} \right) \right] + 0,13 = 0,295$$

и эквивалентная реактивность всей схемы со стороны автотрансформатора АТ-1 относительно точки К-3

$$x_8 = \left[0,295 // \left(0,34 + 0,55 \right) \right] + 0,34 = 0,561.$$

Искомая мощность короткого замыкания при коротком у впадин 20 кВ генератора Г-1 составит:

$$S_{к1} = \frac{1000}{0,561} + \frac{1000}{0,55} = 1780 + 1820 = 3600 \text{ Мва.}$$

Попутно отметим, что если бы оба генератора Г-1 и Г-2 были электрически связаны на напряжении 20 кВ, то эта мощность короткого замыкания возросла бы до 5600 Мва, т. е. в 1,55 раза. Этим примером наглядно иллюстрируется целесообразность присоединения генераторов к отдельным ветвям (цепям) разделенной обмотки

трансформатора, чем достигается существенное ограничение токов короткого замыкания при коротком в цепи каждого из этих генераторов.

От полученных величин мощностей короткого замыкания легко перейти к значениям сверхпереходных токов. Так, при коротком в

$$\text{точке К-1 } I''_n = \frac{6540}{\sqrt{3 \cdot 500}} = 7,55 \text{ кА};$$

$$\text{точке К-2 } I''_n = \frac{8400}{\sqrt{3 \cdot 230}} = 21 \text{ кА};$$

$$\text{точке К-3 } I''_n = \frac{3600}{\sqrt{3 \cdot 20}} = 104 \text{ кА}.$$

Задача 2-10

При тех же исходных данных, что и в задаче 2-9, определить¹ величины мощности короткого замыкания (соответствующей начальному сверхпереходному току) при трехфазном коротком замыкании в следующих пунктах схемы на рис. 2-7:

- на шинах 230 кВ станции Ст-2;
- на шинах 230, 115 и 10,5 кВ подстанции п/Ст-1.

Задача 2-11

Блок генератор—трансформатор—линия связан с системой, мощность которой практически бесконечно велика и ее напряжение 105 кВ сохраняется неизменным. Элементы этого блока характеризуются следующими данными:

генератор 117,5 Мва, 13,8 кВ, $\cos \varphi = 0,85$, $x''_d = 0,14$, $x_2 = 0,17$, $T_n = 0,38$ сек;

трансформатор 120 Мва, 121/13,8 кВ, $u_n = 10,5\%$, $x/r = 25,5$;

линия протяженностью 80 км, $x = 0,4$ Ом/км, провод АС-300.

Определить максимально возможное мгновенное значение тока генератора при его несинхронном включении в сеть, считая, что до такого включения он работал на холостом ходу с номинальным напряжением. Полученное значение тока сравнить с ударным током генератора при трехфазном коротком замыкании на его выводах, считая, что предварительно он работал с полной номинальной нагрузкой.

Решение. Примем за основную ступень сторону высшего напряжения трансформатора. Тогда индуктивные и активные сопротивления отдельных элементов блока в эквивалентной схеме замещения будут:

для линии

$$x = 0,4 \cdot 80 = 32 \text{ Ом}; r = 0,105 \cdot 80 = 8,4 \text{ Ом}$$

(для АС-300 $r = 0,105$ Ом/км);

для трансформатора

$$x = 0,105 \cdot \frac{121^2}{120} = 12,8 \text{ Ом}; r = \frac{12,8}{26,5} = 0,48 \text{ Ом};$$

¹ Рекомендуется использовать промежуточные результаты решения задачи 2-9.

для генератора

$$x''_d = 0,14 \cdot \frac{121^2}{117,5} = 17,5 \text{ Ом}; x_2 = 0,17 \cdot \frac{121^2}{117,5} = 21,2 \text{ Ом};$$

$$r = \frac{x_2}{\omega T_n} = \frac{21,2}{314 \cdot 0,38} = 0,18 \text{ Ом};$$

приведенное линейное напряжение генератора

$$\dot{U} = 13,8 \cdot \frac{121}{13,8} = 121 \text{ кВ}.$$

Наибольший ток несинхронного включения будет при сдвиге между напряжениями 180° , т. е.

$$I'' = \frac{121 + 105}{\sqrt{3}(17,5 + 12,8 + 32)} \cdot \frac{121}{13,8} = 18,4 \text{ кА}.$$

Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока

$$T_n = \frac{21,2 + 12,8 + 32}{314(0,18 + 0,48 + 8,4)} = 0,023 \text{ сек}.$$

Значение коэффициента

$$k_y = 1 + e^{-0,01/0,023} = 1,65,$$

следовательно, максимальное мгновенное значение тока при несинхронном включении

$$i_{\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot 1,65 \cdot 18,4 = 43 \text{ кА}.$$

Приведенное значение номинального тока генератора

$$\dot{I}_n = \frac{117,5}{\sqrt{3} \cdot 121} = 0,56 \text{ кА}.$$

Сверхпереходная э. д. с. генератора при его номинальной нагрузке, приведенная к стороне высшего напряжения трансформатора

$$\dot{E}'' = \sqrt{(121 \cdot 0,85)^2 + (121 \cdot 0,53 + \sqrt{3} \cdot 0,56 \cdot 17,5)^2} = 131 \text{ кВ}.$$

При трехфазном коротком замыкании на выводах генератора ударный коэффициент

$$k_y = 1 + e^{-0,01/0,023} = 1,98$$

и ударный ток

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 1,98 \cdot \frac{131}{\sqrt{3} \cdot 17,5} \cdot \frac{121}{13,8} = 107 \text{ кА}.$$

Таким образом, при данных условиях максимальный ток при несинхронном включении в $\frac{107}{43} = 2,5$ раза меньше ударного тока при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора.

Задача 2-12

Для условий схемы на рис. 2-11 определить величину внешней реактивности x_c (ом), при которой наибольшее возможное значение начального сверхпереходного тока при несинхронном включении генератора G в сеть выключателем B было бы таким же, что и начальный сверхпереходный ток генератора при трехфазном коротком замыкании на его выводах. При найденной величине x_c подсчитать максимальное мгновенное значение тока генератора при его несинхронном включении.



Система C характеризуется как источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 118 кВ; генератор G 117,5 Мва, $\cos \varphi = 0,85$, 10,5 кВ, $x''_d = 0,18$, $T_d = 0,42$ сек; до несинхронного включения работает на холостом ходу с номинальным напряжением; до короткого замыкания имеет сверхпереходную э. д. с., соответствующую номинальной нагрузке; трансформатор T 120 Мва, 121/10,5 кВ, $u_k = 10,5\%$. При оценке активного сопротивления внешней сети считать, что ударный коэффициент со стороны системы составляет 1,8.

Рис. 2-11. Схема к задаче 2-12.

Задача 2-13

Генератор G связан с системой C двумя повышающими трансформаторами $T-1$ и $T-2$ (рис. 2-12, а). Нужно установить, допустимо ли несинхронное включение генератора по возникающему при этом току, величина которого не должна превышать допустимых значений токов короткого замыкания как для генератора G , так и для каждого из трансформаторов.

Система C характеризуется эквивалентной реактивностью $x = 7$ ом, за которой приложено неизменное напряжение 115 кВ: генератор G 117,5 Мва, $\cos \varphi = 0,85$, 10,5 кВ, $x''_d = 0,22$; трансформатор $T-1$ 30 Мва, 118/10,5 кВ, $u_k = 10,5\%$; трансформатор $T-2$ 90 Мва, 118/10,5 кВ, $u_k = 10,5\%$.

Решение. На рис. 2-12, б приведена схема замещения, параметры элементов которой выражены в относительных единицах при $S_G = 100$ Мва, $U_{ст} = 10,5$ кВ, $U_{ст} = 118$ кВ, $I_{ст} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5$ ка.

Коль скоро ударные коэффициенты при различных включениях заданных элементов различаются сравнительно мало, то проверку условий несинхронного включения можно вести путем сравнения соответствующих величин сверхпереходного тока.

Наибольший сверхпереходный ток генератора, очевидно, имеет место при трехфазном коротком замыкании на его выводах, когда генератор предварительно работал с номинальной нагрузкой. При этом его относительная сверхпереходная э. д. с.

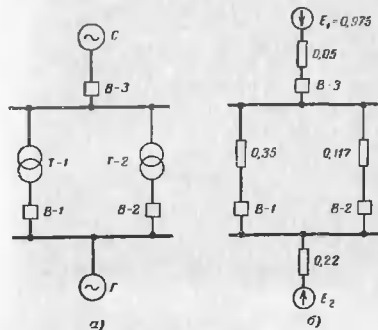


Рис. 2-12. К задаче 2-13. а — исходная схема; б — схема замещения.

$$E'' \approx 1 + 0,22 \cdot 0,53 = 1,12$$

(где $\sin \varphi = 0,53$) и величина сверхпереходного тока

$$I''_k = \frac{1,12}{0,22} = 5,1.$$

Для трансформаторов допустимые значения сверхпереходного тока (при базисных условиях) будут:

$$I'' = \frac{1}{0,35} = 2,86$$

и для $T-2$

$$I'' = \frac{1}{0,117} = 8,55.$$

Несинхронное включение генератора G предполагается при его работе на холостом ходу с номинальным напряжением. Поэтому в схеме замещения на рис. 2-12, б э. д. с. $E_2 = 1$.

Найдем наибольший сверхпереходный ток генератора G при его несинхронном включении на выключателе $B-3$, т. е. когда включены

оба трансформатора. В этом случае суммарная реактивность цепи будет:

$$x_{\Sigma} = 0,05 + (0,35 \neq 0,117) + 0,22 = 0,358$$

и

$$I''_{\text{ис}} = \frac{1 + 0,975}{0,358} = 5,5.$$

что для генератора недопустимо, так как превышает $I''_{\text{н}} = 5,1$. Нетрудно убедиться, что в каждом из трансформаторов при этом сверхпереходный ток будет меньше допустимого.

При несинхронном включении, когда трансформатор Т-2 отключен (отключен выключатель В-2), $x_{\Sigma} = 0,05 + 0,35 + 0,22 = 0,62$ и наибольший сверхпереходный ток

$$I''_{\text{ис}} = \frac{1 + 0,975}{0,62} = 3,18,$$

что допустимо для генератора, но уже недопустимо для трансформатора Т-1, так как этот ток больше 2,86 (см. выше).

Наконец, если произойдет несинхронное включение при отключенном трансформаторе Т-1, то $x_{\Sigma} = 0,05 + 0,117 + 0,22 = 0,387$ и наибольший сверхпереходный ток

$$I''_{\text{ис}} = \frac{1 + 0,975}{0,387} = 5,1.$$

что является уже допустимым как для генератора Г, так и для трансформатора Т-2.

Задача 2-14

Две системы С-1 и С-2 (рис. 2-13,а) связаны между собой линиями Л-1 (150 км, АСУ-400) и Л-2 (50 км, АСУ-300) и автотрансформатором АТ 180 Мва, 220/121/11 кВ, $u_{\text{НС}} = 26\%$, $u_{\text{СН}} = 18\%$. Каждую из этих систем практически можно рассматривать как источник бесконечной мощности с неизменным напряжением соответственно 230 и 115 кВ, считая, что по фазе эти напряжения совпадают. К третьей обмотке автотрансформатора АТ может быть подключен генератор Г 75 Мва, 10,5 кВ, $\cos \varphi = 0,85$, $x''_d = 0,21$, $T_g = 0,22$ сек.

Определить угол δ между напряжениями сети и генератора Г, при котором максимальное мгновенное значение тока генератора при его несинхронном включении в сеть не превзойдет ударный ток генератора при трехфазном коротком замыкании на его выводах. При этом следует считать, что до несинхронного включения генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением, а до короткого замыкания — с номинальной нагрузкой.

Решение. Проведем расчет в относительных единицах при $S_0 = 180$ Мва, $U_{\text{СН}} = 220$ кВ, и тогда $U_{\text{ЛП}} = 121$ кВ и $U_{\text{ЛНП}} = 11$ кВ.

На рис. 2-13,б приведена схема замещения, на которой указаны относительные величины э. д. с. источников и порядковые номера ее элементов. Значения сопротивлений этих элементов (после приве-

дения к базисным условиям) составят: $x_1 = 0,223$; $r_1 = 0,059$; $x_2 = 0,246$; $r_2 = 0,049$; $x_3 = 0,04$; $r_3 = 0,0012$; $x_4 = r_4 = 0$; $x_5 = 0,09$; $r_5 = 0,0028$; $x_6 = 0,456$; $r_6 = 0,0066$.

Эквивалентные сопротивления и э. д. с. обеих систем до выключения В составляют: $x_0 = 0,217$; $r_0 = 0,0297$ и $E_0 = 1,0$.

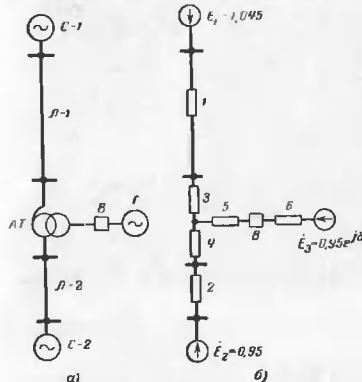


Рис. 2-13. К задаче 2-14.

а — исходная схема; б — схема замещения.

При несинхронном включении генератора результирующие сопротивления будут:

$$x_{\Sigma} = 0,217 + 0,456 = 0,673; \quad r_{\Sigma} = 0,0297 + 0,0066 = 0,0363.$$

Постоянная времени

$$T_{\text{а.в}} = \frac{0,673}{314 \cdot 0,0363} = 0,059 \text{ сек.}$$

и значение коэффициента

$$k = 1 + e^{-0,01/0,059} = 1,84.$$

Максимально возможное мгновенное значение тока при несинхронном включении генератора составит:

$$i_{\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot 1,84 \cdot \frac{1 + 0,95}{0,673} \cdot \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 11} = 71,4 \text{ кА.}$$

Ударный ток при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора составляет

$$i_k = \sqrt{2} (1 + e^{-0,01/0,22}) \frac{1,11}{0,21} \frac{75}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 60,5 \text{ кА,}$$

где сверхпереходная э. д. с.

$$E'' \approx U_n + Ix''_d \sin \varphi = 1 + 1,0,21 \cdot 0,53 = 1,11.$$

По заданному условию должно быть соблюдено неравенство

$$\sqrt{2} \cdot 1,84 \cdot \frac{(1 - 0,95e^{0,2})}{0,673} \frac{160}{\sqrt{3} \cdot 11} \leq 60,5,$$

откуда искомое значение угла

$$\delta \leq 116^\circ.$$

Задача 2-15

На схеме рис. 2-14,а показана станция, суммарная номинальная мощность которой 120 Мва. Номинальное напряжение ее генерато-

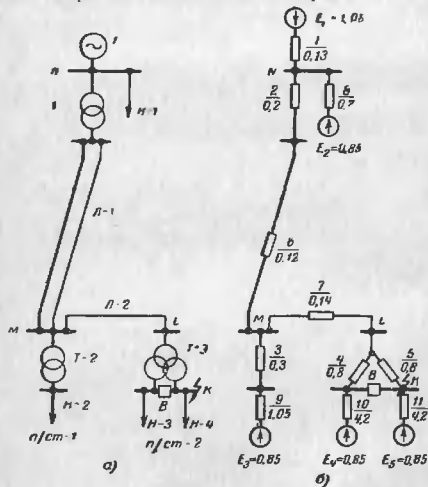


Рис. 2-14. К задаче 2-15.

а — исходная схема; б — схема замещения.

ров 10,5 кВ, а их относительная реактивность $x''_d = 0,13$. Станция несет полную номинальную нагрузку при $\cos \varphi = 0,8$. Присоединенные к станции потребители (нагрузки) можно рассматривать как обобщенные промышленные нагрузки, принимая для их параметров в начальный момент переходного процесса средние значения, т. е. $x'' = 0,35$ и $E'' = 0,85$. Мощности отдельных нагрузок составляют: $H-1$ 60 Мва, $H-2$ 40 Мва, $H-3$ и $H-4$ по 10 Мва.

Остальные элементы схемы характеризуются следующими параметрами:

трансформатор Т-1 60 Мва, 115/10,5 кВ, $u_n = 10\%$;

трансформатор Т-2 40 Мва, 115/6,3 кВ, $u_n = 10\%$;

трансформатор Т-3 30 Мва, 115/6,3/6,3 кВ, $u_{ВН} = 10\% =$

$= u_{ВН2}$, $u_{ВН3} = 20\%$;

линии Л-1 66 км, Л-2 38,5 км, $x = 0,4$ Ом/км одной цепи.

При трехфазном коротком замыкании на стороне пониженного напряжения подстанции *п/ст-2* (точка К) требуется определить величину пачального сверхпереходного тока в месте короткого и его распределение в схеме. Решение провести для двух случаев, когда а) выключатель В отключен и б) выключатель В включен, при этом выполнить также приближенное решение без учета нагрузок, кроме непосредственно связанных с местом короткого замыкания.

Всеми активными сопротивлениями в расчете пренебречь. Решение. При $S_G = 120$ Мва и $U_G = U_{ср}$ (на каждой ступени напряжения) относительные реактивности элементов схемы и участвующие э. д. с. имеют величины, указанные непосредственно на схеме замещения рис. 2-14,б. В частности, э. д. с. генераторов станции определена как $E_1 = E'' = 1 + 0,13 \cdot 0,6 = 1,08$, где $\sin \varphi = 0,6$.

Для последовательно соединенных элементов имеем:

$$x_{12} = 0,2 + 0,12 = 0,32; \quad x_{13} = 0,3 + 1,05 = 1,35;$$

$$x_{14} = 0,8 + 4,2 = 5.$$

Проводим дальнейшее упрощение схемы, приводя ее к элементарному виду относительно точки короткого

$$x_{15} = 0,13/0,7 = 0,11; \quad E_6 = \frac{1,08 \cdot 0,7 + 0,85 \cdot 0,13}{0,13 + 0,7} = 1,04;$$

$$x_{16} = 0,11 + 0,32 = 0,43; \quad x_{17} = 0,43/1,35 = 0,33;$$

$$E_7 = 1,04/0,85 = 1^*; \quad x_{18} = 0,33 + 0,14 = 0,47.$$

Дальнейшие преобразования зависят от положения выключателя В на *п/ст-2*.

а) Выключатель В отключен

$$x_{19} = 0,47/0,85 = 0,56; \quad E_8 = 1/0,85 = 0,99; \quad x_{20} = 0,43 + 0,8 = 1,23.$$

* Здесь и далее для упрощения запись нахождения эквивалентной э. д. с.

Следовательно, сверхпереходный ток со стороны трансформатора $T-3$

$$I'' = \frac{0,99}{1,23} = 0,81,$$

то же от $H-4$

$$I'' = \frac{0,85}{4,2} = 0,2,$$

и в месте короткого

$$I''_к = 0,81 + 0,2 = 1,01$$

или

$$I''_к = 1,01 \cdot \frac{120}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 1,01 \cdot 11 = 11,1 \text{ кА}.$$

Найдем распределение тока в схеме. Напряжение узла L составляет

$$U_L = 0,81 \cdot 0,8 = 0,648,$$

и ток от нагрузки $H-3$

$$I''_{H-3} = \frac{0,85 - 0,648}{5} = 0,04;$$

ток в элементе 7

$$I''_7 = 0,81 - 0,04 = 0,77;$$

напряжение узла M

$$U_M = 0,648 + 0,14 \cdot 0,77 = 0,75;$$

ток от нагрузки $H-2$

$$I''_{H-2} = \frac{0,85 - 0,75}{1,85} = 0,07;$$

ток в элементах b и 2

$$I''_a = 0,77 - 0,07 = 0,7;$$

напряжение узла N

$$U_N = 0,75 + 0,7 \cdot 0,32 = 0,97;$$

ток генератора

$$I''_Г = \frac{1,08 - 0,97}{0,13} = 0,85,$$

в ток, потребляемый нагрузкой $H-1$,

$$I''_{H-1} = 0,85 - 0,7 = 0,15.$$

Для большей наглядности на рис. 2-15 показаны эпюры напряжений и токов в рассматриваемой схеме. Как видно, нагрузки $H-2$, $H-3$ и $H-4$ являются дополнительными источниками питания короткого замыкания, причем их участие тем интенсивнее, чем ближе они и месту короткого. Так, равные по мощности нагрузки $H-3$ и $H-4$ посылают токи, отличающиеся в 5 раз, что обусловлено резким различием их удаленности относительно места короткого. Мощность

нагрузки $H-2$ в 4 раза превышает мощность нагрузки $H-3$, но благодаря большей удаленности ток от нагрузки $H-2$ приблизительно лишь в 2 раза больше тока от нагрузки $H-3$. Наконец, нагрузка $H-1$, у которой напряжение при коротком упало совсем незначительно, продолжает потреблять ток из сети.

Следует подчеркнуть, что относительное участие таких обобщенных промышленных нагрузок в образовании максимального

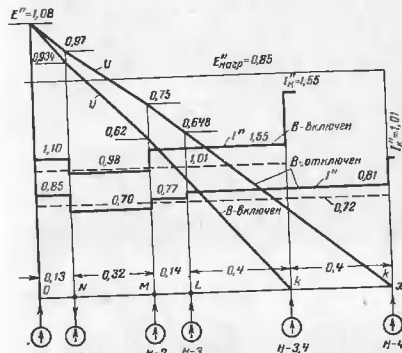


Рис. 2-15. К задаче 2-15. Эпюры напряжений и токов в схеме при коротком замыкании.

мгновенного значения (ударного) тока меньше, так как затухание их обеих составляющих (периодической и аperiodической) токов происходит значительно быстрее, чем тех же составляющих токов от синхронных и крупных асинхронных машин.

Если пренебречь всеми нагрузками, кроме нагрузки $H-4$, то приближенное значение сверхпереходного тока в месте короткого будет:

$$I''_к = \frac{1}{0,13 + 0,32 + 0,14 + 0,8} + \frac{0,85}{4,2} = 0,72 + 0,2 = 0,92,$$

т. е. меньше на

$$\frac{1,01 - 0,92}{1,01} \cdot 100 = 8,9\%.$$

Для сравнения на рис. 2-15 пунктиром проведена прямая, отвечающая приближенному значению сверхпереходного тока, поступающего к месту короткого через трансформатор $T-3$. Такая точность приближенного подсчета часто является достаточной для решения ряда технических вопросов и задач.

и ее э. д. с. $E_1 = 107/110 = 0,97$. Для трансформаторов остаются их заданные значения $x_2 = x_3 = 0,105$. Реактивность реактора

$$x_4 = 0,08 \frac{1,75}{1} \left(\frac{6}{6,6} \right) = 0,127.$$

Реактивность синхронного двигателя

$$x_6 = x_8 = \frac{1}{5,3} \frac{20}{2,9} \left(\frac{6}{6,6} \right)^2 = 1,08,$$

где номинальная полная мощность двигателя

$$S_{11} = \frac{2,5}{0,9 \cdot 0,958} = 2,9 \text{ Мва},$$

его э. д. с.

$$E'' \approx \frac{6}{6,6} + \frac{2,9}{20} \cdot 1,08 \cdot 0,435 = 0,98.$$

Реактивность и э. д. с. нагрузок заданы при $U_{cp} = 6,3$ кв, поэтому их значения при базисных условиях будут:

$$x_7 = x_8 = 0,35 \frac{20}{10} \left(\frac{6,3}{6,6} \right)^2 = 0,64 \text{ и } E_6 = E_8 = 0,85 \frac{6,3}{6,6} = 0,81.$$

В решении поставленных вопросов двигатель *СД-1* и нагрузка *Н-1*, очевидно, не играют роли и их можно отбросить. Заменяем двигатель *СД-2* и нагрузку *Н-2* эквивалентной ветвью с э. д. с.

$$E_7 = \frac{0,98 \cdot 0,64 + 0,81 \cdot 1,08}{0,64 + 1,08} = 0,875$$

и реактивностью $x_9 = 1,08/0,64 = 0,402$.

Далее преобразуем треугольник с элементами 2, 3 и 4 в эквивалентную звезду (см. пунктир на рис. 2-17,б), реактивности лучей которой будут:

$$x_9 = \frac{0,105^2}{2 \cdot 105 + 0,127} = 0,033 \text{ и } x_{10} = x_{11} = \frac{0,105 \cdot 0,127}{2 \cdot 0,105 + 0,127} = 0,04.$$

Ветвь от системы

$$x_{12} = 0,04 + 0,033 = 0,073$$

и от здоровой секции шня подстанции

$$x_{13} = 0,402 + 0,04 = 0,442,$$

их эквивалентная э. д. с.

$$E_8 = \frac{0,97 \cdot 0,442 + 0,875 \cdot 0,073}{0,073 + 0,442} = 0,958$$

и

$$x_{14} = 0,073/0,442 = 0,063.$$

Ток, поступающий к месту короткого по элементу 10, будет

$$I_{10} = \frac{0,958}{0,063 + 0,04} = 9,3.$$

Для выхождения требуемых токов нужно теперь развернуть схему. Напряжение узла *N*

$$U = 9,3 \cdot 0,04 = 0,372.$$

Ток от системы

$$I_1 = I_8 = \frac{0,97 - 0,372}{0,073} = 8,2$$

и напряжение узла *M*

$$U = 0,372 + 8,2 \cdot 0,033 = 0,643.$$

Ток от 2-й секции

$$I_{11} = 9,3 - 8,2 = 1,1.$$

Искомое остаточное напряжение

$$U = 0,372 + 1,1 \cdot 0,04 = 0,41,$$

что от 6 кв составляет

$$0,41 \frac{6,6}{6} \cdot 100 = 45,1\%.$$

Искомые токи будут:

через трансформатор *T-1*

$$I = \frac{0,643}{0,105} = 6,1$$

или $I = 6,1 \cdot 1,75 = 10,7$ ка;

через реактор *P*

$$I = \frac{0,41}{0,127} = 3,2$$

или $I = 3,2 \cdot 1,75 = 5,6$ ка.

Ток от источников, приключенных к 2-й секции шня (здоровой), составляет

$$\frac{9,3 - 8,2}{9,3} \cdot 100 = 11,8\%.$$

Решение данной задачи можно также выполнить, не прибегая к преобразованию треугольника в звезду. В самом деле, узел трехфазного короткого замыкания можно разрезать и элемент 4 рассмотреть как ветвь с э. д. с., равной нулю (рис. 2-17,в). Теперь

нужно три ветви в узле L заменить одной эквивалентной, реактивность которой будет $x_0 = 0,127/1,08/0,64 = 0,097$ в э. д. с.

$$E_a = \frac{(0,98/1,08) + (0,81/0,64)}{1/0,097} = 0,212.$$

Реактивность этой ветви до узла M будет:

$$x_{10} = 0,097 + 0,105 = 0,202.$$

Замена ветвей с элементами I и 10 приводит к эквивалентной ветви с реактивностью $x_{11} = 0,04/0,202 = 0,0334$ в э. д. с.

$$E_9 = \frac{0,97 \cdot 0,202 + 0,212 \cdot 0,04}{0,202 + 0,04} = 0,845.$$

Следовательно, искомый ток в трансформаторе $T-I$ будет:

$$I = \frac{0,845}{0,0334 + 0,105} = 6,1.$$

т. е. та же величина, которая была получена ранее.

Развертывая схему, нетрудно найти остальные требуемые величины. Следует отметить, что прием расщепления схемы по месту трехфазного короткого замыкания особенно удобен, если требуется определить токи в одной или даже нескольких ветвях, примыкающих к месту короткого.

Обратимся теперь к подсчету при отключенном секционном выключателе B . Здесь можно использовать схему на рис. 2-17, а, исключив из нее ветвь с элементом 4. Ветвь от неповрежденной секции шин до узла M имеет $x_{10} = 0,402 + 0,105 = 0,507$ и $E_7 = 0,875$.

Заменяя две ветви эквивалентной, найдем:

$$x_{11} = 0,507/0,04 = 0,037$$

и

$$E_a = \frac{0,97 \cdot 0,507 + 0,875 \cdot 0,04}{0,507 + 0,04} = 0,96.$$

Ток в трансформаторе $T-I$

$$I = \frac{0,96}{0,037 + 0,105} = 6,75 \text{ или } I = 6,75 \cdot 1,75 = 11,8 \text{ кА,}$$

т. е. на 10,7% больше, чем при включенном выключателе B .

Напряжение в узле M $U = 6,75 \cdot 0,105 = 0,71$, и остаточное напряжение на здоровой секции шин

$$U = 0,71 + \frac{0,875 - 0,71}{0,507} \cdot 0,105 = 0,74.$$

что от б/ж составляет $0,74 \cdot \frac{6,6}{6} \cdot 100 = 81,4\%$, т. е. в 1,8 раза больше, чем при включенном выключателе B .

84

Задача 2-19

Для станции, схема которой приведена на рис. 2-18, а, требуется проверить допустимость несинхронного включения генератора по величине возникающего в нем тока. Для этого сначала нужно установить, на каком из выключателей ($B-1$ или $B-2$) такое включение для генератора является тяжелее, и затем сравнить максимальное мгновенное значение тока генератора при несинхронном включении с его ударным током при трехфазном коротком замыкании на выводах.

Система S характеризуется эквивалентной реактивностью $x = 22 \text{ ом}$, за которой приложено неизменное напряжение 230 кВ.

Генератор G 100 Мва, $\cos \varphi = 0,85$, 13,6 кВ, $x''_d = 0,25$, $T_a = 0,2 \text{ сек}$.

Автоматический выключатель AT 180 Мва, 242/121/13,8 кВ, $u_{BC} = 18\%$, $n_{III} = 25\%$ и $u'_{CH} = 7\%$.

Нагрузка H 400 Мва, $x'' = 0,35$, $E'' = 0,85$ (при $U_{CP} = 115 \text{ кВ}$).

Решение. На рис. 2-18, б показана схема замещения, где параметры всех элементов выражены в относительных единицах при $S_0 = 100 \text{ Мва}$, $U_{01} = 242 \text{ кВ}$, $U_{011} = 121 \text{ кВ}$ и $U_{0111} = 13,8 \text{ кВ}$. Отметим, что приведение параметров нагрузки H сделано следующим образом:

$$x_a = 0,35 \left(\frac{115}{121} \right)^2 = 0,316 \text{ и } E_a = 0,85 \cdot \frac{115}{121} = 0,81.$$

Сверхпереходная э. д. с. генератора, считая, что он работал в номинальной нагрузке, будет:

$$E'' = E_1 \approx 1 + 0,25 \cdot 0,53 = 1,13$$

где $0,53 = \sin \varphi$.

При несинхронном включении на выключателе $B-1$ эквивалентная реактивность и э. д. с. $x_0 = (0,25 + 0,039)/0,316 = 0,151$ и $E_0 = 1,13/0,81 = 0,98$.

Наибольший сверхпереходный ток в выключателе $B-1$

$$I''_{sc} = \frac{0,98 + 0,95}{0,151 + 0,1 + 0,038} = 6,67.$$

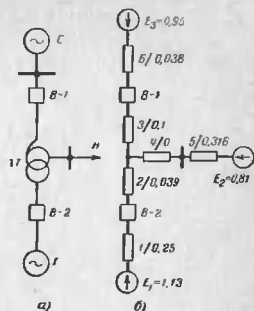


Рис. 2-18. К задаче 2-19.

а — исходная схема; б — схема замещения.

Напряжение в узле $U = (0,1 + j0,038)6,67 - 0,95 = -0,03$. Ток в генераторе

$$I''_{гс} = \frac{1,13 - (-0,03)}{0,25 + j0,039} = 4,01.$$

При несинхронном включении на выключателе В-2: эквивалентные реактивности и о. д. с.:

$$x_0 = (0,1 + j0,038) / 0,316 = 0,096 \text{ и } E_0 = 0,95 / 0,81 = 0,91.$$

Наибольший сверхпереходный ток в генераторе в данном случае определяем, принимая $E'' = 1$, т. е.

$$I''_{гс} = \frac{1 + 0,91}{0,25 + j0,039 + 0,096} = 4,96.$$

Как видно, при включении В-2 ток в генераторе Г значительно больше, чем при включении В-1. Это различие вызвано влиянием подключенной нагрузки, которая может существенно снижать ток в генераторе при несинхронном включении.

Далее для оценки максимального мгновенного значения тока при несинхронном включении нужно предварительно найти значение эквивалентной постоянной времени T_{Σ} затухания апериодической слагающей тока. Установим значения активных сопротивлений элементов схемы:

$$r_1 = \frac{0,25}{0,2 \cdot 314} = 0,4 \cdot 10^{-2};$$

для автотрансформатора принимаем $x/r = 33$, тогда

$$r_2 = \frac{0,039}{33} = 0,12 \cdot 10^{-2}; \quad r_3 = \frac{0,1}{33} = 0,3 \cdot 10^{-2};$$

$r_4 = 0$; для нагрузки $x/r = 4,5$ и, следовательно,

$$r_5 = \frac{0,316}{4,5} = 7 \cdot 10^{-2},$$

по сравнению с другими элементами можно принять $r_6 = \infty$; для системы $r_0 = 0$.

Суммарное активное сопротивление цепи

$$r_{\Sigma} = (0,4 + 0,12 + 0,3) \cdot 10^{-2} = 0,82 \cdot 10^{-2}$$

и эквивалентная постоянная времени

$$T_{\Sigma, \text{ак}} = \frac{0,096 + 0,289}{314 \cdot 0,82} \cdot 10^2 = 0,15 \text{ сек.}$$

Соответственно ударный коэффициент

$$k_{\text{уд}} = 1 + e^{-0,01/0,15} = 1,93.$$

Максимальное мгновенное значение тока при несинхронном включении В-2

$$i_{\text{макс}} = 1,93 \sqrt{2} \cdot 4,96 \cdot \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 56,9 \text{ кА};$$

то же при включении В-1 $i_{\text{макс}} = 45,5$ кА, в то время как ударный ток генератора при трехфазном коротком замыкании на его выводах составляет:

$$i_{\text{г}} = (1 + e^{-0,01/0,2}) \sqrt{2} \cdot \frac{1,13}{0,25} \cdot \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 52,5 \text{ кА}.$$

Таким образом, несинхронное включение нагруженного генератора, т. е. включение В-1, менее опасно по току, чем трехфазное короткое замыкание на выводах, а включение холостого генератора, т. е. включение В-2, напротив, более опасно по току, чем указанное короткое замыкание.

Задача 2-20

На узловой подстанции схемы на рис. 2-19а установлен понижающий трансформатор Т-1 120 Мва, 230/10,5 кВ, $u_n = 12\%$, обмотка низшего напряжения которого разделена на две параллельные ветви. Каждая из последних присоединена к своей секции шин, которые могут быть соединены выключателем В. В нормальных условиях этот выключатель отключен. Синхронные компенсаторы и нагрузки, присоединенные к этим секциям шин, характеризуются следующими данными:

синхронные компенсаторы СК-1 и СК-2 одинаковые, каждый 30 Мва, 10,5 кВ, $x''_d = 0,22$, $T_a = 0,24$ сек;
нагрузки Н-2 и Н-3 одинаковые, каждая 44 Мва, являются обобщенной промышленной нагрузкой, для которой $x'' = 0,35$ и $I'' = 0,85$.

Для остальных элементов схемы известны следующие параметры:

генератор Г-1 166,5 Мва, 18 кВ, $\cos \varphi = 0,85$, $x''_d = 0,122$;
генератор Г-2 75 Мва, 10,5 кВ, $\cos \varphi = 0,8$, $x''_d = 0,286$;
автотрансформатор АТ-1 180 Мва, 230/115/18 кВ, $u_{\text{НС}} = 12,4\%$, $u''_{\text{Н1}} = 11,6\%$, $u_{\text{СН}} = 17,7\%$;

трансформатор Т-2 80 Мва, 230/10,5 кВ, $u_n = 12\%$;
линии Л-1 250 км, Л-2 140 км, Л-3 50 км, $x = 0,4$ ом/км;
система С — источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 230 кВ.

В нормальном режиме генераторы Г-1 и Г-2 и оба синхронных компенсатора СК-1 и СК-2 работают с полной номинальной нагрузкой.

Требуется рассмотреть начальный момент переходного процесса для следующих случаев:

а) внезапное трехфазное короткое замыкание на одной из секций шин пониженного напряжения узловой подстанции при отключенном выключателе В; при этом необходимо выявить влияние присоединенной нагрузки;

б) отключение одной из ветвей расцепленной обмотки пониженного напряжения трансформатора *T-1* узловой подстанции с последующим немедленным включением секционного выключателя *B*.

Решение. Используемая в дальнейшем схема замещения представлена на рис 2-19,б. Здесь величины реактивностей и э.д.с. выражены в процентах при базисных условиях, за которые приняты

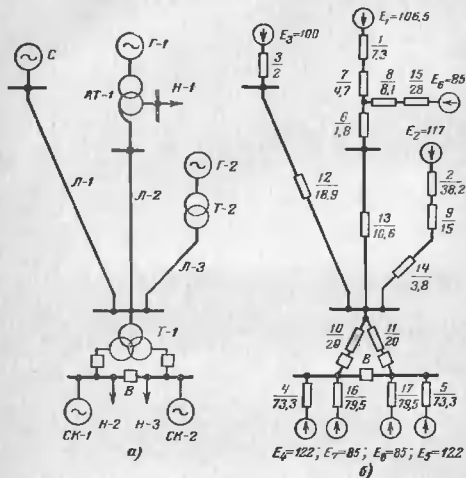


Рис. 2-19. К задаче 2-20.

а — исходная схема; б — схема замещения.

$S_0 = 100$ Мва и $U_0 = U_{ср}$ на каждой ступени трансформации, т. е. 230, 115, 18 и 10,6 кВ, отклонениями которых заданы соответствующие коэффициенты трансформации.

Значения э. д. с. подсчитаны приближенно в соответствии с заданными условиями предшествующей нагрузки. Так, для генератора *G-1* $E'' = E_1 = 100 + 12,2 \cdot 1 \cdot 0,53 = 106,5\%$; для генератора *G-2* $E'' = E_2 = 100 + 28,6 \cdot 1 \cdot 0,6 = 117\%$; синхронных компенсаторов *СК-1* и *СК-2* $E'' = E_3 = E_4 = 100 + 22 \cdot 1 = 122\%$; системы *S* $E_5 = 100\%$ и для каждой нагрузки *H-1*, *H-2* и *H-3* $E_6 = E_7 = E_8 = 85\%$.

а) Пусть трехфазное короткое замыкание произошло на второй секции шин 10,5 кВ узловой подстанции. После небольших преобразований нетрудно найти, что эквивалентная реактивность ветвей системы *S*, генератора *G-1* (включая нагрузку *H-1*) и генератора *G-2*

составляет $x_{16} = 8,9\%$, и за ней приложена эквивалентная э. д. $E_{10} = 103\%$. Эквивалентная реактивность синхронного компенсатора и нагрузки будет:

$$x_{10} = 73,3/79,5 = 38\%$$

и их эквивалентная э. д. с.

$$E_{10} = \frac{122 \cdot 79,5 + 85 \cdot 73,3}{73,3 + 79,5} = 103\% = E_9.$$

Эквивалентная реактивность до точки короткого с стороны трансформатора *T-1* будет:

$$x_{10} = (38 + 20)/8,9 + 20 = 7,7 + 20 = 27,7\%$$

Сверхпереходный ток, поступающий к месту короткого через трансформатор,

$$I'' = \frac{103}{27,7} = 3,72.$$

Остаточное напряжение на здоровой секции шин составляет:

$$U = 3,72 \left(20 + \frac{7,7}{58} \cdot 20 \right) = 84,6\%;$$

следовательно, нагрузка *H-2* (где $E_7 = 85\%$) в начальный момент короткого практически никакого участия не проявляет.

Сверхпереходные токи:

от синхронного компенсатора *СК-2*

$$I'' = \frac{122}{73,3} = 1,67;$$

от нагрузки *H-3*

$$I'' = \frac{85}{79,5} = 1,07.$$

Поскольку трансформатор *T-1* большой мощности, то для поступающего через него тока можно принять $k_T = 1,8$; для синхронного компенсатора в соответствии с заданным значением $T_n = 0,24$ сек $k_T = 1,96$ и, наконец, для тока от обобщенной нагрузки *H-3* $k_T = 1$.

Таким образом, ударный ток в месте короткого замыкания определяется суммой токов от этих ветвей и составляет:

$$i_3 = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 3,72 \cdot 5,5 + \sqrt{2} \cdot 1,96 \cdot 1,67 \cdot 5,5 + \sqrt{2} \cdot 1,07 \cdot 5,5 = 52 + 25,6 + 8,4 = 86 \text{ кА},$$

$$\text{где } I_0 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА}.$$

Как видно, доля участия нагрузки $H-3$ составляет около 40%.
 б) Допустим, что произошло отключение трансформатора $T-1$ от второй секции шин 40,5 кВ. Тогда, используя промежуточные результаты подсчета, приведенного в решении п. а), найдем эквивалентную реактивность схемы относительно первой секции шин

$$x_{21} = (8,9 + 20)/38 = 16,4\%$$

за которой приложена эквивалентная э. д. с. $E = 103$ кВ.

Наибольший сверхпереходный ток, который может возникнуть при включении выключателя B , очевидно, будет в том случае, если пренебречь затуханием сверхпереходных э. д. с. синхронных машин и нагрузок и считать, что э. д. с. со обеих сторон данного выключателя находятся в противофазе. Соответственно этому имеем:

$$I' = \frac{103 - (-103)}{16,4 + 38} = 3,79$$

Напряжение на шинах при таком включении будет:

$$U = 103 - 3,79 \cdot 16,4 = 41\%$$

и сверхпереходные токи в синхронных компенсаторах составят:

$$CK-I I' = \frac{1122 - 41}{73,3} = 1,1$$

что меньше, чем при коротком замыкании на его выводах, $I''_K = 1,67$ (см. выше);

$$CK-II I' = \frac{41 - (-1122)}{73,3} = 2,22$$

что, напротив, превышает сверхпереходный ток при коротком замыкании на выводах $I''_K = 1,67$.

Задача 2-21

Элементы схемы на рис. 2-20 характеризуются следующими данными:

генератор G 75 Мва, 6,3 кВ, $x''_d = 0,195$, $x_2 = 0,257$, $T_a = 0,367$ сек;
 трансформатор $T-1$ 40 Мва, 121/6,3 кВ, $u_k = 10,5\%$, $P_K = 222$ квт;
 трансформатор $T-2$ 25 Мва, 105/6,3 кВ, $u_k = 10,5\%$, $P_K = 180$ квт;
 линия L 110 км, провод АС-240, $x = 0,38$ ом/км, $r = 0,131$ ом/км;
 реактор P 6 кВ, 200 а, $x = 4\%$, $P_K = 1,8$ квт/фаза;
 кабель $KБ$ 300 м, А-3х120, $x = 0,069$ ом/км, $r = 0,27$ ом/км;
 асинхронный двигатель АД 1800 квт, 6 кВ, $\cos \varphi = 0,88$, $\eta = 95,1\%$, кратности пускового тока $I_{пуск} = 6,2$, момента $M_{пуск} = 1$, $k_M = 1,7$.

Требуется определить максимальное мгновенное значение тока при пуске двигателя АД и развиваемый им пусковой момент (в долях от номинального) для двух случаев, когда:

а) питание двигателя осуществляется по схеме на рис. 2-20;
 б) цепь двигателя (включая реактор и кабель) питается от шин пониженного напряжения трансформатора $T-2$.

Считать, что до пуска двигателя генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Решение. Проведем расчет в мнимоважных единицах, при этом элементы на других ступенях напряжения будут приводить к стороне генератора. Найдем индуктивные и активные сопротивления каждого элемента схемы:

$$\text{генератор } x''_d = 0,195 \cdot \frac{6,3^2}{75} = 0,103 \text{ ом}; \text{ активное сопротивление определяем из выражения для постоянной времени}$$

$$T_a = \frac{x_2}{\omega r},$$

где

$$x_2 = 0,257 \cdot \frac{6,3^2}{75} = 0,135 \text{ ом};$$

следовательно,

$$r = \frac{0,136}{314 \cdot 0,367} = 0,0011 \text{ ом};$$

трансформатор $T-1$

$$x = 0,105 \cdot \frac{6,3^2}{40} = 0,104 \text{ ом}; r = \frac{P_K}{3 \cdot I_n^2} = P_K \left(\frac{U_n}{S_n} \right)^2 = 0,222 \left(\frac{6,3}{40} \right)^2 = 0,0065 \text{ ом};$$

трансформатор $T-2$

$$x = 0,105 \cdot \frac{105^2}{25} \left(\frac{6,3}{121} \right)^2 = 0,221 \text{ ом};$$

$$r = 0,180 \cdot \frac{105^2}{25} \left(\frac{6,3}{121} \right)^2 = 0,0086 \text{ ом};$$

$$\text{линия } L \quad x = 0,38 \cdot 110 \left(\frac{6,3}{121} \right)^2 = 0,113 \text{ ом}; r = 0,131 \cdot 110 \cdot \left(\frac{6,3}{121} \right)^2 = 0,039 \text{ ом};$$

реактор P

$$x = 0,04 \cdot \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 200} = 0,693 \text{ ом}; r = \frac{1800}{200^2} = 0,045 \text{ ом};$$

кабель $KБ$

$$x = 0,069 \cdot 0,3 = 0,021 \text{ ом}; r = 0,27 \cdot 0,3 = 0,081 \text{ ом};$$

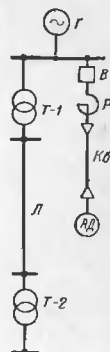


Рис. 2-20. Схема к задаче 2-21.

асинхронный двигатель АД — его номинальная мощность (полная)

$$S_n = \frac{1600}{0,88 \cdot 0,951} = 1910 \text{ кВА}$$

и номинальный ток

$$I_n = \frac{1910}{\sqrt{3} \cdot 6} = 184 \text{ а};$$

реактивность при пуске

$$x = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 5,2 \cdot 184} = 3,62 \text{ ом};$$

по заданной величине $k_{\Sigma} = 1,7$ находим постоянную времени T_a из равенства $1,7 = 1 + e^{-0,01/T_a}$, откуда $T_a = 0,0278 \text{ сек}$ и, следовательно, активное сопротивление

$$r = \frac{3,62}{314 \cdot 0,0278} = 0,415 \text{ ом}.$$

а) При пуске по схеме на рис. 2-20 результирующие сопротивления будут:

$$x_{\Sigma} = 0,103 + 0,693 + 0,021 + 3,62 = 4,437 \text{ ом};$$

$$r_{\Sigma} = 0,0011 + 0,045 + 0,081 + 0,415 = 0,5621 \text{ ом}.$$

Так как $x_{\Sigma} \gg r_{\Sigma}$, то учет r_{Σ} производим только при определении T_a .
Периодическая слагающая тока при пуске составляет:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 4,437} = 820 \text{ а};$$

напряжение на выводах двигателя в момент пуска

$$U = \sqrt{3} \cdot 820 \cdot 3,62 = 5100 \text{ в}.$$

Относительная величина развиваемого двигателем пускового момента будет:

$$M_{\text{пуск}} = \left(\frac{5,1}{6}\right)^2 = 0,72,$$

т. е. меньше номинального на 28%.

Величина постоянной времени

$$T_a = \frac{4,437}{314 \cdot 0,5621} = 0,026 \text{ сек}$$

и соответственно максимальное мгновенное значение пускового тока будет:

$$i_{\text{макс}} = \sqrt{2} (1 + e^{-0,01/(0,026)}) 820 = \sqrt{2} \cdot 1,68 \cdot 820 = 1950 \text{ а}.$$

б) Сопротивления цепи двигателя $x = 0,003 + 0,021 + 3,62 = 3,644 \text{ ом}$ и $r = 0,045 + 0,081 + 0,415 = 0,551 \text{ ом}$, после переноса их на трансформатор Т-2 они должны быть приведены к стороне генератора, т. е. их приведенные значения будут:

$$x = 4,334 \left(\frac{105}{6,6}\right)^2 \left(\frac{6,3}{121}\right)^2 = 2,96 \text{ ом};$$

$$r = 0,551 \left(\frac{105}{6,6}\right)^2 \left(\frac{6,3}{121}\right)^2 = 0,378 \text{ ом}.$$

Результирующие сопротивления в этом случае будут:

$$x_{\Sigma} = 0,103 + 0,104 + 0,113 + 0,221 + 2,96 = 3,501 \text{ ом};$$

$$r_{\Sigma} = 0,0011 + 0,0055 + 0,039 + 0,0086 + 0,378 = 0,4322 \text{ ом}.$$

Приведенный пусковой ток (пренебрегая r_{Σ})

$$I_{\text{пуск}} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 3,501} = 1040 \text{ а};$$

его значение в цепи двигателя

$$I_{\text{узел}} = 1040 \left(\frac{6,3}{121}\right) \left(\frac{105}{6,6}\right) = 860 \text{ а}.$$

При постоянной времени

$$T_a = \frac{3,501}{314 \cdot 0,4322} = 0,0258 \text{ сек},$$

т. е. практически той же, что и в предыдущем случае, максимальное мгновенное значение пускового тока будет:

$$i_{\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot 1,68 \cdot 860 = 2050 \text{ а}.$$

Напряжение на выводах двигателя в момент пуска

$$U = \sqrt{3} \cdot 860 \cdot 3,62 = 5350 \text{ в}.$$

Относительная величина развиваемого двигателем пускового момента будет:

$$M_{\text{пуск}} = \left(\frac{5,35}{6}\right)^2 = 0,8,$$

т. е. на 20% меньше номинального.

На первый взгляд получился как бы парадоксальный результат. Хотя удаленность двигателя от генератора увеличилась, тем не менее условия пуска двигателя стали лучше. Нетрудно заметить, что это обусловлено установленными коэффициентами трансформации трансформаторов Т-1 и Т-2, при которых не только компенсируются

падения напряжения в этих трансформаторах и линии, но получается большее напряжение непосредственно у двигателя.

Разумеется, если изменить коэффициенты трансформации так, чтобы их произведение равнялось единице, например $\left(\frac{115}{6,6}\right) \left(\frac{6,3}{105}\right)$, то никакое приведение цепи двигателя к стороне генератора не требуется и общее сопротивление будет:

$$x_{\Sigma} = 4,437 + 0,104 + 0,113 + 0,221 = 4,875 \text{ ом,}$$

при котором $I_{\text{пуск}} = 735 \text{ а}$ и $M_{\text{пуск}} = 0,58$, т. е. значительно меньше, чем в первом случае.

Задача 2-22

От шин 6 кв понижающей подстанции (рис. 2-21,а) питаются два одинаковых асинхронных двигателя АД-1 и АД-2, каждый из

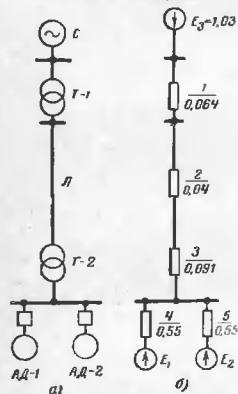


Рис. 2-21. К задаче 2-22.

а — исходная схема; б — схема замещения.

Решение. Примем $S_6 = 7,5 \text{ Мва}$ и $U_{6\text{кв}} = 6 \text{ кв}$. Тогда базисные напряжения на других ступенях будут:

$$U_{0,6\text{кв}} = 6 \cdot \frac{36,8}{6,6} = 33,4 \text{ кв} \quad \text{и} \quad U_{0,3\text{кв}} = 33,4 \cdot \frac{115,5}{37} = 104 \text{ кв.}$$

каждый из которых имеет параметры: 2000 квт , 6 кв , $\cos \varphi = 0,83$, $\eta = 92\%$, $I_{\text{пуск}} = 5,2$. Остальные элементы схемы характеризуются следующими данными:

трансформатор Т-1 15 Мва , $115,5/37 \text{ кв}$, $u_k = 10,5\%$;

трансформатор Т-2 $7,5 \text{ Мва}$, $36,8/6,6 \text{ кв}$, $u_k = 7,5\%$;

линия Л 15 км , $x = 0,4 \text{ ом/км}$;

система С — источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 107 кв .

Требуется сравнить условия пуска двигателей для случаев, когда:

а) оба двигателя пускаются одновременно;

б) пускается один двигатель, в то время как другой работает при номинальном напряжении с нагрузкой $0,67 S_n$ при $\cos \varphi = 0,8$.

Сравнение провести по величинам периодической слагающей пускового тока и пускового момента, имея в виду, что пусковой момент при номинальном напряжении составляет 70% номинального момента двигателя.

Относительные реактивности элементов схемы замещения на рис. 2-21,б при этом будут:

$$x_1 = 0,105 \cdot \frac{7,5}{15} \left(\frac{37}{33,4}\right)^2 = 0,064; \quad x_2 = 0,4 \cdot 15 \cdot \frac{7,5}{33,4^2} = 0,04;$$

$$x_3 = 0,075 \left(\frac{6,6}{6}\right)^2 = 0,091; \quad x_4 = x_5 = \frac{1}{5,2} \cdot \frac{7,5}{2,62} = 0,55,$$

где номинальная мощность двигателя

$$S_n = \frac{2000}{0,83 \cdot 0,92} = 2620 \text{ квт} = 2,62 \text{ Мва.}$$

Напряжение системы в относительных единицах $E_s = \frac{107}{104} = 1,03$.

а) В данном случае в схеме замещения на рис. 2-21,б следует считать $E_1 = E_2 = 0$. Результирующая реактивность схемы составляет:

$$x_{\Sigma} = 0,064 + 0,04 + 0,091 + \frac{0,55}{2} = 0,47.$$

Пусковой ток в каждом двигателе при базисных условиях

$$I_{\text{пуск}} = 0,5 \cdot \frac{1,03}{0,47} = 1,1$$

или по отношению к номинальному току двигателя

$$I_{\text{пуск}} = 1,1 \cdot \frac{7,5}{2,62} = 3,15.$$

Остаточное напряжение на выводах двигателя при его пуске

$$U = 1,1 \cdot 0,55 = 0,605.$$

и соответственно момент двигателя при пуске

$$M_{\text{пуск}} = 0,605^2 \cdot 0,7 \cdot M_n = 0,256 M_n.$$

б) Найдем вначале э. л. с. двигателя, который работал под нагрузкой. Его рабочий ток при базисных условиях составляет:

$$I = \frac{0,67 \cdot 2,62}{7,5} = 0,234.$$

Следовательно, исходная э. л. с. будет:

$$E_s = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi - Ix)^2} = \sqrt{0,8^2 + (0,6 - 0,234 \cdot 0,55)^2} = 0,93.$$

Реактивность двигателя при пуске $x'' = \frac{100}{5,6} = 17,9\%$ и отнесенная к базисным условиям

$$x_0 = x_0 = 17,9 \cdot \frac{10}{5,7} = 31,4\%.$$

Для асинхронных двигателей такой мощности $x/r \approx 14$ (чему соответствует $k_{\varphi} = 1,8$), поэтому

$$r_5 = r_6 = \frac{31,4}{14} = 2,24\%.$$

Относительный рабочий ток двигателя при базисных условиях

$$I = \frac{3,65}{0,85 \cdot 10} = 0,43,$$

и, следовательно, предшествующая э. д. с. двигателя

$$E_2 = E_2 = \sqrt{U^2 \cos^2 \varphi + (U \sin \varphi - I x'')^2} = \\ = \sqrt{(100 \cdot 0,85)^2 + (100 \cdot 0,53 - 31,4 \cdot 0,43)^2} = 94\%.$$

Для остальных элементов схемы замещения (рис. 2-22, б) имеем

$$x_1 = 9,3 \cdot \frac{10}{30} \left(\frac{115}{100} \right)^2 = 4,1\%; \quad r_1 = \frac{0,155}{30} \cdot 100 = 0,52\%; \\ E_1 = \frac{204}{191} = 1,07; \quad x_2 = 0,4 \cdot 75 \cdot \frac{10}{100} = 3\%; \quad r_2 = 3 \cdot \frac{0,33}{0,4} \approx 2,5\%; \\ x_3 = x_4 = 10,5 \cdot \left(\frac{6,6}{6} \right)^2 = 12,7\% \quad \text{и} \quad r_3 = r_4 = \frac{12,7}{11} = 1,15\%.$$

Рассмотрим поочередно каждый из указанных случаев коммутации.

а) В данном случае в схеме на рис. 2-22, б следует считать $E_2 = 0$ и $E_3 = 94\%$. Эквивалентная реактивность ветви системы и ветви двигателя АД-2

$$x_7 = (4,1 + 3) // (31,4 + 12,7) = 7,1 // 44,1 = 6,1\%.$$

и результирующая реактивность

$$x_2 = 6,1 + 12,7 + 31,4 = 50,2\%.$$

Эквивалентная э. д. с.

$$E_2 = \frac{107 \cdot 44,1 + 94 \cdot 7,1}{44,1 + 7,1} = 105\%.$$

Начальный пусковой ток будет $I_{\text{пуск}} = \frac{105}{50,2} = 2,09$ или по отношению к номинальному току двигателя $I_{\text{пуск}} = 2,09 \cdot \frac{10}{5,7} = 3,67$.

Остаточное напряжение на выводах двигателя АД-1

$$U = 2,09 \cdot 31,4 = 65,6\%.$$

Развиваемый этим двигателем момент составляет:

$$M = (0,656)^2 \cdot 0,7 M_{\text{н.дв}} = 0,302 M_{\text{н.дв}}.$$

т. е. он практически равен начальному моменту сопротивления механизма.

Найдем остаточное напряжение на выводах другого двигателя. Напряжение за трансформатором Т-1 составляет:

$$U = 65,6 + 2,09 \cdot 12,7 = 92\%.$$

и искомое напряжение

$$U = 92 + \frac{(94 - 92) \cdot 12,7}{44,1} = 92,6\%.$$

Следовательно, снижение момента этого двигателя произойдет на $(1 - 0,326) \cdot 100 = 14\%$.

Для определения максимального мгновенного значения пускового тока предварительно найдем эквивалентную постоянную времени затухания аperiodической слагающей тока $I_{\text{в.в}}$. Полагая все индуктивности равными нулю, определяем результирующее активное сопротивление схемы для рассматриваемого случая

$$r_2 = (0,52 + 2,5) // (2,24 + 1,15) + 1,15 + 2,24 = 4,99\%.$$

Постоянная времени

$$T_{\text{в.в}} = \frac{50,2}{314,4 \cdot 99} = 0,032 \text{ сек.}$$

и значение ударного коэффициента

$$k_{\sigma} = 1 + e^{-0,01/0,032} = 1 + 0,73 = 1,73.$$

Искомое максимальное мгновенное значение тока

$$I_{\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot 1,73 \cdot 2,09 \cdot 0,96 = 4,9 \text{ ка.}$$

где

$$I_{\text{ст}} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 6} = 0,96 \text{ ка.}$$

б) При включенном выключателе В-2 эквивалентная реактивность схемы до двигателя АД-1 составляет:

$$x_7 = \left(4,1 + 3 + \frac{12,7}{2} \right) // 31,4 = 13,45 // 31,4 = 9,45\%.$$

и эквивалентная э. д. с.

$$E_{\Sigma} = \frac{107 \cdot 31,4 + 94 \cdot 13,45}{31,4 + 13,45} = 103\%.$$

Результирующая реактивность $x_{\Sigma} = 9,45 + 31,4 = 40,85\%$.

Начальный пусковой ток

$$I_{\text{пуск}} = \frac{103}{40,85} = 2,57.$$

что по отношению к номинальному току двигателя составляет:

$$I_{\text{пуск}} = 2,57 \cdot \frac{10}{5,7} = 4,5.$$

Остаточное напряжение на шинах

$$U = 2,57 \cdot 31,4 = 80,6\%.$$

Пусковой момент двигателя АД-1

$$M_{\text{пуск}} = 0,806^2 \cdot 0,7 M_{\text{н.дв}} = 0,455 M_{\text{н.дв}}.$$

а снижение момента двигателя АД-2 при пуске двигателя АД-1 составит $(1 - 0,806^2)100 = 35\%$, т. е. в 2,5 раза больше, чем в предыдущем случае.

Подсчет (аналогично предыдущему) нетрудно найти, что $T_{\text{в.в}} = 0,036$ сек и значение коэффициента $k_{\Sigma} = 1,76$.

Таким образом, максимальное мгновенное значение пускового тока составляет:

$$i_{\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot 1,76 \cdot 2,57 \cdot 0,96 = 6,14 \text{ кА}.$$

в) В этом случае следует считать, что цепь трансформатора Т-1 разорвана, $E_2 = 0$ и реактивность x_2 повышена в отношении

$$5,6/5,1, \text{ т. е. } x_2 = 31,4 \cdot \frac{5,6}{5,1} = 34,5\%.$$

Эквивалентная реактивность до двигателя АД-1

$$x_{\Sigma} = (4,1 + 3 + 12,7)/31,4 = 19,8/31,4 = 12,2\%,$$

в. д. с.

$$E_{\Sigma} = \frac{107 \cdot 31,4 + 0,94 \cdot 19,8}{19,8 + 31,4} = 102\%.$$

Результирующая реактивность

$$x_{\Sigma} = 12,2 + 34,5 = 46,7\%.$$

Начальный пусковой ток

$$I_{\text{пуск}} = \frac{102}{46,7} = 2,19$$

или по отношению к номинальному току двигателя

$$I_{\text{пуск}} = 2,19 \cdot \frac{10}{5,7} = 3,84.$$

Остаточное напряжение на шинах

$$U = 2,19 \cdot 34,5 = 75,5\%.$$

Развиваемый двигателем АД-1 момент после включения выключателя В-2 составит:

$$M = 0,755^2 \cdot 0,83 M_{\text{н.дв}} = 0,47 M_{\text{н.дв}},$$

в момент двигателя АД-2 при подаче напряжения к двигателю АД-1, т. е. при включении В-2, будет снижен на $(1 - 0,755^2)100 = 43\%$.

Значение эквивалентной постоянной времени в данном случае вычислится $T_{\text{в.в}} = 0,04$ сек, чему соответствует $k_{\Sigma} = 1,78$ и, следовательно,

$$i_{\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot 1,78 \cdot 2,19 \cdot 0,96 = 5,3 \text{ кА}.$$

г) При одновременном пуске обоих двигателей (т. е. $E_2 = E_3 = 0$) результирующая реактивность схемы будет:

$$x_{\Sigma} = 4,1 + 3 + \frac{12,7 + 31,4}{2} = 29,15\%$$

и пусковой ток в каждом двигателе

$$I_{\text{пуск}} = \frac{107}{29,15} \cdot 0,5 = 1,84$$

или по отношению к номинальному току

$$I_{\text{пуск}} = 1,84 \cdot \frac{10}{5,7} = 3,22.$$

Остаточное напряжение на выводах двигателя

$$U = 1,84 \cdot 31,4 = 0,58$$

и пусковой момент

$$M_{\text{пуск}} = 0,58^2 \cdot 0,7 M_{\text{н.дв}} = 0,23 M_{\text{н.дв}}.$$

У двигатели не развернутся, так как $M_{\text{пуск}}$ меньше момента сопротивления механизма.

Результирующее активное сопротивление схемы составляет:

$$r_{\Sigma} = 0,52 + 2,5 + \frac{2,24 + 1,15}{2} = 4,72\%.$$

Отношение $x_{\Sigma}/r_{\Sigma} = 29,15/4,72 = 6,2$. Следовательно, $T_{\text{в.в}} = 6,2/314 = 0,0197$ сек; $k_{\Sigma} = 1,61$ и

$$i_{\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot 1,61 \cdot 1,84 \cdot 0,96 = 4,0 \text{ кА}.$$

д) При коротком замыкании на выводах двигателя АД-1 при отключенном В-2 эквивалентная реактивность со стороны трансформатора Т-1 (см. решение п. «а») будет:

$$x = 6,1 + 12,7 = 18,8\%$$

я) приложенная за ней эквивалентная э. д. с. $E = 105\%$.

Следовательно, сверхпереходный ток, поступающий через трансформатор Т-1, будет:

$$I'' = \frac{105}{18,8} = 5,6.$$

Остаточное напряжение за трансформатором Т-1

$$U = 5,6 \cdot 12,7 = 71,6\%.$$

Сверхпереходный ток от двигателя АД-2

$$I'' = \frac{94 - 71}{12,7 + 31,4} = 0,52,$$

что составляет около 40% сверхпереходного тока, поступающего от системы.

Остаточное напряжение на выводах двигателя АД-2

$$U = 71 + 0,52 \cdot 12,7 = 77,6\%;$$

следовательно, развиваемый этим двигателем момент при возникновении короткого замыкания на другой секции шин упадет на

$$(1 - 0,776^2) 100 = 40\%.$$

Суммарное активное сопротивление со стороны трансформатора Т-1 составляет $r = 2,75\%$. Отношение $x/r = 18,8/2,75 = 6,83$, чему соответствует $T_n = 0,022$ сек и $k_p = 1,64$.

Сверхпереходный ток от двигателя АД-1

$$I'' = \frac{94}{31,4} = 3, \text{ а его } k_p = 1,8 \text{ (см. выше).}$$

Разумеется, момент этого двигателя падает до нуля.

Ударный ток в месте короткого замыкания будет:

$$i_w = \sqrt{2} \cdot 1,64 \cdot 5,6 \cdot 0,96 + \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 3 \cdot 0,96 = 12,4 + 7,3 = 19,7 \text{ кА.}$$

Доля участия двигателя АД-1 в этом токе составляет 37%.

Задача 2-24

От шин пониженного напряжения подстанции схемы на рис. 2-23 подается четыре одинаковых асинхронных двигателя АД-1—АД-4, каждый 2 000 квт, 6 кв, $\cos \varphi = 0,83$, $\eta = 92\%$, $I_{пуск} = 5,2$, $M_{пуск} = 0,7 M_n$. Для остальных элементов известны следующие параметры:

система С — эквивалентная реактивность от трансформатора Т-1 $x = 19 \text{ ом}$; за ней приложено неизменное напряжение 105 кв; трансформатор Т-1 20 Мва, 118/38,5 кв, $n_n = 17\%$; трансформатор Т-2 10 Мва, 35/6,6 кв, $n_n = 7,5\%$; линия Л 20 км, $x = 0,4 \text{ ом/км}$.

Требуется определить, сколько двигателей можно пустить одновременно, если известно, что начальный момент сопротивления механизма сцепленного с каждым двигателем, составляет 20% номинального момента двигателя. При этом считать, что все двигатели предварительно отключены от сети и неподвижны.

Задача 2-25

В конце одноцепной линии длиной 120 км присоединен понижающий трансформатор 10 Мва, 110/6,6 кв, $n_n = 10,5\%$. Питание линии осуществляется от узловой подстанции системы, напряжение которой практически можно считать неизменным в равном 115 кв.

Указанный трансформатор предполагается использовать для питания асинхронного двигателя, параметры которого могут быть оценены следующими значениями: $U_n = 6 \text{ кв}$; $\cos \varphi = 0,85$; $\eta = 90\%$; $I_{пуск} = 5$; $M_{пуск} = M_n$, д.в.

Требуется определить наибольшую номинальную мощность такого двигателя, чтобы при пуске в заданных условиях он развивал момент не менее 50% номинального момента двигателя.

Для линии следует принять $x = 0,4 \text{ ом/км}$. Всеми активными сопротивлениями можно пренебречь.

Решение. Чтобы выполнить поставленное условие, необходимо обеспечить при пуске двигателя напряжение на его выводах, определяемое из равенства

$$U^* M_{н,дв} = 0,5 M_{н,дв},$$

откуда $U = \sqrt{0,5} = 0,707$, считая $U_{6,6} = 6 \text{ кв}$.

При $S_0 = 10 \text{ Мва}$ и

$$U_{6,6} = 6 \cdot \frac{110}{6,6} = 100 \text{ кв}$$

соответствующие реактивности будут:

$$x = 0,4 \cdot 120 \cdot \frac{10}{100^2} = 0,048;$$

трансформатора

$$x = 0,105 \left(\frac{110}{100} \right)^2 = 0,127.$$

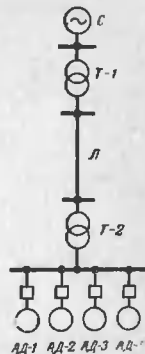


Рис. 2-23. К задаче 2-24. Исходная схема.

Относительное напряжение системы

$$U = \frac{115}{100} = 1,15.$$

Допустимая величина пускового тока

$$I_{пуск} = \frac{1,15 - 0,707}{0,048 + 0,127} = 2,53.$$

Следовательно, относительная базисная реактивность двигателя должна быть

$$x'' = \frac{0,707}{2,53} = 0,28.$$

Теперь искомая номинальная мощность двигателя определится из равенства

$$0,28 = \frac{1}{5} \cdot \frac{10}{S_n},$$

откуда $S_n = 7,15 \text{ Мва}$ и соответственно $P_n = 7,15 \cdot 0,85 \cdot 0,9 = 5,5 \text{ Мвт}$.

Задача 2-26

Для пуска асинхронного двигателя, имеющего параметры 8000 квт, 6 кв, $\cos \varphi = 0,87$, $\eta = 0,92$, $I_{пуск} = 4,8$, должно быть обеспечено напряжение на его выводах не менее 80% номинального.

Требуется определить наименьшую номинальную мощность понижающего трансформатора (в соответствии с новой шкалой по ГОСТ 9680-61) 110/6,6 кв, $u_n = 10,5\%$, который должен быть использован для питания указанного двигателя, имея в виду, что напряжение к трансформатору будет подано по линии протяженностью 90 км от узловой подстанции системы, напряжение которой можно считать практически неизменным и равным 115 кв.

При подсчете для линии принять $x = 0,4 \text{ ом/км}$; всеми активными сопротивлениями можно пренебречь.

Задача 2-27

Определить наименьшую номинальную мощность генератора G в схеме на рис. 2-24, считая его $U_n = 10,5 \text{ кв}$ и $x''_d = 0,25$, чтобы при пуске асинхронный двигатель AD развивал момент не менее $0,3M_{н.д.в}$. До пуска двигателя генератор работает на холостом ходу с номинальным напряжением. Остальные элементы схемы характеризуются следующими данными:



Рис. 2-24. Исходная схема к задаче 2-27.

вращающийся двигатель AD 2800 квт, 3 кв, $\cos \varphi = 0,86$, $\eta = 0,94$, $I_{пуск} = 6,1$, $M_{пуск} = 0,7M_{н.д.в}$; трансформатор T 3200 квв, 10/3,3 кв, $u_n = 5,5\%$; кабель $K0$ 1 км, $x = 0,072 \text{ ом/км}$. Активными сопротивлениями элементов можно пренебречь.

Решение. Выполним необходимый расчет в относительных единицах, приняв за базисные условия номинальное напряжение $U_{б1} = 10,5 \text{ кв}$ и номинальную мощность $S_b = S_n$ двигателя, которая составляет:

$$S_n = \frac{2800}{0,86 \cdot 0,948} = 3440 \text{ квв}.$$

Базисное напряжение на стороне генератора, очевидно, будет:

$$U_{б11} = 3 \cdot \frac{10}{3,3} = 9,1 \text{ кв}.$$

В соответствии с поставленным условием напряжение на выводах двигателя в момент пуска находим из равенства

$$0,3M_{н.д.в} = U^2 \cdot 0,7M_{н.д.в},$$

откуда

$$U = \sqrt{\frac{0,3}{0,7}} = 0,655.$$

Реактивность двигателя при пуске

$$x'' = \frac{1}{6,4} = 0,156,$$

следовательно, ток при пуске

$$I_{пуск} = \frac{0,655}{0,156} = 4,2.$$

Реактивности трансформатора и кабеля, отнесенные к базисным условиям:

$$x_T = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{3,44}{3,2} \left(\frac{3,3}{3}\right)^2 = 0,072;$$

$$x_{к0} = 0,072 \cdot \frac{3,44}{9,1^2} = 0,003.$$

Номинальное напряжение генератора в относительных единицах от базисного напряжения составляет:

$$U = \frac{10,5}{9,1} = 1,16.$$

Реактивность генератора, отнесенная к базисным условиям, может быть теперь получена как

$$x = \frac{1,16 - 0,655}{4,2} - (0,072 + 0,003) = 0,045.$$

Следовательно, искомая наименьшая номинальная мощность генератора составляет:

$$S_{\text{н}} = \frac{0,25}{0,045} \left(\frac{10,5}{9,1} \right)^2 3,44 = 25,4 \text{ Мва.}$$

Задача 2-28

Для элементов схемы на рис. 2-24 дополнительно известно, что у генератора $r = x''/60$, у двигателя $r = x''/12$, у кабеля $r = 0,21 \text{ ом/км}$ и у трансформатора T потери короткого замыкания $P_{\text{к.з.}} = 37 \text{ кВт}$.

Используя решение предыдущей задачи, определить максимальное мгновенное значение тока при пуске двигателя АД в заданных условиях.

Задача 2-29

Для условий схемы на рис. 2-25 нужно определить первичную сларнуюющую тока при пуске асинхронного двигателя АД и максимальное мгновенное значение пускового тока этого двигателя. Оценить также величину напряжения на шинах (в процентах от 6,0 кВ) в момент пуска двигателя.

Элементы схемы характеризуются следующими данными:

- система С — источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 108 кВ;
- трансформатор $T-1$ 30 Мва, 110/38,5 кВ, $u_{\text{н}} = 10,5\%$, $x/r = 16,5$;
- трансформатор $T-2$ 10 Мва, 36,8/6,6 кВ, $u_{\text{н}} = 7,5\%$, $x/r = 8$;
- кабель К6 10 км, $x = 0,116 \text{ ом/км}$, $r = 0,21 \text{ ом/км}$;
- линейка Н 7,5 Мва, $x'' = 0,35$, $E'' = 0,85$ (от $U_{\text{нр}} = 6,3 \text{ кВ}$);

асинхронный двигатель АД 1250 кат, 6 кВ, $\cos \varphi = 0,9$, $\eta = 96\%$, $I_{\text{пуск}} = 5,6$; ударный коэффициент $k_y = 1,75$.

Задача 2-30

На тепловой электрической станции установлены два блока генератор — автотрансформатор, каждый из которых имеет следующие параметры:

- генератор 300 Мвт, $\cos \varphi = 0,85$, 20 кВ, $x''/a = 0,196$;
- автотрансформатор 360 Мва, 230/115/20 кВ, $u_{\text{вс}} = 8\%$, $u_{\text{вн}} = 10\%$, $u_{\text{сн}} = 18\%$;

станция на напряжении 230 кВ связана с системой С (рис. 2-26), которую можно рассматривать как источник бесконечной мощности с напряжением 230 кВ.

Для питания собственных нужд каждого блока служит свой трансформатор ($T-1$), присоединяемый непосредственно к генератору. Обмотка низшего напряжения этого трансформатора расщеп-

лена на две половинной мощности. Номинальная мощность этого трансформатора 32 Мва и номинальные напряжения 20/6,3/6,3 кВ. Это напряжения короткого замыкания, отнесенные к номинальной мощности каждой обмотки низшего напряжения (T е. 16 Мва), составляют $u_{\text{вн}} = 11,5\%$ и $u_{\text{сн}} = 20\%$.

Резервом для питания собственных нужд является трансформатор $T-2$ 31,5 Мва, 115/6,3/6,3 кВ (также с расщепленной обмоткой низшего напряжения), $u_{\text{вн}} = 10,5\%$ и $u_{\text{сн}} = 20\%$.

К каждой секции шин 6,3 кВ присоединены двигатели механизмов собственных нужд блока. Суммарная номинальная мощность двигателей одной секции составляет 18 Мва.

В нормальных условиях выключатели, соединяющие секции шин собственных нужд с резервным трансформатором (выключатель СВ-1 и аналогичные), разомкнуты.

Требуется сопоставить условия одновременного самозапуска двигателей одной секции при полноте напряжения от рабочего трансформатора $T-1$ (включение H) или от резервного трансформатора (включение СВ-1), считая, что все двигатели данной секции полностью остановлены и их кратность пускового тока равна 5.

Для успешного самозапуска напряжение на секции должно быть не менее 70% номинального. Поэтому, если данная величина при пуске всех двигателей секции не обеспечивается, следует установить, на сколько нужно уменьшить суммарную мощность двигателей, остающихся присоединенными к сети при достаточно длительной аварии напряжения.

Задача 2-31

Для асинхронных двигатели, каждый 1900 кат, 6 кВ, $\cos \varphi = 0,83$, $\eta = 95,5\%$, $I_{\text{пуск}} = 5,1$, через выключатели, кабели и ветви реактивного реактора СР присоединены к шинам пониженного напряжения подстанции, которая питается от системы С (рис. 2-27). Спешивая практически бесконечно велика, и ее неизменное напряжение составляет 105 кВ.

Основные элементы схемы характеризуются следующими данными:

- трансформатор T 15 Мва, 110/6,6 кВ, $u_{\text{н}} = 10,5\%$, $P_{\text{к}} = 133 \text{ кВт}$;
- реактивный реактор СР 6 кВ, $2 \times 600 \text{ а}$, $x = 6\%$, коэффициент связи $k = 0,46$, $P_{\text{с}} = 8,6 \text{ кВт/фаза}$;
- кабели К6-1 и К6-2 одинаковые, каждый 100 м, $A-3 \times 95$, $x = 0,091 \text{ ом/км}$, $r = 0,34 \text{ ом/км}$.



Рис. 2-25. Схема к задаче 2-29.

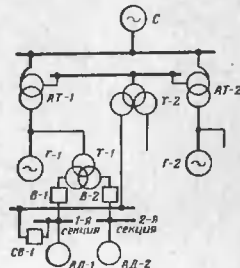


Рис. 2-26. Исходная схема к задаче 2-30.

Для указанных выше асинхронных двигателей ударный коэффициент $k_u = 1.71$.

В начальный момент переходного процесса, вызванного поочередно следующими коммутациями:

- а) одновременным пуском двигателей АД-1 и АД-2;
 б) пуском двигателя АД-1 при отключенном двигателе АД-2;

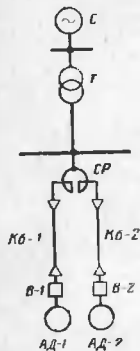


Рис. 2-27. Схема к задаче 2-31.

Система характеризуется как источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 105 кв.

Линия Л 80 км, АС0-120. $x = 0.4$ ом/км, $r = 0.28$ ом/км.

Трансформатор Т 10 Мва, 110/6.6 кв, $x_{тн} = 10.5\%$.

Асинхронный двигатель АД 4500 квт, 6 кв, $\cos \varphi = 0.87$, $\eta = 95.5\%$, $I_{пуск} = 5.6$ (при соединении в треугольник), $M_{пуск} = 0.7M_n$, $x''/r = 10$.

Решение. Введем расчет в относительных единицах при $S_{бл} = 10$ Мва, $U_{бл} = 6.6$ кв, $U_{бл} = 6.6 \cdot \frac{110}{6.6} = 110$ кв, $I_{бл} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 6.6} = 0.875$ ка.

Реактивность двигателя при базисных условиях и при соединении его обмоток статора в треугольник

$$x_{хв} = \frac{1}{5.6} \cdot \frac{10}{5.4} \left(\frac{6}{6.6} \right)^2 = 0.276,$$

где

$$S_{х.д.м} = \frac{4.5}{0.87 \cdot 0.955} = 5.4 \text{ Мва.}$$

Задача 2-32

У асинхронного двигателя АД, питающегося от подстанции (рис. 2-28, а), в нормальном рабочем режиме обмотки статора соединены в треугольник. Для уменьшения пускового тока предусмотрено переключение этих обмоток с треугольника на звезду.

Определить максимальное мгновенное значение тока при пуске и значение пускового момента (в долях M_n) для условий, когда обмотка статора данного двигателя соединена:

- а) в треугольник;
 б) в звезду.

На рис. 2-28, б приведена эквивалентная схема замещения, где указаны значения активных и реактивных сопротивлений всех элементов (в числителе x и в знаменателе r), а также э. д. с. источника.

а) При соединении обмоток статора двигателя в треугольник результирующие сопротивления схемы будут:

$$x_2 = 0.026 + 0.105 + 0.276 = 0.407;$$

$$r_2 = (1.82 + 0.96 + 2.76) \cdot 10^{-2} = 5.54 \cdot 10^{-2}.$$

Пренебрегая r , найдем величину пускового тока

$$I_{пуск} = \frac{0.955}{0.407} = 2.35.$$

Напряжение на выводах двигателя в долях его номинального напряжения

$$U = 2.35 \cdot 0.276 \cdot \frac{6.6}{6} = 0.713.$$

Развиваемый двигателем пусковой момент

$$M_{пуск} = 0.713^2 \cdot 0.7 M_n = 0.36 M_n.$$

Постоянная времени

$$T_a = \frac{0.407 \cdot 10^3}{314 \cdot 5.54} = 0.023 \text{ сек.}$$

Максимальное мгновенное значение пускового тока

$$i_{макс} = (1 + e^{-0.01/0.023}) \sqrt{2} \cdot 2.35 \cdot 0.875 = 4.8 \text{ ка.}$$

б) При соединении обмоток статора в звезду сопротивления двигателя будут:

$$x_{дв} = 3 \cdot 0.276 = 0.828 \text{ и } r_{дв} = 3 \cdot 2.76 \cdot 10^{-2} = 8.28 \cdot 10^{-2}.$$

Результирующие сопротивления схемы при этом будут:

$$x_2 = 0.959 \text{ и } r_2 = 11.06 \cdot 10^{-2}.$$

Величина пускового тока $I_{пуск} = \frac{0.955}{0.959} \approx 1$, и напряжение на выводах двигателя

$$U = 1 \cdot 0.828 \cdot \frac{6.6}{6} = 0.91.$$

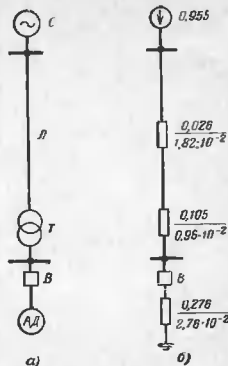


Рис. 2-28. К задаче 2-32.

а — исходная схема; б — схема замещения.

Пусковой момент

$$M_{\text{пуск}} = \left(\frac{0,91}{\sqrt{3}} \right)^2 0,7 M_n = 0,19 M_n$$

Постоянная времени

$$T_a = \frac{0,959 \cdot 10^3}{314 \cdot 11,06} = 0,028 \text{ сек.}$$

Максимальное мгновенное значение пускового тока

$$i_{\text{макс}} = (1 + e^{-0,01/0,028}) \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 0,875 = 2,1 \text{ кА.}$$

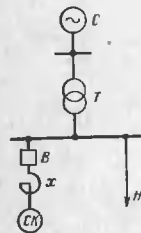


Рис. 2-29. Схема к задаче 2-33.

Задача 2-33

На подстанции (рис. 2-29) установлен синхронный компенсатор СК 30 Мва, 10,5 кВ, $x''_d = 0,22$. Определить величину реактивности x (ом), которая должна быть введена в цепь синхронного компенсатора, чтобы в начальный момент его асинхронного пуска напряжение на выводах компенсатора составляло 50% его номинального напряжения. При этих условиях найти также величину остаточного напряжения на шинах, к которым приключена нагрузка Н.

Система характеризуется эквивалентной реактивностью $x_c = 11$ ом, за которой приложено неизменное напряжение 113 кВ.

Трансформатор Т 60 Мва, 110/11 кВ, $u_n = 10,5\%$.

Нагрузка Н 45 Мва, $x'' = 0,35$ и $E'' = 0,85$.

Глава третья

УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Установившийся режим при трехфазном коротком замыкании вблизи источников питания в условиях современных электрических систем совершенно исключается, так как уже при сравнительно небольшой затяжке отключения аварийного участка парашается параллельная работа отдельных генераторов или целых станций и наступает их асинхронный режим.

При обычно принимаемых допущениях установившийся режим короткого замыкания возможен главным образом при изолированной работе генератора, как, например, в условиях отдельной блок-станции или в тех случаях, когда генератор выделен для проведения спе-

циальных испытаний (подъем с нуля аварийной цепи, испытания релейной защиты и др.).

Несмотря на ограниченную возможность установившегося режима короткого замыкания, его изучение является весьма полезным и необходимым. Здесь наглядно выявляется связь между цепями статора и ротора (приведение параметров последнего к статору), влияние автоматического регулирования возбуждения и практическая возможность его учета, роль присоединенной нагрузки и возможность ее приближенного учета.

При параллельной работе генератора с другими источниками особый интерес представляет влияние сдвига между э. д. с. на изменении токов в отдельных ветвях и напряжений в узлах схемы (см. задачу 3-7).

Задача 3-1

Для турбогенератора ТВФ-100-2 известны следующие параметры: $P_n = 100$ Мвт, $U_n = 10,5$ кВ, $\cos \varphi = 0,85$, $x_n = 0,15$, $I_k^{(3)} = 1,68$ (относительный ток трехфазного короткого замыкания при возбуждении, соответствующем номинальной нагрузке);

ток возбуждения холостого хода $I_{fx,x} = 640$ а;

то же при номинальной нагрузке $I_{fn} = 1600$ а;

напряжение на кольцах ротора при номинальной нагрузке $U_{fn} = 270$ в;

предельное напряжение возбуждителя $U_{f\text{пр}} = 480$ в.

Требуется привести цепь обмотки возбуждения к статору, выразив все величины во взаимной системе относительных единиц.

Решение. За базисные единицы статора примем его номинальные величины, т. е.

$$S_b = S_n = \frac{100}{0,85} = 117,5 \text{ Мва, } U_b = U_n = 10,5 \text{ кВ,}$$

соответственно

$$I_b = I_n = \frac{117,5}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 6,45 \text{ кА.}$$

Определим ОКЗ из выражения

$$\text{ОКЗ} = I_k^{(3)} \frac{I_{fx,x}}{I_{fn}} = 1,68 \cdot \frac{640}{1600} = 0,67.$$

Синхронная продольная реактивность [при спрямлении характеристики холостого хода через начало координат и точку с координатами (1,1)] будет:

$$x_d = \frac{1}{\text{ОКЗ}} = \frac{1}{0,67} = 1,49,$$

и продольная реактивность реакции статора

$$x_{ad} = x_d - x_0 = 1,49 - 0,15 = 1,34.$$

Во взаимной системе относительных единиц базисными величинами на стороне обмотки возбуждения должны быть:

$$S_{I0} = 117,5 \text{ Мва}; I_{I0} = I_0 x_{ad} = 640 \cdot 1,34 = 860 \text{ а}$$

и соответственно

$$U_{I0} = \frac{117,5}{0,86} = 137 \text{ кв.}$$

Тогда приведенные к статору относительные величины токов возбуждения будут:

при холостом ходе

$$\overset{\circ}{I}_{I0} = \frac{640}{860} = \frac{1}{1,34} = 0,746;$$

при номинальной нагрузке

$$\overset{\circ}{I}_{I1} = \frac{1600}{860} = 1,86;$$

предельная величина

$$\overset{\circ}{I}_{I2} = 1,85 \cdot \frac{480}{270} = 3,3.$$

Активное сопротивление обмотки возбуждения¹

$$r_I = \frac{270}{1600} = 0,169 \text{ ом},$$

и его приведенная к статору относительная величина

$$\overset{\circ}{r}_I = 0,169 \cdot \frac{117,5}{137^2} = 1,06 \cdot 10^{-3}.$$

Приведенные к статору относительные величины напряжений цепи возбуждения будут:

при номинальной нагрузке

$$\overset{\circ}{U}_{I1} = \frac{270}{137} \cdot 10^{-3} = 1,97 \cdot 10^{-3};$$

предельное значение

$$\overset{\circ}{U}_{I2} = \frac{480}{137} \cdot 10^{-3} = 3,50 \cdot 10^{-3}.$$

¹ Соответствует горячему состоянию машины, поскольку оно определено из величин при номинальной нагрузке.

Естественно, те же величины этих напряжений можно получить как произведение:

$$\overset{\circ}{U}_I = I_I \overset{\circ}{r}_I.$$

Некоторые использованные соотношения можно дополнительно проиллюстрировать известным графическим построением основного реактивного треугольника.

Пусть задана характеристика холостого хода (рис. 3-1), проходящая через начало координат и точку с координатами (1,1). Зная величину ОКЗ, легко определить относительный ток возбуждения, при котором установившийся ток короткого замыкания равен номинальному току, т. е.

$$I_I = \frac{1}{\text{ОКЗ}} = \frac{1}{0,67} = 1,49 = x_d,$$

который численно равен продольной синхронной реактивности.

Следовательно, в принятом для тока возбуждения I_I масштабе m_I отрезок ОС на рис. 3-1 будет:

$$OC = 1,49 m_I, \text{ мм.}$$

Поскольку при принятой характеристике холостого хода координаты любой ее точки по обеим осям численно одинаковы, то, отложив по оси ординат $I_{I0} x_0 = x_0$, найдем вершину А основного реактивного треугольника ABC , при этом отрезок $OB = 0,15 m_I$, мм. Горизонтальный катет этого треугольника, равный

$$BC = OC - OB = (1,49 - 0,15) m_I = 1,34 m_I, \text{ мм.}$$

является масштабом тока статора m_I , коль скоро он представляет продольную реакцию статора, созданную трехфазным номинальным током генератора.

Таким образом, ток возбуждения, выраженный в масштабе тока статора, т. е.

$$\overset{\circ}{I}_I = \frac{m_I}{m_I} I_I = \frac{I_I}{1,34} = x_{ad},$$

является приведенным к статору током возбуждения.

Задача 3-2

Турбогенератор, параметры которого даны в предыдущей задаче, соединен с повышающим трансформатором 20 Мва, 38,5/10,5 кв, $u_n = 8\%$. На стороне высшего напряжения трансформатора трехфазное короткое замыкание.

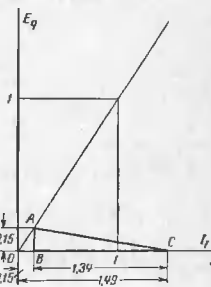


Рис. 3-1. К задаче 3-1. Построение основного реактивного треугольника.

При установившемся режиме указанного короткого замыкания требуется определить напряжение на кольцах ротора, т. е. на выводах обмотки возбуждения, имея в виду, что автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) генератора выключено.

Решение. Реактивность трансформатора, отнесенная к номинальным условиям генератора, будет:

$$x_T = 0,08 \cdot \frac{117,5}{20} = 0,47.$$

В соответствии с полученными в решении предыдущей задачи величинами кратность предельного тока возбуждения (по отношению к току возбуждения холостого хода) составляет:

$$I_{гпр} = \frac{3,3}{0,746} = 4,42.$$

Следовательно, критическая реактивность

$$x_{кр} = x_d \frac{U_n}{E_{гпр} - U_n} = 1,49 \cdot \frac{1}{4,42 - 1} = 0,44.$$

Поскольку $x_T = 0,47 > x_{кр} = 0,44$, то генератор работает в режиме нормального напряжения и его относительная э. д. с. будет:

$$E_g = U_n + I_n x_d = 1 + \frac{1}{0,47} \cdot 1,49 = 4,18.$$

При принятом спрямлении характеристики холостого хода относительный ток возбуждения численно равен относительной э. д. с. E_0 , т. е. $I_f = E_0 = 4,18$.

Зная, что ток возбуждения холостого хода $I_{ф.х.} = 640$ а активное сопротивление обмотки возбуждения $r_f = 0,169$ ом, находим искомого напряжение на выводах обмотки возбуждения

$$U_f = 4,18 \cdot 640 \cdot 0,169 \approx 450 \text{ В.}$$

Ту же величину можно было получить и иначе. Приведенный к статору относительный ток возбуждения составляет:

$$\frac{I_f}{I_n} = \frac{I_f}{x_{ад}} = \frac{4,18}{1,34} = 3,12.$$

Приведенная к статору относительная величина искомого напряжения будет:

$$\dot{U}_f = \dot{I}_f r_f = 3,12 \cdot 1,06 \cdot 10^{-2} = 3,31 \cdot 10^{-2}.$$

Соответственно истинная величина этого напряжения

$$U_f = \dot{U}_f U_{f0} = 3,31 \cdot 10^{-2} \cdot 137\,000 \approx 450 \text{ В.}$$

Задача 3-3

Цель состоит из генератора и реактора РБА-10-600-5 (т. е. 10 кв мм) а, $x = 5\%$, за которым предполагается трехфазное короткое замыкание. Генератор характеризуется следующими данными: 56 Мвт, $\cos \varphi = 0,85$, 10,5 кв, $OK3 = 1,16$, ток возбуждения при холостом ходе $I_f = 370$ а.

Требуется определить величину тока возбуждения, при котором относительное напряжение генератора в установившемся режиме рассматриваемого короткого замыкания равнялась бы номинальному напряжению.

Задача 3-4

Для гидрогенератора 108 Мвт, 13,8 кв, $\cos \varphi = 0,85$ известны: относительные реактивности $x_d = 0,71$, $x_q = 0,37$; ток возбуждения холостого хода $I_{ф.х.} = 1\,120$ а; активное сопротивление обмотки возбуждения при $\theta = 15^\circ$ С $r_f = 0,143$ ом.

Требуется определить, какое должно быть поведено к обмотке возбуждения напряжение при номинальной нагрузке генератора, имея в виду, что при таком режиме генератора температура обмотки возбуждения составляет 130° С.

Решение. Векторная диаграмма генератора для заданного режима представлена на рис. 3-2. Здесь вектор напряжения направ-

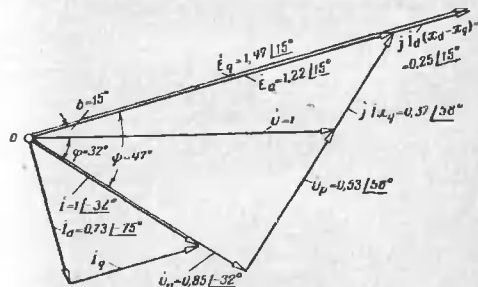


Рис. 3-2. К задаче 3-4. Векторная диаграмма генератора.

лен по оси положительных действительных величин. Непосредственно из диаграммы следует, что при $x_d = x_q$ модуль э. д. с.

$$E_Q = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (I x_q + U \sin \varphi)^2} = \sqrt{0,85^2 + (0,37 + 0,53)^2} = 1,22.$$

Значение э. д. с. E_0 (при принятом спрямлении характеристики холостого хода) будет:

$$E_g = E_Q + I_d (x_d - x_q) = 1,22 + 0,73 (0,71 - 0,37) = 1,47.$$

Следовательно, ток возбуждения при номинальной нагрузке генератора будет:

$$I_f = 1,47 \cdot 1120 = 1650 \text{ а.}$$

Активное сопротивление обмотки возбуждения при температуре $\theta = 130^\circ \text{C}$ (считая для меди температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 0,004 \text{ 1/град}$) составит:

$$\begin{aligned} r_f &= r_{f\theta=15^\circ} [1 + \alpha(\theta - 15)] = 0,143 [1 + 0,004(130 - 15)] = \\ &= 0,143 \cdot 1,46 = 0,209 \text{ ом.} \end{aligned}$$

Величина искомого напряжения будет:

$$U_f = 1650 \cdot 0,209 = 345 \text{ в.}$$

Задача 3-5

Генератор, снабженный АРВ, имеет $I_{\text{АРВ}} = 4$ и $x_d = 1,5$. Известно, что при трехфазном коротком замыкании во внешней чисто индуктивной цепи остаточное напряжение генератора в установившемся режиме составляет $0,7U_n$.

Требуется определить, насколько (в процентах) увеличится ток в месте короткого замыкания, если к выводам данного генератора подключить еще такой же генератор, у которого:

- а) АРВ включен;
б) АРВ отключен и относительное возбуждение $I_f = 1$.

Решение. Найдем вначале внешнюю реактивность до точки короткого. Поскольку остаточное напряжение $U < U_n$, генератор работает в режиме предельного возбуждения и величина установившегося тока короткого замыкания составляет:

$$I_k = \frac{E_{\text{АРВ}} - U}{x_d} = \frac{4 - 0,7}{1,5} = 2,2;$$

внешняя реактивность

$$x_{\text{вн}} = \frac{0,7}{2,2} = 0,32.$$

Рассмотрим поочередно оба поставленных условия.

а) В данном случае это равносильно увеличению в 2 раза номинальной мощности генератора. Если за базисную мощность сохранить номинальную мощность одного генератора, то критическая реактивность при двойной мощности генератора будет:

$$x_{\text{кр}} = \frac{1,5}{2} \cdot \frac{1}{4-1} = 0,25,$$

и поскольку $x_{\text{вн}} = 0,32 < x_{\text{кр}} = 0,25$, оба генератора будут находиться в режиме нормального напряжения и ток короткого замыкания составит $I_k = \frac{1}{0,32} = 3,13$, т. е. он возрастает на $\frac{3,13 - 2,2}{2,2} \times 100 = 42,3\%$.

116

Дополнительно нетрудно определить относительное возбуждение, которое установится при этом у каждого генератора,

$$I_f = E_a = 3,13 \left(\frac{1,5}{2} + 0,32 \right) = 3,35.$$

б) В этом случае у генератора с АРВ, очевидно, сохранится режим предельного возбуждения. При этом эквивалентная в. д. с. обоих генераторов будет:

$$E_{\text{в}} = \frac{4+1}{2} = 2,5$$

и ток в месте короткого

$$I_k = \frac{2,5}{0,5 \cdot 1,5 + 0,32} = 2,34,$$

т. е. увеличится всего лишь на 6,4%.

Естественно, в той же мере возрастает остаточное напряжение генератора, т. е. оно составит $1,064 \cdot 0,7U_n = 0,745U_n$.

При этом ток генераторов будет:

$$I_f = \frac{4 - 0,745}{1,5} = 2,17 \text{ (т. е. меньше на } 1,4\%),$$

без АРВ

$$I_f = \frac{1 - 0,745}{1,5} = 0,17.$$

Задача 3-6

Два генератора $G-1$ и $G-2$ работают на общие шины. Их синхронная реактивность, отнесенная к номинальной мощности каждого генератора, одинакова и составляет $x_d = 1$. Генератор $G-1$ снабжен АРВ, и его $I_{\text{АРВ}} = 3,5$, генератор $G-2$ не имеет АРВ, и его рабочий ток возбуждения $I_f = 2$.

Известно, что при установившемся режиме трехфазного короткого замыкания во внешней цепи индуктивной цепи остаточное напряжение на шинах составляет 50% номинального, при этом токи в обоих генераторах одинаковы.

Требуется определить:

а) в каком соотношении находятся номинальные мощности этих генераторов;

б) насколько (в процентах) уменьшится ток в месте короткого замыкания и каково будет его относительное распределение между генераторами, если удаленность короткого замыкания увеличить в 2 раза.

Задача 3-7

При установившемся режиме трехфазного короткого замыкания в точке K схемы замещения, представленной на рис. 3-3, где все величины выражены в относительных единицах при номинальных

117

условиях работы генератора, требуется выяснить влияние углового сдвига э. д. с. E_q генератора относительно ненапряженного напряжения системы $U_c=1$ на величины токов в каждой ветви схемы и напряжения на шинах. Относительная величина предельного тока возбуждения генератора составляет $I_{гр}=3,25$.

Решение. Найдем критическую реактивность генератора

$$x_{кр} = x_a \frac{U_n}{E_{гр}} = 0,9 \cdot \frac{1}{3,25 - 0,9} = 0,4.$$

Поскольку $x_k = 0,75 > x_{кр} = 0,4$, то при $\alpha=0$ генератор работает в режиме нормального напряжения и ток в месте короткого

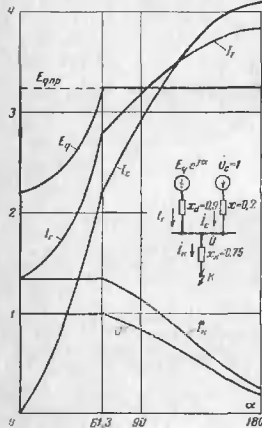


Рис. 3-3. К задаче 3-7. Схема замещения; кривые изменения э. д. с. напряжения и токов в функции угла α .

Эквивалентная э. д. с. генерирующих ветвей будет:

$$\dot{E}_c = \frac{0,9 \cdot 1 + 0,2 E_q e^{j\alpha}}{0,9 + 0,2} = 0,82 + 0,18 E_q e^{j\alpha};$$

их эквивалентная реактивность

$$x_c = \frac{0,9 \cdot 0,2}{0,9 + 0,2} = 0,164.$$

Ток и месте короткого

$$I_k = \frac{0,82 + 0,18 E_q e^{j\alpha}}{j(0,164 + 0,75)} = -j(0,9 + 0,2 E_q e^{j\alpha})$$

и напряжение на шинах

$$\dot{U} = -j(0,9 + 0,2 E_q e^{j\alpha}) j 0,75 = 0,67 + 0,15 E_q e^{j\alpha}.$$

Ток генератора

$$I_g = \frac{E_q e^{j\alpha} - 0,67 - 0,15 E_q e^{j\alpha}}{j 0,9} = -j(-0,75 + 0,95 E_q e^{j\alpha}),$$

и ток системы

$$I_c = \frac{1 - 0,67 - 0,15 E_q e^{j\alpha}}{j 0,2} = -j(1,65 - 0,75 E_q e^{j\alpha}).$$

Предельное значение угла α , при котором генератор может поддерживать напряжение на нормальном уровне, нетрудно определить из выражения для модуля напряжения при $E_q = E_{гр} = 3,25$, т. е.

$$U = U_n = 1 = |0,67 + 0,15 \cdot 3,25 e^{j\alpha}| = |0,67 + 0,49 e^{j\alpha}| = \sqrt{0,67^2 + 0,49^2 + 2 \cdot 0,67 \cdot 0,49 \cos \alpha},$$

откуда $\cos \alpha = 0,474$ и $\alpha = 61,3^\circ$.

Следовательно, при $\alpha \geq 61,3^\circ$ в полученных выше выражениях для токов и напряжения нужно принимать $E_q = E_{гр} = 3,25$. Выражения для модулей этих величин после небольших преобразований приобретают следующий вид:

$$I_k = 1,11 \sqrt{1 + 0,95 \cos \alpha};$$

$$U = 0,83 \sqrt{1 + 0,95 \cos \alpha};$$

$$I_g = 3,18 \sqrt{1 - 0,46 \cos \alpha};$$

$$I_c = 2,94 \sqrt{1 - 0,93 \cos \alpha}.$$

При $\alpha < 61,3^\circ$ значение E_q (для заданного угла α) также легко найти, поскольку модуль напряжения известен ($U=1$). Из выражения

$$1 = \sqrt{0,67^2 + 0,15^2 E_q^2 + 2 \cdot 0,67 \cdot 0,15 (\cos \alpha) E_q}$$

после упрощений получаем квадратное уравнение

$$E_q^2 + 9 (\cos \alpha) E_q - 24,3 = 0,$$

положительный корень которого

$$E_q = 0,5 [-9 \cos \alpha + \sqrt{81 \cos^2 \alpha + 97}] = 4,5 \cos \alpha \left(\sqrt{\frac{1,2}{\cos^2 \alpha} + 1} - 1 \right).$$

По полученным выражениям произведены подсчеты для ряд значений α . Результаты этих подсчетов представлены кривыми на рис. 3-3. В диапазоне $\alpha=0-61,3^\circ$ напряжение генератора и соответственно ток в месте короткого остаются неизменными. Токи I_r и I_c и э. д. с. E_q резко возрастают, причем ток генератора остается больше тока от системы.

При дальнейшем увеличении угла α (свыше $61,3^\circ$) э. д. с. E_q , достигнув предельного значения, остается постоянной; напряжение

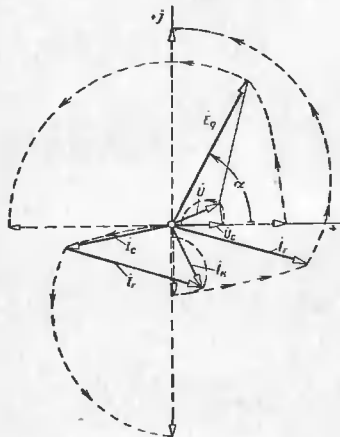


Рис. 3-4. Векторная диаграмма э. д. с., напряжений и токов в задаче 3-7.

на шинах и ток в месте короткого замыкания уменьшаются и достигают своего минимального значения при $\alpha=180^\circ$; токи I_c и I_r продолжают возрастать, но с меньшей интенсивностью, стремясь к своим максимальным значениям при $\alpha=180^\circ$. При этом, как видно, начиная с $\alpha=120^\circ$, ток от системы I_s становится больше тока генератора I_r .

Разумеется, при $\alpha>180^\circ$ продолжениями кривых будут являться их зеркальные отображения от вертикали при $\alpha=180^\circ$.

Чтобы иметь еще более полное представление о рассматриваемых зависимостях, на рис. 3-4 приведена векторная диаграмма э. д. с., напряжений и токов. Она построена для $\alpha=61,3^\circ$. Пунктиром показаны геометрические места точек, по которым скользят концы соответствующих векторов при изменении угла α . Векторы \vec{U}

и I_s , оставаясь под углом 90° , вначале, т. е. до $\alpha=61,3^\circ$, перемещаются по своим окружностям с центрами в полюсе векторной диаграммы, а затем (при $\alpha>61,3^\circ$) также по окружностям, но других радиусов и с центрами, смещенными относительно полюса диаграммы. Векторы E_q , I_r и I_c вначале скользят по своим сложным кривым, а затем переходят на соответствующие окружности.

Задача 3-8

При трехфазном коротком замыкании в точке К элементарной схемы (рис. 3-5) построить кривые зависимостей установившихся величин тока в месте короткого, тока и напряжения генератора от удаленности короткого замыкания, т. е. от величины реактивной аварийной ветви X_k . Построение произвести для двух случаев, когда нагрузка характеризуется:

а) постоянным полным сопротивлением при $\cos \varphi=0,8$;

б) постоянной реактивностью, относительная величина которой при номинальных условиях составляет $x_k=1,2$.

Генератор предварительно работал с номинальной нагрузкой при $\cos \varphi=0,8$; его АРВ включен, предельный ток возбуждения $I_{\text{впр}}=-4$, синхронная реактивность $x_d=x_q=1,5$.

Изменение x_k рассмотреть в пределах от 0 до 1,5, считая, что величина этой реактивности выражена в относительных единицах при номинальных условиях генератора.

Решение. Для условий п. «а» относительная величина полного сопротивления нагрузки, очевидно, составляет $Z_n=0,8+j0,6=1,237^\circ$. Эквивалентные э. д. с. и сопротивление, которыми могут быть заменены нагрузочная и генераторная ветви, при этом будут:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\text{эп}} &= \frac{\vec{E}_{\text{гнр}} Z_n}{j x_d + Z_n} = \frac{4(0,8 + j0,6)}{j1,5 + 0,8 + j0,6} = 1,78 \angle -32^\circ; \\ Z_0 &= \frac{j x_k Z_n}{j x_d + Z_n} = \frac{(0,8 + j0,6) j1,5}{j1,5 + 0,8 + j0,6} = 0,35 + j0,57 = 0,67 \angle 58^\circ. \end{aligned}$$

Здесь, как видно, принято, что вектор $\vec{E}_{\text{гнр}}$ направлен по оси действительных положительных величин комплексной плоскости.

Найдем значение реактивности x_k , при котором напряжение генератора достигает номинального значения при предельном токе возбуждения. В соответствии с этим для модуля напряжения генератора можно написать:

$$U = 1 = \left| \frac{j x_k \cdot 1,78 \angle -32^\circ}{0,35 + j(0,57 + x_k)} \right|,$$

откуда после преобразований получим квадратное уравнение

$$x_k^2 - 0,525 x_k - 0,206 = 0,$$

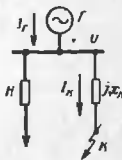


Рис. 3-5. Исходная схема к задаче 3-8.

При $x_{к1} = 1$ ток в месте короткого будет $I_{к1} = 1$, и в генераторе $I_{Г} = 1 + \frac{1}{1,2} = 1,84$ (вместо 1,79).

Проведенные пунктиром на рис. 3-7 кривые иллюстрируют искомыми зависимостями при учете нагрузки постоянной реактивностью $x_{н1} = 1,2$. Как видно, результаты расчета в обоих случаях очень близки, что является наглядным подтверждением практической возможности учета нагрузки чистой реактивностью рекомендуемой величины. Конечно в последнем случае нельзя познать правильности фазы тока. Так, при $x_{н1} = 0,5$ и учете нагрузки с $x_{н1} = 1,2$ векторная диаграмма будет иметь вид, как это показано пунктирными линиями на рис. 3-6.

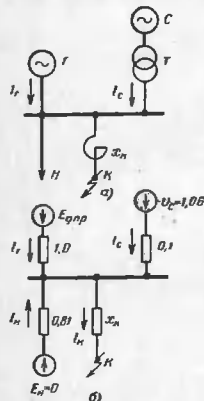


Рис. 3-8. К задаче 3-9.
а — исходная схема; б — схема замещения.

Решение. Пусть базисные условия совпадают с номинальными условиями генератора, т. е. $S_{б} = 52$ Мва и $U_{б} = 10,5$ кв.

Тогда напряжение системы в относительных базисных единицах будет:

$$U_c = \frac{112 \cdot \frac{11}{110}}{10,5} = 1,06;$$

реактивность трансформатора

$$x_{т} = 0,105 \cdot 60 \left(\frac{11}{10,5} \right)^2 = 0,1;$$

реактивность нагрузки

$$x_{н} = 1,2 \cdot \frac{52}{77} = 0,81.$$

Задача 3-9

Для схемы на рис. 3-8а известно, что при установившемся режиме трехфазного короткого замыкания в точке К остаточное напряжение на шинах составляет 72% номинального и токи в цепях генератора и системы одинаковы ($I_G = I_C$). Элементы схемы характеризуются данными:

система — источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 112 кв;

генератор Г 52 Мва, 10,5 кв, $x_d = 1,0$, АРВ включен;

трансформатор Т 60 Мва, 110/11 кв, $u_{т} = 10,5\%$;

нагрузка Н 77 Мва, $x = 1,2$.

Требуется определить пределы отношения токов I_G/I_C при изменении $x_{к1}$ от нуля до бесконечности, считая при этом, что э. д. с. генератора по фазе совпадает напряжением системы.

Эквивалентная схема замещения представлена на рис. 3-8б. В соответствии с условием имеем:

$$I_c = \frac{1,06 - 0,72}{0,1} = 3,4 = \frac{E_{ост} - 0,72}{1,0} = I_G.$$

откуда $E_{ост} = 4,12$.

Ток в нагрузочной ветви

$$I_n = \frac{0 - 0,72}{0,81} = -0,89.$$

Следовательно, ток в месте короткого составляет:

$$I_{к1} = 2 \cdot 3,4 - 0,89 = 5,91,$$

и реактивность $x_{к1}$, при которой соблюдается равенство $I_G = I_C$,

$$x_{к1} = \frac{0,72}{5,91} = 0,122.$$

При $x_{к1} < 0,122$ отношение $I_G/I_C < 1$, и оно достигает своего наименьшего значения при $x_{к1} = 0$, т. е.

$$\frac{I_G}{I_C} = \frac{4,12/1,0}{1,06/0,1} = 0,39.$$

При $x_{к1} > 0,122$ отношение $I_G/I_C > 1$; оно достигает своего наибольшего значения, когда генератор имеет $E_{ост}$ и остаточное напряжение равно номинальному. При этом токи будут:

$$I_c = \frac{1,06 - 1}{0,1} = 0,6; \quad I_G = \frac{4,12 - 1}{1,0} = 3,12$$

и их отношение

$$\frac{I_G}{I_C} = \frac{3,12}{0,6} = 5,2.$$

Это имеет место при токе в месте короткого

$$I_{к1} = 3,12 + 0,6 - \frac{1}{0,81} = 2,49,$$

т. е. когда

$$x_{к1} = \frac{1}{2,49} = 0,401.$$

При дальнейшем увеличении $x_{к1}$ (свыше 0,401) отношение $\frac{I_G}{I_C}$ падает, стремясь к наименьшему значению, которое наступает при $x_{к1} \rightarrow \infty$ (т. е. при отсутствии короткого замыкания). В последнем

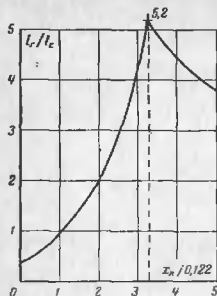


Рис. 3-9. К задаче 3-9. Кривая зависимости отношения I_c/I_c от удаленности короткого замыкания.

генератор G 75 Мва, 10,5 кВ, $x_d = 1,4$, $I_{нр} = 3,5$;
 трансформатор T 80 Мва, 115/10,5 кВ, $u_k = 10,5\%$;
 нагрузка N 90 Мва, $x = 1,2$.

Требуется определить, при какой реактивности x_n (ом) остаточное напряжение на шинах при установившемся режиме короткого замыкания будет составлять 80% номинального напряжения генератора. При этом условия найти величины токов (кА) генератора и трансформатора (на стороне 10,5 кВ), считая, что напряжение системы и э. д. с. генератора совпадают по фазе.

Задача 3-11

При найденном в решении предыдущей задачи значении x_n каковы будут величины остаточного напряжения на шинах и токов генератора и трансформатора, если э. д. с. генератора окажется в противофазе с напряжением системы?

Задача 3-12

Воздушная линия 35 кВ, выполненная проводом АС-70 (ее $x = 0,4$ ом/км и $r = 0,45$ ом/км), отходит от гидростанции. Для испытания ее релейной защиты на расстоянии 12,5 км от станции поставлена на линии трехфазная заводка. Ток в этой линии должен быть постепенно доведен до 1000 А и поддерживаться в течение нескольких секунд.

Для проведения такого испытания на станции могут быть выделены:

генератор 21 Мвт, $\cos \varphi = 0,8$, 10,5 кВ, $x_d = 0,69$, $x_q = 0,48$, $I_{нр} = 3,02$;

случае токи, очевидно, будут:

$$I_c = 0,6; I_n = \frac{-1}{0,81} = -1,23$$

и

$$I_T = 1,23 - 0,6 = 0,63,$$

и отношение

$$\frac{I_T}{I_c} = \frac{0,63}{0,6} = 1,05.$$

Для большей наглядности на рис. 3-9 приведена кривая зависимости отношения I_c/I_c от удаленности короткого замыкания, причем последняя выражена в кратности от $x_n = 0,122$ (при которой, как установлено выше, $I_c/I_c = 1$).

Задача 3-10

Исходная схема аналогична схеме на рис. 3-8а, но ее элементы характеризуются следующими данными: система С — источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 115 кВ;

Исходная схема аналогична схеме на рис. 3-8а, но ее элементы характеризуются следующими данными: система С — источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 115 кВ;

трансформатор 25 Мва, 38,5/10,5 кВ, $u_k = 8\%$.

Требуется определить возбуждение и напряжение генератора, которые у него будут, если питание испытуемой линии производить:

а) через указанный трансформатор;

б) непосредственно от генератора, присоединив к нему линию прямой связью (перемачкой).

Решение. Примем номинальные данные генератора за базисные, т. е. $S_0 = 21,0,8 = 26,3$ Мва; $U_{01} = 10,5$ кВ; $I_{01} = \frac{26,3}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 1,45$ кА и соответственно $U_{011} = 10,5 \cdot 38,5/10,5 = 38,5$ кВ и $I_{011} = 0,395$ кА. Рассмотрим поочередно оба варианта питания линии.

а) Базисная реактивность трансформатора $x_T = 0,08 \cdot \frac{26,3}{25} = 0,084$ и базисные сопротивления линии

$$x = 12,5 \cdot 0,4 \cdot \frac{26,3}{38,5^2} = 0,089 \text{ и } r = 0,089 \cdot \frac{0,45}{0,4} \approx 0,1.$$

Полное сопротивление внешней цепи

$$Z_{вн} = 0,1 + j(0,089 + 0,084) = 0,1 + j0,173 = 0,2 \angle 60^\circ.$$

Заданная величина установившегося тока короткого замыкания в относительных базисных единицах будет:

$$I_k = \frac{1000}{395} = 2,53,$$

для проведения которого напряжение генератора должно быть:

$$U = 2,53 \cdot 0,2 = 0,506$$

и соответственно э. д. с. (рис. 3-10)

$$\begin{aligned} \dot{E}_Q &= I[r + j(x + x_T)] = 2,53[0,1 + j(0,173 + 0,48)] = \\ &= 2,63(0,1 + j0,653) = 1,67 \angle 81^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_q &= \dot{E}_Q + jI_d(x_d - x_q) = [1,67 + 2,53 \sin 81^\circ](0,69 - 0,48) \angle 81^\circ = \\ &= (1,67 + 0,53) \angle 81^\circ = 2,2 \angle 81^\circ. \end{aligned}$$

Следовательно, искомая величина относительного тока возбуждения

$$I_f = E_q = 2,2.$$

б) При непосредственном присоединении линии к генератору ее относительные базисные сопротивления будут:

$$x = 12,5 \cdot 0,4 \cdot \frac{26,3}{10,5^2} = 1,19; r = 1,19 \cdot \frac{0,45}{0,4} = 1,34$$

Обработка осциллограмм и получение по ним различных величин и параметров, что весьма часто требуется в практике, иллюстрированы в ряде задач (4-5—4-9, 4-31).

В двух задачах (4-32 и 4-33) рассмотрен процесс при включении синхронной машины на операторное сопротивление.

Задача 4-1

Гидрогенератор 40 Мва, 10,5 кв, $x_d = 0,81$, $x'_d = 0,31$. $T_{f0} = 2,5$ сек работает на холостом ходу с номинальным напряжением. За реактивностью $x = 0,69$ ом, присоединенной к генератору, произошло металлческое трехфазное короткое замыкание.

Требуется построить кривые изменения действующих значений периодической слагающей тока статора и связанной с ней аperiodической слагающей тока в цепи возбуждения, напряжения и э. д. с. E'_q и E_q генератора, считая, что его АРВ отключено.

Решение. Подсчет проводим в относительных единицах при номинальных условиях генератора. Соответственно этому относительная величина внешней реактивности будет:

$$x = 0,69 \cdot \frac{40}{10,5^2} = 0,25.$$

Начальное значение переходного тока, с учетом того, что $E'_{q0} = U_n = 1$, будет:

$$I' = \frac{1}{0,31 + 0,25} = \frac{1}{0,56} = 1,79,$$

и установившийся ток (при $E_{q0} = U_n = 1$)

$$I = \frac{1}{0,81 + 0,25} = \frac{1}{1,06} = 0,94.$$

Постоянная времени затухания

$$T'_{fd} = T_{f0} \cdot \frac{x'_d + x}{x_d + x} = 2,5 \cdot \frac{0,56}{1,06} = 1,32 \text{ сек.}$$

Выражение для периодической слагающей тока статора будет:

$$i_t = I + (I' - I) e^{-t/T'_{fd}} = 0,94 + (1,79 - 0,94) e^{-t/1,32} = 0,94 + 0,85 e^{-t/1,32}.$$

Все остальные величины связаны с этим током простыми линейными соотношениями:

$$U_t^* = I_t x = I_t 0,25 = 0,235 + 0,212 e^{-t/1,32};$$

$$E'_{qt} = I_t (x'_d + x) = I_t (0,31 + 0,25) = I_t \cdot 0,56 = 0,525 + 0,475 e^{-t/1,32};$$

$$E_{qt} = I_t (x_d + x) = I_t (0,81 + 0,25) = I_t \cdot 1,06 = 1 + 0,9 e^{-t/1,32} = I_{t0}.$$

Последнее выражение одновременно соответствует закономерности изменения аperiodической слагающей тока в цепи возбуждения, так как при принятом спрессовании характеристики холостого хода относительная э. д. с. E_q численно равна относительному току возбуждения.

По приведенным выше выражениям построены требуемые кривые (рис. 4-1). Подкастная в любой точке каждой из этих кривых в масштабе по времени дает значение периодической T'_d . На рис. 4-1 такие касательные проведены к начальным точкам кривых.

Для произвольного момента, например $t = 0,5$ сек, имеем:

$$I_t = 0,94 + 0,85 e^{-0,5/1,32} = 0,94 + 0,85 e^{-0,38} = 0,94 + 0,85 \cdot 0,68 = 0,94 + 0,58 = 1,52$$

и соответственно

$$U = 1,52 \cdot 0,25 = 0,38;$$

$$E'_{qt} = 1,52 \cdot 0,56 = 0,85 \text{ и } E_{qt} = 1,52 \cdot 1,06 = 1,61.$$

Задача 4-2

При тех же исходных данных, что и в задаче 4-1, предположим, что через 0,5 сек происходит отключение короткого замыкания, а затем еще через 0,5 сек повторное его включение.

Для такого цикла переходного процесса требуется построить кривые изменения действующих значений периодической слагающей

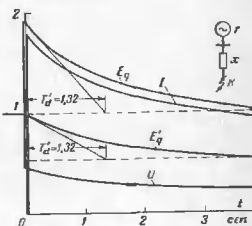


Рис. 4-1. К задаче 4-1. Кривые изменения I , U , E'_q и E_q в функции времени при отсутствии АРВ.

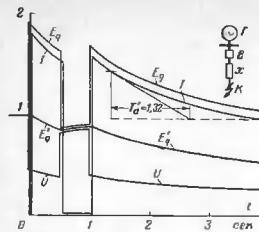


Рис. 4-2. К задаче 4-2. Кривые изменения I , U , E'_q и E_q в функции времени при отсутствии АРВ.

В течение бестоковой паузы напряжение в эти э. д. с., разумеется, остаются одинаковыми и их изменение будет происходить по экспоненте с постоянной времени $T_{I0}=2,5$ сек, стремясь к своим предшествовавшим нормальным значениям ($E_{q0}=E'_{q0}=U_0=1$), т. е.

$$E'_q = E_q = U = 1 + (0,85 - 1) e^{-t/2,5}$$

где t — время с момента отключения короткого.

В момент повторного включения на короткое замыкание имеем:

$$E'_q = 1 + (0,85 - 1) e^{-0,5/2,5} = 1 - 0,12 = 0,88$$

При этом ток в момент повторного включения на короткое замыкание будет:

$$I' = \frac{0,88}{0,31 + 0,25} = 1,57$$

и его дальнейшее изменение будет происходить по выражению¹ (см. решение задачи 4-1)

$$I_t = 0,94 + (1,57 - 0,94) e^{-t/1,32} = 0,94 + 0,63 e^{-t/1,32}$$

соответственно

$$U_t = I_t \cdot 0,25 = 0,235 + 0,158 e^{-t/1,32}$$

$$E'_{qt} = I_t \cdot 0,56 = 0,525 + 0,353 e^{-t/1,32}$$

$$E_{qt} = I_t \cdot 1,06 = 1 + 0,668 e^{-t/1,32}$$

На рис. 4-2 показаны искомые кривые для рассматриваемого случая. На участке от 0 до 0,5 сек они те же, что и на рис. 4-1.

Теперь обратимся к случаю, когда имеется АРВ. Критическая реактивность составляет:

$$x_{кр} = x_d \frac{U_n}{E_{qкр} - U_n} = 0,81 \cdot \frac{1}{3 - 1} = 0,405$$

тока статора, напряжения, э. д. с. E'_q и E_q . При этом следует рассмотреть два случая, когда у генератора:

- АРВ отключено;
- АРВ включено. причем $I_{кр} = 3$ и $T_e \approx 0$

Решение. В решении предыдущей задачи было найдено, что при отсутствии АРВ в момент $t=0,5$ сек э. д. с. $E'_q = -0,85$. Следовательно, после отключения короткого замыкания напряжение скачком возрастает до $U=0,85$, а э. д. с. E_q , напротив, упадет до той же величины $E_q=0,85$.

В течение бестоковой паузы напряжение в эти э. д. с., разумеется, остаются одинаковыми

и их изменение будет происходить по экспоненте с постоянной времени $T_{I0}=2,5$ сек, стремясь к своим предшествовавшим нормальным значениям ($E_{q0}=E'_{q0}=U_0=1$), т. е.

$$E'_q = E_q = U = 1 + (0,85 - 1) e^{-t/2,5}$$

где t — время с момента отключения короткого.

В момент повторного включения на короткое замыкание имеем:

$$E'_q = 1 + (0,85 - 1) e^{-0,5/2,5} = 1 - 0,12 = 0,88$$

При этом ток в момент повторного включения на короткое замыкание будет:

$$I' = \frac{0,88}{0,31 + 0,25} = 1,57$$

и его дальнейшее изменение будет происходить по выражению¹ (см. решение задачи 4-1)

$$I_t = 0,94 + (1,57 - 0,94) e^{-t/1,32} = 0,94 + 0,63 e^{-t/1,32}$$

соответственно

$$U_t = I_t \cdot 0,25 = 0,235 + 0,158 e^{-t/1,32}$$

$$E'_{qt} = I_t \cdot 0,56 = 0,525 + 0,353 e^{-t/1,32}$$

$$E_{qt} = I_t \cdot 1,06 = 1 + 0,668 e^{-t/1,32}$$

На рис. 4-2 показаны искомые кривые для рассматриваемого случая. На участке от 0 до 0,5 сек они те же, что и на рис. 4-1.

Теперь обратимся к случаю, когда имеется АРВ. Критическая реактивность составляет:

$$x_{кр} = x_d \frac{U_n}{E_{qкр} - U_n} = 0,81 \cdot \frac{1}{3 - 1} = 0,405$$

Поскольку $x=0,25 < x_{кр}$, то под действием АРВ напряжение генератора не будет восстановлено до нормального. Установившийся ток при предельном возбуждении будет:

$$I = \frac{3}{0,81 + 0,25} = 2,82 \quad (\text{или иначе } I = 3 - 0,94 = 2,82)$$

Начальное значение тока короткого не зависит от АРВ, и оно раньше было найдено $I'=1,79$. Следовательно, в интервале от 0 до 0,5 сек изменение тока будет происходить по выражению

$$I_t = 2,82 + (1,79 - 2,82) e^{-t/1,32} = 2,82 - 1,03 e^{-t/1,32}$$

Умножив, как выше, на 0,25, 0,56 и 1,06, получим выражения соответственно для U , E'_q и E_q .

В момент отключения короткого ток $I=2,12$ и переходная э. д. с. $E'_q=2,12 \cdot 0,56=1,19$. В течение бестоковой паузы имеем:

$$E'_q = E_q = U = 1 + (1,19 - 1) e^{-t/2,5}$$

В момент повторного включения короткого

$$E'_q = 1 + (1,19 - 1) e^{-0,5/2,5} = 1,16$$

Ток в момент повторного включения на короткое замыкание

$$I' = \frac{1,16}{0,56} = 2,06$$

и его дальнейшее изменение

$$I_t = 2,82 + (2,06 - 2,82) e^{-t/1,32} = 2,82 - 0,76 e^{-t/1,32}$$

После умножения на соответствующие коэффициенты (см. выше) легко получить аналогичные выражения для остальных величин.

На рис. 4-3 приведены искомые кривые для данного случая. Сопоставляя их с кривыми на рис. 4-2, заметим, что при отсутствии АРВ все величины при замкнутой цепи затухают, а в течение бестоковой паузы напряжение и э. д. с. возрастают, в то время как при наличии АРВ наблюдаются обратные закономерности, т. е. возрастание всех величин при замкнутой цепи и затухание напряжения и э. д. с. в бестоковом интервале.

Задача 4-3

Гидрогенератор, параметры которого $x_d=1,0$, $x'_d=0,6$, $x_c=0,15$, $x'_c=0,3$, $T_{I0}=5$ сек, имеет АРВ, и его $I_{кр}=3$. В присоединенной к генератору чисто индуктивной цепи произошло металлическое трехфазное короткое замыкание. Удаленность короткого замыкания

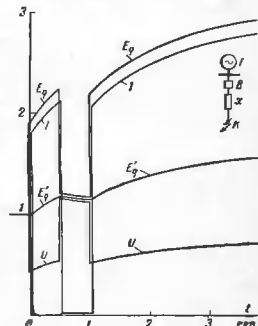


Рис. 4-3. К задаче 4-2. Кривые изменения I , U , E'_q и E_q в функции времени при наличии АРВ.

¹ Здесь t — с момента повторного включения короткого.

характеризуется реактивностью $x=0,7$, выраженной в относительных единицах при номинальных условиях генератора.

Требуется определить, в какой момент времени напряжение генератора под действием АРВ достигнет нормальной величины, если до короткого замыкания генератор работал с номинальным напряжением на холостом ходу и $T_{\text{вс}}=0$.

Решение. Начальное значение переходного тока составляет:

$$I' = \frac{1}{0,3 + 0,7} = 1,$$

и установившийся ток при предельном возбуждении

$$I = \frac{3}{1,0 + 0,7} = 1,77.$$

Постоянная времени затухания свободного переходного тока и одновременно возрастания (от действия АРВ) принужденного тока будет:

$$T'_{\text{в}} = T_{\text{в}} \frac{x'_d + x}{x_d + x} = 5 \cdot \frac{0,3 + 0,7}{1,0 + 0,7} = 2,94 \text{ сек.}$$

Поставленное условие можно записать следующим образом:

$$[1 + (I' - I) e^{-t/T'_{\text{в}}}] x = U_{\text{н}}$$

или, подставляя числовые значения,

$$[1,77 + (1 - 1,77) e^{-t/2,94}] 0,7 = 1,$$

откуда

$$e^{-t/2,94} = 0,445$$

и искомое время

$$t = 2,94 \ln \frac{1}{0,445} = 2,35 \text{ сек.}$$

Задача 4-4

Для условий предыдущей задачи определить, до какой величины должна быть уменьшена постоянная времени $T'_{\text{в}}$ или увеличен предельный ток возбуждения I , чтобы напряжение генератора достигло нормальной значения уже через 1 сек.

Решение. В первом случае исходом из выражения

$$\frac{1}{T'_{\text{в}}} = \ln \frac{1}{0,445} = 0,8, \quad \text{откуда} \quad T'_{\text{в}} = \frac{1}{0,8} = 1,25 \text{ сек.}$$

Следовательно, искомая постоянная времени

$$T_{\text{в}} = 1,25 \cdot \frac{1 + 0,7}{0,3 + 0,7} = 2,12 \text{ сек (вместо 5 сек.)}$$

Во втором случае выражение для тока через 1 сек, очевидно, должно быть следующим:

$$\frac{E_{\text{вр}}}{1 + 0,7} + \left(\frac{1}{0,3 + 0,7} - \frac{E_{\text{вр}}}{1 + 0,7} \right) e^{-1/2,94} = \frac{1}{0,7} = 1,43,$$

откуда значение предельной э. д. с. (или относительного предельного тока возбуждения)

$$E_{\text{вр}} = 4,2 = I_{\text{вр}} \text{ (вместо } I_{\text{вр}} = 3).$$

Задача 4-5

Для двух генераторов Г-1 и Г-2 известны следующие величины:

Генератор	Ток при трехфазном коротком замыкании, x_d		Постоянная времени обмотки возбуждения на холостом ходу $T'_{\text{в}}$, сек
	начальный переходный	установившегося режима	
Г-1	24	12	4,0
Г-2	20	15	5,34

Указанные величины токов соответствуют условию, что до короткого замыкания оба генератора работали на холостом ходу с номинальным напряжением и их АРВ отключены.

Требуется определить, в какой момент времени токи этих генераторов при заданных условиях одинаковы.

Решение. Поскольку в данном случае э. д. с. в начальный момент короткого замыкания и при установившемся режиме одинаковы, отношение результирующих реактивностей для начального момента к результирующим реактивностям при установившемся режиме можно заменить обратным отношением соответствующих токов, т. е.

для генератора Г-1

$$\frac{x'_d}{x_d} = \frac{I}{I'} = \frac{12}{24} = 0,5;$$

для генератора Г-2

$$\frac{x'_d}{x_d} = \frac{I}{I'} = \frac{15}{20} = 0,75.$$

Тогда постоянные времени затухания свободных переходных токов каждого генератора будут:

$$\text{у Г-1 } T'_{\text{в}} = 4 \cdot 0,5 = 2 \text{ сек и у Г-2 } T'_{\text{в}} = 5,34 \cdot 0,75 = 4 \text{ сек.}$$

Приравняв выражения для токов обоих генераторов, получим уравнение

$$(24 - 12)e^{-t/2} + 12 = (20 - 15)e^{-t/4} + 15,$$

которое после простых преобразований приобретает вид

$$12e^{-t/2} - 5e^{-t/4} - 3 = 0.$$

Его решение относительно искомого времени t проще всего выполнить графически. В данном частном случае его можно рассматривать как квадратное уравнение

$$12x^2 - 5x - 3 = 0, \text{ где } x = e^{-t/4},$$

положительный корень которого

$$x = \frac{5 + \sqrt{5^2 + 4 \cdot 12 \cdot 3}}{2 \cdot 12} = 0,75.$$

Следовательно,

$$e^{-t/4} = 0,75,$$

откуда

$$t = 4 \ln \frac{1}{0,75} = 1,15 \text{ сек.}$$

На рис. 4.4 сплошными линиями проведены сравниваемые кривые изменения токов периодической слагающей токов обоих генераторов.

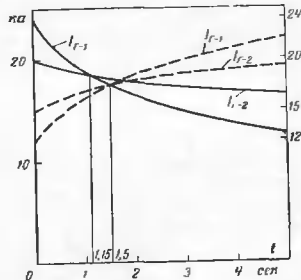


Рис. 4.4. К задачам 4-5 и 4-6. Кривые изменения токов генераторов Г-1 и Г-2 при трехфазном коротком замыкании.

Задача 4-6

Заданные в предыдущей задаче величины начального переходного и установившегося токов трехфазного короткого замыкания влкого генератора взаимно поменяем местами, т. е. у генератора Г-1 $I' = 12$ кА и $I = 24$ кА и у генератора Г-2 $I' = 15$ кА и $I = 20$ кА. Такое соотношение, очевидно, возможно лишь при наличии АРВ у генераторов.

Требуется найти момент времени, когда токи этих генераторов одинаковы, имея в виду, что до короткого замыкания оба генератора работали на холостом ходу с номинальным напряжением, их АРВ включены, постоянная времени $T_e = 0$; предельный ток возбуждения у обоих генераторов одинаков, и его относительная величина составляет $I_{пр} = 3$.

Решение. Отношение токов в данном случае не характеризует отношение соответствующих реактивных, так как в д. с. генератора в начальный момент короткого замыкания и при установившемся режиме короткого замыкания пропорционален возбуждению, а значит найти значения этих токов при $I_1 = 1$, т. е. для Г-1 $I = 24/3 = 8$ кА и для Г-2 $I = 20/3 = 6,67$ кА.

Теперь аналогично предыдущему можно определить постоянные времени изменения токов (при $T_e = 0$):

$$\text{у Г-1 } T'_{e1} = 4 \cdot \frac{8}{12} = 2,67 \text{ сек}$$

$$\text{у Г-2 } T'_{e2} = 5,34 \cdot \frac{6,67}{15} = 2,37 \text{ сек.}$$

Для нахождения искомого момента времени имеем уравнение

$$(12 - 24)e^{-t/2,67} + 24 = (15 - 20)e^{-t/2,37} + 20,$$

или после преобразования

$$24 - 12e^{-t/2,67} = 20 - 5e^{-t/2,37}.$$

Построив по нескольким точкам кривые для левой и правой частей уравнения, найдем до точки их пересечения искомое время $t = 1,5$ сек (рис. 4.4, пунктирные кривые).

Задача 4-7

После обработки осциллограммы, снятой при внезапном трехфазном коротком замыкании на выводах 6,3 кВ генератора, получены следующие величины токов (действующие значения): начальный переходный ток 30 кА; ток через 1 сек 25 кА, установившийся ток 10 кА.

При этом до короткого замыкания генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Используя эти данные, нужно рассмотреть переходный процесс трехфазного короткого замыкания за реактивной зоной $x = 0,24$ Ом, подключенной к этому генератору, и построить кривую

изменения во времени напряжения генератора. Решенье провести для двух случаев, когда генератор:

- а) не имеет АРВ и его относительный ток возбуждения $I_f=1$;
 б) снабжен АРВ и его предельный ток возбуждения $I_{f\text{пр}}=3.3$.

Задача 4-8

Для генератора без демпферных обмоток с параметрами 27.4 Мва , 6.3 кВ , 2.5 кА , $\text{ОКЗ}=0.91$ проведен опыт внезапного трехфазного короткого замыкания. Последнее было осуществлено за чисто индуктивным сопротивлением. До проведения опыта генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением и его АРВ было отключено.

По полученной осциллограмме четко установлены амплитуды периодической слагающей тока через $0.5 \text{ сек} - 4.250 \text{ а}$, через $1 \text{ сек} - 3.350 \text{ а}$ и при установившемся режиме — 2.550 а .

Используя указанные данные, требуется определить начальный переходный ток, продолжительность переходной реактивности генератора x_d и постоянную времени его обмотки возбуждения T_d .

Решение. Выведем вначале некоторые общие соотношения. Пусть для двух произвольных моментов времени t_1 и t_2 известны значения периодической слагающей тока короткого замыкания I_{t1} и I_{t2} и, кроме того, величина установившегося тока короткого замыкания. Тогда для машины без демпферных обмоток и при отсутствии АРВ можно написать два уравнения:

$$I_{t1} - I = I'_{\text{св}} e^{-t_1/T'_d};$$

$$I_{t2} - I = I'_{\text{св}} e^{-t_2/T'_d},$$

в которых две неизвестные величины: $I'_{\text{св}}$ и T'_d .

Разделив первое уравнение на второе, получим:

$$\frac{I_{t1} - I}{I_{t2} - I} = e^{\frac{t_2 - t_1}{T'_d}},$$

откуда

$$T'_d = t_1 \frac{(n-1)}{\ln \frac{I_{t1} - I}{I_{t2} - I}},$$

где $n = t_2/t_1$.

После подстановки полученного выражения для T'_d в первое уравнение и выполнения ряда преобразований найдем:

$$I'_{\text{св}} = \sqrt[n-1]{\frac{(I_{t1} - I)^n}{I_{t2} - I}}.$$

Обратимся теперь к условиям данной задачи.

Выразим заданные токи в относительных единицах (помня, что для них даны амплитудные значения):

$$\text{для } 0.5 \text{ сек } I_{t1} = \frac{4.250}{\sqrt{2 \cdot 2.500}} = 1.2;$$

$$\text{для } 1 \text{ сек } I_{t2} = \frac{3.350}{\sqrt{2 \cdot 2.500}} = 0.95;$$

$$\text{для установившегося режима } I = \frac{2.550}{\sqrt{2 \cdot 2.500}} = 0.72.$$

Синхронная реактивность генератора составляет $x_d = \frac{1}{\text{ОКЗ}} = \frac{1}{0.91} = 1.1$. Внешняя реактивность цепи короткого замыкания может быть получена из равенств

$$I = 0.72 = \frac{1}{1.1 + x}, \quad \text{откуда } x = 0.292.$$

По полученным выше выражениям находим при $n = 1/0.5 = 2$

$$I'_{\text{св}} = \frac{(1.2 - 0.72)^2}{0.95 - 0.72} \approx 1$$

и

$$T'_d = 0.5 \frac{1}{\ln \frac{1.2 - 0.72}{0.95 - 0.72}} = 0.68 \text{ сек}.$$

Начальное значение переходного тока

$$I' = I'_{\text{св}} + I = 1 + 0.72 = 1.72,$$

и искомая реактивность генератора

$$x'_d = \frac{1}{1.72} - 0.292 = 0.29.$$

Искомая постоянная времени

$$T_{10} = 0.68 \frac{1.1 + 0.292}{0.29 + 0.292} = 1.63 \text{ сек}$$

или иначе, имея в виду, что в начальный момент и при установившемся режиме короткого замыкания э. д. с. генератора в данном случае одинаковы,

$$T_{10} = 0.68 \frac{1.72}{0.72} = 1.63 \text{ сек}.$$

Задача 4-9

Показать, что если для генератора без демпферных обмоток при отключенном АРВ известны значения периодической сглаживающей тока трехфазного короткого замыкания для трех моментов времени I_{t_1} , I_{t_2} и I_{t_3} , причем эти моменты находятся в соотношении $t_1 : t_2 : t_3 = 1 : 2 : 3$, то начальное значение свободного переходного тока $I'_{св}$, установившийся ток короткого замыкания I и постоянная времени затухания свободного переходного тока $T'_{д}$ могут быть найдены по следующим выражениям:

$$I'_{св} = \frac{(I_{t_1} - I_{t_2})^2}{(I_{t_2} - I_{t_1})[(I_{t_1} - I_{t_2}) - (I_{t_2} - I_{t_3})]};$$

$$I = \frac{I_{t_1} I_{t_3} - I_{t_2}^2}{(I_{t_1} - I_{t_2}) - (I_{t_2} - I_{t_3})};$$

$$T'_{д} = \frac{t_1}{\ln \frac{(I_{t_1} - I_{t_2})}{(I_{t_2} - I_{t_3})}};$$

Задача 4-10

К выводам генератора присоединена нагрузка, которая приближенно характеризуется постоянной реактивностью, относительная величина которой при номинальных условиях генератора составляет $x_{нвстр} = 1,25$. Параметры генератора: $x_d = 0,9$; $x'_d = 0,25$; $T_{J0} = -2$ сек; $I_{нвстр} = 3,6$. На отходящей от генератора шине цепи с реактивностью x_N произошло металлическое трехфазное короткое замыкание, которое через 1 сек отключается линейным выключателем В (рис. 4-5).

Построить кривые изменения э. д. с. E_q и E'_q , напряжения U и тока I генератора во время процесса короткого замыкания и после его отключения. Построение произвести для двух случаев, когда: а) $x_N = 0$ и б) $x_N = 0,25$, считая в обоих случаях $T_e = 0$.

Решение. Предшествующий ток нагрузки генератора, очевидно, составляет $I_0 = 1/1,25 = 0,8$, и соответственно предшествующие значения э. д. с.:

$$E'_0 = 1 + 0,8 \cdot 0,25 = 1,2;$$

$$E_0 = 1 + 0,8 \cdot 0,90 = 1,72.$$

а) При $x_N = 0$ величины токов будут $I' = \frac{1,2}{0,25} = 4,8$; $I = \frac{3,6}{0,9} = 4$ и э. д. с. $E_{q10} = 4,8 \cdot 0,9 = 4,32$, а $U_{q1} = 0$.

Постоянная времени $T'_{д} = 2 \cdot \frac{0,25}{0,90} = 0,555$ сек, и ток через 1 сек

$$I = (4,8 - 4)e^{-1/0,555} + 4 = 4,14.$$

Следовательно, э. д. с. через 1 сек будут:

$$E'_q = 4,14 \cdot 0,25 = 1,035 \quad \text{и} \quad E_q = 4,14 \cdot 0,9 = 3,73.$$

В начальный момент после отключения выключателя В отдельные величины будут:

$$I' = \frac{1,035}{0,25 + 1,25} = 0,668;$$

$$U = 0,668 \cdot 1,25 = 0,835; \quad E'_q = 0,668 (0,9 + 1,25) = 1,44;$$

а дальнейшие изменения отдельных величин до своих значений, кото-

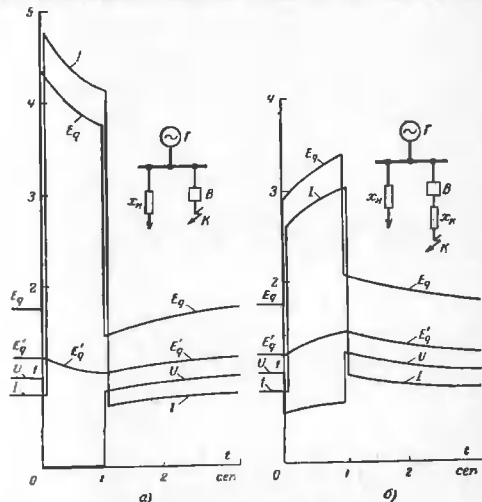


Рис. 4-5. К задаче 4-10. Кривые изменения E_q , E'_q , U и I в функции времени.

а — при $x_N = 0$; б — при $x_N = 0,25$.

рые были до возникновения короткого замыкания, будут происходить по экспоненте с постоянной времени

$$T'_{д} = 2 \cdot \frac{0,25 + 1,25}{0,90 + 1,25} = 1,4 \text{ сек.}$$

Некоторые кривые для рассматриваемых условий приведены на рис. 4-5, а.

б) При $x_n = 0,26$ реактивность внешней цепи генератора будет $x_{an} = 0,26/1,25 = 0,215$ и постоянная времени

$$T'_d = 2 \frac{0,25 + 0,215}{0,50 + 0,215} = 0,84 \text{ сек.}$$

Значения токов:

$$I' = \frac{1,2}{0,25 + 0,215} = 2,58; \quad I = \frac{3,6}{0,9 + 0,215} = 3,25;$$

$$\text{через } 1 \text{ сек } I = (2,58 - 3,25)e^{-1,0/0,84} + 3,25 = 3,05.$$

Напряжение и э. д. с. в момент короткого замыкания:

$$U = 2,58 \cdot 0,215 = 0,555; \quad E'_{q(0)} = 2,58(0,9 + 0,215) = 2,88$$

и через 1 сек:

$$U = 3,05 \cdot 0,215 = 0,655; \quad E'_q = 3,05(0,25 + 0,215) = 1,42$$

и

$$E_q = 3,05(0,9 + 0,215) = 3,4.$$

В начальный момент после отключения выключателя В

$$I' = \frac{1,42}{0,25 + 1,25} = 0,945;$$

$$U = 0,945 \cdot 1,25 = 1,18; \quad E'_q = 0,945(0,9 + 1,25) = 2,04;$$

дальнейшие изменения отдельных величин до их значений в нормальном предшествующем режиме будут происходить по экспоненте с постоянной времени, как и ранее, $T'_d = 1,4$ сек.

Искомые кривые для данного случая представлены на рис. 4-5,б.

Интересно отметить, что в то время как при условиях п. «а» все величины (рис. 4-5,а) в течение процесса короткого замыкания затухают, а после отключения короткого возрастают, для условий п. «б» наблюдается обратная картина (рис. 4-5,б), т. е. в процессе короткого происходит нарастание отдельных величин, а после отключения короткого их уменьшение до тех значений, которые были в предшествующем рабочем режиме.

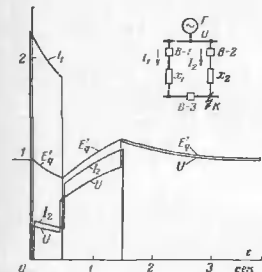


Рис. 4-6. К задаче 4-11. Кривые изменения I , I_2 , U и E'_q в функции времени.

ротное замыкание. Его отключение происходит через 0,5 сек отключения выключателя В-3, спустя еще 1 сек происходит отключение выключателя В-2.

Задача 4-11

В точке К схемы на рис. 4-6 произошло трехфазное короткое замыкание. Его отключение происходит в следующем порядке: через 0,5 сек отключается выключатель В-3, спустя еще 1 сек происходит отключение выключателя В-2.

Элементы схемы характеризуются данными:

генератор Г 24 Мва, 6,3 кв, $x_d = 1,5$, $x'_d = 0,25$, $T_{j0} = 2$ сек,

$$I_{нр} = 3, \quad T_{e0} = 0;$$

реактивности $x_1 = 0,25$ ом, $x_2 = 1,4$ ом.

До короткого замыкания генератор работал на холостом ходу в номинальных напряжениях.

Требуется построить кривые изменения периодической сглаженной токов I и I_2 (в выключателях В-1 и В-2), напряжения и э. д. с. E'_q генератора в функции времени.

Решение. Выразим реактивности x_1 и x_2 в относительных единицах при номинальных условиях генератора, т. е.

$$x_1 = 0,25 \frac{24}{6,3^2} = 0,15 \quad \text{и} \quad x_2 = 1,4 \frac{24}{6,3^2} = 0,84.$$

Эквивалентная реактивность параллельных ветвей

$$x_0 = 0,15/0,84 = 0,128.$$

Коэффициенты распределения токов для этих ветвей:

$$C_1 = \frac{0,128}{0,15} = 0,85; \quad C_2 = 1 - 0,85 = 0,15.$$

Критическая реактивность

$$x_{кр} = 1,5 \sqrt{\frac{1}{1}} = 0,75.$$

До отключения выключателя В-3:

$$I' = \frac{1}{0,25 + 0,128} = 2,65; \quad I = \frac{3}{1,5 + 0,128} = 1,84;$$

$$T'_d = 2 \frac{0,25 + 0,128}{1,5 + 0,128} = 0,47 \text{ сек.}$$

В момент отключения В-3 ($t = 0,5$ сек):

$$I_n = 1,84 + (2,65 - 1,84)e^{-0,5/0,47} = 2,11;$$

$$U = 2,11 \cdot 0,128 = 0,27; \quad E'_q = 2,11(0,25 + 0,128) = 0,8.$$

Токи в выключателях:

$$\text{II } I \text{ и начальный момент } I_2 = 0,85 \cdot 2,65 = 2,25; \quad \text{B2 } I_2 = 0,4;$$

$$\text{II } I \text{ через } 0,5 \text{ сек } I_1 = 0,85 \cdot 2,11 = 1,79; \quad \text{B2 } I_2 = 0,32.$$

После отключения выключателя В-3 ток в начальный момент

$$I'_n = I'_2 = \frac{0,8}{0,25 + 0,84} = 0,73;$$

устанавливающийся ток при предельном возбуждении

$$I_n = I_2 = \frac{3}{1,5 + 0,84} = 1,28,$$

однако этот ток не будет достигнут, так как $x_{кв} = 0,75$ меньше $x_n = 0,84$ (см. ниже).

Постоянная времени

$$T'_d = 2 \cdot \frac{0,25 + 0,84}{1,5 + 0,84} = 0,93 \text{ сек.}$$

Ток к моменту отключения выключателя В-2 будет:

$$I_n = I_d = 1,28 + (0,73 - 1,28)e^{-1/0,93} = 1,09,$$

и соответственно

$$U = 1,09 \cdot 0,84 = 0,92; E'_g = 1,09(0,25 + 0,84) = 1,19.$$

После отключения В-2 изменение U и E'_g будет проходить по уравнению

$$E'_g = U = 1 + (1,19 - 1)e^{-t/2}.$$

По полученным выражениям построены искомые кривые, которые приведены на рис. 4-6.

Отметим, что если бы выключатель В-2 не отключался (или отключался позднее), то под действием АРВ напряжение генератора достигло бы нормального уровня. Время, через которое это произойдет (считая с момента отключения В-3), можно найти из выражения

$$1,28 + (0,73 - 1,28)e^{-t/0,93} = \frac{U_n}{x_2} = \frac{1}{0,84} = 1,19,$$

откуда $t/0,93 = 1,8$, или $t = 0,93 \cdot 1,8 = 1,7 \text{ сек.}$

Задача 4-12

Генератор 235 *Мва*, 18 *кв*. $x_d = 1,5$, $x'_d = 0,23$, $T_{J0} = 6,2 \text{ сек}$, $I_{нр} = 4$, $T_{d0} = 0$, через повышающий трансформатор 240 *Мва*, 230/18 *кв*, $u_n = 12\%$ связан с двухцепной линией 120 *км* ($x = 0,4 \text{ Ом/км}$ одной цепи). В конце одной из цепей линии произошел металлическое трехфазное короткое замыкание. Поврежденная цепь практически одновременно через 0,25 *сек* отключена с обеих сторон. Спустя еще 0,5 *сек* поврежденная цепь действием автоматики (АПВ) повторно включена со стороны станции. Короткое оказалось устойчивым, и цепь линии снова через 0,25 *сек* отключается.

Требуется определить величины токов в выключателях линии при:

- первом отключении поврежденной цепи;
- повторном включении поврежденной цепи;
- повторном отключении поврежденной цепи.

Определению подлежат действующие значения периодической слагающей тока. считая, что генератор предварительно работал на холостом ходу с номинальным напряжением и его АРВ включено.

Задача 4-13

Генератор, параметры которого 30 *Мва*, 6,3 *кв*, $\cos \varphi = 0,85$, $x_d = 1,0$, $x'_d = 0,6$, $x''_d = 0,3$, $T_{J0} = 2 \text{ сек}$, $I_{нр} = 3$ и $T_{d0} \approx 0$, работает на сопротивление, при котором обеспечивается номинальная нагрузка генератора. Активная и реактивная составляющие этого сопротивления могут быть закорочены включением выключателей В-1 и В-2, как это показано на схеме рис. 4-7.

Переходный процесс вызывается вначале включением выключателя В-1 и затем через 0,5 *сек* дополнительным включением выключателя В-2.

Требуется построить кривые действующих значений тока (его периодической слагающей), напряжения и э. д. с. E'_g генератора, считая, что АРВ включено.

Решение. При последовательном соединении сопротивлений r и x их относительные величины при заданных условиях, очевидно, будут:

$$r = 0,85 \text{ и } x = \sqrt{1 - 0,85^2} = 0,53.$$

Угол ξ между током I и осью $q-q$ определится из

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{0,6 + 0,53}{0,85} = 1,33,$$

откуда $\xi = 53^\circ$.

Угол δ между напряжением и осью $q-q$ составляет:

$$\delta = 53 - 32 = 21^\circ,$$

или $32^\circ = \arccos 0,85$.

Переходная э. д. с. предшествующего режима будет:

$$E'_g = U \cos \delta + x'_d I \sin \xi = f \cos 21^\circ + 0,3f \sin 53^\circ = 0,934 + 0,3 \cdot 0,8 = 1,174.$$

Начальное значение переходного тока

$$I' = \frac{1,174}{0,3 + 0,53} = 1,41.$$

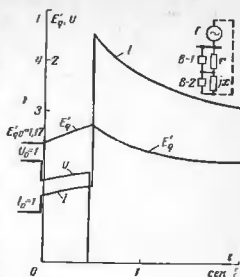


Рис. 4-7. К задаче 4-13. Кривые изменения I , U и E'_g в функции времени.

Установившийся ток при предельном возбуждении

$$I = \frac{3}{1,0 + 0,53} = 1,96.$$

Значение постоянной времени

$$T'_d = 2 \cdot \frac{0,3 + 0,53}{1,0 + 0,53} = 1,08 \text{ сек.}$$

Величина тока через 0,5 сек, но до включения выключателя В-2

$$I = 1,96 + (1,41 - 1,96)e^{-1,5/1,08} = 1,61,$$

и значение переходной э. д. с. в тот же момент времени

$$E'_q = 1,61(0,3 + 0,53) = 1,34.$$

После включения выключателя В-2 имеем начальное значение тока

$$I' = \frac{1,34}{0,3} = 4,47;$$

установившийся ток при предельном возбуждении

$$I = \frac{3}{1} = 3;$$

постоянная времени

$$T'_d = 2 \cdot \frac{0,3}{1,0} = 0,6 \text{ сек.};$$

значение тока в произвольный момент

$$I_t = 3 + (4,47 - 3)e^{-4/0,6} = 3 + 1,47e^{-4/0,6};$$

э. д. с.

$$E'_{qt} = I_t \cdot 0,3 = 0,9 + 0,44e^{-4/0,6}.$$

где t — время с момента включения выключателя В-2.

Кривые на рис. 4-6 иллюстрируют полученные закономерности. После включения В-2 напряжение генератора падает до нуля.

Задача 4-14

Гидрогенератор, параметры которого 24 Мва, 6,3 кВ, $x_d = 1,0$, $x'_d = 0,6$, $x''_d = 0,25$, $T_{J0} = 2$ сек, несет нагрузку 15 Мвт при $\cos \phi = 0,85$ и номинальном напряжении. За внешней реактивностью $x = 0,41$ ом, которая находится до места присоединения нагрузки, произошло металлическое трехфазное короткое замыкание. Спустя 1,4 сек генератор отключился своим выключателем и перешел в режим холодного хода.

146

Требуется построить кривые изменения периодической слагающей тока I статора, напряжения U и э. д. с. E'_q и E_q в функции времени t для двух случаев, когда:

- АРВ отключено;
- АРВ включено; предельный ток возбуждения $I_{Jnp} = 4$ и постоянная времени $T'_d = 0$.

В обоих случаях считать, что скорость вращения ротора считается постоянной.

Задача 4-15

Провести сравнение двух переходных процессов в генераторе, названных:

- металлическим трехфазным коротким замыканием непосредственно у генератора;
- несинхронным включением генератора, когда его напряжение в противофазе с напряжением сети.

В обоих случаях считать, что такой процесс продолжается 1,5 сек, после чего происходит отключение генератора и он продолжает работать на холодном ходу. Скорость вращения $\omega, \text{ рад/сек}$ генератора постоянна.

Исходные данные:

генератор $P = 37,5$ Мва, $U_n = 6,3$ кВ, $x_d = 2,0$, $x'_d = 0,2$, $T_{J0} = 5$ сек, $I_{Jnp} = 3$, АРВ включено, $T_e = 0$;

система С — источник бесконечной мощности с номинальным напряжением 6,3 кВ, приложенным за эквивалентной реактивностью $x = 0,42$ ом.

Полученные изменения периодической слагающей тока, напряжения и э. д. с. E'_q генератора представить соответствующими кривыми в функции времени (в диапазоне от 0 до 5 сек).

Решение. Решение проводим в относительных единицах при номинальных условиях генератора. Рассмотрим поочередно каждый из описанных переходных процессов.

а) При трехфазном коротком замыкании на выводах генератора имеем:

$$I' = \frac{1}{0,2} = 5; I = \frac{3}{2} = 1,5; T'_d = 5 \cdot \frac{0,2}{2,0} = 0,5 \text{ сек.}$$

Ток через 1,5 сек $I = 1,5 + (5 - 1,5)e^{-1,5/0,5} = 1,68$ и э. д. с. в тот же момент $E'_q = 1,68 \cdot 0,2 = 0,336$.

147*

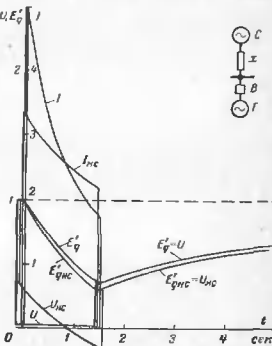


Рис. 4-8. К задаче 4-15. Кривые изменения I , U и E'_q в функции времени.

147

После отключения короткого изменение напряжения и э. д. с. E'_q будет происходить по уравнению

$$E'_q = U = 1 + (0,336 - 1)e^{-t/5},$$

где t — время с момента отключения короткого.

Найденные закономерности представлены соответствующими кривыми на рис. 4-8.

б) Эквивалентная реактивность связи с системой, выраженная в относительных единицах при номинальных условиях генератора, составляет:

$$x = 0,42 \frac{37,5}{6,32} = 0,4.$$

При включении в противофазу значения токов будут¹:

$$I'_{ис} = \frac{1+1}{0,2+0,4} = 3,33 \text{ и } I_{ис} = \frac{3+1}{2+0,4} = 1,67.$$

Постоянная времени

$$T'_{ис} = 5 \cdot \frac{0,2+0,4}{2+0,4} = 1,25 \text{ сек.}$$

Значение тока через 1,5 сек

$$I_{ис} = 1,67 + (3,33 - 1,67)e^{-1,5/1,25} = 2,17$$

и э. д. с.

$$E'_{qис} = -1 + 2,17(0,2+0,4) = 0,3.$$

Напряжение генератора в начальный момент несинхронного включения $U_{ис} = -1 + 3,33 \cdot 0,4 = 0,33$ и через 1,5 сек

$$U_{ис} = -1 + 2,17 \cdot 0,4 = -0,13.$$

После отключения генератора его напряжение и э. д. с. $E'_{qис}$ будет изменяться по уравнению

$$U_{ис} = E'_{qис} = 1 + (0,3 - 1)e^{-t/5},$$

где t — время с момента отключения генератора.

Полученные выражения для тока, напряжения и э. д. с. E'_q при несинхронном включении иллюстрированы соответствующими кривыми на рис. 4-8.

Из сравнения кривых на рис. 4-8 видно, что при заданных условиях и параметрах элементов схемы ток при несинхронном включении вначале меньше тока при коротком замыкании, но затем (примерно через 0,8 сек) он становится больше его. Следует под-

¹ При этом относительные напряжения системы принято $U=1$. Индекс «ис» указывает, что данные величины получены при несинхронном включении

заметить, что такая картина будет иметь место только при отсутствии каких-либо качаний или скольжения ротора генератора в течение рассматриваемых 1,5 сек после несинхронного включения.

Задача 4-16

Для генератора без демпферных обмоток, снабженного автоматическим регулированием возбуждения, вывести в общем виде выражение для момента времени, когда действующее значение периодической слагающей тока при трехфазном коротком замыкании достигает своего минимума. Далее, приняв параметры генератора $x_d = 1,0$, $x'_d = 0,25$, $I_{иср} = 4$ и $T'_{ис} = 4$ сек, построить кривые изменения действующего значения периодической слагающей тока трехфазного короткого замыкания на выходах генератора при нескольких значениях постоянной времени $T_e = n \cdot T'_d$, изменяя n_e в пределах от 0,25 до 1.

Решение. Общее выражение искомого тока имеет вид:

$$I_{nt} = I + I'_{св[0]} e^{-\frac{t}{T'_d}} + \Delta I_{нр} \left(1 - \frac{T'_d e^{-\frac{t}{T'_d}} - T_e e^{-\frac{t}{T_e}}}{T'_d - T_e} \right),$$

где $I'_{св[0]} = I'_{[0]} - I$ — начальное значение свободного переходного тока; $\Delta I_{нр} = I_{иср} - I$ — избыточное приращение принужденного (установившегося) тока.

Возьмем производную $\frac{dI_{nt}}{dt}$ и приравняем ее нулю

$$\frac{dI_{nt}}{dt} = -\frac{I'_{св[0]}}{T'_d} e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{\Delta I_{нр}}{T'_d - T_e} e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{\Delta I_{нр}}{T'_d - T_e} e^{-\frac{t}{T_e}} = 0,$$

будди после преобразования получаем искомое выражение

$$t = \frac{T'_d T_e}{T'_d - T_e} \ln \frac{\Delta I_{нр} T'_d}{I'_{св[0]} T_e - (I'_{св[0]} - \Delta I_{нр}) T'_d}.$$

Считая, что до короткого замыкания генератор имел $I_f = 1$, при заданных параметрах получим:

$$I'_{[0]} = \frac{1}{0,25} = 4; I = \frac{1}{1} = 1; I_{иср} = \frac{4}{1} = 4; T'_d = 4 \cdot \frac{0,25}{1} = 1 \text{ сек}$$

и следовательно,

$$I_{nt} = 1 + (4 - 1)e^{-t} + (4 - 1) \left(1 - \frac{e^{-t} - n_e e^{-t/n_e}}{1 - n_e} \right) = 4 - \frac{3n_e}{1 - n_e} (e^{-t} - e^{-t/n_e}).$$

При $I'_{сн[0]} = \Delta I_{вр}$, как это имеет место в данном случае, полученное выше выражение для t приобретает более простой вид:

$$t = \frac{T'_d T_e}{T'_d - T_e} \ln \frac{T'_d}{T_e} = \frac{n_e \ln 1/n_e}{1 - n_e} T'_d$$

(Ср. [Л. 1], выражение (4-19). При $n_e = 1$ оно приводит к неопределенности, раскрытие которой дает $t = T'_d$.)

Для значений $n_e = 0,25; 0,5; 1; 2; 4$ подсчет дает соответственно $t = 0,46; 0,69; 1,0; 1,39; 1,85$ сек.

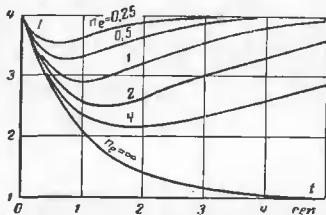


Рис. 4-9. К к задаче 4-16. Кривые изменения тока трехфазного короткого замыкания при разных значениях $n_e = T_e/T'_d$.

Искомые кривые изменения тока приведены на рис. 4-9. Чем больше n_e (т. е. чем больше T_e), тем в течение большего отрезка времени происходит уменьшение тока до более низкого уровня и тем медленнее происходит возрастание его до установившегося значения. Для сравнения приведена кривая при $n_e = \infty$, что соответствует отсутствию автоматического регулирования возбуждения. В другом предельном случае, когда $n_e = 0$, при заданных параметрах изменения тока вообще не будет, так как затухание свободного переходного тока здесь полностью компенсируется приращением принужденного тока.

Задача 4-17

Синхронный компенсатор, относительные реактивности которого $x_d = 1,0$ и $x'_d = 0,2$, работает с номинальным напряжением и посылает в сеть реактивный ток, составляющий 80% его номинального тока. За внешней относительной реактивностью $x = 0,3$ произошло металлическое трехфазное короткое замыкание, которое отсекло от компенсатора другие источники и присоединенные нагрузки.

Считая скорость вращения синхронного компенсатора неизменной, показать изменение периодической слагающей тока, э. д. с. E'_q и E_q , а также напряжения компенсатора в функции времени $t' = t/T'_d$ при следующих условиях:

- АРВ отключено;
 - АРВ включено; предельный ток возбуждения $I_{вр} = 4,6$, по окончании времени $T_e = 0,5T'_d$;
 - то же, что и в п. а6, но $T_e = 0$.
- Решение. Предшествоющие короткому замыканию э. д. с. компенсатора составляют (в относительных единицах при номинальных условиях конденсатора)

$$E'_q = 1 + 0,2 \cdot 0,8 = 1,16;$$

$$E_q = 1 + 1,0 \cdot 0,8 = 1,80.$$

В процессе короткого замыкания величны э. д. с. E'_q , E_q и напряжения U компенсатора связаны с периодической слагающей его тока простыми очевидными равенствами:

$$E'_q = (0,2 + 0,3)I = 0,5I;$$

$$E_q = (1,0 + 0,3)I = 1,3I;$$

$$U = 0,3I.$$

Следовательно, изменив соответственно масштаб, можно по любой изменению тока получить кривые изменения э. д. с. E'_q , E_q и напряжения.

а) АРВ отключено. Начальная и установившаяся величины тока короткого замыкания составляют:

$$I'_{[0]} = \frac{1,16}{0,5} = 2,32 \text{ и } I = \frac{1,8}{1,3} = 1,38.$$

Выражение для тока в процессе короткого

$$I_{[t]} = (2,32 - 1,38)e^{-t'} + 1,38 = 0,94e^{-t'} + 1,38.$$

На рис. 4-10а приведены кривые изменения I , E'_q , E_q и U в зависимости от t' . Внизу также показано, что подведенное к ротору компенсатора напряжение U_f и создаваемый им принужденный ток возбуждения $I_{[t]}$ при отсутствии АРВ сохранятся неизменными.

б) АРВ включено; $I_{вр} = 4,6$ и $T_e = 0,5T'_d$. Найдем значение критической реактивности для установившегося режима

$$x_{кр} = x_d \frac{U_n}{E_{свн} - U_n} = 1,0 \cdot \frac{1}{4,6 - 1} = 0,278.$$

Поскольку $x = 0,3 > x_{кр} = 0,278$, то под действием АРВ напряжение компенсатора будет доведено до нормального, прежде чем начнет установившийся процесс.

Наибольшая величина тока при этом, очевидно, будет:

$$I = \frac{1}{0,3} = 3,33.$$

Предельное приращение установившегося тока короткого замыкания составляет:

$$\Delta I_{вр} = \frac{4,6}{1,3} - 1,38 = 2,16.$$

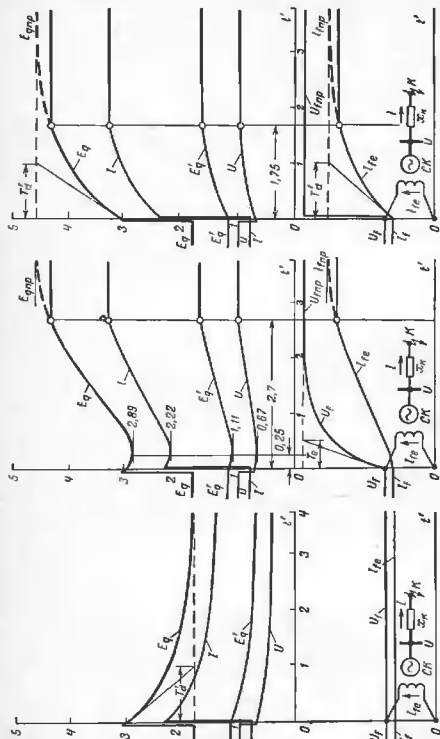


Рис. 4-10. К задаче 4-17. Изменения тока I , э. д. с. E_q и $E_{\text{в}}$, напряжения U_f , напряжения на кольцах ротора U_f и принужденного тока возбуждения $I_{f\text{в}}$ в функции $t' = t/T_{\text{в}}$, а — при открытом АРВ, б — при включенном АРВ, $I_{f\text{в}} = 4,6$ и $T_{\text{в}} = 0,57$ с; ω — то же, но при $T_{\text{в}} = 0$.

При заданном соотношении $T_{\text{в}} = 0,57 T_{\text{в}}$ функция $F(t')$ приобретает следующий вид:

$$F(t') = 1 - \frac{T_{\text{в}} e^{-4T_{\text{в}} t'} - T_{\text{в}} e^{-4t'/T_{\text{в}}}}{T_{\text{в}} - T_{\text{в}}} = 1 + e^{-2t'} - 2e^{-4t'}$$

Выражение для тока в процессе короткого замыкания будет:

$$I_{f'} = 0,94 e^{-4t'} + 1,38 + 2,16 (1 + e^{-2t'} - 2e^{-4t'}) = 2,16 e^{-2t'} - 3,38 e^{-4t'} + 3,54 \leq 3,33$$

Оно, как видно, ограничено возможным наибольшим значением тока, которое было подчтито выше. Приравняв левую и правую части этого выражения, получим уравнение

$$2,16 e^{-2t'} - 3,38 e^{-4t'} + 0,21 = 0,$$

из которого можно определять величину критического времени $t'_{\text{кр}}$, т. е. времени, когда напряжение генератора достигнет своего нормального значения, а ток — соответственно своей наибольшей величины.

В данном случае, введя обозначение $x = e^{-2t'}$, имеем полное квадратное уравнение

$$2,16 x^2 - 3,38 x + 0,21 = 0 \text{ или } x^2 - 1,57 x + 0,097 = 0.$$

Корень, отвечающий положительному значению t' , равен

$$x = \frac{1,57 - \sqrt{1,57^2 - 4 \cdot 0,097}}{2} = 0,065,$$

т. е. $e^{-2t'_{\text{кр}}} = 0,065$, откуда $t'_{\text{кр}} = 2,7$.

Минимум тока наступает при t' , определяемом из равенства¹

$$\frac{dI_{f'}}{dt'} = 2x - 1,57 = 0, \text{ т. е. при } x = \frac{1,57}{2} = 0,785, \text{ чему соответствует } t' = 0,25, \text{ и составляет } I_{\text{мин}} = 2,22.$$

Для рассматриваемых условий кривые изменения тока, э. д. с. E_q , $E_{\text{в}}$ и напряжения показаны на рис. 4-10, б. Внизу показан экспоненциальный закон подъема напряжения на кольцах ротора U_f и закономерность роста принужденного тока возбуждения $I_{f\text{в}}$, которая выражается функцией $F(t')$.

в) АРВ включено; $I_{f\text{в}} = 4,6$ и $T_{\text{в}} = 0$. В данном случае выражение для тока упрощается и приобретает следующий вид:

$$I_{f'} = (2,32 - 3,54) e^{-t'} + 3,54 = -1,22 e^{-t'} + 3,54 \leq 3,33.$$

Здесь оно также ограничено возможной наибольшей величиной тока $I = 3,33$, которая устанавливается при достижении напряжения

¹ Здесь также можно использовать выражение, полученное в решении задачи 4-16.

своего нормального значения. Последнее наступает при $t'_{кр}$, определяемом из равенства

$$1,22 e^{-t'_{кр}} = 3,54 - 3,33 = 0,21,$$

откуда $t'_{кр} = 1,75$, т. е. как и следовало ожидать, значительно меньше, чем при $T_e = 0,5 T'_{a}$.

На рис. 4-10а представлены кривые изменения тока, э. д. с. E'_q и E_q и напряжения U в функции t' при рассматриваемых условиях. Визуально показано внезапное приращение напряжения на кольцах ротора и вызываемое этим увеличение приглушенного тока возбуждения по экспоненте.

Задача 4-18

Для генератора известны следующие параметры: 67 Маа , $10,5 \text{ кВ}$, $3,68 \text{ кА}$, $x_d = 1,0$, $x_q = 0,6$, $x_c = 0,15$, $x'_d = 0,3$, $r = 0,83 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$ (при горячей машине), $T_{f\phi} = 5 \text{ сек}$, ток возбуждения холостого хода $p_{н.х} = 450 \text{ а}$.

В обоих осях ротор данного генератора намечено дополнительно разместить демпферные обмотки, параметры которых: $x_d = 0,95$, $x_{fd} = 0,88$ и $T_{fd} = T_{fd} = 1 \text{ сек}$.

Требуется сопоставить протекание процесса трехфазного короткого замыкания на выводах генератора при отсутствии и наличии таких демпферных обмоток. Для этого должны быть в обоих случаях построены кривые изменения мгновенных значений токов статора и обмотки возбуждения, а также кривые изменения действующего значения полного тока статора в начальной стадии процесса короткого замыкания.

Считать, что до короткого замыкания генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением, его АРВ отключено.

Решение. Расчет проведем в относительных единицах при номинальных условиях и лишь некоторые конечные результаты выразим в именованных единицах.

Рассмотрим вначале процесс короткого замыкания при отсутствии демпферных обмоток на роторе.

Согласно заданному условию $E_{q0} = E_{c0} = 1 = U_{q0}$, при этом будем иметь:

$$\frac{I'_{q0}}{I} = \frac{1}{0,3} = 3,33; \quad I = \frac{1}{1} = 1;$$

начальное значение аperiodической составляющей тока статора

$$i_{a0} = \frac{U_{q0}(x_d + x'_d)}{2x'_d x_q} = \frac{1(0,6 + 0,3)}{2 \cdot 0,6 \cdot 0,3} = 2,5;$$

начальная амплитуда второй гармоники

$$I_{m20} = \frac{U_{q0}(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q} = \frac{1(0,6 - 0,3)}{2 \cdot 0,6 \cdot 0,3} = 0,83.$$

Величина реактивности

$$x_B = \frac{2x'_d x_c}{x'_d + x_q} = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 0,6}{0,3 + 0,6} = 0,4;$$

относительная величина активного сопротивления статора

$$r = 0,83 \cdot 10^{-2} \frac{67}{10,5^2} = 0,005.$$

Изменения постоянных времени:

$$T_a = \frac{x_B}{\omega r} = \frac{0,4}{314 \cdot 0,005} = 0,255 \text{ сек} \quad \text{и} \quad T'_a = T_{f\phi} \frac{x'_d}{x_d} = 5 \cdot \frac{0,3}{1} = 1,5 \text{ сек}.$$

Выражение для мгновенного значения тока фазы А (при начальном угле $\gamma_0 = 0$) будет:

$$i_A = [(3,33 - 1) e^{-t/1,5} + 1] \cos \omega t - 2,5 e^{-t/0,255} - 0,83 e^{-t/0,255} \cos 2\omega t = \\ = (2,33 e^{-t/1,5} + 1) \cos \omega t - (2,5 + 0,83 \cos 2\omega t) e^{-t/0,255}.$$

Относительный ток возбуждения, приведенный к статору, будет:

$$\frac{i'_f}{I} = \frac{I_f}{x_{fd}} = \frac{I_f}{x_d - x_q} = \frac{I_f}{1 - 0,15} = 1,18 I_f.$$

Для мгновенного значения тока в обмотке возбуждения имеем:

$$i'_f = \frac{i}{I} + \frac{(x_d - x'_d) U_{q0}}{x_{fd} x'_d} e^{-t/T'_a} - \frac{(x_d - x'_d)}{x_{fd}} \frac{U_{q0}}{x'_d} e^{-t/T_a} \cos \omega t = \\ = 1,18 + \frac{(1 - 0,3)}{0,85} \cdot \frac{1}{0,3} e^{-t/1,5} - \frac{(1 - 0,3)}{0,85} \cdot \frac{1}{0,3} e^{-t/0,255} \cos \omega t = \\ = 1,18 + 2,74 e^{-t/1,5} - 2,74 e^{-t/0,255} \cos \omega t.$$

По этим выражениям построены кривые, представленные на рис. 4-11а и рис. 4-12а. Для статора они даны только для первых нескольких периодов, а для обмотки возбуждения — до 3 сек, причем для большей наглядности период слагающей i_{f2} резко увеличен, хотя огибающая по ее амплитудам сохранена в правильном масштабе.

Ударный ток короткого замыкания, наступающий практически через 0,01 сек, составляет:

$$i_y = 2,33 e^{-0,01/1,5} + 1 + (2,5 + 0,83) e^{-0,01/0,255} = 6,52$$

или

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 3,68 \cdot 6,52 = 34 \text{ кА}.$$

Ударный коэффициент составляет:

$$k_S = \frac{i_y}{I} = \frac{6,52}{1,01} = 1,96.$$

Аналогично находим, что максимальное мгновенное значение тока возбуждения, выраженное в относительных единицах, при ко-

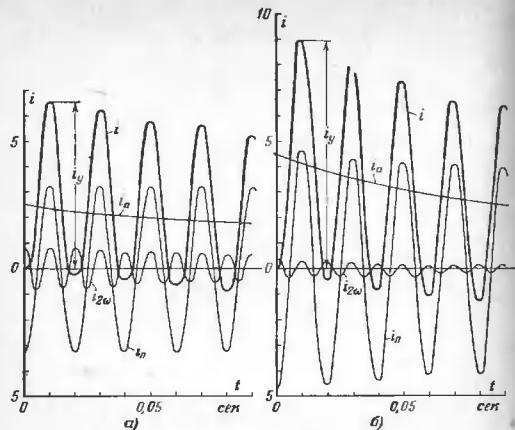


Рис. 4-11. К задаче 4-18. Кривые изменения тока статора при трехфазном коротком замыкании.
 а — при отсутствии демпферных обмоток; б — при наличии демпферных обмоток.

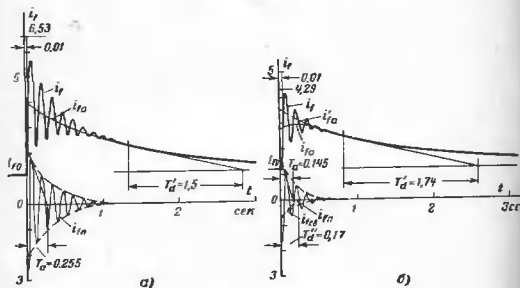


Рис. 4-12. К задаче 4-18. Кривые изменения тока в цепи возбуждения генератора при трехфазном коротком замыкании.
 а — при отсутствии демпферных обмоток; б — при наличии демпферных обмоток.

ных строится характеристика холостого хода, будет:

$$i_f = i_f^0 x_{ed} = 6,52 \cdot 0,85 = 5,55$$

или

$$i_f = 5,55 \cdot 450 = 2500 \text{ а.}$$

Определим максимальное мгновенное значение напряжения на кольцах ротора, для чего предварительно найдем активное сопротивление обмотки возбуждения. Из выражения для постоянной времени для T_{f0} имеем относительное приведенное к статору значение

$$r_f^0 = \frac{x_f}{\omega T_{f0}} = \frac{1,03}{314 \cdot 5} = 0,655 \cdot 10^{-3}.$$

где полная реактивность обмотки возбуждения

$$x_f = \frac{x_{fd}^2}{x_d - x_d'} = \frac{0,85^2}{1 - 0,3} = 1,03.$$

Во взаимной системе относительных единиц базисный ток в цепи возбуждения должен быть:

$$I_{bf} = I_{fx} x_{ed} = 450 \cdot 0,85 = 380 \text{ а.}$$

и $S_{bf} = S_6 = 67 \text{ Мва}$, следовательно,

$$U_{bf} = \frac{67}{0,38} = 176 \text{ кв.}$$

Таким образом, истинное активное сопротивление обмотки возбуждения в именованных единицах будет:

$$r_f = 0,655 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{176^2}{67} = 0,304 \text{ ом.}$$

Напряжение на кольцах ротора:

при холостом ходе $U_{f0} = 0,304 \cdot 450 = 137 \text{ в}$; максимальное мгновенное при коротком замыкании на выводах $U_{f \text{ макс}} = 0,304 \cdot 2500 = 760 \text{ в}$.

При определении действующего значения полного тока короткого замыкания исходим из приближенного выражения, считая, что в пределах одного периода основной частоты отдельные составляющие не затухают; при этом амплитуды гармонических слагаемых и значение аperiodической составляющей для данного момента времени принимаются по соответствующим огибающим и кривой. Тогда, как известно из теории несинусоидальных токов, для действующего значения полного тока в момент времени t имеем¹:

$$I_t = I_0 \sqrt{(I_{c1} e^{-t/T_1} + 1)^2 + (I_{2\omega} e^{-t/T_2})^2 + 2(I_{c1} e^{-t/T_1} + 1) I_{2\omega} e^{-t/T_2}}$$

¹ Токи под корнем выражены в относительных единицах.

или в рассматриваемом случае, выражая I_t в относительных единицах

$$I_t = \sqrt{(2,33e^{-4/1,5} + 1)^2 + (0,83^2 + 2 \cdot 2,5^2) e^{-2/0,255}} = \\ = \sqrt{1 + 4,66e^{-0,67t} + 5,4e^{-1,34t} + 13,2e^{-7,85t}}$$

Следует отметить, что если не выделять вторую гармонику, а считать, что только одна апериодическая слагающая полностью уравновешивает начальную амплитуду периодической слагающей

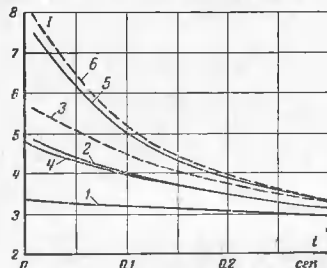


Рис. 4-13. К задаче 4-18. Кривые изменения действующего значения тока.

I — периодической слагающей тока; 2 — полного тока с учетом второй гармоники; 3 — то же, но без учета второй гармоники с соответствующим увеличением апериодической слагающей тока при отсутствии демпферных обмоток; 4, 5 и 6 — то же, но при наличии демпферных обмоток.

(т. е. начальный переходный ток $I' = 3,33$), то коэффициент у последнего слагаемого под корнем будет 22 (вместо 13,2), что, естественно, приводит к завышению определяемой величины тока.

По вычисленным для нескольких моментов времени величинам действующих значений тока построены кривые на рис. 4-13: 1 — действующее значение периодической слагающей тока; 2 — действующее значение полного тока с учетом второй гармоники; 3 — то же, но без учета второй гармоники и с соответствующим увеличением апериодической слагающей тока.

Перейдем теперь к случаю, когда ротор снабжен указанными выше демпферными обмотками. Если при отсутствии таких обмоток реактивности генератора в обеих его осях в начальный момент переходного процесса характеризовались схемами замещения на рис. 4-14а, то при наличии этих обмоток в каждой из приведенных схем замещения следует добавить параллельные ветви, отвечающие реактивностям рассеяния (рис. 4-14б) соответственно продольной демпферной обмотке

$$x_{a1d} = x_{1d} - x_{a1d} = 0,95 - 0,85 = 0,1,$$

поперечной демпферной обмотке

$$x_{a1q} = x_{1q} - x_{a1q} = 0,58 - 0,45 = 0,13.$$

Эквивалентные реактивности схем на рис. 4-14б дают значения

$$x''_a = 0,21 \text{ и } x''_q = x'_q = 0,25.$$

Начальный сверхпереходный ток при трехфазном коротком на выводах генератора составляет:

$$I''_{sc0} = \frac{E''_a}{x''_a} = \frac{1}{0,21} = 4,76.$$

Поскольку постоянная времени T_{10} существенно больше постоянной времени T_{100} , то определение свободных токов и постоянных

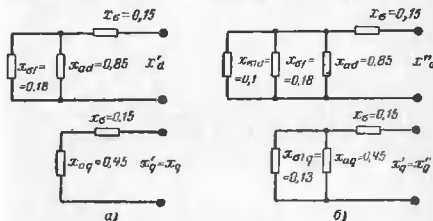


Рис. 4-14. К задаче 4-18. Схемы замещения генератора в продольной и поперечной осях.

а — при отсутствии демпферных обмоток; б — при наличии демпферных обмоток.

времени их затухания выполним приближенно¹. В частности, примем, что начальный переходный ток сохранится тот же, что и при отсутствии демпферных обмоток, т. е. $I''_{sc0} = 3,33$. Тогда начальные свободные токи статора будут:

$$I''_{sc0} = 4,76 - 3,33 = 1,43 \text{ и } I''_{sc0} = 3,33 - 1 = 2,33.$$

Начальные значения свободных апериодических токов в обмотке возбуждения и продольной демпферной обмотке найдем, используя схему замещения на рис. 4-14б, т. е.

$$I''_{fsc0} = I''_{sc0} \frac{x''_d - x_a}{x_{a1d}} = 4,76 \cdot \frac{0,21 - 0,15}{0,18} = 1,59;$$

$$I''_{1dsc0} = I''_{sc0} \frac{x''_d - x_a}{x_{a1d}} = 4,76 \cdot \frac{0,21 - 0,15}{0,1} = 2,86.$$

¹ Точное решение аналогичной задачи приведено в задаче 4-22.

При этом легко убедиться, что эти свободные токи ротора связаны с соответствующим начальным свободным током статора очевидным равенством

$$\dot{I}_{\text{св}[\sigma]} + \dot{I}_{\text{дсв}[\sigma]} x_{\sigma d} = (I''_{\text{св}[\sigma]} + I'_{\text{св}[\sigma]}) x_d = (I''_{\text{r}} - I) x_d.$$

Напомним, что здесь и далее все величины цепей ротора привели к статору.

Начальные значения составляющих свободного тока $\dot{I}_{\text{св}}$ найдем, используя приближенное выражение, т. е.

$$\dot{I}'_{\text{св}[\sigma]} = I'_{\text{св}[\sigma]} \frac{x_d}{x_{\sigma d}} \frac{T_{f\sigma}}{T_{f\sigma} + T_{\text{д}\sigma}} = 2,33 \cdot \frac{1}{0,85} \cdot \frac{5}{5+1} = 2,28.$$

тогда

$$\dot{I}''_{\text{св}[\sigma]} = 1,59 - 2,28 = -0,69.$$

При замкнутой обмотке статора имеем следующие значения реактивностей, коэффициента рассеяния и постоянных времени:

$$x'_{\sigma d} = x_{\sigma d} / x_{\sigma} = 0,85 / 0,15 = 0,128;$$

$$x'_{fj} = x_{\sigma f} + x'_{\sigma d} = 0,18 + 0,128 = 0,308;$$

$$T'_{fj} = T_{f\sigma} \frac{x'_{fj}}{x_{fj}} = 5 \cdot \frac{0,308}{1,03} = 1,5 \text{ сек};$$

$$x'_{1d} = x_{\sigma 1d} + x'_{\sigma d} = 0,10 + 0,128 = 0,228;$$

$$T'_{1d} = T_{1d\sigma} \frac{x'_{1d}}{x_{1d}} = 1 \cdot \frac{0,228}{0,95} = 0,24 \text{ сек};$$

$$\sigma' = 1 - \frac{x'^2_{\sigma d}}{x'_{fj} x'_{1d}} = 1 - \frac{0,128^2}{0,308 \cdot 0,228} = 0,766.$$

Приближенные значения постоянных времени затухания свободных токов будут:

$$T'_{fj} \approx T'_{fj} + T'_{1d} = 1,5 + 0,24 = 1,74 \text{ сек}$$

и

$$T'_{1d} \approx \sigma' T'_{1d} = 0,766 \cdot 0,24 = 0,184 \text{ сек}.$$

По тем же выражениям, что и при отсутствии демпферных обмотк, заменив в них только x_{σ} на x''_{σ} и $x'_{\sigma d}$ на $x''_{\sigma d}$, найдем: начальное значение апериодической слагающей тока статора

$$i_{\text{а}[\sigma]} = \frac{1(0,25 + 0,21)}{2 \cdot 0,25 \cdot 0,21} = 4,38$$

¹ Их точные значения составляют: $T'_{1d} = 1,57 \text{ сек}$ и $T'_{fj} = 0,17 \text{ сек}$.

и начальную амплитуду второй гармоники

$$I_{m2\sigma} = \frac{1(0,25 - 0,21)}{2 \cdot 0,25 \cdot 0,21} = 0,36.$$

Величина реактивности

$$x_a = \frac{2x''_{\sigma} x''_{\sigma d}}{x''_{\sigma} + x''_{\sigma d}} = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot 0,21}{0,25 + 0,21} = 0,228,$$

и постоянная времени

$$T_a = \frac{0,228}{314 \cdot 0,005} = 0,145 \text{ сек}.$$

Таким образом, выражение для мгновенного значения тока фазы А (при $\psi_0 = 0$) будет:

$$i_A = (1,43e^{-t/0,184} + 2,33e^{-t/1,74} + 1) \cos \omega t + 4,38e^{-t/0,145} - 0,36e^{-t/0,145} \cos 2\omega t$$

и для тока в обмотке возбуждения (приведенного к статору)

$$i_f = 1,18 - 0,69e^{-t/0,184} + 2,28e^{-t/1,74} - 1,59e^{-t/0,145} \cos \omega t,$$

где начальная амплитуда периодической слагающей тока обмотки возбуждения $I_{f\sigma} = -(2,28 - 0,69) = -1,59$.

По этим выражениям построены кривые, представленные на рис. 4-11,б и 4-12,б. Как и раньше, в построении периодической слагающей тока обмотки возбуждения условно принято резкое увеличение периода при сохранении правильной отгибающей данной кривой.

При наличии демпферных обмоток ударный ток значительно возрос и составляет в относительных единицах $i_y = 9,13$ и в абсолютных единицах

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 3,68 \cdot 9,13 = 47,6 \text{ ка},$$

однако при этом из-за более быстрого затухания свободных токов ударный коэффициент стал несколько меньше

$$k_y = 1,92 \text{ (против } 1,96).$$

Экранирующее действие продольной демпферной обмотки существенно сказывается на токе в обмотке возбуждения. Последний в начальной стадии процесса значительно меньше, чем при отсутствии продольной демпферной обмотки, а затем он затухает немного медленнее (с $T'_a = 1,74 \text{ сек}$ вместо $T'_a = 1,5 \text{ сек}$). Максимальное мгновенное значение тока в обмотке возбуждения составляет:

$$i_f = 1,630 \text{ а (вместо } 2,500 \text{ а)},$$

и соответственно максимальное напряжение на кольцах ротора $U_{f\sigma} = 0,304 : 1,630 = 495 \text{ в (вместо } 760 \text{ в)}$.

На рис. 4-13 приведены кривые (4, 5, 6) изменения во времени действующего значения тока короткого замыкания при наличии демпферных обмоток (кривая 4 — действующее значение периодической составляющей тока, кривая 5 — действующее значение полного тока с учетом второй гармоники, кривая 6 — то же но без учета второй гармоники и с соответствующим увеличением аperiodической составляющей тока).

Поскольку действующего значения полного тока аналогичен предыдущему; в нем появляются лишь дополнительные слагаемые, связанные с учетом свободного сверхпереходного тока.

Коль скоро ротор с демпферными обмотками стал более симметричным в электромагнитном отношении, то это привело к существенному (более чем в 2 раза) снижению второй гармоники. Поэтому разница между кривыми 5 и 6 значительно меньше, чем между кривыми 2 и 3 (рис. 4-13).

Задача 4-19

Известно, что с увеличением удаленности короткого замыкания в цепи, питаемой генератором без демпферных обмоток, величина второй гармоники тока падает. При параметрах генератора предыдущей задачи определить, при какой удаленности короткого замыкания начальное значение второй гармоники не превышает 10% впадного переходного тока. При этом требуется оценить, на сколько процентов учет второй гармоники снижает величину наибольшего действующего значения полного тока короткого замыкания, определяемого без учета затухания его свободных составляющих.

Задача 4-20

Для генератора без демпферных обмоток, параметры которого указаны в задаче 4-18, требуется создать только поперечную демпферную обмотку с тем, чтобы его ротор при переходных процессах был и электромагнитно отношения симметричен.

Определить реактивность такой обмотки и оценить получаемое при этом значение ударного коэффициента при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора.

Задача 4-21

Непосредственно за линейным выключателем В схема на рис. 4-15 произошла металлическое трехфазное короткое замыкание, которое через 0,24 сек этим выключателем отключено.

Определить максимальное мгновенное значение тока после отключения короткого при условии, что благодаря возникшему ускорению роторов генераторов стация их э. д. с. в момент отключения выключателя В находится в противофазе с напряжением системы С. Кроме того, выяснить, как сказывается число работающих на

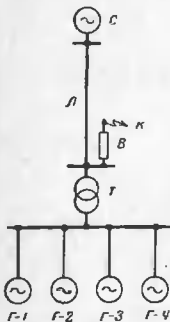


Рис. 4-15. Исходная схема к задаче 4-21.

генераторов на искомой величине тока каждого генератора, и сопоставить этот ток с ударным током генератора при трехфазном коротком замыкании на его выводах.

Параметры отдельных элементов схемы следующие:

генераторы $\Gamma-1-\Gamma-4$ (киловольты) одинаковые, каждый 110 кВ, $\cos \varphi = 1$, $6,3$ кВ, $x''_d = 0,38$, $x'_d = 0,49$, $x_d = 1,14$, $x_2 = 0,19$, $T_{j0} = 2,05$ сек, $\gamma_a^{(3)} = 0,202$ сек, $I_{гр} = 3$; в предшествующем режиме работат как номинальной нагрузкой;

трансформатор Т 60 Мва, 115/6,3 кВ, $u_k = 10,5\%$;

линия Л 16 км, $x = 0,4$ Ом/км, $r = 0,27$ Ом/км.

Система характеризуется как источник с неизменным напряжением, равным 115 кВ, приложенным за реактивностью $x = 6,3$ Ом.

Решение. Проведем решение в относительных единицах при $U_B = 115$ кВ, приложенном за реактивностью $x = 6,3$ Ом.

Все генераторы рассматриваем как один генератор мощностью 60,2 Мва. Реактивные и активные сопротивления элементов при базисных условиях будут: реактивности объединенного генератора те же что и для одного генератора; его активное сопротивление

$$r_x = \frac{x_2}{\omega T_d} = \frac{0,39}{314 \cdot 0,202} = 0,0061;$$

сопротивления трансформатора

$$x_x = 0,105 \cdot \frac{65,2}{60} = 0,114$$

■

$$r_x = \frac{x_x}{22} = \frac{0,114}{22} = 0,0052;$$

сопротивления линии

$$x_d = 0,4 \cdot 16 \cdot \frac{65,2}{115^2} = 0,032$$

■

$$r_d = \frac{0,27}{0,4} \cdot 0,032 = 0,0216;$$

реактивности системы

$$x_c = 6,3 \cdot \frac{65,2}{115^2} = 0,031.$$

Векторная диаграмма предшествующего режима генераторов видна на рис. 4-16. Из нее имеем:

$$E''_0 = 1,07; E'_0 = 1,11.$$

Ток от генераторов при трехфазном коротком в точке К

$$I''_{||} = \frac{1,07}{0,38 + 0,114} = 2,17;$$

$$I'_{||} = \frac{1,11}{0,49 + 0,114} = 1,84$$

$$I = \frac{3}{1,14 + 0,114} = 2,39;$$

постоянная времени

$$T_d = 2,05 \frac{0,49 + 0,114}{1,14 + 0,114} = 1 \text{ сек.}$$

За промежуток 0,24 сек практически можно считать, что свободный сверхпереходный ток полностью затух. Тогда, принимая $T_e = 0$,

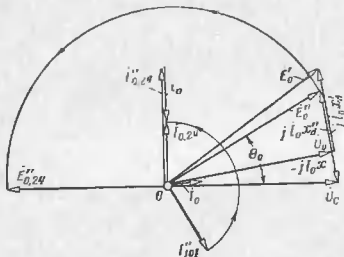


Рис. 4-16. Векторная диаграмма к задаче 4-21.

получим значение периодической слагающей тока генераторов через 0,24 сек

$$I = (1,84 - 2,39) e^{-0,24/1} + 2,39 = 1,96.$$

Сверхпереходная э. д. с. к этому моменту времени

$$E'' = 1,96 (0,38 + 0,114) = 0,97.$$

По условию эта э. д. с. находится в противофазе с напряжением системы $U_c = \frac{115}{115} = 1$. Следовательно, сверхпереходный ток после отключения выключателя В будет:

$$I'' = \frac{0,97 + 1}{0,38 + 0,114 + 0,032 + 0,031} = 3,53.$$

Как видно из векторной диаграммы на рис. 4-16, начальное значение аperiodической слагающей тока составляет:

$$I_a = 1,96 - 3,53 = -1,57.$$

Постоянная времени затухания этой слагающей тока

$$T_a = \frac{0,39 + 0,114 + 0,032 + 0,031}{314(0,0061 + 0,0052 + 0,0216)} = 0,054 \text{ сек.}$$

Некоем значении тока наступает практически через 0,01 сек после отключения выключателя, и оно составляет:

$$I = \sqrt{2}(3,53 + 1,57 e^{-0,01/0,054}) = 41,2 \text{ кА,}$$

$$I_0 = I_a = \frac{65,2}{\sqrt{3} \cdot 6,3} \approx 6 \text{ кА.}$$

Следовательно, ток от каждого генератора

$$i = \frac{41,2}{4} = 10,3 \text{ кА.}$$

При трехфазном коротком замыкании на выводах генератора ударный ток (при том же предшествующем режиме) составляет:

$$i_2 = \sqrt{2} \cdot \frac{1,07}{0,38} (1 + e^{-0,01/0,202}) \frac{6}{4} = 11,7 \text{ кА,}$$

т. е. он на $\frac{11,7 - 10,3}{11,7} \cdot 100 = 12\%$ больше тока при включении ге-

нераторов в противофазу с напряжением системы после отключения через 0,24 сек трехфазного короткого замыкания в точке К.

С уменьшением числа работающих на станции генераторов ток в каждом генераторе при включении в противофазу в рассматриваемых условиях возрастает. Так, при работе только одного генератора этот ток достигает уже 14 кА, т. е. он превышает ударный ток при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора на $\frac{14 - 11,7}{11,7} \cdot 100 = 10\%$. При уменьшении реактивности связи между сетями и шинами 115 кВ станции это различие еще больше увеличивается и в данном случае в пределе достигает 36%.

Задача 4-22

Турбогенератор связан с системой через повышающий трансформатор. Параметры их следующие:

турбогенератор¹ 125 Мва, $\cos \varphi = 0,8$, 15, 75 кВ, 4,6 кА, $OKZ = 0,74$, $x_g = 0,1$, $x''_d = 0,13$, $x'_d = 0,15$, $x'_d = 0,2$, $T_{j0} = 8,8$ сек, $T_{j\infty} = 11,45$ сек, $T''_{d0} = 0,25$ сек, $T''_{d\infty} = 2,5$ сек, $T_e = 0,4$ сек, $I_{j\text{нр}} = 4,3$; трансформатор 120 Мва, 242/15,75 кВ, $u_k = 11,5\%$.

Для случая внезапного трехфазного короткого замыкания непосредственно за трансформатором получить выражения для периодической слагающей тока статора и для связанных с ней токов в цепи ротора. По полученным выражениям построить соответствующие кривые изменения токов во времени.

¹ Идентичные данные: значение x_d дано при отсутствии демпферных контуров.

Считать, что до возникновения короткого замыкания генератор нес нагрузку 100 Мва при $\cos \varphi_0 = 0,8$ и $U_0 = 16,5$ кВ.

Решение. Выполним расчет в относительных единицах при номинальных условиях генератора.

Рабочий ток генератора

$$I_0 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 16,5} = 3,5 \text{ ка или } I_0 = \frac{3,5}{4,6} = 0,76;$$

рабочее напряжение генератора

$$U_0 = \frac{16,5}{15,75} = 1,05; \varphi_0 = \arccos 0,8 = 37^\circ \text{ и } \sin \varphi_0 = 0,6.$$

Синхронная реактивность при спрямления характеристика холостого хода через начало координат и точку (1,1) будет:

$$x_d = x_q = 1/0,74 = 1,35.$$

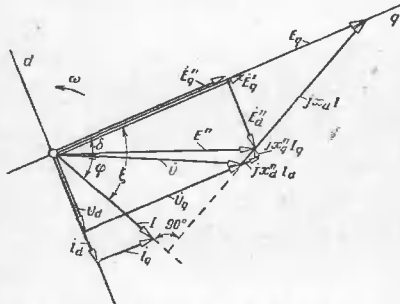


Рис. 4-17. К задаче 4-22. Векторная диаграмма турбогенератора при его предшествовавшем нагрузочном режиме.

Напомним векторную диаграмму генератора для предшествующего нагрузочного режима (рис. 4-17). Здесь синхронная з. д. с.

$$E_{q0} = \sqrt{(1,05 \cdot 0,8)^2 + (1,05 \cdot 0,6 + 1,35 \cdot 0,76)^2} = 1,86.$$

Сдвиг между током I_0 и E_{q0} определяется из выражения

$$\operatorname{tg} \xi_0 = \frac{1,05 \cdot 0,6 + 1,35 \cdot 0,76}{1,05 \cdot 0,8} = 1,98,$$

т. е. $\xi_0 = \operatorname{arctg} 1,98 = 63^\circ$, и соответственно $\cos \xi_0 = \cos 63^\circ = 0,45$; $\sin \xi_0 = \sin 63^\circ = 0,89$.

Следовательно,

$$\delta_0 = 63 - 37 = 26^\circ; \cos \delta_0 = \cos 26^\circ = 0,9 \text{ и } \sin \delta_0 = \sin 26^\circ = 0,44.$$

Продольные и поперечные составляющие тока и напряжения:

$$I_{d0} = 0,76 \cdot 0,89 = 0,68; I_{q0} = 0,76 \cdot 0,45 = 0,34;$$

$$U_{d0} = 1,06 \cdot 0,9 = 0,945; U_{q0} = 1,05 \cdot 0,44 = 0,46.$$

Значения составляющих сверхпереходной з. д. с.:

$$E''_{q0} = U_{q0} + I_{d0} x''_d = 0,945 + 0,68 \cdot 0,13 = 1,03;$$

$$E''_{d0} = U_{d0} - I_{q0} x''_q = 0,945 - 0,34 \cdot 0,15 = 0,41.$$

Чтобы иметь более ясное представление, составим схемы замещения генератора в его продольной и поперечной осях. Для этого дополнительно определим некоторые параметры генератора.

Реактивность реакши статора в обеих осях одинакова и составляет

$$x_{ad} = x_{aq} = 1,35 - 0,1 = 1,25.$$

Полная реактивность обмотки возбуждения

$$x_f = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x'_d} = \frac{1,25^2}{1,35 - 0,2} = 1,36;$$

т. е. реактивность рассеяния этой обмотки

$$x_{f0} = x_f - x_{ad} = 1,36 - 1,25 = 0,11.$$

Из выражений для x''_d и x'_d после нескольких преобразований выведем выражение для реактивности рассеяния продольной демпферной обмотки

$$x_{1d0} = \frac{(x'_d - x_d)(x''_d - x_d)}{(x'_d - x_d) - (x''_d - x_d)} =$$

$$= \frac{(0,2 - 0,1)(0,13 - 0,1)}{(0,2 - 0,1) - (0,13 - 0,1)} = 0,043,$$

и, следовательно, полная реактивность этого контура

$$x_{1d} = 0,043 + 1,25 = 1,293.$$

На рис. 4-18а представлена схема замещения генератора в продольной оси ротора. Здесь приведены реактивности трансформации

$$x_r = 0,115 \cdot \frac{125}{120} = 0,12;$$

поперечная составляющая предшествующего напряжения в месте короткого

$$U_{q0} = 0,945 \sin 0,12 \cdot 0,68^{\circ} = 0,86;$$

поперечная составляющая э. д. с. воздушного зазора

$$E_{q0} = 0,945 + 0,1 \cdot 0,68 = 1,008 = E_{1d0},$$

равная предшествующей э. д. с. в продольном демпферном контуре, т. е. обусловленной его результирующим потокоосцеплением; приве-

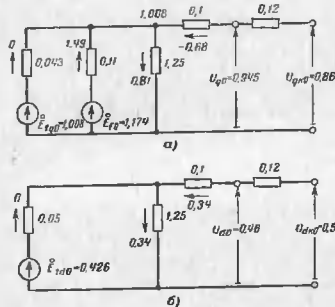


Рис. 4-18. К задаче 4-22. Схема замещения турбогенератора.

а — в продольной оси ротора; б — в поперечной оси ротора.

денный к статору предшествующий ток возбуждения

$$I_{f0}^{\circ} = \frac{E_{q0}}{X_{fd}} = \frac{1,86}{1,25} = 1,49,$$

и э. д. с., обусловленная результирующим потокоосцеплением обмотки возбуждения,

$$E_{f0}^{\circ} = 1,008 + 1,49 \cdot 0,11 = 1,174;$$

ток в ветви намагничивания

$$I_{\mu 0} = 1,49 - 0,68 = 0,81.$$

Нетрудно убедиться, что результирующая э. д. с. схемы на рис. 4-18,а

$$E_{\Sigma} = \frac{1,008/0,043 + 1,174/0,11}{1/0,043 + 1/0,11 + 1/1,25} = 1,03 = E''_{q0}$$

равна ранее найденной поперечной сверхпереходной э. д. с. предшествующего режима.

Для составления аналогичной схемы замещения в поперечной оси ротора определим справа полную реактивность поперечного демпферного контура

$$x_{1q} = \frac{x_{1q}^{\prime\prime}}{x_q - x_{1q}^{\prime\prime}} = \frac{1,25^2}{1,35 - 0,15} = 1,3$$

и его реактивность рассеяния

$$x_{1q\sigma} = 1,3 - 1,25 = 0,05.$$

Следовательно, схема замещения в поперечной оси имеет вид схемы на рис. 4-18,б, где продольная составляющая напряжения в месте короткого (до возникновения последнего)

$$U_{d0} = 0,46 + 0,12 \cdot 0,34 = 0,5$$

и э. д. с., обусловленная результирующим потокоосцеплением поперечного демпферного контура,

$$E_{1q0} = 0,46 - 0,1 \cdot 0,34 = 0,426.$$

Результирующая э. д. с. схемы на рис. 4-18,б

$$E_{\Sigma} = \frac{0,426 \cdot 1,25}{0,05 + 1,25} = 0,41 = E''_{d0},$$

как и следовало ожидать, равна ранее найденной продольной сверхпереходной э. д. с. предшествующего режима.

При коротком замыкании в рассматриваемой точке эквивалентная реактивность реакции статора составляет:

$$x'_{sd} = (0,1 + 0,12)/1,25 = 0,187.$$

Соответственно этому полные реактивности контуров в продольной оси будут: $x'_{1d} = 0,043 + 0,187 = 0,23$ и $x'_f = 0,11 + 0,187 = 0,297$.

Коэффициент рассеяния и постоянные времени:

$$\sigma' = 1 - \frac{x_{1d}^{\prime\prime}}{x'_{1d} x'_f} = 1 - \frac{0,187^2}{0,23 \cdot 0,297} = 0,487;$$

$$T'_f = T_{f0} \frac{x'_f}{x_f} = 8,8 \cdot \frac{0,297}{1,36} = 1,92 \text{ сек};$$

$$T'_{1d} = T_{1d0} \frac{x'_{1d}}{x_{1d}} = 2,9 \cdot \frac{0,23}{1,253} = 0,52 \text{ сек},$$

т. е. $T_{1d0} = T'_{1d} + T'_{fd} - T_{f0} = 11,45 + 0,25 - 8,8 = 2,9$ сек — постоянная времени продольного демпферного контура при разомкнутых главных контурах.

Значение коэффициента

$$q' = \sqrt{1 - \frac{4\sigma^2 T_f T'_{1d}}{(T_f + T'_{1d})^2}} = \\ = \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,487 \cdot 1,92 \cdot 0,52}{(1,92 + 0,52)^2}} = 0,82,$$

и постоянные времени затухания свободных токов:

$$T'_d = \frac{1+q'}{2} (T_f + T'_{1d}) = \\ = \frac{1+0,82}{2} (1,92 + 0,52) = 2,22 \text{ сек};$$

$$T''_d = \frac{2\sigma^2 T_f T'_{1d}}{(1+q')(T_f + T'_{1d})} = \\ = \frac{2 \cdot 0,487 \cdot 1,92 \cdot 0,52}{(1+0,82)(1,92 + 0,52)} = 0,22 \text{ сек}$$

или проще

$$T''_d = T_f + T'_{1d} - T'_d = 1,92 + 0,52 - 2,22 = 0,22 \text{ сек}.$$

Начальные значения свободных продольных токов статора

$$I'_{dсв [0]} = \frac{U_{qв0} (T'_{d0} - T'_d) (T'_d - T''_d)}{x_{d\sigma} T'_d (T'_d - T''_d)} = \\ = \frac{0,86 (11,45 - 2,22) (2,22 - 0,25)}{(1,35 + 0,12) 2,22 (2,22 - 0,22)} = 2,40;$$

$$I''_{dсв [0]} = \frac{U_{qв0} (T'_{d0} - T''_d) (T''_d - T'_{1d})}{x_{d\sigma} T''_d (T'_d - T''_d)} = \\ = \frac{0,86 (11,45 - 0,22) (0,25 - 0,22)}{(1,35 + 0,12) 0,22 (2,22 - 0,22)} = 0,45.$$

Установившийся ток короткого замыкания без учета действия АРВ

$$I_d = \frac{E_{d0}}{x_{d\sigma}} = \frac{1,86}{1,35 + 0,12} = 1,27.$$

Таким образом, при отсутствии АРВ изменение продольной периодической слагающей тока короткого замыкания проходит по уравнению

$$I_d = 0,45 e^{-t/0,22} + 2,4 e^{-t/2,22} + 1,27;$$

ее начальное значение $I''_{d [0]} = 0,45 + 2,4 + 1,27 = 4,12$, которое может быть также получено как

$$I''_{d [0]} = \frac{E''_{qв}}{x''_{d\sigma}} = \frac{1,03}{0,13 + 0,12} = 4,12.$$

В поперечной оси ротора имеем:

$$T''_q = T_{1\sigma} \frac{x''_{q\sigma}}{x_{q\sigma}} = 2,5 \cdot \frac{0,15 + 0,12}{1,35 + 0,12} = 0,46 \text{ сек};$$

$$I'_{qсв [0]} = I''_{q [0]} = \frac{E''_{d0}}{x''_{q\sigma}} = \frac{0,41}{0,15 + 0,12} = 1,52$$

и

$$I_q = 1,52 e^{-t/0,46}.$$

Обратимся теперь к пепам ротора.

Начальные значения свободных токов в обмотке возбуждения составляют:

$$\hat{I}'_{fсв [0]} = \frac{x_{d\sigma} I'_{qсв0} T'_{1d} (T'_d - T'_{1d\sigma})}{x_{d\sigma} x_{1d} T'_d (T'_d - T''_d)} = \\ = \frac{1,25 \cdot 0,86 \cdot 8,8 (2,22 - 0,097)}{1,47 \cdot 1,36 \cdot 2,22 (2,22 - 0,22)} = 2,26,$$

и

$$T'_{1d\sigma} = T_{1\sigma} \frac{x_{1d\sigma}}{x_{1d}} = 2,9 \cdot \frac{0,043}{1,293} = 0,097 \text{ сек}; \\ \hat{I}''_{fсв [0]} = - \frac{x_{d\sigma} U_{qв0} T'_{1d} (T''_d - T'_{1d\sigma})}{x_{d\sigma} x_{1d} T''_d (T'_d - T''_d)} = \\ = - \frac{1,25 \cdot 0,86 \cdot 8,8 (0,22 - 0,097)}{1,47 \cdot 1,36 \cdot 0,22 (2,22 - 0,22)} = -1,32.$$

Следовательно, выражение для тока в обмотке возбуждения при отсутствии АРВ будет:

$$\hat{I}_f = -1,32 e^{-t/0,22} + 2,26 e^{-t/2,22} + 1,49;$$

в начальный момент имеем $\hat{I}_f [0] = -1,32 + 2,26 + 1,49 = 2,43$, т. е. приращение в начальный момент составляет:

$$\Delta \hat{I}_f [0] = 2,43 - 1,49 = 0,94.$$

Начальные значения свободных токов в продольном демпферном контуре:

$$\hat{I}'_{1dсв [0]} = \frac{x_{d\sigma} U_{qв0} T'_{1d\sigma} (T'_d - T'_{1d})}{x_{d\sigma} x_{1d} T'_d (T'_d - T''_d)} = \\ = \frac{1,25 \cdot 0,86 \cdot 2,9 (2,22 - 0,713)}{1,47 \cdot 1,293 \cdot 2,22 (2,22 - 0,22)} = 0,56,$$

$$T_{f\sigma} = T_{f\sigma} \frac{x_{f\sigma}}{x_f} = 6,8 \cdot \frac{0,11}{1,36} = 0,713 \text{ сек};$$

$$I_{1d\sigma}^{\circ} |_{0} = - \frac{x_{ad} U_{q\sigma} T_{1d\sigma} (T''_d - T_{f\sigma})}{x_{d1} x_{1d} T''_d (T'_d - T''_d)} =$$

$$= - \frac{1,25 \cdot 0,86 \cdot 2,9 (0,22 - 0,713)}{1,47 \cdot 1,293 \cdot 0,22 (2,22 - 0,22)} = 1,84.$$

При отсутствии АРВ выражение для тока в продольном демпферном контуре имеет следующий вид:

$$I_{1d}^{\circ} = 1,84 e^{-t/0,22} + 0,56 e^{-t/2,22};$$

его начальное значение $I_{1d}^{\circ} |_{0} = 1,84 + 0,56 = 2,4$.

Поскольку взаимная реактивность между продольными контурами ротора и статора одинакова и принята неизменной (машина без насыщения), то в любой момент времени соблюдается равенство

$$(I_f^{\circ} + I_{1d}^{\circ}) x_{ad} = I_d x_{ad},$$

которое справедливо как для полных токов, так и для отдельных их составляющих (взаимно связанных). Например, для начального момента имеем:

$$I_d |_{0} = \frac{(2,43 + 2,4) 1,25}{1,47} = 4,12,$$

т. е. та же величина продольной составляющей начального сверхпереходного тока, которая была получена ранее.

Перейдем к учету действия АРВ. Пользуясь соответствующими выражениями для $F_f(t)$ и $F_{1d}(t)$, найдем их значения для рассматриваемых условий при заданном значении $T_{\sigma} = 0,4 \text{ сек}$.

Для цепи возбуждения

$$F_f(t) = 1 - \frac{T_{\sigma} (T_d - T'_{1d}) e^{-t/T_{\sigma}}}{(T_d - T'_d)(T_{\sigma} - T''_d)} -$$

$$- \frac{T'_d (T'_d - T'_{1d}) e^{-t/T'_d}}{(T'_d - T_{\sigma})(T'_d - T''_d)} - \frac{T''_d (T''_d - T'_{1d}) e^{-t/T''_d}}{(T''_d - T'_d)(T''_d - T_{\sigma})} =$$

$$= 1 - \frac{0,4 (0,4 - 0,52) e^{-t/0,4}}{(0,4 - 2,22)(0,4 - 0,22)} -$$

$$- \frac{2,22 (2,22 - 0,52) e^{-t/2,22}}{(2,22 - 0,4)(2,22 - 0,22)} -$$

$$- \frac{0,22 (0,22 - 0,52) e^{-t/0,22}}{(0,22 - 2,22)(0,22 - 0,4)} = 1 - 0,14 e^{-t/0,4} -$$

$$- 1,04 e^{-t/2,22} + 0,18 e^{-t/0,22}.$$

Для продольного демпферного контура:

$$F_{1d}(t) = - \frac{T_{\sigma} (T'_{1d} - T_{1d\sigma}) e^{-t/T_{\sigma}}}{(T_{\sigma} - T'_d)(T_{\sigma} - T''_d)} -$$

$$- \frac{T'_d (T'_{1d} - T_{1d\sigma}) e^{-t/T'_d}}{(T'_d - T_{\sigma})(T'_d - T''_d)} - \frac{T''_d (T'_{1d} - T_{1d\sigma}) e^{-t/T''_d}}{(T''_d - T'_d)(T''_d - T_{\sigma})} =$$

$$= - \frac{0,4 (0,52 - 0,1) e^{-t/0,4}}{(0,4 - 2,22)(0,4 - 0,22)} -$$

$$- \frac{2,22 (0,52 - 0,1) e^{-t/2,22}}{(2,22 - 0,4)(2,22 - 0,22)} -$$

$$- \frac{0,22 (0,52 - 0,1) e^{-t/0,22}}{(0,22 - 2,22)(0,22 - 0,4)} = 0,5 e^{-t/0,4} -$$

$$- 0,25 e^{-t/2,22} - 0,25 e^{-t/0,22}.$$

Для статора имеем:

$$F_d(t) = F_f(t) + F_{1d}(t) = 1 + 0,36 e^{-t/0,4} -$$

$$- 1,29 e^{-t/2,22} - 0,07 e^{-t/0,22}.$$

Предельное значение установившегося тока короткого замыкания составляет:

$$\Delta I_{\text{кр}} = \frac{4,3}{1,47} - 1,27 = 1,65,$$

то же принудительного тока возбуждения (приведенного к статору)

$$\Delta I_{f\text{кр}}^{\circ} = \frac{4,3}{1,25} - 1,49 = 1,95.$$

Приращение тока под действием АРВ будет: в статоре

$$\Delta I_d = 1,65 F_d(t);$$

в обмотке возбуждения

$$\Delta I_f^{\circ} = 1,95 F_f(t);$$

в продольном демпферном контуре

$$\Delta I_{1d}^{\circ} = 1,95 F_{1d}(t).$$

По полученным выражениям построены кривые изменения токов во времени, которые приведены на рис. 4-19 (сплошные линии). Для сравнения там же показаны (пунктирными линиями) аналогичные кривые при отсутствии демпферных контуров и сохранении всех прочих параметров генератора. Влияние АРВ показано как отдельными кривыми, так и в сумме с кривыми без учета АРВ.

Чтобы получить полное значение периодической составляющей тока короткого замыкания, нужно сложить ее продольную и поперечную

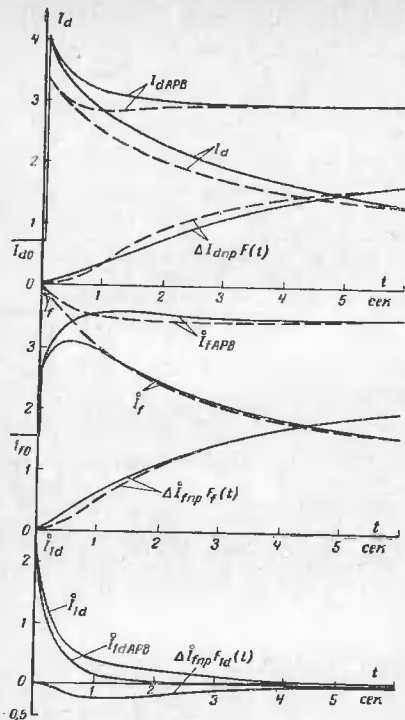


Рис. 4-19. К задаче 4-22. Кривые изменения токов статора, обмотки возбуждения и продольного демпферного контура при трехфазном коротком замыкании; сплошные линии — при наличии демпферного контура, пунктирные — при его отсутствии; индекс АРВ указывает, что данная кривая построена с учетом действия АРВ.

составляющие. Последние в данном случае достаточно малы и скрываются лишь в самом начале процесса. Так, величина начального сверхпереходного тока будет:

$$I'' = \sqrt{4,12^2 + 1,52^2} = 4,4,$$

т. е. на 7% больше своей продольной составляющей.

Уже через 0,25 сек влияние поперечной составляющей сказывается менее 1,5%.

Остановимся на получении выражений для токов при отсутствии демпферных контуров (см. пунктирные линии на рис. 4-19).

Предшествующее значение переходной з. д. с. (рис. 4-17) составляет:

$$E'_{\text{э0}} = 0,94 + 0,68 \cdot 0,2 = 1,08.$$

Начальное значение переходного тока

$$I'_{d|0} = \frac{1,08}{0,2 + 0,12} = 3,38$$

и свободного переходного тока

$$I'_{d\text{св}|0} = 3,38 - 1,27 = 2,11.$$

Начальное значение тока в обмотке возбуждения

$$I'_{f|0} = 3,38 \cdot \frac{1,47}{1,25} = 3,97$$

и его свободная составляющая

$$I'_{f\text{св}|0} = 3,97 - 1,49 = 2,48.$$

Постоянная времени затухания свободного переходного тока

$$T' = T'_{f0} \frac{x'_d + x_r}{x_d + x_r} = 8,8 \cdot \frac{0,2 + 0,12}{1,35 + 0,12} = 1,92 \text{ сек.}$$

При отсутствии АРВ выражения для токов будут: в статоре

$$I_d = 2,11e^{-t/1,92} + 1,27;$$

в обмотке возбуждения

$$I_f = 2,48e^{-t/1,92} + 1,49.$$

Выражение функции $F(t)$ при $T_e = 0,4$ сек будет:

$$F(t) = 1 - \frac{T'_d e^{-t/T'_d} - T_e e^{-t/T_e}}{T'_d - T_e} = \\ = 1 - \frac{1,92e^{-t/1,92} - 0,4e^{-t/0,4}}{1,92 - 0,4} = 1 + 0,26e^{-t/0,4} - \\ - 1,26e^{-t/1,92}.$$

и приращение тока под действием АРВ:
в статоре

$$\Delta I_d = 1,65F(t);$$

в обмотке возбуждения

$$\Delta I_f = 1,95F(t).$$

Коль скоро в поперечной оси ротора демпферного контура нет, то поперечной периодической слагающей тока статора также не будет. Приведенный выше расчет при наличии демпферных контуров выполнен по строгим выражениям. Рассмотрим теперь часто применяемое приближенное решение, когда эффект демпферных контуров как бы дополнительно складывается на результаты, полученные без учета таких контуров.

Если начальный сверхпереходный ток, как ранее подсчитано, составляет $I''_{d0} = 4,12$, а начальный переходный ток при отсутствии демпферных контуров $I'_{d0} = 3,38$, то отсюда делается заключение, что приближенке начальное значение свободного сверхпереходного тока составляет:

$$I''_{d\text{св}} = 4,12 - 3,38 = 0,74,$$

то время как в действительности этот ток $I''_{d\text{св}} = 0,45$.

Приближенная величина постоянной времени затухания этого свободного тока определяется при условии, что $r_f = 0$. При этом выражение для T''_d приобретает вид:

$$T''_d = T_{1d} \frac{x''_d \alpha \Sigma}{x''_d \alpha \Sigma},$$

где $T_{1d} = T_{1d0} \left(1 - \frac{x''_{ad}}{x_{1d} x_f} \right)$ — постоянная времени продольного демпферного контура при замкнутой цепи обмотки возбуждения (с $r_f = 0$) и разомкнутой цепи статора.

В данном случае

$$T_{1d} = 2,9 \left(1 - \frac{1,25^2}{1,36 \cdot 1,293} \right) = 0,32 \text{ сек}$$

$$T''_d = 0,32 \frac{0,13 + 0,12}{0,2 + 0,12} = 0,25 \text{ сек},$$

что достаточно близко к истинной величине $T''_d = 0,22 \text{ сек}$.

Таким образом, приближенный учет демпферных контуров приводит к следующему выражению для периодической слагающей тока статора при отсутствии АРВ:

$$I_d = 0,74e^{-t/0,25} + 2,11e^{-t/1,02} + 1,27.$$

Сравнение его с ранее полученным точным выражением показывает, что если в значениях постоянных времени разница относитель-

но мала (порядка 10%), то в значениях начальных свободных токов (особенно начального свободного сверхпереходного тока) она достаточна значительно больших величин. Что касается влияния демпферного контура на характер возрастания принужденного тока от действия АРВ, то это наглядно видно из сравнения соответствующих кривых, приведенных на рис. 4-19.

Следует отметить, что при определении тока в цепи возбуждения, особенно в начальной стадии переходного процесса, строгий учет демпферных контуров является обязательным, так как приближенная оценка влияния таких контуров может привести к весьма большим ошибкам.

Задача 4-23

Для условий предыдущей задачи найти закономерности изменения приращений принужденных токов в статоре, обмотке возбуждения и продольном демпферном контуре под действием АРВ при $T_e = 0$. Представить их кривыми (как функции времени) и сопоставить последние с аналогичными кривыми, полученными в решении предыдущей задачи.

Решение. Общие выражения для $F_f(t)$, $F_{1d}(t)$ и $F_d(t)$, которые приводятся в решении предыдущей задачи, при $T_e = 0$ значительно упрощаются и принимают следующий вид:

$$F_f(t) = 1 - \frac{T'_d - T_{1d}}{T'_d - T''_d} e^{-t/T'_d} - \frac{T''_d - T_{1d}}{T''_d - T'_d} e^{-t/T''_d};$$

$$F_{1d}(t) = -\frac{T_{1d} - T_{1d0}}{T'_d - T''_d} (e^{-t/T'_d} - e^{-t/T''_d});$$

а ток статора проще записать

$$F_d(t) = F_f(t) + F_{1d}(t).$$

Подставив в них полученные ранее значения:

$$T'_d = 2,22 \text{ сек}, T''_d = 0,22 \text{ сек},$$

$$T_{1d} = 0,52 \text{ сек}, T_{1d0} = 0,1 \text{ сек},$$

получим:

$$F_f(t) = 1 - \frac{2,22 - 0,52}{2,22 - 0,22} e^{-t/2,22} -$$

$$- \frac{0,22 - 0,52}{0,22 - 2,22} e^{-t/0,22} = 1 - 0,85e^{-t/2,22} - 0,15e^{-t/0,22},$$

$$F_{1d}(t) = -\frac{0,52 - 0,1}{2,22 - 0,22} (e^{-t/2,22} - e^{-t/0,22}) =$$

$$= -0,21 (e^{-t/2,22} - e^{-t/0,22})$$

соответственно

$$F_d(t) = F_f(t) + F_{1d}(t) = 1 - 1,06e^{-t/2,22} + 0,06e^{-t/0,22},$$

Изкоме закономерности изменения приращений токов и обмотках статора и ротора находятся в прямой пропорциональности с полученными выражениями для функций $F_d(t)$, $F_f(t)$ и $F_{1d}(t)$. Так для статора имеем:

$$\Delta I_a = \Delta I_{cr} F_d(t) = 1,65 F_d(t);$$

и для приведенных к статору принужденных приращений токов в обмотке возбуждения

$$\Delta I_f^0 = \Delta I_{fcr} F_f(t) = 1,95 F_f(t)$$

и в продольном демпферном контуре

$$\Delta I_{1d}^0 = 1,95 F_{1d}(t).$$

Для сопоставления характера изменения принужденных токов достаточно рассмотреть только сами функции $F_d(t)$, $F_f(t)$ и $F_{1d}(t)$.

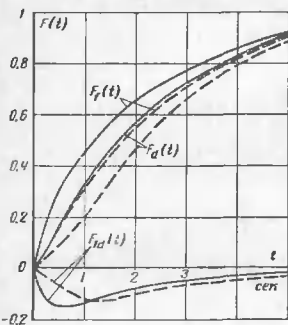


Рис. 4-20. К задаче 4-23. Кривые изменения функций $F_f(t)$, $F_{1d}(t)$ и $F_d(t)$ при $T_e=0$ (сплошные кривые) и $T_e=0,4$ сек (пунктирные кривые).

очень мала и кривая $F_d(t)$ представляет практически чистую экспоненту с постоянной времени T_d' .

Задача 4-24

Установить закономерности изменения принужденных токов в цепях статора и ротора для условий задачи 4-22 в частном случае, когда $T_e = T''_d$. Полученные закономерности сопоставить с результатами решения предыдущей задачи.

Задача 4-25

Гурбогенератор, параметры которого приведены в задаче 4-22, работает на холостом ходу с номинальным напряжением. Его ток возбуждения при этом составляет $I_{f0} = 300$ а.

Требуется рассмотреть процесс гашения поля, производимого путем закорачивания обмотки возбуждения на постоянном разрядном сопротивлении $r = 4r_f$, и выявить влияние демпферных контуров на протекание этого процесса.

Решение. Гашение поля на существо противоположно форсировке возбуждения. Принципиальное различие между ними характеризуется лишь граничными условиями и разными значениями постоянной времени цепи обмотки возбуждения. Сама же структура дифференциальных уравнений при этих процессах в основном одинакова и соответственно одинаковы выражения для постоянных времени T''_a и T''_d , характеризующих затухание свободных составляющих. Поэтому выражение для функций $F_f(t)$, $F_{1d}(t)$ и $F_d(t)$, полученные для процесса форсировки возбуждения, с некоторыми коррективками могут быть использованы при рассмотрении процесса гашения поля.

Так, полагая $T_e=0$ и понимая под T''_a и T''_d значения этих постоянных времени при $T_f = T_{fcr}$, для цепи обмотки возбуждения будем иметь:

$$F_{fcr}(t) = \frac{T'_d - T'_{1d}}{T'_d - T''_d} e^{-t/T'_d} + \frac{T''_d - T'_{1d}}{T''_d - T'_d} e^{-t/T''_d};$$

соответственно для продольного демпферного контура

$$F_{1dcr}(t) = \frac{T'_{1d} - T_{1d\sigma}}{T''_d - T''_d} (e^{-t/T'_d} - e^{-t/T''_d})$$

и для продольного тока статора (или поперечной э. д. с.)

$$F_{dcr}(t) = F_{fcr}(t) + F_{1dcr}(t),$$

причем, как отмечалось ранее (см. задачу 4-23), функция $F_{dcr}(t)$ в основном определяется только слагаемым, изменяющимся с постоянной времени T'_d . Учет ненулевых начальных условий в цепи статора и продольном демпферном контуре легко произвестись по известным граничным условиям (см. задачу 4-27).

При гашении поля на холостом ходу постоянная времени цепи возбуждения будет:

$$T_{fcr} = T_{f0} \frac{1}{1+k} = 8,8 \cdot \frac{1}{1+4} = 1,76 \text{ сек},$$

$$k = \frac{r}{r_f} = 4.$$

Остальные необходимые параметры получены при решении задачи 4-22, т. е.

$$T_{1d0} = 2,9 \text{ сек}, \quad x_{ad} = 1,25; \quad x_f = 1,36;$$

$$x_{1d} = 1,253 \text{ и } T'_{1d} = 0,1 \text{ сек.}$$

и $F_{fcr}(t)$ оставлены, разумеется, только свободные слагаемые

Коэффициент рассеяния на холостом ходу

$$\sigma_0 = 1 - \frac{x_{ad}^2}{x_j x_{id}} = 1 - \frac{1,25^2}{1,36 \cdot 1,293} = 0,11,$$

и значение коэффициента

$$q_0 = \sqrt{1 - \frac{4\sigma_0 T_{гор.эм} T_{ид}}{(T_{гор.эм} + T_{ид})^2}} =$$

$$= \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,11 \cdot 1,76 \cdot 2,9}{(1,76 + 2,9)^2}} = 0,945.$$

Значения постоянных времени:

$$T'_{до} = \frac{1 + q_0}{2} (T_{гор.эм} + T_{ид}) =$$

$$= \frac{1 + 0,945}{2} (1,76 + 2,9) = 4,53 \text{ сек}$$

и

$$T''_{до} = (T_{гор.эм} + T_{ид}) - T'_{до} = (1,76 + 2,9) - 4,53 = 0,13 \text{ сек.}$$

Отметим, что хотя величина σ_0 достаточно мала, но благодаря большому значению $T_{ид}$ приближенное значение $T'_{до} = \sigma_0 T_{ид} = 0,11 \cdot 2,9 = 0,32 \text{ сек}$ в 2,5 раза больше истинного значения. Найдем значение функций:

$$F_{гор.эм}(t) = \frac{4,53 - 2,9}{4,53 - 0,13} e^{-t/4,53} +$$

$$+ \frac{0,13 - 2,9}{0,13 - 4,53} e^{-t/0,13} = 0,37 e^{-t/4,53} + 0,63 e^{-t/0,13},$$

$$F_{ид.гем}(t) = \frac{2,9 - 0,1}{4,53 - 0,13} (e^{-t/4,53} - e^{-t/0,13}) =$$

$$= 0,63 (e^{-t/4,53} - e^{-t/0,13});$$

$$F_{гем.гем}(t) = F_{гор.эм}(t) + F_{ид.гем}(t) =$$

$$= 1,007 e^{-t/4,53} - 0,007 e^{-t/0,13}.$$

Как видно, в последнем выражении составляющая с $T''_{до}$ ничтожно мала (менее 1%).

Полученные выражения с достаточной для практики точностью характеризуют протекание процесса гашения поля. Напомним, что при их выводе не учтено влияние трансформаторных э. д. с., возникающих при переходных процессах. Чтобы получить изменение тока в цепи возбуждения при рассматриваемом гашении поля, до-

статочно предшествующий ток $I_{г0} = 300 \text{ а}$ умножить на $F_{гем}(t)$. Умножая тот же ток на $F_{гем.гем}(t)$, получим приведенный к обмотке возбуждения ток в продольном демпферном контуре. Функция $F_{гем.гем}(t)$ дает относительное изменение напряжения или э. д. с. статора.

Полученные закономерности представлены кривыми на рис. 4-21. Для сравнения там же приведена кривая гашения поля при отсут-

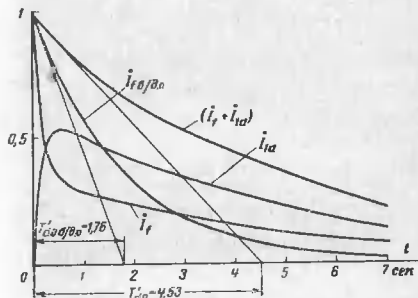


Рис. 4-21. К задаче 4-25. Кривые изменения токов при гашении поля турбогенератора, работающего на холостом ходу.

ствия продольной демпферной обмотки¹. В последнем случае она является чистой экспонентой с постоянной времени $T_{гор.эм} = 1,76 \text{ сек}$. В начальной стадии процесса демпферная обмотка (или контур) в значительной мере ускоряет затухание тока в обмотке возбуждения, но затем снижение тока происходит медленнее, чем при отсутствии такой обмотки. Наводимая в статоре э. д. с. определяется суммой токов ($I_{г} + I_{ид}$), и здесь, как отмечалось ранее, продольная демпферная обмотка существенно затягивает процесс гашения поля, причем ее проявление тем сильнее, чем больше ее постоянная времени. В турбогенераторах естественным демпферным контуром является массив (бочка) ротора, который препятствует осуществлению быстрого гашения поля.

Чтобы найти напряжение на коллектах ротора, определим сперва величину сопротивления обмотки возбуждения. Его относительно величину, приведенную к статору, легко определить из выражения той же самой времени $T_{г0}$ катушки

$$\rho = \frac{x_j}{\omega T_{г0}} = \frac{1,36}{314 \cdot 8,8} = 0,493 \cdot 10^{-3}.$$

¹ Относительно к данному случаю величины отмечены на рис. 4-21 и 4-22 номинальными индексами Б. д. п.

Во взаимной системе относительных единиц базисные единицы в цепи возбуждения будут:

$$S_{I\sigma} = S_{\sigma} = 125 \text{ Мва}; \\ I_{I\sigma} = I_{I\sigma, \text{к.а.а.}} = 300 \cdot 1,25 = 375 \text{ а.}$$

Тогда истинная величина истинного сопротивления обмотки возбуждения будет:

$$r_f = 0,493 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{125}{0,375^2} = 0,44 \text{ ом.}$$

Напряжение на кольцах ротора при холостом ходе

$$U_{I\sigma, \text{х}} = 300 \cdot 0,44 = 132 \text{ в,}$$

и наибольшее напряжение при гашении поля на холостом ходу, очевидно, будет в начальный момент, т. е.

$$U_{I\sigma, \text{макс}} = 300(4 \cdot 0,44) = 4 \cdot 132 = 528 \text{ в.}$$

Задача 4-26

На рис. 4-22 показаны кривые изменения токов в цепях ротора того же турбогенератора, что и в задачах 4-22 и 4-25, при гашении

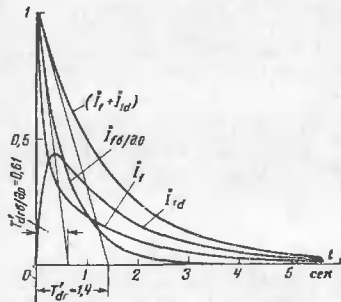


Рис. 4-22. К задаче 4-26. Кривые изменения токов в цепях ротора турбогенератора при гашении поля, когда цепь статора замкнута через $X_{\text{нр}}$.

его магнитного поля закорачиванием обмотки возбуждения на разрядное сопротивление $r = 4r_f$, при этом цепь статора замкнута через критическую реактивность для данного турбогенератора (его $I_{\text{нр}} =$

182

1,3) и гашение поля осуществляется при наступлении установившегося режима трехфазного короткого замыкания.

Требуется составить уравнения для этих кривых, выразив токи в долях тока возбуждения, который был в начальный момент гашения поля. Определить также максимальное напряжение на обмотке возбуждения.

Задача 4-27

Исходные данные те же, что и в задаче 4-22. Внезапное трехфазное короткое замыкание предопределяется за повышающим трансформатором в зоне дифференциальной защиты блока генератор — трансформатор, от действия которой через 0,5 сек произошло отключение блока от системы и одновременно с этим сработал автомат гашения поля (АГП), который замкнул цепь обмотки возбуждения на постоянное разрядное сопротивление $r = 4r_f$.

Рассмотреть весь цикл указанного переходного процесса, состоящего из двух стадий: короткого замыкания и гашения поля (при допущении коротком в цепи статора), и аналогично предыдущим задачам выявить влияние демпферных контуров. При учете действия автоматического регулирования возбуждения считать $T_e = 0$. Дополнительно известно, что у генератора $T_e^{(0)} = 0,38 \text{ сек}$.

Решение. Из решений задач 4-22 и 4-23 имеем выражения для токов с учетом действия АРВ (при $T_e = 0$).

в цепи статора

$$I_a = 0,55e^{-t/0,22} + 0,65e^{-t/2,22} + 2,92;$$

в обмотке возбуждения

$$I_f = -1,61e^{-t/0,22} + 0,6e^{-t/2,22} + 3,44;$$

в демпферном контуре

$$I_d = 2,25e^{-t/0,22} + 0,15e^{-t/2,22}$$

и при отсутствии демпферных контуров

$$I_a = 0,46e^{-t/1,92} + 2,92$$

$$I_f = 0,53e^{-t/1,92} + 3,44.$$

В момент действия АГП, т. е. через 0,5 сек, токи в этих цепях составляют: $I_a = 3,5$; $I_f = 3,76$; $I_d = 0,35$ и при отсутствии демпферных контуров $I_a = 3,28$ и $I_f = 3,87$. Напомним, что в статоре это соответствует периодической сглаживающей тока, а в цепях ротора — связанным с ней аperiodическим сглаживающим токам.

Оценим возможную величину аperiodической слагающей тока статора в момент $t = 0,5$ сек. Из выражений для T_a определим активные сопротивления статора

$$T_a = \frac{x_2}{\omega r},$$

откуда

$$r = \frac{0,14}{314 \cdot 0,38} = 1,17 \cdot 10^{-4},$$

где

$$x_2 = \frac{2x''_d x''_q}{x''_d + x''_q} = \frac{2 \cdot 0,13 \cdot 0,15}{0,13 + 0,15} = 0,14.$$

При коротком замыкании за трансформатором, для которого $\frac{x}{r} \approx$

$$\approx 30, \text{ т. е. } r = \frac{0,12}{30} = 4 \cdot 10^{-4}, \text{ будем иметь:}$$

$$T_a = \frac{0,26}{314(1,17 + 4) \cdot 10^{-4}} = 0,16 \text{ сек.},$$

где

$$x_2 = \frac{2(0,13 + 0,12)(0,15 + 0,12)}{(0,13 + 0,12) + (0,15 + 0,12)} = 0,26$$

$$\left(\text{или проще } x_2 = \frac{0,13 + 0,15}{2} + 0,12 = 0,26 \right).$$

Через 0,5 сек значение аperiodической слагающей будет составлять $(e^{-0,5/0,16}) 100 = 4\%$ своей начальной величины, что позволяет пренебречь ею, а также связанными с ней периодическими слагающими токов в цепях ротора.

При рассматриваемом коротком замыкании в решении задачи 4-22 были найдены: $T'_f = 1,92$ сек; $T'_{fd} = 0,52$ сек; $\sigma' = 0,487$.

После включения разрядного сопротивления постоянная времени цепи возбуждения будет:

$$T'_{f\text{внш}} = T'_f \frac{1}{1+k} = 1,92 \cdot \frac{1}{1+4} = 0,385 \text{ сек.}$$

При этом значение коэффициента q' будет.

$$q' = \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,487 \cdot 0,385 \cdot 0,52}{(0,385 + 0,52)^2}} = 0,724$$

и постоянные времени:

$$T'_d = \frac{1+0,724}{2} (0,385 + 0,52) = 0,78 \text{ сек.};$$

$$T''_d = (0,385 + 0,52) - 0,78 = 0,125 \text{ сек.}$$

Начальные значения составляющих тока в цепи возбуждения:

$$\dot{I}'_f = \frac{T'_d - T'_{fd}}{T'_d - T''_d} \dot{I}_f = \frac{0,78 - 0,52}{0,78 - 0,125} \cdot 3,76 = 1,5;$$

$$\dot{I}''_f = \dot{I}_f - \dot{I}'_f = 3,76 - 1,5 = 2,26.$$

Следовательно, при гашении поля изменение тока в этой цепи будет:

$$\dot{I}_f = 1,5e^{-t/0,78} + 2,26e^{-t/0,125},$$

причем отсчет времени здесь производится с начала гашения поля.

Затухание тока в цепи статора при гашении поля практически следует по экспоненте с постоянной времени $T'_d = 0,78$, т. е.

$$I_d = 3,5e^{-t/0,78}.$$

Из равенства $(\dot{I}_f + \dot{I}_{fd}) x_{ad} = I_d x_{d\text{внш}}$, которое должно соблюдаться в любой момент, находим для тока и демпферном контуре:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{fd} &= I_d \frac{x_{d\text{внш}}}{x_{ad}} - \dot{I}_f = 3,5 \cdot \frac{1,35 + 0,12}{1,25} e^{-t/0,78} - 1,5e^{-t/0,78} - \\ &\quad - 2,26e^{-t/0,125} = 2,61e^{-t/0,78} - 2,26e^{-t/0,125}. \end{aligned}$$

При отсутствии демпферных контуров изменения токов в статоре и в цепи возбуждения при гашении поля будут выражаться следующими уравнениями:

$$I_d = 3,28e^{-t/0,385};$$

$$\dot{I}'_f = 3,87e^{-t/0,385}.$$

Кривые на рис. 4-23 иллюстрируют полученные закономерности изменения токов в обеих цепях рассматриваемого переходного процесса. Сплошные линии соответствуют условию, когда имеются демпферные контуры, а пунктирные — когда их нет¹.

Нетрудно установить из равенства

$$\frac{d\dot{I}_{fd}}{dt} = -\frac{2,61}{0,78} e^{-t/0,78} + \frac{2,26}{0,125} e^{-t/0,125} = 0.$$

что максимум \dot{I}_{fd} наступает через 0,25 сек после начала гашения поля, и его величина составляет 1,58.

Оценим примерную величину времени гашения поля. Если считать, что дуга переменного тока гаснет при напряжении 150 в, то при несущейся магнитной характеристике (т. е. принятой спрямленной характеристике холостого хода) даяного турбогенератора магнитизирующий ток ротора должен быть снижен до $\frac{0,15}{15,75} I_{f\text{н.х.}} = \frac{0,15}{15,75} \times 300 = 2,86$ а.

¹ Подчеркнем, что для турбогенераторов такое допущение условно, поскольку сам явсся ротора обладает достаточно сильным естественным демпфированием.

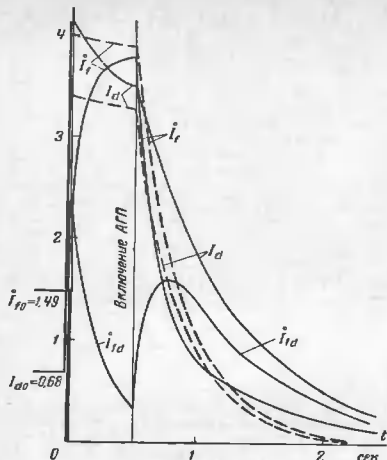


Рис. 4-23. К задаче 4-27. Кривые изменения токов в цепях турбогенератора при трехфазном коротком замыкании и гашении поля.

Намагничивающий ток ротора в начальный момент гашения поля при наличии демпферных контуров составляет:

$$(I_r + I_{rd}) x_{ad} I_{x,x} = (3,76 + 0,35) 1,25 \cdot 300 = 1545 \text{ а}$$

(для ивие $I_{rd} I_{x,x} = 3,5 \cdot 1,47 \cdot 300 = 1545 \text{ а}$);
при отсутствии демпферных контуров

$$I_r x_{ad} I_{x,x} = 3,87 \cdot 1,25 \cdot 300 = 1450 \text{ а.}$$

Искомое время гашения составит:
при наличии демпферных контуров

$$t_{\text{гаш}} = T_d \ln N = 0,78 \ln \frac{1545}{2,86} = 4,9 \text{ сек};$$

при отсутствии их

$$t_{\text{гаш}} = 0,385 \ln \frac{1450}{2,86} = 2,4 \text{ сек},$$

т. е. в данном случае демпферные контуры примерно в 2 раза удлиняют процесс гашения поля.

Задача 4-28

Произвести приближенную оценку влияния демпферных контуров турбогенератора на его дополнительный нагрев при переходном процессе, который рассмотрен в предыдущей задаче.

При решении ограничиться учетом только периодической составляющей тока статора и соответственно апериодических слагающих токов цепи ротора. Процесс нагрева считать адиабатическим.

Решение. Поскольку токи при переходном процессе выражаются через экспоненциальные функции, то вначале напомним соотношения, которые вытекают из интегрирования таких функций.

Пусть задана экспонента n -й степени (рис. 4-24). Ее, очевидно, можно рассматривать как экспоненту первой степени, у которой в n раз уменьшена постоянная времени, т. е.

$$(e^{-t/T})^n = e^{-t \frac{T}{n}}.$$

Полная площадь, ограниченная такой экспонентой и системой координат, т. е.

$$\int_0^{\infty} e^{-t \frac{T}{n}} dt = -\frac{T}{n} \int_0^{\infty} e^{-t \frac{T}{n}} = \frac{T}{n},$$

равна площади прямоугольника $OIAB$ с основанием T/n .

За промежуток времени t эта площадь будет меньше (заштрихованная часть), и она составляет:

$$\int_0^t e^{-t \frac{T}{n}} dt = \frac{T}{n} \left(1 - e^{-t \frac{T}{n}}\right).$$

Ее можно получить с помощью дополнительно построенной экспоненты с той же постоянной времени T/n , как показано на рис. 4-24.

Теперь, используя полученные в решении задачи 4-27 выражения для токов, нетрудно определить тепло, создаваемое в каждой цепи турбогенератора как при коротком замыкании, так и за время гашения поля. Например, для цепи статора при отсутствии демпферных контуров имеем:

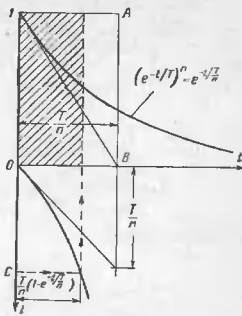


Рис. 4-24. К задаче 4-28. К определению площади, ограниченной экспонентой.

при коротком замыкании

$$I_d = 0,46e^{-t/1,92} + 2,92$$

и, следовательно,

$$Q = \int_0^{0,5} I_d^2 r dt = 1,17 \cdot 10^{-2} \int_0^{0,5} (0,46e^{-t/1,92} + 2,92)^2 dt =$$

$$= 1,17 \cdot 10^{-2} \int_0^{0,5} (0,46^2 e^{-t/0,96} + 2 \cdot 2,92 \cdot 0,46 e^{-t/1,92} + 2,92^2) dt =$$

$$= 1,17 \cdot 10^{-2} \{0,46^2 \cdot 0,96 (1 - e^{-0,5/1,92}) + 2 \cdot 2,92 \cdot 0,46 \times$$

$$\times 1,92 (1 - e^{-0,5/1,92}) + 2,92^2 \cdot 0,5\} = 6,46 \cdot 10^{-2};$$

при гашении поля

$$I_d = 3,28e^{-t/0,385}$$

и

$$Q = \int_0^{\infty} I^2 r dt = 1,17 \cdot 10^{-2} \int_0^{\infty} 3,28^2 e^{-t/0,193} dt =$$

$$= 1,17 \cdot 10^{-2} \cdot 3,28^2 \cdot 0,193 = 2,41 \cdot 10^{-2}.$$

Произведенные подсчеты для каждой цепи и для турбогенератора в целом позволили найти значения отношений выделенного тепла при наличии демпферных контуров к теплу, выделенному при отсутствии таких контуров. Результаты этих подсчетов сведены в следующую таблицу:

Наименование элемента	Величины отношений за время		
	короткого замыкания	гашения поля	всего переходного процесса
Статор	1,25	2,30	1,54
Обмотка возбуждения	0,74	0,67	0,72
Ротор в целом	1,04	2,35	1,40
Генератор в целом	1,17	2,32	1,49

Из таблицы видно, сколь существенно демпферные контуры разгружают обмотку возбуждения, хотя общий нагрев машины при них возрастает.

Задача 4-29

Генератор характеризуется следующими данными: $x_d = 0,91$; $x_d' = 0,54$; $x_d'' = 0,21$; $T_{j0} = 4,5$ сек; $T_{j0}^{(3)} = 0,18$ сек; относительный ток возбуждения при номинальной нагрузке с $\cos \varphi = 0,8$ $I_f = 1,69$; $I_{fnp} = -3,1$; форсировка возбуждения с $T_a = 0$.

Требуется определить наибольшее допустимое значение постоянного разрядного сопротивления r (выраженное через активное сопротивление обмотки возбуждения r_f), чтобы при гашении поля максимальное напряжение на обмотке возбуждения не превышало k -кратной величины напряжения на ней при номинальной нагрузке. При этом следует иметь в виду, что включение разрядного сопротивления может происходить через 0,2 сек с момента подачи импульса на автомат гашения поля (АГП).

Решение. Найдем максимальное мгновенное значение тока в обмотке возбуждения. Оно, очевидно, будет при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора, когда последний предварительно работал с номинальной нагрузкой.

Начальное значение переходной э. д. с. (по приближенной формуле) составляет:

$$E'_{q0} \approx U_{q0} + I_a x_d' \sin \varphi_0 = 1 + 1 \cdot 0,21 \cdot 0,6 \approx 1,13.$$

Значения токов в постоянной времени будут:

$$I'_{f0} = \frac{1,13}{0,21} = 5,4; \quad I = \frac{E_{qnp}}{x_d} = \frac{3,1}{0,91} = 3,4;$$

$$T'_{fd} = 4,5 \frac{0,21}{0,91} = 1,04 \text{ сек.}$$

Начальное значение аperiodической слагающей тока в обмотке возбуждения

$$I_{f a | 0} = E_{q | 0} - I'_{f0} x_d = 5,4 - 0,91 = 4,9$$

и значение этой слагающей тока через 0,2 сек

$$I_{f a} = (4,9 - 3,1) e^{-0,2/1,04} + 3,1 = 4,6.$$

Начальное значение сгибающей периодической слагающей тока в обмотке возбуждения

$$I_{f n | 0} = I_{f a | 0} - I_{f0} = 4,9 - 1,69 = 3,21,$$

и ее значение через 0,2 сек

$$I_{f n} = 3,21 e^{-0,2/0,18} = 1,06.$$

Все эти величины токов в обмотке возбуждения выражены в относительных единицах, причем за единицу здесь принят ток возбуждения холостого хода.

Таким образом, максимальное мгновенное значение тока в обмотке возбуждения будет:

$$I_{f \text{ макс}} = 4,6 + 1,06 = 5,66.$$

В соответствии с поставленным условием можно написать

$$U_{f \text{ макс}} = 5,66r \leq 8 \cdot 1,69r,$$

откуда

$$r \leq \frac{8 \cdot 1,69}{5,66} r_f = 2,4 r_f.$$

Задача 4-30

Для гидрогенератора типа СВ-1500/170-96 известны следующие параметры: 100 Мвт, 117,65 Мва, $\cos \varphi = 0,85$, 13,8 кА, $x''_d = 0,21$, $x'_d = 0,29$, $x_0 = 0,17$, $x_{d0} = 0,65$, $T'_{d0} = 5,3$ сек; возбуждение при холостом ходе $I_{fх.х} = 1030$ а, при номинальной нагрузке $I_{fn} = 1795$ а и $U_{fn} = 430$ в; предельное напряжение возбудителя $U_{fnp} = 700$ в.

Определить время гашения поля при использовании:

- постоянного разрядного сопротивления;
- дугогасящей решетки.

Решение провести для условий, когда статор замкнут накоротко и возбуждение генератора предельное, при этом напряжение на обмотке возбуждения при гашении поля не должно превышать 2600 в (для примененной изоляции).

Решение. Активное сопротивление обмотки возбуждения, очевидно, составляет:

$$r_f = \frac{U_{fn}}{I_{fn}} = \frac{430}{1795} = 0,24 \text{ ом.}$$

Во взаимной системе относительных единиц $S_{f0} = S_0 = 117,65$ Мва и $I_{f0} = I_{fх.х} \cdot x_{d0} = 1030(0,85 - 0,17) = 495$ а.

Следовательно, приведенное к статору и выраженное в относительных единицах активное сопротивление обмотки возбуждения будет

$$r_f' = 0,24 \cdot \frac{0,495^2}{117,65} = 0,5 \cdot 10^{-2}.$$

Реактивность обмотки возбуждения

$$x_f = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x'_d} = \frac{(0,85 - 0,17)^2}{0,65 - 0,29} = \frac{0,48^2}{0,36} = 0,64.$$

Постоянная времени обмотки возбуждения

$$T_{f0} = \frac{x_f}{\omega r_f} = \frac{0,64}{314 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2}} = 4,1 \text{ сек.}$$

С достаточной точностью постоянную времени продольной демпферной обмотки можно определить как разность:

$$T_{1d0} \approx T'_{d0} - T_{f0} = 5,3 - 4,1 = 1,2 \text{ сек.}$$

Реактивность продольной демпферной обмотки определим из выражения

$$x_{1d} = \frac{(x'_d - x_0)(x''_d - x_c)}{x'_d - x''_d} + 1$$

$$x_{1d} = \frac{(0,29 - 0,17)(0,21 - 0,17)}{0,29 - 0,21} + 0,48 = 0,06 + 0,48 = 0,54.$$

Реактивности и постоянные времени цепей ротора при короткозамкнутом статоре будут:

$$x'_f = x_f \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f x_d} \right) = 0,64 \left(1 - \frac{0,48^2}{0,64 \cdot 0,65} \right) = 0,285;$$

$$x'_{1d} = x_{1d} \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x_{1d} x_d} \right) = 0,54 \left(1 - \frac{0,48^2}{0,64 \cdot 0,65} \right) = 0,185;$$

$$T'_f = T_{f0} \frac{x'_f}{x_f} = 4,1 \cdot \frac{0,285}{0,64} = 1,83 \text{ сек};$$

$$T'_{1d} = T_{1d0} \frac{x'_{1d}}{x_{1d}} = 1,2 \cdot \frac{0,185}{0,54} = 0,41 \text{ сек.}$$

а) Гашение на разрядное сопротивление. Предельный ток возбуждения $I_{fnp} = \frac{U_{fnp}}{r_f} = \frac{700}{0,24} = 2900$ а. Допустимое разрядное сопротивление $r = \frac{2600}{700} r_f = 3,7 r_f$. Постоянная времени гашения поля

$$T_{гаш} = T'_{1d} + \frac{1}{1+k} T'_f = 0,41 + \frac{1}{1+3,7} \cdot 1,83 = 0,8 \text{ сек.}$$

Ток возбуждения, при котором гаснет дуга переменного тока,

$$I_{fгаш} = \frac{0,15}{13,8} \cdot 1030 = 10,9 \text{ а.}$$

Время гашения составит:

$$t_{гаш} = T_{гаш} \ln \frac{I_{fnp}}{I_{fгаш}} = 0,8 \ln \frac{2900}{10,9} = 0,8 \ln 267 = 4,5 \text{ сек.}$$

б) Гашение на дугогасящую решетку. Поскольку ток возбуждения при номинальной нагрузке $I_{fn} = 1795$ а, то выбираем автомат АПН-24, у которого $I_n = 2400$ а и напряжение на решетке $U_n = 30 \cdot 40 = 1200$ в. Если включить в каждый полюс по такому автомату, то напряжение на решетке будет $U_n = 2 \cdot 1200 = 2400$ в и значение

$$k = \frac{2400 - 700}{700} = 2,43.$$

Обратимся к осциллограмме тока короткого замыкания (рис. 4-25, а). Для разложения ее на слагаемые нужно вначале провести огибающие по положительным и отрицательным амплитудам и осевую линию времени. Затем следует провести ряд вертикалей, пересекающих данную осциллограмму. Отрезок, например MN , ограниченный огибающими, нужно разделить пополам. Получившаяся точка L лежит на искровой кривой аperiodической слагающей тока, мгновенное значение которой в этот момент времени определяется ординатой точки L относительно оси времени. Соответственно отрезок ML или NL дает максимальное мгновенное значение периодической слагающей тока в тот же момент времени¹. Построив таким путем кривую изменения аperiodической слагающей проведена на осциллограмме. Экстраполируя ее до начального момента, находим начальное значение $i_0|_0$. Отложив на полученной кривой отрезок, равный $0,368 \cdot |i_0|$, найдем подкастельную, которая в масштабе оси времени дает значение постоянной времени $T_a = 0,18$ сек. Показанный на рис. 4-25, а отрезок между огибающими, пропорциональный току 13,6 ка, устанавливает масштаб для кривых тока. Соответствующая этому масштабу шкала для тока нанесена по оси ординат осциллограммы.

После измерения отрезков, представляющих периодическую слагающую тока для различных моментов времени, и пересчета их по установленному масштабу в относительные единицы можно построить отдельную кривую изменения во времени периодической слагающей тока. Чтобы точнее выявить величины постоянных времени T'_a и T''_a и начальные значения токов $I'_{св}|_0$ и $I''_{св}|_0$, построим кривую изменения свободной периодической слагающей тока (т. е. за вычетом установившегося тока $I_{=0,77}$) в системе координат, где по оси ординат принят логарифмический масштаб. Такое построение приведено на рис. 4-25, в. После исчезновения свободного сверхпереходного тока (примерно через 0,4 сек) кривая переходит в чистую экспоненту, которая в такой системе координат выражается прямой. Продолжение последней до пересечения с осью ординат дает начальное значение свободного переходного тока

$$I'_{св}|_0 = 3,08.$$

Начальное значение суммарного свободного периодического тока при этом получается равным:

$$I'_{св}|_0 + I'_{св}|_0 = 4,45,$$

откуда начальное значение свободного сверхпереходного тока будет:

$$I''_{св}|_0 = 4,45 - 3,08 = 1,37.$$

Поскольку до короткого замыкания генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением, его начальные в. д. с.

$$E''_q = E'_q = E_q = U_M = 1$$

¹ При этом отрезок MN , измеряемый по крайним точкам осциллограммы, должен быть уменьшен на толщину световой линии.

и относительные реактивности в продольной оси будут:

$$x''_d = \frac{1}{4,45 + 0,77} = 0,192$$

$$x'_d = \frac{1}{3,08 + 0,77} = 0,26.$$

Как видно из рис. 4-25, в, постоянные времена получаются:

$$T'_a = 0,94 \text{ сек} \text{ и } T''_a = 0,135 \text{ сек.}$$

Из выражения для продольной переходной реактивности $x'_d =$

$$x'_d = \frac{x''_{ad}}{x_f} \text{ найдем полную реактивность обмотки возбуждения}^2$$

$$x_f = \frac{x''_{ad}}{x_d - x'_d} = \frac{1,18^2}{1,3 - 0,26} = 1,34.$$

Для определения реактивности рассеяния продольного демпферного контура используем выражение

$$x_{1d0} = \frac{(x'_d - x_q)(x''_d - x_q)}{(x'_d - x_q) - (x''_d - x_q)} = \frac{(0,26 - 0,12)(0,192 - 0,12)}{(0,26 - 0,12) - (0,192 - 0,12)} = 0,14;$$

следовательно, полная реактивность этого контура будет:

$$x_{1d} = 0,14 + 1,18 = 1,32.$$

Для нахождения постоянных времени обмотки возбуждения и свободного демпферного контура воспользуемся данными опыта изменения тока и восстановления напряжения (рис. 4-25, б). С достаточной для практики точностью можно считать что

$$T'_{d0} = 5,4 \approx T'_{1d0} + T_{f0}$$

$$I'_{d0 \text{ ном}} = 1,9 \approx T'_{1d0} + T_{f0 \text{ ном}} = T'_{1d0} + \frac{1}{1 + 3,5},$$

откуда находим

$$T'_{1d0} = 4,5 \text{ сек} \text{ и } T_{f0} = 0,9 \text{ сек.}$$

Привнесенные к статору относительные величины активных сопротивлений обмотки возбуждения и продольного демпферного кон-

² Для машины с демпферными контурами использовать это выражение можно не совсем точно. Правда, получающаяся при этом ошибка очень мала (подробнее см. [Л1-12, стр. 397]).

тура будут:

$$r_f = \frac{x_f}{\omega T_{f0}} = \frac{1,34}{314 \cdot 4,5} = 0,00095;$$

$$r_{fd} = \frac{x_{fd}}{\omega T_{fd0}} = \frac{1,32}{314 \cdot 0,9} = 0,0047.$$

Отметим, что если бы не было данных из опытов гашения поля и восстановления напряжения, то, приняв приближенно

$$T'_d = 0,94 \approx \sigma T'_f \quad \text{и} \quad T''_d = 0,135 \approx \sigma T'_{fd},$$

где σ — суммарный коэффициент рассеяния ротора при замкнутом накоротко статоре, который в данном случае составляет 0,83, мы получили бы следующие значения постоянных времени:

$$T_{f0} = 4,7 \text{ сек (вместо } 4,5 \text{ сек);}$$

$$T_{fd0} = 0,88 \text{ сек (вместо } 0,9 \text{ сек).}$$

Задача 4-32

Синхронный двигатель 1, у которого $x_d = 0,7$; $x'_d = 0,22$; $T_{f0} = 3$ сек, связан с источником питания через реактивность $x = 0,3$, величина которой выражена в относительных единицах при номинальных условиях двигателя.

Предполагается, что двигатель работал на холостом ходу, затем был отключен от его обмотки возбуждения замкнута накоротко. Пока скорость вращения двигателя оставалась практически еще синхронной, не возбужденный (с замкнутой обмоткой возбуждения) двигатель снова был включен в сеть, причем в тот момент, когда возникающий в двигателе магнитный поток был направлен по продольной оси его ротора.

Для электромагнитного переходного процесса, возникающего при таком включении двигателя, требуется определить закономерности изменения по времени периодической слагающей тока в напряжении источника и у двигателя, считая, что в качестве источника используется:

а) система безостановочной мощности с неизменным напряжением, равным номинальному напряжению двигателя;

б) генератор, у которого $x_d = 1,4$; $x'_d = 1,3$; $x''_d = 0,2$; $T_{f0} = 7$ сек; его номинальная мощность в 4 раза больше номинальной мощности двигателя, а их номинальные напряжения одинаковы; в предельно возможном режиме работает на холостом ходу с номинальным напряжением при отключенном АРВ;

в) То же, что в п. «б», но при включенном АРВ, при этом $I_{f0} = 2$ и $T_e = 0,5$ сек².

Решение. Все величины в дальнейшем выражаем в относительных единицах при номинальных условиях двигателя.

¹ Синхронный двигатель с демиферными (пусковыми) обмотками рассмотрен в задаче 4-34.

² Мелкая величина I_{f0} при относительно большой величине T_e принята, чтобы увеличить время наступления нормального напряжения.

Рассмотрим поочередно каждое из заданных условий питания. а) При питании от системы изменение периодической слагающей тока, очевидно, будет происходить от начального значения

$$I' = \frac{1}{0,22 + 0,3} = 1,92$$

до установившегося значения

$$I = \frac{1}{0,7 + 0,3} = 1$$

по экспоненте с постоянной времени

$$T'_d = 3 \cdot \frac{0,22 + 0,3}{0,7 + 0,3} = 1,56 \text{ сек,}$$

т. е.

$$I_d = (1,92 - 1)e^{-t/1,56} + 1 = 0,92e^{-t/1,56} + 1.$$

Напряжение у двигателя найдем как разность:

$$U'_{fd} = U_c - I_d x = 1 - (0,92e^{-t/1,56} + 1)0,3 = 0,7 - 0,276e^{-t/1,56}.$$

Полученные зависимости представлены на рис. 4-26,а соответствующими кривыми (сплошные линии). Как видно, по мере затухания свободного тока напряжение у двигателя возрастает.

б) Когда источником питания является генератор, задача приобретает более сложный характер. По существу она сводится к решению задачи на взаимное последовательное соединение двух операционных реактивностей, в цепи которых приложена неизменная в д. с. поскольку в данном случае предполагается, что генератор работает на холостом ходу и его АРВ отключено.

Операторная реактивность синхронного двигателя будет:

$$x_d(s) = \frac{x_d + x'_d T_{f0} p}{1 + T_{f0} p} = \frac{0,7 + 0,22 \cdot 3p}{1 + 3p} = \frac{0,7 + 0,66p}{1 + 3p};$$

аналогично реактивность до генератора, получим:

$$x_a(p) = \frac{0,77 + 0,66p}{1 + 3p} + 0,3 = \frac{1 + 1,56p}{1 + 3p}.$$

Операторная реактивность генератора, отнесенная к базисным условиям, будет:

$$x'_d(p) = \frac{x_d + x'_d T_{f0} p}{1 + T_{f0} p} \frac{S_c}{S_{н.с}} = \frac{1,4 + 0,2 \cdot 7p}{1 + 7p} \cdot \frac{1}{4} = \frac{0,35(1 + p)}{1 + 7p}$$

Синтегорная в. д. с. генератора

$$E'_s(p) = \frac{1}{p}.$$

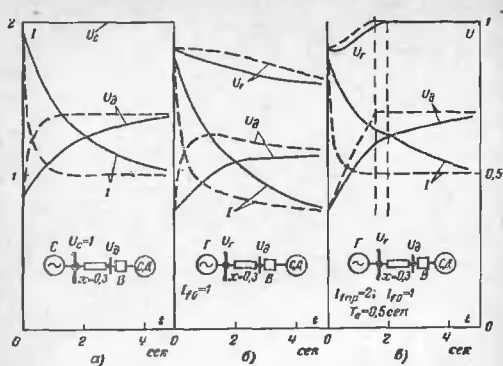


Рис. 4-26. К задачам 4-32 и 4-33. Кривые изменения тока и напряжений во времени при включении разрятого невозбужденного синхронного двигателя к источнику, которым является:

а — система бесконечной мощности; б — генератор без АРВ; в — генератор с АРВ. (Сплошные линии — при замкряемой обмотке возбуждения двигателя, пунктирные линии — при разомкнутой обмотке возбуждения двигателя через разрядное сопротивление $r=5r_f$).

Суммарная операторная реактивность всей цепи составляет:

$$x_{\text{дз}}(p) = \frac{1 + 1,56p}{1 + 3p} + \frac{0,35(1 + p)}{1 + 7p} = \frac{12p^2 + 10p + 1,35}{(1 + 3p)(1 + 7p)}$$

Для тока в операторной форме имеем:

$$I(p) = \frac{E'_s(p)}{x_{\text{дз}}(p)} = \frac{1(1 + 3p)(1 + 7p)}{p(12p^2 + 10p + 1,35)} = \frac{0,74(1 + 3p)(1 + 7p)}{p(8,9p^2 + 7,4p + 1)}$$

Корни характеристического уравнения

$$p(8,9p^2 + 7,4p + 1) = 0$$

получаются следующими: $p_1 = -0,17$; $p_2 = -0,66$ и $p_3 = 0$.

Для перехода от изображения и оригиналу (временной функции) найдем вначале производную

$$\frac{d}{dp}(8,9p^2 + 7,4p + 1) = 17,8p + 7,4,$$

и далее по формуле разложения (при нулевом корне и отсутствии других корней) имеем:

$$I_t = 0,74 \left[\frac{1 + \frac{(1 - 3 \cdot 0,17)(1 - 7 \cdot 0,17)}{(-0,17)(-17,8 - 0,17 + 7,4)} e^{-0,17t} + \frac{(1 - 3 \cdot 0,66)(1 - 7 \cdot 0,66)}{(-0,66)(-17,8 - 0,66 + 7,4)} e^{-0,66t} \right] = 0,74 + 0,09e^{-0,17t} + 0,91e^{-0,66t}$$

Для напряжения генератора в операторной форме имеем:

$$U_r(p) = I(p) x_d(p) = \frac{0,74(1 + 3p)(1 + 7p)}{p(8,9p^2 + 7,4p + 1)} \frac{(1 + 1,56p)}{(1 + 3p)} = \frac{0,74(1 + 7p)(1 + 1,56p)}{p(8,9p^2 + 7,4p + 1)}$$

и после перехода к оригиналу

$$U_{rt} = 0,74 + 0,14e^{-0,17t} + 0,03e^{-0,66t}$$

Эта U_{rt} и I_t легко получить напряжением у двигателя как разность:

$$U_{\Delta t} = U_{rt} - I_t x = U_{rt} - I_t 0,3,$$

которая после подстановки числовых значений дает:

$$U_{\Delta t} = 0,52 + 0,11e^{-0,17t} - 0,15e^{-0,66t}$$

Полученные закономерности представлены на рис. 4-26,б соответствующими кривыми (сплошные линии). При отсутствии АРВ напряжение генератора с течением времени падает. Соответствующему напряжению у двигателя меньше и подъем его происходит медленнее, чем при питании от источника бесконечной мощности (рис. 4-26,а).

в) Для генератора без насыщения (как это принято в числе обычных допущений) действие АРВ можно учесть, налагая на найденные выше закономерности дополнительные приращения соответствующих величин, обусловленные увеличением приращенного тока возбуждения генератора. Эти приращения токов и напряжений статора и ротора генератора, выраженные в операторной форме, связаны между собой уравнениями:

$$x_{\text{ад}} \Delta \dot{I}_f(p) = [x_d + x_d(p)] \Delta I(p); \quad (1)$$

$$\Delta \dot{U}_f(p) = r_f \Delta \dot{I}_f(p) + [x_f \Delta \dot{I}_f(p) + x_{\text{ад}} \Delta I(p)] p, \quad (2)$$

где все величины цепи ротора являются приведенными к статору а на выходящие направление токов в статоре и роторе принято направление в сторону генератора.

Из (1) имеем:

$$\Delta \dot{I}_1(p) = \frac{x_a + x_d(p)}{x_{ad}} \Delta I(p). \quad (3)$$

Подставив (3) в (2) и произведя ряд преобразований, получим операторное выражение для приращения тока статора

$$\Delta I(p) = - \frac{\Delta \dot{I}_1(p) x_{ad}}{r_1 [x_a + x_d(p) + T_{j0} (x_a + x_d(p))]},$$

где $x_d(p)$ — операторная реактивность внешней цепи статора генератора, а все остальные величины являются параметрами самого генератора.

При подъеме напряжения на кольцах фотора по экспоненте

$$\Delta U_{f0t} = \Delta U_{f0p} (1 - e^{-t/T_f});$$

эта зависимость в области изображений будет:

$$\Delta U_{f0t} \doteq \Delta U_f(p) = \frac{\Delta U_{f0p}}{p(1+T_f p)} = \frac{\Delta U_{f0p}}{p(1+0,5p)}.$$

Имея в виду, что $\frac{\Delta \dot{U}_{f0p} x_{ad}}{r_1} = \Delta \dot{I}_{f0p} x_{ad} = \Delta E_{q0p}$ и в нашем случае $\Delta E_{q0p} = 2 - 1 = 1$, выражение (4) после подстановки числовых значений и ряда преобразований, приобретает следующий вид:

$$\Delta I(p) = \frac{0,74(1+3p)}{p(1+0,5p)(8,9p^2+7,4p+1)}.$$

Сопоставив это выражение с выражением для тока $I(p)$, которое было получено в решении п. «б», замечаем, что характеристическое уравнение увеличилось на дополнительный множитель $(1+0,5p)$, т. е. оно содержит четвертый корень $p_4 = -\frac{1}{0,5} = -2$, а в числителе отсутствует множитель $(1+7p)$. Что касается совпадения постоянных коэффициентов (0,74), то это является лишь случайностью, поскольку предельная величина приращения тока возбуждения в данном случае равна предшествовавшему току возбуждения генератора.

Определив производящую

$$\begin{aligned} \frac{d}{dp} [(1+0,5p)(8,9p^2+7,4p+1)] = \\ = 0,5(8,9p^2+7,4p+1) + (1+0,5p)(17,8p+7,4) \end{aligned}$$

и зная корни характеристического уравнения

$$p_1 = -0,17, \quad p_2 = -0,66, \quad p_3 = 0, \quad p_4 = -2,$$

в формуле разложения находим временную зависимость приращения тока статора

$$\begin{aligned} \Delta I_t = 0,74 \left(1 + \frac{(1-3 \cdot 0,17)e^{-0,17t}}{(1-0,5 \cdot 0,17)(-17,8 \cdot 0,17+7,4)(-0,17)} + \right. \\ \left. + \frac{(1-3 \cdot 0,66)e^{-0,66t}}{(-0,66)(1-0,5 \cdot 0,66)(-17,8 \cdot 0,66+7,4)} + \right. \\ \left. + \frac{(1-3 \cdot 2)e^{-2t}}{(-2)0,5(8,9 \cdot 2^2-7,4 \cdot 2+1)} \right) = \\ = 0,74(1 - 0,71e^{-0,17t} - 0,52e^{-0,66t} + 0,23e^{-2t}). \end{aligned}$$

Чтобы получить выражение для полной величины периодической составляющей тока статора, нужно к выражению, приведенному в п. «б», прибавить полученное выражение для приращения этого тока. Такое суммирование приводит к выражению

$$I_t = 1,48 - 0,44e^{-0,17t} + 0,53e^{-0,66t} + 0,17e^{-2t},$$

которое справедливо до тех пор, пока напряжение генератора не достигнет нормального значения (см. ниже).

Приращение напряжений генератора и у двигателя находятся аналогично тому, как были найдены эти напряжения в п. «б». После прибавления этих приращений к соответствующим напряжениям получаются следующие выражения:

$$U_{g1t} = 1,48 - 0,66e^{-0,17t} + 0,02e^{-0,66t} + 0,07e^{-2t};$$

$$U_{d1t} = 1,04 - 0,53e^{-0,17t} - 0,15e^{-0,66t} + 0,02e^{-2t}.$$

Эти выражения (как и для тока) справедливы до наступления у генератора нормального напряжения, так как после наступления этого режима генератор уже можно рассматривать практически как источник бесконечной мощности.

Поскольку два последних слагаемых в выражении для U_{g1t} относительно малы, с достаточной для практики точностью момент наступления нормального напряжения можно оценить из упрощенного выражения

$$U_{g1t} = 1 \approx 1,48 - 0,66e^{-0,17t},$$

откуда $t \approx 2$ сек.

Следовательно, для $t > 2$ сек напряжение генератора сохраняется на нормальном уровне и дальнейшие изменения тока и напряжения у двигателя можно считать такими же, как было найдено выше в решении п. «а».

Полученные для рассматриваемых условий зависимости предельных на рис. 4-26 в соответствующих кривых (сплошные линии). При $t = 2$ сек все кривые претерпевают переход, так как в этот момент генератор переходит на режим подъема возбуждения в режиме нормального напряжения.

Напряжение генератора после едва заметного снижения начинает довольно быстро возрастать. Соответственно этому напряжение у двигателя также возрастает быстрее, чем при отсутствии АРВ у генератора.

Задача 4-32

В условия предыдущей задачи внесено единственное изменение, а именно: обмотка возбуждения синхронного двигателя замкнута не в коротко, а через активное сопротивление, величина которого в 5 раз больше активного сопротивления самой обмотки возбуждения.

Получающиеся при этом кривые изменения тока и напряжений генератора и у двигателя при тех же условиях включения последнего показаны на рис. 4-26 кривыми, проведенными пунктиром.

Требуется вывести выражения, по которым построены данные кривые, и дать пояснения, чем физически обусловлено отклонение этих кривых от аналогичных кривых, полученных в решении задачи 4-32.

Задача 4-34

У синхронного двигателя с параметрами $x_{ad}=0,7$, $x_{ad}'=0,6$, $x_{ad}''=0,22$, $T_{f0}=3$ сек, как это принято в условии задачи 4-32, дополнительно создана продольная демпферная обмотка с полной относительной реактивностью $x_{fd}=0,68$ и постоянной времени $T_{fd0}=0,1$ сек.

Аналогично условию задачи 4-32 предполагается, что двигатель работает на холостом ходу, затем был отключен и его обмотка возбуждения замкнута через разрядное сопротивление $r=B_r$. Пока скорость вращения двигателя оставалась практически еще синхронной, нев возбужденный двигатель (с замкнутой на разрядное сопротивление обмоткой возбуждения) снова был включен в сеть в момент, когда возникающий в двигателе магнитный поток был направлен по продольной оси его ротора.

Требуется определить закономерности изменения во времени периодической составляющей тока и напряжений источника и у двигателя при указанном включении последнего, когда в качестве источника служат:

- система бесконечной мощности;
- генератор без АРВ;
- генератор с АРВ.

Подробная характеристика этих источников приведена в условии задачи 4-32.

Решение. Выражение для продольной операторной реактивности синхронной машины с продольной демпферной обмоткой имеет следующий вид:

$$x_d(p) = x_d \frac{\sigma_0 T_{fd}' T_{fd} p^2 + (T_{f0}' + T_{fd}') p + 1}{\sigma_0 T_{fd} T_{fd} p^2 + (T_{f0} + T_{fd}) p + 1},$$

где σ_0 , T_{f0} , T_{fd} — общий коэффициент рассеяния и постоянные времени при разомкнутом статоре;

σ_0' , T_{f0}' , T_{fd}' — то же при замкнутом статоре.

Произведем подсчет всех необходимых величин, используя заданные параметры двигателя.

Полная реактивность обмотки возбуждения

$$x_f = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x_{ad}'} = \frac{0,6^2}{0,7 - 0,22} = 0,75,$$

и ее реактивность рассеяния $x_{cf} = 0,75 - 0,6 = 0,15$.

Коль скоро обмотка возбуждения замкнута через разрядное сопротивление, ее постоянная времени при разомкнутом статоре будет

$$T_{f0\text{зам}} = 3 \cdot \frac{1}{1+5} = 0,5 \text{ сек.}$$

Следовательно, при разомкнутом статоре имеем

$$\sigma_0 = 1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f x_{fd}} = 1 - \frac{0,6^2}{0,75 \cdot 0,68} = 0,255;$$

$$T_{f0\text{зам}} = 0,5 \text{ сек и } T_{fd0} = 0,1 \text{ сек.}$$

Внешнюю реактивность $x = 0,3$ включим в реактивность рассеяния статора, т. е.

$$x_0 + x = (0,7 - 0,6) + 0,3 = 0,4.$$

Тогда реактивности при замкнутом статоре будут:

$$x_{ad}' = 0,4 / 0,6 = 0,24;$$

$$x_f' = 0,15 + 0,24 = 0,39 \text{ и } x_{fd}' = (0,68 - 0,6) + 0,24 = 0,32.$$

При замкнутом статоре имеем:

$$\sigma' = 1 - \frac{0,24^2}{0,39 \cdot 0,32} = 0,54;$$

$$T_{f0\text{зам}}' = 0,5 \cdot \frac{0,39}{0,75} = 0,26 \text{ сек и } T_{fd}' = 0,1 \cdot \frac{0,32}{0,68} = 0,047 \text{ сек.}$$

Таким образом, операторная реактивность двигателя до генератора (или системы) будет:

$$x_d(p) = (0,7 + 0,3) \frac{0,54 \cdot 0,26 \cdot 0,047 p^2 + (0,26 + 0,047) p + 1}{0,295 \cdot 0,5 \cdot 0,1 p^2 + (0,5 + 0,1) p + 1} = \frac{0,66 \cdot 10^{-2} p^2 + 0,31 p + 1}{1,47 \cdot 10^{-2} + 0,6 p + 1}.$$

а) При включении на неизменное напряжение ток в операторной функции будет:

$$I(p) = \frac{U(p)}{x_d(p)} = \frac{1(1,47 \cdot 10^{-2} p^2 + 0,6 p + 1)}{p(0,66 \cdot 10^{-2} p^2 + 0,31 p + 1)}.$$

Корни характеристического уравнения

$$p(0,66 \cdot 10^{-2} p^2 + 0,31 p + 1) = 0$$

имеют следующие значения:

$$p_1 = -3,48, \quad p_2 = -43,5 \text{ и } p_3 = 0.$$

После перехода к оригиналу получим для тока

$$I_t = 1 + 1e^{-2,48t} + 0,24e^{-4,5t}$$

и для напряжения у двигателя

$$U_{dt} = U_c - I_t \cdot 0,3 = 0,7 - 0,3e^{-2,48t} - 0,07e^{-4,5t}$$

Построенные по этим выражениям кривые приведены на рис. 4-27а.

б) Когда источником служит генератор, суммарная операторная реактивность будет:

$$\begin{aligned} x_{dt}(p) &= x_{dr}(p) + x_d(p) = \frac{0,35(1+p)}{1+7p} + \\ &+ \frac{0,66 \cdot 10^{-2} p^2 + 0,31p + 1}{1,47 \cdot 10^{-2} p^2 + 0,6p + 1} = \\ &= \frac{1,35(3,81 \cdot 10^{-2} p^2 + 2,15p^2 + 5,83p + 1)}{(1+7p)(1,47 \cdot 10^{-2} p^2 + 0,6p + 1)} \end{aligned}$$

При предшествовавшем режиме холостого хода в отсутствии у генератора АРВ переходная операторная в. д. с.

$$E'_d(p) = \frac{1}{p}$$

Следовательно, ток в операторной форме будет:

$$I(p) = \frac{0,74(1+7p)(1,47 \cdot 10^{-2} p^2 + 0,6p + 1)}{p(3,81 \cdot 10^{-2} p^2 + 2,15p^2 + 5,83p + 1)}$$

Поскольку в характеристическом уравнении

$$p(3,81 \cdot 10^{-2} p^2 + 2,15p^2 + 5,83p + 1) = 0$$

коэффициент при p^3 очень мал, то с достаточной для практики точностью два корня можно выявить из уравнения

$$2,15p^2 + 5,83p + 1 = 0,$$

откуда $p_1 = -0,185$ и $p_2 = -2,53$, а третий — из свойства корней кубического уравнения, т. е.

$$p_3 = \frac{2,15}{3,81 \cdot 10^{-2}} - (-0,185 - 2,53) = -53,5.$$

Читатель может убедиться, что эти значения корней вполне удовлетворительно отвечают исходному кубическому уравнению.

Помимо указанных корней, как видно, имеется еще корень $p_4 = 0$. Применяемые формулы разложения приводят к следующей зависимости тока от времени:

$$I_t = 0,74 + 0,21e^{-0,185t} + 0,48e^{-2,53t} + 0,57e^{-53,5t}$$

Операторное выражение для напряжения генератора будет:

$$U_r(p) = I(p) x_d(p) = \frac{0,74(1+7p)(0,66 \cdot 10^{-2} p^2 + 0,31p + 1)}{p(3,81 \cdot 10^{-2} p^2 + 2,15p^2 + 5,83p + 1)},$$

переход от которого к оригиналу дает:

$$U_{rt} = 0,74 + 0,22e^{-0,185t} - 0,29e^{-2,53t} + 0,23e^{-53,5t}$$

Как и раньше, для напряжения у двигателя имеем:

$$U_{dt} = U_{rt} - I_t \cdot 0,3 = 0,52 + 0,16e^{-0,185t} - 0,43e^{-2,53t} + 0,06e^{-53,5t}$$

На рис. 4-27б показаны кривые, которые построены по найденным закономерностям.

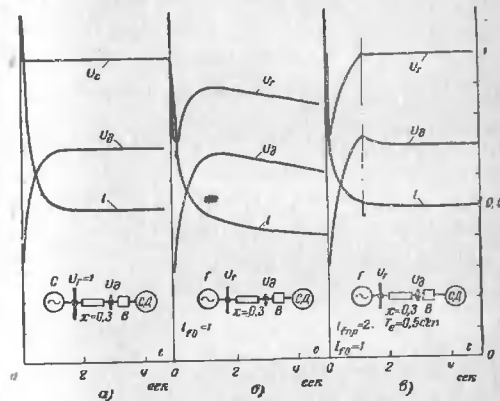


Рис. 4-27. К задаче 4-34. Кривые изменения тока и напряжений во времени при включении разветвленного невозбужденного синхронного двигателя в источник, которым является:

а — система бесконечной мощности; б — генератор без АРВ; в — генератор с АРВ. (Двигатель с демпферной обмоткой и его обмотка возбуждения замыкается на $r=5r_f$).

в) Полученное в решении п. «в» задачи 4-32 выражение (4) для напряжения тока статора в операторной форме справедливо и в данном случае. Под $x_d(p)$ в нем теперь следует понимать операторную реактивность двигателя (включая $x=0,3$) с учетом демпферных обмоток. Однако делать весь подсчет для получения опер-

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В СИСТЕМЕ
С НЕСКОЛЬКИМИ ИСТОЧНИКАМИ

второго выражения для $\Delta I(p)$ нет необходимости, так как гораздо проще воспользоваться уже установленной аналогией в структуре выражений для $I(p)$ и $\Delta I(p)$ при отсутствии демпферных обмоток. В соответствии с этим можно сразу написать:

$$\Delta I(p) = \frac{0,74(1,47 - 10^{-2}p^2 + 0,6p + 1)}{p(1 + 0,5p)(3,81 \cdot 10^{-2}p^2 + 2,15p^2 + 5,83p + 1)}$$

Характеристическое уравнение, как видно, имеет еще дополнительный пятый корень $p_5 = -2$.

Переход к оригиналу по формуле разложения дает:

$$\Delta I_t = 0,74 - 0,80e^{-0,185t} + 0,104e^{-2,32t} - 0,044e^{-2t}$$

Слагаемое с декрементом затухания $-63,5$ настолько мало, что в этом выражении оно отброшено.

Прибавив это приращение к току без АРВ, получим:

$$I_t = 1,48 - 0,59e^{-0,185t} + 0,584e^{-2,32t} + 0,57e^{-0,5t} - 0,044e^{-2t}$$

Операторное выражение для приращения напряжения генератора имеет вид:

$$\Delta U_{гс}(p) = \frac{0,74(0,66 \cdot 10^{-2}p^2 + 0,31p + 1)}{p(1 + 0,5p)(3,81 \cdot 10^{-2}p^2 + 2,15p^2 + 5,83p + 1)}$$

и соответственно как временная функция

$$\Delta U_{гс} = 0,74 - 0,81e^{-0,185t} - 0,06e^{-2,32t} + 0,13e^{-2t}$$

Для полного напряжения генератора имеем:

$$U_{гс} = 1,48 - 0,59e^{-0,185t} - 0,35e^{-2,32t} + 0,23e^{-0,5t} + 0,13e^{-2t}$$

и для напряжения у двигателя

$$U_{дс} = 1,04 - 0,4e^{-0,185t} - 0,54e^{-2,32t} + 0,06e^{-0,5t} + 0,14e^{-2t}$$

Полученные здесь выражения для I_t , $U_{гс}$ и $U_{дс}$ справедливы до наступления у генератора нормального напряжения. Как видно из построенных кривых (рис. 4-27, в), такой режим генератора наступает примерно через 1,2 сек, после чего генератор можно рассматривать как источник бесконечной мощности и продолжение кривых будет такое же, как на рис. 4-27, а.

Интересно отметить, что при наличии демпферных обмоток у двигателя напряжение генератора в начальной стадии рассматриваемого переходного процесса резко снижается до некоторого минимума (рис. 4-27, б и в) и затем достаточно быстро возрастает. При этом, если нет АРВ, оно приблизительно через 1,3 сек достигает максимума и затем снова снижается, стремясь к своему установившемуся значению (0,74).

Наряду с использованием известных практических методов расчета коротких замыканий, как-то: метод расчетных кривых, метод для проверки и выбора быстродействующих выключателей, метод спрямленных характеристик, в настоящей главе уделено значительное внимание вопросу учета качаний машин при переходном процессе и выявлению взаимного влияния машин на протекание этого процесса.

Нужно особо подчеркнуть, что обычно принимаемое в практических расчетах коротких замыканий допущение о совпадении по фазе э. д. с. источников питания позволяет оценить наибольшее возможное значение тока в аварийной ветви или непосредственно в месте повреждения, что необходимо при выборе аппаратов или проводников по условиям их работы при коротких замыканиях. Что же касается токов в ветвях, связывающих отдельные источники, то такое допущение, напротив, дает невозможное наименьшее их значение (при рассматриваемом нагрузочном режиме). Поэтому достаточно правильная оценка величин токов в таких ветвях при аварийных условиях требует хотя бы приближенного учета возникающих качаний машин. С этой целью могут быть использованы типовые кривые изменения угла δ' от расчетного времени τ , которые для разных начальных условий приведены на рис. П-10 приложения П-4. Применение этих кривых показано в решениях задач 5-10 и 5-15. В последней из них приведено также более строгое решение с численным интегрированием дифференциального уравнения, которым описывается данный переходный процесс. Интересно отметить, что затухание свободного переходного тока, форсировка возбуждения и возникновение в роторе токов скольжения в совокупности приводят к тому, что переходная э. д. с. остается почти постоянной и равной своему первоначальному значению. Это обстоятельство существенно упрощает выполнение расчетов с учетом качаний.

Взаимное электромагнитное влияние машин (задачи 5-19—5-23) как при отсутствии, так и при наличии автоматического регулирования возбуждения (АРВ) рас-

смотрено на простейшей схеме с двумя генераторами без демпферных обмоток. Отказ от учета последних обусловлен лишь необходимостью упростить решение (снизить порядок характеристического уравнения). Однако и при таком ограничении читатель может получить достаточно ясное представление, в чем сказывается это взаимное влияние. Нужно обратить внимание на физический смысл перехода к приближенной лучевой схеме, который вскрыт в решении задачи 5-20.

Типичный практический случай, когда при переходном процессе короткого замыкания генератор остается связанным с источником бесконечной мощности, рассмотрен в задаче 5-23.

Задача 5-1

При переходном процессе свободный ток на некотором участке схемы определяется суммой двух экспонент

$$I_{св} = 0,25e^{-t/T} + 0,75e^{-t/T_3}$$

Заменить эту сложную кривую одной экспонентой, исходя из условия эквивалентности количества электричества на данном участке схемы за полную продолжительность переходного процесса¹. При этом требуется оценить изменение во времени относительной погрешности в величине свободного тока, определяемого после указанной замены.

Решение. Поставленное условие эквивалентности требует соблюдения следующего равенства:

$$\int_0^{\infty} (0,25e^{-t/T} + 0,75e^{-t/T_3}) dt = \int_0^{\infty} (0,25 + 0,75) e^{-t/T_0} dt,$$

которое после интегрирования приводит к определению эквивалентной постоянной времени T_0 заменяющей экспоненты

$$0,25T + 0,75 \frac{T}{3} = (0,25 + 0,75) T_0,$$

откуда

$$T_0 = \frac{T}{2}.$$

Для соблюдения поставленного условия эквивалентности заменяющая экспонента непременно должна пересекать истинную кривую. Момент, когда наступает это пересечение, найдем из уравнения

¹ При сохранении того же начального значения свободного тока.

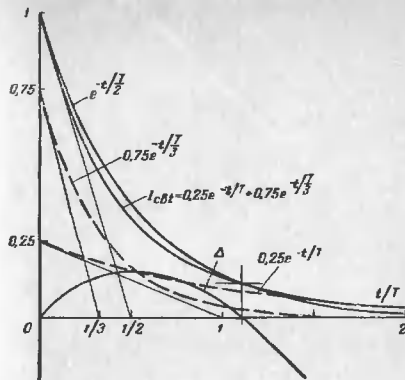


Рис. 5-1. К задаче 5-1. Кривые изменения свободного тока.

$$0,25e^{-t/T} + 0,75e^{-3t/T} = e^{-2t/T},$$

или после сокращения на $e^{-t/T} = x$

$$0,75x^3 - x + 0,25 = 0,$$

или

$$x_{1,2} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4 \cdot 0,75 \cdot 0,25}}{2 \cdot 0,75} = \frac{1 \pm 0,5}{1,5},$$

т. е.

$$x_1 = e^{-t/T} = 1 \text{ или } t/T = 0;$$

$$x_2 = e^{-t/T} = 1/3 \text{ или } t/T = \ln 3 = 1,1.$$

Относительная погрешность в токе будет:

$$\Delta = \frac{e^{-2t/T}}{0,25e^{-t/T} + 0,75e^{-3t/T}} - 1 = \frac{4e^{-t/T}}{1 + 3e^{-2t/T}} - 1.$$

В пределах до $t/T = 1,1$ относительная погрешность $\Delta = 0$. Ее максимум наступает при t/T , определяемом из равенства

$$\frac{d\Delta}{dt} = 0 \text{ или } e^{-2t/T} = \frac{1}{3},$$

откуда

$$t/T = \frac{\ln 3}{2} = 0,55,$$

и составляет $\Delta_{\text{МДЮ}} = 0,15$.

При $t/T > 1,1$ относительная погрешность $\Delta < 0$. С ростом t/T она увеличивается, в пределе стремясь к $\Delta = -1$. Хотя в этом диапазоне относительная погрешность в определении свободного тока может достигать больших значений, не следует забывать, что сама величина свободного тока при этом становится все меньше и ею практически можно вообще пренебречь.

Кривые на рис. 5-1 иллюстрируют результаты выполненного решения. За аргумент здесь принято отношение t/T .

Задача 5-2

На понижающей подстанции установлено два одинаковых трансформатора, каждый 40 *Мва*, 115/6,3 *кв*, $u_n = 10,5\%$. Питание подстанции осуществляется от тепловой станции мощностью 250 *Мва*.

Известно, что при раздельной работе трансформаторов на стороне 6,3 *кв* наибольшая величина периодической слагающей тока при трехфазном коротком замыкании за трансформатором составляет 29 *кА*.

Требуется определить наибольшую и наименьшую величины периодической слагающей тока при трехфазном коротком замыкании в той же точке, когда оба трансформатора на стороне 6,3 *кв* соединены параллельно.

Решение. Используем для решения метод расчетных кривых. Номинальный ток генераторов станции, приведенный к стороне 6,3 *кв*, составляет:

$$i_{\text{нз}} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 22,8 \text{ кА.}$$

Выразим задавший ток в относительных единицах от $i_{\text{нз}}$

$$I = \frac{29}{22,8} = 1,27.$$

По условию этот ток (периодическая слагающая) во времени является наибольшим. Следовательно, обращаясь к кривым на рис. П-7, находим, что он имеет место при $t = \infty$ и $x_{\text{расч}} = 0,87$.

Относительная реактивность трансформатора, приведенная к мощности станции, составляет:

$$x_{\text{т}} = 0,105 \cdot \frac{250}{40} = 0,66.$$

Эквивалентную реактивность станции определяем как разность:

$$x = 0,87 - 0,66 = 0,21.$$

При параллельной работе трансформаторов на стороне 6,3 *кв* расчетная реактивность будет:

$$x_{\text{расч}} = 0,21 + \frac{0,66}{2} = 0,21 + 0,33 = 0,54.$$

По тем же кривым для $x_{\text{расч}} = 0,54$ находим относительные величины периодической слагающей тока короткого замыкания:

наибольшее значение — 1,83 (при $t = 0$);

наименьшее значение — 1,46 (при $t = 0,5$ сек).

Таким образом, искомые величины токов будут:

$$I = 1,83 \cdot 22,8 = 41,8 \text{ кА} \quad \text{и} \quad I = 1,46 \cdot 22,8 = 33,4 \text{ кА.}$$

Задача 5-3

При исходных данных предыдущей задачи требуется определить величину реактивности (отнесенную к номинальным параметрам трансформатора), через которую могут быть соединены на стороне 6,3 *кв* оба трансформатора.

Чтобы при трехфазном коротком замыкании за одним из трансформаторов наибольшая величина периодической слагающей тока не превышала 37,5 *кА*. При этом также найти наибольшую и наименьшую величины напряжения во этой реактивности (или на выводах 6,3 *кв* другого трансформатора).

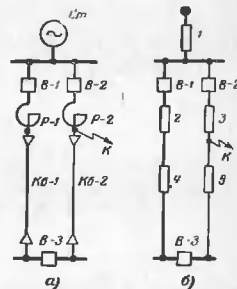


Рис. 5-2. К задачам 5-4 и 5-5. а — исходная схема; б — схема замещения.

Задача 5-4

Через 0,5 сек после возникновения трехфазного короткого замыкания в точке К схемы на рис. 5-2а произошло отключение выключателя В-2, а затем еще через 0,5 сек — выключателя В-3.

Требуется определить остаточное напряжение на шинах станции в момент, до и после отключения выключателя В-2, а также в момент, до и после отключения выключателя В-3. Исходные данные: тепловая станция Ст 46,5 *Мва*, 6,3 *кв* эквивалентная реактивность $x'' = 0,2$;

реакторы П-1 и П-2 одинаковые, каждый 6 *кв*, 500 *а*, $x = 5\%$; кабели К6-1 и К6-2 одинаковые, каждый 2 *км*, $x = 0,08 \text{ Ом/км}$.

Решение. Исходные данные позволяют провести решение только методом расчетных кривых. Примем за базисные условия номинальные данные станции, т. е. $S_{\text{б}} = 46,5 \text{ Мва}$, $U_{\text{б}} = 6,3 \text{ кв}$ и соответственно

$$I_{\text{б}} = \frac{46,5}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 4,26 \text{ кА.}$$

При этом реактивности элементов схемы замещения на рис. 5-2, б будут: $x_1 = 0,2$; $x_2 = x_3 = 0,05 \cdot \frac{4,26}{0,5} \cdot \frac{6}{6,3} = 0,406$; $x_4 = x_5 = 2 \cdot 0,06 \times \frac{46,5}{6,3^2} = 0,188$.

До отключения выключателей внешняя реактивность цепи при коротком в точке К составляет:

$$x_0 = 0,405 / (0,405 + 2 \cdot 0,188) = 0,266$$

и расчетная реактивность

$$x_{расч} = 0,2 + 0,266 = 0,466.$$

По кривым на рис. П-7 для $x_{расч} = 0,466$ и $t = 0,5$ сек находим $I = 1,65$. Следовательно, остаточное напряжение до отключения В-2 будет $U = 1,65 \cdot 0,266 = 0,44$.

В тот же момент, но после отключения В-2 ток в цепи найдем следующим образом. Сверхпереходная э. д. с. генераторов станции через 0,5 сек после возникновения короткого замыкания, очевидно, составляет:

$$E'' = 1,65 - 0,466 = 0,77.$$

Эта э. д. с. сохранится в начальный момент после отключения В-2, и, поскольку внешняя реактивность цепи теперь будет $x_0 = 0,405 + 2 \cdot 0,188 = 0,781$, ток в начальный момент после отключения В-2 будет:

$$I = \frac{0,77}{0,2 + 0,781} = 0,785$$

и остаточное напряжение $U = 0,785 \cdot 0,781 = 0,61$.

Отметим, что если бы исходить из расчетной реактивности

$$x_{расч} = 0,2 + 0,781 = 0,981,$$

то ток получился бы $I = 0,9$ и $U = 0,9 \cdot 0,781 = 0,71$, т. е. на 16,4% больше. Это объясняется тем, что при большей внешней реактивности затухание свободного тока происходит медленнее.

Ток через 0,5 сек после отключения В-2 приближенно найдем как

$$I = 0,94 \cdot \frac{0,785}{0,9} = 0,82,$$

где 0,94 — относительный ток по расчетным кривым на рис. П-7 для $x_{расч} = 0,981$ и $t = 1$ сек.

Остаточное напряжение к моменту отключения В-3 будет:

$$U = 0,82 \cdot 0,781 = 0,64,$$

и в начальный момент после отключения В-3

$$E'' = U = 0,82 \cdot 0,981 = 0,805$$

Задача 5-5

Провести решение предыдущей задачи при другом порядке действия выключателей, а именно:

через 0,5 сек после возникновения короткого замыкания происходит отключение выключателя В-3, затем спустя еще 1 сек отключается выключатель В-2.

Задача 5-6

При трехфазных коротких замыканиях поочередно в точках К-1 и К-2 схемы на рис. 5-3а определить величины токов через 0,5 сек. Генераторный выключатель В замкнут.

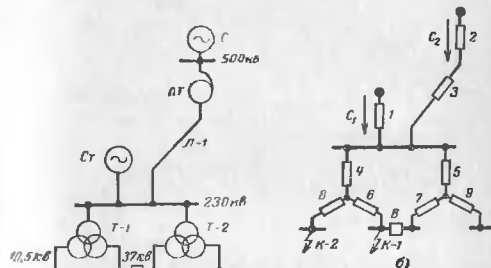


Рис. 5-3. К задачам 5-6 и 5-7. а — исходная схема; б — схема замещения.

Элементы схемы характеризуется следующими данными: система С — источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 500 кВ;

станция СТ — тепловая, 380 Мва, эквивалентная реактивность $x_{СТ} = 0,43$;

автотрансформатор АТ 160 Мва, 500/230 кВ, $u_{BC} = 9,3\%$;

линия Л-1 190 км, $x = 0,4$ см/км;

трансформаторы Т-1 и Т-2 одинаковые, каждый 60 Мва, $u_{BC} = 10,5$ кВ, $u_{BC} = 12,3\%$, $u_{BH} = 18,1\%$, $u_{CH} = 5,8\%$.

Решение. Примем $S_0 = 600$ Мва и $U_0 = U_{СТ}$. Реактивности элементов схемы замещения на рис. 5-3, б при базисных условиях будут:

$$x_1 = 0,43 \cdot \frac{600}{380} = 0,68; \quad x_2 = 0,093 \cdot \frac{600}{160} = 0,35;$$

$$x_3 = 0,4 \cdot 190 \cdot \frac{600}{230^2} = 0,56;$$

$$x_4 = x_5 = 0,5 (0,123 + 0,181 - 0,058) \cdot \frac{600}{60} = 1,23;$$

$$x_6 = x_7 = 0; \quad x_8 = x_9 = 0,58.$$

Эквивалентная реактивность схемы до шпн 230 кв подстанции 60-ставляет:

$$x_{10} = 0,68 // (0,35 + 0,86) = 0,435.$$

Регулирующая реактивность до точки К-1

$$x_{\Sigma} = 0,435 + \frac{1,23}{2} = 1,05.$$

Перейдем к лучевой схеме с тем, чтобы выделить систему. Этот переход можно осуществить с помощью преобразования звезды в треугольник или используя коэффициенты распределения генерирующих ветвей. В данном случае целесообразно использовать коэффициенты распределения, так как и при коротком в К-2 их значения останутся теми же. Считая в месте короткого $C_n = 1$, найдем

$$C_{ст} = C_1 = \frac{0,435}{0,68} = 0,64 \text{ и } C_2 = C_2 = 1 - 0,64 = 0,36.$$

Реактивности ветвей лучевой схемы:

$$x_{ст,н} = \frac{1,05}{0,64} = 1,64 \text{ и } x_{г,н} = \frac{1,05}{0,36} = 2,92.$$

Расчетная реактивность станции

$$x_{расч} = 1,64 \cdot \frac{380}{600} = 1,04,$$

для которой по кривым на рис. П-7 при $t = 0,5 \text{ сек}$ находим:

$$I = 0,85.$$

Искомый ток при коротком в К-1 будет:

$$I_n = 0,85 \cdot \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 37} + \frac{1}{2,92} \cdot \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 37} = 8,25 \text{ кА.}$$

При коротком в К-2 результирующая реактивность составляет:

$$x_{\Sigma} = 1,05 + 0,58 = 1,63.$$

Реактивности ветвей лучевой схемы:

$$x_{ст,н} = \frac{1,63}{0,64} = 2,55 \text{ и } x_{г,н} = \frac{1,63}{0,36} = 4,53$$

Расчетная реактивность станции

$$x_{расч} = 2,55 \cdot \frac{380}{600} = 1,61.$$

для которой аналогично находим при $t = 0,5 \text{ сек}$ $I = 0,57$.

Следовательно, искомый ток при коротком в К-2 будет:

$$I_n = 0,57 \cdot \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 10,5} + \frac{1}{4,53} \cdot \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 19,2 \text{ кА.}$$

Задача 5-7

Оценить, на сколько (в процентах) уменьшатся величины токов в предыдущей задаче, если считать, что секционный выключатель В схемы на рис. 5-3,а отключен.

Задача 5-8

На рис. 5-4,а показана часть электрической системы, состоящая из двух электрических станций и сети 110 кв, которые через автотрансформатор связаны с остальной частью системы С, мощность которой практически можно считать бесконечно большой.

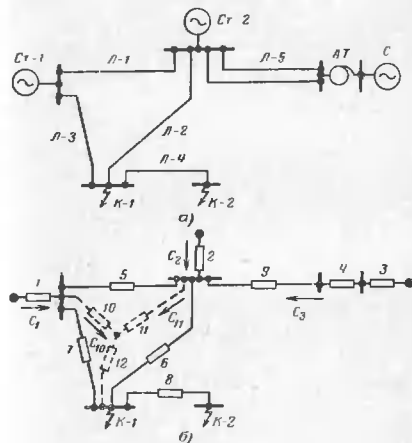


Рис. 5-4. К задаче 5-8.

а — исходная схема; б — схема замещения

Элементы схемы характеризуются следующими данными: система С — эквивалентная реактивность $x = 0$, неизменное напряжение $U = 330 \text{ кВ}$;

станция Ст-1 — гидростанция, 93 Мва, эквивалентная реактивность $x'' = 0,38$, генераторы без демпферных обмоток;
станция Ст-2 — тепловая, 225 Мва, эквивалентная реактивность $x'' = 0,45$;

автотрансформатор АТ 90 Мва, 330/115 кВ, $u_n = 11\%$;
линии: Л-1 70 км, Л-2 80 км, Л-3 40 км, Л-4 53 км, Л-5 120 км, $x = 0,4$ ом/км одной цепи.

Требуется определить значения мощностей короткого замыкания через 0,2 сек при трехфазных коротких замыканиях поочередно в точках К-1 и К-2.

Решение. Выбрав за базисные условия $S_0 = 1000$ Мва и $U_0 = U_{cp}$, нетрудно подсчитать в относительных единицах значения реактивностей схемы замещения (рис. 5-4,6). Они получаются следующими: $x_1 = 4,1$; $x_2 = 2$; $x_3 = 0$; $x_4 = 5,22$; $x_5 = 2,42$; $x_7 = 1,21$; $x_8 = 1,6$ и $x_9 = 1,82$.

Дальнейший план решения методом расчетов кривых состоит в том, что после преобразования треугольника с элементами 5, 6 и 7 в эквивалентную звезду 10, 11 и 12 и определения коэффициентов распределения C_1 , C_2 и C_3 должны быть найдены реактивности трех генерирующих ветвей до рассматриваемой точки короткого замыкания. Затем для каждой станции определяются расчетные реактивности, во которых под заданного момента времени по соответствующим расчетным кривым находят относительные величины тока. Ток от системы считается неизменным, и его величина ограничена полученной реактивностью для этой ветви.

Ток в месте короткого определяется как сумма токов генерирующих ветвей. При этом следует помнить, что при сложении относительных токов последние должны быть приведены к одной базе, а при суммировании токов в именованных единицах они должны быть приведены к той ступени напряжения, где находится точка короткого замыкания.

Выделение каждой станции в отдельную ветвь вызвано в данном случае лишь разным типом этих станций. При односторонности станций можно было бы их объединять в одну генерирующую ветвь, коэффициент распределения которой был бы $(C_1 + C_2)$, а суммарная мощность 225+93=318 Мва.

Все сказанное выше относительно токов справедливо и для мощностей короткого замыкания, поскольку последние находятся в прямой пропорциональности с соответствующими токами.

В соответствии с изложенным планом рекомендуется самостоятельно выполнить оставшуюся часть расчета.

Задача 5-9

Блок (рис. 5-5,а), состоящий из двух турбогенераторов Г-1 и Г-2, повышающего трансформатора Т с расщепленной обмоткой генераторного напряжения, воздушной линией Л-1 и повышающего автотрансформатора АТ, связан с узлом крупной системы С. Напряжение в этом узле можно считать практически неизменным и равным 500 кВ. Параметры элементов блока следующие:

генераторы Г-1 и Г-2 одинаковые, каждый 117,5 Мва, 138 кВ, $x''_d = 0,132$, $T_{10} = 12,2$ сек, АРВ есть; их мощность (за вычетом нагрузки собственных нужд) передается в систему;
трансформатор Т 240 Мва, 230/138 кВ, $u_n = 11\%$;

автотрансформатор АТ
240 Мва, 500/230 кВ, $u_{нв} = 10,4\%$;
линия Л-1 165 км, $x = 0,4$ ом/км.

При трехфазном коротком замыкании в точке К требуется определить наименьшую величину периодической составляющей тока, поступающего к месту короткого через выключатель В-2.

Решение. При базисных условиях $S_0 = 240$ Мва и $U_0 = U_{cp}$ (на каждой ступени трансформации) относительные реактивности элементов схемы замещения выражаются величинами, которые указаны на рис. 5-5,6.

Последовательно соединенные элементы дают:

$$x_7 = 0,27 + 0,22 = 0,49 \text{ и} \\ x_8 = 0,1 + 0,3 = 0,4.$$

Генерирующие ветви лучевой схемы найдем как соответствующие стороны эквивалентного треугольника, которым может быть заменена звезда с реактивностями x_4 , x_7 и x_8 , т. е.

$$x_{Г-1к} = 0,49 + 0,22 + \frac{0,49 \cdot 0,22}{0,4} = 0,98;$$

$$x_{Г-2к} = 0,4 + 0,22 + \frac{0,4 \cdot 0,22}{0,49} = 0,8.$$

Расчетная реактивность генератора Г-1

$$x_{расч} = 0,98 \cdot \frac{117,5}{240} = 0,48.$$

По кривым на рис. П-7 при $x_{расч} = 0,48$ наименьшее значение относительного тока составляет $I = 1,6$. Оно имеет место в диапазоне от 0,5 до 1 сек или с поправкой на различие в постоянной времени, принятой при построении кривых и имеющейся у данного генератора, в диапазоне $(0,5 + 1) \frac{12,2}{7} = 0,87 \sim 1,74$ сек.

Поскольку имеется указание, что нагрузка генератора Г-1 в основном находится в системе, то найденный по кривым ток должен быть умножен на коэффициент

$$b = 1 + \frac{x_{расч} - x''_d}{1,2} = 1 + \frac{0,48 - 0,132}{1,2} = 1,29.$$

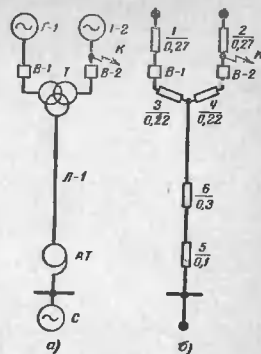


Рис. 5-5. К задаче 5-9.

а — исходная схема; б — схема замещения.

Таким образом, наименьший ток от генератора Г-1 будет:

$$I = 1,29 \cdot 1,6 \cdot \frac{117,5}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 9,9 \text{ кА.}$$

Ток от системы

$$I = \frac{1}{0,8} \cdot \frac{240}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 12,5 \text{ кА.}$$

Искомый ток в выключателе В-2

$$I = 9,9 + 12,5 = 22,4 \text{ кА.}$$

Задача 5-10

Уточнить результат решения предыдущей задачи учетом возникающих при рассматриваемом коротком замыкании качаний генератора Г-1, используя для этого типовые кривые изменения угла δ' от расчетного времени τ (рис. П1-10).

Дополнительные данные: предшествующая нагрузка блока на приемном конце (за автотрансформатором АТ) составляет $P_0 = 158 \text{ Мвт}$ при $\cos \varphi_0 = 0,97$; оба генератора нагружены поровну; их $x'_{d0} = 0,2$ и $T_J = 4,42 \text{ сек}$.

Решение. Относительный ток нагрузки при ранее принятых базисных условиях ($S_0 = 240 \text{ Мва}$ и $U_0 = U_{cr}$) будет:

$$I_0 = \frac{S_0}{S_*} = \frac{158}{0,97 \cdot 240} = 0,68.$$

Базисная переходная реактивность генератора составляет:

$$x'_{d0} = 0,2 \cdot \frac{240}{117,5} = 0,41.$$

Для начального значения переходной з. д. с. каждого генератора имеем:

$$\begin{aligned} E'_0 &= \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 + I_0 x'_{d0})^2} = \\ &= \sqrt{(1 \cdot 0,97)^2 + \left[1 \cdot 0,24 + 0,68 \left(0,1 + 0,3 + \frac{0,22 + 0,41}{2}\right)\right]^2} = \\ &= \sqrt{0,97^2 + 0,73^2} = 1,21. \end{aligned}$$

Взаимная переходная реактивность между генератором Г-1 и системой С при коротком замыкании

$$x'_{Г-1с} = (0,41 + 0,22) + 0,4 + \frac{(0,41 + 0,22) \cdot 0,4}{0,22} = 2,17.$$

Максимальная активная мощность, которая может быть передана при коротком замыкании, в относительных базисных единицах

218

составляет:

$$P'_{\text{maxc}} = \frac{E'_0 U_c}{x'_{Г-1с}} = \frac{1,21 \cdot 1}{2,17} = 0,56.$$

Предшествующая активная нагрузка каждого генератора (если пренебречь нагрузкой собственных нужд) в относительных базисных единицах

$$P_0 = \frac{158}{2 \cdot 240} = 0,33.$$

При

$$T = \frac{P_0}{P'_{\text{maxc}}} = \frac{0,33}{0,56} = 0,59$$

и

$$\sin \delta_c = \frac{I_0 x'_{Г-1с} \cos \varphi_0}{E'_0} = \frac{(0,73 - 0,24) \cdot 0,97}{1,21} = 0,393$$

по графику на рис. П1-10а находим, что максимальное значение угла δ' составляет $\sim 50^\circ$ и наступает при $\tau = 3,5$, что соответствует относительному времени, определяемому из выражения

$$t = \frac{\tau}{\sqrt{\frac{314}{T_J} P'_{\text{maxc}}}} = \frac{3,5}{\sqrt{\frac{314}{2,16} \cdot 0,56}} = 0,39 \text{ сек,}$$

где приведенная к базисной мощности постоянная инерции генератора

$$T_J(\sigma) = T_J \frac{S_0}{S_0^*} = 4,42 \cdot \frac{117,5}{240} = 2,16 \text{ сек.}$$

Если учесть различие в постоянных времени, то ток от генератора Г-1 следует определить по рис. П1-7 при $x_{\text{расч}} = 0,48$ не для $t = 0,39 \text{ сек}$, а для приведенного времени

$$t' = 0,39 \cdot \frac{7}{12,2} = 0,22 \text{ сек.}$$

Для этого момента относительный ток $I = 1,67$ (вместо 1,6, что было найдено ранее), и, следовательно, ток от генератора Г-1 в этот момент будет:

$$I = 9,9 \cdot \frac{1,67}{1,6} = 10,3 \text{ кА.}$$

Модуль тока, протекающего в данный момент (т. е. 0,39 сек) через выключатель В-2, с учетом сдвига его слагаемых будет:

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{I_{ГК}^2 + I_{СК}^2 + 2I_{ГК} I_{СК} \cos \vartheta} = \\ &= \sqrt{10,3^2 + 12,5^2 + 2 \cdot 10,3 \cdot 12,5 \cos 50^\circ} = 20,6 \text{ кА,} \end{aligned}$$

т. е. примерно на 10% меньше, чем получено без учета качаний.

219

Столь скромное влияние качаний объясняется тем, что благодаря сохранившейся при рассматриваемом коротком замыкании достаточно сильной вязан генератора $G-1$ с системой его качания очень невелики. В противоположном состоянии находится генератор $G-2$. Если пренебречь потерями, то у него происходит полный сброс нагрузки и угол сдвига его э. д. с. от напряжения системы progressively возрастает до тех пор, пока не придет в действие система регулирования первичного двигателя.

Задача 5-11

Ток на некотором участке схемы состоит из двух токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , сдвинутых друг относительно друга на угол β .

Установить зависимость между отношением модулей токов $I_1 : I_2 = n$ и углом сдвига между ними, при которой арифметическая сумма этих токов не превышает истинной величины суммарного тока более чем на 10%. При этом определить экстремум такой зависимости.

Задача 5-12

Асинхронный двигатель АД 4500 квт, 6 кв, $\cos \varphi = 0,87$, $\eta = 95,5\%$, $I_{\text{пуск}} = 5,5 I_n$, $M_{\text{пуск}} = 0,7 M_n$ служит приводом к механизму, начальный (статический) момент сопротивления которого составляет 40% номинального момента двигателя. Питание двигателя осуществляется от шин 6,3 кв станции (рис. 5-6,а), причем при его пуске используется реактор P 6 кв, 500 а, $x = 5\%$.

Через трансформатор T 7,5 Мва, 115/6,3 кв, $u_n = 10,5\%$ станция связана с системой C , неизменное напряжение которой 115 кв приложено за эквивалентной реактивностью $x = 46 \text{ ом}$.

Генератор G 20 Мва, 6,3 кв, $x_d = 1,5$, $x'_d = 0,2$, $T_{10} = 6 \text{ сек}$ имеет АРВ, при этом $I_{\text{вр}} = 3,7$ и $T_{\text{вр}} = 0$.

Присоединенная к шинам 6,3 кв нагрузка H составляет 12 Мва, и ее относительная реактивность $x = 1,2$.

Считая, что двигатель АД остановлен, нужно определить, через какой промежуток времени с момента включения выключателя $B-1$ начнется развертывание двигателя при условии, что станция работает:

а) изолированно от системы C (выключатель $B-2$ отключен);

б) параллельно с системой C (выключатель $B-2$ включен).

В обоих случаях считать, что в предшествующем режиме генератор G работает с номинальным напряжением и его $I_{10} = 1,75$.

Решение. Выразим элементы схемы замещения на рис. 5-6,б в относительных единицах при $S_0 = 20 \text{ Мва}$ и $U_0 = 6,3 \text{ кв}$.

Реактивности

$$x'_1 = 0,2 \text{ и } x_1 = 1,5; x_2 = 46 \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 \frac{20}{6,3^2} = 0,07;$$

$$x_3 = 0,105 \cdot \frac{20}{7,5} = 0,28; x_4 = 1,2 \cdot \frac{20}{12} = 2; x_5 = 0,05 \cdot \frac{1,83}{0,5} \left(\frac{6}{6,3} \right) =$$

$$= 0,17,$$

$$\text{где } I_6 = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 1,83 \text{ ка;}$$

$$I_7 = \frac{1}{5,5} \frac{20}{6,3} \left(\frac{6}{6,3} \right)^2 = 0,61,$$

$$\text{где } S_{\text{н.д.р.}} = \frac{4,5}{0,87 \cdot 0,955} = 5,4 \text{ Мва.}$$

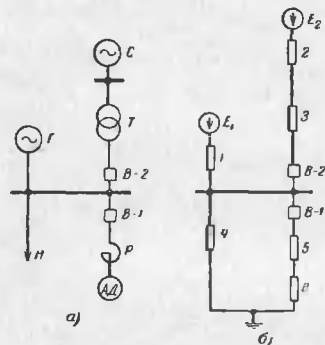


Рис. 5-6. К задаче 5-12.

а — исходная схема; б — схема замещения

Электродвижущая сила системы

$$E_s = \frac{115 \cdot \frac{6,3}{115}}{6,3} = 1.$$

Если не считаться с возможным сдвигом между E_2 и напряжением на шинах станции, то весь ток, потребляемый нагрузкой в предшествующем режиме, т. е.

$$I_4 = \frac{1}{2} = 0,5,$$

составляет генератор G и его относительные э. д. с. составляют:

$$E'_1 = E'_{q0} = 1 + 0,5 \cdot 0,2 = 1,1$$

и

$$E_2 = E_{q0} = 1 + 0,5 \cdot 1,5 = 1,75$$

(или $E_{q0} = I_{10} = 1,75$, как задано в условии).

При предельном возбуждении генератора

$$E_a = E_{\text{нр}} = I_{\text{нр}} = 3,7.$$

Оценим, какое должно быть обеспечено напряжение у двигателя и на шинах, чтобы он начал развращаться. В соответствии с заданным условием, очевидно, должно быть:

$$\left(\frac{U}{U_n}\right)^2 0,7 M_n \geq 0,4 M_n$$

откуда

$$U \geq \sqrt{\frac{0,4}{0,7}} U_n = 0,755 U_n$$

или по отношению к $U_0 = 6,3$ кв

$$U \geq 0,755 \frac{6}{6,3} = 0,72.$$

При этом ток в двигателе должен быть:

$$I \geq \frac{0,72}{0,61} = 1,18$$

и напряжение на шинах

$$U \geq 0,72 + 1,18 \cdot 0,17 = 0,92.$$

Теперь рассмотрим пуск двигателя поочередно при каждом из указанных условий.

а) При изолированной работе станции внешняя реактивность

$$x_1 = x_0 / (x_0 + x_g) = 2 / (0,17 + 0,61) = 0,56$$

и значения токов генератора будут:

в начальный момент

$$I' = \frac{1,1}{0,2 + 0,56} = 1,45$$

при предельном возбуждении

$$I_{\text{нр}} = \frac{3,7}{1,5 + 0,56} = 1,8.$$

Ток генератора в момент, когда напряжение достигает $U = 0,92$,

$$I = \frac{0,92}{0,56} = 1,64.$$

Время, когда ток генератора достигнет этой величины, определим из уравнения

$$1,64 = 1,8 + (1,45 - 1,8) e^{-t/2,22}$$

$$T'_a = 6 \cdot \frac{0,2 + 0,56}{1,5 + 0,56} = 2,22 \text{ сек},$$

откуда

$$e^{-t/2,22} = \frac{(1,8 - 1,64)}{(1,8 - 1,45)} = \frac{0,16}{0,35} = 0,457$$

или

$$t = 2,22 \ln \frac{1}{0,457} = 1,74 \text{ сек}.$$

б) При параллельной работе станции с системой С эквивалентные реактивности и э. д. с. генерирующих ветвей будут:

$$x'_0 = 0,2 / (0,07 + 0,28) = 0,2 / 0,35 = 0,13;$$

$$E'_a = \frac{1,1 \cdot 0,35 + 1,0,2}{0,2 + 0,35} = 1,06;$$

при установившемся режиме $x_0 = 1,5 / (0,35 + 0,28)$ и э. д. с., когда генератора $E_{0 \text{ нр}} = 3,7$,

$$E_a = \frac{3,7 \cdot 0,35 + 1,1,5}{0,35 + 1,5} = 1,51.$$

Значения токов и напряжений будут:

в начальный момент

$$I' = \frac{1,03}{0,13 + 0,56} = 1,54 \text{ и } U' = 1,54 \cdot 0,56 = 0,86,$$

при установившемся режиме

$$I = \frac{1,51}{0,28 + 0,56} = 1,8 \text{ и } U = 1,8 \cdot 0,56 = 1,01.$$

Поскольку изменения во времени происходят только из-за перемещения процесса в генераторе, то, определив постоянную времени

$$T'_a = 6 \cdot \frac{0,2 + 0,22}{1,5 + 0,22} = 1,45 \text{ сек}$$

и $x_0 = 0,56 / (0,35 + 0,22)$, искомое время можно найти из выражения для тока

$$1,64 = 1,8 + (1,54 - 1,8) e^{-t/1,45}$$

или напряжения

$$0,92 = 1,01 + (0,86 - 1,01) e^{-t/1,45}.$$

Подсчет дает $t = 0,65$ сек, т. е. почти в 3 раза меньше, чем при изолированной работе станции.

Задача 5-13

В предыдущей задаче принято, что подъем напряжения на кольцах ротора происходит скачком ($T_e=0$) от предшествующего до предельного значения.

Определить, до какой величины возрастет искомое время начала развращения двигателя, если подъем напряжения на кольцах ротора генератора будет происходить по экспоненте с постоянным временем $T_e=0,5$ сек. Все остальные условия сохраняются без изменения.

Задача 5-14

Элементы схемы на рис. 5-7 характеризуются следующими данными:

тепловая станция $Ст-1$ — эквивалентный турбогенератор 470 $Мва$, 15,75 $кв$, $T_{10}=9,8$ сек;

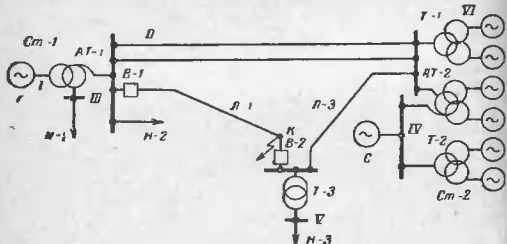


Рис. 5-7. К задаче 5-14. Исходная схема.

гидростанция $Ст-2$ — шесть одинаковых генераторов, каждый 118 $Мва$, 13,8 $кв$, $T_{10}=5,2$ сек;

система $С$ — эквивалентная реактивность до $Ст-2$ $x=83$ $ом$, за которой приложено неизменное напряжение 510 $кв$;

автотрансформатор $АТ-1$ 480 $Мва$, 242/121/15, 75 $кв$, $u_{BC}=13,5\%$, $u_{ВН}=12,5\%$, $u_{СН}=18,8\%$;

автотрансформатор $АТ-2$ 360 $Мва$, 525/242/13,8 $кв$, $u_{BC}=8,4\%$, $u_{ВН}=28,4\%$, $u_{СН}=19,0\%$;

трансформаторы: $T-1$ 250 $Мва$, 242/13,8 $кв$, $u_n=11\%$;

$T-2$ 250 $Мва$, 525/13,8 $кв$, $u_n=14\%$;

$T-3$ 120 $Мва$, 220/11 $кв$, $u_n=12\%$;

нагрузки: $H-1$ 250 $Мва$, $H-2$ 300 $Мва$, $H-3$ 100 $Мва$, $x=1,2$;

линии: $Л-1$ 120 $км$, $Л-2$ 85 $км$, $Л-3$ 70 $км$, $x=0,4$ $ом/км$.

На линии $Л-1$ вблизи выключателя $В-2$ возникло трехфазное короткое замыкание, отключение которого произошло в следующем порядке: через 0,7 сек отключился выключатель $В-2$ и затем спустя еще 0,8 сек отключился выключатель $В-1$.

Для указанных условий требуется определить величины токов во всех трех линиях в моменты отключения каждого из этих выключателей. Решение провести методом спрямленных характеристик, считая, что все генераторы слабыми АРВ и предельными работала с номинальной нагрузкой.

Решение. Пусть $S_0=1\ 000$ $Мва$ и $U_{01}=15,75$ $кв$, тогда

$$U_{011}=15,75 \frac{242}{15,75}=242 \text{ кв}; U_{0111}=121 \text{ кв}; U_{011V}=525 \text{ кв};$$

$$U_{0V}=242 \frac{11}{220}=12,1 \text{ кв}; U_{0V1}=13,8 \text{ кв}.$$

Для генератора $Ст-1$ по кривым на рис. П-9,а, учтя различие в значениях T_{10} , находим:

$$t'=0,7 \frac{7}{9,8}=0,5 \text{ сек } E_t=1,25 \text{ и } x_t=0,3;$$

для

$$t'=(0,7+0,8) \frac{7}{9,8}=1,07 \text{ сек } E_t=1,48 \text{ и } x_t=0,45.$$

Аналогично [для генераторов $Ст-2$ по кривым на рис. П-9,б находим]:

для

$$t=0,7 \text{ сек } E_t=1,33 \text{ и } x_t=0,38;$$

для

$$t=0,7+0,6=1,5 \text{ сек } E_t=1,55 \text{ и } x_t=0,47.$$

Схема замещения представлена на рис. 5-8,а, где каждые два генератора, находящихся в одинаковых условиях, заменены одним генератором (элементами 2, 3 и 4). Реактивности и в. д. с. ее элементов, выраженные в относительных единицах при базисных условиях, составляют:

для $t=0,7$ сек

$$E_1=1,25; x_1=0,3; \frac{1\ 000}{470}=0,64; I_{np}=\frac{1,25-1}{0,64}=0,4;$$

$$E_2=E_3=E_4=1,33;$$

$$x_2=x_3=x_4=0,38; \frac{1\ 000}{2 \cdot 118}=1,61; I_{np}=\frac{1,33-1}{1,61}=0,204;$$

для $t=1,5$ сек

$$E_t=1,48; x_t=0,96 \text{ и } I_{np}=0,5.$$

¹ Здесь вводить поправку на различие постоянных времени нет смысла, так как заданная величина T_{10} близка к принятой при построении кривых на рис. П-9,б (5 сек).

Подсчет для генераторов *Ст-2* не делаем, так как при $t = 1,5$ сек и отключенном выключателе *В-2* наиболее вероятным для них является режим нормального напряжения.

Для системы

$$E_6 = \frac{510}{525} = 0,97 \text{ и } x_{17} = 83 \cdot \frac{1000}{525^2} = 0,3;$$

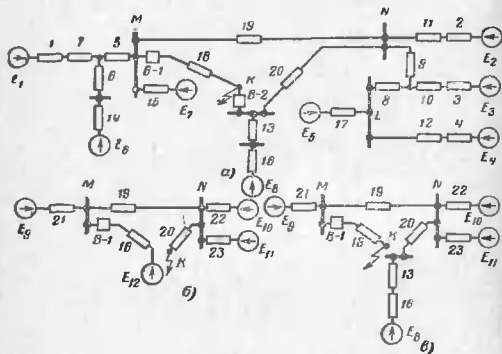


Рис. 5-8. К задаче 5-14.

а — схема замещения; б и в — этапы ее преобразования.

для нагрузок

$$E_6 = E_7 = E_8 = 0 \text{ и } x_{14} = 1,2 \cdot \frac{1000}{250} \left(\frac{115}{121} \right)^2 = 4,36;$$

$$x_{15} = 3,64 \text{ и } x_{16} = 9^*;$$

для всех остальных элементов

$$x_3 = 0,075; x_6 = 0,206; x_7 = 0,185; x_8 = 0,247; x_9 = 0;$$

$$x_{10} = 0,54; x_{11} = 0,44; x_{12} = 0,56; x_{13} = 0,83; x_{18} = 0,58;$$

$$x_{19} = 0,41; x_{20} = 0,48.$$

Для $t = 0,7$ сек примем, что все генераторы работают в режиме подъема возбуждения. Тогда после объединения ветвей с E_1 , E_6 и E_7 получим $E_9 = 0,875$ и $x_{21} = 0,64$. Аналогичное объединение ветвей с E_2 и E_3 дает $E_{10} = 1,33$ и $x_{22} = 1,04$ и ветвей с E_4 и E_5 дает $E_{11} = 1,01$ и $x_{23} = 0,511$. Схема замещения при этом приобретает более

* При подсчете реактивностей нагрузок узлово, что величина $x = 1,2$ отнесена к среднему напряжению соответствующей ступени.

простой вид (рис. 5-8,б). Далее можно треугольник с элементами 19, 20 заменить эквивалентной звездой и затем привести схему к элементарному виду. Можно решение выполнить и иначе, разрыв схему в месте трехфазного короткого. Последний путь в данном случае, пожалуй, проще, так как при нем легче находить распределение тока. Итак, приняв в схеме на рис. 5-8,б $E_{12} = 0$, свернем схему относительно точки *К*:

$$E_{12} = \frac{0,875 - 0,58}{0,64 + 0,56} = 0,415; x_{24} = 0,64 / 0,58 = 0,303;$$

$$x_{26} = 0,303 + 0,41 = 0,713;$$

$$E_{14} = \frac{(0,415 / 0,713) + (1,33 / 1,04) + (1,01 / 0,511)}{(1 / 0,713) + (1 / 1,04) + (1 / 0,511)} = 0,865;$$

$$x_{26} = 0,713 / 1,04 / 0,511 = 0,231 \text{ и } x_{27} = 0,231 + 0,48 = 0,711.$$

Ток в выключателе *В-2* (или в линии *Л-3*) будет:

$$I_{В-2} = I_{Л-3} = \frac{0,885}{0,711} = 1,25.$$

Проверим правильность выбранного режима генератора. Напряжение узла *Н* составляет $U_N = 1,25 \cdot 0,48 = 0,6$. Ток в элементе 2

$$I_2 = \frac{1,33 - 0,6}{0,44 + 1,61} = 0,36 > I_{кр} = 0,204;$$

аналогично $I_8 = 0,34 > I_{кр}$. Напряжение узла *Л*

$$U_L = 0,6 + \frac{1,01 - 0,6}{0,511} \cdot 0,247 = 0,8,$$

и ток в элементе 4

$$I_4 = \frac{1,33 - 0,8}{0,56 + 1,61} = 0,244 > I_{кр}.$$

Ток в элементе 19 (линия *Л-2*)

$$I_{19} = \frac{0,415 - 0,6}{0,713} = -0,26,$$

и напряжение в узле *М*

$$U_M = 0,6 - 0,26 \cdot 0,41 = 0,494.$$

Ток в элементе 5 получается $I_5 = 0,73$, и коль скоро он больше $I_{кр} = 0,4$, то генератор *Ст-1*, несомненно, работает в режиме подъема возбуждения.

Следовательно, выбранный режим для всех генераторов правильный и искомые токи в момент отключения выключателя *В-2* состав-

в линии Л-1 (выключателе В-1)

$$I = \frac{0,494}{0,58} \cdot 2,38 = 2,02 \text{ кА};$$

в линии Л-2

$$I = 0,26 \cdot 2,38 = 0,62 \text{ кА};$$

в линии Л-3 (выключателе В-2)

$$I = 1,25 \cdot 2,38 = 2,98 \text{ кА},$$

$$I_0 = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 242} = 2,38 \text{ кА}.$$

После отключения выключателя В-2 схема замещения имеет вид показанной на рис. 5-8,а. К линии Л-3 остается присоединенной нагрузка Н-3. Как отмечалось выше, для $t=1,5$ сек примем, что генератор Ст-2 уже достигли режима нормального напряжения, а генератор Ст-1 продолжает еще работать в режиме подъема возбуждения. В соответствии с этим в схеме на рис. 5-8,а принимаем $E_1=1,48$ к $x_1=0,96$; $E_2=E_3=E_4=1$ и $x_2=x_3=x_4=0$.

После подсчета эквивалентных э. д. с. и реактивностей для элементов схемы замещения на рис. 5-8,в имеем: $E_9=0,93$; $x_{21}=0,78$; $E_{10}=1$; $x_{22}=0,244$; $E_{11}=0,985$; $x_{23}=0,442$; реактивности всех остальных элементов этой схемы известны, а $E_8=0$.

Подсчет токов для схемы на рис. 5-8,в и проверку правильности выбранных режимов генераторов обеих станций рекомендуется выполнить читателю¹.

Следует подчеркнуть, что произведенный подсчет сделан при допущении, что э. д. с. всех источников совпадают по фазе. Возникающие качания генераторов, как показано в решении задачи 5-15, могут существенно изменить токи в линиях рассматриваемой схемы. Так, например, если после отключения В-2 э. д. с. генератора Ст-1 окажется в противофазе с э. д. с. генераторов Ст-2, то ток в линии Л-2 достигнет 3,4 кА, а ток в линии Л-1 (в выключателе В-1), напротив, упадет до 0,1 кА.

Задача 5-15

Для элементов схемы на рис. 5-9,а известны следующие данные:

генератор Г 353 Мва, $\cos \varphi = 0,85$, 20 кВ, $x_1=1,7$, $x'_d=0,3$, $T_{10} = 7$ сек, $I_{нр}=4,56$; возбуждение поное ($T_{в}=0$); АРВ включено; $T_{г}=6$ сек; предварительно работает с номинальной нагрузкой; система С — источник бесконечной мощности с неизменным напряжением; в предшествующем режиме от генератора в систему поступает 40% номинальной мощности; трансформатор Т-1 400 Мва, 347/20 кВ, $u_{тс}=13\%$; автотрансформатор АТ-1 250 Мва, 500/330/38,5 кВ, $u_{тс}=11\%$, $u_{вп}=36\%$, $u_{сн}=20\%$;

¹ Получаемые величины токов для $t=1,5$ сек указывы в ответе к данной задаче.

автотрансформатор АТ-2 120 Мва, 330/121/11 кВ, $u_{тс}=12\%$; нагрузки Н-1 и Н-2 соответственно 26 и 32% номинальной мощности генератора Г;

линии Л-1 и Л-2 соответственно 185 км и 130 км, $x=0,4$ ом/км. Для условий внезапного трехфазного короткого замыкания поочередно в точках К-1 и К-2 требуется для диапазона от 0,5 до 1 сек построить кривые изменения тока и напряжения генератора. Размет с учетом действия АРВ и возникающих качаний генератора.

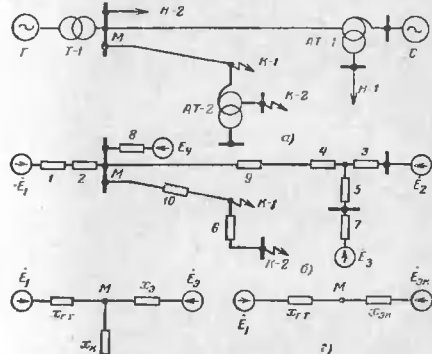


Рис. 5-9. К задаче 5-15.

а — исходная схема; б, в — схема замещения и ее преобразование к простейшему виду.

Решение. Расчет проведем в системе относительных единиц, приняв за базисные условия $S_6 = S_{Г,н} = 353$ Мва; $U_{61} = U_{Г,н} = 20$ кВ и соответственно

$$U_{611} = 20 \cdot \frac{347}{20} = 347 \text{ кВ}; U_{6111} = 347 \cdot \frac{500}{330} = 525 \text{ кВ}.$$

Поскольку требуется рассмотреть процесс для $t \geq 0,5$ сек, то на свободным сверхпереходными токами можно не считаться и выбранные нагрузки характеризовать средними относительными реактивностями $x=1,2$ и $E=0$.

Исходная схема замещения имеет вид рис. 5-9,б. Реактивности ее элементов при базисных условиях составляют:

$x_1 = 0,3$ для начального момента

и $x_1 = 1,7$ для установившегося режима:

$$x_2 = 0,115;$$

$$x_3 = 0,174; x_4 = -0,032; x_5 = 0,3; x_6 = 0,32; x_7 = 1,2 \cdot \frac{100}{26} = 4,3;$$

$$x_8 = 1,2 \cdot \frac{100}{32} = 3,75; x_9 = 0,216 \text{ и } x_{10} = 0,152;$$

э. д. с. $E_3 = E_4 = 0$, а E_1 и E_2 определяем по задающему предшествующему режиму.

При отсутствии короткого замыкания эквивалентная реактивность всей правой части схемы замещения от точки M составляет

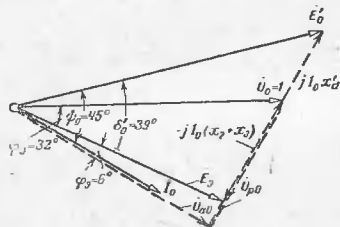


Рис. 5-10. К задаче 5-15. Векторная диаграмма предшествующего режима.

$x_0 = 0,32$. Далее из векторной диаграммы (рис. 5-10) для предшествующего режима имеем:

$$E_0' = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 + I_0 x_0')^2} = \sqrt{0,85^2 + (0,53 + 0,3)^2} = 1,19$$

и

$$E_0 = \sqrt{0,85^2 + (0,53 - 0,115 - 0,32)^2} = 0,855.$$

Углы сдвигов составляют:

$$\varphi_0 = \arctg \frac{0,53 + 0,3}{0,85} = 45^\circ; \varphi_0 = \arctg \frac{0,53 - 0,435}{0,85} = 6^\circ;$$

следовательно,

$$\delta_0 = \varphi_0 - \varphi_0 = 45^\circ - 6^\circ = 39^\circ$$

и

$$\sin \delta_0 = 0,63.$$

В упрощенном виде схема замещения представлена на рис. 5-9,а. По известной величине E_0 нетрудно найти E_2 в схеме на

рис. 5-9,б, однако в этом нет необходимости, коль скоро в задачу входит нахождение тока и напряжения только одного генератора.

Рассмотрим поочередно каждый случай короткого замыкания.

а) Короткое замыкание в точке К-1

В данном случае в схеме на рис. 5-9,в имеем $x_K = x_{10} = 0,152$. Чтобы воспользоваться типовыми кривыми изменения угла δ' во времени, найдем предварительно относительную величину максимальной мощности, которая может быть передана от генератора в данном аварийном режиме. Для последнего имеем:

$$P'_{\max \tau} = \frac{E_0' E_{\text{в.к}}}{x_{\text{г.т}} + x_0 + \frac{x_{\text{г.т}} x_0}{x_K}}$$

или иначе

$$P'_{\max \tau} = \frac{E_0' E_{\text{в.к}}}{x_{\text{г.т}} + x_{\text{в.к}}}$$

где $x_{\text{в.к}} = x_0/x_K$ и $E_{\text{в.к}} = E_0 \frac{x_K}{x_0 + x_K}$ — эквивалентные реактивность и э. д. с. ветви, которой могут быть заменены ветвь короткого замыкания и ветвь остальной части сети (рис. 5-9,г).

Подставив численные значения, найдем $x_{\text{в.к}} = 0,103$; $E_{\text{в.к}} = 0,275$; $P'_{\max \tau} = 0,634$. Для $T = P_0/P'_{\max \tau} = 0,85/0,634 = 1,34$ и $\sin \delta_0 = 0,63$ с помощью типовых кривых на рис. П-10,в и с установившимся приближенную зависимость изменения угла δ' от расчетного времени τ , которое связано с действительным временем t соотношением

$$\tau = t \sqrt{\frac{\omega}{T_j} P'_{\max \tau}} = t \sqrt{\frac{314}{6} \cdot 0,634} = 5,75t.$$

Зависимость $\delta' = f(t)$ представлена соответствующей кривой на рис. 5-11. Как видно, в данном случае генератор очень быстро выпадает из синхронизма.

Для определения законномерности изменения $E_0' = \varphi(t)$ используем дифференциальное уравнение

$$T_d' \frac{dE_0'}{dt} + E_0' = \frac{x'_{\text{г.т}} E_{\text{в.к}}}{x_{\text{г.т}}} E_{\text{в.к}} + \frac{(x_d - x_d')}{x_{\text{г.т}}} E_{\text{в.к}} \cos \delta' = B(t),$$

где φ — после подстановки числовых значений

$$B(t) = \frac{x'_{\text{г.т}} E_{\text{в.к}}}{x_{\text{г.т}}} E_{\text{в.к}} + \frac{(x_d - x_d')}{x_{\text{г.т}}} E_{\text{в.к}} \cos \delta' = 0,518;$$

$$x_{\text{г.т}} = 1,7 + 0,115 + 0,103 = 1,918;$$

$$T_d' = T_{j0} \frac{x'_{\text{г.т}}}{x_{\text{г.т}}} = 7 \frac{0,518}{1,918} = 1,69 \text{ сек};$$

$$E_{\text{в.к}} = 0,275; E_{\text{в.к}} = I_{\text{в.к}} = 4,56$$

и полсебя коэффициентов приобретает следующий вид:

$$1,89 \frac{dE'_q}{dt} + E'_q = 1,23 + 0,2 \cos \delta' = B(t).$$

Его решение выполним численным интегрированием, принимая интервал $\Delta t = 0,1$ сек. Следовательно, приращение $\Delta E'_q$ за интервал 0,1 сек будет:

$$\Delta E'_q = \frac{\Delta t [B(t) - E'_q]}{T'_d} = 0,053 [B(t) - E'_q].$$

Производимый подсчет от 0 до 1,1 сек сведен в следующую таблицу:

t, сек	δ' , град	относительные единицы			
		cos δ'	B(t)	E'_q	$\Delta E'_q$
0	39	0,78	1,39	1,190	0,010
0,1	48	0,67	1,37	1,200	0,009
0,2	67	0,39	1,31	1,209	0,005
0,3	94	-0,07	1,22	1,214	0
0,4	126	-0,59	1,11	1,214	-0,005
0,5	164	-0,96	1,04	1,209	-0,009
0,6	200	-0,94	1,04	1,200	-0,008
0,7	234	-0,59	1,11	1,192	-0,004
0,8	273	0,05	1,24	1,188	0,003
0,9	323	0,80	1,39	1,191	0,011
1,0	373	0,97	1,43	1,202	0,012
1,1	410	0,64	1,36	1,214	0,008
1,2	450	0	1,23	1,222	

Как видно, значение E'_q в данном случае изменяется очень незначительно относительно некоторого среднего уровня (1,2). Это обусловлено тем, что здесь результирующий эффект от затухания свободного переходного тока, форсировки возбуждения и наводных в роторе токов скольжения получается близким к нулю.

Напомним, что типовые кривые $\delta' - I(\tau)$ построены при допущении, что генератор характеризуется переходной э. д. с. E'_0 , определяемой приближенно, считая $x_d \approx x'_d$ (рис. 5-10). При этом отпадает необходимость учета различия реактивностей в обеих осях ротора генератора и значение тока в схеме рис. 5-9,а можно определить как

$$I = \frac{-j(\dot{E}_1 - \dot{E}_{\text{вн}})}{x_{\text{г.т}} + x_{\text{вн}}} = \frac{-j(E' \angle \delta' - 0,275)}{0,415 + j0,103} = -j1,93 (E' \angle \delta' - 0,275)$$

и его модуль

$$I = 1,93 \sqrt{E'^2 + 0,275^2 - 0,55E' \cos \delta'}.$$

Для напряжения генератора, очевидно, имеем:

$$\dot{U}_x = E' \angle \delta' - jI x'_d = E' \angle \delta' - 1,93 (E' \angle \delta' - 0,275) 0,3 = 0,42E' \angle \delta' + 0,16$$

и для его модуля

$$U_x = 0,16 \sqrt{(2,62E')^2 + 1 + 5,24E' \cos \delta'}.$$

Построенные по этим выражениям (для модулей) кривые изменения тока и напряжения генератора показаны на рис. 5-11. Там же показана и кривая изменения напряжения точки М, т. е. места приложения аварийной петли.

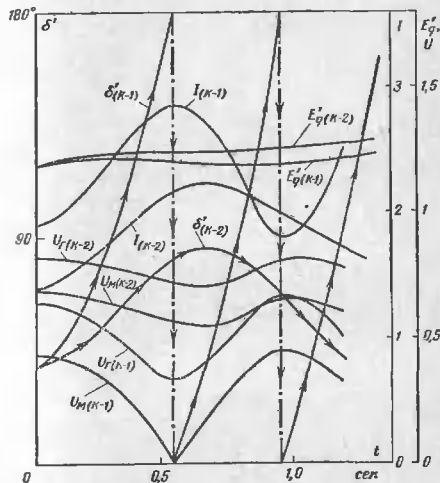


Рис. 5-11. К задаче 5-15. Кривые изменения угла δ' , э. д. с. E' , тока I и напряжений U_f и U_M во времени при трехфазных коротких замыканиях.

При заданных параметрах цепи точка М оказывается ее электрическим центром. При $\delta' = 180^\circ$ напряжение в ней падает до нуля, при этом ток генератора, напротив, достигает наибольшего значения. Изменение тока в месте короткого имеет тот же характер, что и изменение напряжения в точке М.

б) Короткое замыкание в точке К-2

В этом случае в схеме на рис. 5-9,а реактивность

$$x_k = x_{10} + x_0 = 0,152 + 0,32 = 0,472$$

и в схеме на рис. 5-9,з

$$x_{\text{вн}} = 0,32/0,472 = 0,19 \text{ и } E_{\text{вн}} = \frac{0,655 \cdot 0,472}{0,32 + 0,472} = 0,51.$$

Аналогично предыдущему находим:

$$I'_{\text{выск}} = \frac{1,19 \cdot 0,51}{0,415 + 0,19} \approx 1; T = 0,85 \text{ и } \tau = t \sqrt{\frac{314}{6} \cdot 1} = 7,25t.$$

С помощью типовых характеристик на рис. П-10 находим изменение угла δ' во времени, которое показано на рис. 5-11 соответствующей кривой. Поскольку электрическая удаленность точки К-2 значительно больше, чем точки К-1, генератор не выпадает из синхронизма и максимум угла δ' при коротком составляет 85° ; он наступает через 0,65 сек.

Выражения для модулей тока и напряжений получаются следующими:

$$I = 1,65 \sqrt{E'^2 + 0,26 - 1,02E' \cos \delta'};$$

$$U_r = 0,253 \sqrt{4E' (E' + \cos \delta') + 1};$$

$$U_M = 0,35 \sqrt{(0,9E')^2 + 1 + 1,8E' \cos \delta'}.$$

Построенные по этим выражениям кривые приведены на рис. 5-11. В интервале от 0,5 до 1 сек ток изменяется сравнительно мало. Интересно отметить, что в интервале от 0,85 до 1,05 сек ток при коротком в К-2 оказывается больше, чем при коротком в К-1. Такой, на первый взгляд, парадокс объясняется существенным различием сдвига между э. д. с. источников в рассматриваемых случаях короткого замыкания.

Задача 5-16

Для схемы на рис. 5-9,а и при исходных данных предыдущей задачи требуется определить ток генератора через 1 сек при трехфазном коротком замыкании поочередно в точках К-1 и К-2, используя для расчета метод спрямленных характеристик.

Решение. Поскольку значения некоторых параметров (как-то $x'_d, I_{\text{пр}}, T_d$) заданного генератора существенно отличаются от принятых при построении типовых кривых для определения расчетных величин E_d и x_d , найдем эти расчетные величины для данного генератора путем спрямления его внешней характеристики для рассматриваемого момента времени $t=1$ сек.

При $T_d=0$ выражение для тока генератора через 1 сек будет:

$$I = I_{\text{пр}} + (I'_{[0]} - I_{\text{пр}}) e^{-t/T'_d},$$

где $I'_{[0]}$ и $I_{\text{пр}}$ — соответственно изначальный переходный ток и пре-

деленный установившийся ток при заданной внешней реактивности цепи статора x ;

$$I'_d = 7 \cdot \frac{0,3 + x}{1,7 + x} \text{ — постоянная времени обмотки возбуждения при}$$

замкнутом статоре через реактивность x .

Напряжение генератора в тот же момент времени при разной удаленности короткого, очевидно, будет:

$$U_d = Ix.$$

Результаты произведенного подсчета для разных значений x сведены в таблицу:

x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9
T'_d	1,23	1,56	1,84	2,10	2,34	2,74	3,23
I	3,16	2,67	2,30	2,02	1,79	1,46	1,14
U_r	0	0,267	0,460	0,606	0,716	0,880	1,026

По этим данным на рис. 5-12 построена внешняя характеристика. Ее участок HN отвечает режиму подъема возбуждения. За-

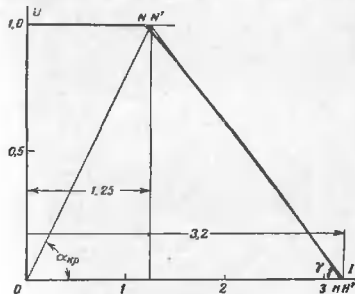


Рис. 5-12. К задаче 5-16. Определение расчетных параметров генератора по методу спрямленных характеристик.

тем она переходит в горизонтальную прямую, которая соответствует режиму нормального напряжения. Как видно, кривизна участка

HN очень невелика. Заменяя его прямой HN' , найдем, что относительная расчетная реактивность генератора для $t=1$ сек будет:

$$x_{t=1} = \frac{1}{3,2-1,25} = 0,513 \quad (x_{t=1} \equiv \operatorname{tg} \gamma)$$

я расчетная э. д. с. для того же момента

$$E_{t=1} = 3,2 \cdot 0,513 = 1,64.$$

Критический ток для $t=1$ сек из построения на рис. 5-12 $I_{кр} = 1,25$ (или $I_{кр} = (1,64-1)/0,513 = 1,25$), и критическая реактивность $x_{кр} = 1/1,25 = 0,8$ ($x_{кр} \equiv \operatorname{tg} \alpha'_{кр}$).

В схеме на рис. 5-9,а при коротком в точке $K-I$ $x_n = 0,152$, и так как $x_2 + x_n = 0,115 + 0,103 = 0,218 < x_{кр} = 0,80$, то для генератора применим режим подъема возбуждения и в схему на рис. 5-9,а вводим его реактивность $x_1 = 0,513$ и э. д. с. $E_1 = 1,64$.

Имея в виду, что объединение ветвей x_n и x_2 при коротком в точке $K-I$ (см. решение предыдущей задачи) дает $x_{н2} = 0,103$ и $E_{н2} = 0,275$, для искомого тока генератора получим:

$$I = \frac{1,64 - 0,275}{0,513 + 0,115 + 0,103} = 1,87.$$

По кривой $I_{(k-1)}$ на рис. 5-11 видим, что этот ток через 1 сек $I = 1,81$. Столь близкое совпадение обусловлено главным образом тем, что через 1 сек э. д. с. генератора и системы почти совпадают по фазе ($\delta' = 373 - 360 = 13^\circ$), как это и принято в подсчете по методу сжимленных характеристик.

При коротком в $K-2$ $x_{н2} = 0,19$ и $E_{н2} = 0,51$ (рис. 5-9,б). Если и в этом случае генератор характеризовать $x_1 = 0,513$ и $E_1 = 1,64$, то при совпадении по фазе э. д. с. величина тока генератора через 1 сек будет:

$$I = \frac{1,64 - 0,51}{0,513 + 0,115 + 0,19} = 1,38 > I_{кр} = 1,25,$$

что указывает на правильность выбранного режима.

По кривой $I_{(k-2)}$ на рис. 5-11 следует, что этот ток через 1 сек $I = 1,94$, при этом угол $\delta' = 63^\circ$. Если учесть этот сдвиг между э. д. с. в расчете по методу сжимленных характеристик, то вместо $I = 1,38$ получим:

$$I = \sqrt{2,01^2 + 0,62^2} + 2 \cdot 2,01 \cdot 0,62 \cos 63^\circ = 1,81,$$

т. е. меньше чем $I = 1,94$ примерно на 7%.

Задача 5-17

На стороне 500 кВ $Ст-2$ схемы на рис. 5-13,а предполагается усановить выключатель ($B-4$), полное время отключения которого составляет 0,1 сек (5 пер). Требуется определить величину расчетного отключаемого тока для этого выключателя.

Схема на рис. 5-13,а та же, что и в задаче 5-14 (рис. 5-7). Она при детализации лишь в несколько упрощенном виде (без нагрузок). Параметры ее элементов приведены в условии задачи 5-14. Ниже указаны необходимые дополнительные данные: генератор $Г-1$ $x'_1 a = 0,19$, $x/r = 125$; генератор $Г-2$ $x'_1 a = 0,21$, $x/r = 70$; система C $x/r = 6$;

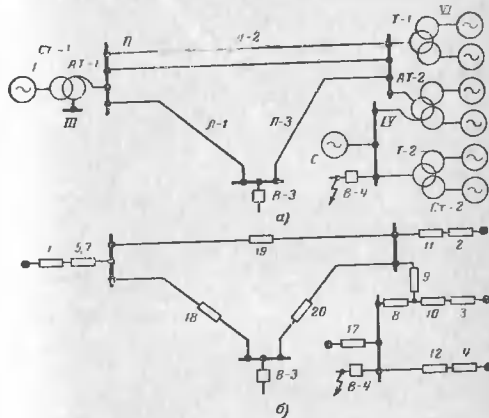


Рис. 5-13. К задаче 5-17.

а — исходная схема; б — схема замещения.

автотрансформатор $AT-1$ $x/r = 40$; автотрансформатор $AT-2$ $x/r = 45$; трансформаторы $T-1$ $x/r = 35$ и $T-2$ $x/r = 44$; линии $L-1$, $L-2$ и $L-3$ выполнены проводом марки АСВ-300 при котором $x/r = 4$.

Решение. Для решения используем кривые коэффициента α (рис. П-6), с помощью которого приближенно учитываются затухающие периодической слагающей тока и наличие аperiodической слагающей тока к расчетному моменту времени размыкания контактов выключателя¹. Последнее для намечаемого к установке выключателя составляет 0,05 сек (3 пер).

Для нахождения расчетного отключаемого тока нужно сначала определить начальный сверхпереходный ток при трехфазном корот-

¹ При этом определяется действующее значение полного тока для расчетного момента времени.

жом замыкания непосредственно за выключателем В-4. Этот ток может быть найден упрощенно, без учета нагрузок и считая все э. д. с. равными номинальным напряжениям источников. Такая упрощенная схема замещения представлена на рис. 5-13,б. Реактивности ее элементов при $S_{0\epsilon} = 1000 \text{ Мва}$ и $U_{0\epsilon} = 15,75 \text{ кв}$, $U_{01\epsilon} = 242 \text{ кв}$, $U_{01V} = 525 \text{ кв}$, $U_{0V1} = 13,8 \text{ кв}$ (как это принято в решении задачи 5-14) составляют:

$$x_1 = 0,19 \cdot \frac{1000}{470} = 0,405; \quad x_2 = x_3 = x_4 = 0,21 \cdot \frac{1000}{2 \cdot 118} = 0,89; \quad \text{для}$$

остальных — из решения задачи 5-14:

$$x_{5,7} = x_6 + x_7 = 0,075 + 0,185 = 0,26; \quad x_8 = 0,247; \quad x_9 = 0;$$

$$x_{10} = 0,54; \quad x_{11} = 0,44; \quad x_{12} = 0,56; \quad x_{17} = 0,3;$$

$$x_{18} = 0,58; \quad x_{19} = 0,41; \quad x_{20} = 0,48.$$

Все э. д. с. принимаем равными единице.

По заданным значениям x/r находим относительные базисные величины активных сопротивлений элементов схемы замещения на рис. 5-13,б:

$$r_1 = \frac{0,405}{125} = 0,32 \cdot 10^{-2}; \quad r_2 = r_3 = r_4 = \frac{0,89}{70} = 1,27 \cdot 10^{-2};$$

$$r_{5,7} = \frac{0,26}{40} = 0,65 \cdot 10^{-2}; \quad r_8 = \frac{0,247}{45} = 0,55 \cdot 10^{-2}; \quad r_9 = 0;$$

$$r_{10} = \frac{0,54}{35} = 1,20 \cdot 10^{-2}; \quad r_{11} = \frac{0,44}{35} = 1,26 \cdot 10^{-2}; \quad r_{12} = \frac{0,56}{44} =$$

$$= 1,27 \cdot 10^{-2}; \quad r_{17} = \frac{0,3}{6} = 5 \cdot 10^{-2}; \quad r_{18} = \frac{0,58}{4} = 17 \cdot 10^{-2};$$

$$r_{19} = \frac{0,41}{4} = 10,25 \cdot 10^{-2}; \quad r_{20} = \frac{0,48}{4} = 12 \cdot 10^{-2}.$$

Приведем схему к элементарному виду:

$$x_{21} = 0,405 + 0,26 + [(0,58 + 0,48) // 0,41] = 0,961;$$

$$x_{22} = (0,89 + 0,44) // (0,89 + 0,54) // 0,961 = 0,4;$$

$$x_{23} = 0,4 + 0,247 = 0,647; \quad x_{24} = 0,89 + 0,56 = 1,45.$$

Аналогичным образом нетрудно найти

$$r_{23} = 1,64 \cdot 10^{-2} \quad \text{и} \quad r_{24} = 2,54 \cdot 10^{-2}.$$

Для каждой из независимых параллельных ветвей находим отношение x/r и для него по соответствующей кривой на рис. П-6—

наименее коэффициента α :

$$\text{ветвь } 23 \quad x/r = 0,647 / 1,64 \cdot 10^{-2} = 39,5, \quad \alpha = 1,3;$$

$$\text{ветвь } 24 \quad x/r = 1,45 / 2,54 \cdot 10^{-2} = 57, \quad \alpha = 1,25^*;$$

$$\text{ветвь } 17 \quad x/r = 6, \quad \alpha = 1.$$

Таким образом, искомым расчетный отключаемый ток будет:

$$I_{от.рас} = \left(\frac{1,3}{0,647} + \frac{1,25}{1,45} + \frac{1}{0,3} \right) 1,1 = 6,83 \text{ ка.}$$

$$I_0 = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 525} = 1,1 \text{ ка.}$$

Следует подчеркнуть, что этот ток определен при трехфазном коротком замыкании. Поскольку в системе 500 кв нейтраль заземлена наглухо, то должен быть также определен расчетный отключаемый ток при однофазном коротком замыкании (см. задачу 6-48). Но большему из этих токов, очевидно, и должны производиться выбор или проверка выключателя по его отключающей способности.

Задача 5-18

Для схемы и данных предыдущей задачи требуется определить величину отключаемого тока выключателя В-3 (на подстанции 220 кв) по условиям трехфазного короткого замыкания. Предполагается установить выключатель, полное время отключения которого составляет 0,06 сек (3 пер), а расчетное время замыкания его контактов 0,04 сек (2 пер).

Задача 5-19

Для генератора Г-1 и Г-2 одинаковой мощности связаны в точке А элементарной схемы на рис. 5-14. В ветви с реактивностью x_{11} произошло трехфазное короткое замыкание.

Требуется определить закономерности изменения во времени периодической слагающей токов в месте короткого и каждого генератора, считая, что автоматическое регулирование возбуждения у обоих генераторов отключено и до короткого замыкания они работали на холостом ходу с номинальным напряжением. Решение провести операторным методом, используя преобразование Лапласа.

Элементы схемы характеризуются следующими данными:

генератор Г-1 $x_d = 1,4$, $x'_d = 0,2$, $T_{1\sigma} = 7$ сек;

генератор Г-2 $x_d = 1,0$, $x'_d = 0,4$, $T_{1\sigma} = 5$ сек.

Исписие реактивности $x = 0,2$ и $x_{11} = 0,5$ выражены в относительных единицах при номинальных условиях генераторов.

Решение. Операторная реактивность генератора Г-1 будет:

$$x_{d1}(p) = \frac{x_d + x'_d T_{1\sigma} p}{1 + T_{1\sigma} p} = \frac{1,4 + 0,2 \cdot 7p}{1 + 7p} = \frac{1,4(1+p)}{1+7p} = \frac{a(p)}{b(p)},$$

* Это значение взято по пунктирной кривой, учитывающей затухание свободного сверхпереходного тока.

то же генератора Г-2 до узла М схемы

$$x_{a2}(p) = \frac{1 + 0,4 \cdot 5p}{1 + 5p} + 0,2 = \frac{1,2 + 3p}{1 + 5p} = \frac{c(p)}{d(p)}$$

Результирующая операторная реактивность схемы

$$x_{aE}(p) = \left[\frac{a(p)}{b(p)} \parallel \frac{c(p)}{d(p)} \right] + x_n = \frac{a(p)c(p) + x_n[a(p)d(p) + b(p)c(p)]}{a(p)d(p) + b(p)c(p)}$$

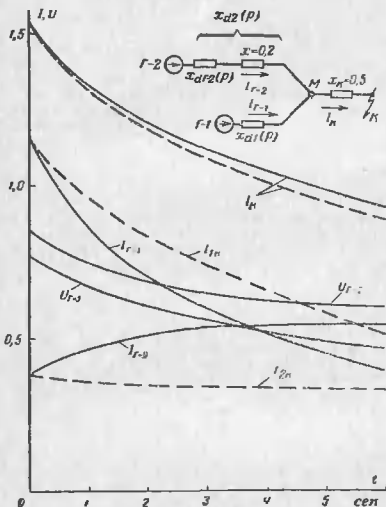


Рис. 5-14. К задачам 5-19 и 5-20. Кривые изменения во времени токов и напряжений при трехфазном коротком замыкании.

Относительная э. д. с. $E = 1$ и в операторной форме ее значение

$$E(p) = \frac{1}{p}$$

Операторное выражение для тока генератора Г-1 будет:

$$I_{r-1}(p) = \frac{1}{p x_{a2}(p)} = \frac{c(p) \parallel d(p)}{a(p) \parallel b(p) + c(p) \parallel d(p)} = \frac{b(p)c(p)}{p[a(p)c(p) + x_n[a(p)d(p) + b(p)c(p)]]}$$

или после подстановки численных значений и ряда преобразований

$$I_{r-1}(p) = \frac{(1+7p)(1,2+3p)}{p(18,2p^2 + 15,78p + 2,98)} = \frac{H_1(p)}{pF(p)}$$

Аналогично для тока генератора Г-2

$$I_{r-2}(p) = \frac{1,4(1+p)(1+5p)}{p(18,2p^2 + 15,78p + 2,98)} = \frac{H_2(p)}{pF(p)}$$

Для тока в месте короткого замыкания, очевидно, имеем:

$$I_n(p) = I_{r-1}(p) + I_{r-2}(p)$$

Из характеристического уравнения

$$pF(p) = p(18,2p^2 + 15,78p + 2,98) = 0$$

имеет корень $p=0$, что указывает на наличие принужденных (уставившихся) токов, и два другие корня $p_1 = -0,28$ и $p_2 = -0,587$ — отрицательные вещественные величины, что указывает на затухание свободных токов.

Постоянные времена затухания этих токов определяются через значения корней p_1 и p_2 :

$$T_1 = -\frac{1}{p_1} = -\frac{1}{-0,28} = 3,57 \text{ сек.}$$

$$T_2 = -\frac{1}{p_2} = -\frac{1}{-0,587} = 1,7 \text{ сек.}$$

Для перехода от изображений к временным функциям воспользуемся формулой разложения, которая при наличии нулевого корня и отсутствии кратных корней характеристического уравнения имеет вид:

$$I(t) = \frac{H(0)}{F(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{H(p_k)}{p_k F'(p_k)} e^{p_k t}$$

В данном случае производная $F'(p) = 36,4p + 15,78$.

После подстановки числовых значений и простейших преобразований получим:

$$I_{r-1} = 0,403 + 0,222e^{-0,28t} + 0,528e^{-0,587t};$$

$$I_{r-2} = 0,470 + 0,257e^{-0,28t} - 0,340e^{-0,587t};$$

$$I_n = I_{r-1} + I_{r-2} = 0,873 + 0,479e^{-0,28t} + 0,188e^{-0,587t}$$

По этим выражениям построены кривые, которые приведены на рис. 5-14 (сплошные линии). Интересно отметить, что, в то время как ток генератора $\Gamma-1$ затухает во времени, ток генератора $\Gamma-2$, напротив, возрастает, хотя никакого принужденного увеличения тока возбуждения не имеет места (по условию АРВ обоих генераторов отключены). Это увеличение тока обусловлено относительно быстрым затуханием тока генератора $\Gamma-1$.

На рис. 5-14 также показаны кривые изменения напряжений обоих генераторов. Они построены по выражениям, которые легко получить по найденным выражениям для токов и величинам внешних реактивностей. Так, для напряжения генератора $\Gamma-1$ имеем:

$$U_{\Gamma-1} = I_{\kappa} x_{\kappa} = 0,437 + 0,24e^{-0,38t} + 0,094e^{-0,58t}$$

и для напряжения генератора $\Gamma-2$

$$U_{\Gamma-2} = U_{\Gamma-1} + I_{\Gamma-2} x = 0,531 + 0,291e^{-0,28t} + 0,026e^{-0,58t}$$

Задача 5-20

На примере схемы с исходными данными предыдущей задачи показать сущность перехода к приближенной лучевой (радикальной) схеме, отвечающей условной эквивалентности в начальный момент переходного процесса. Для преобразованной схемы найти приближенное выражение для периодической слагающей тока в месте короткого замыкания и сопоставить результаты приближенного вычисления с полученными в предыдущей задаче.

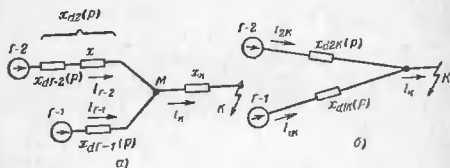


Рис. 5-15. К задаче 5-20.
а — исходная схема; б — эквивалентная лучевая схема.

Решение. Исходная схема (рис. 5-15, а) представляет трехфазную звезду, где ветвь с реактивностью x_{κ} является общей для обоих генераторов. Используя известное преобразование звезды в эквивалентный треугольник, найдем операционные реактивности непосредственных связей каждого генератора с точкой короткого замыкания. Эти реактивности (рис. 5-15, б) будут:

для генератора $\Gamma-1$

$$x_{d1k}(p) = x_{d1}(p) + x_{\kappa} + \frac{x_{\kappa} x_{d2}(p)}{x_{d2}(p)} = x_{d1}(p) + x_{\kappa} \left(1 + \frac{x_{d1}(p)}{x_{d2}(p)} \right);$$

для генератора $\Gamma-2$

$$x_{d2k}(p) = x_{d2}(p) + x_{\kappa} + \frac{x_{\kappa} x_{d1}(p)}{x_{d1}(p)} = x_{d2}(p) + x_{\kappa} \left(1 + \frac{x_{d2}(p)}{x_{d1}(p)} \right).$$

Такой переход совершенно строг (при принятых ранее допущениях). Из структуры выражений для $x_{d1k}(p)$ и $x_{d2k}(p)$ видно, что взаимное влияние генераторов при переходном процессе находит свое отражение в отношении операционных реактивностей $x_{d1}(p)$ и $x_{d2}(p)$. Естественно, это преобразование не снижает порядок характеристического уравнения и не упрощает решение задачи.

Используемое на практике приближенное решение заключается в том, что отношение операционных реактивностей заменяют отношением реактивностей тех же ветвей для начального момента переходного процесса. Тогда приближенные выражения для операционных реактивностей лучевой схемы на рис. 5-15, б приобретают следующий вид:

$$x_{d1k}(p) = x_{d1}(p) + x_{\kappa} \left(1 + \frac{x'_{d1}}{x'_{d2}} \right) = x_{d1}(p) + \frac{x_{\kappa}}{C_1};$$

$$x_{d2k}(p) = x_{d2}(p) + x_{\kappa} \left(1 + \frac{x'_{d2}}{x'_{d1}} \right) = x_{d2}(p) + \frac{x_{\kappa}}{C_2};$$

где $C_1 = \frac{x'_{d2}}{x'_{d1} + x'_{d2}}$ и $C_2 = \frac{x'_{d1}}{x'_{d1} + x'_{d2}}$ — коэффициенты распределения в соответствующих генераторных ветвях, считая в общей величине $C_{\kappa} = 1$.

При заданных величинах $x'_{d1} = 0,2$ и $x'_{d2} = 0,6$ имеем:

$$C_1 = \frac{0,6}{0,2 + 0,6} = 0,75 \text{ и } C_2 = \frac{0,2}{0,2 + 0,6} = 0,25.$$

Соответственно приближенные значения операционных реактивностей лучевой схемы (рис. 5-15, б) будут:

$$x_{d1k}(p) = \frac{1,4(1+p)}{1+7p} + \frac{0,5}{0,75} = \frac{2,067 + 6,07p}{1+7p};$$

$$x_{d2k}(p) = \frac{1,2+3p}{1+5p} + \frac{0,5}{0,25} = \frac{3,2+13p}{1+5p},$$

и в операторной форме токи в этих ветвях:

$$I_{1k}(p) = \frac{1}{p x_{d1k}(p)} = \frac{1+7p}{p(2,067+6,07p)}$$

$$\text{и } I_{2k}(p) = \frac{1}{p x_{d2k}(p)} = \frac{1+5p}{p(3,2+13p)}.$$

Переход от изображений к оригиналам приводит в данном случае к следующим зависимостям изменения этих токов во времени:

$$I_{1\kappa} = 0,484 + 0,669e^{-0,28t};$$

$$I_{2\kappa} = 0,312 + 0,075e^{-0,28t}.$$

Следовательно, приближенное выражение для тока в месте короткого замыкания будет:

$$I_{k1} = I_{1k1} + I_{2k1} = 0,796 + 0,669e^{-0,84t} + 0,075e^{-0,84t}.$$

Построенная по нему кривая показана на рис. 5-14 (пунктирная линия). Там же пунктирными линиями проведены кривые изменения токов I_{1k} и I_{2k} .

Как видно, с течением времени погрешность приближенного определения тока в месте короткого замыкания остается отрицательной. При установившемся режиме она в данном случае достигает -9% , а в интервале до 2 сек она не превышает -2% . Что касается токов I_{1k} и I_{2k} , то они являются только соответствующими частями токов каждого генератора, и поэтому их нельзя сопоставлять соответственно с $I_{Г-1}$ и $I_{Г-2}$.

Отметим, что после того, как исходная схема преобразована в приближенную радиальную схему, подсчет тока в каждой ветви легко может быть сделан без использования операторного метода. Так, например, в ветви генератора $Г-1$ схема на рис. 5-15,б значения реактивностей будут:

$$x'_{d1} = 0,2 + \frac{0,5}{0,75} = 0,867,$$

при установившемся режиме

$$x_{d1} = 1,4 + \frac{0,5}{0,75} = 2,067.$$

Постоянная времени затухания свободного переходного тока в этой ветви

$$T'_{d1} = 7 \cdot \frac{0,867}{2,067} = 2,94 \text{ сек или } p_1 = -\frac{1}{2,94} = -0,34,$$

в выражение для тока в данной ветви будет:

$$I_{1k1} = \frac{1}{2,067} + \left(\frac{1}{0,867} - \frac{1}{2,067} \right) e^{-0,34t} = 0,484 + 0,669e^{-0,34t}.$$

т. е. то же, что получено выше, как этого и следовало ожидать.

Задача 5-21

Выполнить решение задачи 5-19 для случая, когда реактивность $x=0,2$ включена в цепь генератора $Г-1$, а генератор $Г-2$ связан с узлом M схемы на рис. 5-14 непосредственно. Все остальные условия сохранятся без изменения.

Задача 5-22

Для схемы на рис. 5-14 и при исходных данных задачи 5-19 требуется определить закон изменения во времени периодической слагающей токов в месте короткого замыкания и каждо-

го генератора, считая, что автоматическое регулирование возбуждения имеется:

- только у генератора $Г-1$, при этом его $I_{Г-1} = 4,2$ и $T_e = 1 \text{ сек}$;
 - только у генератора $Г-2$, при этом его $I_{Г-2} = 3,1$ и $T_e = 1 \text{ сек}$;
 - у обоих генераторов с указанными значениями $I_{Г-1}$ и T_e .
- До возникновения короткого замыкания генераторы работали на холостом ходу с номинальным напряжением.

Решение. Аналогично решению задач 4-32 и 4-34 учет действия АРВ произведем путем наложения на величины токов и напряжений, которые были найдены в решении задачи 5-19, соответствующих приращений, обусловленных увеличением принужденных токов возбуждения заданных генераторов.

а) АРВ только у генератора $Г-1$

Определим относительно генератора $Г-1$ операторную реактивность внешней цепи (рассматривая $T-2$ как элемент с $x_{d2}(p)$ и E_{d2})

$$x_{d2}(p) = x_{d2}(p) // x_M = \frac{1,2 + 3p}{1 + 5p} // 0,5 = \frac{0,6 + 1,5p}{1,7 + 5,5p}.$$

рис. $x_{d2}(p) = \frac{1,2 + 3p}{1 + 5p}$ — операторная реактивность генератора $Г-2$

до узла M схемы (до точки присоединения ветви с $x_M = 0,5$).

Для определения приращения тока генератора $Г-1$ воспользуемся операторным выражением (4), которое было выведено в решении задачи 4-32, т. е.

$$\Delta I_{Г-1}(p) = \frac{\Delta U_{Г-1}^{\circ}(p) x_{ad}}{r_{Г-1} \{x_{d1} + x_{d2}(p) + T_{eГ-1} [x'_{d1} + x_{d2}(p)]\}}.$$

В данном случае:

$$x_{d1} + x_{d2}(p) = 1,4 + \frac{0,6 + 1,5p}{1,7 + 5,5p} = \frac{2,98 + 9,2p}{1,7 + 5,5p};$$

$$x'_{d1} + x_{d2}(p) = 0,2 + \frac{0,6 + 1,5p}{1,7 + 5,5p} = \frac{0,94 + 2,6p}{1,7 + 5,5p};$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta U_{Г-1}^{\circ}(p) x_{ad}}{r_{Г-1}} &= \frac{\Delta U_{Г-1}^{\circ} x_{ad}}{r_{Г-1} p (1 + T_e p)} = \frac{\Delta I_{Г-1}^{\circ} x_{ad}}{p (1 + T_e p)} = \\ &= \frac{\Delta E_{Г-1}^{\circ}}{p (1 + T_e p)} \frac{4,2 - 1}{p (1 + p)} = \frac{3,2}{p (1 + p)}. \end{aligned}$$

После подстановки указанных числовых значений (имея также в виду, что $T_{eГ-1} = 7 \text{ сек}$) и ряда преобразований, операторное выра-

* Завышенное значение T_e принято, чтобы замедлять переходный процесс при АРВ.

жение для приращения тока генератора $\Gamma-1$ приобретает следующий вид:

$$\Delta I_{\Gamma-1}(p) = \frac{1,83(1+3,24p)}{p(1+p)(6,1p^2+5,3p+1)}.$$

Корни характеристического уравнения

$$p(1+p)(6,1p^2+5,3p+1) = 0$$

получаются следующими: $p_1 = -0,28$; $p_2 = -0,587$; $p_3 = -1$ и $p_4 = 0$.

Значения корней p_1 и p_2 разумеется, такие же, как и при решении задачи 5-19, поскольку характеристическое уравнение, где отражаются параметры обоих генераторов, остается неизменным. В данном случае нетрудно убедиться, что это характеристическое уравнение отличается от характеристического уравнения в задаче 5-19 на постоянный множитель 2,98.

После перехода от изображения к оригиналу получим для приращения тока генератора $\Gamma-1$:

$$\Delta I_{\Gamma-1} = 1,83 - 0,46e^{-0,388t} - 3,64e^{-0,587t} + 2,27e^{-t}$$

которое в сумме с током генератора $\Gamma-1$ при отсутствии АРВ дает:

$$I_{\Gamma-1} = 2,233 - 0,238e^{-0,388t} - 3,112e^{-0,587t} + 2,27e^{-t}.$$

Чтобы найти в операторной форме приращение тока в месте короткого замыкания, достаточно $\Delta I_{\Gamma-1}(p)$ распределить между двумя параллельными ветвями, т. е.

$$\Delta I_k(p) = \Delta I_{\Gamma-1}(p) \frac{x_d(p)}{x_k} = \frac{1,29(1+2,5p)}{p(1+p)(6,1p^2+5,3p+1)}.$$

Оригинал этого операторного выражения получается следующим:

$$\Delta I_{k2} = 1,29 - 1,03e^{-0,388t} - 1,33e^{-0,587t} + 1,07e^{-t}.$$

После суммирования с током I_{k1} без учета АРВ, который был найден в решении задачи 5-19, получим:

$$I_{k2} = 2,163 - 0,551e^{-0,388t} - 1,142e^{-0,587t} + 1,07e^{-t}.$$

Для тока генератора $\Gamma-2$, очевидно, имеем:

$$I_{\Gamma-2} = I_{k2} - I_{\Gamma-1} = -0,07 - 0,313e^{-0,388t} + 1,57e^{-0,587t} - 1,2e^{-t}.$$

В рассматриваемой схеме легко получить выражения для напряжений обоих генераторов. Так, для генератора $\Gamma-1$ имеем:

$$U_{\Gamma-1} = I_{k2}x_k = 1,082 - 0,276e^{-0,388t} - 0,571e^{-0,587t} + 0,535e^{-t}$$

для генератора $\Gamma-2$

$$U_{\Gamma-2} = U_{\Gamma-1} + I_{\Gamma-2}x = 1,068 - 0,339e^{-0,388t} - 0,177e^{-0,587t} + 0,298e^{-t}.$$

Все полученные выражения справедливы до момента, пока напряжение генератора $\Gamma-1$ не достигнет нормального значения, после чего практически можно считать, что переходный процесс закончился.

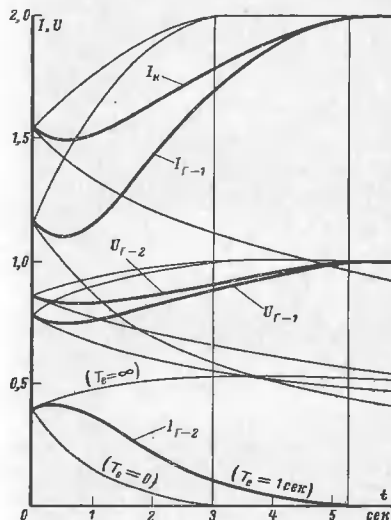


Рис. 5-16. К задаче 5-22. Кривые изменения во времени токов и напряжений при коротком замыкании. Генератор $\Gamma-1$ с АРВ.

На рис. 5-16 приведены кривые (толстые линии), которые построены по найденным выражениям. Как видно, нормальное напряжение генератора $\Gamma-1$ (и одновременно генератора $\Gamma-2$) наступит через 5,2 сек. Для каждой кривой показаны (тонкими линиями) пределы, в которых она может находиться при изменении величины постоянной времени T_e . Верхний предел отвечает случаю $T_e = 0$,

г. е. внезапному приращению напряжения U_{j0} до U_{jnp} (при заданной величине последнего), а нижний — $T_e = \infty$, т. е. когда АРВ вообще отсутствует. Исключением составляет кривая $I_{Г-2}$, для которой указанные пределы меняются местами.

Для $t \geq 5,2$ сек ток в генераторе Г-2 отсутствует и к месту короткого замыкания ток поступает только от генератора Г-1.

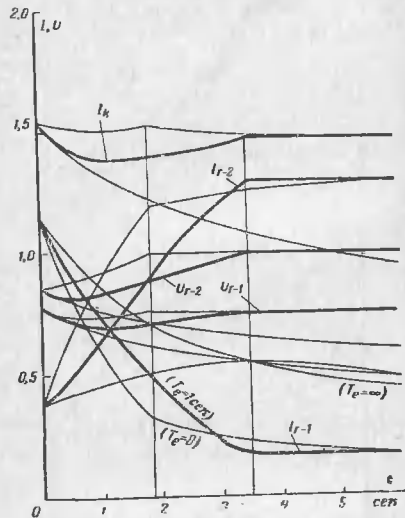


Рис. 5-17. К задаче 5-22. Кривые изменения во времени токов и напряжений при коротком замыкании. Генератор Г-2 с АРВ.

То обстоятельство, что у генератора Г-1 наступит режим нормального напряжения, можно было заранее предвидеть, поскольку

$$x_{вр Г-1} = x_d \frac{U_{н}}{E_{вр} - U_{н}} = 1,4 \cdot \frac{1}{2,1 - 1} = 0,44 < x_k = 0,5.$$

б) АРВ только у генератора Г-2

Решение для данного случая рекомендуется выполнять читателю самостоятельно. Получающиеся при этом кривые (их выраже-

ния даны в ответе) показаны на рис. 5-17 (толстые линии). Там же для сравнения указаны (тонкими линиями) пределы, в которых может находиться каждая кривая при изменении T_e от нуля до бесконечности. Для всех кривых, кроме $I_{Г-1}$, верхний предел соответствует $T_e = 0$, а нижний — $T_e = \infty$. Для кривой $I_{Г-1}$ эти пределы меняются местами.

Как видно, нормальное напряжение генератора Г-2 наступает примерно через 3,5 сек, при этом напряжение генератора Г-1 достигает приблизительно того значения, которое у него было в начальный момент короткого замыкания, и далее остается без изменения. Соответственно ток $I_{Г-1}$ к моменту $t = 3,5$ сек достигает своего установившегося значения.

Естественно, чем меньше T_e , тем раньше наступает у генератора Г-2 режим нормального напряжения. Так, при $T_e = 0$ это имеет место через 1,8 сек.

в) АРВ у обоих генераторов

Полученные в пп. «а» и «б» решения позволяют путем наложения приращений токов (с учетом их знаков) получить законченную картину изменения результирующих приращений токов, обусловленных одновременным действием АРВ обоих генераторов. Так, для ветви короткого замыкания это результирующее приращение тока составит:

$$\Delta I_k = 2,28 - 2,91e^{-0,28t} - 0,44e^{-0,587t} + 1,07e^{-t}.$$

Суммируя его с током I_k , который был найден без учета АРВ (см. решение задачи 5-19), получим:

$$I_k = 3,163 - 2,431e^{-0,28t} - 0,252e^{-0,587t} + 1,07e^{-t}.$$

Следовательно, напряжение генератора Г-1 при одновременном действии АРВ у обоих генераторов будет:

$$U_{Г-1} = I_k x_k = 1,577 - 1,216e^{-0,28t} - 0,126e^{-0,587t} + 0,535e^{-t}.$$

Аналогичным образом, прибавив к $U_{Г-1}$ падение напряжения в $r = 0,2$ от тока $I_{Г-2}$, получим выражение для напряжения генератора Г-2:

$$U_{Г-2} = 1,831 - 1,479e^{-0,28t} - 0,034e^{-0,587t} + 0,53e^{-t}.$$

Выражения для токов генераторов получаются следующими:

$$I_{Г-1} = 1,883 - 1,128e^{-0,28t} - 0,722e^{-0,587t} + 1,12e^{-t};$$

$$I_{Г-2} = 1,27 - 1,303e^{-0,28t} + 0,47e^{-0,587t} - 0,05e^{-t}.$$

Все эти выражения справедливы до момента, пока у одного из генераторов не наступит режим нормального напряжения. Построенные по ним кривые приведены на рис. 5-18 (толстые линии). Генератор Г-2, как более удаленного от места короткого замы-

кания, напряжение достигает нормального значения раньше, чем у генератора Г-1. В данном случае, как видно по рис. 5-18, это имеет место через 1,8 сек. Начиная с этого момента времени, генератор Г-2 практически можно рассматривать как источник бесконечной мощности.

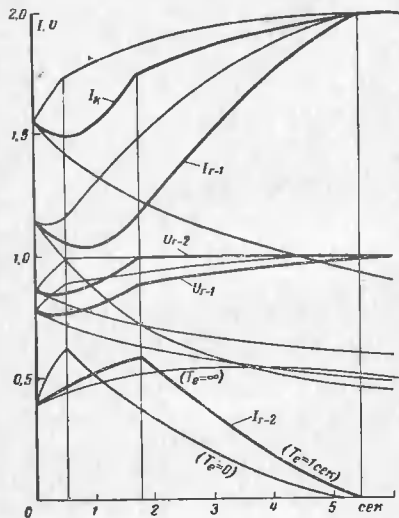


Рис. 5-18. К задаче 5-22. Кривые изменения во времени токов и напряжений при коротком замыкании. Оба генератора с АРВ.

нечной мощности. При таких условиях новое значение постоянной времени T'_d генератора Г-1 будет:

$$T'_d = 7 \cdot \frac{0,2 + 0,143}{1,4 + 0,143} = 1,56 \text{ сек}$$

или

$$p = -\frac{1}{T'_d} = -\frac{1}{1,56} = -0,643,$$

где $x = 0,2 // 0,5 = 0,143$.

250

По приведенному выше выражению для I_k можно установить, что при $t = 1,8$ сек ток $I_k = 1,77$, причем он состоит из свободного тока $I_{k,св} = 0,36$ и принужденного тока $I_k = 1,41$. При предельном принуждении генератора Г-1 принужденный ток в месте короткого замыка-

$$I_{k,пр} = \frac{1,4}{0,175 + 0,5} = 2,07;$$

соответственно з. д. с.

$$E_w = \frac{4,2 \cdot 0,2 + 1 \cdot 1,4}{0,2 + 1,4} = 1,4$$

и эквивалентная реактивность

$$x_w = 0,2 // 1,4 = 0,175.$$

Таким образом, для $t \geq 1,8$ сек выражение для тока I_k с достаточной для практики точностью можно записать в следующем виде:

$$I_k = 1,41 + 0,36e^{-0,643(t-1,8)} + (2,07 - 1,41) \frac{F(t) - 0,41}{1 - 0,41},$$

$$F(t) = 1 - \frac{T'_d e^{-t/T'_d} - T_e e^{-t/T_e}}{T'_d - T_e} = 1 - \frac{1,56e^{-t/1,56} - e^{-t}}{1,56 - 1} = 1 - 2,78e^{-0,643t} + 1,78e^{-t};$$

или

$$t = 1,8 \text{ сек эта функция } F(1,8) = 0,41.$$

Соответственно этому напряжению $U_{Г-1}$ для $t \geq 1,8$ сек будет:

$$U_{Г-1} = I_k x_w = 0,705 + 0,18e^{-0,643(t-1,8)} + 0,66 \frac{F(t) - 0,41}{1 - 0,41}.$$

Для токов в генераторах, очевидно, будем иметь (для $t \geq 1,8$ сек):

$$I_{Г-2} = \frac{1 - U_{Г-1}}{0,2}$$

$$I_{Г-1} = I_k - I_{Г-2}.$$

Участки кривых на рис. 5-18 при $t \geq 1,8$ сек иллюстрируют изменение соответствующих величин по этим выражениям. Нормальное напряжение генератора Г-1 устанавливается примерно через 1 сек.

Тонкие линии указывают, как и раньше, пределы, в которых является каждая кривая при изменении T_e от нуля до бесконечности.

Задача 5-23

Генератор Г 120 Мва, 10,5 кВ, $x_d = 1,4$, $x'_d = 0,2$, $T_{10} = 7$ сек через понижающий трансформатор Т 63 Мва, 115/10,5 кВ, $u_n = 10,5\%$ связан с системой С, которую можно рассматривать как источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 115 кВ. К шинам

генераторного напряжения (рис. 5-19,а) присоединил линейный реактор P 10 кв, 1000 а, $x=8\%$, за которым произошло трехфазное короткое замыкание.

Требуется построить кривые изменения периодической составляющей тока в реакторе, генераторе и трансформаторе и напряжения генератора при условии, что последний:

а) без АРВ и предварительно работал на холостом ходу с номинальным напряжением;

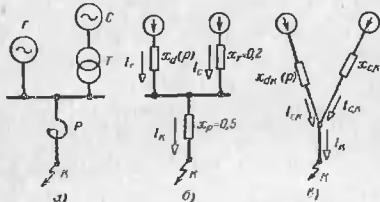


Рис. 5-19. К задаче 5-23.

а — исходная схема; б — схема замещения; в — лучевая схема замещения.

б) с АРВ при $I_{гнр}=4,2$ и $T_g=1$ сек*; предварительно работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Решение. Выразим реактивности трансформатора и реактора в относительных единицах при номинальных условиях генератора:

$$x_{гн} = 0,105 \cdot \frac{120}{63} = 0,2;$$

$$x_p = 0,08 \cdot \frac{6,6}{1,0} \cdot \frac{10}{10,5} = 0,5;$$

$$I_{н.г} = \frac{120}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 6,6 \text{ кА} \text{ — номинальный ток генератора.}$$

Операторная реактивность генератора составляет:

$$x_d(p) = \frac{1,4 + 7 \cdot 0,2p}{1 + 7p} = \frac{1,4(1+p)}{1+7p}.$$

Следовательно, схема замещения имеет вид рис. 5-19,б. Легко заметить, что она является частным случаем схемы на рис. 5-14 (задача 5-19), когда в последней генератор Г-2 заменен источником бесконечной мощности.

Решение данной задачи можно выполнить без применения операторного метода.

* Замышенное значение T_g принято с целью замедлить протекание переходного процесса.

а) Генератор без АРВ

Генератор и систему заменим эквивалентным источником, у которого

$$x'_{d0} = \frac{0,2}{2} = 0,1; \quad x_{d0} = 0,2 // 1,4 = 0,175;$$

$$T'_{г0} = T_g \cdot \frac{0,2 + 0,2}{1,4 + 0,2} = 1,75 \text{ сек} \text{ и } E'_{г0} = E_{г0} = 1.$$

При коротком в точке К

$$x'_2 = 0,1 + 0,5 = 0,6; \quad x_2 = 0,175 + 0,5 = 0,675;$$

$$T'_a = 1,75 \cdot \frac{0,1 + 0,5}{0,175 + 0,5} = 1,56 \text{ сек}$$

и величина тока в реакторе (или в месте короткого) будет:

$$I_p = I_K = \frac{1}{0,675} + \left(\frac{1}{0,6} - \frac{1}{0,675} \right) e^{-t/1,56} = 1,48 + 0,19e^{-t/1,56}.$$

Напряжение генератора

$$U_g = x_p I_K = 0,74 + 0,095e^{-t/1,56}.$$

Ток в трансформаторе (или от системы)

$$I_{гг} = I_c = \frac{U_c - U_g}{x_{гг}} = 1,3 - 0,475e^{-t/1,56};$$

ток генератора

$$I_g = I_n - I_c = 0,18 + 0,665e^{-t/1,56}.$$

Построенные по этим выражениям кривые показаны на рис. 5-20 сплошными линиями. Рост тока от системы обусловлен затуханием тока генератора.

Дополнительно остановимся еще на одном вопросе. Пусть схема на рис. 5-19,б приведена к лучевой схеме на рис. 5-19,в, эквивалентной по условиям начального момента короткого замыкания (см. решение задачи 5-20). Реактивности лучей этой схемы одинаковы и составляют:

$$x_{гн} = x_{гн} = 0,2 + \frac{0,5}{0,5} = 1,2.$$

Резистивность генераторной ветви при установившемся режиме короткого замыкания, очевидно, будет:

$$x_{гг.н} = (1,4 - 0,2) + 1,2 = 2,4.$$

Постоянная времени такой генераторной ветви

$$T'_{гг.н} = 7 \cdot \frac{1,2}{2,4} = 3,5 \text{ сек (т. е. в 2,24 раза больше).}$$

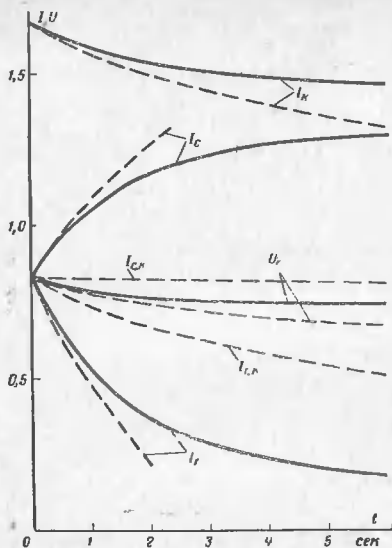


Рис. 5-20. К задаче 5-23. Кривые изменения токов и напряжения при трехфазном коротком замыкании при отсутствии АРВ у генератора (толстые линии — точное решение, тонкие линии — приближенное решение).

Ток в месте короткого (в реакторе) при таком представлении будет:

$$I_k = I_r = I_{c,k} + I_{r,k} = \frac{1}{1,2} + \frac{1}{2,4} + \left(\frac{1}{1,2} - \frac{1}{2,4} \right) e^{-t/3,5} = 1,252 + 0,418e^{-t/3,5},$$

и напряжение генератора $U_r = 0,626 + 0,209e^{-t/3,5}$.

Теперь, зная напряжения U_c и U_r , легко получить ток от системы I_c , а затем ток генератора I_g . Найденные таким образом приближенные закономерности изменения токов и напряжения представлены на рис. 5-20 пунктирными линиями.

Как и следовало ожидать, отклонения от действительных закономерностей с увеличением времени progressively возрастают. Если для тока I_k и напряжения U_r их приближенные значения достаточно приемлемы в пределах до 2 сек, то для токов I_c и I_g это уже справедливо для меньшего отрезка времени.

Прибегать к подобному приближенному решению целесообразно при использовании метода расчетных кривых.

б) Генератор с АРВ

Предельная э. д. с. эквивалентного источника, очевидно, будет:

$$F_{\text{пред.в}} = \frac{4,2 \cdot 0,2 + 1 \cdot 1,4}{0,2 + 1,4} = 1,4,$$

и предельное приращение установившегося тока короткого замыкания от действия АРВ

$$\Delta I_{\text{кр}} = \frac{1,4 - 1}{0,675} = 0,59.$$

Изменение приращения принужденного тока в месте короткого замыкания:

$$\begin{aligned} \Delta I_k &= 0,59F(t) = 0,59 \left(1 - \frac{1,56e^{-t/1,56} - e^{-t/1}}{1,56 - 1} \right) = \\ &= 0,59(1 - 2,78e^{-t/1,56} + 1,78e^{-t}). \end{aligned}$$

Прибавив это приращение к току без учета действия АРВ, получим:

$$I_k = 1,842 - 1,431e^{-t/1,56} + 1,05e^{-t}.$$

Соответственно для других величин имеем:

$$U_r = 0,921 - 0,716e^{-t/1,56} + 0,525e^{-t};$$

$$I_c = 0,395 + 3,58e^{-t/1,56} - 2,625e^{-t};$$

$$I_r = 1,447 - 5,011e^{-t/1,56} + 3,675e^{-t}.$$

Эти выражения справедливы до тех пор, пока напряжение генератора не достигло нормального значения, после чего переходный процесс прайтически можно считать законченным. Построенные по ним кривые приведены на рис. 5-21 (толстые линии). В данном случае, как видно, режим нормального напряжения наступает через 1,1 сек.

Для сравнения на рис. 5-21 тонкими линиями показаны пределы, в которых находится каждая из кривых. Верхние кривые для I_k , I_r и U_r соответствуют случаю, когда $T_e = 0$, а нижние — когда $T_e = \infty$ (т. е. когда нет АРВ). Для тока I_c эти пределы меняются местами. Действительно, чем меньше T_e (при измененном $I_{\text{кр}}$), тем раньше устанавливается режим нормального напряжения генератора, при этом действие системы в питании короткого замыкания прекращается (при выключении по фазе напряжений генератора и системы).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ СИСТЕМЫ

Глава шестая

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ОДНОКРАТНОЙ
ПОПЕРЕЧНОЙ НЕСИММЕТРИИ

Рассматриваемые в настоящей главе случаи однократной поперечной несимметрии системы и возникающие при этом переходные электромагнитные процессы наиболее часто встречаются на практике. Все виды несимметричных коротких замыканий в одной точке системы являются различными видоизменениями однократной поперечной несимметрии. Сюда также могут быть отнесены различные комбинации включения несимметричных нагрузок, которые можно рассматривать как частные случаи несимметричных коротких замыканий.

Вследствие большой актуальности относящихся в данной главе вопросов в ней помещено много задач, что привело к значительному ее объему. Основные соотношения между симметричными составляющими для токов и напряжений в месте несимметричного короткого замыкания, а также расчетные выражения для каждого вида короткого замыкания в одной точке системы приведены в приложении П-3.

По всем задачам предполагается, что периодическая составляющая тока несимметричного режима состоит только из основной гармоники, т. е. не учитываются высшие гармоники, которые могут возникать в таких режимах. Значительное влияние последних сказывается у машин с резной несимметрией их роторов в продольной и поперечной осях и особенно при наличии в цепи продольной емкости, что может привести к возникновению резонанса (или, постоянно, близко к нему) на какой-либо из высших гармоник. При отсутствии таких специфических

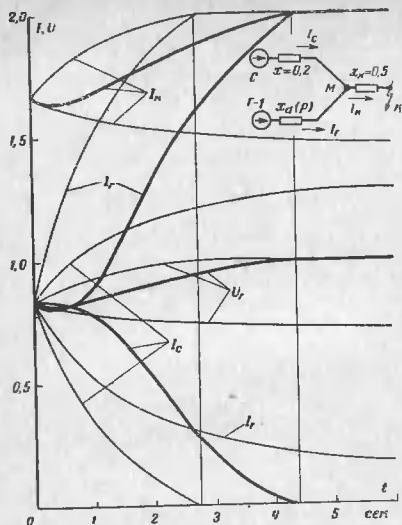


Рис. 5-21. К задаче 5-23. Кривые изменения токов и напряжения при трехфазном коротком замыкании при наличии АРВ у генератора (толстые линии — при $T_g=1$ сек, тонкие линии — при $T_g=0$ и $T_g=\infty$).

Задача 5-24

Выполнить решение задачи 5-19 для частного случая, когда у генератора Г-2 постоянная времени $T_{g0}=\infty$. При этом для генератора Г-1 рассмотреть три возможных варианта, когда его автоматическое регулирование возбуждения (АРВ):

- а) отключено (или $T_g=\infty$);
- б) включено и $T_g=0$;
- в) включено и $T_g=1$ сек.

Полученные результаты рекомендуется представить в виде соответствующих кривых изменений токов и напряжений во времени. Кроме того, дать пояснение, чему эквивалентен генератор Г-2 с такой постоянной времени своей обмотки возбуждения.

Условий проявления высших гармоник сравнительно мало, и им обычно пренебрегают в практических расчетах, как-то: для релейной защиты, проверки и выбора аппаратов, расчета защитных заземлений и др.

Очень важным выводом из применения теории симметричных составляющих к исследованию и расчету несимметричных коротких замыканий является так называемое правило эквивалентности прямой последовательности, в соответствии с которым ток прямой последовательности любого вида несимметричного короткого замыкания можно рассматривать (пренебрегая высшими гармониками) как ток трехфазного короткого замыкания при удалении аварийной точки на дополнительное сопротивление. Величина последнего зависит от вида короткого замыкания и определяется только результирующими сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей относительно места короткого замыкания.

В соответствии с этим правилом все методы расчета трехфазного короткого замыкания могут быть использованы для расчета токов и напряжений прямой последовательности любого несимметричного короткого замыкания. Что касается токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей, то они, как известно, находятся в прямой пропорциональности с током прямой последовательности в месте несимметричного короткого замыкания и, следовательно, их закон изменения также известен.

В первых задачах данной главы (до задачи 6-9 включительно) рассматриваются междуфазные замыкания без соединения с землей, т. е. в них отсутствуют составляющие нулевой последовательности. На простых схемах здесь показано влияние неповрежденной фазы (задачи 6-2, 6-3), присоединенной нагрузки (задачи 6-4, 6-6), различного затухания токов (задачи 6-8, 6-9).

Сравнение всех видов короткого замыкания в одной и той же точке системы дано в задачах 6-11—6-13.

Встречающийся на практике случай однофазного замыкания в цепи, питаемой через трехфазный трансформатор с соединением обмоток Y/Y_0-12 , рассмотрен в задаче 6-14.

Вопросы, связанные с нахождением распределения токов и напряжений в схеме при однократной несимметрии, рассмотрены в задачах, начиная с задачи 6-15.

Для иллюстрации анализа и получения расчетных напряжений для нового вида несимметричного короткого замыкания в задаче 6-20 рассмотрен случай так называемого однофазно-двухфазного короткого замыкания.

Поскольку современные релейные защиты и автоматические устройства, применяемые на ответственных участках системы, имеют малые времена действия, то выполняемые для этой цели расчеты коротких замыканий обычно делают для начального момента короткого замыкания, т. е. находят начальные значения периодической составляющей токов (начальный сверхпереходный или переходный ток). Это допущение тем более оправдано, что, особенно при несимметричных коротких замыканиях, в крупной системе изменение периодической составляющей тока во времени проявляется мало, если не наступает заметных качаний машин (см. далее).

В соответствии с этим в задачах 6-22—6-24 подробно рассмотрен начальный момент различных видов короткого замыкания, происходящих на выводах типового типа генератор — трансформатор, связанного с мощной системой. Здесь дано построение векторных диаграмм токов и напряжений на обеих сторонах трансформатора, а также показаны влияние и учет начального углового сдвига между э. д. с. генератора и напряжением системы.

Характерные расчеты коротких замыканий, проводимые при проектировании и настройке релейных защит воздушных линий, приведены в задачах 6-25—6-33. Существенно важным здесь является учет взаимной индукции в удаленной последовательности, влияние которой сильно проявляется на распределении токов нулевой последовательности. Учет взаимной индукции нулевой последовательности между цепями разных напряжений показан в задаче 6-48.

Циркуляция токов нулевой последовательности в цепи, содержащей автотрансформаторы, имеет некоторые особенности. В частности, даже если нейтраль автотрансформатора не заземлена, то при наличии обмотки, соединенной треугольником, через такой автотрансформатор может протекать ток нулевой последовательности. Все эти вопросы подробно освещены в задачах 6-34—6-38.

Для проведения различных испытаний в условиях эксплуатации приходится прибегать к искусственным условиям, создавая их из выделенных для испытания элементов. Подобного рода пример рассмотрен в задаче 6-40.

В задачах 6-42—6-44 показано использование записей автоматических приборов, по которым могут быть определены виды и местоположения возникших коротких замыканий и построены соответствующие векторные диаграммы.

Применение практических методов расчета токов короткого замыкания для различных моментов времени иллюстрировано в задачах 6-45—6-50, причем в последней из них показан также учет активных сопротивлений воздушной линии, для которой проведен расчет коротких замыканий.

Использование уравнений для определения изменения периодической слагающей тока во времени иллюстрировано в задачах 6-52 и 6-53.

Как отмечалось выше, изменение углового сдвига между э. д. с. источников питания может очень сильно сказываться на характере изменения во времени как тока в месте короткого замыкания, так и токов в других ветвях (особенно в связях между источниками). В задаче 6-54 это показано для условий конкретной схемы, которая с той же целью использована в задаче 5-15 для условий трехфазного короткого замыкания.

В последней задаче данной главы (задача 6-56) показано взаимное влияние генераторов при несимметричных коротких замыканиях. Ее решение выполнено с применением операторного метода. Следует обратить внимание на различие в закономерностях изменения тока прямой последовательности и токов обратной и нулевой последовательности.

Задача 6-1

При включении асинхронного двигателя АД, питающегося от шин 6 кВ подковообразной подстанции (рис. 6-1, а), одна фаза из-за неисправности выключателя В осталась разомкнутой. Для этих условий определить величину начального пускового тока и оценить, насколько (в процентах) уменьшился пусковой момент двигателя.

Система характеризуется реактивностью $x_1 = x_2 = 26,4$ Ом, при этом в схеме прямой последовательности за указанной реактивностью приложено неизменное напряжение 115 кВ.

Трансформатор Т 10 Мва, 115/6,3 кВ, $u_k = 10\%$. Асинхронный двигатель АД 4,0 Мвт, 6 кВ, $\cos \varphi = 0,87$, $\eta = 0,92$. $I_{пуск} = 4,5$.

Нагрузка Н 2,5 Мва, в начальный момент характеризуется $x_1 = x_2 = 0,35$ и $E'' = 0,85$ (при $U_{6,3} = 6,3$ кВ).

Решение. Пуск двигателя АД на двух фазах можно рассматривать как двухфазное короткое замыкание на реактивностью заторможенного двигателя, которая в прямой и обратной последователь-

ности одинакова. Таким образом, для заданных условий комплексная схема имеет вид, приведенный на рис. 6-1, б, где N — нейтральная точка обмотки статора двигателя. Указанные на схеме величины реактивностей и э. д. с. выражены в относительных единицах при $S_B = 10$ Мва, $U_{6,3} = 6,3$ кВ, $U_{6,3} = 115$ кВ, $i_{6,3} = 0,92$ ка.

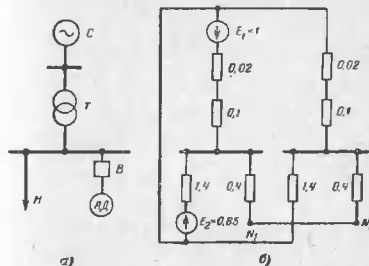


Рис. 6-1. К задаче 6-1.

а — исходная схема; б — комплексная схема замыкания.

Остановимся на определении реактивности двигателя при базисных условиях.

Номинальная полная мощность двигателя

$$S_N = \frac{4}{0,87 \cdot 0,92} = 5 \text{ Мва,}$$

и исходная реактивность

$$x_n = \frac{1}{4,5} \cdot \frac{10}{5} \left(\frac{6}{6,3} \right)^2 = 0,4.$$

Результирующие реактивности относительно точки N

$$x_{1z} = x_{2z} = (0,02 + 0,1) // 1,4 + 0,4 = 0,51.$$

Составляющая прямой последовательности пускового тока

$$I_{1пуск} = \frac{0,987}{2 \cdot 0,51} = 0,97,$$

$$E_0 = 1 // 0,85 = 0,987.$$

Минимум пускового тока двигателя при базисных условиях

$$I_{пуск} = \sqrt{3} \cdot 0,97 = 1,68,$$

при номинальных условиях двигателя

$$I_{\text{пуск}} = 1,68 \cdot \frac{0,92}{0,48} = 3,2 \text{ (здесь } I_n = 0,48 \text{ ка),}$$

т. е. меньше номинального пускового тока на $\frac{4,5 - 3,2}{4,5} \cdot 100 = 29\%$.

Симметричные составляющие напряжения на выводах двигателя:

$$U_1 = 0,97 (0,51 + 0,4) = 0,88;$$

$$U_2 = 0,97 (0,51 - 0,4) = 0,107.$$

Выразим их в долях номинального напряжения двигателя.

$$U_1 = 0,88 \cdot \frac{6,3}{6} = 0,924 \text{ и } U_2 = 0,107 \cdot \frac{6,3}{6} = 0,112.$$

Развиваемый двигателем пусковой момент составит:

$$M_{\text{мк}} = (0,924^2 - 0,112^2) M_{\text{пуск.н}} = 0,84 M_{\text{в.к.н.}}$$

т. е. снижение пускового момента составляет 16%.

Задача 6-2

Генератор через индуктивное сопротивление x связан с системой бесконечной мощности. Между фазами В и С на выводах генератора металлическое двухфазное короткое замыкание. Относительные реактивности генератора: $x_d = 1,4$ и $x_2 = 0,2$.

Для установившегося режима короткого замыкания вывести зависимость тока неповрежденной фазы генератора от величины индуктивного сопротивления x и э. д. с. E_q генератора. Система поддерживает неизменным напряжение, равное номинальному напряжению генератора.

Решение. Пусть индуктивное сопротивление x выражено в относительных единицах при номинальных условиях генератора. Тогда эквивалентная э. д. с. и результирующие реактивности схемы относительно точки короткого будут:

$$E_D = \frac{E_q x + 1,4}{x + 1,4},$$

$$x_{1x} = \frac{1,4x}{1,4 + x}$$

$$x_{2x} = \frac{0,2x}{0,2 + x}.$$

Ток прямой последовательности в месте короткого

$$I_{\text{кА1}} = \frac{E_q x + 1,4}{(1,4 + x) \left(\frac{1,4x}{1,4 + x} + \frac{0,2x}{0,2 + x} \right)} = \frac{(E_q x + 1,4)(0,2 + x)}{x(0,56 + 1,6x)}$$

Напряженье прямой последовательности в месте короткого

$$\dot{U}_{\text{кА1}} = I_{\text{кА1}} x_{2x} = \frac{(E_q x + 1,4) 0,2}{0,56 + 1,6x}.$$

Ток прямой последовательности генератора

$$I_{\text{А1}} = \frac{\dot{E}_q - \dot{U}_{\text{кА1}}}{1,4} = \frac{0,56 \dot{E}_q + 1,6 \dot{E}_q x - 0,2 \dot{E}_q x - 0,28}{1,4(0,56 + 1,6x)} = \frac{E_q(0,4 + x) - 0,2}{0,56 + 1,6x},$$

ток обратной последовательности

$$I_{\text{А2}} = -\frac{\dot{U}_{\text{кА2}}}{x_2} = -\frac{\dot{U}_{\text{кА1}}}{x_2} = -\frac{\dot{E}_q x + 1,4}{0,56 + 1,6x}.$$

Следовательно, искомое выражение для тока неповрежденной фазы генератора будет:

$$I_{\text{А}} = I_{\text{А1}} + I_{\text{А2}} = \frac{E_q(0,4 + x) - 0,2 - (E_q x + 1,4)}{0,56 + 1,6x} = \frac{E_q - 4}{1,4 + 4x}.$$

При заданном значении E_q ток $I_{\text{А}}$, как показывает вышесказанное выражение, связан с реактивностью x гиперболической зависимостью. Для нескольких значений E_q она представлена кривыми на рис. 6-2. При $E_q = 4$ в данном случае ток в неповрежденной фазе не будет. При $E_q < 4$ он направляется от системы в генератор, а при $E_q > 4$ (что может иметь место при очень большом предельном токе возбуждения) — наоборот, от генератора в систему.

Следует отметить, что при относительно малом возбуждении, например $I_1 = 1$ (или $E_q = 1$), ток в неповрежденной фазе может быть больше тока поврежденной фазы генератора при том же двухфазном коротком, то когда генератор отключен от системы. Величина такого тока ($I_1^{(2)} = 1,08$) отмечена на рис. 6-2 пунктирной прямой.

Задача 6-3

Генератор связан с системой бесконечной мощно-

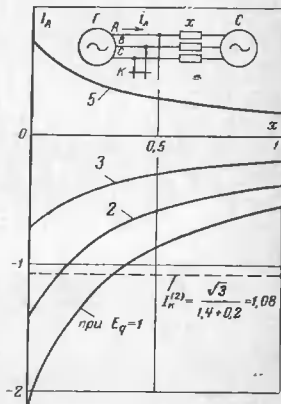


Рис. 6-2. К задаче 6-2. Исходная схема и кривые изменения тока в здоровой фазе при двухфазном коротком замыкании в зависимости от реактивного сопротивления связи между генератором и системой.

стп через внешнюю реактивность $x_{\text{вн}}=0,5$, выраженную в относительных единицах при номинальных условиях генератора. Относительные реактивности генератора $x_1=1,0$ и $x_2=0,28$. На вывод генератора предполагается двухфазное короткое замыкание.

Для установившегося режима этого вида короткого замыкания требуется вывести закономерности изменения тока в месте короткого замыкания и тока неповрежденной фазы генератора от величины синхронной э. д. с. E_q последней.

Решение. Результирующие реактивности отдельных последовательностей в данном случае составляют:

$$x_{1\Sigma} = 1/0,5 = 0,33 \text{ и } x_{2\Sigma} = 0,28/0,5 = 0,18.$$

Считая для системы $E = U = 1$, найдем выражение для результирующей э. д. с.

$$E_{\Sigma} = \frac{E_q 0,5 + 1 \cdot 1}{1 + 0,5} = 0,67 + 0,33E_q.$$

Ток прямой последовательности в месте короткого

$$I_{03} = \frac{0,67 + 0,33E_q}{0,33 + 0,18} = 0,65E_q + 1,31,$$

и ток в месте короткого

$$I_n = \sqrt{3} I_{03} = \sqrt{3} (0,65E_q + 1,31) = 1,13E_q + 2,28.$$

Напряжение прямой последовательности в месте короткого

$$U_{03} = (0,65E_q + 1,31) 0,18 = 0,117E_q + 0,236.$$

Симметричные составляющие тока неповрежденной фазы генератора:

$$I_{r1} = \frac{E_q - 0,117E_q - 0,236}{1,0} = 0,883E_q - 0,236;$$

$$I_{r2} = \frac{0 - 0,117E_q - 0,236}{0,28} = -0,418E_q - 0,844;$$

его полная величина

$$I_r = I_{r1} + I_{r2} = 0,883E_q - 0,236 - 0,418E_q - 0,844 = 0,465E_q - 1,08.$$

Как и следовало ожидать, исконые закономерности выражаются линейными функциями E_q . Отметим, что ток в неповрежденной фазе генератора отсутствует только в том случае, когда

$$E_q = \frac{1,08}{0,465} = 2,32.$$

При $E_q > 2,32$ ток неповрежденной фазы генератора поступает в сеть ($I_r > 0$), а при $E_q < 2,32$ он, напротив, поступает из сети ($I_r < 0$).

Задача 6-4

Для схемы на рис. 6-3а определить величину ударного тока при двухфазном коротком замыкании в точке К и найти распределение начальных токов. Элементы схемы характеризуются следующими данными:

система С — источник напряжения мощности с номинальным напряжением 110,5 кВ;

линия Л 130 км, провод АС 120, $x = 0,4 \frac{\text{Ом/км}}$, $r = 0,27 \frac{\text{Ом/км}}$;

трансформатор Т Ю Мва, 115/6,3 кв. $u_n = 10,5\%$, $Y_0/\Delta-11$, обмотка высшего напряжения разделена на две параллельные ветви, $R_n = 222 \text{ кВт}$;

выпрямки Н-1 и Н-2 одинаковые, каждая 12 Мва, критические параметры обобщенной нагрузки, т. е. $E''_0 = 0,85$, $x'' = x_2 = 0,35$; синхронные двигатели Д-1 и Д-2 одинаковые, каждый 5 Мва, 6 кв, $I_{н2} = 1,55$; в предположении режима работы с удельной 2,1 Мва при $\cos \varphi = 0,8$ и $U = 6 \text{ кв}$.

Решение. Схема замещения прямой последовательности (считая выключатель В разомкнутым) представлена на рис. 6-3б. Ее элементы характеризуются следующими величинами э. д. с. и сопротивлениями, выраженными в относительных единицах при $S_0 = 40 \text{ Мва}$ и $U_0 = U_r$:

$$E_1 = E_2 \approx \left(U_0 - \frac{S_{\text{нагр}}}{S_0} \frac{1}{I_{\text{нуск}}} \sin \varphi \right) \frac{U_{н1}}{U_0} =$$

$$= \left(1 - \frac{2,1}{5} \cdot \frac{1}{4,55} \cdot 0,6 \right) \frac{6}{6,3} = 0,9;$$

$$x_1 = x_2 = \frac{1}{4,55} \cdot \frac{40}{5} \left(\frac{6}{6,3} \right)^2 = 1,6.$$

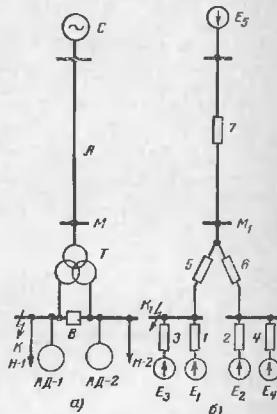


Рис. 6-3. К задаче 6-4.

а — исходная схема; б — схема замещения прямой (обратной) последовательности.

Для оценки активного сопротивления двигателя воспользуемся средней кривой на рис. П-4, по которой для данной мощности двигателя имеем $k_s \approx 1,8$, чему по кривой на рис. П-4 соответствует отношение $x/r = 13$; следовательно,

$$r_1 = r_2 = \frac{1,6}{13} = 12,3 \cdot 10^{-2}.$$

Сопротивления нагрузок и их э. д. с.:

$$x_3 = x_4 = 0,35 \frac{40}{12} = 1,17; \quad r_3 = r_4 = \frac{1,17}{4,5} = 26 \cdot 10^{-2};$$

$$E_3 = E_4 = 0,85.$$

Сопротивления ветвей схемы замещения трансформатора Т:

$$x_5 = x_6 = 2 \cdot 0,105 = 0,21; \quad r_5 = r_6 = \frac{0,222}{40} = 2 = 1,11 \cdot 10^{-2}.$$

Сопротивления линий:

$$x_7 = 0,4 \cdot 130 \frac{40}{115^2} = 0,158$$

$$r_7 = 0,158 \frac{0,27}{0,4} = 0,107.$$

Э. д. с. (напряжение) системы $E_0 = 116,5/115 = 1,01$.

Найдем результирующую э. д. с. и реактивность схемы прямой последовательности:

$$x_a = x_0 = 1,6/1,17 = 0,676; \quad E_0 = E_2 = 0,85/0,9 = 0,87;$$

$$x_{10} = 0,158/(0,676 + 0,21) = 0,134;$$

$$E_0 = E_2/E_0 = 1,01/0,87 = 0,99; \quad x_1 = 0,134 + 0,21 = 0,344;$$

$$x_{12} = 0,344/0,676 = 0,228 \text{ и } E_2 = E_0/E_2 = 0,99/0,87 = 0,95.$$

Для получения схемы обратной последовательности в данном случае достаточно в схеме на рис. 6-3,б положить все э. д. с. равными нулю, сохранив прежние значения сопротивлений. Следовательно, результирующая реактивность обратной последовательности относительно точки короткого $x_{22} = 0,228$.

Пренебрегая активными сопротивлениями, найдем модуль тока прямой последовательности в месте короткого

$$I_{n1} = \frac{0,95}{2 \cdot 0,228} = 2,08$$

и напряжение прямой последовательности в месте короткого

$$U_{n1} = 2,08 \cdot 0,228 = 0,476.$$

Ток прямой последовательности от двигателя АД-1 и нагрузки Н-1 составляет:

$$I_1 = \frac{0,87 - 0,475}{0,676} = 0,58.$$

Через трансформатор к месту короткого поступает ток прямой последовательности

$$I_1 = 2,08 - 0,58 = 1,5.$$

Напряжение прямой последовательности точки M_1 схемы на рис. 6-3,б составляет $U_{M1} = 0,475 + 1,5 \cdot 0,21 = 0,79$.

Ток прямой последовательности от двигателя АД-2 и нагрузки Н-2

$$I_1 = \frac{0,87 - 0,79}{0,676 + 0,21} = 0,09$$

и от системы

$$I_1 = 1,5 - 0,09 = 1,41.$$

Ток обратной последовательности в неповрежденной фазе будет $I_{n2} = -2,08$ и его распределение получается таким:

от двигателя АД-1 и нагрузки Н-1 $I_2 = -0,7$;

от двигателя АД-2 и нагрузки Н-2 $I_2 = -0,21$;

от системы С $I_2 = -1,17$.

Таким образом, начальные значения токов в здоровой и поврежденной фазах будут:

$$\text{в АД-1 и Н-1 } I_a = 0,58 - 0,7 = -0,12;$$

$$I_b = I_c = |a^2 0,58 - a 0,7| = 1,11;$$

$$\text{в АД-2 и Н-2 } I_a = 0,09 - 0,21 = -0,12;$$

$$I_b = I_c = |a^2 0,09 - a 0,21| = 0,24;$$

от системы (учитывая переход через трансформатор с заданным соотношением обмоток)

$$I_A = I_B = |1,41e^{-j30^\circ} - 1,17e^{j30^\circ}| = 2,24; \quad I_C = 1,41 + 1,17 = 2,58.$$

Для получения величины токов в именованных единицах найденные относительные токи должны быть соответственно умножены на $I_0 =$

$$= \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 3,67 \text{ кА на стороне пониженного напряжения трансформатора и } I_0 = \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,2 \text{ кА на стороне высшего напряжения трансформатора.}$$

Чтобы определить эквивалентную постоянную времени $T_{\text{в.}}$, найдем результирующее активное сопротивление схемы (полагая все реактивности равными нулю), которое получается $r_{12} = 3,54 \times 10^{-2}$. Соответственно этому искомая постоянная времени

$$T_{\text{в.}}^{(2)} = T_{\text{в.}}^{(3)} = \frac{0,228}{314 \cdot 3,54} \cdot 10^3 = 0,0204 \text{ сек,}$$

при которой ударный коэффициент будет:

$$k_{\text{уд}} = 1 + e^{-0,01/0,010} = 1 + 0,61 = 1,61.$$

Искомое значение ударного тока короткого замыкания составляет:

$$i_{\text{уд}} = 1,61 \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 2,08 \cdot 3,67 = 30,2 \text{ кА}.$$

Задача 6-5

Определить, во сколько раз увеличится ударный ток в месте двухфазного короткого замыкания в схеме на рис. 6-3а при данных задачи 6-4, если считать, что выключатель В замкнут.

Задача 6-6

Турбогенератор 75 Мва, 6,3 кВ несет нагрузку 60 Мва, имея опережающий ток возбуждения $I_f = 2$; его АРВ выключено. Нагрузка (промышленная) питается от шин генераторного напряжения. От тех же шин отходит еще линия, которая в нормальном режиме находится на холостом ходу. Известно, что при трехфазном коротком замыкании в конце этой линии напряжение генератора через 1,5 сек составляет 75% номинального.

Требуется определить для того же момента времени при двухфазном коротком замыкании в той же точке линии величины коэффициентов несимметрии токов и напряжений генератора, считая, что генератор и нагрузка характеризуются типичными параметрами.

Решение. Для решения используем метод спрямленных характеристик. По рис. П-9а для $t = 1,5$ сек при $I_f = 2$ находим расчетные параметры турбогенератора $E_1 = 1,62$ и $x_1 = 0,53$; его реактивность обратной последовательности примем $x_2 = 0,18$.

Средние параметры промышленной нагрузки $x_1 = 1,2$ и $x_2 = 0,35$ после приведения к номинальной мощности генератора будут:

$$x_1 = 1,2 \cdot \frac{75}{60} = 1,5 \text{ и } x_2 = 0,35 \cdot \frac{75}{60} = 0,44.$$

Из заданного условия при трехфазном коротком замыкании трудно найти реактивность линии. Эквивалентные з. и. с. и реактивность генератора и нагрузки в схеме прямой последовательности составляют:

$$E_0 = \frac{1,62 \cdot 1,5}{0,53 + 1,5} = 1,15 \text{ и } x_0 = \frac{0,53}{1,5} = 0,392.$$

Величина тока трехфазного короткого замыкания

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{1,15 - 0,75}{0,392} = 1,02,$$

и искомая реактивность линии

$$x = \frac{0,75}{1,02} = 0,735.$$

Гуманная реактивность схемы обратной последовательности будет:

$$x_{2\text{г}} = (0,18/0,44) + 0,735 = 0,863.$$

Отделив в схеме прямой последовательности точку короткого замыкания $x = x_{2\text{г}} = 0,863$, найдем внешнюю реактивность по отношению к генератору в схеме прямой последовательности, которая будет:

$$x_{\text{вн}} = 1,5 / (0,735 + 0,863) = 0,773.$$

Поскольку критическая реактивность для $t = 1,5$ сек

$$x_{\text{кр}} = 0,53 \cdot \frac{1}{1,62 - 1} = 0,856 > x_{\text{вн}} = 0,773,$$

то и при двухфазном коротком замыкании генератор в данный момент работает в режиме подъяма возбуждения я величина тока обратной последовательности генератора будет:

$$I_{\text{г1}} = \frac{1,62}{0,53 + 0,773} = 1,25,$$

а меньшая прямой последовательности генератора

$$I_{\text{г2}} = 1,62 - 1,25 \cdot 0,53 = 1,02 - 0,66 = 0,96.$$

Соответственно обратной последовательности

$$I_{\text{г3}} = \frac{0,96}{0,735 + 0,863} + \frac{0,44}{0,18 + 0,44} = 0,425$$

$$I_{\text{г4}} = 0,425 \cdot 0,18 = 0,076.$$

Искомые коэффициенты несимметрии:

по току

$$b_0 = \frac{0,425}{1,25} = 0,34$$

по напряжению

$$b_0 = \frac{0,076}{0,96} = 0,08.$$

Легко видеть, что при отсутствии или меньшей величине нагрузки генератор при двухфазном коротком замыкании через 1,5 сек имел бы уже нормальное напряжение.

Задача 6-7

Известно, что при трехфазном коротком замыкании в некоторой точке сети, питаемой генератором с параметрами $x_d = 0,85$, $x'_d = 0,25$, $x_2 = 0,35$, $I_{\text{нр}} = 8$, вачадный переходный и установившийся токи одинаковы.

Требуется определить, в каком соотношении падают начальный переходный и установившийся токи при двухфазном коротком замыкании в той же точке сети. Нагрузок в сети нет, и до короткого замыкания генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Решение. Из заданного условия равенства токов при трехфазном коротком замыкании имеем:

$$\frac{E'}{x'_d + x} = \frac{e_{\text{в.к.р.}}}{x_d + x},$$

или

$$\frac{1}{0,25 + x} = \frac{3}{0,85 + x},$$

откуда $x = 0,05$.

При двухфазном коротком замыкании в той же точке

$$x_{\text{в.к.р.}} = 0,05 + x_{2\text{к}} = 0,05 + (0,35 + 0,05) = 0,45;$$

$$x_{\text{в.к.р.}} = 0,85 \cdot \frac{1}{3-1} = 0,425.$$

Следовательно, при установившемся режиме этого вида короткого замыкания генератор будет работать уже с номинальным напряжением прямой последовательности. Поэтому токи при двухфазном коротком будут:

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1}{0,25 + 0,05 + 0,35 + 0,05} = 2,48;$$

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1}{0,05 + 0,35 + 0,05} = 3,85,$$

и искомое отношение составляет:

$$I^{(2)}: I^{(3)} = 2,48:3,85 = 0,64.$$

Задача 6-8

Генератор, параметры которого $x_d = 2$, $x'_d = 0,2$, $x_2 = 0,25$, $T_{D0} = 5$ сек, работает на холостом ходу с номинальным напряжением. Его АРВ отключено.

Требуется определить, в какой момент времени токи при трех- и двухфазных коротких замыканиях на выводах генератора одинаковы. Кроме того, определить, при какой продолжительности каждого из указанных видов короткого замыкания возникающие при них дополнительные нагревы генератора также одинаковы. Нагревом от аperiodической составляющей тока короткого замыкания можно пренебречь.

Решение. При трехфазном коротком замыкании имеем:

$$I' = \frac{1}{0,2} = 5; I = \frac{1}{2} = 0,5; T'_d = 5 \cdot \frac{0,2}{2} = 0,5 \text{ сек},$$

выражение для периодической составляющей тока будет:

$$I_i^{(3)} = 0,5 + (5 - 0,5) e^{-t/0,5} = 0,5 + 4,5 e^{-t/0,5}.$$

При двухфазном коротком замыкании

$$I' = \sqrt{3} \cdot \frac{1}{0,2 + 0,25} = 3,85; I = \sqrt{3} \cdot \frac{1}{2 + 0,25} = 0,77;$$

$$T'_d = 5 \cdot \frac{0,2 + 0,25}{2 + 0,25} = 1 \text{ сек};$$

$$I_i^{(2)} = 0,77 + (3,85 - 0,77) e^{-t/1} = 0,77 + 3,08 e^{-t}.$$

По полученным выражениям построены кривые изменения $I^{(2)}$ и $I^{(3)}$ и функции времени (рис. 6-4). Их пересечение имеет место через

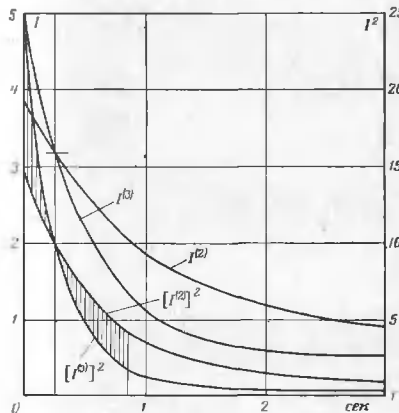


Рис. 6-4. К задаче 6-8. Кривые изменения тока и его квадратичного значения при трех- и двухфазных коротких замыканиях.

0,77 сек. Последнее также можно найти аналитически, приравняв соответствующие выражения для токов

$$0,5 + 4,5 e^{-t/0,5} = 0,77 + 3,08 e^{-t},$$

или заменив $a^{-t} = x$, $4,5x^2 - 3,08x - 0,27 = 0$, откуда $x = 0,764$ и

$$t = \ln \frac{1}{0,764} = 0,27 \text{ сек.}$$

Для определения продолжительности трех- и двухфазных коротких замыканий, при которой нагрева одинаковы, исхходим из очевидного равенства

$$\int_0^t (0,5 + 4,5e^{-4t/0,5})^2 dt = \int_0^t (0,77 + 3,08e^{-t})^2 dt,$$

которое после интегрирования и простейших преобразований приводит к уравнению

$$5,06e^{-2t} - 2,5e^{-2t} - 4,74e^{-t} + 0,34t + 2,19 = 0.$$

Решая его подбором, найдем $t \approx 0,8 \text{ сек}$. Для иллюстрации на рис. 6-4 проведены кривые изменения квадратов токов при трех- и двухфазных коротких замыканиях. Равенство заштрихованных площадей, ограниченных этими кривыми, определяет искомую продолжительность $t = 0,8 \text{ сек}$.

Задача 6-9

На кабельной линии, присоединенной через реактор P к шинам генераторного напряжения (рис. 6-5,а), произошло двухфазное короткое замыкание, которое через 1,5 сек перешло в трехфазное короткое замыкание.

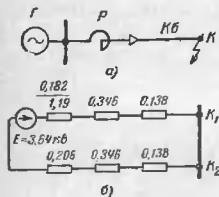


Рис. 6-5. К задаче 6-9.
а — исходная схема; б — комплексная схема замещения.

Требуется построить кривые изменения периодической слагающей тока поврежденных фаз и напряжения прямой последовательности генератора в функции времени в диапазоне от 0 до 5 сек.

Генератор G 50 МВА, 6,3 кВ, $x_d = 1,51$, $x'_d = 0,23$, $x_2 = 0,26$, $T_{r0} = 4,1 \text{ сек}$, $I_{r0} = 1$, АВВ отключено.

Реактор P 600 а, 6 кВ, $x = 6\%$.

Кабель KB А-3×185, длина поврежденного участка 2 км, $x = 0,069 \text{ ом/км}$.

Решение. Проведем решение в измеренных единицах. Фазные значения э. д. с.

$$E'_{\phi 0} = E_{\phi 0} = \frac{6,3}{\sqrt{3}} = 3,64 \text{ кв.}$$

Реактивности элементов схемы:

$$x'_d = 0,23 \cdot \frac{6,3^2}{50} = 0,182 \text{ ом};$$

$$x_d = 1,51 \cdot \frac{6,3^2}{50} = 1,19 \text{ ом};$$

$$x_2 = 0,26 \cdot \frac{6,3^2}{50} = 0,206 \text{ ом};$$

$$x_p = \frac{6}{100} \cdot \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0,6} = 0,346 \text{ ом};$$

$$x_{KB} = 2 \cdot 0,069 = 0,138 \text{ ом.}$$

Комплексная схема замещения для рассматриваемого случая при двухфазном коротком замыкании показана на рис. 6-5,б. Результирующие реактивности прямой последовательности:

$$x'_{1\Sigma} = 0,182 + 0,346 + 0,138 = 0,666 \text{ ом};$$

для установившегося режима

$$x_{1\Sigma} = 1,19 + 0,346 + 0,138 = 1,674 \text{ ом.}$$

То же обратной последовательности

$$x_{2\Sigma} = 0,206 + 0,346 + 0,138 = 0,69 \text{ ом.}$$

Постоянные времена изменения периодической слагающей тока

при двухфазном коротком замыкании

$$T^{(2)}_d = 4,1 \cdot \frac{0,666 + 0,69}{1,674 + 0,69} = 2,35 \text{ сек};$$

при трехфазном коротком замыкании

$$T^{(3)}_d = 4,1 \cdot \frac{0,666}{1,674} = 1,63 \text{ сек.}$$

При двухфазном коротком замыкании значения токов составляют:

$$I'_1 = \frac{3,64}{0,666 + 0,69} = 2,68 \text{ кв}$$

$$I_1 = \frac{3,64}{1,674 + 0,69} = 1,53 \text{ кА}$$

и соответственно $I' = \sqrt{3} \cdot 2,68 = 4,65 \text{ кА}$ и $I = \sqrt{3} \cdot 1,53 = 2,65 \text{ кА}$; через 1,5 сек $I_1 = (2,68 - 1,53) e^{-1,5/2,35} + 1,53 = 2,14 \text{ кА}$ и $I = \frac{1}{3} \cdot 2,14 = 0,71 \text{ кА}$.

Напряжение прямой последовательности генератора в начальный момент короткого $U_1 = 2,68(0,346 + 0,138 + 0,69) = 3,15 \text{ кВ}$ (86,5%) или иначе $U_1 = 3,64 - 2,68 \cdot 0,182 = 3,15 \text{ кВ}$; через 1,5 сек $U_1 = 2,14(0,346 + 0,138 + 0,69) = 2,51 \text{ кВ}$ (69%).

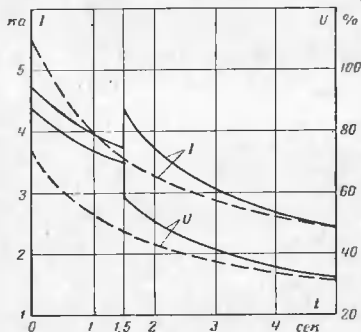


Рис. 6-6. К задаче 6-9. Кривые изменения фазового тока и остаточного напряжения прямой последовательности генератора во времени.

Значение переходной э. д. с. через 1,5 сек

$$E'_{\eta} = 2,51 + 2,14 \cdot 0,182 = 2,9 \text{ кВ}$$

Начальное значение тока в момент перехода двухфазного короткого замыкания в трехфазное будет:

$$I' = \frac{2,9}{0,666} = 4,35 \text{ кА},$$

(т. е. ток возрастает на 17%), а установившийся ток

$$I = \frac{3,64}{1,674} = 2,17 \text{ кА}.$$

Изменение тока во времени t' с момента перехода в трехфазное короткое замыкание

$$I = (4,35 - 2,17) e^{-t'/1,63} + 2,17 \text{ кА}.$$

Напряжение генератора в момент перехода в трехфазное короткое замыкание составляет:

$$U = 4,35(0,346 + 0,138) = 2,1 \text{ кВ} \text{ (57\%)}$$

и в дальнейшем уменьшается по тому же закону, что и ток. До наименьшего значения при установившемся режиме, т. е.

$$U = 2,17(0,346 + 0,138) = 1,05 \text{ кВ} \text{ (28,5\%)}.$$

Требуемые кривые изменения тока и напряжения представлены на рис. 6-6 (сплошные линии). Для сравнения пунктирными линиями проведены аналогичные кривые для случая, когда в заданной точке якоря возникает сразу трехфазное короткое замыкание.

Задача 6-10

Для измерения сопротивления нулевой последовательности синхронной машины на практике проводят опыт, принципиальная схема которого показана на рис. 6-7.

Требуется доказать, что искомое сопротивление определяется как отношение напряжения здоровой фазы (показания включенного вольтметра) к току в нейтральном проводе (показания амперметра).

Задача 6-11

Генератор в блоке с повышающим трансформатором работает на холостом ходу с номинальным напряжением. Их параметры следующие: генератор 120 Мва, 13,8 кВ, $x_d = 1,4$, $x'_d = 0,18$, $I_{н\text{огр}} = 4,25$; трансформатор 120 Мва, 242/13,8 кВ, $u_{н\%} = 12\%$, Y_{Δ} -11, нейтрал заземлена через реактивность $x = 24,4 \text{ Ом}$.

Требуется построить в зависимости от $t/T_{\text{го}}$ кривые изменения относительной слагающей тока в обмотке высшего напряжения трансформатора при всех основных видах короткого замыкания (трехфазного, двухфазного однофазного и двухфазного на землю) на выводах этой обмотки. Построение произвести для двух случаев, когда

- автоматическое регулирование возбуждения отключено;
- автоматическое регулирование возбуждения включено и $T_{\text{го}} = 0$.

Решение. Расчет проведем в относительных единицах при номинальных условиях генератора. При этом относительная реактивность, введенная в нейтраль трансформатора, будет:

$$x = 24,4 \cdot \frac{120}{242^2} = 0,05.$$

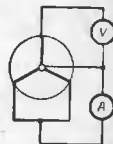


Рис. 6-7. Схема к задаче 6-10.

а) При отсутствии АРВ

При трехфазном коротком замыкании

$$I' = \frac{1}{0,18 + 0,12} = 3,33; I = \frac{1}{1,4 + 0,12} = 0,66;$$

$$T'_a = T_{j0} \frac{0,18 + 0,12}{1,4 + 0,12} = 0,197 T_{j0}; e^{-j0,197 T_{j0}} = e^{-2,57 t'}$$

где $t' = t/T_{j0}$.

Выражение для тока при этом виде короткого замыкания будет:

$$I(t) = 0,66 + (3,33 - 0,66) e^{-2,57 t} = 0,66 + 2,67 e^{-2,57 t}$$

При двухфазном коротком замыкании:

$$x_{22} = 0,19 + 0,12 = 0,31; I' = \frac{\sqrt{3}}{0,18 + 0,12 + 0,31} = 2,84;$$

$$I = \frac{\sqrt{3}}{1,4 + 0,12 + 0,31} = 0,95;$$

$$T'_a = T_{j0} \frac{0,18 + 0,12 + 0,31}{1,4 + 0,12 + 0,31} = 0,333 T_{j0}; e^{-j0,333 T_{j0}} = e^{-2 t'}$$

и выражение для тока будет:

$$I(t) = 0,95 + (2,84 - 0,95) e^{-2 t} = 0,95 + 1,89 e^{-2 t}$$

При однофазном коротком замыкании:

$$x_{02} = 0,12 + 3 \cdot 0,05 = 0,27;$$

$$I' = \frac{3}{0,18 + 0,12 + 0,31 + 0,27} = 3,41;$$

$$I = \frac{3}{1,4 + 0,12 + 0,31 + 0,27} = 1,43;$$

$$T'_a = T_{j0} \frac{0,18 + 0,12 + 0,31 + 0,27}{1,4 + 0,12 + 0,31 + 0,27} = 0,427 T_{j0}; e^{-j0,427 T_{j0}} = e^{-2,38 t'}$$

и выражение для тока будет:

$$I(t) = 1,43 + (3,41 - 1,43) e^{-2,38 t} = 1,43 + 1,98 e^{-2,38 t}$$

При двухфазном коротком замыкании на землю

$$x^{(1,2)}_A = 0,31/0,27 = 0,145;$$

$$m^{(1,2)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{0,31 \cdot 0,27}{(0,31 + 0,27)^2}} \approx 1,5;$$

$$I' = \frac{1,5}{0,18 + 0,12 + 0,145} = 3,37; I = \frac{1,5}{1,4 + 0,12 + 0,145} = 0,9;$$

$$T'_a = T_{j0} \frac{0,18 + 0,12 + 0,145}{1,4 + 0,12 + 0,145} = 0,267 T_{j0}; e^{-j0,267 T_{j0}} = e^{-2,75 t'}$$

и выражение для тока будет:

$$I^{(1,2)} = 0,9 + (3,37 - 0,9) e^{-2,75 t} = 0,9 + 2,47 e^{-2,75 t}$$

По полученным выражениям построены кривые, которые показаны в нижней части рис. 6-8.

б) При наличии АРВ

Критическая реактивность

$$x_{кр} = 1,4 \cdot \frac{1}{4,25 - 1} = 0,43.$$

При трехфазном коротком замыкании $x_{кв} = 0,12 < x_{кр}$; следовательно,

$$I = \frac{4,25}{1,4 + 0,12} = 2,8$$

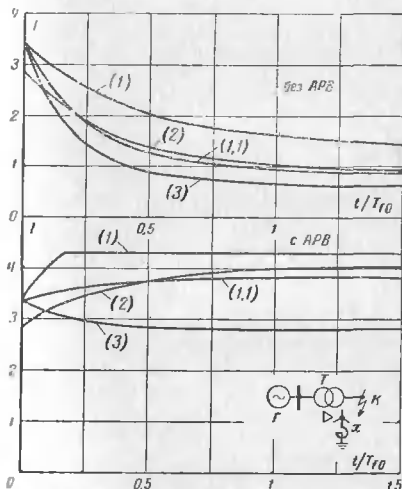


Рис. 6-8. К кривым 6-11. Кривые изменения тока в функции t/T_{j0} при трехфазном (3), двухфазном (2), однофазном (1) и двухфазном на землю (1,1) коротких замыканиях.

и выражение для тока будет:

$$I^{(2)} = 2,8 + (3,33 - 2,8) e^{-0,67t'} = 2,8 + 0,53e^{-0,67t'}$$

При двухфазном коротком замыкании $x_{вн} = 0,12 + 0,31 = 0,43 = x_{вн}$, т. е. при установившемся режиме этого вида короткого замыкания у генератора напряжение прямой последовательности достигает нормального значения при предельном токе возбуждения; величина тока при этом составляет:

$$I = \frac{\sqrt{3} \cdot 4,25}{1,4 + 0,12 + 0,31} = 4,04,$$

или иначе

$$I = \frac{\sqrt{3}}{0,12 + 0,31} = 4,04;$$

выражение для тока будет:

$$I^{(2)} = 4,04 + (2,84 - 4,04) e^{-3t'} = 4,04 - 1,2e^{-3t'}$$

При однофазном коротком замыкании $x_{вн} = 0,12 + 0,31 + 0,27 = 0,7 > x_{вн}$, поэтому предельная величина тока при этом виде короткого

$$I = \frac{3}{0,7} = 4,29.$$

С другой стороны, установившийся ток, который был бы при предельном возбуждении, составляет:

$$I = \frac{3 \cdot 4,25}{1,4 + 0,7} = 6,08.$$

Следовательно, для тока однофазного короткого замыкания выражение будет:

$$I^{(1)} = 6,08 + (3,41 - 6,08) e^{-2,26t'} = 6,08 - 2,67 e^{-2,26t'} \leq 4,29, \text{ т. е.}$$

по достижении этой предельной величины ток остается неизменным. Из последнего равенства нетрудно установить, что величина этого тока наступает через $t' = 0,17$.

При двухфазном коротком замыкании на землю $x_{вн} = 0,12 + 0,145 = 0,265 < x_{вн}$, поэтому для установившегося тока имеем:

$$I = \frac{1,5 \cdot 4,25}{1,4 + 0,265} = 3,82;$$

соответственно выражение для тока будет:

$$I^{(1)} = 3,82 + (3,37 - 3,82) e^{-2,75t'} = 3,82 - 0,45e^{-2,75t'}$$

Построенные по полученным выражениям кривые изменения тока приведены в нижней части рис. 6-8.

Задача 6-12

При различных видах короткого замыкания в точках *K-1* и *K-2* питаемой синхронным генератором, известны следующие величины токов:

Виды короткого замыкания	Время с момента короткого, сек	Ток, ка при коротком замыкании		
		(3)	(2)	(1)
<i>K-1</i>	0	40	?	40
	1	?	?	30
	∞	10	13	?
<i>K-2</i>	0	?	14	?
	1	?	12	?
	∞	10	10	10

Используя эти данные, определить те величины токов, которые отмечены знаком вопроса. Считать, что генератор не имеет демпферных обмоток и его автоматический регулятор возбуждения выключен.

Решение. Проведем решение для условий короткого замыкания в точке *K-1*.

Если токи $I^{(3)} = 40$ ка и $I^{(2)} = 10$ ка, найдем, что отношение реактивной прямой последовательности для установившегося режима к реактивности для начального момента короткого замыкания составляет:

$$x_1 : x_1' = 40 : 10 = 4.$$

Если скоро по данным $I^{(2)} = I^{(1)}$, т. е.

$$\frac{1}{x_1'} = \frac{3}{x_1' + x_2 + x_0'}$$

тогда имеем соотношение $(x_2 + x_0) = 2x_1'$, что позволяет теперь найти ток

$$I^{(1)} = \frac{3E}{x_1' + x_2 + x_0} = \frac{3E}{(4+2)x_1'} = \frac{40}{2} = 20 \text{ ка.}$$

Далее из равенства

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E}{x_1 + x_2} = \frac{\sqrt{3}}{(4+x_2/x_1)} \cdot \frac{E}{x_1'} = \frac{\sqrt{3}}{4+x_2/x_1'} \cdot 40 = 13 \text{ ка}$$

находим, что отношение реактивностей $x_2/x'_1 = 1,34$, поэтому начальный ток при двухфазном коротком замыкании будет:

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E}{x'_1 + x_2} = \frac{\sqrt{3}}{1 + x_2/x'_1} \cdot \frac{E}{x'_1} = \frac{\sqrt{3}}{1 + 1,34} \cdot 40 = 29,6 \text{ кА.}$$

Для тока однофазного короткого замыкания через 1 сек можно написать:

$$30 = (40 - 20) e^{-1/T_d^{(1)}} + 20,$$

откуда $e^{-1/T_d^{(1)}} = 0,5$ и соответственно $T^{(1)}_d = 1,43 \text{ сек.}$

По этой постоянной времени найдем

$$T_{10} = 1,43 \cdot \frac{x_1 + x_2 + x_0}{x'_1 + x_2 + x_0} = 1,43 \cdot \frac{4 + 2}{1 + 2} = 2,86 \text{ сек}$$

и затем постоянные времена:

при трехфазном коротком замыкании

$$T_d^{(3)} = 2,86 \cdot \frac{x'_1}{x_1} = 2,86 \cdot \frac{1}{4} = 0,715 \text{ сек};$$

при двухфазном коротком замыкании

$$T_d^{(2)} = 2,86 \cdot \frac{x'_1 + x_2}{x_1 + x_2} = 2,86 \cdot \frac{1 + 1,34}{4 + 1,34} = 1,25 \text{ сек.}$$

Теперь находим токи через 1 сек при трех- и двухфазных коротких замыканиях:

$$I^{(3)} = (40 - 10) e^{-1/0,715} + 10 = 17,5 \text{ кА};$$

$$I^{(2)} = (29,6 - 13) e^{-1/1,25} + 13 = 20,5 \text{ кА.}$$

Решение для условий короткого замыкания в точке К-2 рекомендуется выполнить читателю.

Задача 6-13

Блок состоит из: гидрогенератора 67,3 Мва, 10,6 кВ, $x''_d = 0,28$, $x'_d = 0,34$, $x_d = 0,66$, $x_2 = 0,32$, $T_{10} = 3,8 \text{ сек}$, $I_{нр} = 3,2$ и повышающего трансформатора 63 Мва, 121/10,5 кВ, $u_n = 10,5\%$, $Y_0/\Delta-11$.

Блок отключен от внешней сети, и генератор работает на холостом ходу с номинальным напряжением; АРВ генератора включено.

Для случаев трехфазного, двухфазного, однофазного и двухфазного короткого замыкания на землю непосредственно на выводах высшего напряжения трансформатора требуется установить, в каких соотношениях находится:

- постоянные времена T_d ;
- начальные и установившиеся токи в месте короткого;

а) наибольшие начальные и наибольшие установившиеся токи в фазе генератора;

б) начальные и установившиеся значения напряжения прямой последовательности генератора.

Задача 6-14

Трехфазный трехстержневой трансформатор 1000 кВа, 6,3/0,4—11/0,4 кВ, $Y/\Delta-12$, $P_{кз} = 15 \text{ кВт}$, $u_{н1} = 8\%$, $u_{н0} = 58\%$ присоединен к источнику эквивалентной реактивности которого составляет $x_1 = x_2 = 0,44$ Ом и эквивалентная э. д. с. $E = 6,3 \text{ кВ}$.

На стороне низшего напряжения трансформатора произошло короткое замыкание фазы а на нулевой провод (рис. 6-9). До короткого замыкания трансформатор был на холостом ходу.

Требуется определить величины фазных токов и напряжений на обмотках статора трансформатора и построить по ним векторные диаграммы для заданного аварийного режима; э. д. с. источника считать практически неизменной.

Решение. Решение выполним в относительных единицах, выражая величины сопротивлений и э. д. с. в процентах при номинальных условиях трансформатора.

Относительные э. д. с. и реактивности источника будут:

$$E = \frac{6,3}{6,3} \cdot 100 = 100\% \text{ и } x_1 = x_2 = 0,44 \cdot \frac{1}{6,3^2} \cdot 100 = 1,11\%.$$

Относительная величина активного сопротивления трансформатора

$$r_{\Sigma} = \frac{15}{1000} \cdot 100 = 1,5\%$$

и индуктивного сопротивления трансформатора для токов прямой и обратной последовательностей

$$x_{\Sigma 1} = x_{\Sigma 2} = \sqrt{8^2 - 1,5^2} = 7,89\%,$$

а также токов нулевой последовательности (пренебрегая активным сопротивлением)

$$x_{\Sigma 0} = 58\%.$$

Результующие реактивности до места короткого будут:

$$x_{12} = x_{22} = 1,11 + 7,89 = 8,99\% \approx 9\% \text{ и } x_{02} = 58\%.$$

Симметричные составляющие тока в месте короткого (если пренебречь r и считать $E_A = j100$)

$$I_{a1} = I_{k12} = I_{n0} = \frac{j100}{j(2,9 + 58)} = 1,32,$$

а напряжения в месте короткого

$$\dot{U}_{a1} = j(9 + 58) \cdot 1,32 = j89\%; \quad \dot{U}_{a2} = -j9 \cdot 1,32 = -j12\%; \\ \dot{U}_{n0} = -j59 \cdot 1,32 = -j76\%.$$

Симметричные составляющие напряжения на стороне высшего напряжения трансформатора:

$$\dot{U}_{A1} = j88 + j7,85 \cdot 1,32 = j98,5\%;$$

$$\dot{U}_{A2} = -j1,11 \cdot 1,32 = -j1,5\%;$$

$$\dot{U}_{A0} = -j \left(58 - \frac{7,85}{2} \right) 1,32 = -j71,5\%;$$

где $j \frac{7,85}{2}$ — относительная реактивность рассеяния обмотки высшего напряжения трансформатора.

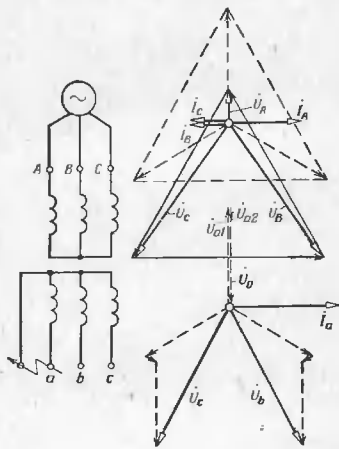


Рис. 6-9. К задаче 6-14. Исходная схема и векторные диаграммы токов и напряжений.

Фазные токи и напряжения на стороне короткого замыкания:

$$I_{ka} = 3 \cdot 1,32 = 3,96 \text{ или } I_{ka} = 3,96 \cdot \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 5700 \text{ а;}$$

$$I_{kb} = I_{kc} = 0;$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ka} &= 0; \dot{U}_{kb} = \dot{U}_{kc} = a^2 j88 - a j12 - j76 = \\ &= 86,4 - j114 = 143\% \angle -53^\circ \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{kb} = \dot{U}_{kc} = 1,43 \cdot \frac{0,4}{\sqrt{3}} \angle -53^\circ = 0,33 \angle -53^\circ \text{ кв.}$$

То же на стороне высшего напряжения трансформатора

$$I_A = 2 \cdot 1,32 = 2,64$$

$$I_A = 2,64 \cdot \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 240 \text{ а.}$$

$$I_B = I_C = -\frac{240}{2} = -120 \text{ а;}$$

$$\dot{U}_A = j(98,5 - 1,5 - 71,5) = j25,5\%$$

$$\dot{U}_A = j0,255 \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3}} = j0,93 \text{ кв.}$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_C = j(a^2 \cdot 98,5 - a \cdot 1,5 - 71,5) = 86,8 - j120 = 148\% \angle -54,3^\circ$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_C = 1,48 \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3}} \angle -54,3^\circ = 5,4 \angle -54,3^\circ \text{ кв.}$$

Изобрисные по найденным величинам векторные диаграммы токов и напряжений приведены на рис. 6-9.

Задача 6-15

Для повышающего трансформатора $T-1$ и $T-2$ включены параллельно (рис. 6-10). Их номинальные напряжения и относительные коэффициенты трансформации одинаковы; они отличаются только величинами своих номинальных мощностей S_1 и S_2 , при $S_1 > S_2$.

Требуется определить величину относительности x (выразив ее через напряжение короткого замыкания трансформатора $T-1$), через которую должна быть заземлена средняя точка трансформатора $T-1$, чтобы при однофазном коротком замыкании в точке K (рис. 6-10) токи в поврежденной фазе на стороне высшего напряжения обоих трансформаторов были одинаковы. При этом требуется также найти соотношение между модулями токов поврежденной и здоровых фаз.

Решение. Выполнение поставленного условия определяется параметрами только самих трансформаторов, поэтому никаких данных относительно питания не требуется.

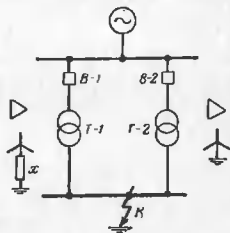


Рис. 6-10. Схема к задаче 6-15.

В соответствии с условием $S_2: S_1 = n < 1$. Коэффициент распределения для тока прямой и обратной последовательностей в трансформаторе $T-I$, очевидно, будет:

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{1+n}.$$

Чтобы токи поврежденной фазы обоих трансформаторов были одинаковы, коэффициент распределения нулевой последовательности в трансформаторе $T-I$ должен быть:

$$C_0 = 1,5 - (C_1 + C_2) = 1,5 - \frac{2}{1+n} = \frac{3n-1}{2(1+n)}.$$

С другой стороны, исходя из схемы нулевой последовательности, для этого коэффициента распределения имеем:

$$C_0 = \frac{u_n/n}{u_n + 3x + (u_n/n)} = \frac{u_n}{u_n(1+n) + 3nx},$$

где u_n/n — напряжение короткого замыкания трансформатора $T-I$, приведенное к мощности трансформатора $T-I$.

Приравняв правые части двух последних выражений и выполнив необходимые преобразования, найдем:

$$x = \frac{(1+n)(1-n)}{n(3n-1)} u_n.$$

Реальные пределы для этой реактивности (точнее индуктивно-сти) следующие:

при $n=1$ (одинаковой мощности трансформаторов) $x=0$;

при $n=1/3$ $x=\infty$, т. е. в этом случае нейтраль трансформатора $T-I$ должна быть разземлена.

При равенстве токов прямой и обратной последовательностей как это имеет место в данном случае, модуль тока в здоровых фазах каждого трансформатора будет:

$$I_B = I_C = \frac{1}{1+n} - \frac{3n-1}{2(1+n)} = \frac{3(1-n)}{2(1+n)}$$

и искомое отношение

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{(1+n)}{(1-n)}.$$

Задача 6-16

Оценить, в каком соотношении будут находиться токи поврежденной фазы на стороне высшего напряжения обоих трансформаторов схемы на рис. 6-10, если при установленном в решении задачи 6-15 значении реактивности x считать, что произошло отключение: а) выключателя $B-1$; б) выключателя $B-2$.

Задача 6-17

Для схемы на рис. 6-10 и исходных данных задачи 6-15 определить реактивность x (выразить ее через напряжение короткого замыкания трансформатора $T-I$), через которую должна быть разземлена нейтраль трансформатора $T-I$, чтобы токи в нейтралах обоих трансформаторов были одинаковы. При этом также определить соотношение между модулями фазных токов на стороне высшего напряжения обоих трансформаторов.

Задача 6-18

На гидростанции установлено десять генераторов; параметры каждого из них: 33 Mva , $10,5 \text{ кв}$, $x''_{d0} = 0,29 x_d$. Они разбиты на пять групп по два генератора; каждая группа через повышающий трансформатор 63 Mva , $115/10,5 \text{ кв}$, $u_n = 10,5\%$, $Y_0/\Delta-11$ присоединена к общим шинам 115 кв , на которых осуществлена связь с системой. Показатели характеризуются эквивалентными реактивностями $x_1 = x_2 = 0,4 \text{ ом}$ и $x_0 = 36 \text{ ом}$. За реактивностью x_1 напряжение системы электрически неадекватно и равно 115 кв .

Требуется определить, у скольких трансформаторов станции следует разземлить нейтраль обмоток 115 кв , чтобы одновременно были соблюдены два требования:

1) начальный ток в месте однофазного короткого замыкания на шинах 115 кв станции не должен превышать начального тока при трехфазном коротком замыкании в той же точке;

2) напряжение безземленных нейтралей обмоток 115 кв трансформаторов станции при однофазном коротком замыкании на шинах 115 кв не должно превышать 35 кв .

Для упрощения расчета считать, что все генераторы работают на холостом ходу с номинальным напряжением.

Решение. Проведем подсчет в относительных единицах при $U_n = 110 \text{ Mva}$ и $U_0 = U_{cp}$. Реактивности элементов при этих базисных условиях будут:

$$\text{генератора} \quad x_g = 0,29 \frac{100}{33} = 0,88;$$

трансформатора

$$x_{tr} = 0,105 \frac{100}{33} = 0,32;$$

системы

$$x_{c1} = 8,8 \frac{100}{115^2} = 0,067$$

$$x_{c0} = 36 \frac{100}{115^2} = 0,273.$$

При заданных условиях э. д. с. всех источников в относительных единицах одинаковы и равны $E=1$.

Имея в виду, что реактивности прямой и обратной последовательностей в данном случае одинаковы, найдем отношение $x_{0\Gamma} / x_{1\Gamma}$, при котором соблюдается первое требование

$$I_{\Gamma}^{(3)} = \frac{1}{x_{1\Gamma}} = I_{\Gamma}^{(1)} = \frac{3}{2x_{1\Gamma} + x_{0\Gamma}},$$

откуда $x_{0\Gamma} / x_{1\Gamma} = 1$, и соответственно второе требование!

$$U_{\text{нв}} = \frac{1}{2x_{1\Gamma} + x_{0\Gamma}} x_{0\Gamma} = \frac{\sqrt{3} \cdot 35}{115} = 0,53,$$

откуда $x_{0\Gamma} / x_{1\Gamma} = 2,4$.

Следовательно, оба поставленных требования будут удовлетворены, если отношение результирующих реактивностей $x_{0\Gamma} / x_{1\Gamma}$ находится в пределах

$$1 \leq x_{0\Gamma} / x_{1\Gamma} \leq 2,4.$$

В нашем случае результирующая реактивность прямой последовательности составляет:

$$x_{1\Gamma} = \frac{\frac{0,88}{2} + 0,32}{5} / 0,067 = 0,152 / 0,067 = 0,047.$$

Чтобы было соблюдено первое требование, реактивность нулевой последовательности станции должна быть не менее

$$x_{0\Gamma} = \frac{0,273 \cdot 0,047}{0,273 - 0,047} = 0,057,$$

что имеет место при заземлении

$$n = \frac{x_{\Gamma}}{x_{0\Gamma}} = \frac{0,32}{0,057} = 5,6,$$

т. е. всех пяти нейтралей трансформаторов станции, при этом, естественно, удовлетворяется и второе требование.

Найдем теперь допустимое наименьшее число заземленных нейтралей трансформаторов станции, при котором удовлетворяется второе требование. Для этого результирующая реактивность нулевой последовательности не должна превышать

$$x_{0\Gamma} = 2,4 \cdot 0,047 = 0,113;$$

соответственно реактивность нулевой последовательности станции

¹ Учитывая, что напряжение незаземленной нейтрали трансформатора в данном случае одновременно является напряжением нулевой последовательности в месте однофазного короткого замыкания.

не должна быть более

$$x_{0\Gamma} = \frac{0,273 \cdot 0,113}{0,273 - 0,113} = 0,193$$

и наименьшее число заземленных нейтралей должно быть не менее

$$n = \frac{0,32}{0,193} = 1,75,$$

т. е. у двух трансформаторов.

Задача 6-19

Поставленное в предыдущей задаче требование, чтобы при однофазном коротком замыкании на шинах станции напряжения нейтральной обмотки 115 кВ трансформаторов не превышало 35 кВ, можно выполнить, если нейтраль каждого трансформатора заземлить через некоторое индуктивное сопротивление.

Требуется определить величину такого сопротивления, выразив его в именованных единицах.

Задача 6-20

Для представленного на рис. 6-11 однофазно-двухфазного короткого замыкания в одной точке системы вывести расчетные выражения для токов и напряжений, сравнить этот вид с другими видами короткого замыкания и составить для него комплексную схему.

Решение. Граничные условия для данного вида короткого замыкания в соответствии с рис. 6-11, очевидно, будут:

$$\dot{U}_{\text{кА}} = 0; \quad \dot{U}_{\text{кВ}} - \dot{U}_{\text{кС}} = 0; \quad I_{\text{кВ}} = -I_{\text{кС}}.$$

И записи через симметричные составляющие фазы А эти условия будут:

$$\dot{U}_{\text{нв}} = -2\dot{U}_{\text{кА1}}; \quad \dot{U}_{\text{кА2}} = \dot{U}_{\text{кА1}}; \quad I_{\text{кА1}} + I_{\text{кА2}} = 2I_{\text{нв}}.$$

С другой стороны, имеем:

$$\frac{\dot{U}_{\text{кА2}}}{\dot{U}_{\text{нв}}} = \frac{\dot{U}_{\text{кА1}}}{\dot{U}_{\text{нв}}} = -\frac{1}{2} = \frac{I_{\text{кА2}} Z_0}{I_{\text{нв}} Z_0},$$

$$I_{\text{нв}} = -2I_{\text{кА2}} \frac{Z_2}{Z_0}.$$

Следовательно,

$$I_{\text{кА1}} + I_{\text{кА2}} = 2I_{\text{нв}} = -4I_{\text{кА2}} \frac{Z_2}{Z_0},$$

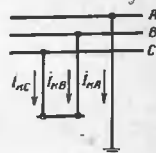


Рис. 6-11. К задаче 6-20. Однофазно-двухфазное короткое замыкание.

откуда

$$I_{KA2} = -I_{KA1} \frac{Z_0}{4Z_2 + Z_0}.$$

Теперь можно выразить ток I_{B0} через I_{KA1}

$$I_{B0} = I_{KA1} \frac{2Z_2}{4Z_2 + Z_0}.$$

Во всех этих выражениях Z_1, Z_2, Z_0 — результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно места короткого.

Далее, для заземленной фазы A имеем:

$$\dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{B0} = \dot{E}_A - I_{KA1}Z_1 - I_{KA2}Z_2 - I_{B0}Z_0 = 0,$$

откуда, после замены I_{KA2} и I_{B0} через I_{KA1} получим:

$$I_{KA1} = \frac{\dot{E}_A}{Z_1 + Z_{\Delta}^{(1,2)}},$$

где $Z_{\Delta}^{(1,2)} = \frac{2Z_2}{4Z_2 + Z_0}$ — дополнительное сопротивление, на которое

должна быть удалена точка эквивалентного трехфазного короткого замыкания, при котором может быть определен ток прямой последовательности при рассматриваемом виде несимметричного короткого замыкания. Как видно, это сопротивление меньше, чем при двухфазном коротком замыкании на землю.

Найдем фазные токи в месте короткого:

$$I_{KA} = I_{KA1} + I_{KA2} + I_{B0} = \frac{6Z_2}{4Z_2 + Z_0} I_{KA1} = 3I_{B0};$$

$$I_{KB} = a^2 I_{KA1} + a I_{KA2} + I_{B0} = -j\sqrt{3} \frac{2Z_2 + Z_0}{4Z_2 + Z_0} I_{KA1} = -I_{KC}.$$

Соотношение между фазными токами

$$\frac{I'_{KA}}{I_{KB}} = j\sqrt{3} \frac{2Z_2}{2Z_2 + Z_0}.$$

При $Z_2 = jx_2$ и $Z_0 = jx_0$ для модуля этого отношения имеем:

$$\frac{I_{KA}^{(1,2)}}{I_{KB}^{(1,2)}} = \sqrt{3} \cdot \frac{2}{2 + (x_0/x_2)};$$

его зависимость от x_0/x_2 представлена на рис. 6-12 соответствующей кривой. Как видно, при $x_0/x_2 = 1,5$ токи $I_{KA} = I_{KB}$; при $x_0/x_2 < 1,5$ преобладает ток I_{KA} , а при $x_0/x_2 > 1,5$, напротив, — ток I_{KB} .

Сравнение тока $I_{KA}^{(1,2)}$ с током обычного однофазного короткого замыкания $I_{KA}^{(1)}$ приводит к следующему выражению:

$$\frac{I_{KA}^{(1,2)}}{I_{KA}^{(1)}} = \frac{2(Z_1 Z_2 + Z_2^2 + Z_2 Z_0)}{4Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0}.$$

Интерес при $Z_1 = Z_2$ становится равным единице, т. е. при этих условиях дополнительное замыкание между собой фаз B и C не сказывается на величине тока фазы A , замкнувшейся на землю.

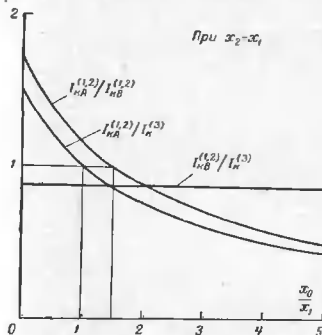


Рис. 6-12. К задаче 6-20. Кривые изменения отношений токов в функции x_0/x_2 .

Аналогичное сравнение тока $I_{KB}^{(1,2)}$ с током обычного двухфазного короткого замыкания дает:

$$\frac{I_{KB}^{(1,2)}}{I_{KB}^{(2)}} = \frac{(Z_1 + Z_2)(2Z_2 + Z_0)}{4Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0}.$$

При $Z_1 = Z_2$ это отношение также равно единице, т. е. при таких условиях дополнительное замыкание на землю фазы A не влияет на величину тока в фазах B и C .

Сравним еще фазные токи рассматриваемого вида короткого замыкания с током трехфазного короткого в той же точке:

$$\frac{I_{KA}^{(1,2)}}{I_K^{(3)}} = \frac{3Z_2}{2Z_2 + Z_0};$$

$$\frac{I_{кВ}^{(1,2)}}{I_{к}^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}(2Z_2 + Z_0)Z_1}{4Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0}$$

При $Z_1 = Z_2$ отношение $\frac{I_{кВ}^{(1,2)}}{I_{к}^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2}$, т. е. та же величина, что

и отношения $\frac{I_{кВ}^{(2)}}{I_{к}^{(3)}}$ при равенстве $Z_1 = Z_2$.

Зависимость $\frac{I_{кВ}^{(1,2)}}{I_{к}^{(3)}}$ от x_0/x_1 при $x_1 = x_2$ показана соответствующей

кривой на рис. 6-12. Эта кривая эквивалентна кривой $\frac{I_{кВ}^{(1,2)}}{I_{кВ}^{(1,2)}}$

(их ординаты находятся в постоянном соотношении $\frac{\sqrt{3}}{1,5} = 1,15$).

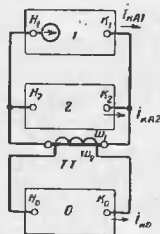


Рис. 6-13. К задаче 6-20. Комплексная схема для однофазно-двухфазного короткого замыкания.

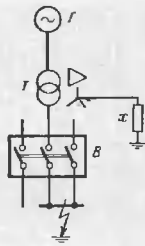


Рис. 6-14. Схема к задаче 6-21.

и $x_0 = 1:2$. Таким образом, при рассматриваемом виде короткого замыкания комплексная схема уже не является схемой замещения, поскольку она содержит магнитную связь.

Задача 6-21

При выводе выключателя B схемы на рис. 6-14 произошло двухфазное короткое замыкание на землю. Через 1 сек после возникновения короткого отключились только две фазы выключателя; третья поврежденная фаза осталась включенной.

Требуется определить наибольшие величины периодической составляющей тока в оставшейся включенной фазе и напряжений отключившихся фаз.

Элементы схемы на рис. 6-14 характеризуются следующими данными:

генератор G 130 *Мва*, 13,8 *кв*, $x_d = 0,6$, $x'_d = 0,2$, $x_2 = 0,28$, $T_{го} = 0,1$ *сек*, АРВ включено, $I_{нр} = 3$, $T_c = 0$; предварительно работал на номинальном ходу с номинальным напряжением;

трансформатор T 120 *Мва*, 121/13,8 *кв*, $u_n = 10,5\%$, нейтраль обмотки высшего напряжения заземлена через $x = 15$ *ом*.

Решение. Привяв номинальные условия генератора за базисные, определим относительные реактивности трансформатора и катушки включенной в его нейтраль,

$$x_T = 0,105 \cdot \frac{130}{120} = 0,114 \text{ и } x = 15 \cdot \frac{130}{121^2} = 0,133.$$

Резльтирующие реактивности обратной и нулевой последовательностей будут:

$$x_{2\Sigma} = 0,28 + 0,114 = 0,394;$$

$$x_{0\Sigma} = 0,114 + 3 \cdot 0,133 = 0,513.$$

Дополнительная реактивность при двухфазном коротком замыкании на землю

$$x_A^{(1,1)} = 0,394/0,513 = 0,222.$$

Настоящая величина

$$I_d^{(1,1)} = 5,3 \cdot \frac{0,2 + 0,114 + 0,222}{0,6 + 0,114 + 0,222} = 5,3 \cdot \frac{0,536}{0,936} = 3,03 \text{ сек.}$$

Критическая реактивность для установившегося режима короткого замыкания

$$x_{кр} = 0,6 \cdot \frac{1}{3-1} = 0,3$$

и соответственно критический ток прямой последовательности

$$I_{к11} = \frac{1}{0,3} = 3,33.$$

Остановимся на вопросе комплексной схемы для данного вида короткого замыкания. Чтобы удовлетворить соотношения для симметричных составляющих токов и напряжений, которые вытекают из граничных условий, в данном случае необходимо схему нулевой последовательности связать со схемой других последовательностей через трансформатор тока TT , как это показано на рис. 6-13. Отношение чисел витков у этого трансформатора должно быть

Значения токов прямой последовательности:

$$I_1 = \frac{1}{0,536} = 1,87 \text{ и } I_{1np} = \frac{3}{0,936} = 3,2;$$

через 1 сек

$$I_1 = 3,2 + (1,87 - 3,2)e^{-1/3,03} = 2,24.$$

Переходная э. д. с. в момент отключения двух фаз выключателя

$$E' = 2,24 \cdot 0,536 = 1,2.$$

После отключения двух фаз выключателя изменился вид короткого замыкания; он из двухфазного короткого на землю перешел в однофазное короткое. Соответственно этому дополнительная реактивность будет:

$$x_A^{(1)} = 0,394 + 0,513 = 0,907.$$

Значение тока прямой последовательности в начальный момент после отключения двух фаз выключателя

$$I_1 = \frac{1,2}{1,221} = 0,983$$

и напряжение прямой последовательности генератора

$$U_1 = 0,983(0,114 + 0,907) = 1.$$

т. е. практически можно считать, что в дальнейшем все величины сохраняются неизменными.

Таким образом, искомый ток будет:

$$I = 3 \cdot 0,983 \cdot \frac{130}{\sqrt{3} \cdot 121} = 1,83 \text{ кА.}$$

Симметричные составляющие напряжений в месте короткого

$$\dot{U}_1 = 0,983 \cdot 0,907 = 0,89; \quad \dot{U}_2 = -0,983 \cdot 0,394 = -0,39;$$

$$\dot{U}_0 = -(0,89 - 0,39) = -0,5.$$

Напряжение здоровых (отключившихся) фаз

$$U = |a^2 \cdot 0,89 - a \cdot 0,39 - 0,5| \frac{121}{\sqrt{3}} = 95 \text{ кВ.}$$

Задача 6-22

Блок, состоящий из: гидрогенератора G 235 Mva , $\cos \varphi = 0,85$, 15,75 kA , $x''_d = x''_q = x_2 = 0,2$ и повышающего трансформатора T 250 Mva , 254/15,75 kV , $u_k = 12,2\%$, $Y_0\Delta$ -11, связан с системой C , эквивалентные реактивности которой составляют $x_1 = x_2 = 88 \text{ Ом}$ и $x_0 = 132 \text{ Ом}$.

Генератор работает с номинальной нагрузкой; напряжение системы (т. е. за реактивностью x_1) практически неизменно.

Для случаев трехфазного, двухфазного, однофазного и двухфазного на землю коротких замыканий, осуществляемых с помощью показанных на схеме рис. 6-15 разъединителей P , P_2 и выключателя B , требуется определить фазные величины токов и напряжений генератора и трансформатора (на стороне звезды) в начальный момент короткого замыкания. Кроме того, для каждого вида короткого замыкания построить векторные диаграммы токов и напряжений.

Решение. Расчет проведем в относительных единицах при номинальных условиях генератора. При этом реактивности трансформатора и системы будут:

$$x_{TP} = 0,122 \cdot \frac{235}{250} = 0,115; \quad x_1 = x_2 = 88 \cdot \frac{235}{254^2} = 0,32$$

$$x_0 = 132 \cdot \frac{235}{254^2} = 0,48.$$

Начальное значение сверхпереходной э. д. с. генератора

$$E''_0 = \sqrt{0,85^2 + (0,53 + 0,2)^2} = 1,12,$$

и напряжение системы

$$U_c = \sqrt{0,85^2 + (0,53 - 0,115 - 0,32)^2} = 0,84.$$

Натурно установить, что приведенная к стороне высшего напряжения э. д. с. E''_0 генератора сдвинута относительно напряжения системы \dot{U}_c на $34,5^\circ$. Поскольку этот сдвиг сравнительно невелик, то для упрощения дальнейших подсчетов пренебрежем им⁴. Соответственно в комплексной плоскости примем, что $E''_A = j1,12$ и напряжение системы $\dot{U}_A = j0,84$.

Результирующие реактивности в э. д. с. относительно места короткого замыкания составляют:

$$x_{11} = x_{25} = (0,2 + 0,115)/0,32 = 0,16; \quad x_{00} = 0,115/0,48 = 0,098$$

$$\dot{E}_A \approx j \frac{1,12 + 0,84}{2} = j0,98$$

(так как реактивности обеих ветвей практически одинаковы).

Рассмотрим поочередно каждый вид короткого замыкания.

Трехфазное короткое замыкание

В данном случае имеем ток на стороне звезды трансформатора

$$I_A = \frac{j1,12}{j0,315} = 3,55$$

⁴ Этот случай фаз рассмотрен в задаче 6-24.

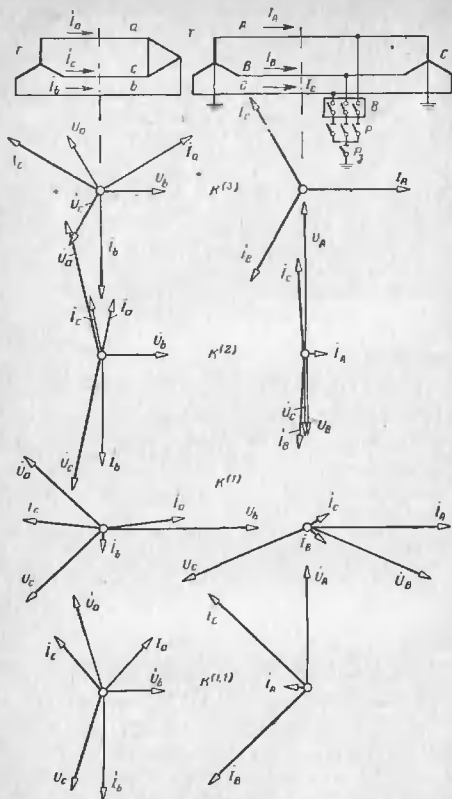


Рис. 6-15. К задаче 6-22. Векторные диаграммы токов и напряжений при разных видах короткого замыкания.

и при заданной группе соединения обмоток трансформатора ток фазы a генератора $I_a = 3,55 \angle 30^\circ$. Напряжение генератора

$$\dot{U}_a = j 0,115 \cdot 3,55 \angle 30^\circ = 0,41 \angle 120^\circ.$$

Двухфазное короткое замыкание

Напряжение прямой последовательности в месте короткого

$$\dot{U}_{\kappa A1} = \frac{j 0,98}{j 2 \cdot 0,16} j 0,16 = j 0,49 = \dot{U}_{\kappa A2}$$

Симметричные составляющие токов трансформатора:

$$I_{A1} = \frac{j(1,12 - 0,49)}{j 0,315} = 2; \quad I_{A2} = \frac{0 - j 0,49}{j 0,315} = -1,53,$$

и фазные токи

$$I_A = 2 - 1,53 = 0,47;$$

$$I_B = \hat{I}_C = a^2 - a \cdot 1,53 = 3,07 \angle -94,5^\circ.$$

Фазные токи генератора будут:

$$I_a = 2 \angle 30^\circ - 1,53 \angle -30^\circ = 1,8 \angle 78^\circ = \hat{I}_c;$$

$$I_b = 2 \angle 270^\circ - 1,53 \angle -90^\circ = -j 3,53.$$

Фазные напряжения на стороне звезды трансформатора:

$$\dot{U}_A = 2j 0,49 = j 0,98; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_C = -j 0,49;$$

Фазные напряжения генератора:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= j(49 + 2 \cdot 0,115) \angle 30^\circ + j(0,49 - 1,53 \cdot 0,115) \angle -30^\circ = \\ &= 0,72 \angle 120^\circ + 0,31 \angle 60^\circ = 0,90 \angle 105^\circ = \hat{U}_c \end{aligned}$$

"

$$\dot{U}_b = 0,72 \angle 360^\circ + 0,31 \angle 180^\circ = 0,72 - 0,31 = 0,41.$$

Однофазное короткое замыкание

Напряжение прямой последовательности в месте короткого

$$\dot{U}_{\kappa A1} = \frac{j 0,98}{j(2 \cdot 0,16 + 0,093)} j(0,16 + 0,093) = 2,38 j 0,253 = j 0,6;$$

и обратный и нулевой последовательностей:

$$\dot{U}_{\kappa A2} = -2,38 j 0,16 = -j 0,38 \quad \text{и} \quad \dot{U}_{\kappa 0} = -2,38 j 0,093 = -j 0,22.$$

Симметричные составляющие токов трансформатора:

$$I_{A1} = \frac{j(1,12 - 0,6)}{j0,315} = 1,65; \quad I_{A2} = \frac{j0,38}{-j0,315} = 1,2;$$

$$I_{A0} = \frac{j0,22}{j0,115} = 1,93,$$

и фазные токи:

$$I_A = 1,65 + 1,20 + 1,93 = 4,78;$$

$$I_B = a^2 \cdot 1,65 + a \cdot 1,20 + 1,93 = 0,63 \angle -38^\circ = \hat{I}_C,$$

Фазные токи генератора:

$$I_a = 1,65 \angle 30^\circ + 1,2 \angle -30^\circ = 2,48 \angle 5^\circ = \hat{I}_c;$$

$$I_b = 1,65 \angle 270^\circ + 1,2 \angle 90^\circ = (1,65 - 1,2) \angle -90^\circ = 0,45 \angle -90^\circ.$$

Фазные напряжения на стороне звезды трансформатора:

$$\dot{U}_A = 0; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_C = 0,6 \cdot a^2 - 0,38 \cdot a - 0,22 = 0,92 \angle -21^\circ.$$

Фазные напряжения генератора:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= j(0,6 + 1,65 \cdot 0,115) \angle 30^\circ + (-0,38 + 1,2 \cdot 0,115) \angle -30^\circ = \\ &= 0,71 \angle 138^\circ = \hat{U}_c \end{aligned}$$

и

$$\dot{U}_b = 0,79 \angle 360^\circ - 0,24 \angle 180^\circ = 0,79 + 0,24 = 1,03.$$

Двухфазное короткое замыкание на землю

Дополнительная реактивность

$$x_d = 0,16 / j0,093 = 0,059.$$

Ток прямой последовательности в месте короткого

$$I_{KA1} = \frac{j0,98}{j(0,16 + 0,059)} = 4,48.$$

Симметричные составляющие напряжения в месте короткого

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{U}_{KA2} = \dot{U}_{K0} = 4,48 j0,059 = j0,264.$$

симметричные составляющие токов трансформатора:

$$I_{A1} = \frac{j(1,12 - 0,264)}{j0,315} = 2,68; \quad I_{A2} = \frac{-j0,264}{j0,315} = -0,84;$$

$$I_0 = \frac{-j0,264}{j0,115} = -2,29.$$

Фазные напряжения на стороне звезды трансформатора:

$$\dot{U}_A = 3 j0,264 = j0,792 \quad \text{и} \quad \dot{U}_B = \dot{U}_C = 0.$$

Фазные напряжения генератора:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= j(0,264 + 2,68 \cdot 0,115) \angle 30^\circ + j(-0,84 \cdot 0,2) \angle -30^\circ = \\ &= 0,67 \angle 108^\circ = \hat{U}_c \end{aligned}$$

$$\dot{U}_b = 0,572 \angle 360^\circ + 0,168 \angle 180^\circ = 0,404.$$

По полученным величинам токов и напряжений построены векторные диаграммы, которые представлены на рис. 6-15. Их масштабы для всех видов короткого замыкания одинаковы. Условно приняты, что особой фазой является фаза А.

Задача 6-23

Произвести сопоставление полученных в решении предыдущей задачи фазных токов трансформатора и генератора при различных видах короткого замыкания с значениями тех же токов, которые были бы в том случае, если система С была бы отключена и генератор А работал до возникновения короткого замыкания на холостом режиме номинальным напряжением.

Задача 6-24

Выполнить решение задачи 6-22 с учетом сдвига фазы э. д. с. генератора относительно напряжения системы.

Решение. Пусть вектор э. д. с. \dot{E}''_{A0} приведенной к стороне звезды трансформатора, как и раньше, направлен по оси положительной мнимых величин комплексной плоскости, т. е. $\dot{E}''_{A0} = j1,12$. Тогда векторная диаграмма предшествующего режима будет иметь вид, как показано на рис. 6-16 (в верхнем первом квадранте). Из нее, в частности, следует, что напряжение за трансформатором, т. е. в месте короткого до возникновения последнего, в фазе А

$$\dot{U}_{A0} = 0,945 \angle 75^\circ \quad \text{и ток} \quad I_{A0} = 1 \angle 49^\circ.$$

При трехфазном коротком замыкании сдвиг фаз в данном случае никак не влияет на ток генератора, поскольку при этом генератор

оказывается отделенным от системы. Такое явление, очевидно, проявляется лишь при несимметричных коротких замыканиях в рассматриваемой точке.

Двухфазное короткое замыкание

Проведем решение, используя наложение собственно аварийного режима на предшествующий рабочий режим. Для собственно аварийного режима исходим на схеме на рис. 6-16, где напряжение \dot{U}_{A0} приложено за реактивностью $X_{2\Sigma} = 0,16$, присоединенной к точке короткого (K_1) в схеме прямой последовательности, из которой э. д. с. источников удалены.

Для аварийной составляющей тока прямой последовательности генератора (учитывая, что реактивности параллельных ветвей практически одинаковы) имеем:

$$I_{A1ав} = \frac{0 - (-0,945 \angle 75^\circ)}{2j(0,16 + 0,16)} = 1,48 \angle -15^\circ.$$

Коль скоро схемы прямой и обратной последовательностей в данном случае одинаковы, то

$$I_{A2} = -I_{A1ав} = -1,48 \angle -15^\circ.$$

Следовательно, фазные токи на стороне звезды трансформатора будут:

$$I_A = I_{A1ав} + I_{A0} + I_{A2} = 1 \angle 49^\circ;$$

$$I_B = (a^2 - a) 1,48 \angle -15^\circ + a^2 \cdot 1 \angle 49^\circ = 3,45 \angle -95^\circ;$$

$$I_C = (a - a^2) 1,48 \angle -15^\circ + a \cdot 1 \angle 49^\circ = 2,7 \angle 98^\circ.$$

Для определения фазных токов генератора используем выражения (при группе соединения $Y_0/\Delta-11$):

$$I_a = \frac{I_A - I_B}{\sqrt{3}} = \frac{1 \angle 49^\circ - 3,45 \angle -95^\circ}{\sqrt{3}} = 2,5 \angle 77^\circ;$$

$$I_b = \frac{I_B - I_C}{\sqrt{3}} = \frac{3,45 \angle -95^\circ - 2,7 \angle 98^\circ}{\sqrt{3}} = 3,5 \angle -90^\circ;$$

$$I_c = \frac{I_C - I_A}{\sqrt{3}} = \frac{2,7 \angle 98^\circ - 1 \angle 49^\circ}{\sqrt{3}} = 1,2 \angle 119^\circ;$$

здесь линейный коэффициент трансформации $k=1$, так как величины выражены в относительных единицах.

Аварийная составляющая напряжения прямой последовательности генератора (приведенная к стороне звезды трансформатора)

$$\dot{U}_{rA1ав} = 0 - j0,2 \cdot 1,48 \angle -15^\circ = 0,296 \angle -105^\circ;$$

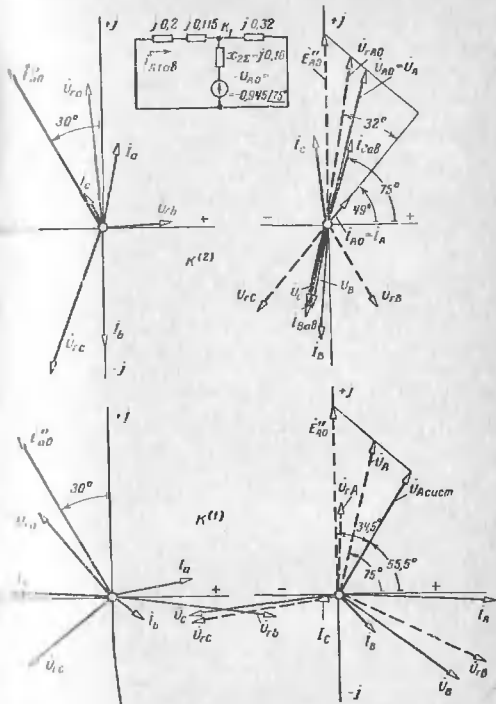


Рис. 6-16. К задаче 6-24. Векторные диаграммы токов и напряжений двухфазного и однофазного коротких замыканий.

напряжение обратной последовательности генератора

$$\dot{U}_{rA2} = 0 - j0,2(-1,48 \angle -15^\circ) = 0,296 \angle 75^\circ.$$

Фазные напряжения генератора, приведенные к стороне звезды трансформатора:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{rA} &= 1 \angle 81^\circ + 0,296 \angle -105^\circ + 0,296 \angle 75^\circ = 1 \angle 81^\circ; \\ \dot{U}_{rB} &= a^2(1 \angle 81^\circ + 0,296 \angle -105^\circ) + a \cdot 0,296 \angle 75^\circ = 0,57 \angle 60^\circ; \\ \dot{U}_{rC} &= a(1 \angle 81^\circ + 0,296 \angle -105^\circ) + a^2 \cdot 0,296 \angle 75^\circ = 0,67 \angle 132^\circ.\end{aligned}$$

Действительные фазные напряжения (с учетом сдвига в трансформаторе) будут:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{ra} &= \frac{\dot{U}_{rA} - \dot{U}_{rB}}{\sqrt{3}} = \frac{1 \angle 81^\circ - 0,57 \angle 60^\circ}{\sqrt{3}} = 0,87 \angle 95^\circ; \\ \dot{U}_{rb} &= \frac{\dot{U}_{rB} - \dot{U}_{rC}}{\sqrt{3}} = \frac{0,57 \angle 60^\circ - 0,67 \angle 132^\circ}{\sqrt{3}} = 0,42 \angle 2^\circ; \\ \dot{U}_{rc} &= \frac{\dot{U}_{rC} - \dot{U}_{rA}}{\sqrt{3}} = \frac{0,67 \angle 132^\circ - 1 \angle 81^\circ}{\sqrt{3}} = 0,93 \angle -122^\circ.\end{aligned}$$

Фазные токи и напряжения генератора, разумеется, можно получить также через симметричные составляющие, учитывая их изменение при трансформации. Так, например, для напряжений фазы *a* генератора имеем:

$$\dot{U}_{ra} = (1 \angle 81^\circ + 0,296 \angle -105^\circ) \angle 30^\circ + (0,296 \angle 75^\circ) \angle -30^\circ = 0,87 \angle 95^\circ.$$

По полученным величинам построены векторные диаграммы, показанные на рис. 6-16. Сопоставляя их с соответствующими диаграммами на рис. 6-15, замечаем, что сдвиг фаз между э. д. с. источников сказывается довольно заметно.

Однофазное короткое замыкание

Нетрудно убедиться, что эквивалентная э. д. с. двух генерирующих ветвей, реактивности которых в данном случае практически одинаковы,

$$\dot{E}_a = \frac{1,12 \angle 90^\circ + 0,84 \angle 55,5^\circ}{2} = 0,945 \angle 75^\circ$$

представляет собой то напряжение, которое было в месте короткого до возникновения последнего.

Симметричные составляющие тока в месте короткого будут:

$$\dot{I}_{KA1} = \dot{I}_{KA2} = \dot{I}_{r0} = \frac{0,945 \angle 75^\circ}{j(2 \cdot 0,16 + 0,093)} = 2,29 \angle -15^\circ;$$

симметричные составляющие напряжения:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{KA1} &= j(0,16 + 0,093) \cdot 2,29 \angle -15^\circ = 0,58 \angle 75^\circ; \\ \dot{U}_{KA2} &= -j0,16 \cdot 2,29 \angle -15^\circ = 0,366 \angle -105^\circ; \\ \dot{U}_{r0} &= -j0,093 \cdot 2,29 \angle -15^\circ = 0,214 \angle -105^\circ.\end{aligned}$$

Фазные напряжения в месте короткого:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{KA} &= 0; \\ \dot{U}_{rA} &= a^2 \cdot 0,58 \angle 75^\circ + a \cdot 0,366 \angle -105^\circ + 0,214 \angle -105^\circ = 0,88 \angle -35^\circ; \\ \dot{U}_{rC} &= a \cdot 0,58 \angle 75^\circ + a^2 \cdot 0,366 \angle -105^\circ + 0,214 \angle -105^\circ = 0,88 \angle -175^\circ.\end{aligned}$$

Симметричные составляющие токов трансформатора на стороне низкого:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{A1} &= \frac{1,12 \angle 90^\circ - 0,58 \angle 75^\circ}{j0,315} = 1,85 \angle 15^\circ; \\ \dot{I}_{A2} &= \frac{2,29 \angle -15^\circ}{2} = 1,15 \angle -15^\circ; \quad \dot{I}_0 = \frac{0,093}{0,115} \cdot 2,29 \angle -15^\circ = 1,85 \angle -15^\circ.\end{aligned}$$

Фазные токи получаются следующими:

$$\dot{I}_A = 4,75 \angle -2^\circ; \quad \dot{I}_B = 1,5 \angle -47^\circ; \quad \dot{I}_C = 0,35 \angle -170^\circ.$$

Фазные напряжения генератора, приведенные к стороне звезды трансформатора, составляют:

$$\dot{U}_{rA} = 1,12 \angle 90^\circ - j0,2 \cdot 1,85 \angle 15^\circ - j0,2 \cdot 1,15 \angle -15^\circ = 0,55 \angle 88^\circ;$$

и равно

$$\dot{U}_{rB} = 0,94 \angle -35^\circ \quad \text{и} \quad \dot{U}_{rC} = 0,88 \angle -172^\circ.$$

Как и выше, теперь нетрудно найти фазные величины токов и напряжений генератора:

$$\begin{aligned}\dot{I}_a &= 2,2 \angle 12^\circ; \quad \dot{I}_b = 1 \angle -37^\circ; \quad \dot{I}_c = 2,97 \angle 177^\circ; \\ \dot{U}_a &= 0,72 \angle 132^\circ; \quad \dot{U}_b = 1 \angle -7^\circ; \quad \dot{U}_c = 0,66 \angle -143^\circ.\end{aligned}$$

Векторные диаграммы, построенные по найденным величинам токов и напряжений для этого вида короткого замыкания, приведены на рис. 6-16.

Аналогичные подсчет и построение векторных диаграмм для другого вида короткого замыкания на землю рекомендуется выполнять читателю самостоятельно.

Задача 6-25

К середине воздушной линии 110 кВ протяженностью 75 км, связывающей узлы M и N системы и имеющей двустороннее питание с одним трансформатором T 40 МВА, 115/6,3 кВ, $u_k = 10,5\%$, Y_{Δ}/Δ -11. Присоединение должно быть выполнено через отделитель $ОД$, при этом повреждения в трансформаторе T переводятся устанавливаемым короткозамыкателем $КЗ$ в однофазные короткие замыкания, отключение которых производится выключателями $B-1$ и $B-2$ данной линии.

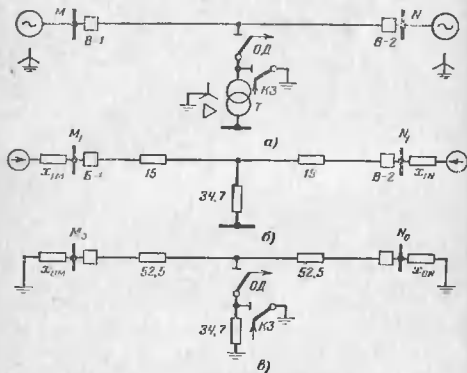


Рис. 6-17. К задаче 6-25.

а — исходная схема; б — схема замыкания прямой (обратной) последовательности; в — та же нулевой последовательности.

Требуется определить:

1) наибольший ток, от которого должна быть отстроена релейная защита линии, чтобы она не реагировала на короткие замыкания за трансформатором T ;

2) величины токов короткого замыкания, по которым должны быть проверены отделитель $ОД$ и короткозамыкатель по условиям их электродинамической устойчивости.

Реактивности системы по концам линии подлежат определению по известным величинам сверхпереходного тока при трех- и однофазных коротких замыканиях:

$$\text{в узле } M \quad I_{\kappa}^{(3)} = 5,54 \text{ кА и } I_{\kappa}^{(1)} = 4,86 \text{ кА};$$

$$\text{в узле } N \quad I_{\kappa}^{(3)} = 3,70 \text{ кА и } I_{\kappa}^{(1)} = 3,50 \text{ кА}.$$

При этом реактивности прямой и обратной последовательностей можно считать одинаковыми. По обе стороны линии за соответствующими значениями x_1 системы считать приложенными неизменные параметры 115 кВ.

Для линии принимать $x_1 = 0,4 \text{ Ом/км}$ и $x_0 = 1,4 \text{ Ом/км}$.

Решение. По заданным величинам токов короткого замыкания в начале результирующие реактивности относительно каждого из узлов M и N . Так, для прямой последовательности имеем:

$$x_{1M} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 5,54} = 12 \text{ Ом и } x_{1N} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 3,70} = 18 \text{ Ом};$$

такие же реактивности будут и для обратной последовательности. Аналогично находим реактивности нулевой последовательности:

$$x_{0M} = \frac{3 \cdot 115}{\sqrt{3} \cdot 4,86} - 2 \cdot 12 = 17,3 \text{ Ом и } x_{0N} = \frac{3 \cdot 115}{\sqrt{3} \cdot 3,50} - 2 \cdot 18 = 20,8 \text{ Ом}.$$

Теперь, зная реактивности линии $x_1 = 0,4 \cdot 75 = 30 \text{ Ом}$ и $x_0 = 1,4 \cdot 75 = 105 \text{ Ом}$, для определения эквивалентных реактивностей соответствующих частей системы (рис. 6-17 б и в) можно составить уравнения:

для схемы прямой последовательности

$$\frac{x_{1M}(30 + x_{1N})}{x_{1M} + 30 + x_1} = 12 \quad \text{и} \quad \frac{x_{1N}(30 + x_{1M})}{x_{1N} + 30 + x_{1M}} = 18;$$

для схемы нулевой последовательности

$$\frac{x_{0M}(105 + x_{0N})}{x_{0M} + 105 + x_{0N}} = 17,3 \quad \text{и} \quad \frac{x_{0N}(105 + x_{0M})}{x_{0N} + 105 + x_{0M}} = 20,8.$$

Одновременное решение каждой пары этих равенств приводит к следующим значениям реактивностей:

$$x_{1M} = 15 \text{ Ом}; \quad x_{1N} = 30 \text{ Ом} \quad \text{и} \quad x_{0M} = 20 \text{ Ом}; \quad x_{0N} = 25 \text{ Ом}.$$

Для решения п. 1 следует рассмотреть за трансформатором T трехфазное короткое замыкание, при этом наибольший ток через отделитель выключатель, очевидно, будет в том случае, когда другой отделитель отключен. Следовательно, наибольший ток через выключатель $B-1$ при трехфазном коротком за трансформатором будет (рис. 6-17 в):

$$I = \frac{115}{\sqrt{3}(15 + 15 + 34,7)} = 1,03 \text{ кА},$$

где $34,7 = 0,105 \cdot \frac{115^2}{30}$ — реактивность трансформатора T , приведенная к стороне высшего напряжения.

Аналогично наибольший ток через выключатель В2 будет:

$$I = \frac{115}{\sqrt{3}(30+15+34,7)} = 0,88 \text{ кА.}$$

Для решения п. 2 необходимо рассмотреть включение однофазного короткозамыкателя КЗ. В соответствии со схемой замещения на рис. 6-17,б и в находим результирующие реактивности:

$$x_{1\Gamma} = x_{2\Gamma} = (15+15)/(30+15) = 18 \text{ Ом};$$

$$x_{0\Gamma} = \left(20 + \frac{105}{2}\right) // \left(25 + \frac{105}{2}\right) // 34,7 = 17,9 \text{ Ом.}$$

Ток, протекающий через короткозамыкатель КЗ,

$$I_K = \frac{3 \cdot 115}{\sqrt{3}(2 \cdot 18 + 17,9)} = 3,8 \text{ кА}$$

и через отделитель ОД

$$I = \frac{2}{3} \cdot 3,8 + \frac{1}{3} \cdot 3,8 \left(1 - \frac{17,9}{34,7}\right) = 3,14 \text{ кА.}$$

Принимая среднее значение ударного коэффициента $k_y = 1,8$, найдем величины ударных токов при однофазном коротком замыкании, протекающие через:

короткозамыкатель КЗ $I_y = 1,8\sqrt{2} \cdot 3,8 = 9,7 \text{ кА};$

отделитель ОД $I_y = 1,8\sqrt{2} \cdot 3,14 = 8,0 \text{ кА.}$

Для отделителя этот ток не является наибольшим возможным. Последний, очевидно, будет при трехфазном коротком замыкании за отделителем. Поскольку в данном случае $x_{0\Gamma} \approx x_{1\Gamma} = x_{2\Gamma}$, то ударный ток при трехфазном коротком практически такой же, как и при однофазном коротком.

Таким образом, номинальные токи электродинамической устойчивости отделителя и короткозамыкателя, устанавливаемые на данной подстанции, должны быть сопоставлены с ударным током $I_y = 9,7 \text{ кА.}$

Задача 6-26

Одноцепная воздушная линия протяженностью 100 км, у которой $x_1 = 0,4 \text{ Ом/км}$ и $x_0 = 1,3 \text{ Ом/км}$, связывает узлы М и N сети 230 кВ системы. Других связей между этими узлами не имеется.

Известно, что при трехфазных и однофазных коротких замыканиях в данных узлах мощность короткого замыкания в начальный момент составляет:

в узле М $S_K^{(3)} = 3 \text{ 680 Мва}$ и $S_K^{(1)} = 3 \text{ 000 Мва};$

в узле N $S_K^{(3)} = 6 \text{ 160 Мва}$ и $S_K^{(1)} = 5 \text{ 200 Мва.}$

Требуется определить для начального момента однофазного короткого замыкания в узле М фазные токи в указанной линии и фазное напряжение в узлах М и N.

Решение. Результирующие реактивности прямой последовательной системы относительно этих узлов найдем из заданных значений мощностей трехфазного короткого замыкания, т. е.

$$x_{M1\Gamma} = \frac{230^2}{3 \cdot 680} = 14,3 \text{ Ом} \text{ и } x_{N1\Gamma} = \frac{230^2}{6 \cdot 160} = 8,56 \text{ Ом.}$$

Принимая $x_{M2\Gamma} = x_{M1\Gamma}$ и $x_{N2\Gamma} = x_{N1\Gamma}$, найдем по заданным значениям мощностей однофазного короткого замыкания результирующие реактивности нулевой последовательности системы относительно этих же узлов, т. е.

$$3 \cdot 000 = \frac{230^2}{2 \cdot 14,3 + x_{M0\Gamma}},$$

$$x_{M0\Gamma} = 25 \text{ Ом,}$$

$$5 \cdot 200 = \frac{230^2}{2 \cdot 8,56 + x_{N0\Gamma}},$$

$$x_{N0\Gamma} = 13,7 \text{ Ом.}$$

Аналогично решено задачи 6-25 из системы уравнений

$$\frac{x_{M1}(40+x_{N1})}{x_{M1}+40+x_{N1}} = 14,3; \quad \frac{x_{N1}(40+x_{M1})}{x_{M1}+40+x_{N1}} = 8,56$$

получим $x_{M1} = 20 \text{ Ом}$ и $x_{N1} = 10 \text{ Ом}$ и из системы уравнений

$$\frac{x_{M0}(130+x_{N0})}{x_{M0}+130+x_{N0}} = 25; \quad \frac{x_{N0}(130+x_{M0})}{x_{M0}+130+x_{N0}} = 13,7$$

получим $x_{M0} = 30 \text{ Ом}$ и $x_{N0} = 15 \text{ Ом.}$

Начальное значение тока при однофазном коротком замыкании в узле М составляет:

$$I_K = \frac{3 \cdot 000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 7,5 \text{ кА.}$$

В поврежденной фазе А, найдем ее симметричные составляющие тока:

в месте короткого замыкания

$$I_{A1} = I_{A2} = I_0 = \frac{7,5}{3} = 2,5 \text{ кА;}$$

в линии

$$I_{A1} = I_{A2} = 2,5 \cdot \frac{20}{20 + 40 + 10} = 0,715 \text{ кА}$$

$$I_0 = 2,5 \cdot \frac{30}{30 + 130 + 15} = 0,43 \text{ кА.}$$

Искомые фазные токи линии:

$$\begin{aligned} I_A &= 2 \cdot 0,715 + 0,43 = 1,86 \text{ кА}; \quad I_B = \bar{I}_C = \\ &= (a^2 + a) 0,715 + 0,43 = -0,285 \text{ кА.} \end{aligned}$$

Симметричные составляющие напряжений:

в узле M

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= -j25 \cdot 2,5 = -j62,5 \text{ кВ}; \\ \dot{U}_{A2} &= -j14,3 \cdot 2,5 = -j35,8 \text{ кВ}; \\ \dot{U}_{A1} &= -j(-62,5 - 35,8) = j98,3 \text{ кВ}; \end{aligned}$$

в узле N

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= -j15 \cdot 0,43 = -j6,45 \text{ кВ}; \\ \dot{U}_{A2} &= -j10 \cdot 0,715 = -j7,15 \text{ кВ}; \\ \dot{U}_{A1} &= j98,3 + j40 \cdot 0,715 = j126,9 \text{ кВ.} \end{aligned}$$

Искомые фазные напряжения будут:

в узле M

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= 0; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_C = j(a^2 \cdot 98,3 - a \cdot 35,8) - j62,5 = \\ &= 147,4 - j93,75 = 175 \angle -32,5^\circ; \end{aligned}$$

в узле N

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= j(126,9 - 7,15 - 6,45) = j113,3 \text{ кВ}; \\ \dot{U}_B = \dot{U}_C &= j(a^2 \cdot 126,9 - a \cdot 7,15) - j6,45 = \\ &= 113,6 - j66,3 = 134 \angle -30,5^\circ. \end{aligned}$$

Задача 6-27

На одной из цепей двухцепной линии передачи предполагается короткое замыкание (рис. 6-18). Требуется построить кривые изменения сверхпереходного тока в месте короткого и токов в выключателях B-1 и B-2 при перемещении точки короткого K по данной цепи линии. Построение произвести для двух видов короткого замыкания а) трехфазного и б) однофазного.

Генератор Г-1 117,5 Мва, 13,8 кВ, $x'_{d1} = 0,138 \approx x_{d1}$.
Трансформатор Т-1 125 Мва, 121/13,8 кВ, $u_k = 10,5\%$, Y_0/Δ .
Трансформатор Т-2 100 Мва, 121/10,5 кВ, $u_k = 9,7\%$, Y_0/Δ .
Линия 80 км, $x_1 = 0,4 \text{ Ом/км}$ одной цепью, $x_0 = 3,5 \text{ Ом}$ без учета влияния соседней цепи, $x_{11} = 2x_1$ — реактивность взаимной индукции между цепями в нулевой последовательности.

При коротком замыкании генератор работал на холостом ходу и номинальным напряжением.

Решение. Решение проведем в именованных единицах, отнеся все величины к стороне линии передачи, т. е.:

$$x_{T-1} = 0,137 \cdot \frac{121^2}{117,5} = 17,2 \text{ Ом}; \quad x_{T-2} = 0,105 \cdot \frac{121^2}{125} = 12,3 \text{ Ом},$$

$$x_{T-2} = 0,097 \cdot \frac{121^2}{100} = 14,1 \text{ Ом};$$

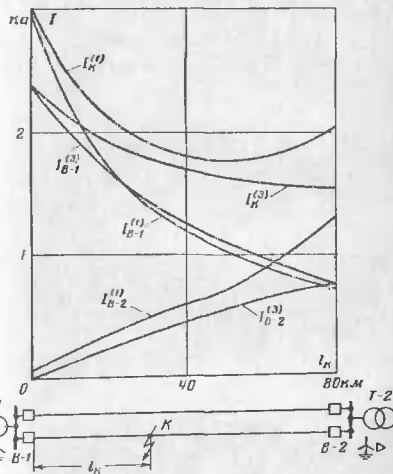


Рис. 6-18. К задаче 6-27. Исходная схема и кривые изменения тока в месте короткого замыкания и токов в выключателях B-1 и B-2 при перемещении точки короткого по линии передачи.

реактивность здоровой цепи

$$x_0 = 0,4 \cdot 80 = 32 \text{ Ом}; \quad x_0 = 3,5 \cdot 32 = 112 \text{ Ом}; \quad x_{0(1)} = 2 \cdot 32 = 64 \text{ Ом};$$

численные э. д. с. генератора

$$\bar{E} = 13,8 \cdot \frac{121}{13,8} = 121 \text{ кВ},$$

и ее фазная величина

$$\vec{E}_0 = \frac{121}{\sqrt{3}} = 70 \text{ кв.}$$

а) Трехфазное короткое замыкание

В данном случае схема замещения имеет вид рис. 6-19,а где $x_{T-1} + x_{T-1} = 17,2 + 12,3 = 29,5 \text{ ом}$, а $n = \frac{I_K}{I}$ — относительная длина участка поврежденной цепи, примыкающего к выключателю В-1. Эквивалентная реактивность обеих цепей линии

$$x_0 = n32 // [(1-n)32 + 32] = n(2-n)16 \text{ ом.}$$

Результирующая реактивность схемы относительно места короткого $x_{\Sigma} = 29,5 + n(2-n)16 \text{ ом}$.

Ток в месте короткого

$$I_K = \frac{70}{29,5 + n(2-n)16} \text{ кА.}$$

Токи в выключателях

$$I_{B-1} = I_n \frac{n(2-n)16}{32n} = I_n \left(1 - \frac{n}{2}\right) \text{ и } I_{B-2} = I_n \frac{n}{2}.$$

Для нескольких значений n по указанным выражениям легко подсчитать искомые токи. По результатам таких подсчетов построены искомые кривые, которые приведены на графике рис. 6-18.

Наименьшее значение тока в месте короткого и в выключателе В-1 и соответственно наибольшее значение тока в выключателе В-2, как и следовало ожидать, получается при коротком в конце линии.

б) Однофазное короткое замыкание

Поскольку для генератора принято $x_0 \approx x''_d$, то результирующие реактивности прямой и обратной последовательностей будут одинаковы

$$x_{2\Sigma} = x_{1\Sigma} = 29,5 + n(2-n)16 \text{ ом.}$$

Исходная схема нулевой последовательности имеет вид рис. 6-19,б, где у фигурных скобок указаны значения реактивностей взаимоддукции между цепями линии на отдельных участках. После освобождения от магнитной связи между цепями эта схема приобретает вид, показанный на рис. 6-19,в. Замена треугольник эквивалентной звездой и произведя последовательное сложение сопротивлений элементов, получим упрощенную схему (рис. 6-19,г), результирующее сопротивление которой составляет:

$$x_{0\Sigma} = \frac{(12,3 + n88)[14,1 + (1-n)88]}{114,4} + n(1-n)24 \text{ ом.}$$

Суммарная реактивность для однофазного короткого получается

$$x^{(1)} = x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma} = 70 + 157n - 124n^2.$$

и реактивность имеет экстремум, который наступает при

$$\frac{dx^{(1)}}{dn} = 157 - 248n = 0,$$

или

$$n = \frac{157}{248} = 0,63 \quad (I_K = 0,63 \cdot 80 = 50,4 \text{ кА})$$

и величин $x_{\text{макс}}^{(1)} = 120 \text{ ом}$.

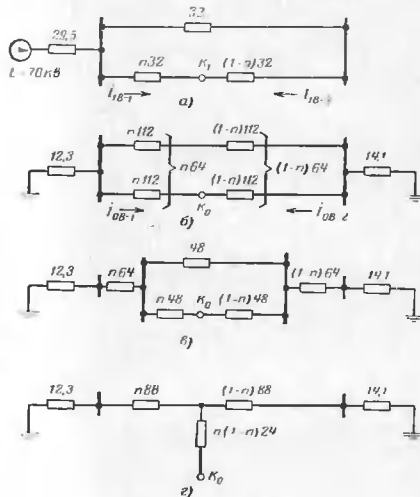


Рис. 6-19. К задаче 6-27.

а — схема прямой последовательности; б, в и г — то же нулевой последовательности.

В том же образе, симметричные составляющие токов в месте короткого (рис. 6-19):

$$I_{B1} = I_{B2} = I_{B0} = \frac{70}{70 + 157n - 124n^2} \text{ кА,}$$

в ток в месте короткого $I_{K-1} = 3I_{B-1}$; его наименьшее значение (при $n=0,63$)

$$I_{K-1} = \frac{3 \cdot 70}{120} = 1,75 \text{ кА.}$$

Для нахождения распределения токов прямой и обратной последовательностей, которое в данном случае будет одинаковым, используем те же выражения, что и при трехфазном коротком, при этом под I_K здесь следует понимать соответствующее $I_{K1} = I_{K2}$. Чтобы найти токи в цепях линии в схеме нулевой последовательности, нужно предварительно по схеме на рис. 6-19,а определить токи нулевой последовательности обеих трансформаторов I_{0T-1} и I_{0T-2} , после чего по известным выражениям получим искомые токи

$$I_{0B-1} = \frac{(2-n)}{2} I_{0T-1} + \frac{(1-n)}{2} I_{0T-2};$$

$$I_{0B-2} = \frac{n}{2} I_{0T-1} + \frac{(1+n)}{2} I_{0T-2}.$$

Ток поврежденной фазы аварийной цепи будет:

$$\text{в выключателе } B-1 \quad I_{B-1} = 2I_{1B-1} + I_{0B-1};$$

$$\text{в выключателе } B-2 \quad I_{B-2} = 2I_{1B-2} + I_{0B-2}.$$

Результаты произведенного подсчета для нескольких значений n представлены соответствующими кривыми на графике рис. 6-18. Интересно отметить, что в то время как кривые тока I_{B-1} и I_{B-2} при однофазном коротком всегда выше, чем при трехфазном коротком, кривые тока I_{B-1} при этих видах короткого пересекаются, т. е. при однофазном коротком в начале линии этот ток больше, чем при трехфазном коротком, и с увеличением удаленности короткого наблюдается обратная картина.

Что касается двухфазного короткого замыкания, то при заданных условиях кривые токов имеют тот же характер, что и при трехфазном коротком, но все ординаты кривых будут меньше на

$$\left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) 100 = 13\%.$$

Задача 6-28

В схеме предыдущей задачи предполагается, что за трансформатором $T-2$ дополнительно включен генератор $G-2$, соответственно чему исходная схема приобретает вид, показанный на рис. 6-20,а. Генератор $G-2$ имеет следующие параметры: 106 МВА , $10,5 \text{ кВ}$, $x''_d = 0,19$.

Аналогично предыдущей задаче требуется построить кривые наложения сверхпереходного тока в месте короткого и токов в выключателях $B-1$ и $B-2$ при перемещении точки короткого K по цепи II линии передачи. Построение произвести для трех- и однофазного коротких замыканий при следующих условиях:

- когда цепь II линии передачи отключена, но не заземлена;
- когда обе цепи линии включены;
- когда отключен выключатель $B-1$, а остальные выключатели включены (каждое отключение поврежденной цепи).

До возникновения короткого замыкания оба генератора работают на холостом ходу со своими номинальными напряжениями.

Решение. Сохраняем решение в именованных величинах, приводя все величины к стороне линии передачи. При этом реактивность и с.с. генератора $G-2$ будут:

$$x_{T-2} = 0,19 \cdot \frac{121^2}{106} = 26,2 \text{ Ом и } \dot{E}_\phi = \frac{10,5}{\sqrt{3}} \cdot \frac{121}{10,5} = 70 \text{ кВ.}$$

Умножив реактивность генератора $G-2$ и трансформатора $T-2$

$$x = 26,2 + 14,1 = 40,3 \text{ Ом.}$$

Рассмотрим поочередно каждое из поставленных условий.

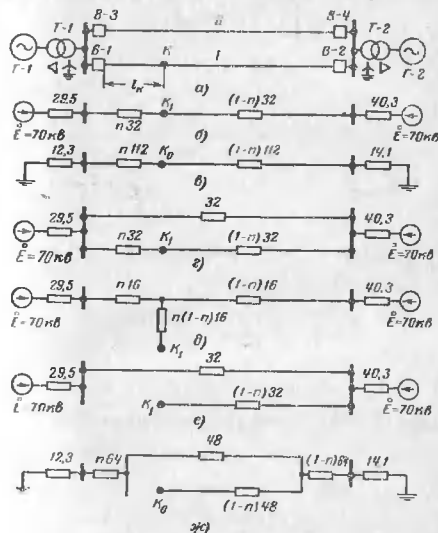


Рис. 6-20. К задаче 6-28.

- а — исходная схема; б — схема прямой (обратной) последовательности при отключенной цепи II линии; в — то же нулевой последовательности; г — схема прямой (обратной) последовательности при включенных обеих цепях линии; д — то же (после преобразования); е — схема прямой последовательности при отключенном выключателе $B-1$; ж — то же нулевой последовательности.

а) Цепь II линии передачи отключена

Для данного случая схема замещения прямой последовательности (рис. 6-20,б) получается из схемы на рис. 6-20,а, где справа должна быть добавлена генерирующая ветвь с $x=40,3$ ом, а ветвь с $x=32$ ом — исключена. Результирующая реактивность прямой (обратной) последовательности составляет¹:

$$x_{1\Sigma} = (29,5 + n32) / [40,3 + (1-n)32] = 21 + 13,4n - 10,1n^2.$$

Схема нулевой последовательности (рис. 6-20,в) также получается из схемы на рис. 6-20,б (или в), в которой достаточно разорвать ветвь, отвечающую цепи II линии. Ее результирующая реактивность

$$x_{0\Sigma} = (12,3 + n12) / [14,1 + (1-n)12] = 11,2 + 92n - 90,6n^2.$$

Максимум реактивности $x_{1\Sigma}$ наступает при

$$\frac{dx_{1\Sigma}}{dn} = 13,4 - 20,2n = 0,$$

т. е. при

$$n = \frac{13,4}{20,2} = 0,66,$$

и составляет

$$x_{1\Sigma} = 21 + 13,4 \cdot 0,66 - 10,1 \cdot 0,66^2 = 25,5 \text{ ом}.$$

Соответственно минимум тока трехфазного короткого замыкания

$$I_k^{(3)} = \frac{60}{25,5} = 2,75 \text{ кА}.$$

Его распределение между ветвями схемы рис. 6-20,б дает токи в выключателях В-1 и В-2.

$$I_{В-1} = 1,38 \text{ кА и } I_{В-2} = 1,37 \text{ кА}.$$

Суммарное сопротивление при однофазном коротком составляет

$$x^{(1)} = 2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma} = 53,2 + 118,8n - 110,8n^2,$$

максимальное значение короткого наступает при $n = \frac{118,8}{2 \cdot 110,8} = 0,54$ и

составляет $x^{(1)} = 84,8$ ом. При этом минимум тока однофазного короткого замыкания

$$I_k^{(1)} = \frac{3 \cdot 70}{84,8} = 2,49 \text{ кА}.$$

¹ Напомним, здесь $n=I_0/I$ — относительное расстояние точки короткого от трансформатора Т-1.

Распределение тока каждой последовательности $I_{n1} = I_{n2} = I_{n0} = \frac{2,49}{3} = 0,83$ кА в соответствующих схемах (рис. 6-20,б и в), найдем

симметричные составляющие токов в выключателях:

$$\begin{aligned} B-1 \quad I_1 = I_0 = 0,45 \text{ кА и } I_0 = 0,4 \text{ кА;} \\ B-2 \quad I_1 = I_2 = 0,38 \text{ кА и } I_0 = 0,43 \text{ кА.} \end{aligned}$$

Искомые токи поврежденной фазы в выключателях:

$$\begin{aligned} I_{В-1} = 2 \cdot 0,45 + 0,4 = 1,30 \text{ кА;} \\ I_{В-2} = 2 \cdot 0,38 + 0,43 = 1,19 \text{ кА (или } I_{В-2} = 2,49 - 1,3 = 1,19). \end{aligned}$$

Результаты подсчета для других значений n позволяют построить искомые кривые, которые представлены на рис. 6-21. Как видно, в зависимости от положения точки короткого замыкания на линии токи в выключателях В-1 и В-2 при трехфазном коротком могут быть и больше и меньше, чем при однофазном коротком.

б) Обе цепи линии включены

Схема замещения прямой (обратной) последовательности для данного условия приведена на рис. 6-20,г. После преобразования треугольника (с реактивностями 32, n32; (1-n)32 ом) в эквивалентную цепочку она приобретает вид схемы на рис. 6-20,д. Ее результирующая реактивность составляет:

$$x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = \{(29,5 + n16) / [40,3 + (1-n)16]\} + n(1-n)16 = 19,4 + 21n - 19n^2.$$

Схема нулевой последовательности сохраняется той же, что и в предыдущей задаче (рис. 6-19,в и е), и ее результирующая реактивность

$$x_{0\Sigma} = [(12,3 + n88) / (14,1 + (1-n)88)] + n(1-n)24 = 11 + 93,2n - 91,6 \cdot n^2 \text{ ом}.$$

Суммарная реактивность при однофазном коротком замыкании

$$x^{(1)} = 2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma} = 49,4 + 135,2n - 129,6n^2 \text{ ом}.$$

Находим $\frac{dx_{1\Sigma}}{dn} = 0$ и $\frac{dx^{(1)}}{dn} = 0$ находим, что максимумы реактивности составляют:

$$\begin{aligned} x_{1\Sigma} = 25,2 \text{ ом при } n = 0,55; \\ x^{(1)} = 85,0 \text{ ом при } n = 0,52. \end{aligned}$$

¹ Соответственно, наименьшие значения токов в месте короткого

при трехфазном коротком замыкании

$$I_K^{(3)} = \frac{70}{25,2} = 2,78 \text{ ка};$$

при однофазном коротком замыкании

$$I_K^{(1)} = \frac{3 \cdot 70}{85} = 2,46 \text{ ка}.$$

Для этих значений l найдем распределение токов. В схеме на рис. 6-20, д при $l=0,55$ реактивности генерирующих ветвей состав-

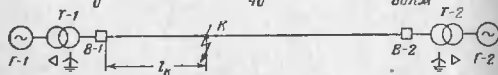
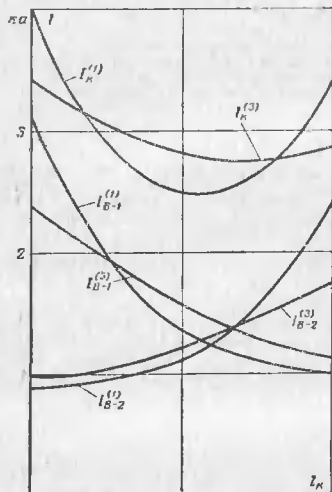


Рис. 6-21. К задаче 6-28. Изменение тока в месте короткого замыкания и токов в выключателях $B-1$ и $B-2$ в зависимости от положения точки короткого на цепи I линии передат. при отключенной цепи II этой линии.

ляют $(29,5 + 0,55 \cdot 16) = 38,3 \text{ ом}$ и $(40,3 + 0,45 \cdot 16) = 47,5 \text{ ом}$. Токи в трансформаторах будут:

$$I_{T-1} = 2,78 \cdot \frac{47,5}{38,3 + 47,5} = 1,53 \text{ ка} \text{ и } I_{T-2} = 2,78 - 1,53 = 1,25 \text{ ка}.$$

Чтобы найти токи в выключателях $B-1$ и $B-2$, воспользуемся теми же формулами, по которым в предыдущей задаче определены токи нулевой последовательности отдельных участков аварийной цепи линии, т. е.

$$I_{B-1} = \frac{(2 - 0,55)}{2} \cdot 1,53 + \frac{(1 - 0,55)}{2} \cdot 1,25 = 1,39 \text{ ка}$$

и, следовательно,

$$I_{B-2} = 2,78 - 1,39 = 1,39 \text{ ка} = I_{B-1}.$$

При однофазным коротком замыкании

$$I_{B-1} = I_{B-2} = I_{B-0} = \frac{2,46}{3} = 0,82 \text{ ка}.$$

Приведем, как и выше, распределение отдельных симметричных составляющих токов (при $l=0,52$), получим $I_{B-1} = I_{B-2} = 0,43 \text{ ка}$ и $I_{B-1} = 0,4 \text{ ка}$, что дает

$$I_{B-1} = 2 \cdot 0,43 + 0,4 = 1,26 \text{ ка}.$$

Тогда в выключателе $B-2$ $I_{B-2} = 2,46 - 1,26 = 1,20 \text{ ка}$.

Результаты аналогичных подсчетов при других значениях l представляются соответствующими кривыми (сплошные линии) на рис. 6-22.

е) Отключен выключатель $B-1$, остальные — включены

Схемы прямой (обратной) и нулевой последовательностей для данного случая показаны на рис. 6-20, е и ж. Их результирующие реактивности соответственно получаются:

$$x_{1E} = x_{2E} = 24,4 + (1 - \bar{n}) 32, \text{ ом}$$

$$x_{0E} = 34 + 8,3l - 29,6l^2, \text{ ом}.$$

Суммарная реактивность при однофазном коротком замыкании

$$x^{(1)} = 2x_{1E} + x_{0E} = 146,8 - 55,7l - 29,6l^2, \text{ ом}.$$

Эта реактивность в диапазоне изменения l от 0 до 1 не имеет минимума.

Следовательно, для тока в выключателе $B-2$ имеем:

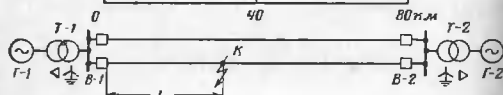
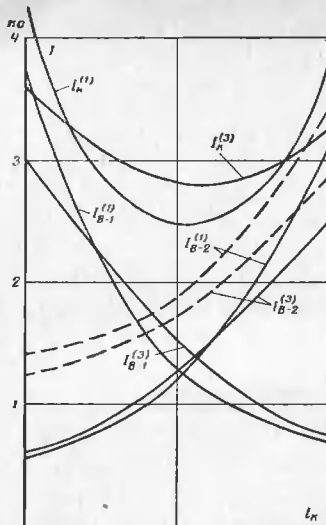


Рис. 6-22. К задаче 6-28. Изменение тока в месте короткого замыкания и токов в выключателях B-1 и B-2 при перемещении точки короткого по цепи I линии передачи. Сплошные линии — при всех включенных выключателях; пунктирные линии — при отключенном выключателе B-1.

при трехфазном коротком

$$I_k^{(3)} = \frac{70}{24,4 + (1-n)32} \cdot \text{кА};$$

при однофазном коротком

$$I_k^{(1)} = \frac{3 \cdot 70}{146,8 - 55,7n - 29,6n^2} \cdot \text{кА}.$$

На этих выражениях построены кривые, которые приведены в той же форме линиями на рис. 6-22. Как и следовало ожидать, они находятся значительно выше соответствующих кривых при включенном выключателе B-1.

Задача 6-29

Неповрежденная цепь линии передачи в схеме на рис. 6-20, а повреждена, и на обоих ее концах поставлены трехфазные выключатели.

Требуется определить, в какой мере это повлияет на величину переходного тока в месте однофазного короткого замыкания на другой цепи линии и на распределение тока нулевой последовательности в нейтралах трансформаторов T-1 и T-2. Кроме того, оценить наибольшую величину наведенного тока в заземленной цепи.

Решение. Коль скоро заземление одной цепи линии выполнено только по ее концам, то, очевидно, влияние этого заземленного контура больше будет сказываться при замыканиях на землю другой цепи в ее крайних точках, так как при замыканиях в промежуточных точках ток в заземленной цепи будет определяться разностью э. д. с. равных токами нулевой последовательности на участках поврежденной цепи.

Рассмотрим однофазное короткое замыкание у выключателя B-1 ($n=0$).

При решении задачи 6-28 было найдено, что реактивность нулевой последовательности одной цепи линии без учета влияния другой цепи составляла $x_0=112$ ом, а реактивность взаимной индукции нулевой последовательности между цепями $x_{0-1}=64$ ом.

Следовательно, реактивность нулевой последовательности одной цепи линии при заземленной по концам (короткозамкнутой) другой цепи будет:

$$x_0 = 112 - \frac{64^2}{112} = 75,5 \text{ ом},$$

т. е. она меньше на 32,5%.

Результирующая реактивность нулевой последовательности относительно точки короткого (при $n=0$) составит:

$$x_{0\text{ср}} = 12,3 // (75,5 + 14,1) = 10,8 \text{ ом}.$$

т. е. $x_{T-1} = 12,3$ ом и $x_{T-2} = 14,1$ ом.

Или результирующую реактивность прямой (обратной) последовательности $x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = 21$ ом, найдем суммарную реактивность для рассматриваемого случая однофазного короткого замыкания

$$x^{(1)} = 2 \cdot 21 + 10,8 = 52,8 \text{ ом},$$

т. е. такая же как при отсутствии заземленной цепи линии эта реактивность $x^{(1)}=53,2$ ом.

Таким образом, заземление параллельной цепи приводит к увеличению тока в месте короткого замыкания, но это увеличение в данном случае очень мало (менее 1%).

Иная картина получается в распределении тока нулевой последовательности. Так, при заземленной параллельной цепи ток нулевой

последовательности в трансформаторе Т-2 (или в поврежденной цепи) составляет:

$$I_{от-2} = \frac{70}{52,8} \cdot \frac{12,3}{(12,3 + 75,5 + 14,1)} = 160 \text{ а.}$$

а при отсутствии заземленной параллельной цепи этот ток

$$I_{от-2} = 117 \text{ а.}$$

т. е. заземление параллельной цепи увеличивает ток нулевой последовательности в трансформаторе Т-2 примерно на 37%.

Величина наведенного тока в каждой фазе заземленной цепи составит:

$$I_0 = \frac{160 \cdot 64}{112} = 91,5 \text{ а.}$$

Проведя аналогичный подсчет, нетрудно убедиться, что при однофазном коротком замыкании в конце линии у выключателя В-2 (и—1) влияние заземленной параллельной цепи на величины тока в месте короткого и тока нулевой последовательности в трансформаторе Т-1 сказывается практически в той же мере.



Задача 6-30

При двухфазном коротком замыкании на землю у выключателя В-1 схемы на рис. 6-20а, считая, что другая параллельная цепь заземлена по кощам, определить величины тока нулевой последовательности в трансформаторе Т-2 и тока, наведенного в каждой фазе заземленной цепи. Решение провести для начального момента короткого замыкания.

Задача 6-31

При однофазном коротком замыкании на одноцепной воздушной линии с двусторонним питанием (рис. 6-23) требуется определить возможную наибольшую величину начального тока в месте короткого и ее распределение между участками линии (т. е. ток в поврежденной фазе с обеих сторон).

Элементы схемы на рис. 6-23 характеризуются следующими данными:

Рис. 6-23. Схема к задаче 6-31.

генератор Г 117 Мва, 10,5 кВ, $x''_d = 0,2 = x_2$; преобразовательно работает на холостом ходу с номинальным напряжением;
 трансформатор Т 120 Мва, 115/10,5 кВ, $u_n = 10,5\%$, $Y_0/\Delta-11$;
 автотрансформатор АТ 90 Мва, 230/115/6,3 кВ, $u_{св} = 10,5\%$,
 $u_{вн} = 10,5\%$, $u_{сн} = 21\%$, $Y_0/Y_0/\Delta-12, 11$;
 линия Л 100 км, $x_1 = 0,4 \text{ ом/км}$, $x_0 = 3x_1$;

Схема С — источник бесконечной мощности с неизменяемым напряжением 230 кВ ($x_1 = x_2 = x_0 = 0$); нейтраль системы заземлена наглухо.

Задача 6-32

К одной цепи двухцепной линии передачи на расстоянии 25 км от ее конца присоединен трансформатор Т-3 (рис. 6-24а), имеющий параметры 60 Мва, 110/6,3 кВ, $u_n = 10,5\%$, Y_0/Δ . Параметры всех остальных элементов схемы те же, что и в задачах 6-27, 6-28.

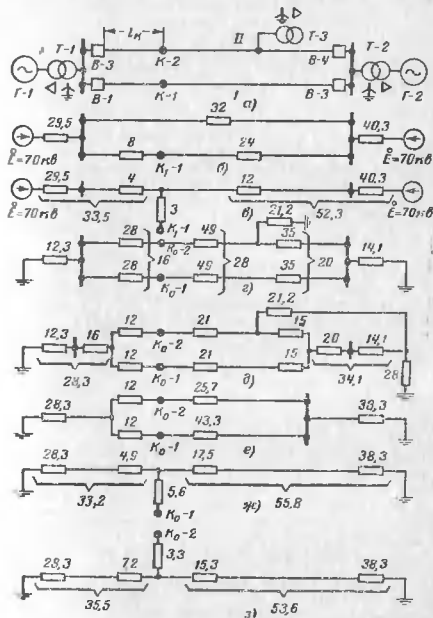


Рис. 6-24. К задаче 6-32.

а — исходная схема; б и в — схемы прямой (обратной) последовательности; г — схемы нулевой последовательности.

Требуется построить кривые изменения тока нулевой последовательности в выключателях той цепи, где произошло однофазное короткое замыкание, при перемещении последнего вдоль линии (т. е. в выключателях В-1 и В-2 при коротком в точке К-1 и в выключателях В-3 и В-4 при коротком в точке К-2). Сопоставить эти кривые с аналогичными кривыми при отсутствии трансформатора Т-3. Решение провести для начального момента короткого замыкания, считая что оба генератора (Г-1 и Г-2) предварительно работали на холостом ходу с номинальным напряжением.

Решение. Как и в двух предыдущих задачах, решение ведем в именованных единицах, приводя все элементы к стороне линии передачи. В данном случае ввиду достаточной сложности схемы нулевой последовательности (см. ниже) решение в общем виде (т. е. для произвольного положения точки короткого) приводит к весьма громоздким выражениям. Поэтому проще выполнить расчет для нескольких конкретных положений точки короткого и по полученным результатам построить искомые кривые.

Проведем решения при $I_{\Sigma} = 20$ кА, т. е. при $n = \frac{20}{80} = 0,25$.

В соответствии с рис. 6-20,а схема прямой последовательности в данном случае будет такой, как показано на рис. 6-24,б, причем поскольку за трансформатором Т-3 нет явн нагрузки, явн источника питания, то ее результирующие сопротивления относительно точек К-1 и К-2, очевидно, одинаковы. После преобразования треугольника с реактивностями 8, 24 и 32 ом в эквивалентную звезду получим схему на рис. 6-24,в, результирующая реактивность которой составляет:

$$x_{12} = x_{23} = (33,5/52,3) + 3 = 23,45 \text{ ом.}$$

В схеме нулевой последовательности (рис. 6-24,г) должна быть учтена взаимная индуктивность между цепями на трех участках линии, т. е. на участке $x_{\text{кз-1}} = 0,8 \cdot 20 = 16$ ом, на участке от точки короткого до места присоединения трансформатора Т-3 $x_{\text{кз-1}} = 0,8 \cdot 35 = 28$ ом и, наконец, на последнем участке $x_{\text{кз-1}} = 0,8 \cdot 25 = 20$ ом. После введения взаимных реактивностей, во которым протекает сумма токов взаимноиндуктирующихся участков линии, получим схему на рис. 6-24,д, где имеются только электрически связанные элементы. Дальнейшее преобразование треугольника с реактивностями 34,1, 15 и 21,2 ом в эквивалентную звезду и сложение последовательно соединенных элементов позволяют привести схему к виду показанной на рис. 6-24,е. Еще одно преобразование треугольника в эквивалентную звезду приводит схему к простому виду (рис. 6-24,ж и з). Ее результирующая реактивность при коротком будет:

$$\text{в точке К-1 } x_{0\text{к}} = (33,2/55,8) + 5,6 = 26,4 \text{ ом;}$$

$$\text{в точке К-2 } x_{0\text{к}} = (35,5/53,6) + 3,3 = 24,6 \text{ ом.}$$

Таким образом, ток нулевой последовательности в месте короткого составляет:

при коротком в точке К-1

$$I_{00} = \frac{70}{2 \cdot 23,45 + 26,4} = 0,955 \text{ кА;}$$

при коротком в точке К-2

$$I_{00} = \frac{70}{2 \cdot 23,45 + 24,6} = 0,98 \text{ кА.}$$

Найдем коэффициенты распределения в схеме нулевой последовательности.

При коротком замыкании в точке К-1:

$$C_{В-1} = 1 - \frac{55,8}{33,2 + 55,8} = 0,63; \quad C_{В-1} = \frac{5,6 \cdot 1 + 4,9 \cdot 0,63}{12} = 0,72 \text{ и}$$

$$C_{В-2} = 1 - 0,72 = 0,28.$$

При коротком в точке К-2:

$$C_{Т-1} = 1 - \frac{53,6}{35,5 + 53,6} = 0,6;$$

$$C_{В-3} = \frac{3,3 \cdot 1 + 7,2 \cdot 0,6}{12} = 0,635; \quad C_{Т-2,3} = 1 - 0,6 = 0,4.$$

В соответствии с рис. 6-24,д для коэффициента распределения в трансформаторе Т-3 имеем:

$$C_{Т-3} = \frac{24,6 \cdot 1 - 21(1 - 0,635) - 28 \cdot 0,4}{21,2} = 0,265$$

и, следовательно,

$$C_{В-4} = (1 - 0,635) - 0,265 = 0,1.$$

Новые токи в выключателях при $n = 0,25$ будут, при коротком в К-1

$$I_{0В-1} = 0,72 \cdot 0,955 = 0,69 \text{ кА;}$$

$$I_{0В-2} = 0,28 \cdot 0,955 = 0,265 \text{ кА;}$$

при коротком в К-2

$$I_{0В-3} = 0,635 \cdot 0,98 = 0,62 \text{ кА;}$$

$$I_{0В-4} = 0,1 \cdot 0,98 = 0,098 \text{ кА.}$$

По результатам аналогичных подсчетов при других значениях I_{Σ} (при n) построены искомые кривые, которые представлены сплошными линиями на рис. 6-25. Для построения подобных кривых при отключении трансформатора Т-3 могут быть использованы промежуточные результаты решения п. «б» задачи 6-28. Такие кривые на рис. 6-25 проведены пунктирными линиями. Из сравнения соответствующих кривых видно, что при коротком на цепи I присоединение трансформатора Т-3 сравнительно мало сказывается на величинах токов в выключателях В-1 и В-2; при этом такое присоединение приводит к снижению тока нулевой последовательности в выключателях I и II, напротив, к увеличению в выключателе В-2. При коротком на цепи II влияние присоединенного трансформатора Т-3 весьма

существенно сказывается на снижении тока нулевой последовательности в выключателе В-4, который ближе находится к этому трансформатору, и в значительно меньшей мере на снижении тока в выключателе В-3.

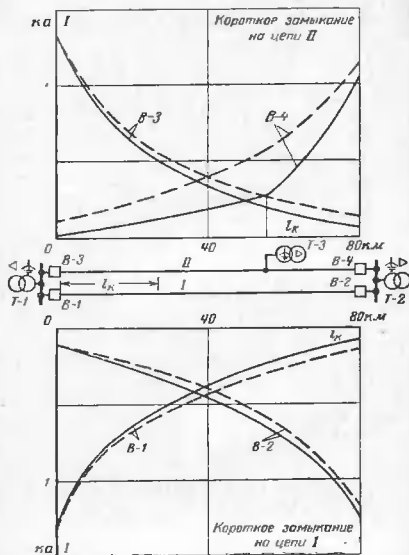


Рис. 6-25. К задаче 6-32. Кривые изменения тока нулевой последовательности в выключателях линии передачи в зависимости от положения точки короткого на линии. Сплошные линии — при включенном трансформаторе Т-3, пунктирные кривые — при отключенном трансформаторе Т-3.

Задача 6-33

Два одинаковых блока генератор — трансформатор — линия работают на шины узловой подстанции системы С (рис. 6-26), результирующие реактивности которой относительно этих шин составляют $x_1 = x_2 = 18,5 \text{ ом}$ и $x_0 = 16 \text{ ом}$, при этом за реактивностью x_1 поддерживается практически неизменное напряжение $U_C = 230 \text{ кв}$.

Данные по каждому блоку следующие: генератор 176,5 Мва, 18 кв, $x''_d = 0,21 \approx x_2$, $E''_0 = U_N = 18 \text{ кв}$; трансформатор 180 Мва, 242/18 кв, $u_k = 13\%$, $Y_0 \Delta$; линия 120 кв, $x_1 = 0,42 \text{ ом/км}$, $x_0 = 1,32 \text{ ом/км}$, реактивность взаимной индукции между цепями линии в нулевой последовательности $x_{10} = 0,85 \text{ ом/км}$.

Требуется построить кривые изменения начальных сверхпереходных токов нулевой последовательности в выключателях В-1 и В-2.

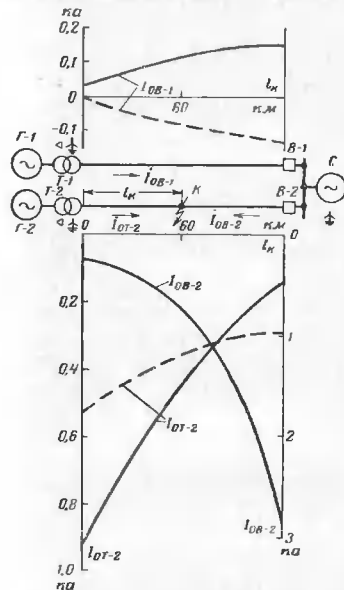


Рис. 6-26. К задаче 6-33. Исходная схема и кривые изменения тока нулевой последовательности отдельных ветвей схемы в зависимости от положения точки однофазного короткого замыкания на линии.

Сплошные кривые — при включенных выключателях В-1 и В-2, пунктирные кривые — при отключенном выключателе В-2.

и в трансформаторе Т-2 при перемещении точки однофазного короткого замыкания по линии от трансформатора Т-2 до выключателя В-2. Решение провести для двух случаев, когда:

- а) оба выключателя включены;
 б) выключатель В-1 включен, а выключатель В-2 отключен (короткое питается только от генератора Г-2).

Решение. Проведем решение для условия, когда короткое замыкание находится посредине линии. Выразим все величины в именованных единицах, приводя их к ступени напряжения линии передачи. Реактивности каждого генератора и трансформатора будут:

$$x_T = 0,21 \cdot \frac{18^2}{176,5} \left(\frac{242}{18} \right)^2 = 70 \text{ ом}; \quad x_T = 0,13 \cdot \frac{242^2}{180} = 42,3 \text{ ом}.$$

Реактивности участка линии протяженностью 60 км:

$$x_1 = x_2 = 0,42 \cdot 60 = 25,2 \text{ ом}; \quad x_0 = 1,32 \cdot 60 = 79,2 \text{ ом};$$

$$x_{0II} = 0,85 \cdot 60 = 51 \text{ ом}.$$

Приведенные значения фазных э. д. с.

$$\overset{\circ}{E}_1 = \overset{\circ}{E}_2 = \frac{18}{\sqrt{3}} \cdot \frac{242}{18} = 139 \text{ кв} \text{ и } \overset{\circ}{E}_C = \frac{230}{\sqrt{3}} = 133 \text{ кв}.$$

На рис. 6-27,а показана схема замещения прямой последовательности. При э. д. с., равных нулю, она же является схемой замещения обратной последовательности.

Исходная схема нулевой последовательности приведена на рис. 6-27,б. После переноса реактивности взаимной индукции $x_{0I-II} = 51 \text{ ом}$ в цепи, где протекает соответствующая сумма взаимно влияющих токов, получим схему замещения, приведенную на рис. 6-27,в.

а) Оба выключателя включены

В этом случае результирующая реактивность прямой (обратной) последовательности относительно точки короткого составляет:

$$x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = 32 \text{ ом}$$

и результирующая э. д. с. $E_{\Sigma} = 135 \text{ кв}$.

Для определения результирующей реактивности нулевой последовательности нужно предварительно треугольник с реактивностями 98,7; 70,5; 28,2 ом преобразовать в эквивалентную звезду (рис. 6-27,г). Дальнейшее упрощение схемы приводит к $x_{0\Sigma} = 51,7 \text{ ом}$.

Ток нулевой последовательности в месте короткого будет:

$$I_{00} = \frac{135}{2 \cdot 32 + 51,7} = 1,17 \text{ ка}.$$

Распределяя его в схеме на рис. 6-27,з, найдем ток нулевой последовательности в обоих трансформаторах

$$I_0 = 1,17 \cdot \frac{81}{86,2 + 81} = 0,57 \text{ ка}.$$

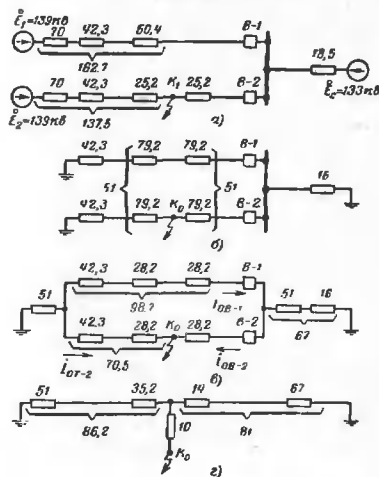


Рис. 6-27. К задаче 6-33. Схемы замещения. а — прямой (обратной) последовательности; б, в, г — нулевой последовательности.

Затем находим все искомые токи:

$$I_{0T-2} = \frac{1,17 \cdot 10 + 0,57 \cdot 35,2}{70,5} = 0,45 \text{ ка};$$

$$I_{0T-1} = I_{0T-2} = 0,57 - 0,45 = 0,12 \text{ ка};$$

$$I_{0B-2} = 1,17 - 0,45 = 0,72 \text{ ка}.$$

б) Выключатель В-1 включен; выключатель В-2 отключен
 Как видно из схемы на рис. 6-27,а, в данном случае

$$x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = 137,5 \text{ ом} \text{ и } E_{\Sigma} = E_1 = 139 \text{ кв}.$$

Поскольку цепи линии в нулевой последовательности связаны взаимной индуктивностью, для нахождения результирующей реактивности $x_{0\pi}$ может служить та же схема замещения из рис. 6-27, в, но в ней лишь надо считать, что цепь выключателя В-2 разорвана. Путем простых преобразований определяем

$$x_{0\pi} = (47 + 96,7)/51 + 70,5 = 109,3 \text{ ом.}$$

Отметим, что эту же реактивность можно получить из схемы на рис. 6-27,б (при отключенном выключателе В-2), рассматривая цепь другого блока и системы как короткозамкнутый контур, связанный магнитно с сварившим блоком, т. е.

$$x_{0\pi} = 42,3 + \left(79,2 - \frac{51^2}{42,3 + 2,79,2 + 16} \right) = 109,3 \text{ ом.}$$

Ток нулевой последовательности в трансформаторе Т-2

$$I_{0T-2} = \frac{139}{2 \cdot 137,5 + 109,3} = 0,36 \text{ ка,}$$

и наведенный ток нулевой последовательности в цепи неповрежденного блока будет:

$$I_{0T-1} = I_{0B-1} = -0,36 \cdot \frac{51}{51 + 98,7 + 67} = -0,085 \text{ ка;}$$

здесь знак минус поставлен потому, что этот ток имеет противоположное направление току в той же цепи при выключенном выключателе В-2.

Для построения требуемых кривых практический достаточно сделать аналогичные подсчеты еще для крайних положений точки короткого (т. е. в начале и конце линии).

Полученные результаты представлены кривыми на рис. 6-28. Кривые, проведенные сплошными линиями, относятся к случаю, когда оба выключателя включены, а проведенные пунктиром — к случаю, когда выключатель В-2 отключен. Масштаб для кривой изменения тока I_{0T-2} принят в 1/0,3 = 3,33 раза больше, чем для остальных кривых.

Следует заметить, что ток нулевой последовательности в трансформаторе Т-2 I_{0T-2} в зависимости от положения точки короткого на линии при отключенном выключателе В-2 может быть как меньше, так и больше того значения, которое получается при включенном выключателе В-2. Наведенный ток нулевой последовательности в цепи неповрежденного блока I_{0T-1} , как видно, имея обратный знак, по абсолютной величине близок к току нулевой последовательности в этой цепи при выключенном выключателе В-2.

Задача 6-34

На стороне высшего напряжения автотрансформатора, имеющего параметры 180 Мва, 220/121/11 кВ, $u_{BC} = 8\%$, $u_{BH} = 28\%$, $u_{CH} = 18\%$, приложено напряжение нулевой последовательности $U_0 = 27 \text{ кВ}$

326

(рис. 6-29). В каждую фазу цепи среднего напряжения включена реактивность x , за которой все фазы замкнуты на землю. В цепь нейтрали введена реактивность x_N . Разъединители Р-1 и Р-2 позволяют держать разомкнутыми соответственно цепь обмотки низшего напряжения и цепь заземления нейтрали.

Требуется найти изменения (представив их графически соответствующими кривыми) величины токов нулевой последовательности в цепи каждого напряжения (т. е. I_{0B} , I_{0H}), а также тока I_N в заземлении U_N нейтрали при каждом из следующих условий:

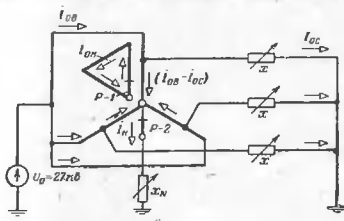


Рис. 6-28. Схема к задаче 6-34.

- реактивность x меняется от нуля до бесконечности, нейтраль заземлена наглухо ($x_N = 0$);
 - то же, но нейтраль разземлена (Р-2 отключен);
 - реактивность x_N меняется от нуля до бесконечности, реактивность $x = 30 \text{ ом}$;
 - то же, но при разомкнутой обмотке низшего напряжения (Р-1 отключен);
 - мощность обмотки низшего напряжения S_{H2} меняется от нуля до номинальной мощности автотрансформатора¹, реактивность $x = 30 \text{ ом}$, нейтраль заземлена наглухо;
 - то же, но при разземленной нейтрали (Р-2 отключен).
- Решение. Напряжения к. з. элементов трехфазовой схемы замещения автотрансформатора составляют:

$$x_B = 0,5(8 + 28 - 18) = 9\%;$$

$$x_C = 8 - 9 = -1\% \text{ и } x_H = 28 - 9 = 19\%.$$

Для наиболее решения ведем в именованных единицах, приводя все величины к стороне высшего напряжения. При этом реактивности элементов схемы замещения автотрансформатора будут:

$$x_B = \frac{9 \cdot 220^2}{100 \cdot 180} = 24,2 \text{ ом}$$

¹ При этом предполагается, что реактивность обмотки низшего напряжения заданная к мощности этой обмотки, остается постоянной и равной 19%.

327

аналогично

$$x_C = -2 \text{ ом}, \quad \ddot{x}_H = 51,1 \text{ ом}.$$

Рассмотрим поочередно все указанные условия.

а) Исходная схема и ее схема замещения показаны на рис. 6-29,а, где реактивность

$$\ddot{x} = x \left(\frac{220}{121} \right)^2 = 3,3x.$$

Произведем подсчет при $x = 30 \text{ ом}$, т. е. $\ddot{x} = 3,3 \cdot 30 = 99 \text{ ом}$.
Свертывая схему, получим

$$x_1 = -2,7 + 99 = 96,3 \text{ ом}; \quad x_2 = 96,3 / 51,1 = 33,4 \text{ ом}$$

и

$$x_2 = 24,2 + 33,4 = 57,6 \text{ ом}.$$

Ток на стороне высшего напряжения

$$I_{OB} = \frac{27}{57,6} = 0,47 \text{ ка}.$$

Приведенные токи

$$\overset{\circ}{I}_{OC} = 0,47 \cdot \frac{33,4}{96,3} = 0,163 \text{ ка}$$

и

$$\overset{\circ}{I}_{OH} = 0,47 - 0,163 = 0,307 \text{ ка};$$

их истинные значения:

$$I_{OC} = 0,163 \cdot \frac{220}{121} = 0,3 \text{ ка}$$

и

$$I_{OH} = 0,307 \cdot \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 11} = 3,55 \text{ ка}.$$

Можно убедиться, что баланс н. с. в автотрансформаторе соблюдается, т. е.

$$0,47 \cdot \frac{220 - 121}{\sqrt{3}} + (0,47 - 0,3) \cdot \frac{121}{\sqrt{3}} = 3,55 \cdot 11.$$

Ток в нейтрали $I_N = 3(0,47 - 0,3) = 0,51 \text{ ка}$.

По результатам подобных подсчетов для других значений x построены искомые кривые, которые показаны на рис. 6-30 (сплошные кривые).

Как видно, при изменении x ток в нейтрали меняет знак; он проходит через нуль при соблюдении очевидного условия $I_{OB} = I_{OC}$ или когда

$$\overset{\circ}{I}_{OC} = \frac{121}{220} I_{OB} = 0,55 I_{OB}.$$

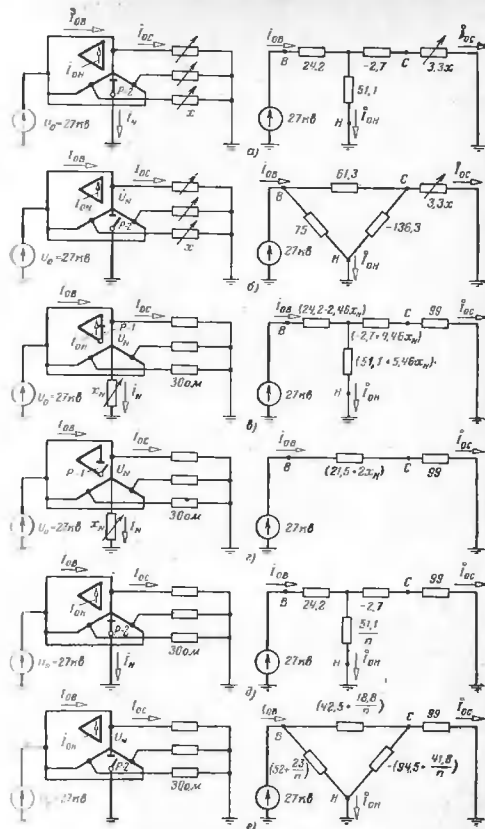


Рис. 6-29. Исходные схемы и соответствующие им схемы замещения для различных заданных условий задачи 6-34.

что имеет место при

$$0,55(x - 2,7) = (1 - 0,55)51,1,$$

откуда

$$\overset{\circ}{x} = 44,5 \text{ ом} \text{ или } x = \frac{44,5}{3,3} = 13,5 \text{ ом}.$$

С изменением x ток в обмотке низшего напряжения тоже меняет знак. Как следует из схемы замещения на рис. 6-29,а, он равен нулю при $\overset{\circ}{x} = 2,7 \text{ ом}$, т. е. при $x = \frac{2,7}{3,3} = 0,82 \text{ ом}$; при этом одновременно

но соблюдается равенство

$$\overset{\circ}{I}_{OC} = I_{OB} \text{ или } \overset{\circ}{I}_{OC} = \frac{220}{121} I_{OB}.$$

Разумеется, здесь также соблюдается баланс и. с. автотрансформатора, т. е.

$$I_{OB} \frac{(220 - 121)}{\sqrt{3}} + (I_{OB} - I_{OC}) \frac{121}{\sqrt{3}} = 0.$$

В пределе при $x = \infty$ значения токов составляют:

$$I_{OB} = 0,37 \text{ ка}; I_{OC} = 0;$$

$$I_{OH} = 4,28 \text{ ка}$$

и

$$I_N = 1,11 \text{ ка}.$$

б) При разземлении нейтрали исходная схема и ее схема замещения имеют вид, показанный на рис. 6-29,б. Реактивности этого «резонансного» треугольника определяются из выражений:

$$x'_{BC} = 24,2 \frac{220}{121} - 2,7 \frac{121}{220} +$$

$$+ 51,1 \frac{(220 - 121)^2}{220 \cdot 121} = 61,3 \text{ ом};$$

$$x'_{BH} = 24,2 \frac{220}{220 - 121} - 2,7 \frac{121^2}{(220 - 121)220} +$$

$$+ 51,1 \frac{(220 - 121)}{121} = 75 \text{ ом};$$

$$x'_{CH} = -24,2 \frac{220^2}{(220 - 121)121} + 2,7 \frac{121}{(220 - 121)} -$$

$$- 51,1 \frac{(220 - 121)}{121} = -136,3 \text{ ом}.$$

При $\overset{\circ}{x} = 99 \text{ ом}$ имеем:

$$x_1 = \frac{136,3 \cdot 99}{136,3 - 99} = 362 \text{ ом};$$

$$x_2 = 362 + 61,3 = 423,3 \text{ ом}.$$

Токи в ветвях x'_{BC} и x'_{BH} схемы на рис. 6-29,б составляют:

$$I_{OBC} = \frac{27}{423,3} = 0,064 \text{ ка}$$

$$I_{OBH} = \frac{27}{75} = 0,36 \text{ ка},$$

и, следовательно,

$$I_{OB} = 0,064 + 0,36 = 0,424 \text{ ка}.$$

Приведенные токи

$$\overset{\circ}{I}_{OC} = 0,064 \frac{362}{99} = 0,234 \text{ ка}$$

$$\overset{\circ}{I}_{OH} = 0,424 - 0,234 = 0,19 \text{ ка}.$$

На эти же величины

$$\overset{\circ}{I}_{OC} = 0,234 \frac{220}{121} = 0,424 = I_{OB}$$

$$I_{OH} = 0,19 \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 11} = 2,2 \text{ ка}.$$

Эти токи $\overset{\circ}{I}_{OC}$ и $\overset{\circ}{I}_{OH}$ по схеме замещения на рис. 6-29,а находим как разности токов в ветвях нейтрали

$$I_N = (99 - 2,7)0,234 - 51,1 \cdot 0,19 = 12,8 \text{ ка}.$$

Кривые, проведенные пунктиром на рис. 6-30, характеризуют изменения токов I_{OB} , I_{OC} , I_{OH} и напряжения U_N в функции x . Напря-

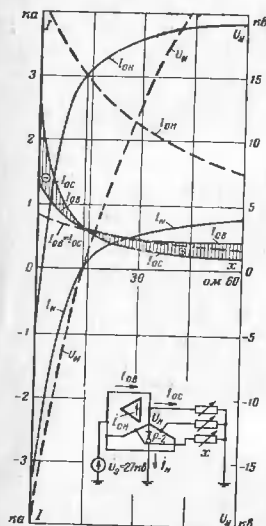


Рис. 6-30. Зависимости изменения токов и напряжения нейтрали автотрансформатора от реактивности в цепи среднего напряжения (к задаче 6-34, пп. «а» и «б»).
Сплошные линии — при включенном P-2; P-2; пунктирные линии — при отключенном P-2.

жеме U_N меняет знак, проходя через нуль при $x=13,5$ ом, как было установлено выше. В пределе ($x \rightarrow \infty$) все токи стремятся к нулю, а напряжение U_N , очевидно, к 27 кВ.

б) В данном случае исходная схема и ее схема замещения имеют вид, показанный на рис. 6-29,а. Здесь реактивности трехлучевой схемы замещения автотрансформатора определяются из выражений:

$$x'_B = 24,2 + 3x_N \left(1 - \frac{220}{121}\right) = 24,2 - 2,46x_N;$$

$$x'_C = -2,7 + 3x_N \frac{(220 - 121)220}{121^2} = -2,7 + 4,46x_N;$$

$$x'_H = 51,1 + 3x_N \frac{220}{121} = 51,1 + 5,46x_N.$$

При $x_N = 50$ ом имеем:

$$x'_B = 24,2 - 2,46 \cdot 50 = -98,8 \text{ ом};$$

$$x'_C = -2,7 + 4,46 \cdot 50 = 221,3 \text{ ом};$$

$$x'_H = 51,1 + 5,46 \cdot 50 = 324,1 \text{ ом}.$$

Свертываем схему

$$x_1 = 221,3 + 99 = 320,3 \text{ ом}; \quad x_2 = 324,1 / 320,3 = 161 \text{ ом}$$

$$x_2 = 161 - 98,8 = 62,2 \text{ ом}.$$

Значения токов:

$$I_{OB} = \frac{27}{62,2} = 0,435 \text{ кА};$$

$$I_{OC}^0 = 0,435 \frac{161}{320,3} = 0,219 \text{ кА};$$

$$I_{OC} = 0,219 \frac{220}{121} = 0,4 \text{ кА};$$

$$I_{OH}^0 = 0,435 - 0,219 = 0,216 \text{ кА};$$

$$I_{OH} = 0,216 \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 11} = 2,5 \text{ кА}.$$

Ток и напряжение нейтрали равны:

$$I_N = 3(0,435 - 0,4) = 0,105 \text{ кА}$$

$$U_N = 0,105 \cdot 60 = 5,25 \text{ кВ}.$$

Сплошные кривые на рис. 6-31 иллюстрируют искоемые зависимости токов и напряжения U_N от величины x_N .

В пределе при $x_N = \infty$, как получено в п. «б», $I_{OB} = I_{OC} = 0,424$ кА и $U_N = 12,8$ кВ.

а) При разомкнутой обмотке низшего напряжения (в отличие от рисунка п. «в») исходная схема и ее схема замещения имеют вид (рис. 6-29,б). Последняя получается из схемы замещения на рис. 6-29,а, где достаточно разомкнуть цепь обмотки низшего напряжения. При этом, очевидно,

$$x_{BC} = (24,2 - 2,46x_N) + (-2,7 + 4,46x_N) = 21,5 + 2x_N.$$

При $x_N = 50$ ом имеем:

$$x_2 = 21,5 + 2 \cdot 50 + 99 = 220,5 \text{ ом}.$$

Токи

$$I_{OB} = \frac{27}{220,5} = 0,122 \text{ кА}$$

$$I_{OC} = 0,122 \frac{220}{121} = 0,222 \text{ кА};$$

ток и напряжение нейтрали равны:

$$I_N = 3(0,122 - 0,222) = -0,3 \text{ кА};$$

$$U_N = -0,3 \cdot 50 = -15 \text{ кВ}.$$

Искомые зависимости представлены кривыми, проведенными индуктиром на рис. 6-31. В пределе ($x_N = \infty$) все токи стремятся к нулю, а напряжение U_N к -27 кВ.

Заметим, что если при данной обмотке низшего напряжения ток и напряжение нейтрали при $x=30$ ом всегда положительны, то при отсутствии данной обмотки они, напротив, всегда отрицательны.

а) Для заданных условий исходная схема и соответствующая ей схема замещения показаны на рис. 6-29,а. Последняя отличается схеме замещения на рис. 6-29,а, в которой реактивности обмотки низшего напряжения по условию надлежит обозначать изменяющейся в пределах от 51,1 ом (а=1) до бесконечности (а=

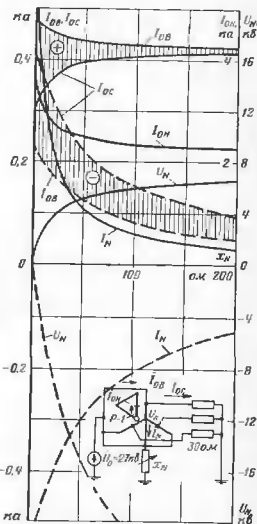


Рис. 6-31. Зависимости изменения токов и напряжения нейтрали автотрансформатора от реактивности в цепи нейтрали (к задаче 6-34, пп. «в» и «г»).

Сплошные линии — при включенном P-I; пунктирные линии — при отключенном P-I.

Найдем значение $n = S_2 / S_{\Sigma}$, при котором отсутствует ток в нейтрале. Для этого должно быть соблюдено следующее равенство:

$$I_{OC} = \frac{121}{220} I_{OB} = 0,55 I_{OB}$$

и, следовательно,

$$I_{OH} = (1 - 0,55) I_{OB} = 0,45 I_{OB}$$

Теперь из уравнения

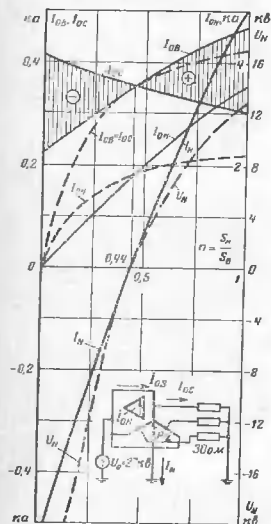


Рис. 6-32. Зависимости изменения токов и напряжений нейтрала автотрансформатора от отношения мощностей обмотки высшего напряжения к мощности обмотки высшего напряжения (к задаче 6-34, пп. «д» и «е»).

Сплошные линии — при включенном P-2; пунктирные линии — при отключенном P-2.

$$(99 - 2,7) 0,55 I_{OB} =$$

$$\frac{51,1}{n} 0,45 I_{OB}$$

получаем $n = 0,44$.

При $n = 0,44$ результирующая реактивность $X_2 = 77,2 \text{ Ом}$ и величины токов составляют:

$$I_{O3} = I_{OC} = \frac{27}{77,2} = 0,35 \text{ кА}$$

и

$$I_{OH} = 0,35 \cdot 0,45 \cdot \frac{220}{\sqrt{3} \cdot 11} = 1,83 \text{ кА}$$

Искомые зависимости от относительной величины мощности обмотки высшего напряжения показали сплошные кривые на рис. 6-32. При $n < 0,44$ ток $I_{OC} > I_{OB}$ и соответственно $I_N < 0$; при $n > 0,44$, напротив, ток $I_{OB} > I_{OC}$ и $I_N > 0$. При $n = 1$ и $n = 0$ значения токов те же, что и в пп. «в» и «г» при $X_N = 0$.

е) При разземленной нейтрале исходная схема и ее схема замещения имеют вид (рис. 6-29 е). Реактивности сторон «резонансного» треугольника подучаются так же, как и в решении п. «б», где последние слагаемые в выражениях для X'_{Σ} , X''_{Σ} и X'_{Σ} должны быть согласно поставленному условию разделены на

$$n = \frac{S_2}{S_{\Sigma}}$$

При $n = 0,44$ результат получается тот же, что и в п. «д», так как при этом ток $I_N = 0$. Подсчет при других значениях n аналогичен тому же п. «б». Полученные результаты представлены на рис. 6-32 кривыми, проведенными пунктиром. При отсутствии обмотки высшего напряжения ($n = 0$) все токи равны нулю, а напряжения нейтрала достигают -27 кВ (как и в п. «г» при $X_N = \infty$). При $n = 1$ величина ток и напряжения U_N те же, что и в пп. «в» при $X_N = \infty$.

Задача 6-35

При однофазном коротком замыкании поочередно в точках K-1 и K-2 схемы на рис. 6-33, а определить начальные сверхпереходные токи нулевой последовательности в линиях Л-1 и Л-2 и в нейтрале автотрансформатора АТ. Определить произведи для условий, когда автотрансформатора АТ:

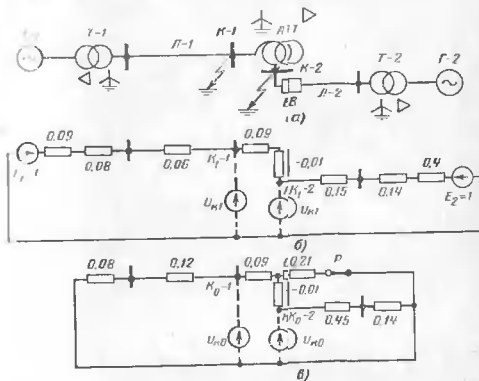


Рис. 6-33. К задаче 6-35.

а) исходная схема; б — схема замещения прямой (обратной) последовательности; в — схема замещения нулевой последовательности.

- а) замысается третья обмотка;
 б) третья обмотка отсутствует (или разомкнута).
 До короткого замыкания оба генератора работали на холостом ходу с номинальным напряжением.

Параметры элементов схемы: генератор Г-1 118 Мва, 10,5 кВ, $x''_{\Sigma 1} \approx x_{\Sigma 1} = 0,133$; генератор Г-2 57 Мва, 6,3 кВ, $x''_{\Sigma 2} \approx x_{\Sigma 2} = 0,285$; трансформатор Т-1 120 Мва, 220/10,5 кВ, $u_k = 12\%$, $Y_0 \Delta$; трансформатор Т-2 60 Мва, 115/6,3 кВ, $u_k = 10,5\%$, $Y_0 \Delta$;

автотрансформатор AT 80 Mva , 230/115/6,3 kV , $u_{вс} = 6\%$, $u_{пр} = 30\%$, $u_{сп} = 20\%$, $U_0 = 10kV$;

линия Л-1 100 km , $x_1 = 0,4$ $ом/км$, $x_0 = 2x_1$;

линия Л-2 62 km , $x_1 = 0,4$ $ом/км$, $x_0 = 3x_1$;

Решение. На рис. 6-33, б и в приведены схемы замещения соответственно прямой и нулевой последовательностей, на которых указаны значения реактивностей элементов, выраженные в относительных единицах при $S_0 = 80 Mva$ и $U_0 = U_{пр}$ на каждой ступени трансформации. Схема обратной последовательности такая же, как и схема на рис. 6-33, б, в которой нужно только считать $E_1 = E_2 = 0$.

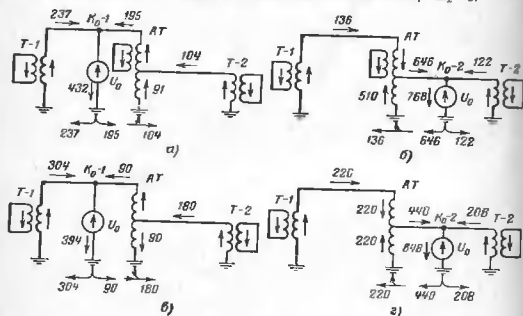


Рис. 6-34. К задаче 6-35. Распределение токов нулевой последовательности.

а — при наличии третьей обмотки у автотрансформатора AT и коротком замыкании в точке $K-1$; б — то же при коротком замыкании в точке $K-2$; в — при отсутствии третьей обмотки у автотрансформатора AT и коротком замыкании в точке $K-1$; г — то же при коротком замыкании в точке $K-2$.

Результирующие реактивности прямой и обратной последовательностей относительно точки $K-1$ $x_{12} = x_{22} = 0,177$ и точки $K-2$ $x_{12} = x_{22} = 0,214$.

а) При наличии третьей обмотки у автотрансформатора AT Результирующая реактивность нулевой последовательности относительно точки $K-1$ $x_{02} = 0,110$ и точки $K-2$ $x_{02} = 0,094$.

Величины токов нулевой последовательности в месте короткого при коротком:

$$I_{n0} = \frac{1}{2 \cdot 0,177 + 0,11} \cdot 200 = 432 \text{ а,}$$

где

$$I_0 = \frac{80}{\sqrt{3} \cdot 230} = 200 \text{ а;}$$

в точке $K-2$

$$I_{n0} = \frac{1}{2 \cdot 0,214 + 0,094} \cdot 400 = 768 \text{ а,}$$

$$I_0 = \frac{80}{\sqrt{3} \cdot 115} = 400 \text{ а.}$$

Их распределение в схеме нулевой последовательности показано на рис. 6-34, а и б.

б) При отсутствии третьей обмотки у автотрансформатора AT (в разведенный P в схеме на рис. 6-33, в отключен)

Результирующая реактивность нулевой последовательности относительно точки $K-1$ $x_{02} = 0,154$ и точки $K-2$ $x_{02} = 0,190$.

Величины токов нулевой последовательности в месте короткого при коротком:

$$I_{n0} = \frac{1}{2 \cdot 0,177 + 0,154} \cdot 200 = 394 \text{ а;}$$

в точке $K-2$

$$I_{n0} = \frac{1}{2 \cdot 0,214 + 0,190} \cdot 400 = 648 \text{ а.}$$

Их распределение дано на рис. 6-34, в и г.

Из сравнения соответствующих величин токов, которые указаны на схемах рис. 6-34, видно, что наличие третьей обмотки у автотрансформатора AT сравнительно мало влияет на величину тока в месте короткого и, напротив, существенно сказывается на распределении токов нулевой последовательности. Так, при коротком в точке $K-1$ в обоих случаях ток в нейтрали имеет одинаковое направление (рис. 6-34, б и в), но при коротком в точке $K-2$ ток в нейтрали автотрансформатора при отсутствии и наличии третьей обмотки имеет противоположные направления. Очевидно, величиной сопротивления третьей обмотки (или ее индуктивности) можно влиять на величину и направление тока в нейтрали автотрансформатора AT . Для условий

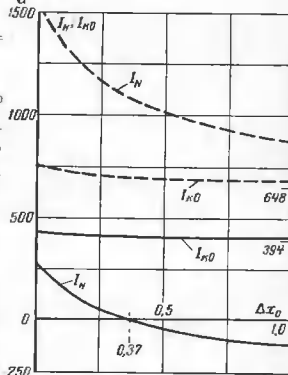


Рис. 6-35. К задаче 6-35. Кривые изменения тока нулевой последовательности в месте однофазного короткого замыкания и тока в нейтрали автотрансформатора AT в функции дополнительной реактивности Δx_0 в цепи треугольника третьей обмотки автотрансформатора AT .

Сплошные линии — при коротком замыкании в точке $K-1$, пунктирные линии — при коротком в точке $K-2$.

рассматриваемой задачи трудно установить, что если в цепь треугольника третьей обмотки включить последовательно реактивность $\Delta x = 1,11$ [что в схеме нулевой последовательности соответствует последовательному включению с реактивностью 0,21 (рис. 6-33,б) дополнительной реактивностью $\Delta x_0 = \frac{1,11}{3} = 0,37$], то при коротком в

точке $K-1$ тока в нейтрали автотрансформатора вообще не будет. Закономерности изменения токов нулевой последовательности при коротких замыканиях в точках $K-1$ и $K-2$ и токов в нейтрали автотрансформатора при тех же условиях в функции от реактивности Δx_0 , вводимой и цепь треугольника третьей обмотки, показаны на рис. 6-35. Представленные кривые наглядно иллюстрируют сказанное выше.

Задача 6-36

Для схемы на рис. 6-33,а и при данных задачи 6-35, считая, что выключатель B отключен, определить при однофазном коротком замыкании в точке $K-2$ начальные значения сверхпереходных токов поврежденной фазы линии $L-1$, нейтрали трансформатора $T-1$ и автотрансформатора AT , а также напряжение нейтрали последнего. Определите произвели для случаев, когда нейтраль автотрансформатора AT :

- завязлена наглухо;
- завязлена через $x = 25$ ом;
- развязлена.

Третья обмотка автотрансформатора AT замкнута.

Решение. Расчет проводим в относительных единицах при данных условиях, которые приняты в решении задачи 6-35, т. е. $S_0 = 80$ Мва и $U_0 = U_{0*}$, $I_0 = 200$ а при 230 кв и $I_0 = 400$ а при 115 кв

Из схемы на рис. 6-33,б следует, что

$$x_{12} = x_{22} = 0,31.$$

а) При глухом заземлении нейтрали автотрансформатора AT по схеме на рис. 6-33,в находим

$$x_{02} = [(0,08 + 0,12 + 0,09)/0,21] - 0,01 = \\ = [0,29/0,21] - 0,01 = 0,112.$$

В месте короткого

$$I_{K1} = I_{K2} = I_{K0} = \frac{1}{2 \cdot 0,31 + 0,112} \cdot 400 = 550 \text{ а}; \\ I_N = 3 \cdot 550 = 1650 \text{ а}.$$

Ток линии $L-1$

$$I_0 = \left(550 \frac{115}{230} \right) \frac{0,21}{0,29 + 0,21} = 115 \text{ а};$$

в поврежденной фазе

$$I = (550 + 550) \frac{115}{230} + 115 = 665 \text{ а},$$

Ток в нейтрали трансформатора $T-1$ $I_N = 3 \cdot 115 = 345$ а и автотрансформатора AT $I_N = 3(550 - 115) = 1305$ а.

Напряжение нейтрали автотрансформатора AT в данном случае равно нулю, $U_N = 0$.

б) Относительная базисная реактивность, через которую заземлена нейтраль автотрансформатора AT , составляет:

$$x = 25 \cdot \frac{80}{230^2} = 0,038.$$

Реактивности схемы замещения нулевой последовательности автотрансформатора AT (рис. 6-36,а) при этом будут [Л. 12, выра-

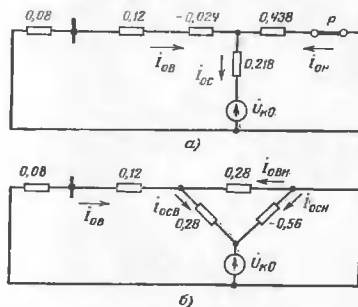


Рис. 6-36. К задаче 6-36. Схемы замещения нулевой последовательности.

а — при заземлении нейтрали автотрансформатора AT через $x = 25$ ом; б — при развязлении нейтрали автотрансформатора AT .

форму (1-34):

$$x'_{12} = 0,09 + 3 \cdot 0,038 \left(1 - \frac{230}{115} \right) = -0,024; \\ x'_{22} = -0,01 + 3 \cdot 0,038 \cdot \frac{(230 - 115) \cdot 230}{115^2} = 0,218; \\ x'_{11} = 0,21 + 3 \cdot 0,038 \cdot \frac{230}{115} = 0,438.$$

Рис. 6-36,а) относительная реактивность схемы на рис. 6-36,а относительно точки $K-2$

$$x_{02} = [(0,08 + 0,12 - 0,024)/0,438] + 0,218 = \\ = (0,176/0,438) + 0,218 = 0,344.$$

В месте короткого:

$$I_{K1} = I_{K2} = I_{K0} = \frac{1}{2 \cdot 0,31 + 0,344} \cdot 400 = 415 \text{ а};$$

$$I_N = 3 \cdot 415 = 1245 \text{ а}.$$

Ток линии Л-Л

$$I_0 = \left(415 \cdot \frac{115}{230} \right) \frac{0,438}{0,176 + 0,438} = 150 \text{ а};$$

в поврежденной фазе

$$I = (415 + 415) \frac{115}{230} + 150 = 565 \text{ а}.$$

Ток в нейтрали трансформатора Т-Л $I_N = 3 \cdot 150 = 450 \text{ а}$ и автотрансформатора АТ $I_N = 3(415 - 150) = 795 \text{ а}$.

Напряжение нейтрали автотрансформатора АТ

$$U_N = 795 \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ кв}.$$

в) При изолированной нейтрали автотрансформатора АТ его схема замещения нулевой последовательности имеет вид (рис. 6-36,б), где реактивности сторон «резонансного» треугольника будут:

$$x'_{BC} = 0,08 + 0,30 \cdot \frac{230 - 115}{115} - 0,20 \cdot \frac{230 - 115}{230} = 0,28;$$

$$x'_{BN} = 0,20 - 0,30 \cdot \frac{230}{115} - 0,08 \cdot \frac{230}{230 - 115} = -0,56;$$

$$x'_{CN} = 0,30 + 0,08 \cdot \frac{116}{230 - 115} - 0,20 \cdot \frac{115}{230} = 0,28.$$

Находим результирующую реактивность схемы на рис. 6-36,б относительно точки К-2:

$$x = [(0,08 + 0,12)/0,28] + 0,28 = 0,4$$

и

$$x_{0\Sigma} = 0,4 / (-0,56) = 1,4.$$

В месте короткого:

$$I_{K1} = I_{K2} = I_{K0} = \frac{1}{2 \cdot 0,31 + 1,4} \cdot 400 = 200 \text{ а}$$

и

$$I_N = 3 \cdot 200 = 600 \text{ а}.$$

Величина относительного тока $I_{K0} = \frac{200}{400} = 0,5$, в его распределе-
ние в схеме на рис. 6-36,б в соответствии с указанными на ней поло-

340

жительными направлениями будет:

$$I_{0CN} = 0,5 \cdot \frac{0,4}{0,4 - 0,56} = -1,25;$$

$$I_{0CB} = 0,5 - (-1,25) = 1,75;$$

$$I_{0BN} = 1,75 \cdot \frac{0,2}{0,2 + 0,28} = 0,75$$

и

$$I_{0\Gamma} = 1,75 - 0,75 = 1,0.$$

В линии Л-Л $I_0 = 1 \cdot 200 = 200 \text{ а}$, т. е. та же величина, что и на стороне 115 кв, поскольку нейтраль автотрансформатора АТ разрезана, ток поврежденной фазы

$$I = (200 + 200) \frac{115}{230} + 200 = 400 \text{ а}.$$

Ток в нейтрали трансформатора Т-Л $I_N = 3 \cdot 200 = 600 \text{ а}$, а в нейтральной автотрансформатора АТ он отсутствует.

Напряжение нейтрали автотрансформатора определяем по схеме на рис. 6-36,в, в которой конец ветви Р следует считать нулевым, а относительный ток в ветвь (в соответствии с принятыми на схеме положительными направлениями)

$$I_{0N} = I_{0C} - I_{0B} = 0,5 - 1 = -0,5.$$

Тогда полное напряжение будет:

$$U_N = (0,20 + 0,09) 1,0 - 0,21 (-0,5) = 0,395$$

и

$$U_N = 0,395 \cdot \frac{230}{\sqrt{3}} = 52,5 \text{ кв}.$$

Задача 6-37

Сеть высшего напряжения, работающая с глухозаземленной нейтралью, связана с сетью низшего напряжения автотрансформатором, нейтраль которого изолирована. Для условий однофазного короткого замыкания на стороне высшего напряжения установить, при каком соотношении между результирующими реактивностями нулевой и прямой последовательностей относительно точки короткого замыкания напряжение неповрежденных фаз на стороне низшего напряжения не превысит заданной величины.

При решении считать, что $x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma}$, и падением напряжения в автотрансформаторе от токов прямой и обратной последовательностей можно пренебречь.

Решение. Введем следующие обозначения:

$t = \frac{U_{0\Gamma}}{U_{0\Gamma}}$ — отношение фазного напряжения неповрежденной фазы на стороне низшего напряжения автотрансформатора к номинальному фазовому напряжению той же ступени;

$\frac{U_B}{U_H} = k$ — коэффициент трансформации автотрансформатора (отношение его номинального высшего напряжения к номинальному низшему);

$\frac{x_{0\pi}}{x_{1\pi}} = n$ — отношение результирующей реактивности нулевой последовательности относительно места короткого к аналогичной реактивности прямой последовательности.

При указанных допущениях симметричные составляющие напряжений поврежденной фазы на стороне низшего напряжения с учетом принятых обозначений будут:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{a1} &= \frac{U_{H\Phi}(1+n)}{2+n}; \quad \dot{U}_{a2} = -\frac{U_{H\Phi}}{2+n}; \\ \dot{U}_0 &= -\frac{kU_{H\Phi}n}{2+n}. \end{aligned}$$

Следовательно, напряжение неповрежденной фазы, например *b*, будет:

$$\begin{aligned} \dot{U}_b &= a^2 \frac{U_{H\Phi}(1+n)}{2+n} - a \frac{U_{H\Phi}}{2+n} - k \frac{U_{H\Phi}n}{2+n} = \\ &= \frac{U_{H\Phi}}{2+n} [a^2(1+n) - a - kn]. \end{aligned}$$

Согласно условию должно быть

$$\frac{U_{H\Phi}}{2+n} [a^2(1+n) - a - kn] = mU_{H\Phi}$$

для

$$[a^2 - a] + (a^2 - k)n = m(2+n).$$

Раскрывая *a* и *a*² и переходя затем к квадрату модуля, после преобразования получим относительно *n* квадратное уравнение

$$[k(1+k) + 1 - m^2]n^2 + (3 - 4m^2)n + (3 - 4m^2) = 0,$$

решение которого (отбрасывая отрицательное значение корня) дает:

$$n = \frac{(4m^2 - 3) \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{4[k(1+k) + 1 - m^2]}{(4m^2 - 3)}} \right\}}{2[k(1+k) + 1 - m^2]}.$$

На рис. 6-37 приведены кривые зависимостей $n=f(k)$ для нескольких значений *m*. Отсюда, в частности, видно, что при *k*=2 напряжение неповрежденной фазы на стороне низшего напряжения не превышает линейного значения (как это имеет место при замыканиях на землю в системах с изолированной нейтралью), если отношение реактивностей

$$\frac{x_{0\pi}}{x_{1\pi}} = n \leq 3.$$

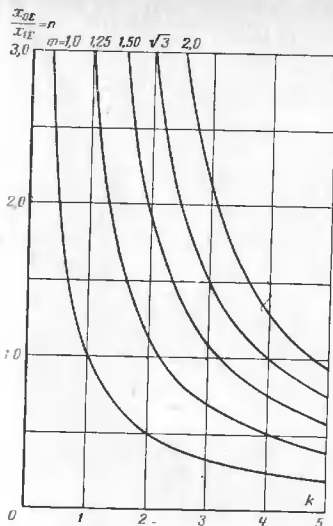


Рис. 6-37. К задаче 6-37. Кривые зависимостей $n=f(k)$ при разных значениях *m*.

Задача 6-38

Для выполнения защитного заземления электрической станции, схема которой приведена на рис. 6-38,а, требуется определить величину расчетного тока.

1) На стороне 230 кВ станция связана с системой С, характеризующейся эквивалентными реактивностями $x_1 = x_0 = 31$ ом и $x_0 = 40$ ом, при этом на реактивности x_1 приложено неизменное напряжение 230 кВ.

2) На 115 кВ, присоединенной к станции, источник питания представляет собой эквивалентную реактивность $x_0 = 13,7$ ом.

3) Трансформаторы Т-1—Т-3 одинаковые, каждый 176 Мва, 18 кВ, $u_n = 12,5\%$, Y_0/Δ .

4) Трансформатор Т-1 180 Мва, 230/18 кВ, $u_n = 12,5\%$, Y_0/Δ .

5) Трансформатор Т-2 180 Мва, 115/18 кВ, $u_n = 10,5\%$, Y_0/Δ .

6) Автотрансформатор АТ 180 Мва, 230/115/18 кВ, $u_{BC} = 13\%$, $u_{BH} = 12,5\%$, $u_{11} = 18\%$, Y_0/Δ .

Решение. Для нахождения расчетного тока, по которому должно быть выполнено защитное заземление станции, следует рассмотреть случаи однофазного короткого замыкания как на стороне 230 кВ, так и на стороне 115 кВ.

Решение проведем в относительных единицах при $S_6 = 1000 \text{ Мва}$, $U_6 = U_{ст}$ на каждой ступени трансформации. Соответственно этому базисный ток на стороне 230 кВ $I_6 = 2,5 \text{ кА}$ и на стороне 115 кВ $I_6 = 5 \text{ кА}$.

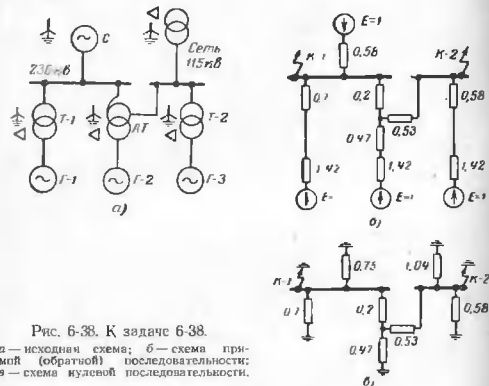


Рис. 6-38. К задаче 6-38.

а — исходная схема; б — схема прямой (обратной) последовательности; в — схема нулевой последовательности.

После приведения всех элементов к базисным условиям схемы замещения прямой и нулевой последовательностей получаются такие, как это показано соответственно на рис. 6-38,б и в. Схема прямой последовательности отвечает начальному моменту короткого замыкания; для упрощения в ней принято, что генераторы станции до короткого замыкания работают на холостом ходу с номинальным напряжением. Эта же схема, но при $E=0$, является схемой обратной последовательности.

Постепенным преобразованием нетрудно найти результирующую реактивности:

относительно точки К-1

$$x_{12} = x_{22} = 0,335 \text{ и } x_{02} = 0,211;$$

относительно точки К-2

$$x_{12} = x_{22} = 0,07 \text{ и } x_{02} = 0,254.$$

При однофазном коротком замыкании в точке К-1

$$I_n = \frac{3}{2 \cdot 0,335 + 0,211} \cdot 2,5 = 8,5 \text{ кА}.$$

При определении этого тока между нейтралью находим, развернув схему нулевой последовательности. Так, в нейтрали трансформатора Г-1 ток

$$I = 8,5 \cdot \frac{0,211}{0,7} = 2,58 \text{ кА};$$

в нейтрали системы С

$$I = 8,5 \cdot \frac{0,211}{0,75} = 2,40 \text{ кА и т. д.}$$

При этом следует иметь в виду, что ток в нейтрали автотрансформатора определяется как разность токов в его цепях К-1 и

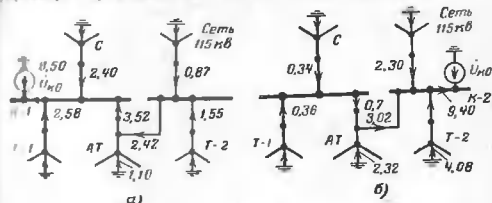


Рис. 6-39. К задаче 6-38.

а — распределение тока в нейтральных схемах при однофазном коротком в точке К-1; б — то же при коротком в точке К-2.

115 кВ, что в данном случае дает $3,52 - 2,42 = 1,10 \text{ кА}$. Здесь каждый ток является утроенным током нулевой последовательности соответствующей цепи. Для большей наглядности на рис. 6-39,а показано распределение тока между заземленными нейтралью схемы, откуда следует, что при однофазном коротком замыкании на стороне 230 кВ наибольший ток, протекающий через защитное заземление станции, будет в том случае, когда точка короткого находится вне замыкающего контура, но в непосредственной близости от него (на первом опоре отходящей линии), и величина его составляет:

$$I = 8,50 - (2,40 + 0,87) = 5,23 \text{ кА}.$$

Обратимся теперь к однофазному короткому замыканию в точке К-2. Ток в месте короткого в данном случае составляет:

$$I_n = \frac{3}{2 \cdot 0,07 + 0,254} \cdot 5 = 9,4 \text{ кА}.$$

Это распределение между заземленными нейтралью схемы показано на рис. 6-39,б, откуда также следует, что наибольший ток, протекающий через защитное заземление, будет:

$$I = 9,4 - (2,3 + 0,34) = 6,76 \text{ кА}.$$

Очевидно, этот ток и является искомым расчетным током для защитного заземления станции.

Задача 6-39

На станции, схема которой представлена на рис. 6-38д, предлагается подключить к линии 230 кВ еще один блок генератор-трансформатор, такой же как и Г-Т-Т-Т. Параметры всех элементов сохраняются те же, что и в предыдущей задаче.

Для условий произведенного расширения станции требуется определить величину расчетного тока, которому должно удовлетворять защитное заземление станции.

Задача 6-40

Воздушная линия 110 кВ длиной 25 км, индуктивные сопротивления которой $x_1=0,413$ Ом/км и $x_0=1,41$ Ом/км, выделена для проведения на ней испытаний релейной защиты. Для этого с обеих сторон линии поставлены однополюсные разъединители (рис. 6-40), с по-

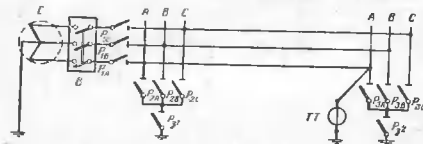


Рис. 6-40. Схема к задаче 6-40.

мощью которых можно осуществлять различные соединения фазных проводов линии как между собой, так и на землю. Кроме того, фаза А в конце линии заглушка заземлена через трансформатор тока ТТ, используемый для питания реле защиты. Через однополюсные разъединители P1 и выключатель В линия может быть присоединена к системе С, которая характеризуется индуктивными сопротивлениями $x_{1C}=x_{2C}=12$ Ом и $x_{0C}=10$ Ом, при этом за реактивностью x_{1C} приложено постоянное напряжение 115 кВ.

Для испытаний нужно получить в цепи установленного трансформатора тока ТТ токи различной величины. С этой целью требуется определить начальные значения периодической сглаженной тока в указанной цепи при включении выключателя В, когда включены следующие разъединители:

- 1) P_{1A}, P_{1B}, P_{1C};
- 2) P_{1A}, P_{1B}, P_{1C}, P_{2A}, P_{2B};
- 3) P_{1B}, P_{2A}, P_{2B}, P_{2C}, P_{3A}, P_{3B};
- 4) P_{1A}, P_{2B}, P_{2A}, P_{3A}, P_{3B};
- 5) P_{1B}, P_{2A}, P_{2B}, P_{3B}, P_{2A};
- 6) P_{1A}, P_{2B}, P_{2C}, P_{3A}, P_{3B}, P_{3C};
- 7) P_{1C}, P_{2A}, P_{2B}, P_{2A}, P_{3B}, P_{3C}, P_{2A};
- 8) P_{1A}, P_{1B}, P_{2C}, P_{2A}, P_{3A}, P_{3B}, P_{3C};
- 9) P_{1B}, P_{1C}, P_{2A}, P_{2B}, P_{2B}, P_{3C}, P_{2A};
- 10) P_{1C}, P_{2A}, P_{2B}, P_{3B}, P_{3C}.

При этом в каждом из указанных соединений все остальные разъединители схемы на рис. 6-40 отключены.

Смоделированным трансформатором тока ТТ и активными сопротивлениями элементов можно пренебречь.

Решение. Реактивности линии $x_1=0,413 \cdot 25=10,3$ Ом = x_2 и $x_0=1,41 \cdot 25=35,3$ Ом. Рассмотрим поочередно каждое из приведенных выше соединений.

1) В данном случае имеет место обычное однофазное короткое замыкание, для которого $x_{1Z}=12+10,3=22,3$ Ом = x_{2Z} и $x_{0Z}=10+145,3=45,3$ Ом и, следовательно, искомым ток

$$I = \frac{3 \cdot 66 \cdot 500}{2 \cdot 22,3 + 45,3} = 2210 \text{ а,}$$

а

$$U_{\phi} = \frac{115 \cdot 000}{\sqrt{3}} = 66 \cdot 500 \text{ в.}$$

2) При таком соединении через трансформатор тока ТТ протекает ток, возвращающийся через землю при коротком замыкании двух фаз на землю. Определим

$x_{1Z}^{(1)} = 22,3/45,3 = 15$ Ом, найдем искомым ток как

$$I = 3 \cdot \frac{66 \cdot 500}{22,3 + 15 \cdot 45,3} = 1770 \text{ а.}$$

3) Такое включение разъединителей создает условия, эквивалентные однофазному короткому замыканию в начале линии, когда нейтраль системы С заземлена через $x = \frac{35,3}{3} = 11,8$ Ом. Следовательно, искомым ток будет:

$$I = \frac{3 \cdot 66 \cdot 500}{2 \cdot 12 + 10 + 3 \cdot 11,8} = 2 \cdot 880 \text{ а.}$$

4) При рассматриваемом соединении получаются условия однофазного (фазы А) короткого замыкания, причем линейный провод фазы В здесь использован в качестве заземленного троса. Через трансформатор тока ТТ протекает не весь ток, а только та его часть, которая возвращается через землю.

По известным величинам реактивностей линии $x_1=10,3$ Ом и $x_{0C}=45,3$ Ом найдем вначале собственную реактивность петли проема — асмля

$$x_{1Z} = \frac{x_0 + 2x_1}{3} = \frac{35,3 + 2 \cdot 10,3}{3} = 18,63 \text{ Ом}$$

и величину реактивности между двумя такими петлями, образованной каким-либо двумя фазами линии 1,

$$x_{1M} = \frac{x_0 - x_1}{3} = \frac{35,3 - 10,3}{3} = 8,33 \text{ Ом.}$$

* При этом предполагается, что путем транспозиции проводов обеспечено взаимное равенство индуктивности между каждой парой проводов.

Поскольку протекающий по заземленному проводу ток равен устроенному току нулевой последовательности, реактивности нулевой последовательности соответственно будут:

$$x_{L0} = 3 \cdot 18,63 = 55,9 \text{ ом и } x_{M0} = 3 \cdot 8,33 = 25 \text{ ом.}$$

Таким образом, реактивность нулевой последовательности линии с учетом того, что она снабжена заземленным тросом, который имеет такие же параметры, как и фазные провода, и расположен относительно последних на том же среднем геометрическом расстоянии, что и фазные провода между собой, составит:

$$x_0 = 35,3 - \frac{25^2}{55,9} = 24,1 \text{ ом.}$$

Ток нулевой последовательности в месте короткого

$$I_{00} = \frac{66\,500}{2 \cdot 22,3 + 10 + 24,1} = 845 \text{ а,}$$

и искомый ток

$$I = 3 \cdot 845 \cdot \frac{(55,9 - 25)}{55,9} = 1\,400 \text{ а.}$$

5) Нетрудно заметить, что это соединение тождественно предыдущему. Различие состоит лишь в присоединении трансформатора тока TT , который в данном случае оказывается в цепи заземленного провода, и протекающий через него ток составляет:

$$I = 3 \cdot 845 - 1\,400 = 1\,135 \text{ а.}$$

6) Это соединение создает условия, аналогичные указанным в п. 4, но только здесь не один, а два провода линии (фазы B и C) использованы как заземленные тросы. Благодаря транспозиции проводов можно считать, что заземленные провода расположены симметрично относительно фазного провода, на котором сделан короткий на землю. Поэтому ток в каждом из заземленных проводов, очевидно, будет одинаков. Исходя из уравнений для палевки напряжений, легко установить, что в данном случае реактивность нулевой последовательности линии будет:

$$x_0 = 35,3 - 2 \frac{25^2}{55,9 + 25} = 19,8 \text{ ом.}$$

Тогда $x_{02} = 10 + 19,8 = 29,8 \text{ ом}$ и ток нулевой последовательности в месте короткого

$$I_{00} = \frac{66\,500}{2 \cdot 22,3 + 29,8} = 900 \text{ а.}$$

Искомый ток, протекающий через трансформатор тока TT , будет:

$$I = 3 \cdot 900 \cdot \frac{55,9 - 25}{55,9 + 25} = 1\,030 \text{ а.}$$

7) Это соединение по существу то же, что и в п. 6, но здесь трансформатор тока TT включен в цепь провода фазы A , использованного в качестве заземленного троса. Искомый ток, очевидно, составит:

$$I = (3 \cdot 900 - 1\,030) 0,5 = 835 \text{ а.}$$

8) Данное соединение создает условия двухфазного короткого замыкания на землю (фаз A и B), при этом третий фазный провод (фаза C) использован в качестве заземленного троса. Через трансформатор тока TT протекает ток, возвращающийся через землю.

Реактивность нулевой последовательности линии при таких условиях была определена в п. 4 ($x_0 = 24,1 \text{ ом}$). Следовательно, $x_{02} = 10 + 24,1 = 34,1 \text{ ом}$ и $x^{(1,1)} = 22,3/34,1 = 13,5 \text{ ом}$. Ток прямой последовательности в месте короткого

$$I_{01} = \frac{66\,500}{22,3 + 13,5} = 1\,860 \text{ а.}$$

Ток нулевой последовательности в месте короткого

$$I_{00} = 1\,860 \frac{13,5}{34,1} = 735 \text{ а,}$$

и искомый ток в трансформаторе тока TT

$$I = 3 \cdot 735 \cdot \frac{55,9 - 25}{55,9} = 1\,220 \text{ а.}$$

9) При таком соединении соблюдаются предыдущие условия, но трансформатор тока TT теперь включен в цепь заземленного провода и протекающий по нему ток составляет:

$$I = 3 \cdot 735 - 1\,220 = 985 \text{ а.}$$

10) Предложенное соединение образует цепь однофазного короткого замыкания, при этом все фазные провода линии оказываются включенными последовательно.

Суммарная реактивность контура из трех последовательно соединенных фазных проводов с возвратом тока через землю будет:

$$x = 3x_L - 2x_M = 3 \cdot 18,63 - 2 \cdot 8,33 = 39,23 \text{ ом.}$$

Считая, что такая реактивность включена в нейтраль системы, можно найти интересующий нас ток как ток при однофазном коротком замыкании в начале линии, т. е.

$$I = \frac{3 \cdot 66\,500}{2 \cdot 12 + 10 + 3 \cdot 39,23} = 1\,320 \text{ а.}$$

Нетрудно убедиться, что если в данном случае включить еще один трансформатор P_{22} , то тока в цепи трансформатора тока TT не будет.

Задача 6-41

В точке K схемы на рис. 6-41 предполагается однофазное короткое замыкание. Определить, при каком значении номинального напряжения вторичной обмотки трансформатора T ее нейтраль, заземленная через индуктивное сопротивление $x=10$ ом, будет иметь наибольший потенциал в начальный момент короткого.

Элементы схемы характеризуются следующими данными: генератор G 235 Mva , 18 kV , $x''_d=0,17$, $x_d=0,22$; до короткого замыкания работал на холостом ходу с номинальным напряжением; трансформатор 180 Mva , $U_{нп}=18$ kV , $u_k=12\%$, $Y_a/\Delta-11$.

Решение. Примем $S_б=235$ Mva и $U_{бп}=18$ kV . Тогда базисная реактивность трансформатора $x_{т*} = 0,12 \frac{235}{180} = 0,157$ и катушки в цепи нейтрали

$$x_k = 10 \frac{235}{U_{нп}^2}$$

Результирующие реактивности составляют:

$$x_{г*} = 0,17 + 0,157 = 0,327; \quad x_{д*} = 0,22 + 0,157 = 0,377;$$

$$x_{0*} = 0,157 + \frac{30 \cdot 235}{U_{нп}^2}$$

Ток в нейтрали трансформатора T

$$I_N = \frac{3}{0,327 + 0,377 + \frac{30 \cdot 235}{U_{нп}^2}} \cdot \frac{235}{\sqrt{3}U_{нп}} = \frac{407U_{нп}}{7050 + 0,861U_{нп}^2}$$

Наибольший потенциал нейтрали трансформатора, очевидно, будет тогда, когда ток I_N достигнет наибольшего значения. Из условия $\frac{dI_N}{dU_{нп}} = 0$ получаем выражение $7050 - 0,861U_{нп}^2 = 0$, откуда $U_{нп} = 90,4$ kV .

Соответственно этому наибольшее значение тока I_N будет $\frac{407 \cdot 90,4}{7050 + 0,861 \cdot 90,4^2} = 2,6$ kA и напряжения нейтрали

$$U_N = 2,6 \cdot 10 = 26$$

Ток генератора при этом составит:

$$I_1 = \sqrt{3} \cdot \frac{2,6 \cdot 90,4}{18} = 7,51$$

Закономерности изменения U_N и I_1 в функции $U_{нп}$ представлены кривыми на рис. 6-41. Изменение $I_{II} = I_N$ аналогично изменению U_N . В данном случае они связаны постоянным коэффициентом, равным 10. Пунктиром проведены аналогичные кривые, полученные не для начального момента, а для установившегося режима короткого замыкания, причем для генератора дополнительно принято $x_d'' = 10x_d' = 1,7$ и $I_{г*} = 3,5$.

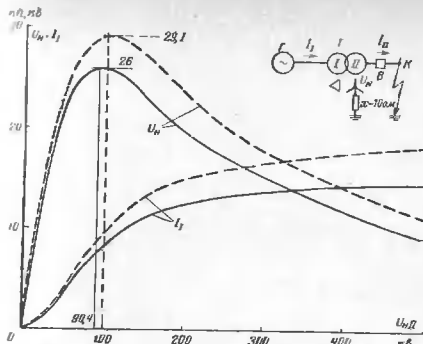


Рис. 6-41. К задаче 6-41. Кривые изменения напряжения U_N и тока I_1 в функции $U_{нп}$.

Задача 6-42

К узлу M системы присоединяется воздушная линия 110 kV протяженностью 50 km (рис. 6-42). На ее конце подключен трансформатор 60 Mva , 110/6,6 kV , $u_k=10,5\%$, Y_a/Δ , работающий на холостом ходу.

На линии произошло короткое замыкание; при этом произведенные замыканием автоматических осциллографов, которые установлены в узле M , позволили измерить следующие значения фазных токов $I_A = I_B = 2560$ A , $I_C = 535$ A , тока и напряжения нулевой последовательности $I_0 = 355$ A и $U_0 = 5300$ V .

Используя приведенные данные, а также имея в виду, что для линии $x_1 = 0,4$ $ом/км$ и $x_0 = 1,4$ $ом/км$, необходимо определить вид и место короткого замыкания и построить векторные диаграммы токов линии со стороны системы и напряжений узла M . Систему можно рассматривать как источник с известным напряжением 115 kV . Активными сопротивлениями элементов можно пренебречь.

Решение. По известным величинам токов видно, что в данном случае произошло двухфазное (фаза A и фаза B) короткое замыкание на землю. Поскольку за трансформатором нагрузка нет (в токном намагничивающемся трансформатора и зарядном токном линия пренебрежим), то, очевидно, ток непогрешенной фазы C одновременно является током нулевой последовательности на участке линии от места короткого замыкания до трансформатора.

Следовательно, ток нулевой последовательности I_0 при короткого замыкания составляет:



Рис. 6-42. Схема к задаче 6-42.

$$I_{\sigma 0} = 355 + 535 = 890 \text{ а.}$$

Реактивность нулевой последовательности системы

$$x_{\sigma 0} = \frac{5300}{365} = 15 \text{ ом}$$

и реактивность трансформатора

$$x_T = \frac{10,5}{100} \frac{110^2}{60} = 21,2 \text{ ом.}$$

Пусть l_k — расстояние от узла M до места короткого, тогда для определения этого расстояния исходим из очевидного равенства

$$(15 + 1,4l_k) 355 = [21,2 + 1,4(50 - l_k)] 535,$$

откуда $l_k = 35 \text{ км.}$

Симметричные составляющие напряжения неповрежденной фазы B в месте короткого замыкания

$$U_{B1} = U_{B2} = U_{B0} = (15 + 1,4 \cdot 35) 0,365 = 22,7 \text{ кв.}$$

При заданном условии можно принять $x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma}$ и определить эту реактивность из уравнения

$$\frac{115\sqrt{3} - 22,7}{x_{1\Sigma}} - \frac{22,7}{x_{1\Sigma}} - 0,89 = 0,$$

откуда $x_{1\Sigma} = 23,7 \text{ ом.}$

Следовательно, реактивность прямой и обратной последовательностей системы

$$x_{1c} = x_{2c} = 23,7 - 0,4 \cdot 35 \approx 10 \text{ ом.}$$

Таким образом, симметричные составляющие тока неповрежденной фазы B линии со стороны системы будут:

$$I_1 = \frac{115\sqrt{3} - 22,7}{23,7} = 1,85 \text{ ка;}$$

$$I_0 = -0,355 \text{ ка и } I_2 = -(1,85 - 0,89) = -0,96 \text{ ка.}$$

Соответственно симметричные составляющие напряжения фазы B в узле M будут:

$$\dot{U}_1 = j(115/\sqrt{3} - 10 \cdot 1,85) = j48 \text{ кв;}$$

$$\dot{U}_2 = 0 - j(-0,96) 10 = j9,6 \text{ кв;}$$

$$\dot{U}_0 = j5,3 \text{ кв.}$$

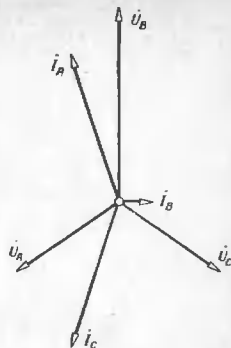
Построенные по этим составленным векторные диаграммы приведены на рис. 6-43.

Задача 6-43

Условия и требования сохраняются те же, что и в предыдущей задаче, но ее решение следует произвести при иных исходных данных, а именно:

$x_1 = 0,4 \text{ ом/км, } x_2 = 1,4 \text{ ом/км;}$
 трансформатор 120 Mva ,
 $220/11 \text{ кв, } u_{\text{вн}} = 12\%, Y_0/\Delta.$

По записям осциллографов в узле M $I_A = I_C = 345 \text{ а, } I_B = 2400 \text{ а, } I_0 = 570 \text{ а, } U_0 = 11400 \text{ в.}$
 Неизменное напряжение системы 230 кв.



Задача 6-44

От узла M системы C отходит однофазная воздушная линия 220 кв длиной 140 км. В конце линии присоединена подстанция, нагрузка которой питается через трансформатор 60 Mva , 220/11 кв, $u_{\text{вн}} = 12\%$, Y_0/Δ (рис. 44а). От возникшего на линии короткого замыкания линия отключилась выключателем B . При этом яо запи-

рис. 6-43. К задаче 6-42. Векторные диаграммы токов и напряжений.

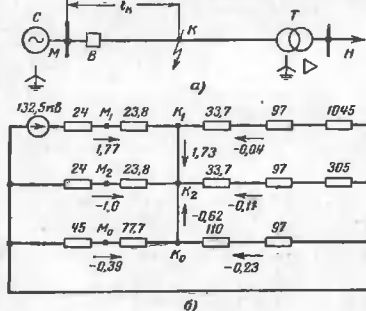


Рис. 6-44. К задаче 6-44.
 а — исходная схема; б — комплексная схема замещения.

сям автоматического осциллографа, установленного в узле *M*, определены действующие значения линейных напряжений: $U_{AB}=114$ кВ, $U_{CA}=U_{BC}=180$ кВ и напряжения нулевой последовательности $U_0=-17,5$ кВ.

Определить вид и место короткого замыкания и построить векторные диаграммы токов и напряжений в начале и конце линии.

Помимо приведенных выше данных, дополнительно известно: реактивности линии $x_1=0,41$ ом/км и $x_0=1,34$ ом/км; эквивалентные реактивности системы $x_1=x_2=24$ ом, $x_0=45$ ом; за реактивностью x_1 практически остается неизменным напряжение 230 кВ. Активные сопротивления элементов малы, и ими можно пренебречь.

Решение. По заданным величинам линейных напряжений на рис. 6-45 построен треугольник этих напряжений, характер которого показывает, что фаза *C* находится в особых условиях, т. е. в данном случае имеет место двухфазное (фаз *A* и *B*) короткое на землю.

Найдя напряжения прямой и обратной последовательностей в узле *M*. Для этого предварительно заданная позиция нулевой точки векторной диаграммы фазных напряжений, которое для рассматриваемой цели, вообще говоря, может быть выбрано совершенно произвольно, коль скоро это сказывается только на величине напряжения нулевой последовательности.

Пусть эта точка находится посередине вектора \dot{U}_{AB} (точка *O'*). Тогда фазные напряжения $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$ (считая, что оси комплексной плоскости совпадают с \dot{U}'_A и \dot{U}'_C) будут:

$$\dot{U}'_A = \frac{114}{2} = 57 \text{ кВ}; \quad \dot{U}'_B = -57 \text{ кВ}$$

$$\dot{U}'_C = j\sqrt{3} \cdot 57 = 98,7 \text{ кВ}$$

Симметричные составляющие напряжения фазы *C* находим из выражений:

$$\dot{U}_{C1} = a\dot{U}'_{A1} = a \cdot \frac{1}{3} (57 - a \cdot 57 + a^2 \cdot 98,7) = 90 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{C2} = a^2\dot{U}'_{A2} = a^2 \cdot \frac{1}{3} (57 - a^2 \cdot 57 + a \cdot 98,7) = 24 \text{ кВ}.$$

Их сумма $\dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2} = j(90 + 24) = j114$ кВ, очевидно, составляет $\frac{2}{3}$ медианы, т. е.

$$\frac{2}{3} \cdot 171 = 114 \text{ кВ}.$$

Ток от системы:

$$I_{C1} = \frac{j(230/\sqrt{3}) - j90}{j24} = 1,77 \text{ кА};$$

$$I_{C2} = \frac{0 - j24}{j24} = -1,0 \text{ кА}$$

$$I_0 = \frac{0 - j17,5}{j45} = -0,39 \text{ кА}.$$

Расстояние l_k (км), на котором произошло короткое, определяем из равенства

$$90 - 0,41l_k \cdot 1,77 = 24 + 0,41l_k \cdot 1,0,$$

откуда $l_k = 58$ км.

Реактивности этого участка линии:

$$x_1 = x_2 = 0,41 \cdot 58 = 23,8 \text{ ом и } x_0 = 1,34 \cdot 58 = 77,7 \text{ ом}.$$

Симметричные составляющие напряжений в месте короткого:

$$\dot{U}'_{C1} = j(90 - 23,8 \cdot 1,77) = j47,8 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}'_{C2} = j24 - j23,8(-1,0) = j47,8 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}'_0 = j17,5 - j77,7(-0,39) = j47,8 \text{ кВ}.$$

Целесообразно проверить каждую из этих составляющих напряжения независимо, чтобы убедиться в равенстве $\dot{U}'_{C1} = \dot{U}'_{C2} = \dot{U}'_0$, которое должно соблюдаться для неповрежденной фазы в месте двухфазного короткого на землю.

Перейдем к определению токов со стороны трансформатора, реактивности которого составляет $x_1=0,12 \frac{220^2}{60} = 97$ ом. Реактивности

линии от места короткого до трансформатора: $x_1=0,41(140-58) = 47$ ом и $x_0=1,34(140-58) = 110$ ом.

Ток нулевой последовательности со стороны трансформатора

$$I_0 = \frac{0 - j47,8}{j(110 + 97)} = -0,23 \text{ кА}$$

и фазных токов, в месте короткого

$$I_{k0} = -(0,39 + 0,23) = -0,62 \text{ кА}.$$

Со стороны трансформатора

$$I_{C1} + I_{C2} = -1,77 + 1,0 + 0,62 = -0,15 \text{ кА}$$

и эквивалентная реактивность параллельных ветвей схемы прямой и обратной последовательностей

$$x = \frac{0 - 47,8}{-0,15} \approx 318 \text{ Ом.}$$

Поскольку данные о нагрузке отсутствуют, то примем, что отношение их реактивностей $x_{н2}/x_{н1} = 0,35/1,2 = 0,292$. Величину $x_{н1}$ найдем из условия

$$\frac{(33,7 + 97 + x_{н1})(33,7 + 97 + 0,292x_{н1})}{33,7 + 97 + x_{н1} + 33,7 + 97 + 0,292x_{н1}} = 318,$$

которое после преобразования даст:

$$x_{н1}^2 - 830x_{н1} - 226\,000 = 0,$$

откуда реальное значение $x_{н1} = 1\,045 \text{ Ом}$ и, следовательно,

$$x_{н2} = 0,292 \cdot 1\,045 = 305 \text{ Ом.}$$

Таким образом, комплексная схема замещения для рассматриваемого случая короткого замыкания имеет вид (рис. 6-44, б). Определить в ней искомые токи I_{C1} и I_{C2} со стороны трансформатора уже не представляет труда.

На рис. 6-45 приведены векторные диаграммы фазных токов и напряжений в узле M . Построение аналогичных диаграмм в конце линии предоставляется выполнить читателю.

Задача 6-45

В узле M системы предполагается присоединить понижающий автотрансформатор 125 Mva , 230/115/10,5 kV , $a_{BC} = 10,5\%$, $u_{ВН} = 36,3\%$, $u_{СН} = 23\%$, $Y_d/\Delta-11$ (рис. 6-46, а).

Известно, что до присоединения этого автотрансформатора мощность короткого замыкания через 0,5 сек при трехфазном и однофазном коротких замыканиях в узле M одинаковы и составляют $S_{к}^{(3)} = S_{к}^{(1)} = 1\,620 \text{ Mva}$, при этом суммарная номинальная мощность тепловых станций системы составляет 950 Mva .

Требуется определить для того же момента времени мощности короткого замыкания при однофазном коротком замыкании на стороне 115 kV (точка $K-1$) и при двухфазном коротком замыкании на стороне 10,5 kV (точка $K-2$) автотрансформатора. Кроме того, оценить, насколько (в процентах) увеличится мощность однофазного короткого замыкания в узле M после присоединения к нему данного автотрансформатора.

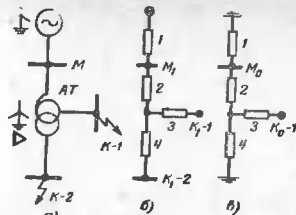


Рис. 6-46. К задаче 6-45.

а — исходная схема; б — схема замещения прямой (обратной) последовательности; в — схема замещения нулевой последовательности.

Решение. Воспользуемся методом расчетных кривых. Относительная величина мощности (или тока) трехфазного короткого замыкания через 0,5 сек составляет:

$$I_{*к}^{(3)} = \frac{1\,620}{950} = 1,7.$$

По кривым на рис. П-7 для $t = 0,5 \text{ сек}$ и $I_{*к} = 1,7$ находим расчетную реактивность системы, которая при трехфазном коротком замыкании представляет результирующую реактивность прямой последовательности системы для начального момента короткого замыкания,

$$x_{расч}^{(3)} = x_{1\Sigma} = 0,45.$$

В соответствии с заданным условием относительная величина мощности или тока прямой последовательности при однофазном коротком замыкании в то же момент времени будет:

$$I_{*к1}^{(1)} = \frac{1,7}{3} = 0,57.$$

Из тем же кривым для $t = 0,5 \text{ сек}$ и $I_{*к} = 0,57$ находим

$$x_{расч}^{(1)} = 1,6.$$

Поскольку $x_{2\Sigma} \approx x_{1\Sigma}$, результирующая реактивность нулевой последовательности системы будет:

$$x_{0\Sigma} = 1,6 - 2 \cdot 0,46 = 0,7.$$

Говорить можно составить схемы замещения. Для прямой (обратной) последовательности схема замещения представлена на рис. 6-46, б и для нулевой последовательности — на рис. 6-46, в, где

реактивности элементов замены автотрансформатора, приведенные к мощности системы, составляют:

$$x_2 = 0,8; x_0 = -0,106 \text{ и } x_3 = 1,85.$$

При однофазном коротком замыкании в точке *K-1* имеем:

$$x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = 0,45 + 0,8 - 0,106 = 1,144;$$

$$x_{0\Sigma} = (0,7 + 0,8)/1,85 - 0,106 = 0,724;$$

$$x_{\text{расч}}^{(1)} = 2 \cdot 1,144 + 0,724 = 3,01.$$

По кривым на рис. П-7 для $t = 0,5 \text{ сек}$ и $x_{\text{расч}} = 3$, $I_{\Sigma} = 0,32$ искровая мощность короткого замыкания

$$S_k^{(1)} = 3 \cdot 0,32 \cdot 950 = 910 \text{ Мва.}$$

При двухфазном коротком замыкании в точке *K-2* имеем:

$$x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = 0,45 + 0,8 + 1,85 = 3,1;$$

$$x_{\text{расч}}^{(2)} = 2 \cdot 3,1 = 6,2,$$

и поскольку $x_{\text{расч}}^{(2)} > 3$, искровая мощность короткого замыкания будет:

$$S_k^{(2)} = \sqrt{3} \cdot \frac{1}{6,2} \cdot 950 = 267 \text{ Мва.}$$

После присоединения автотрансформатора результирующая реактивность нулевой последовательности относительно узла *M* будет:

$$x_{0\Sigma} = 0,7/(1,85 + 0,8) = 0,554$$

и расчетная реактивность при однофазном коротком замыкании в этом узле составит:

$$x_{\text{расч}}^{(1)} = 2 \cdot 0,45 + 0,554 = 1,454,$$

для которой по кривым на рис. П-7 для $t = 0,5 \text{ сек}$ находим:

$$I_{\Sigma} = 0,63.$$

Следовательно, мощность однофазного короткого замыкания будет:

$$S_k^{(1)} = 3 \cdot 0,63 \cdot 950 = 1800 \text{ Мва,}$$

т. е. увеличится примерно на 11%.

Задача 6-46

Используя решение предыдущей задачи, дополнительно определить:

а) при однофазном коротком замыкании в точке *K-1* схемы на рис. 6-46,а токи в нейтралях автотрансформатора и системы;

358

б) при двухфазном коротком замыкании в точке *K-2* схемы на рис. 6-46,а коэффициент несимметрии напряжений в узле *M* и фазные токи на стороне 230 кВ автотрансформатора *AT*.

Задача 6-47

На рис. 6-47,а приведен участок электрической системы, в котором издают:

турбогенератор *G* 265 Мва, 15,75 кВ, $x''_d = 0,24$, ЛРВ — есть;
автотрансформатор *AT-1* 250 Мва, 242/169/15,75 кВ, $u_{BC} = 12,75\%$,
 $u_{III} = 11,8\%$, $u_{CH} = 17,75\%$, $Y_0/\Delta-11$;
автотрансформатор *AT-2* 160 Мва, 525/220/11 кВ, $u_{BC} = 18\%$,
 $u_{III} = 20\%$, $u_{CH} = 10\%$, $Y_0/\Delta-11$;

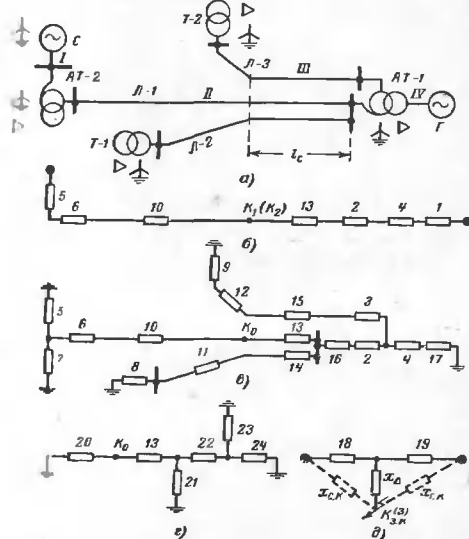


Рис. 6-47. К задаче 6-47.

а) — схема системы; б — схема нулевой последовательности; в — схема прямой последовательности.

трансформатор Т-1 125 Мва, 220/11 кВ, $u_n=12\%$, $Y_0/\Delta-11$;
 трансформатор Т-2 63 Мва, 150/6,6 кВ, $u_n=11,4\%$, $Y_0/\Delta-11$;
 линии: Л-1 130 км, $x_1=0,418$ ом/км, $x_0=1,32$ ом/км;
 Л-2 95 км, реактивности те же, что у линии Л-1;
 Л-3 70 км, $x_1=0,4$ ом/км, $x_0=1,4$ ом/км.

На участке $l_0=45$ км все линии проходят по одной трассе; их реактивности взаимноиндукции нулевой последовательности состав-
 ляют: между линиями Л-1 и Л-2 $x_{0м}=0,845$ ом/км; между линией
 Л-3 и каждой из линий Л-1 и Л-2 $x_{0м}=0,6$ ом/км.

Система С характеризуется как источник бесконечной мощности
 ($x_1=x_2=x_0=0$) с неизменным напряжением 520 кВ.

Требуется определить наибольшую величину тока нулевой по-
 следовательности в линии Л-3 при коротком замыкании на землю
 в сети 230 кВ.

Решение. Вначале проведем решение для случая, когда все эле-
 менты заданной схемы включены. Наибольшее электромагнитное
 влияние линий Л-1 и Л-2 на линию Л-3 будет при коротком замы-
 кании на землю на линии Л-1 в 45 км от станции.

Для нахождения наибольшего значения тока во времени ис-
 пользуем метод расчетных кривых. Реактивности всех элементов
 выразим в относительных единицах при $S_0=1000$ Мва и $U_{017}=
 =U_{н.т.}=15,75$ кВ, при этом базисные напряжения на других ступе-
 нях будут: $U_{011}=242$ кВ; $U_{0111}=169$ кВ; $U_{01}=576$ кВ.

Схема замещения прямой (обратной) последовательности пред-
 ставлена на рис. 6-47,б. Входящие в нее элементы имеют следующие
 значения реактивностей при базисных условиях:

$$x_1 = 0,905; x_2 = 0,136; x_4 = 0,336; x_6 = 0,882; x_8 = 0,052;$$

$$x_{10} = 0,608; x_{12} = 0,322.$$

Схема замещения нулевой последовательности представлена на
 рис. 6-47,в, где элементы 2, 4, 5 и 6 имеют те же реактивности, что и
 в схеме на рис. 6-47,б, а реактивности остальных элементов полу-
 чаются такими:

$$x_3 = 0,374; x_7 = 0,467; x_9 = 0,8; x_{10} = 1,5; x_{11} = 1,92; x_{11} = 1,13;$$

$$x_{12} = 1,32; x_{13} = x_{14} = (1,32 - 0,845) 45 \cdot \frac{1000}{242^2} = 0,37;$$

$$x_{17} = 0,6 \cdot 45 \cdot \frac{1000}{242 \cdot 169} = 0,66; x_{18} = 1,4 \cdot 45 \cdot \frac{1000}{169^2} = 0,65 = 1,72;$$

$$x_{19} = 0,845 \cdot 45 \cdot \frac{1000}{242^2} = 0,6 = -0,01.$$

После частичного преобразования схема нулевой последователь-
 ности приобретает вид (рис. 6-47,з), где $x_{20}=2,28$; $x_{21}=2,3$; $x_{22}=
 =0,126$; $x_{23}=4,91$; $x_{24}=0,996=1$. Дальнейшее ее свертывание отно-
 сительно точки K_0 приводит к результирующей реактивности нулевой
 последовательности $x_{00} = 0,72$.

Сложение двух параллельных ветвей схемы на рис. 6-47,б дает

$$x_{12} = x_{22} = 0,81.$$

Поскольку в данном случае $x_{22} = x_{12} > x_{00}$, то ток в земле
 будет больше при замыкании двух фаз на землю. Соответственно этому

$$I_{\Delta}^{(1)} = 0,81/0,72 = 0,38.$$

Перенеся точку короткого замыкания в схему прямой последо-
 вательности за реактивность $x_{\Delta} = 0,38$, получим схему на рис. 6-47,д,
 где $x_{10}=1,54$ и $x_{10}=1,7$. Реактивности лучевой схемы найдем как
 реактивности створ эквивалентного треугольника, т. е.

$$x_{г.к} = 1,7 + 0,38 + \frac{1,7 \cdot 0,38}{1,54} = 2,49;$$

$$x_{г.н} = 1,54 + 0,38 + \frac{1,54 \cdot 0,38}{1,7} = 2,27.$$

Расчетная реактивность генератора будет:

$$x_{г.всч} = 2,49 \cdot \frac{265}{1000} = 0,66,$$

или которой по кривым на рис. П-7 находим наибольшее относ-
 ительное значение тока прямой последовательности $I_1=1,9$.

Ток прямой последовательности в месте короткого замыкания
 будет (в относительных базисных единицах):

$$I_{н1} = \frac{0,9}{2,27} + 1,9 \cdot \frac{265}{1000} = 0,4 + 0,5 = 0,9;$$

т. е. напряжение системы в относительных базисных единицах равно

$$U_{н1} = 0,9.$$

Модуль тока нулевой последовательности в месте короткого

$$I_{г0} = 0,9 \cdot \frac{0,38}{0,72} = 0,475.$$

Это распределение в схеме нулевой последовательности дает
 наибольшее значение тока в линии Л-3 (элемент 23 схемы на рис. 6-47,з)

$$I_0 = 0,04$$

$$I_0 = 0,04 \cdot \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 169} = 135 \text{ а.}$$

Следует отметить, что найденное значение тока не является
 наибольшим возможным. Последнее можно получить, если в схему
 внести соответствующие изменения. Так, например, после отключе-
 ния трансформатора Т-1 и автотрансформатора АТ-2 ток в месте
 короткого замыкания меньше, из-за меньшего числа парал-

дельных ветвей в схеме нулевой последовательности искомый ток в линии Л-3 достигает 165 А. Проверку правильности такого утверждения рекомендуется сделать читателю.

Важно еще заметить, что взаимдукция нулевой последовательности между линиями очень сильно влияет на распределение тока нулевой последовательности. В частности, если в данной задаче пренебречь взаимдукцией между линиями Л-3 и линиями Л-1 и Л-2, то искомый ток был бы меньше в 3 с лишним раза.

Задача 6-48

Для выключателя В-4 в схеме на рис. 6-48, а¹ в решении задачи 5-17 произведено определение расчетного отключаемого тока при трехфазном коротком замыкании, с учетом того, что расчетное время размыкания контактов этого выключателя составляет 0,06 сек (3 пер).

Требуется определить для того же выключателя величину расчетного тока при однофазном коротком замыкании.

Соединение обмоток трансформаторов и автотрансформаторов показано на рис. 6-48, а. Нейтраль системы С заземлена наглухо.

Дополнительные данные по параметрам нулевой последовательности следующие:

линии Л-1 и Л-3 $x_0 = 3,3x_1$, $r_0 = x_0/5,2$;

Л-2 $x_0 = 4,8x_1$, $r_0 = x_0/7,6$;

система С $x_0 = 2,9x_1$, $r_0 = x_0/8$.

Решение. Расчет проводим при тех же допущениях, которые были приняты в решении задачи 5-17. При расчете трехфазного короткого замыкания схема прямой последовательности была представлена тремя независимыми параллельными ветвями с реактивными $x_{23} = 0,647$; $x_{24} = 1,45$; $x_{12} = 0,3$ и активными сопротивлениями $r_{23} = 1,64 \cdot 10^{-2}$; $r_{24} = 2,54 \cdot 10^{-2}$; $r_{12} = 5 \cdot 10^{-3}$, выраженных в относительных единицах при $S_0 = 1000 \text{ Мва}$ и $U_0 = U_{\text{вр}}$.

Следовательно, результирующие сопротивления прямой (обратной) последовательности будут:

$$x_{12} = x_{22} = 0,647 // 1,45 / 0,3 = 0,18;$$

$$r_{12} = r_{22} = (1,64 // 2,54 / 5) 10^{-2} = 0,84 \cdot 10^{-2}.$$

Обратимся теперь к схеме замещения нулевой последовательности (рис. 6-48, б). Ее элементы имеют следующие значения сопротивлений при выбранных базисных условиях:

$$x_{5,7} = 0,26; x_8 = 0,247; x_9 = 0; x_{10} = 0,54; x_{11} = 0,44; x_{12} = 0,56;$$

$$x_{13} = 0,83; x_{17} = 0,87; x_{18} = 1,91; x_{19} = 1,97; x_{20} = 1,58;$$

$$r_{6,7} = 0,65 \cdot 10^{-2}; r_8 = 0,65 \cdot 10^{-2}; r_9 = 0; r_{10} = 1,2 \cdot 10^{-2};$$

$$r_{11} = 1,26 \cdot 10^{-2}; r_{12} = 1,27 \cdot 10^{-2}; r_{13} = 2,86 \cdot 10^{-2}; r_{17} = 11 \cdot 10^{-2};$$

$$r_{18} = 36,8 \cdot 10^{-2}; r_{19} = 26 \cdot 10^{-2}; r_{20} = 30,4 \cdot 10^{-2}.$$

После преобразования треугольника с элементами 18, 19, 20 в эквивалентную звезду, сопротивления лучей которой полагают

¹ Эта схема повторяет схему на рис. 5-13; в ней лишь дополнительно введен трансформатор Т-3 и показаны соединения обмоток трансформаторов и автотрансформаторов.

$$x_{21} = 0,69; x_{22} = 0,57; x_{27} = 0,55; r_{26} = 10,3 \cdot 10^{-2}; r_{28} = 8,5 \cdot 10^{-2}; r_{29} = 1,7 \cdot 10^{-2}, \text{ трудно найти результирующие сопротивления нулевой последовательности относительно точки короткого замыкания (за 11)}$$

$$x_{0\text{с}} = 0,19 \text{ и } r_{0\text{с}} = 0,57 \cdot 10^{-2}.$$

При однофазном коротком замыкании

$$\frac{2x_{12} + x_{0\text{с}}}{2r_{12} + r_{0\text{с}}} = \frac{2 \cdot 0,18 + 0,19}{(2 \cdot 0,84 + 0,57) 10^{-2}} = 24,4;$$

для этого отношения по соответствующей кривой на рис. П-6 находим $\alpha = 1,2$.

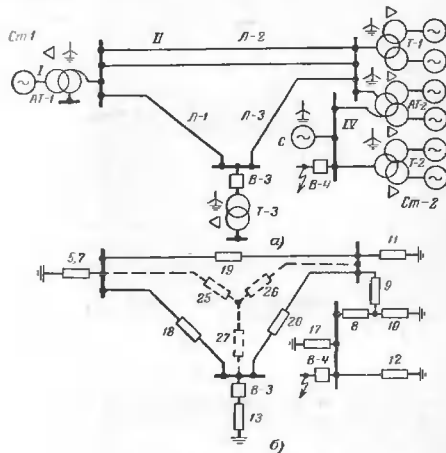


Рис. 6-48. К задаче 6-48.

а — исходная схема; б — схема замещения нулевой последовательности.

Искомый расчетный отключаемый ток при однофазном коротком замыкании будет:

$$I_{\text{отв}}^{(1)} = \frac{3}{\sqrt{3} \cdot 525} \cdot 1000 = 7,15 \text{ кА,}$$

т. е. он оказался примерно на 5% больше, чем при трехфазном коротком замыкании.

Задача 6-49

Аналогично решению задачи 6-18 произвести определение расчетного отключаемого тока выключателя В-3 (на подстанции 220 кв схемы на рис. 6-48,а) по условиям однофазного короткого замыкания. Расчетное время размыкания контактов этого выключателя составляет 0,04 сек (2 пер).

Задача 6-50

На рис. 6-49 показана часть кривой электрической системы. Входящие в нее элементы характеризуются следующими данными: турбогенератор Г 470 Мва (2×235 Мва), $\cos \psi = 0,85$, 15,75 кв, $x''_d = 0,19$, $x_d = 1,5$, $x_2 = 0,23$, $T_{j0} = 6,5$ сек, $I_{j0} = 2,3$, $I_{jnp} = 4,2$, АРВ — есть;

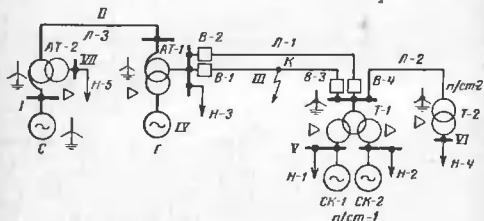


Рис. 6-49. К задаче 6-50. Исходная схема.

система С — источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 515 кв; нейтраль системы заземлена наглухо и $x_0 = 0$; синхронные компенсаторы СК-1 и СК-2 одинаковые, каждый 30 Мва, 10,5 кв, $x''_d = 0,22$, $x_d = 1,6$, $x_2 = 0,3$, $T_{j0} = 6,4$ сек, АРВ — есть; автотрансформатор АТ-1 500 Мва, 347/121/15,75 кв, $u_{BC} = 10\%$, $u_{ВН} = 20\%$, $u_{СН} = 10\%$, $Y_0/\Delta-11$; автотрансформатор АТ-2 400 Мва, 525/230/11 кв, $u_{BC} = 11\%$, $u_{ВН} = 35\%$, $u_{СН} = 20\%$, $Y_0/\Delta-11$;

трансформатор Т-1 80 Мва, 110/11 кв, $u_n = 10,5\%$, $Y_0/\Delta-11$; трансформатор Т-2 25 Мва, 110/6,3 кв, $u_n = 10,5\%$, $Y_0/\Delta-11$; линия Л-1 100 км, АС-150 мм², две цепи, $Z_1 = Z_0 = 0,21 + j0,392$ ом/км одной цепи, $Z_0 = 0,36 + j1,52$ ом/км одной цепи, $Z_{0л-1} = 0,15 + j1,04$ ом/км; линия Л-2 40 км, одна цепь, параметры те же, что линии Л-1; линия Л-3 280 км, $x_1 = 0,322$ ом/км, $x_0 = 1,322$ ом/км; нагрузки Н-1 и Н-2 одинаковые, каждая 36 Мва, Н-3 60 Мва, Н-4 20 Мва, Н-5 85 Мва.

Посредине одной цепи линии Л-1 произойдет двухфазное короткое замыкание на землю (точка К), которое через 0,5 сек было отключено вначале выключателем В-1 и затем тотчас же выключателем В-3.

Требуется определить фазные токи и напряжения выключателей В-1 и В-2 в момент отключения выключателя В-1 и после его повторного включения. По найденным величинам построить векторные диаграммы.

Для решения использовать метод спрямленных характеристик. Составить результаты расчета с учетом активных сопротивлений линии Л-1 и без их учета.

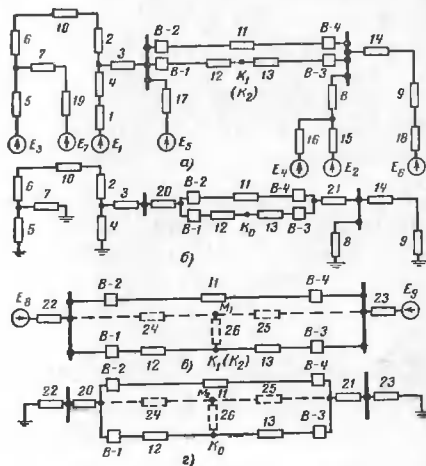


Рис. 6-50. К задаче 6-50. Схемы замещения. а и б — прямой (обратной) последовательности; в и г — нулевой последовательности.

Решение. Схемы замещения прямой и нулевой последовательности представлены на рис. 6-50,а и б. Схема обратной последовательности имеет тот же вид, что и схема прямой последовательности, но только без в. д. с. источника питания.

Расчет ведем в относительных единицах при $S_0 = 1000$ Мва, $U_{0вн} = 15,75$ кв, в соответствии с заданными коэффициентами трансформации величины базисных напряжений на других ступенях составляют: $U_{01} = 551$ кв; $U_{0ВН} = 347$ кв; $U_{0СН} = 121$ кв; $U_{0г} = 7,6$ кв и $U_{0Н4} = 11,5$ кв.

Цифрым расчетные в. д. с. и реактивности прямой последовательности генератора и синхронных компенсаторов.

Если генератор предварительно работал с номинальной нагрузкой, то его

$$E''_0 = \sqrt{0,85^2 + (0,53 + 1,0,19)^2} = 1,12.$$

Найдем интересующие нас величины по выражениям:

$$x_4 = x_d - (x_d - x''_d) \sigma_{x4} = j1,5 - j(1,5 - 0,19) 0,85 = j0,39;$$

$$E_t = E_{\text{впр}} - (E_{\text{впр}} - E''_0) \sigma_{Et} = 4,2 - (4,2 - 1,12) 0,93 = 1,3,$$

где значения коэффициентов σ_{x4} и σ_{Et} найдены по кривым на рис. П-9,а для $i=0,5$ сек.

Аналогично для синхронных компенсаторов (используя кривые рис. П-9,б) находим $x_4 = j0,36$ и $E_t = 1,42$.

После приведения к базисным условиям сопротивления и в.д.с. элементов схемы прямой последовательности (рис. 6-50,а) будут:

$$x_1 = j0,83; x_2 = x_4 = j0,2; x_3 = 0; x_5 = j0,3; x_6 = -j0,05;$$

$$x_7 = j0,51; x_8 = j1,09; x_9 = j3,18; x_{10} = j0,75; Z_{11} = 1,44 + j2,68;$$

$$Z_{12} = Z_{21} = 0,72 + j1,34; x_{14} = j1,07; x_{15} = j4,56; x_{16} = j12,6;$$

$$x_{17} = j18,2; x_{18} = j41; x_{19} = j11,8; E_1 = 1,3; E_2 = 1,23;$$

$$E_3 = 0,94; E_4 = E_5 = E_6 = E_7 = 0.$$

В схеме обратной последовательности имеем:

$$x_1 = j0,49; x_{13} = j3,8; x_{10} = j3,68; x_{17} = j5,3;$$

$$x_{18} = j11,9; x_{19} = j3,44;$$

все остальные — те же, что и в схеме прямой последовательности.

В схеме нулевой последовательности (рис. 6-50, б) имеем:

$$x_{10} = 3,08; Z_{11} = 1,44 + j3,28; Z_{12} = Z_{21} = 0,72 + j1,64;$$

$$Z_{20} = Z_{21} = 0,52 + j3,55; x_{14} = j4,15;$$

значения остальных элементов те же, что и в предыдущих схемах.

После ряда упрощений схема прямой (обратной) последовательности приобретает вид (рис. 6-50,в), где $x_{22} = j0,54$ ($j0,4$); $x_{23} = j4,05$ ($j2,5$) и $E_2 = 1,09$; $E_3 = 0,83$, и схема нулевой последовательности — на рис. 6-50,г, где $x_{22} = j0,2$ и $x_{23} = j0,95$.

Преобразование треугольника с элементами 11, 12, 13 в эквивалентную звезду дает:

в прямой (обратной) последовательности $Z_{24} = Z_{25} = 0,36 + j0,67$; $Z_{26} = 0,18 + j0,335$;

в нулевой последовательности $Z_{24} = Z_{25} = 0,36 + j0,82$; $Z_{26} = 0,18 + j0,41$.

¹ Для нагрузок принято $x_1 = j1,2$ и $x_2 = j0,33$. Элементы 20 и 21 в схемах на рис. 6-50,б и в представляют сопротивления взаимной индукции между параллельными цепями линий 2-4. Из-за симметрии оба синхронных компенсатора объединены в один (элемент 15); равным образом объединены нагрузки Н-1 и Н-2 (элемент 16).

Дальнейшее свертывание схем приводит к

$$Z_{11} = 0,42 + j1,3; E_x = 1,03; Z_{22} = 0,4 + j1,15 = 1,21 \angle 70,5^\circ;$$

$$Z_{02} = 0,53 + j2,66 = 2,72 \angle 79^\circ.$$

Конечное сопротивление

$$Z_{(1,1)}^{(1)} = Z_{22} // Z_{02} = 0,24 + j0,805 = 0,84 \angle 73,5^\circ$$

и полное сопротивление цепи для двухфазного короткого замыкания на линии:

$$Z^{(1,1)} = Z_{12} + Z_{(1,1)}^{(1)} = 0,42 + j1,3 + 0,24 + j0,805 = 0,66 + j2,11 = 2,21 \angle 72,5^\circ.$$

Приняв $E'_A = 1,03 \angle 90^\circ$, получим:

$$I_{KA1} = \frac{1,03 \angle 90^\circ}{2,21 \angle 72,5^\circ} = 0,467 \angle 17,5^\circ;$$

$$I_{KA2} = -0,467 \angle 17,5^\circ \cdot \frac{0,84 \angle 73,5^\circ}{1,21 \angle 70,5^\circ} = 0,324 \angle -159,5^\circ;$$

$$I_{K0} = -0,467 \angle 17,5^\circ \cdot \frac{0,84 \angle 73,5^\circ}{2,72 \angle 79^\circ} = 0,144 \angle -168^\circ.$$

Симметричные составляющие напряжения в месте короткого

$$U'_{KA1} = \dot{U}_{KA2} = \dot{U}'_0 = 0,467 \angle 17,5^\circ \cdot 0,84 \angle 73,5^\circ = 0,392 \angle 91^\circ.$$

Напряжение точки М, (рис. 6-50, в)

$$U'_{11} = 0,392 \angle 91^\circ + 0,467 \angle 17,5^\circ (0,18 + j0,335) = 0,558 \angle 90^\circ.$$

Ток в обеих цепях линий со стороны станций:

$$I_{A1} = \frac{(1,09 - 0,558) \angle 90^\circ}{0,36 + j(0,67 + 0,54)} = 0,44 \angle 16,5^\circ;$$

$$I_{A2} = 0,24 \angle -156,5^\circ \text{ и } I_0 = 0,079 \angle -168^\circ;$$

же со стороны подстанции п/ст-1

$$I_{A1} = 0,027 \angle 16,5^\circ; I_{A2} = 0,085 \angle -168^\circ; I_0 = 0,065 \angle -168^\circ.$$

Симметричные составляющие токов в выводе вале В-1

$$I_{11} = \frac{1 + 0,5}{2} \cdot 0,44 \angle 16,5^\circ + \frac{0,5}{2} \cdot 0,027 \angle 16,5^\circ = 0,337 \angle 16,5^\circ,$$

аналогично

$$I_{A2} = 0,2 \angle -160^\circ$$

$$I_0 = 0,075 \angle -168^\circ;$$

в выключателе B-2

$$I_{A1} = \frac{1-0,5}{2} \cdot 0,44 \angle 16,5^\circ - \frac{0,5}{2} \cdot 0,027 \angle 16,5^\circ = 0,103 \angle 16,5^\circ,$$

аналогично

$$I_{A2} = 0,04 \angle -160^\circ$$

$$I_0 = 0,004 \angle -168^\circ.$$

Симметричные составляющие напряжений у этих выключателей:

$$\dot{U}_{A1} = 0,558 \angle 90^\circ + 0,44 \angle 16,5^\circ (0,36 + j0,67) = 0,89 \angle 85^\circ;$$

$$\dot{U}_{A2} = 0,096 \angle 110^\circ + \dot{U}_0 = 0,016 \angle 102^\circ.$$

Построенные по найденным симметричным составляющим векторные диаграммы приведены на рис. 6-51 (для B-1) и 6-52а (для B-2).

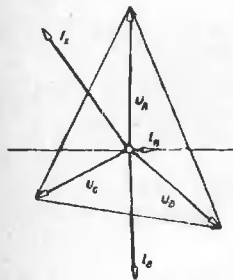


Рис. 6-51. К задаче 6-50. Векторная диаграмма токов и напряжений выключателя B-1.

Искомые фазные величины токов и напряжений, выраженные в имевшихся единицах (с учетом того, что $I_0 = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 121} = 4,77$ ка и $U_0 = \frac{121}{\sqrt{3}} = 70$ кВ), составляют:

$$\dot{U}_A = 64,5 \angle 90^\circ \text{ кВ}; \dot{U}_B = 56 \angle -38^\circ \text{ кВ}; \dot{U}_C = 49,7 \angle -154^\circ \text{ кВ};$$

токи в выключателе B-1

$$I_A = 0,31 \angle 5^\circ \text{ ка}; I_B = 2,24 \angle -87^\circ \text{ ка}; I_C = 2,38 \angle 126^\circ \text{ ка};$$

и в выключателе B-2

$$I_A = 0,31 \angle 5^\circ \text{ ка}; I_B = 0,62 \angle -85^\circ \text{ ка}; I_C = 0,62 \angle 123^\circ \text{ ка}.$$

После отключения выключателя B-1 результирующие сопротивления и э. д. с. получаются следующими:

$$Z_{1\Sigma} = 1,15 + j3,21; Z_{2\Sigma} = 0,99 + j2,8;$$

$$Z_{0\Sigma} = 1,21 + j4,4 \text{ и } \dot{E}_{A\Sigma} = 1,03 \angle 90^\circ.$$

Подсчет, аналогичный предыдущему, приводит к следующим результатам:

фазные напряжения у выключателя B-2 (также и у B-1)

$$\dot{U}_A = 74,2 \angle 90^\circ \text{ кВ}; \dot{U}_B = 71,4 \angle -33^\circ \text{ кВ}; \dot{U}_C = 68,6 \angle -152^\circ \text{ кВ};$$

токи в выключателе B-2

$$I_A = 0,21 \angle 20^\circ \text{ ка}; I_B = 0,76 \angle -75^\circ \text{ ка}; I_C = 0,81 \angle 150^\circ \text{ ка}.$$

Векторная диаграмма для этих условий показана на рис. 6-52б.

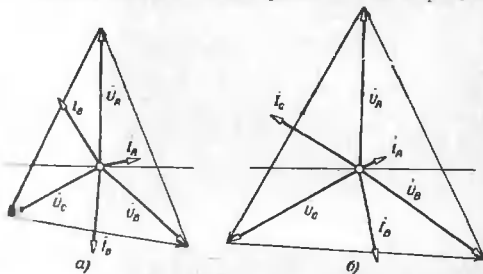


Рис. 6-52. К задаче 6-50. Векторные диаграммы токов и напряжений выключателя B-2.

а — при включенном B-1; б — после отключения B-1.

При пренебрежении активными сопротивлениями линии Л-1 результирующие реактивности и э. д. с. имеют следующие значения: после отключения B-1

$$x_{1\Sigma} = 1,32; x_{2\Sigma} = 1,14; x_{0\Sigma} = 2,88; E_\Sigma = 1,04;$$

после отключения B-1

$$x_{1\Sigma} = 3,13; x_{2\Sigma} = 2,72; x_{0\Sigma} = 6,04; E_\Sigma = 0,98.$$

Проведенный подсчет дает следующие величины искомых токов и напряжений:

до отключения В-1

$$\dot{U}_A = 68 \angle 90^\circ \text{ кВ}; \dot{U}_B = 55,6 \angle -36^\circ \text{ кВ}; \dot{U}_C = 55,6 \angle -144^\circ \text{ кВ};$$

токи в выключателе В-1

$$I_A = 0,24 \angle 0^\circ \text{ кА}; I_B = 2,39 \angle -74,5^\circ \text{ кА}; I_C = 2,39 \angle 74,5^\circ;$$

токи в выключателе В-2

$$I_A = 0,24 \angle 0^\circ \text{ кА}; I_B = 0,6 \angle -76^\circ \text{ кА}; I_C = 0,5 \angle 76^\circ;$$

после отключения В-1

$$\dot{U}_A = 72,8 \angle 90^\circ \text{ кВ}; \dot{U}_B = 70 \angle -30^\circ \text{ кВ}; \dot{U}_C = 70 \angle -150^\circ \text{ кВ};$$

токи в выключателе В-2

$$I_A = 0,29 \angle 0^\circ \text{ кА}; I_B = 0,9 \angle -69,5^\circ \text{ кА}; I_C = 0,9 \angle 69,5^\circ \text{ кА}.$$

Сопоставление этих результатов с полученными ранее показывает, что до отключения В-1 погрешность от неучета активных сопротивлений линии Л-1 меньше, чем после отключения В-1, так как в последнем случае относительное участие сопротивления линии Л-1 в результирующем сопротивлении возрастает. Большая погрешность получается в оценке тока неповрежденной фазы и в значениях фазовых углов сдвига. Что касается модулей токов поврежденных фаз, то их приближенные значения достаточно близки к действительным (наибольшая погрешность здесь достигает +15%). Последнее обстоятельство и позволяет на практике при подсчете токов короткого замыкания часто пренебрегать всеми активными сопротивлениями элементов цепи короткого замыкания. Необходимость учета активных сопротивлений, вообще говоря, должна оцениваться в каждом конкретном случае.

Следует дополнительно заметить, что коль скоро генератор и синхронные компенсаторы введены в схему прямой последовательности своими расчетными э. д. с. в реактивностях, то это соответствует предположению, что они работают в режиме люлеме возбуждения.

Производить проверку правильности выбранного режима в данном случае нет необходимости, так как за 0,5 сек нормальное напряжение генератора обычно не восстанавливается.

Задача 6-51

Используя схемы замещения предыдущей задачи (рис. 6-50), определить, в каком диапазоне меняется отношение модулей токов обратной последовательности при двухфазном коротком замыкании на землю и при обычном двухфазном коротком замыкании (т. е. без одновременного замыкания на землю поврежденных фаз) в зависимости от положения точки К на линии Л-1.

В этой целью достаточно рассмотреть случаи коротких замыканий на концах линии Л-1 и последние на одной из ее цепей. Для упрощения расчета активными сопротивлениями всех элементов (включая линию Л-1) можно пренебречь.

Задача 6-52

На п/ст-2 схемы на рис. 6-53 от газовой защиты трансформатора Т-2 сработал короткозамыкатель КЗ. Созданное им одnofазное короткое замыкание через 0,5 сек отключено от системы С выключателем В. Однако питание короткого замыкания продолжалось от вспомогательного двигателя, присоединенного к п/ст-1.

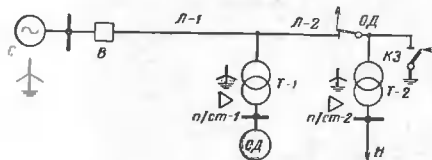


Рис. 6-53. Схема к задаче 6-52.

Определить диапазон, в котором может быть величина тока короткого замыкания, создаваемого этим двигателем в течение 2 сек после отключения выключателя В, считая, что в этот промежуток времени скорость вращения двигателя сохраняется неизменной.

Исходные данные:

система С $x_{C1} = x_{C2} = 15 \text{ ом}$, $x_{C0} = 12 \text{ ом}$, за реактивностью приложено независимое напряжение 115 кВ;
 синхронный двигатель СД 30 Мва, 6,3 кВ, $x''_d = 0,2$; $x'_d = 0,3$,
 $T_{d0} = 1,0$, $x_2 = 0,24$, $T_{10} = 3 \text{ сек}$, $T_{1\text{ин}} = 3$;
 трансформатор Т-1 60 Мва, 115/6,3 кВ, $\sigma_k = 10,5\%$, Y_0/Δ ;
 трансформатор Т-2 40 Мва, 115/6,3 кВ, $\sigma_k = 10,5\%$, Y_0/Δ ;
 нагрузка Н 25 Мва; $x_1 = 1,2$, $x_2 = 0,35$;
 линии: Л-1 25 км, Л-2 15 км, $x_1 = 0,4 \text{ ом/км}$, $x_0 = 3,5x_1$.

Решение. Выразим реактивности и э. д. с. схемы в процентах от $U_n = 110 \text{ Мва}$ и $U_n = U_{C3}$ (на каждой ступени).

На рис. 6-54 представлены схемы отдельных последовательностей на которых указаны значения реактивностей их элементов при данных условиях. Обычным упрощением схем находим результирующие реактивности:

до отключения выключателя В

$$x_{0\Sigma} = 13,5\%; x_{2\Sigma} = 18,2\%;$$

после отключения выключателя В

$$x_{0\Sigma} = 14,7\%; x_{2\Sigma} = 63,3\%.$$

Дополнительная реактивность для рассматриваемого вида короткого замыкания будет:

до отключения выключателя B

$$x_A = 13,5 + 18,2 = 31,7\%;$$

после отключения выключателя B

$$x_A = 14,7 + 63,3 = 78,0\%.$$

В схеме прямой последовательности (рис. 6-54,а) для синхронного двигателя дробно указаны значения реактивностей соответственно X_d' и x_d . Его э. д. с. принимаются далее в соответствии с производимым расчетом.

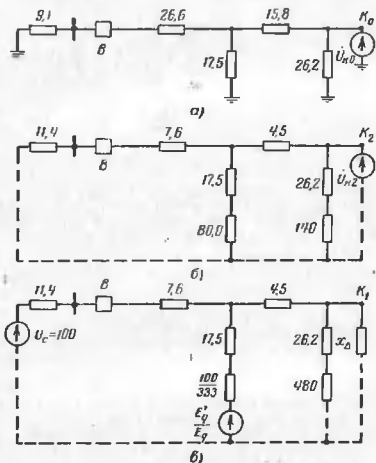


Рис. 6-54. К задаче 6-52. Схемы замещения.
а — нулевой; б — обратной; в — прямой последовательностей.

Практический интерес представляет величина тока от синхронного двигателя не ранее чем через 0,3 сек после отключения выключателя B (имеется в виду время, через которое может подействовать отделитель $ОД$). Поэтому сверхпереходный процесс можно не

рассматривать и нагрузку $p/c-2$ ввести в схему прямой последовательности реактивною и э. д. с. ($E=0$) установившегося режима. Наибольшая величина тока от синхронного двигателя, очевидно, будет при отсутствии у него $АРВ$ и когда он предварительно работал на холостом ходу ($I_f=1$). Напротив, наибольшая величина тока будет при наличии $АРВ$ и когда его $T_d=0$. Для нахождения требуемого диапазона в дальнейшем рассматриваем оба эти крайних условия работы синхронного двигателя.

Приняв для простоты у двигателя $E'_{d0}=100\%$, легко подсчитать критический переходный ток прямой последовательности в месте короткого З.го относительно величина составляет $I'_{к1}=1,86$, при этом от двигателя поступает $I_1=0,274$. Соответственно при отсутствии $АРВ$ установившаяся ток прямой последовательности двигателя составляет $I_1=0,1$. При наличии $АРВ$ двигатель в установившемся режиме рассматриваемого короткого замыкания будет иметь предельное возбуждение, так как критическая реактивность

$$x_{кр} = 333 \cdot \frac{100}{300 - 100} = 166,5\%$$

значительно больше внешней реактивности относительно двигателя (рис. 6-54,а). В этом случае ток прямой последовательности получим $I_1=0,65$.

Для определения постоянной времени затухания свободного перемещения тока следует предварительно найти суммарную реактивность схемы на рис. 6-54,а относительно двигателя (ветвь системы при этом рассматривается как обычная параллельная ветвь внешней цепи, т. е. считаем ее $E=0$). Эта реактивность составляет $x=29,7\%$, и тогда

$$T_d = 3 \cdot \frac{100 + 29,7}{333 + 29,7} = 1,07 \text{ сек.}$$

Таким образом, в момент отключения выключателя B (т. е. через 0,3 сек после возникновения короткого) величины тока I_1 и E'_d двигателя составляют:

при отсутствии $АРВ$

$$I_1 = 0,1 + (0,274 - 0,1)e^{\frac{-0,5}{1,07}} = 0,208; E'_d = 91,6\%;$$

при наличии $АРВ$

$$I_1 = 0,65 + (0,274 - 0,65)e^{\frac{-0,5}{1,07}} = 0,42; E'_d = 119\%.$$

После отключения выключателя B суммарная внешняя реактивность схемы на рис. 6-54,в относительно двигателя составляет:

$$x = 17,5 + 4,5 + (26,2 + 480)/78 = 17,5 + 4,5 + 67,6 = 89,6\%.$$

Токи прямой последовательности двигателя:
без АРВ

$$I'_1 = \frac{91,6}{100 + 89,6} = 0,482;$$

$$I_1 = \frac{100}{333 + 89,6} = 0,237;$$

с АРВ

$$I'_1 = \frac{119}{100 + 89,6} = 0,627$$

и

$$I_1 = 3 \cdot 0,237 = 0,711$$

(так как этот ток пропорционален току возбуждения).
Постоянная времени

$$T'_{d1} = 3 \cdot \frac{100 + 89,6}{333 + 89,6} = 1,35 \text{ сек.}$$

Ток прямой последовательности двигателя через 0,5 сек после отключения выключателя В:
без АРВ

$$I_1 = 0,237 + (0,482 - 0,237) e^{\frac{-0,5}{1,35}} = 0,404;$$

с АРВ:

$$I_1 = 0,711 + (0,627 - 0,711) e^{\frac{-0,5}{1,35}} = 0,651.$$

Для получения вольского тока, выраженного в килоамперах, следует полученные величины относительного тока прямой последовательности двигателя умножить на коэффициент

$$m = 3 \cdot \frac{67,6}{78} \cdot 0,5 = 1,3,$$

где

$$I_0 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ ка.}$$

Таким образом, после отключения выключателя В ток в месте короткого составляет:

без АРВ

$$I' = 0,63 \text{ ка; } I_{0,5} = 0,525 \text{ ка; } I = 0,31 \text{ ка;}$$

с АРВ

$$I' = 0,81 \text{ ка; } I_{0,5} = 0,845 \text{ ка; } I = 0,53 \text{ ка.}$$

Через отделитель ОД протекает несколько меньший ток, так как за отделителем присоединены трансформатор и нагрузка подстанции 2. Если ток каждой последовательности в месте короткого

выразить за единицу, то ток, протекающий через отделитель ОД, со-

$$\left(1 - \frac{78}{26,2 + 480}\right) + \left(\frac{63,3}{4,5 + 17,5 + 89}\right) + \left(\frac{14,7}{15,8 + 17,5}\right) \cdot 100 = 74\%$$

имеет в месте однофазного короткого замыкания.

Полученные результаты представлены в виде кривых на рис. 6-55. Заштрихованная зона показывает возможный диапазон

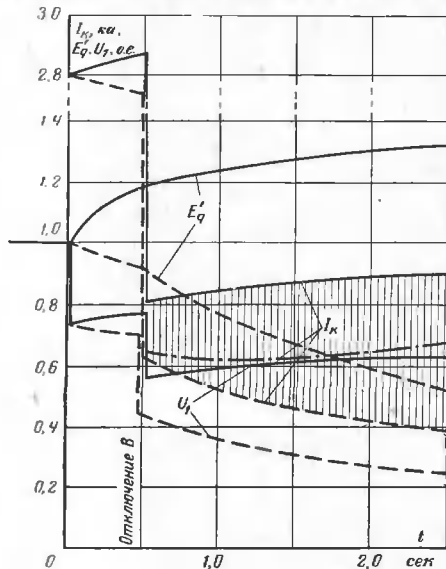


Рис. 6-55. К задаче 6-52. Кривые изменения тока I_k , э. д. с. E'_q и напряжения U_1 синхронного двигателя.

Сплошные линии — СД с АРВ при $T_d = 0$; пунктирные линии — СД без АРВ и $I_1 = 1$; линия штрих с точкой — ток в СД, найденный по расчетным кривым с АРВ.

изменяя тока, поступающего от синхронного двигателя к месту короткого после отключения выключателя В. Некоторый запас в расчете обусловлен тем, что не учтено снижение скорости вращения двигателя.

Для полноты картины рассматриваемого процесса на рис. 6-54 также приведены кривые изменения э. д. с. E'_2 и напряжения прямой последовательности двигателя, которые выражены в относительных единицах его номинального напряжения. Кроме того, в штрихованной зоне приведена кривая (штрих с точкой) изменения тока, полученная более простым методом, т. е. методом расчетных кривых с поправкой на значение постоянной времени T_{d0} и на место присоединения нагрузки. Как видно, этим простым методом можно в первом приближении оценить интересующую величину тока короткого замыкания.

Задача 6-53

Два одинаковых блока генератор — трансформатор связаны на стороне высшего напряжения (рис. 6-56,а). Их различие состоит лишь в том, что нейтраль трансформатора Т-1 заземлена через ин-

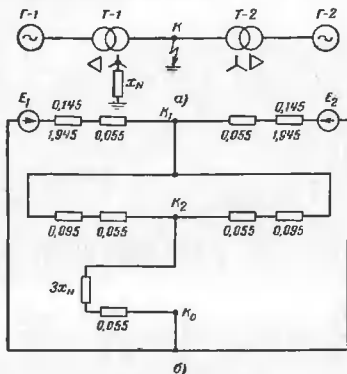


Рис. 6-56. К задаче 6-53.

а — исходная схема; б — комплексная схема замещения.

дуктивное сопротивление x_N , в то время как нейтраль другого трансформатора изолирована.

Требуется определить величину x_N , при которой начальный переходный и установившийся токи в месте однофазного короткого замыкания (точка К) одинаковы. При этом условии построить кривые

изменения фазных токов обоих трансформаторов (на стороне высшего напряжения) и их симметричных составляющих в функции времени.

До короткого замыкания генераторы работали на холостом ходу с номинальным напряжением. У генератора Г-1 АРВ отключен, а у генератора Г-2 АРВ включен, причем последний реагирует на напряжение за трансформатором Т-2 (т. е. на стороне высшего напряжения) и стремится поддерживать его на уровне номинального.

Параметры каждого генератора: $x_d = 1,945$; $x'_d = 0,145$; $x_2 = 0,095$; $T_{d0} = 5$; $T_{J0} = 3$ сек; $T_E \approx 0$. Индуктивное сопротивление каждого трансформатора, отнесенное к номинальным данным генератора, $x = 0,055$.

Решение. Комплексная схема для заданных условий представлена на рис. 6-56, б, где указаны реактивности всех элементов, выраженные в относительных единицах при номинальных условиях генератора. Дополнительная реактивность x_N в данном случае

$$x_N = 0,5(0,095 + 0,055) + 0,055 + 3x_N = 0,13 + 3x_N.$$

Начальный момент короткого замыкания э. д. с. обоих генераторов $E_1 = E_2 = 1$; при установившемся режиме короткого $E_1 = 1$ и $E_2 = 0$, соответственно эквивалентная э. д. с. $E_N = \frac{1+5}{2} = 3$.

Ищем поставленное условие равенства токов:

$$\frac{3}{0,5(0,145 + 0,055) + 0,13 + 3x_N} = \frac{1+5}{3,3} = 2,22 \\ = \frac{3,3}{0,5(1,945 + 0,055) + 0,13 + 3x_N}$$

откуда $x_N = 0,073$ и, следовательно, $x_N = 0,13 + 3 \cdot 0,073 \approx 0,35$.

Величина тока прямой последовательности в месте короткого

$$I'_{K1} = I_{K1} = \frac{1}{0,5(0,145 + 0,055) + 0,35} = 2,22,$$

и ток в месте короткого

$$I''_K = I_K = 3 \cdot 2,22 = 6,66.$$

Напряжение прямой последовательности в месте короткого

$$U_{K1} = 2,22 \cdot 0,35 = 0,78.$$

Симметричные составляющие токов в трансформаторах (поврежденной фазы А):

$$I'1 I'_1 = 0,5 \cdot 2,22 = 1,11; \quad I_1 = \frac{1 - 0,78}{1,945 + 0,055} = 0,11;$$

$$I'2 I'_1 = 1,11; \quad I_1 = 2,22 - 0,11 = 2,11;$$

$$I'1 I'_2 = I'_2 = I_2 = 0,5 \cdot 2,22 = 1,11;$$

$$I'1 I'_0 = I_0 = 2,22; \quad I'_2 I'_0 = I_0 = 0.$$

Постоянная времени

$$T_a = 3 \cdot \frac{0,5(0,145 + 0,055) + 0,35}{0,5(1,945 + 0,055) + 0,35} = 1 \text{ сек.}$$

Поскольку $T_a = 0$, то при $I_n = I_k$ ток в месте короткого и его составляющие обратная и нулевой последовательностей остаются неизменными во времени. Токи прямой последовательности в трансформаторах будут:

$$\begin{aligned} \text{в } T-1 \quad I_1 &= 0,11 + (1,11 - 0,11)e^{-t} = 0,11 + 1e^{-t}; \\ \text{в } T-2 \quad I_1 &= 2,11 + (1,11 - 2,11)e^{-t} = 2,11 - 1e^{-t}. \end{aligned}$$

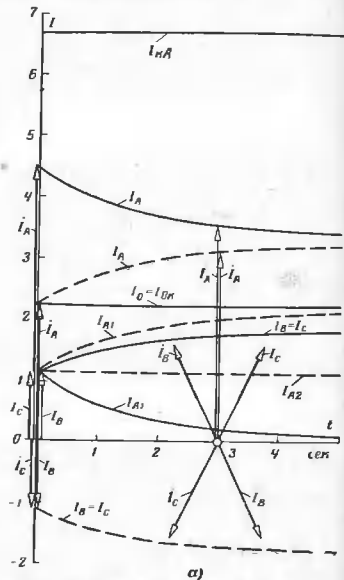


Рис. 6-57. К задаче 6-53. Кривые изменения токов трансформатора $T-1$ и трансформатора $T-2$ и векторные диаграммы токов трансформатора $T-1$ и трансформатора $T-2$.

Токи поврежденной фазы трансформаторов:

$$\begin{aligned} T-1 \quad I &= 0,11 + 1e^{-t} + 1,11 + 2,22 = 3,44 + 1e^{-t}; \\ T-2 \quad I &= 2,11 - 1e^{-t} + 1,11 = 3,22 - 1e^{-t}. \end{aligned}$$

На рис. 6-57а приведены искомые кривые изменения токов трансформатора $T-1$ уменьшается, а трансформатора $T-2$, напротив, возрастает, причем сумма этих токов (I_n) остается неизменной. Токи в поврежденных фазах (естественно, обеих трансформаторов) также возрастают. Для иллюстрации построены векторные диаграммы токов

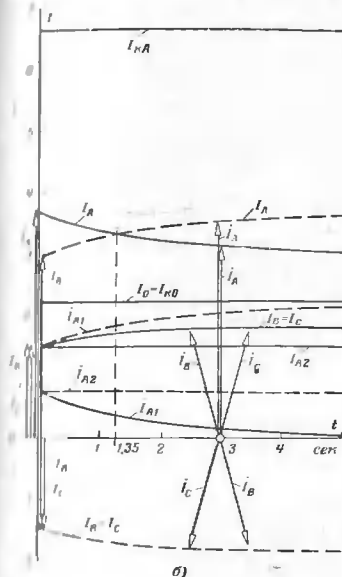


Рис. 6-57. К задаче 6-53. Кривые изменения токов трансформатора $T-1$ и трансформатора $T-2$ и векторные диаграммы токов трансформатора $T-1$ и трансформатора $T-2$.

в начальный момент короткого и в момент $t=3$ сек. Благодаря изменению токов прямой последовательности рассматриваемые векторные диаграммы с течением времени деформируются; сдвиг между токами неповрежденных фаз возрастает.

Для сравнения на рис. 6-57,б приведены аналогичные кривые и векторные диаграммы токов для случая, когда при сохранении всех предыдущих условий лишь уменьшены в 2 раза номинальные мощности генератора $T-1$ и трансформатора $T-1$ (т. е. реактивности соответствующих элементов в комплексной схеме на рис. 6-56,б возрастут в 2 раза). В данном случае, как видно, ток поврежденной фазы обоих трансформаторов через 1,35 сек одинаковы. В дальнейшем ток трансформатора $T-2$ превышает ток трансформатора $T-1$.

Задача 6-54

Для схемы на рис. 6-58,а при двухфазном коротком замыкании в точке $K-1$ определить фазные токи на стороне высшего напряжения трансформатора $T-1$ и их изменение в диапазоне от 0,5 до 1 сек с момента возникновения короткого. Расчет произвести с учетом действия АРВ и возникающих качаний генератора.

Схема на рис. 6-58,а является повторением схемы на рис. 5-9,д, которая использована в задаче 5-15. Все исходные данные указанной задачи сохраняются; ряд необходимых дополнительных данных приведен ниже:

генератор G $x_0=0,24$; автотрансформатор $AT-2$ $u_{BC}=12\%$, $u_{BH}=24\%$, $u_{CH}=12\%$; нагрузки $H-1$ $x_0=0,35$, $H-2$ $x_0=0,35$ и $x_0=0,21$ (реактивность, обусловленная линиями в трансформаторах, по которым летает нагрузка $H-2$); линии $Л-1$ и $Л-2$ $x_0=3,5x_1$; эквивалентная реактивность нулевой последовательности сети среднего напряжения, присоединенной к автотрансформатору $AT-2$, составляет $x_0=38,4$ ом.

Решение. Как и в задаче 5-15, решение проводим в относительных единицах при тех же базисных условиях: $S_0=353$ Мва; $U_{01}=20$ кв; $U_{0II}=347$ кв; $U_{0III}=525$ кв; $U_{0IV}=127$ кв; $U_{0V}=40,5$ кв.

На рис. 6-58,б показана схема прямой последовательности. Напомним значения реактивностей ее элементов:

$$x_1 = 0,3 = x'_d \text{ и } x_1 = 1,7 = x_d; \quad x_2 = 0,115; \quad x_3 = 0,174; \quad x_4 = -0,032; \\ x_5 = 0,3; \quad x_7 = 4,3; \quad x_8 = 3,75; \quad x_9 = 0,216; \quad x_{10} = 0,152; \quad \text{е е з л с.}$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_0 = 1,19 \angle 39^\circ; \quad \dot{E}_2 = 0,97; \quad \dot{E}_3 = \dot{E}_4 = 0.$$

Реактивности элементов схемы обратной последовательности (рис. 6-58,в) составляют:

$$x_1 = 0,24; \quad x_2 = 0,115; \quad x_3 = 0,174; \quad x_4 = -0,032; \quad x_5 = 0,3; \quad x_7 = 1,25; \\ x_8 = 1,09; \quad x_9 = 0,216; \quad x_{10} = 0,152$$

и элементов схемы нулевой последовательности (рис. 6-58,г):

$$x_0 = 0,115; \quad x_2 = 0,174; \quad x_3 = -0,032; \quad x_4 = 0,3; \quad x_5 = 0,65;$$

$$x_8 = 0,755; \quad x_{10} = 0,531; \quad x_{11} = x_{12} = 0,32; \quad x_{13} = 0; \quad x_{14} = 0,84.$$

После вверствания схем обратной и нулевой последовательности относительно точки короткого замыкания получим:

$$x_{22} = 0,302 \text{ и } x_{02} = 0,291,$$

и значение дополнительной реактивности при двухфазном коротком замыкании

$$x_{2(1,1)}^{\Delta} = 0,302/0,291 = 0,148.$$

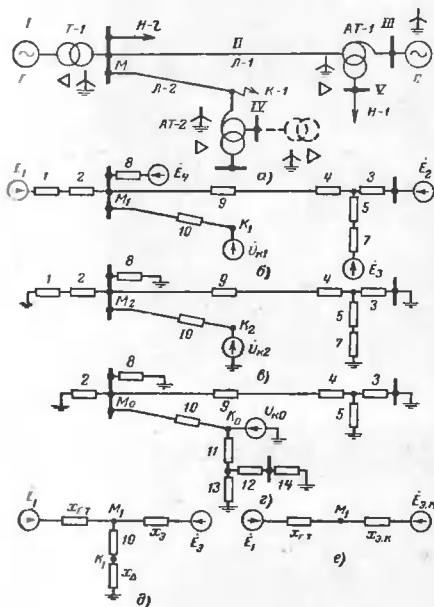


Рис. 6-58. К задаче 6-54.

а — исходная схема; б, в и г — схемы прямой последовательности; в — схема обратной последовательности; е — схема нулевой последовательности.

Используя полученную в решении задачи 5-15 преобразованную схему прямой последовательности (рис. 5-9,з), для рассматриваемых условий имеем схему на рис. 6-58, д, реактивности которой:

$$x_{г,г} = 0,415 \text{ для } t = 0 \text{ и } x_{г,г} = 1,815 \text{ для } t = \infty;$$

$$x_0 = 0,32 \text{ и э. д. с. } \dot{E}_0 = 0,855,$$

Дальнейшее объединение ветви короткого замыкания с ветвью системы приводит к элементарной схеме на рис. 6-58,е, где

$$x_{0,н} = 0,32 // (0,152 + 0,148) = 0,155$$

и

$$\dot{E}_{р,н} = \frac{0,855 \cdot (0,152 + 0,148)}{0,32 + 0,152 + 0,148} = 0,414.$$

Относительная величина максимальной мощности, которая может быть передана в рассматриваемом аварийном режиме, составляет:

$$P'_{\text{макс}} = \frac{E'_0 E_{р,н}}{x'_{г,г} + x_{0,н}} = \frac{1,19 \cdot 0,414}{0,415 + 0,155} = 0,865.$$

Отношение

$$T = \frac{P_0}{P'_{\text{макс}}} = \frac{0,85}{0,865} = 0,98,$$

и расчетное время

$$\tau = t \sqrt{\frac{\omega}{T} P'_{\text{макс}}} = t \sqrt{\frac{314}{6} \cdot 0,865} = 6,73t.$$

По соответствующей кривой на рис. П-10,а (для $\sin \delta'_0 = 0,6$ и $T = 0,98$) находим зависимость $\delta' = f(\tau)$, а затем $\delta' = \psi(t)$. Последняя представлена кривой на рис. 6-59. Ее характер показывает, что при сохранении таких условий генератор выпадает из синхронизма с системой.

Найдем, как и в решении задачи 5-15, закономерность изменения во времени переходной э. д. с. генератора, используя для этого численное интегрирование дифференциальных уравнений. При интервале $\Delta t = 0,1$ сек и постоянной времени

$$T'_d = 7 \frac{0,415 + 0,155}{1,815 + 0,155} = 2,02 \text{ сек}$$

приравняем

$$\begin{aligned} \Delta E'_q &= \frac{\Delta t}{T'_d} \left(E_{\text{вр}} \frac{x'_{г,г}}{x_{г,г}} + \frac{x_d - x'_d}{x_{г,г}} E_{0,н} \cos \delta' - E'_q \right) = \\ &= \frac{0,1}{2,02} \left(4,56 \frac{0,57}{1,97} + \frac{1,7 - 0,3}{1,97} \cdot 0,414 \cos \delta' - E'_q \right) = \\ &= 0,0495 (1,32 + 0,294 \cos \delta' - E'_q). \end{aligned}$$

Результат произведенного подсчета по этому выражению представлен соответствующей кривой на рис. 6-59. Как видно, изменение этой э. д. с. весьма незначительно.

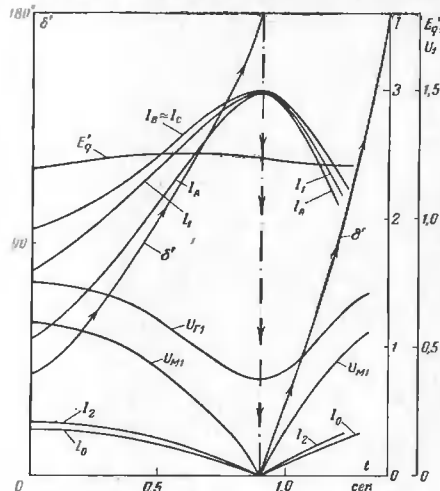


Рис. 6-59. К задаче 6-54. Кривые изменения угла δ' , э. д. с. E'_q , токов $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$, напряжений U_{M1} и U_{T1} во времени при двухфазном коротком замыкании на землю в точке К-1.

Для прямой последовательности фазы А будет:

$$I_{A1} = \frac{E' \angle \delta' - 0,414}{j0,57};$$

по модулю этого тока

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{0,57} \sqrt{E'^2 + 0,414^2 - 2 \cdot 0,414 E' \cos \delta'} = \\ &= 1,75 \sqrt{E'^2 + 0,17 - 0,828 E' \cos \delta'}. \end{aligned}$$

Напряженье прямой последовательности узла М

$$U'_{M11} = E' \angle \delta' - \frac{E' \angle \delta' - 0,414}{j0,57} j0,415 = 0,274 E' \angle \delta' + 0,3;$$

его модуль

$$U_{M1} = 0,3\sqrt{0,84E'^2 + 1 + 1,83E' \cos \delta'}.$$

Симметричные составляющие тока в месте короткого:

$$I_{\kappa A1} = \frac{\dot{U}_{MA1}}{j(x_{10} + x_{\Delta}^{(1,1)})} = \frac{0,27AE' \angle \delta' + 0,3}{j(0,152 + 0,148)} = -j(0,915E' \angle \delta' + 1);$$

$$I_{\kappa A2} = -\frac{x_{0C}}{x_{2E} + x_{0C}} I_{\kappa A1} = -\frac{0,291}{0,302 + 0,291} I_{\kappa A1} = -0,49 I_{\kappa A1};$$

$$I_{10} = -(1 - 0,49) I_{\kappa A1} = -0,51 I_{\kappa A1}.$$

Распределив ток $I_{\kappa A2}$ и I_{10} в схемах одноименных последовательностей, найдем симметричные составляющие токов в трансформаторе $T-I$:

$$I_{A2} = -0,207 I_{\kappa A1};$$

$$I_{10} = -0,184 I_{\kappa A1}.$$

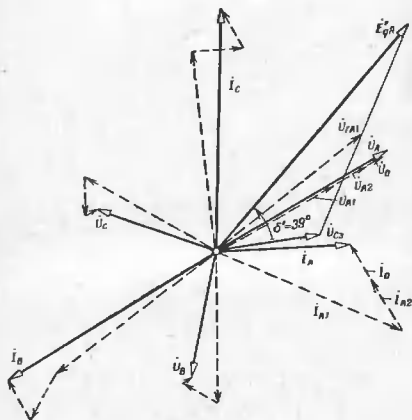


Рис. 6-60. К задаче 6-54. Векторная диаграмма токов для начального момента двухфазного короткого замыкания на землю.

Для модулей симметричных составляющих токов в трансформаторе $T-I$ имеем:

$$I_1 = \sqrt{0,84E'^2 + 1 + 1,83E' \cos \delta'};$$

$$I_2 = 0,207 I_1 \text{ и } I_0 = 0,184 I_1.$$

Изменение во времени этих составляющих токов представлено на рис. 6-59 соответствующими кривыми. Там же приведены кривые изменения напряжений прямой последовательности в узле M и на выводах генератора. Как отмечалось ранее (см. задачу 5-15), точка M в схеме прямой последовательности оказывается (при заданных условиях параметра и условиях) электрическим центром. При $\delta = 180^\circ$, что имеет место через $0,8 \text{ сек}$, напряжение U_{M1} падает до нуля. Соответственно к этому моменту снижаются до нуля токи обратной и нулевой последовательностей. Ток прямой последовательности от генератора при этом, напротив, достигает наибольшей величины.

После сложения симметричных составляющих токов находим величину фазных токов. На рис. 6-60 также суммирование показано для начального момента короткого замыкания. Соответствующие кривые на рис. 6-59 иллюстрируют изменения модулей фазных токов трансформатора $T-I$ при рассматриваемом переходном процессе. Модули токов фаз B и C очень близки друг к другу, поэтому их изменение показано одной кривой. К моменту $t=0,8 \text{ сек}$ несимметричный ток исчезает, а затем вновь возрастает.

Задача 6-55

При исходных данных предыдущей задачи, считая, что в точке $A-I$ схемы на рис. 6-58,а произошло однофазное короткое замыкание, требуется определить модули фазных токов трансформатора $T-I$ на стороне высшего напряжения и генератора G , которые будут при наибольшем значении угла δ' в данных аварийных условиях. Считать, что соединение обмоток трансформатора $T-I$ $Y_0/\Delta-11$.

Задача 6-56

Для генератора $G-1$ и $G-2$ одинаковой мощности связаны в точке M элементарной схемы на рис. 6-61. В ветви с реактивностью x_{10} произошло двухфазное короткое замыкание. До возникновения короткого замыкания оба генератора работали на холостом ходу с номинальным напряжением; их АРВ отключены.

Требуется определить закономерности изменения периодической составляющей фазных токов в месте короткого замыкания и каждого генератора. Решение провести операторным методом без учета активных сопротивлений дуги статоров.

Элементы схемы характеризуются следующими данными: генератор $G-1$ $x_d = 1,4$, $x'_d = 0,2$, $x_2 = 0,25$, $T_{J0} = 7 \text{ сек}$; генератор $G-2$ $x_d = 1,0$, $x'_d = 0,4$, $x_2 = 0,45$, $T_{J0} = 5 \text{ сек}$. Истинные реактивности $x = 0,2$ и $x_H = 0,17$ выражены в относительных единицах при номинальных условиях генераторов.

Решение. Данная задача, как будет видно из дальнейшего, является равносильной задаче 5-19, решение которой может быть использовано.

Обратимся к комплексной схеме замещения для рассматриваемого случая, которая приведена на рис. 6-61. Результирующая реактивность схемы обратной последовательности составляет:

$$x_{22} = [0,25 // (0,45 + 0,2)] + 0,17 = 0,16 + 0,17 = 0,33.$$

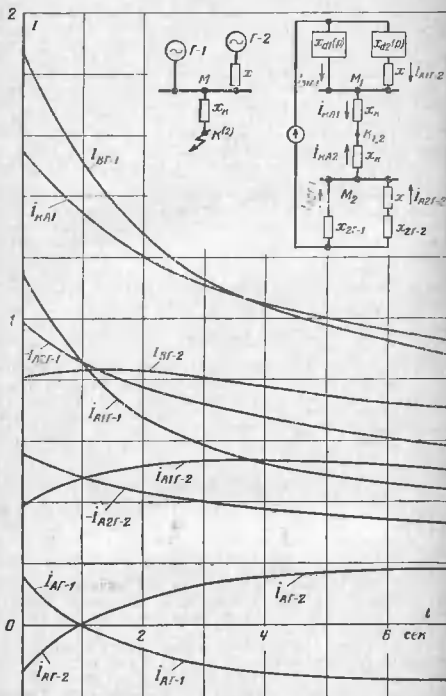


Рис. 6-61. К задаче 6-56. Исходная схема, комплексная схема и кривые изменения токов во времени при двухфазном коротком замыкании.

Общая реактивность внешней цепи, присоединенной к точке M_1 схемы прямой последовательности, составляет:

$$x_{11} = x_1 + x_{22} = 0,17 + 0,33 = 0,5.$$

Эта же величина, что и x_1 в схеме на рис. 5-14, где рассматривается трехфазное короткое замыкание за реактивностью x_1 .

Самостоятельно, все закономерности токов, которые найдены в решении задачи 5-19, являются в данном случае закономерностями токов прямой последовательности¹. Чтобы получить изменение периодической составляющей тока поврежденных фаз в месте короткого замыкания, достаточно найденное в решении задачи 5-19 выражение для тока I_n увеличить в $\sqrt{3}$ раз, т. е.

$$I_n^{(2)} = \sqrt{3} (0,873 + 0,479e^{-0,282t} + 0,188e^{-0,587t}) = 1,51 + 0,83e^{-0,282t} + 0,326e^{-0,587t}.$$

Коэффициенты распределения тока обратной последовательности составляют:

$$C_{\Gamma-1} = \frac{0,16}{0,25} = 0,64 \text{ и } C_{\Gamma-2} = 1 - 0,64 = 0,36.$$

При этом токи неповрежденной фазы A обратной последовательности каждого генератора будут:

$$I_{A1-1} = C_{\Gamma-1} I_n^{(2)} = -0,64 (0,873 + 0,479e^{-0,282t} + 0,188e^{-0,587t}) = -0,557 - 0,307e^{-0,282t} - 0,12e^{-0,587t};$$

$$I_{A1-2} = C_{\Gamma-2} I_n^{(2)} = -0,316 - 0,172e^{-0,282t} - 0,068e^{-0,587t}.$$

Выражения для токов неповрежденной фазы генераторов теперь можно получить, прибавив к найденным в решении задачи 5-19 выражениям для токов прямой последовательности полученные выражения для токов обратной последовательности, т. е.

$$I_{A1-1} = I_{A1-1} + I_{A1-2} = 0,403 + 0,222e^{-0,282t} + 0,528e^{-0,587t} - 0,557 - 0,307e^{-0,282t} - 0,12e^{-0,587t} =$$

$$I_{A1-2} = -I_{A1-1} = 0,154 + 0,085e^{-0,282t} - 0,408e^{-0,587t}.$$

Модуль тока поврежденных фаз для каждого момента времени находят определять из общезвестного соотношения метода симметричных составляющих

$$I_B = |a^2 I_{A1} + a I_{A2}|.$$

Результаты произведенных подсчетов изменения во времени симметричных составляющих токов и фазных токов представлены

¹ Упрощается учет лишь основной гармоники тока.

соответствующими кривыми на рис. 6-61. Интересно отметить, что ток неповрежденной фазы генераторов с течением времени меняет знак, а токи поврежденных фаз генератора Г-2 изменяются в очень небольшом диапазоне; напротив, токи поврежденных фаз генератора Г-1 затухают интенсивно.

Глава седьмая

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ОДНОКРАТНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИИ

Ограничиваясь учетом основной гармоники, ток прямой последовательности при однократной продольной несимметрии можно в соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности определять как ток симметричного трехфазного режима в схеме, где несимметричный участок заменен симметричной цепью, величина сопротивлений которой определяется в зависимости от вида продольной несимметрии сопротивлениями как самого несимметричного участка, так и схем обратной и нулевой последовательностей относительной места несимметрии. Непосредственно из комплексной схемы замещения для рассматриваемого случая однократной продольной несимметрии могут быть получены величины токов и напряжений всех последовательностей в произвольных ветвях и точках схемы.

Следует подчеркнуть, что при продольной несимметрии циркуляция токов отдельных последовательностей может отличаться от той, которая имеет место при поперечной несимметрии. Так, например, при продольной несимметрии возможна циркуляция токов нулевой последовательности даже при отсутствии заземленных нейтралей. Поэтому результирующие сопротивления схем отдельных последовательностей относительно какой-либо точки при продольной несимметрии в ней совершенно отличны от соответствующих результирующих сопротивлений при поперечной несимметрии в той же точке.

В приведенных в данной главе задачах рассмотрены наиболее типовые и характерные случаи продольной однократной несимметрии, которые встречаются на практике. Обычно возникновение однократной продольной несимметрии не сопровождается столь резким изменением параметров схемы, как это почти всегда имеет место

при возникновении поперечной несимметрии (например, несимметричных коротких замыканий). Поэтому здесь часто можно на предшествующий ток прямой последовательности (т. е. ток нормального предшествующего режима) накладывать токи обратной и нулевой последовательностей, определяемые из граничных условий возникшей несимметрии (см. задачи 7-5 и 7-6). Существенное влияние на величины токов при продольной несимметрии может оказывать угловой сдвиг между э. д. с. источников питания (задачи 7-1—7-3).

Частным случаем продольной несимметрии является работа линии передачи по системе два провода—земля (ДПЗ). В задачах 7-7—7-9 рассмотрены такие условия работы линии.

К продольной несимметрии относятся также случаи неправильной фазировки или ошибочного соединения обмоток трансформаторов и машин. Несколько таких случаев разобрано в задачах 7-10—7-13.

Собственно переходный процесс в синхронном генераторе при различных комбинациях возникновения продольной несимметрии рассмотрен в двух последних задачах (7-14 и 7-15) этой главы. Для упрощения здесь принят генератор без демпферных контуров.

Задача 7-1

Блок, состоящий из генератора Г, трансформатора Т, двухцепной линии передачи Л и автотрансформатора АТ, присоединен к узлу мощной системы С (рис. 7-1а). Напряжение в этом узле поддерживается практически неизменным и равным 510 кВ.

Данные элементов схемы следующие:

генератор Г 176,5 Мва, $\cos \varphi = 0,85$, 18 в, $x'_d = 0,31$, $x_d = 0,255$;
 трансформатор Т 160 Мва, 242/18 кВ, $u_k = 12\%$, $Y_0/\Delta-11$;
 автотрансформатор АТ 200 Мва 525/220/10,5 кВ,

$$u_{BC} = 10\%, a_{BH} = 24\%, u_{CH} = 12\%, Y_0/\Delta-11;$$

линия Л 145 км, $x_1 = 0,425$ ом/км одной цепи; $x_0 = 1,31$ ом/км одной цепи без учета влияния другой цепи; $x_{0-11} = 0,61$ ом/км.

Нейтраль трансформатора, автотрансформатора и системы замкнута на землю.

Генератор работает с номинальной нагрузкой.

Требуется построить векторные диаграммы токов обмотки высшего напряжения трансформатора Т, а также обмотки цепей линии передачи для случаев, когда произошло отключение:

а) одной фазы выключателя В-1 (цепи Л);

б) двух фаз выключателя В-1.

Построение произвести при наибольшем значении угла δ' между э. д. с. E'_d и напряжением системы U_0 , которого достигает этот угол

при качаниях, возникающих от указанных отключений. Изменением величины э. д. с. E' , как и активными сопротивлениями цепи, можно пренебречь.

Решение. Решение проведем в относительных единицах, выбрав за базисные условия $S_B = 176,5 \text{ Мва}$, $U_{B1} = 18 \text{ кВ}$; тогда соответственно

$$U_{B11} = 18 \cdot \frac{242}{18} = 242 \text{ кВ} \text{ и } U_{B111} = 242 \cdot \frac{525}{220} = 577,5 \text{ кВ.}$$

Комплексные схемы замещения для случаев обрыва одной фазы и двух фаз представлены соответственно на рис. 7-1, б и в. Зна-

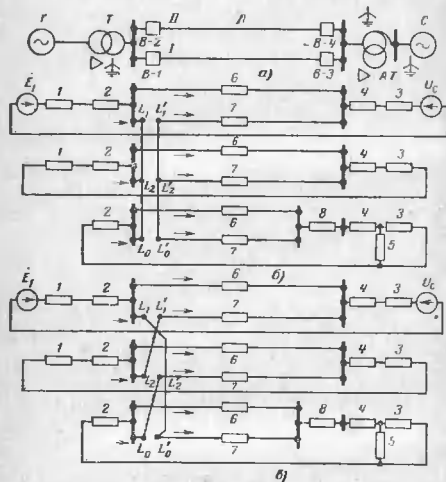


Рис. 7-1. К задаче 7-1.

а — исходная схема; б — комплексная схема при обрыве одной фазы цепи I; в — то же при обрыве двух фаз цепи I.

чения реактивностей их элементов, выраженные в относительных единицах при базисных условиях, составляют:

в схеме прямой последовательности $x_1 = 0,31$; $x_2 = 0,132$; $x_3 = 0,08$; $x_4 = -0,007$; $x_6 = x_7 = 0,185$;

в схеме обратной последовательности

$x_1 = 0,255$; все остальные — те же, что в схеме прямой последовательности;

390

в схеме нулевой последовательности

$x_1, x_3 \text{ и } x_4$ — те же, что выше; $x_5 = 0,095$; $x_6 = x_7 = 0,3$; $x_8 = 0,27$.

В схему прямой последовательности генератор введен своей декомпозированной реактивностью; его начальная переходная э. д. с. составляет:

$$E'_0 \approx \sqrt{(U_n \cos \varphi_0)^2 + (U_n \sin \varphi_0 + I_{sk} x'_d)^2} = \\ = \sqrt{1 \cdot 0,85^2 + (1 \cdot 0,53 + 1 \cdot 0,31)^2} = 1,2.$$

Суммарная реактивность схемы в нормальном режиме (т. е. при симметричных точках L_1 и L'_1)

$$x_x = 0,31 + 0,132 + \frac{0,185}{2} + 0,08 - 0,007 \approx 0,61.$$

Напряжение системы в относительных базисных единицах

$$U_c = \frac{510}{577,5} = 0,88,$$

а сдвиг относительно тока составляет:

$$\arctg \frac{0,53 + 0,31 - 0,61}{0,85} = \arctg 0,27 = 15^\circ.$$

Сдвиг тока относительно E'_0

$$\arctg \frac{0,53 + 0,31}{0,85} = \arctg 1 = 45^\circ.$$

Следовательно, начальный сдвиг между E'_0 и U_c составляет:

$$\delta'_0 = 45 - 15 = 30^\circ, \text{ при котором } \sin 30^\circ = 0,5.$$

а) Отключение одной фазы выключателем B-1

Результирующая реактивность схемы обратной последовательности относительно точек L_2 и L'_2 составляет:

$$x_{L2} = [(0,255 + 0,132 + 0,08 - 0,007)/0,185] + 0,185 = \\ = 0,132 + 0,185 = 0,317;$$

а для схемы нулевой последовательности относительно точек L_3 и L'_3

$$x_{L3} = [(0,08/0,095) - 0,007 + 0,27 + 0,132]/0,3 + 0,3 = \\ = 0,178 + 0,3 = 0,478.$$

При обрыве одной фазы цепи I дополнительная реактивность, введенная между точками L_1 и L'_1 схемы прямой последовательности будет:

$$x_{L1}^{(1)} = 0,317/0,478 = 0,19.$$

Соответственно результирующая реактивность для определения тока прямой последовательности составляет:

$$x_{\Sigma}^{(1)} = 0,31 + 0,132 + (0,185 + 0,19)/0,185 = 0,007 + 0,08 = 0,641$$

(вместо 0,61 в нормальном полнофазном режиме).

Максимальная активная мощность, которую можно передавать в рассматриваемом неполнофазном режиме, составляет:

$$P_{\text{макс}} = \frac{1,2 \cdot 0,88}{0,641} = 1,65.$$

Следовательно, $T = 0,85/1,65 = 0,515$, для которого по рис. П-10,6 видно, что максимальное значение угла δ' не превышает приблизительно $31,5^\circ$. При этом падение напряжения прямой последовательности во всем блоке будет:

$$\Delta U_1 = \sqrt{1,2^2 + 0,88^2} - 2 \cdot 1,2 \cdot 0,88 \cos 31,5^\circ = 0,645,$$

и ток прямой последовательности генератора (или трансформатора)

$$I_1 = \frac{0,645}{0,641} \approx 1,$$

т. е. он практически не изменился.

Произведя распределение токов в комплексной схеме (рис. 7-1,б), найдем значения симметричных составляющих токов фазы А (т. е. фазы, находящейся в особых условиях):

в цепи I линии

$$I_1 = 0,33; I_2 = -0,2; I_0 = -0,13;$$

в цепи II линии

$$I_1 = 0,67; I_2 = 0,143; I_0 = 0,077;$$

в трансформаторе (на стороне высшего напряжения)

$$I_1 = 1; I_2 = -0,057; I_0 = -0,053.$$

Построение по этим составляющим векторные диаграммы приведены на рис. 7-2,а. Легко убедиться, что токи фазы А трансформатора и цепи II линии одинаковы, так как в цепи I линии эта фаза имеет разрыв.

б) Отключение двух фаз выключателя В-1

В соответствии с комплексной схемой на рис. 7-1,б дополнительное сопротивление, вводимое в схему прямой последовательности между точками L_1 и L_1' , составляет:

$$x_{\Sigma}^{(2)} = 0,317 + 0,478 = 0,795;$$

при этом результирующая реактивность для определения тока прямой последовательности будет:

$$x_{\Sigma}^{(2)} = 0,31 + 0,132 + [(0,795 + 0,185)/0,185] = 0,007 + 0,08 = 0,673.$$

Аналогично предыдущему находим:

$$P_{\text{макс}} = \frac{1,2 \cdot 0,88}{0,673} = 1,57;$$

$T = 0,85/1,57 = 1,54$, для которого по кривым на рис. П-10,6 имеем:

$$\delta'_{\text{макс}} = 36^\circ.$$

При таком значении угла δ' падение напряжения прямой последовательности в блоке будет $\Delta U = 0,711$ в, следовательно, ток пря-

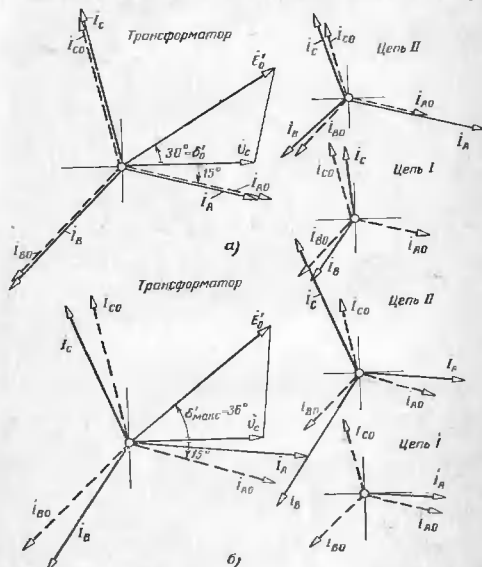


Рис. 7-2. К задаче 7-1. Векторные диаграммы токов.
а — при отрыве одной фазы цепи I; б — при отрыве двух фаз цепи I.

мой последовательности генератора (или трансформатора) будет:

$$I_1 = \frac{0,711}{0,673} = 1,06.$$

Проведя распределение токов в схеме на рис. 7-1,в, найдем симметричные составляющие токов фазы *A* (считая ее особой фазой):

$$\text{в цепи I линии } I_1 = I_2 = I_0 = 0,17;$$

$$\text{в цепи II линии } I_1 = 0,89; I_2 = -0,12; I_0 = -0,1;$$

в трансформаторе (на стороне высшего напряжения)

$$I_1 = 1,06; I_2 = 0,05; I_0 = 0,07.$$

По этим составляющим построены векторные диаграммы, которые приведены на рис. 7-2,б.

Задача 7-2

В блоке, схема которого приведена на рис. 7-1,а, цепь II линии передачи отключена с обоих концов, но не заземлена. Генератор *G* несет нагрузку 125 Мвт при $\cos \varphi = 0,89$. Напряжение системы *C* поддерживается практически неизменным и равным 510 кВ. Параметры всех элементов схемы те же, что и в предыдущей задаче.

При указанных условиях произошел обрыв одной фазы цепи I линии передачи. Требуется определить наибольшие величины периодической слагающей фазных токов трансформатора и генератора, выразив их в кратностях номинальных токов. Рассмотреть только переходный процесс (т. е. без учета свободных сверхпереходных слагающих), считая, что переходный э. д. с. сохраняет свое предшествующее значение неизменным.

Решение. Для решения используем комплексную схему замещения (рис. 7-1,б), в которой следует только разомкнуть цепь элемента *B* в схемах каждой последовательности. При этом результирующая реактивности схем обратной и нулевой последовательностей будет:

$$x_{12\Sigma} = 0,645 \text{ и } x_{L0\Sigma} = 0,739$$

и дополнительная реактивность, вводимая в схему прямой последовательности,

$$x_{Ld}^{(1)} = 0,645 / 0,739 = 0,344.$$

Результирующая реактивность схемы в нормальном (полнофазном) режиме

$$x_{\Sigma} = 0,31 + 0,132 + 0,185 + 0,08 - 0,007 \approx 0,7$$

и при обрыве одной фазы

$$x_{\Sigma}^{(1)} = 0,7 + 0,344 = 1,044.$$

(относительная величина предшествовавшего тока составляет:

$$I = \frac{125}{0,89 \cdot 176,5} = 0,8.$$

Аналогично предыдущему нетрудно установить, что предшествующие значения соответственно будут:

$$E'_0 = 1,045; \delta'_0 = 32,5^\circ, \text{ при котором } \sin \delta'_0 = 0,54.$$

$$\text{Далее, при } P_0 = 125/176,5 = 0,71; P'_{\max} = \frac{1,045 \cdot 0,88}{1,044} = 0,88$$

отношение $T = 0,71/0,88 = 0,805$, для которого, используя кривые на рис. П-10,б и σ , находим, что угол δ' достигает максимального значения

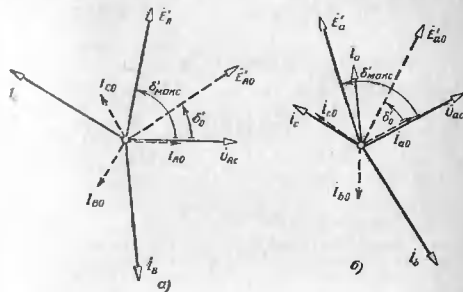


Рис. 7-3. К задаче 7-2. Векторные диаграммы токов.

а — трансформатора на стороне высшего напряжения; б — генератора при обрыве фазы *A* линии и максимальном значении угла.

чenni примерно 80° . Соответственно этому наибольшее значение фазы *A* линии и максимального значения угла.

$$\Delta U_1 = \sqrt{1,045^2 + 0,88^2} - 2 \cdot 1,045 \cdot 0,88 \cos 80^\circ = 1,25$$

и наибольшие значения симметричных составляющих токов фазы *A*:

$$I_{A1} = \frac{1,25}{1,044} = 1,19; I_{A2} = -1,19 \cdot \frac{0,344}{0,645} = -0,64 \text{ и } I_0 = -0,55.$$

По этим составляющим построена векторная диаграмма токов трансформатора на стороне высшего напряжения (рис. 7-3,а);

модуль токов фаз В и С в относительных базисных единицах составляет:

$$I_B = I_C = 1,79$$

и по отношению к номинальному току трансформатора:

$$I_B = I_C = 1,79 \cdot \frac{176,5}{160} = 1,97.$$

Векторная диаграмма токов генератора приведена на рис. 7-3,б. При ее построении учтена заданная группа соединения обмоток трансформатора (Y_г/Δ-11). Наибольший ток имеет место в фазе В, и его модуль составляет $I_b = 1,83$ (он выражен в относительных базисных единицах, которые совпадают с номинальными генератора).

На диаграммах рис. 7-3 для ориентировки показаны векторы фазы А (и соответственно а) напряжения системы, предшествующей переходной з. д. с. и той же з. д. с. при наибольшем значении угла δ.

Задача 7-3

Оценить, насколько (в процентах) изменится наибольшая величина фазного тока генератора в задаче 7-2, если поочередно внести следующие изменения в исходные условия:

- отключенную цепь II линии считать замкнутой с обоих концов (обрыв фазы в цепи I линии);
- считать, что обрыв фазы произошел в цепи генераторного напряжения (т. е. между генератором и трансформатором).

Задача 7-4

Для блока, представленного на рис. 7-1,а, требуется сравнить условия его несинхронного включения, считая, что последние производятся при отключенной одной цепи линии одновременным включением:

- трех фаз другой цепи линии;
- двух фаз другой цепи линии;
- одной фазы другой цепи линии.

Сравнение произвести по наибольшим возможным величинам сверхпереходного тока генератора, имея в виду, что его сверхпереходная реактивность $x''_d = 0,21$.

Решение. Используем реактивности элементов схемы, которые подсчитаны в решении задачи 7-1. Они выражены в относительных единицах при номинальных условиях генератора.

Результирующие реактивности схем отдельных последовательностей для рассматриваемых условий будут:

$$x_{I,II} = 0,21 + 0,132 + 0,185 - 0,007 + 0,08 = 0,6;$$

$$x_{I,III} = 0,255 + 0,132 + 0,185 - 0,007 + 0,08 = 0,645;$$

$$x_{I,IV} = 0,132 + 0,3 + 0,27 - 0,007 + (0,08/0,095) = 0,74.$$

Считаем, что при включении напряжение генератора по величине такое же, как и напряжение системы, которое в относительных

единицах составляет $U_c = 0,88$. Наиболее тяжелые условия несинхронного включения по току имеют место, когда напряжения включения всех питающих находятся в противофазе. Произведем подсчет для каждого из поставленных условий несинхронного включения генератора.

а) Включение трех фаз цепи линии

Наибольшая величина сверхпереходного тока генератора при этом будет:

$$I''^{(3)} = \frac{2 \cdot 0,88}{0,6} = 2,93.$$

б) Включение двух фаз цепи линии

Дополнительная реактивность, вводимая в схему прямой последовательности, будет:

$$x_d = 0,645/0,74 = 0,345.$$

Значения составляющих прямой и обратной последовательностей наибольшего сверхпереходного тока будут:

$$I_1''^{(2)} = \frac{2 \cdot 0,88}{0,6 + 0,345} = 1,85;$$

$$I_2''^{(2)} = 1,86 \frac{0,345}{0,645} = 1.$$

В одной из фаз генератора эти составляющие совпадают по направлению (вместе в виду переход через трансформатор с соединением обмоток Y/Δ), и, следовательно, величина тока в этой фазе будет:

$$I''^{(2)} = 1,86 + 1 = 2,86.$$

в) Включение одной фазы цепи линии

В данном случае дополнительная реактивность составляет:

$$x_d = 0,645 + 0,74 = 1,385.$$

Составляющие прямой и обратной последовательностей наибольшего сверхпереходного тока будут:

$$I_1''^{(1)} = I_2''^{(1)} = \frac{2 \cdot 0,88}{0,6 + 1,385} = 0,89.$$

В двух фазах генератора эти составляющие тока сдвинуты друг относительно друга на 60°, и, следовательно, величина наибольшего сверхпереходного тока в этих фазах генератора будет:

$$I''^{(1)} = \sqrt{3} \cdot 0,89 = 1,54.$$

Таким образом, соотношения между наибольшими величинами сверхпереходного тока при сравнимых условиях несинхронного выключения генератора получаются следующими:

$$I''(0):I''(3):I''(\infty) = 2,93:2,86:1,54 = 1:0,98:0,53.$$

Как видно, условия выключения трех и двух фаз по току практически равноценны. При включении же одной фазы ток почти в 2 раза меньше, чем при включении трех или двух фаз.

Задача 7-5

К шинам распределительного устройства 10 кВ присоединен линейный реактор РВ-10-600-5, к которому через два кабеля марки АСБ-3Х240 протяженностью каждый 2 км присоединена нагрузка Π

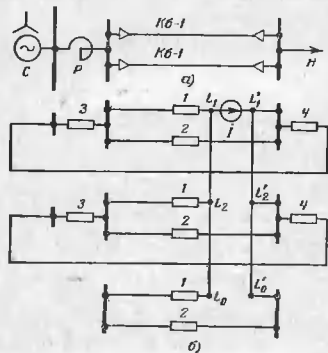


Рис. 7-4. К задаче 7-5.

а — исходная схема; б — комплексная схема замещения.

мощностью 8,5 Мва при $\cos \varphi = 0,87$ (рис. 7-4,а). Кабель характеризуется следующими параметрами:

индуктивные сопротивления $x_1 = 0,07$ Ом/км, $x_0 = 0,315$ Ом/км; активные сопротивления $r_1 = 0,13$ Ом/км, $r_0 = 0,3$ Ом/км. Определить величины токов обратной и нулевой последовательностей в кабелях для случая обрыва фазы в одном из этих кабелей.

Решение. Проводим решение в амперных единицах, учитывая индуктивные и активные составляющие сопротивлений элементов.

Используем принцип наложения, для чего в комплексную схему для заданных условий (рис. 7-4,б) введем источник тока с $I =$

$$= \frac{8600}{\sqrt{3} \cdot 10} = -295 \text{ а (равным по величине и противоположным}$$

для направленно предшествовавшему нагрузочному току кабеля) и включим в д. с. источник питания, считая его бесконечно большой мощности, т. е. его сопротивление равным нулю.

Составления элементов схемы на рис. 7-4,б составляет: прямой последовательности

$$Z_1 = Z_2 = 2(0,13 + j0,07) = 0,26 + j0,14 \text{ Ом;}$$

$$Z_3 = j0,05 \cdot \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,6} = j0,48 \text{ Ом (принимая } r_0 \approx 0);$$

$$Z_4 = (0,87 + j0,5) \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,49} = 10,3 + j5,9 \text{ Ом;}$$

обратной последовательности элементов 1, 2 и 3 сохраняются те же значения, что и в прямой последовательности. Что касается сопротивления нагрузочной ветви, то в первом приближении его можно оценить как

$$Z_4 = (10,3 + j5,9) \frac{0,35}{1,2} = 3 + j1,72 \text{ Ом;}$$

нулевой последовательности —

$$Z_1 = Z_2 = 2(0,3 + j0,315) = 0,6 + j0,63 \text{ Ом.}$$

Исходные элементы в схеме нулевой последовательности не участвуют.

Получено видеть, что результирующие сопротивления прямой и обратной последовательностей в основном определяются суммой сопротивлений элементов 1 и 2, так как шунтирующее влияние последовательно соединенных элементов 3 и 4 очень мало и им можно пренебречь. Поэтому имеем:

$$Z_{L1\Sigma} = Z_{L2\Sigma} = 2(0,26 + j0,14) = 0,59 \angle 28,5^\circ \text{ Ом;}$$

$$Z_{L0\Sigma} = 2(0,6 + j0,63) = 1,74 \angle 46,5^\circ \text{ Ом.}$$

Результирующее сопротивление комплексной схемы относительно источника тока составляет:

$$Z_{L\Sigma} = \frac{0,59 \angle 28,5^\circ}{2} // 1,74 \angle 46,5^\circ = 0,254 \angle 31^\circ \text{ Ом.}$$

Искомые токи обратной и нулевой последовательностей будут:

$$I_2 = -295 \frac{0,254 \angle 31^\circ}{0,59 \angle 28,5^\circ} = -127 \angle 2,5^\circ \text{ а;}$$

$$I_0 = -295 \frac{0,254 \angle 31^\circ}{1,74 \angle 46,5^\circ} = -43 \angle -15,5^\circ \text{ а.}$$

зная которые теперь имеем:

$$x_{\Delta}^{(ДПЗ)} = \left[(x_{MVI} / x_{2MVI}) + \frac{x'_{\Delta}}{3} \left(2 + \frac{x'_{\Delta}}{x''_{\Delta}} \right) \right] // x_{MVI} = \\ = \left[(30,6 / 128) + \frac{80,2}{2} \left(2 + \frac{80,2}{5,8} \right) \right] // 30,6 = 28,6 \text{ Ом.}$$

Суммарная реактивность для определения тока прямой последовательности за пределами линии ДПЗ составляет:

$$x_{\Sigma} = 130 + 22,2 + 28,6 + 36,3 = 217,1 \text{ Ом.}$$

Приведенная э. д. с. генераторов (пренебрегаем различием между x_d и x_q) будет:

$$E_d = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{105^2 + (250 \cdot 217,1)^2} = \frac{141}{\sqrt{3}} \text{ кВ.}$$

Если принять $\dot{U}_{Ac} = \frac{105}{\sqrt{3}}$, то $\dot{E}_{d0} = \frac{141}{\sqrt{3}} \angle 42^\circ$ (рис. 7-6,б).

Следует отметить, что при наличии всех фазных проводов линия суммарная реактивность составляет 219,1 Ом, т. е. больше всего лишь на 2 Ом, что составляет менее 1%. Поэтому токи прямой последовательности при нормальной работе линии и при работе по системе ДПЗ практически одинаковы. Правда, в последнем случае в генераторах будет ток обратной последовательности

$$I_{A2} = I_{A1} \frac{x_{MVI} - x_{\Delta}^{(ДПЗ)}}{x_{MVI} + x_{2MVI}} = 250 \cdot \frac{30,6 - 28,6}{30,6 + 128} = 3,2 \text{ а,}$$

который, как видно, составляет лишь 1,3% тока прямой последовательности.

Симметричные составляющие токов в линии ДПЗ будут:

$$I_{A1} = \frac{2 \cdot 250 - 3,2}{3} = 165,6 \text{ а; } I_{A2} = \frac{2 \cdot 3,2 - 250}{3} = -81,2 \text{ а;}$$

$$I_0 = -84,4 \text{ а.}$$

Фазные токи линии ДПЗ будут:

$$I_B = I_C = 250 \text{ а; } I_A = 0,$$

и ток в земле $I_3 = 3 \cdot 84,4 \approx 250 \text{ а.}$

Фазные напряжения прямой последовательности в точках М и N составляют:

$$\dot{U}_{AM1} = \frac{108,5}{\sqrt{3}} \angle 15^\circ \text{ и } \dot{U}_{AN1} \frac{106}{\sqrt{3}} \angle 8,5^\circ;$$

составляющие обратной последовательности ничтожно малы, и ими

можно пренебречь. Следовательно, составляющие нулевой последовательности нагрязнены будут:

$$\dot{U}_{M0} = -\dot{U}_{AM1} \text{ и } \dot{U}_{N0} = -\dot{U}_{AN1}$$

и фазные напряжения:

$$U_{BM} = U_{CN} = 108,5 \text{ кВ и } U_{BN} = U_{CM} = 106 \text{ кВ.}$$

Требуемые векторные диаграммы представлены на рис. 7-6,а.

Задача 7-8

Провести сравнение режима работы гидроэлектростанции схемы на рис. 7-6,а при использовании линии передачи по системе два провода — земля (ДПЗ), как это рассмотрено в решении предыдущей задачи, с режимом при отключенной фазе линии и сохранении глубокого заземления нейтральной обмотки 110 кВ трансформаторов Т-1 и Т-2.

Сопоставить величины фазных токов линии, токов в земле, фазных токов генераторов, считая, что передаваемая в систему мощность сохраняется той же, т. е. 46 Мвт при $\cos \varphi = 1$ за трансформатором Т-2, равно как и возбуждение (или э. д. с. E_d) генераторов гидроэлектростанции.

Задача 7-9

К узлу М мощной системы С, в котором напряжение поддерживается практически неизменным и равным 225 кВ, присоединен понижающий трехобмоточный трансформатор Т-1 40 Мва, 230/37/10,5 кВ, $u_{sc} = 12,3\%$, $i_{sc1} = 18,1\%$, $i_{sc2} = 5,8\%$, $Y_0/Y/\Delta$ -12,11 (рис. 7-7). От обмотки среднего напряжения по линии передачи два провода — земля (ДПЗ) протяженностью 12 км ($x_1 = 0,4 \text{ Ом/км}$, $x_0 = 1,45 \text{ Ом/км}$)

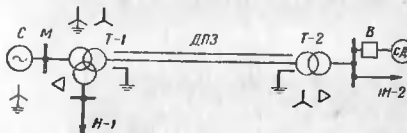


Рис. 7-7. К задаче 7-9. Исходная схема.

через понижающий трансформатор Т-2 15 Мва, 37/6,3 кВ, $u_n = 8\%$, Y/Δ -11 питаются обобщенная промышленная нагрузка Н-2 мощностью 10 Мва и синхронный двигатель СД 4000 кват, 6 кВ, $\cos \varphi = -0,9$, $\eta = 96,5\%$, $I_{sc} = 6$, $M_{sc} = 0,9$. От обмотки высшего напряжения трансформатора Т-1 питаются также обобщенная промышленная нагрузка Н-1 мощностью 20 Мва.

Требуется рассмотреть начальный момент непосредственного (т. е. безреакторного) пуска указанного синхронного двигателя, определить для этого величину периодической слагающей пускового

тома, величину пускового момента (в долях номинального пускового момента), величины фазных токов линии ДПЗ и тока в эсмле.

Для обобщенных нагрузок принимаем рекомендуемые средние значения их параметра (т. е. $E_{\text{ф}}^{\text{н}} = 0,85$ и $x_{\text{н}}^{\text{н}} = x_{2\text{н}} = 0,35$, считая их

отнесенными к среднему номинальному напряжению соответствующей ступени и их лод-ной рабочей мощности).

Задача 7-10

Станция связана с системой одной цепью (I) воздушной линией 110 кВ (рис. 7-8). Вторая цепь (II) этой линии находилась в ремонте, во время которого ошибочно нарушена фазировка данной цепи (поменяли местами фазы B и C).

Определить начальные значения периодической слагающей токов в обеих цепях линии, если при указанных условиях выключить выключатель B . Кроме того, сравнить эти токи с начальными токами в тех же цепях при двухфазном коротком замыкании на шинках 110 кВ станции, когда обе цепи линии выключены нормально.

Исходные данные к рассматриваемой схеме:

генератор G 117 Мва, 10,5 кВ, $x''_d = 0,2$, $x_2 = 0,22$, $E''_0 = 1,09$;
трансформатор T 120 Мва, 121/10,5 кВ, $u_n = 10,5\%$;

линии L 75 км, $x_1 = 0,4$ см/км одной цепи; система C $x_1 = x_2 = 15$ ом; за этой реактивностью в схеме прямой последовательности приложено неизменное напряжение 115 кВ.

Решение. После включения выключателя B напряжение точек M и N (рис. 7-8) одинаково, т. е.

$$\dot{U}_{MA} = \dot{U}_{NA}; \quad (a)$$

$$\dot{U}_{MB} = \dot{U}_{NC}; \quad (b)$$

$$\dot{U}_{MC} = \dot{U}_{NB}. \quad (в)$$

Составляющих нулевой последовательности в данном случае, очевидно, не будет. Поэтому в записи через симметричные составляющие фазы A имеем:

$$\dot{U}_{MA1} + \dot{U}_{MA2} = \dot{U}_{NA1} + \dot{U}_{NA2}; \quad (a')$$

$$a^2 \dot{U}_{MA1} + a \dot{U}_{MA2} = a \dot{U}_{NA1} + a^2 \dot{U}_{NA2}; \quad (b')$$

$$a \dot{U}_{MA1} + a^2 \dot{U}_{MA2} = a^2 \dot{U}_{NA1} + a \dot{U}_{NA2}. \quad (в')$$

После вычитания (в') из (б') и сокращения общего множителя (а'—а) получим:

$$\dot{U}_{MA1} - \dot{U}_{MA2} = -\dot{U}_{NA1} + \dot{U}_{NA2}. \quad (г)$$

Из (а') и (г) легко находим связь между симметричными составляющими напряжений в точках M и N :

$$\dot{U}_{MA1} = \dot{U}_{NA2}; \quad (д)$$

$$\dot{U}_{MA2} = \dot{U}_{NA1}. \quad (е)$$

Из этих соотношений, вообще говоря, вполне достаточно, чтобы найти фазоватриазовые условия несимметрии составить комплексную схему. В принципиальном виде она показана на рис. 7-9. Разумеет-

ся, в ней строго соблюдаются те же и соотношения между симметричными составляющими токов на участках M и N , чем нетрудно убедиться, используя граничные условия при фазных токах:

$$\dot{I}_{MA} + \dot{I}_{NA} = 0; \quad \dot{I}_{MB} + \dot{I}_{NC} = 0; \quad \dot{I}_{MC} + \dot{I}_{NB} = 0,$$

причем запись которых выполняется, что за положительные направления токов приняты направления к выключателю B с каждой его стороны.

На рис. 7-10,а показаны схемы замещения прямой и обратной последовательностей, объединенные в комплексную схему, где реактивности (im) элементов и э. д. с. (K_0) приведены к ступени напряжения, на которой находится линия передачи. Нахождение токов и напряжений в этой схеме является трудным. Их значения (соответственно в килоамперах и киловольт-амперах) указаны на соответствующих схемах, и по ним построены векторные диаграммы (рис. 7-10,б).

Полученные векторные диаграммы, как видно, имеют тот же характер, что и при двухфазном коротком замыкании. Обращает на себя внимание резкое различие токов в фазах B и C обеих цепей линии. Так, в цепи II $I_{B-C} = 1,58$ кА, в то время как в цепи I $I_{B-C} = 0,35$ кА. Это различие обусловлено участием станции. Если отделить от схемы на рис. 7-10,а легко установить, что если выключить станцию или вместо нее присоединить элемент, уравновешенный в схемах прямой и обратной последовательностей одинаково (например, статическая нагрузка), то условия включения несимметричной цепи линии были бы тождественны обычному двухфазному короткому замыканию у выключателя B . При этом токи в обеих цепях линии были бы одинаковы.

Принципиальный расчет двухфазного короткого замыкания (соответственно условию задачи) указывает, что в каждой цепи линии ток $I_{B-C} = I_c = 0,975$ кА, т. е. он существенно отличается от ранее найденных токов при включении несимметричной цепи линии. Что касается величин токов фазы A обеих цепей линии, то они при сравнительно равных условиях практически одинаковы (порядка 0,08 кА).

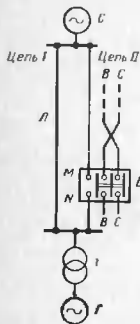


Рис. 7-8. Схема к задаче 7-10.

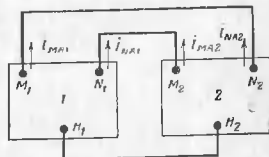


Рис. 7-9. К задаче 7-10. Комплексная схема при включении несбалансированного участка системы.

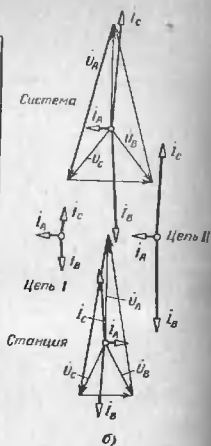
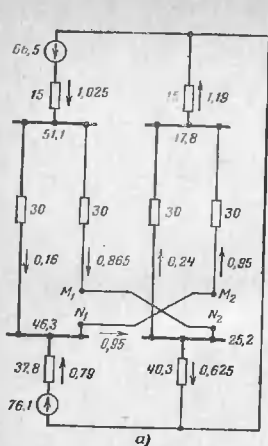


Рис. 7-10. К задаче 7-10.

а — комплексная схема; б — векторные диаграммы токов и напряжений.

Задача 7-11

Провести решение предыдущей задачи при условии, что вместо станции подключена обобщенная промышленная нагрузка мощностью 60 Мва относительная реактивность которой $x''_1 = x_2 = 0,35$ и относительная сверхпереходная э. д. с. $E''_0 = 0,85$ (от среднего номинального напряжения ступени, где присоединена нагрузка).

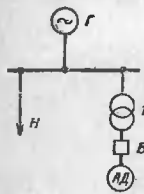


Рис. 7-11. Схема к задаче 7-12.

406

Задача 7-12

У трансформатора T схемы на рис. 7-11 в результате неправильного соединения обмоток вектор напряжения одной фазы на стороне пониженного напряжения повернут на 180° .

При включении в таких условиях асинхронного двигателя АД определить наибольшую величину пускового тока и развиваемого двигателем пускового момента. Построить векторные диаграммы токов и напряжений двигателя при рассматриваемых условиях.

Генератор G $8,0 \text{ Мва}$, $6,3 \text{ кв}$, $x''_1 = 0,12$, $x_2 = 0,18$; трансформатор T $2,4 \text{ Мва}$, $6,3/3,15 \text{ кв}$, $u_k = 5,5\%$; асинхронный двигатель АД $1,6 \text{ Мва}$, 3 кв , $I_{\text{взгн}} = 4,6$; нагрузка H $4,8 \text{ Мва}$, $x''_1 = x_2 = 0,35$, $E''_0 = 0,85$.
Решение. Пусть вектор напряжения фазы A за трансформатором T оказался повернутым на 180° . Тогда для системы напряжений на этом трансформаторе имеем:

$$\dot{U}_A = -U; \quad \dot{U}_B = a^2 U \quad \text{и} \quad \dot{U}_C = a U,$$

где U — абсолютная величина напряжения. Разложение этой системы напряжений на симметричные составляющие даст:

$$\dot{U}_{A1} = \frac{1}{3}(-1 + a^2 + a^2 a)U = \frac{1}{3}U;$$

$$\dot{U}_{A2} = \frac{1}{3}(-1 + a^2 a^2 + a)U = -\frac{2}{3}U;$$

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(-1 + a^2 + a)U = -\frac{2}{3}U.$$

Примем $S_6 = 8 \text{ Мва}$, $U_{61} = 6,3 \text{ кв}$, $U_{611} = 6,3 \cdot \frac{3,15}{6,3} = 3,15 \text{ кв}$.

Реактивности элементов при базисных условиях:

генератора $x''_1 = 0,15$ и $x_2 = 0,18$; нагрузки $x''_1 = x_2 = 0,35 \cdot \frac{8}{4,8} =$

$0,584$; трансформатора T $x = 0,055 \cdot \frac{8}{2,4} = 0,183$; двигателя AD $x_1 =$

$$x_2 = \frac{1}{4,6} \cdot \frac{8}{1,6} \left(\frac{3}{3,15}\right)^2 = 1.$$

Возбуждающая сила генератора

$$E'' = 1 + 0,15 \cdot \frac{4,8}{8} = 0,6 = 1,054$$

и $\cos \varphi = \sin \varphi$ и нагрузки $E'' = 0,85$.

Результирующая реактивности:

$$x_{1\Sigma} = (0,584/0,15) + 0,183 + 1 = 1,302;$$

$$x_{2\Sigma} = (0,584/0,18) + 0,183 + 1 = 1,321;$$

$$x_{0\Sigma} = \infty,$$

так как предполагается, что нет контура для тока нулевой последовательности.

Результирующая э. д. с. $E_\Sigma = 1,054/0,85 = 1,01$.

Симметричные составляющие пускового тока фазы A двигателя будут:

$$I_{A1} = \frac{1,01}{3 \cdot 1,302} = 0,26; \quad I_{A2} = -\frac{2 \cdot 1,01}{3 \cdot 1,321} = -0,51; \quad I_0 = 0.$$

Наибольшая величина пускового тока будет в двух других фазах, и она составит:

$$I_{\text{пуск}} = |a^2 \cdot 0,259 - a \cdot 0,51| = 0,68,$$

или, относив к номинальным условиям двигателя,

$$I_{\text{пуск}} = 0,68 \cdot \frac{8}{1,6} \cdot \frac{3}{3,15} = 3,24$$

(вместо $I_{\text{пуск,н}}$ = 4,6).

Симметричные составляющие напряжения фазы *A* двигателя:

$$\dot{U}_{A1} = j0,26; \dot{U}_{A2} = -j0,51; \dot{U}_0 = -j \frac{9}{3} \cdot 1,01 = -j0,673.$$

Развиваемый двигателем пусковой момент составит:

$$M_{\text{пуск}} = (0,26^2 - 0,51^2) M_{\text{пуск,н}} = -0,193 M_{\text{пуск,н}},$$

т. е. если начальный момент сопротивления приводимого механизма меньше этой величины, то двигатель начнет вращение, но в обратную сторону.

Требуемые векторные диаграммы токов и напряжений двигателя в начальный момент его включения приведены на рис. 7-12.

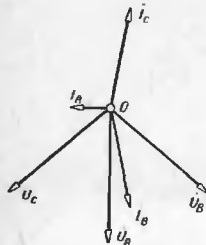


Рис. 7-12. Векторные диаграммы токов и напряжений к задаче 7-12.

Задача 7-13

Два одинаковых по параметрам генератора *G-1* и *G-2* (рис. 7-13а) вращаются с синхронной скоростью. Их возбуждение соответствует номинальному напряжению на холостом ходу. Выключатель *B* отключен.

Определить начальный сверхпереходный ток, который может возникнуть при включении выключателя *B*, если вследствие ошибочного соединения обмоток статора генератора *G-2* окажется:

- а) э. д. с. одной фазы повернута на 180° , т. е. у обмотки этой фазы перепутано начало с концом;
 б) э. д. с. двух фаз повернута на 180° .

Найденные токи сравнить с начальным сверхпереходным током при включении этих генераторов в противофазу, т. е. когда э. д. с. в каждой фазе взаимно противоположны.

Относительные реактивности генераторов: $x''_d = 0,27$ и $x_2 = 0,39$. Нейтралей генераторов изолированы.

Решение. Примем, что э. д. с. фазы *a* генератора *G-1* совпадает с осью положительных мнимых величин комплексной плоскости.

Э. д. с. генератора *G-1*

$$\dot{E}_a = -j1, \dot{E}_b = a^2 j1 \text{ и } \dot{E}_c = a j1.$$

При условии п. „а“ для генератора *G-2*, считая за особую фазу *a*, имеем:

$$\dot{E}_a = -j1, \dot{E}_b = a^2 j1 \text{ и } \dot{E}_c = a j1.$$

Разложение этой несимметричной системы дает:

$$\dot{E}_{a1} = \frac{1}{3} j(-1 + a a^2 + a^2 a) = j \frac{1}{3};$$

$$\dot{E}_{a2} = \frac{1}{3} j(-1 + a^2 a^2 + a a) = -j \frac{2}{3};$$

$$\dot{E}_0 = \frac{1}{3} j(-1 + a^3 + a) = -j \frac{2}{3}.$$

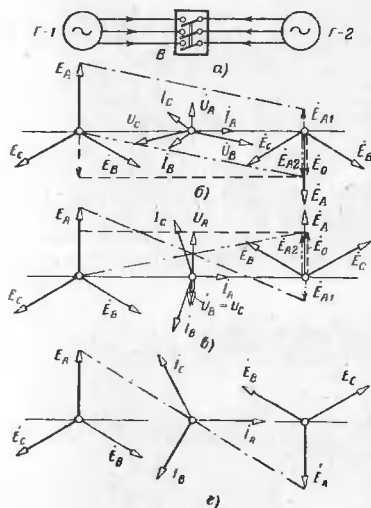


Рис. 7-13. К задаче 7-13.

а — исходная схема; б, в и г — векторные диаграммы э. д. с. и напряжений при различных условиях включения выключателя *B*.

Задача 7-14

Симметричные составляющие тока генератора Г-1 (они же и генератора Г-2) будут:

$$I_{a1} = \frac{i(1-j^2)}{j2 \cdot 0,27} = 1,23; I_{a2} = \frac{0 - (-j^2/3)}{j2 \cdot 0,39} = 0,86 \text{ и } I_0 = 0.$$

Величины фазных токов:

$$I_a = 1,23 + 0,86 = 2,09 \text{ и } I_b = I_c = |a^2 \cdot 1,23 + a \cdot 0,86| = 1,09.$$

Для рассматриваемых условий на рис. 7-13,б показаны векторные диаграммы токов, э. д. с. и напряжений; последние даны относительно нейтрали без учета ее смещения составляющей нулевой последовательности э. д. с. генератора Г-2.

Решение можно выполнить и иным путем. Систему э. д. с. генератора Г-2 можно представить состоящей из нормальной симметричной звезды векторов, к одному из которых (в частности, фазы а) прибавлен вектор, имеющий в 2 раза большую величину и направленный противоположно.

Другими словами, на систему э. д. с. $\dot{E}_a = j1$, $\dot{E}_b = a^2 j1$, $\dot{E}_c = a j1$ должна быть наложена дополнительная система э. д. с. $\dot{E}_a = -2j1$, $\dot{E}_b = 0$, $\dot{E}_c = 0$, которая и вызывает ток при таком включении генераторов. Последняя система э. д. с. распадается на симметричные составляющие $\dot{E}_{a1} = \dot{E}_{a2} = \dot{E}_0 = -j \frac{2}{3}$, по которым не представляет труда найти те же симметричные составляющие токов.

Результаты аналогичного расчета для условий п. «б» приведены на рис. 7-13,в (здесь токи $I_a = 1,61$ и $I_b = I_c = 2,99$). Выполнение этого расчета предоставляется читателю.

При включении генераторов в противофазу (рис. 7-13,з) начальный сверхпереходный ток во всех фазах одинаков и равен:

$$I = \frac{j1 - j(-1)}{j2 \cdot 0,27} = \frac{j1}{j0,27} = 3,7,$$

т. е. начальному сверхпереходному току при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора.

Сравнение показывает, что при условии п. «а» наибольший фазный ток составляет 57%, а при условии п. «б» — 81% тока при включении в противофазу. Следует отметить, что это имеет место при изолированных нейтральных генераторов. При их заземлении к найденным токам добавится ток нулевой последовательности, наибольшая величина которого, разумеется, будет при глухом заземлении. Так, если для генераторов принять $x_0 = 0,1$, то при выполнении условия п. «а»:

$$I_0 = \frac{0 - j(-2/3)}{j2 \cdot 0,1} = 3,33;$$

$$I_a = 2,09 + 3,33 = 5,42,$$

что уже на 46,5% превышает ток при включении в противофазу.

410

Для проведения опыта генератор с АРВ, параметры которого $x_1 = 1,1$, $x_2' = 0,2$, $x_2 = 0,34$, $x_0 = 0,11$, $T_{10} = 2$ сек, $I_{нр} = 3$, $T_a = 0$, предельно нагружен чисто индуктивным сопротивлением до номинального тока при номинальном напряжении. В каждой фазе цепи

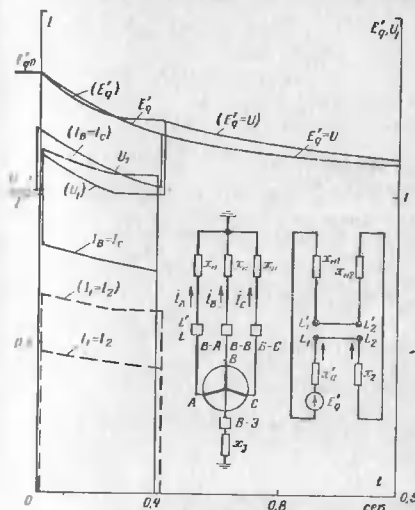


Рис. 7-14. К задаче 7-14. Исходная схема, комплексная схема и кривые изменения E'_a , U_1 и токов при непосредственном отключении фазных выключателей при разомкнутом выключателе В-3.

генератора составляет выключатель с индивидуальным приводом. Нейтраль генератора через выключатель В-3 (см. схему на рис. 7-14) соединена с землей через реактивность x_0 , относительная величина которой при номинальных условиях генератора составляет 0,14, может быть заземлена. Точка нагрузочных реактивных заземлена наглухо.

Приведенный опыт состоит в том, что сначала, с интервалом 0,4 сек, отключают выключатели фаз А, В и С. При этом его проводят на разряд, т. е. вначале при отключении выключателя В-3, а затем при включении этого выключателя.

Требуется построить кривые изменения во времени симметричных составляющих и фазных токов, а также напряжения прямой последовательности генератора. Кроме того, для начального момента возникновения каждого несимметричного процесса построить векторные диаграммы токов и напряжений с обеих сторон фазных выключателей.

Решение. Относительная реактивность нагрузки, включенной в каждую фазу генератора, очевидно, составляет $x_n=1$. При отсутствии взаимовыдуки между нагрузочными фазными реактивностями, очевидно, имеем:

$$x = x_{n1} = x_{n2} = x_{n0} = 1.$$

Предшествующая переходная э. д. с. составляет:

$$E'_{q0} = 1 + 0,2 \cdot 1 = 1,2.$$

Рассмотрим поочередно каждый этап проводимого опыта.

а) Отключение В-А при отключенном В-З

Схема замещения для данного случая показана на рис. 7-14. Суммарная реактивность обратной последовательности будет:

$$x_{L2\bar{2}} = 0,34 + 1 = 1,34.$$

Принимая $E'_{A1} = j1,2$, найдем ток прямой последовательности

$$I'_{A1} = \frac{j1,2}{j(0,2 + 1 + 1,34)} = 0,47 = -I'_{A2}.$$

Модуль фазных токов

$$I'_B = I'_C = \sqrt{3} \cdot 0,47 = 0,82.$$

Симметричные составляющие напряжений: генератора $\dot{U}_{A1} = j1,2 - j0,2 \cdot 0,47 = j1,1$ и $\dot{U}_{A2} = -(-j0,34 \cdot 0,47) = j0,161$ нагрузки $\dot{U}_{A1} = j1 \cdot 0,47 = j0,47$ и $\dot{U}_{A2} = -j0,47$.

Последние можно получить и иначе, а именно: симметричные составляющие напряжения между контактами отключившегося выключателя фазы А будут:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{LD} = j1,34 \cdot 0,47 = j0,63;$$

следовательно, у нагрузки

$$\dot{U}_{A1} = j1,1 - j0,63 = j0,47 \quad \text{и} \quad \dot{U}_{A2} = j0,16 - j0,63 = -j0,47.$$

Построенные по этим составляющим векторные диаграммы приведены на рис. 7-15, а. Нейтраль генератора имеет потенциал, равный $\dot{U}_0 = j0,63$.

412

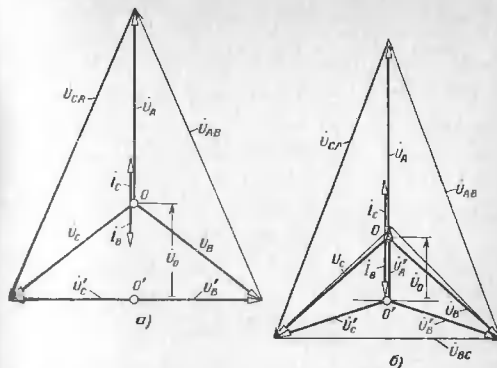


Рис. 7-15. К задаче 7-14. Векторные диаграммы токов и напряжений при отключении одной фазы.
а — при $x_{L2} = 1$; б — при $x_{L2} = 0,99$.

Найдем теперь временные зависимости.

Постоянная времени

$$T'_{d1} = 2 \cdot \frac{0,2 + 1 + 1,34}{1 + 1 + 1,34} = 1,52 \text{ сек.}$$

Поскольку у генератора $\dot{U}_1 > 1$, то начнется его развозбуждение и ток начнет снижаться, стремясь к $I_{A1} = \frac{j1}{j(1 + 1 + 1,34)} = 0,3$, т. е.

$$I_{A1} = -I_{A2} = 0,3 + (0,47 - 0,3) e^{-t/1,52},$$

и соответственно напряжение прямой последовательности генератора

$$U_{A1} = 0,7 + (1,1 - 0,7) e^{-t/1,52},$$

$$U_A = 0,3(1 + 1,34) = 0,7.$$

Такое снижение будет происходить до момента, определяемого равенством

$$1 = 0,7 + (1,1 - 0,7) e^{-t/1,52},$$

т. е. спустя $t = 0,44$ сек, т. е. больше заданной продолжительности первого этапа переходного процесса.

Требуемые кривые изменения построены по полученным выражениям, и они приведены на рис. 7-14. Дополнительно показана также кривая изменения во времени а. д. с. E'_q . К моменту отключения выключателя фазы В (т. е. при $t=0,4$ сек) ее значение составляет $E'_q=1,1$.

Представляет интерес отметить влияние реактивности обратной последовательности нагрузки на величины и характер изменения искомых токов и напряжений. Так, например, если приключенная нагрузка состоит из промышленных предприятий с большим количеством двигателей, то ее реактивность обратной последовательности приближенно можно оценить как

$$x_{12} = 1 - \frac{0,35}{1,2} = 0,29$$

(где 1,2 и 0,35 — относительные реактивности прямой и обратной последовательностей, которыми характеризуются обобщенная промышленная нагрузка).

На рис. 7-14 кривые, обозначения которых заключены в скобки, и векторные диаграммы на рис. 7-15,б иллюстрируют результаты, получившиеся при таком учете нагрузки. Сам подчет при этих условиях рекомендуется выполнить читателю.

б) Отключение В-В при отключенных В-А и В-З.

В данном случае после отключения В-В генератор переходит в режим холостого хода. При этом его э. д. с. и напряжение с постоянной времени $T_{10}=2$ сек будут стремиться к $U=1$, т. е.

$$E'_q = U = 1 + (1,1 - 1)e^{-t/2}$$

Соответствующая этому уравнению кривая приведена на рис. 7-14.

в) Отключение В-А при включенном В-З

Схема замещения при этих условиях дополнительно содержит контур нулевой последовательности (см. верхнюю схему на рис. 7-16), суммарная реактивность которого составляет:

$$x_{10\sigma} = 0,11 + 3 \cdot 0,14 + 1 = 1,53.$$

Дополнительная реактивность, вводимая в схему прямой последовательности, будет:

$$x_{1\Delta}^{(1)} = x_{12\Delta} / x_{10\sigma} = 1,34 / 1,53 = 0,72.$$

Ток прямой последовательности

$$I'_{A1} = \frac{11,2}{1 + 0,72} = 0,63;$$

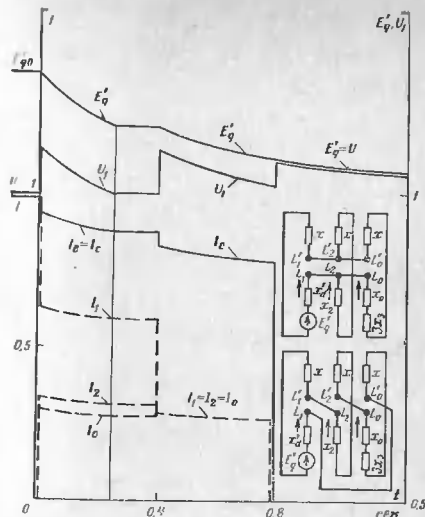


Рис. 7-16. К задаче 7-14. Комплексные схемы и кривые изменения E'_q , U , и токов при отключении одной фазы и двух фаз при замкнутом выключателе В-З.

напряжение прямой последовательности генератора

$$\dot{U}_{A1} = j0,63(1 + 0,72) = j1,08.$$

Токи обратной и нулевой последовательностей:

$$I'_{A2} = -0,63 \frac{0,72}{1,34} = -0,34; I'_0 = -(0,63 - 0,34) = -0,29.$$

Напряжения обратной и нулевой последовательностей генератора:

$$\dot{U}_{A2} = -j(-0,34 - 0,34) = j0,11; \dot{U}_0 = -j(-0,29 - 0,53) = j0,16.$$

Симметричные составляющие напряжения между контактами выключателя В-А

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{L0} = j0,63 \cdot 0,72 = j0,45.$$

Симметричные составляющие напряжений у нагрузки:

$$\dot{U}_{A1} = j(1,08 - 0,45) = j0,63; \quad \dot{U}_{A2} = j(0,11 - 0,45) = -j0,34; \\ \dot{U}_0 = j(0,16 - 0,45) = -j0,29.$$

Векторные диаграммы токов и напряжений, построенные по этим симметричным составляющим, приведены на рис. 7-17,а.

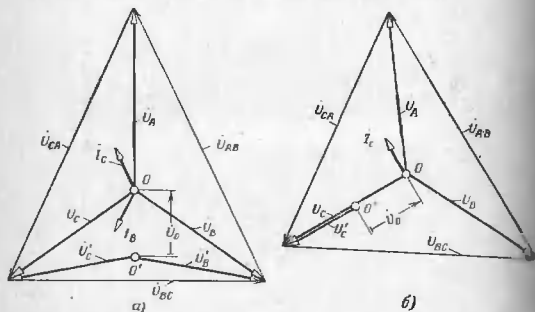


Рис. 7-17. К задаче 7-14. Векторные диаграммы токов и напряжений при отключении:

а — одной фазы А; б — двух фаз А и В.

При развозбуждении ток прямой последовательности стремится к

$$I_{A1} = \frac{I}{j(1 + j0,72)} = 0,37$$

и напряжение — к

$$\dot{U}_{A1} = j0,37 \cdot 1,72 = j0,63.$$

Постоянная времени

$$T'_a = 2 \cdot \frac{0,2 + 1 + 0,72}{1 + 1 + 0,72} = 1,41 \text{ сек.}$$

Из уравнения

$$U_i = 1 = 0,63 + (1,08 - 0,63) e^{-t/T,41}$$

найдем, что при $t = 0,25 \text{ сек}$ переходный процесс на данном интервале практически заканчивается, так как напряжение прямой последовательности генератора достигает нормального значения.

Изменение токов и напряжений U_i во времени представлено соответствующими кривыми на рис. 7-16 (интервал от 0 до 0,4 сек). Модуль токов фаз В и С связан с током I_1 коэффициентом

$$m = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{1,34 \cdot 1,53}{(1,34 + 1,53)^2}} \approx 1,5.$$

В) Отключение В-В при отключенном В-А и включенном В-З

В этом случае комплексная схема замещения имеет вид, как это показано на рис. 7-16 (нижняя схема). Дополнительное сопротивление, вводимое в цепь схемы прямой последовательности, составляет:

$$x_{L\Delta}^{(2)} = x_{L2\Delta} + x_{L0\Delta} = 1,34 + 1,53 = 2,87.$$

Переходная э. д. с. в момент отключения В-В

$$E'_{\Delta} = 1 + 0,2 \cdot \frac{1}{1 + 0,72} = 1 + 0,12 = 1,12,$$

и ток в момент отключения этого выключателя, с учетом того, что теперь в особых условиях находится фаза С,

$$I'_{C1} = I'_{C2} = I'_{C0} = \frac{aj1,12}{j(0,2 + 1 + 2,87)} = a \cdot 0,275 \text{ и} \\ I'_{C'} = 3a \cdot 0,275 = a \cdot 0,825.$$

Симметричные составляющие напряжений генератора:

$$\dot{U}_{C1} = aj0,275(1 + 2,87) = aj1,07; \\ \dot{U}_{C2} = -aj0,275 \cdot 0,34 = -aj0,09; \quad \dot{U}_0 = -aj0,275 \cdot 0,53 = -aj0,14;$$

и в месте разрыва:

$$\Delta \dot{U}_{LC1} = aj0,275 \cdot 2,87 = aj0,79; \quad \Delta \dot{U}_{LC2} = -aj0,275 \cdot 1,34 = -aj0,37; \\ \Delta \dot{U}_{L0} = -aj0,275 \cdot 1,53 = -aj0,42;$$

у нагрузки:

$$U_{C1} = aj(1,07 - 0,79) = aj0,28; \\ \dot{U}_{C2} = -aj(0,09 - 0,37) = aj0,28; \\ \dot{U}_0 = -aj(0,14 - 0,42) = aj0,28.$$

Векторные диаграммы, построенные по этим симметричным составляющим, приведены на рис. 7-17,б.

В. С. А. Ульянов

Изменение будет происходить с постоянной времени

$$T'a = 2 \cdot \frac{0,2 + 1 + 2,87}{1 + 1 + 2,87} = 1,67 \text{ сек.}$$

При развозбуждении ток прямой последовательности будет стремиться к

$$I_1 = \frac{1}{1 + 1 + 2,87} = 0,205$$

и напряжение генератора — к

$$U_1 = 0,205 \cdot (1 + 2,87) = 0,8.$$

К концу второго интервала напряжение прямой последовательности генератора будет:

$$U_1 = 0,8 + (1,07 - 0,8) e^{-0,4/1,67} = 1,01,$$

соответственно ток

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{1,01}{1 + 2,87} = 0,26 \text{ и } I = 3 \cdot 0,26 = 0,78;$$

и э. д. с. $E'_{\alpha} = 1,01 + 0,2 \cdot 0,26 = 1,06$.

На рис. 7-16 в интервале от 0,4 до 0,8 сек эти зависимости показаны соответствующими кривыми.

д) Отключение В-С при отключенных В-А и В-В

После отключения В-С генератор переходит на холостой ход и изменение его э. д. с. и напряжения будет происходить по уравнению

$$E'_{\alpha} = U = 1 + (1,06 - 1) e^{-t/2},$$

как это показано на рис. 7-16 кривой для $t \geq 0,8$ сек.

Задача 7-18

Для генератора, параметры которого указаны в предыдущей задаче, должен быть проведен опыт поочередного закорачивания в фазах части включенных в них реактивных сопротивлений. С этой целью, как показано на рис. 7-18, а, в каждой фазе цепи статора включены последовательно две реактивности, относительные величины которых при номинальных условиях генератора составляют $x_c = 0,9$ и $x = 0,1$. Каждая из реактивностей x_c может быть зашунтирована соответствующим выключателем (В-А, В-В, В-С), имеющим индивидуальный привод.

В предшествующем режиме эти выключатели отключены и генератор нагружен чисто индуктивным сопротивлением до номинального тока при номинальном напряжении.

Как и в предыдущей задаче, нулевая точка внешней цепи статора заземлена наглухо, а нейтраль генератора может быть заземлена через $x_0 = 0,14$ включением выключателя В-З.

Программа опыта предусматривает поочередное, с интервалом в 1 сек, включение выключателей В-А, В-В и В-С, при этом одновременно с включением выключателя В-В производится закорачивание обмотки возбуждения (без введения разрядного сопротивления). Опыт проводится 2 раза: сначала при отключенном выключателе В-З, а затем когда этот выключатель включен.

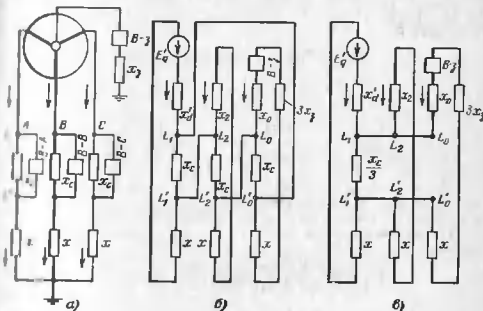


Рис. 7-18. К задаче 7-18.

а — исходная схема; б — комплексная схема при реактивности x_c в двух фазах; в — то же при реактивности x_c в одной фазе.

Требуется построить кривые изменения во времени симметричных составляющих токов, э. д. с. E'_{α} и напряжения прямой последовательности U_1 генератора. Для каждого этапа возникающего переходного процесса построить также векторные диаграммы токов.

Решение. Комплексные схемы для случаев, когда остаются реактивности x_c в двух фазах (т. е. включен В-А) и в одной фазе (т. е. включены В-А и В-В), представлены соответственно на рис. 7-18, б и в. Напомним, что реактивность генератора $x_d = 1,0$; $x'_d = 0,2$; $x_2 = 0,34$; $x_0 = 0,11$, его $T_{10} = 2$ сек; $T_c = 0$; $I_{нр} = 3$; реактивность в шунти нейтралю $x_3 = 0,14$.

Рассмотрим переходный процесс, когда нейтраль генератора не заземлена (В-З отключен).

а) Включение В-А

В соответствии со схемой на рис. 7-18, б при отключенном выключателе В-З дополнительная реактивность, вводимая последовательно и цепь прямой последовательности, составляет:

$$x_{\Sigma 1}^{(2)} = [(0,34 + 0,1)/0,9 + 0,9]/0,9 = 0,514.$$

Начальное значение переходного тока прямой последовательности будет:

$$I_1' = \frac{1,2}{0,2 + 0,1 + 0,514} = 1,48,$$

где $E'_{q0} = 1,2$ — предшествующее значение переходной э. д. с.

Начальное значение напряжения прямой последовательности генератора

$$U_1 = 1,48(0,1 + 0,514) = 0,91.$$

Критическая реактивность при установившемся режиме

$$x_{кр} = x_d \frac{U_n}{E_{qвр} - U_n} = 1 \cdot \frac{1}{3 - 1} = 0,5;$$

поскольку $x_{кр} = 0,5 < x_{нн} = (0,1 + 0,514)$, то не исключена возможность, что уже в первом интервале напряжения прямой последовательности генератора достигнет нормального значения.

Подъем напряжения (и тока) будет происходить с постоянной времени

$$T'_{d'} = 2 \cdot \frac{0,2 + 0,1 + 0,514}{1,0 + 0,1 + 0,514} = 1,01 \text{ сек.}$$

при этом оно будет стремиться в пределе к

$$U_{нн} = \frac{3}{1 + 0,1 + 0,514} (0,1 + 0,514) = 1,14.$$

Момент наступления режима нормального напряжения найдем из уравнения

$$1 = 1,14 + (0,91 - 1,14) e^{-t/1,01},$$

откуда $t \approx 0,5$ сек, т. е. меньше продолжительности первого интервала, который задан равным 0,7 сек.

Значения тока I_1 и э. д. с. $E'_{q'}$ при $t \geq 0,5$ сек будут:

$$I_1 = \frac{1}{0,1 + 0,514} = 1,63 \text{ к } E'_{q'} = 1 + 0,2 \cdot 1,63 = 1,33.$$

По схеме на рис. 7-18,б нетрудно найти, что ток обратной последовательности генератора составляет:

$$I_2 = 0,206 I_1.$$

Искомые кривые для первого этапа переходного процесса (от 0 до 0,7 сек) представлены на рис. 7-19. Там же показана векторная диаграмма токов. В фазе А симметричные составляющие токов совпадают по направлению.

б) Включение В-В при замкнутом В-А

Согласно схеме на рис. 7-18,а при отключенном выключателе В-В дополнительная реактивность, вводимая в схему прямой последовательности, будет:

$$x_{\Delta L}^{(1)} = (0,34 + 0,1) / \frac{0,9}{3} = 0,178.$$

Начальные значения тока прямой последовательности

$$I_1 = \frac{1,33}{0,2 + 0,1 + 0,178} = 2,78;$$

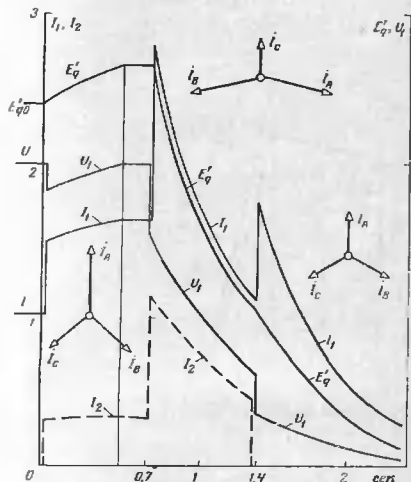


Рис. 7-19. К задаче 7-15. Кривые изменения во времени токов I_1 и I_2 , э. д. с. $E'_{q'}$ и напряжения U_1 при поочередном экзорачивании фазных реактивностей внешней цепи; индуктивность генератора изолирована (выключатель В-В отключен).

напряжения прямой последовательности генератора

$$U_1 = 2,78(0,1 + 0,178) = 0,77.$$

По условию при включении В-В одновременно замыкается на коротко обмотка возбуждения (с отключением ее от возбуждателя).

Следовательно, все искомые величины будут стремиться к нулю с постоянной времени:

$$T'_a = 2 \cdot \frac{0,2 + 0,1 + 0,178}{1,0 + 0,1 + 0,178} = 0,75 \text{ сек.}$$

и в конце второго этапа они будут:

$$I_1 = 2,78e^{-0,7/0,75} = 1,09;$$

$$U_1 = 1,09(0,1 + 0,178) = 0,304 \text{ и } E'_q = 0,304 + 0,2 \cdot 1,09 = 0,522.$$

Тот обратный последовательности на этом этапе составляет:

$$I_2 = \frac{0,178}{0,44} I_1 = 0,405 I_1.$$

На рис. 7-19 в интервале от 0,7 до 1,4 сек приведены кривые, которые построены по полученным величинам. Там же показана век-

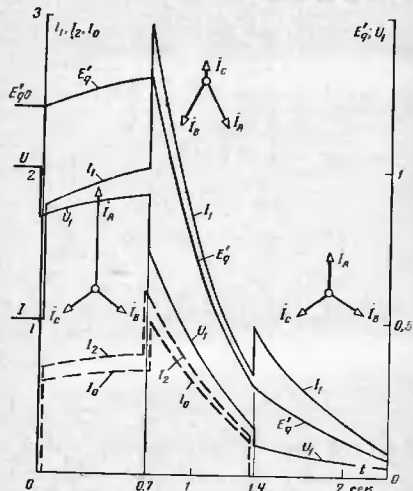


Рис. 7-20. К задаче 7-15. Кривые изменения во времени токов I_1 , I_2 и I_0 , э. д. с. E'_q и напряжения U_1 при поочередном закорачивании фазных реактивных внешней цепки; нейтраль генератора заземлена через x_0 (выключатель В-3 включен).

торная диаграмма токов. Отметим, что в этом случае особой фазой является фаза С и ее токи прямой и обратной последовательностей имеют противоположные направления.

в) Включение В-С при замкнутых В-А и В-В

После включения В-С несимметрия в цепи исчезает. Ток в данный момент будет:

$$I = \frac{0,522}{0,2 + 0,1} = 1,74$$

и напряжение генератора

$$U = 1,74 \cdot 0,1 = 0,174.$$

На дальнейшее затухание до нуля будет происходить с постоянной времени:

$$T'_a = 1 \cdot \frac{0,2 + 0,1}{1,0 + 0,1} = 0,545 \text{ сек. т. е.}$$

$$I = 1,74e^{-t/0,545}; E'_q = 0,522e^{-t/0,545}; U = 0,174e^{-t/0,545}.$$

Эти зависимости представлены на рис. 7-19 кривыми при $t = 1,4$ сек. Векторная диаграмма токов при этом имеет вид симметричной трехлучевой звезды.

Аналитический расчет для случая, когда выключатель В-3 включен, рекомендуется выполнить читателю. Его результаты представлены на рис. 7-20. Представляет интерес сопоставить кривые на рис. 7-19 и 7-20 и объяснить причину их различия. В частности, чем обусловлена значительная разница в величинах тока, э. д. с. E'_q и напряжения U_1 на третьем этапе переходного процесса, т. е. после включения В-С?

Глава восьмая

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ СПЛОЖНЫХ ВИДАХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Сложные виды повреждений чрезвычайно разнообразны. Они представляют собой совокупность нескольких несимметричных замыканий или нарушений пространственной симметрии отдельных участков системы, а также различные одновременные комбинации разных видов несимметрии (т. е. как поперечной, так и продольной). По расчету и анализу сложных видов повреждения в настоящее время имеется весьма обширная специальная литература [Л. 19—22].

В настоящей главе рассматриваются лишь два наиболее часто встречающихся случая сложных повреждений, а именно:

1) двойное замыкание на землю (разных фаз в рядных точках) в сети с изолированной нейтралью (или в компенсированной сети);

2) однофазное короткое замыкание с одновременным обрывом той же фазы.

Весь необходимый материал по этим видам сложных повреждений изложен в [Л. 12].

Существенно важным является то обстоятельство, что для указанных видов сложных повреждений представляется возможным использовать так называемые производные схемы прямой последовательности (точные или приближенные), что, в свою очередь, позволяет распространить известное правило эквивалентности прямой последовательности и свести задачу к расчету тока прямой последовательности в схеме с заданной точкой нулевого потенциала. Выполнение расчетов в особенно нахождение токораспределения при этих сложных видах повреждений имеют некоторые особенности и специфику, на что нужно обратить должное внимание.

Задача 8-1

К генератору G через трансформатор $T-1$ присоединена воздушная линия (рис. 8-1, а). Параметры этих элементов следующие: генератор G 37,5 Мва, 6,3 кВ, $x''_d = 0,143 \approx x_d$; трансформатор $T-1$ 25 Мва, 37/6,3 кВ, $u_k = 8\%$, $\Delta/11$; линия 12,5 км, $x_1 = 0,4$ Ом/км, $x_0 = 1,45$ Ом/км.

На линии произошло двойное короткое замыкание на землю в точках M и N . Определить, в каком диапазоне изменяется величина начального сверхпереходного тока в поврежденных фазах линии при перемещении точки N по линии, считая положение точки M неизменным (в начале линии). Сопоставить величину этого тока с начальным сверхпереходным током при обычном двухфазном коротком замыкании в точке N и отсутствии повреждения в точке M . Считать, что до возникновения короткого замыкания генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Решение. Проведем решение в именованных единицах, приведя все элементы к стороне линии. Соответственно этому имеем для генератора

$$x_d'' = 0,143 \frac{37^2}{37,5} = 5,22 \text{ Ом}$$

$$E'' = \frac{6,3}{\sqrt{3}} \frac{37}{6,3} = 21,4 \text{ кВ};$$

трансформатора

$$x_T = 0,08 \frac{37^2}{25} = 3,2 \text{ Ом};$$

линии

$$x_1 = 0,4 \cdot 12,5 = 5 \text{ Ом} \text{ и } x_0 = 1,45 \cdot 12,5 = 18,1 \text{ Ом.}$$

Для столь простой схемы и при равенстве реактивностей генератора $x''_d = x_d$ решение задачи можно выполнять, не прибегая к методу симметричных составляющих. В самом деле, собственная

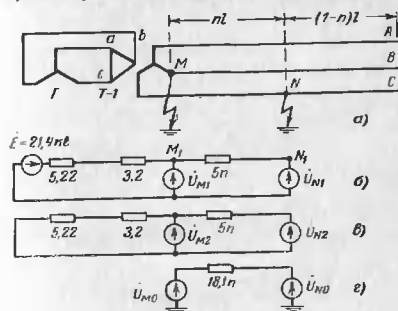


Рис. 8-1. К задаче 8-1.

а — исходная схема; б, в и г — схемы замещения соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей.

реактивность петли провод—земля определяется по заданным значениям x_1 и x_0 , т. е.

$$x_L = \frac{x_0 + 2x_1}{3} = \frac{18,1 + 2 \cdot 5}{3} = 9,35 \text{ Ом.}$$

Суммарная реактивность контура фазы генератора — трансформатора — линии с возвратом через землю и другие фазы трансформатора и генератора, очевидно, составляет:

$$x_{\Sigma} = 2(5,22 + 3,2) + 9,35 = 16,84 + 9,35 \text{ Ом,}$$

где n — относительное расстояние точки N от начала линии.

В указанном контуре действует линейная э. д. с. $E'' = \sqrt{3} \cdot 21,4 = 37$ кВ, и, следовательно, искомым ток будет:

$$I^{(1-1)} = \frac{37}{16,84 + 9,35} \text{ кА};$$

максимальная величина имеет место при $n=0$ (т. е. когда точки M и N совпадают) и составляет 2,2 кА, а наименьшая — при $n=1$ (т. е. когда точка N в конце линии) и составляет 1,41 кА.

При обычном двухфазном коротком замыкании величина тока, очевидно, будет:

$$I^{(2)} = \frac{37}{16,84 + 2,5n} = \frac{37}{16,84 + 10n}, \text{ ка.}$$

т. е., как видно из сравнения с ранее полученным выражением, ток при двухфазном коротком замыкании в данном случае немного меньше, чем при двойном коротком замыкании на землю; однако эта разница в пределе составляет только 7%.

Как общий путь решения подобных задач покажем решение с использованием метода симметричных составляющих.

Схемы замещения отдельных последовательностей для рассматриваемой задачи показаны на рис. 8-1б, в и г.

Для модуля тока прямой последовательности в месте замыкания имеем:

$$I_1 = \frac{\sqrt{3}E}{3x_{H1} + x_{M1} + x_{N1} + x_D} = \frac{\sqrt{3} \cdot 21,4}{3 \cdot 8,42 + 5n + 25,26 + 23,1n},$$

где в данном случае

$$x_{H1} = 5,22 + 3,2 = 8,42 \text{ ом; } x_{M1} = 0; x_{N1} = 5n$$

и

$$x_D = 3x_{H2} + x_{M2} + x_{N2} + x_{MNO} = 3 \cdot 8,42 + 0 + 5n + 18,1n = 25,26 + 23,1n.$$

Для модуля периодической слагающей тока (или сверхпереходного тока) имеем:

$$I^{(1-1)} = 3I_1 = \frac{3\sqrt{3} \cdot 21,4}{50,52 + 28,1n} = \frac{37}{16,84 + 9,35n},$$

т. е., как и следовало ожидать, то же выражение, которое было получено раньше без применения симметричных составляющих.

Задача 8-2

Для схемы и условий предыдущей задачи, считая, что точки замыкания на землю (фаза В) и N (фаза С) находятся соответственно в начале и конце линии, требуется построить векторные диаграммы токов в линии и трансформаторе (на стороне повышенного напряжения), а также векторные диаграммы напряжений в обеих точках замыкания на землю.

Решение. Примем, что $\dot{E}_A = \dot{U}_{\text{Лекст}} = j21,4$ кв. Тогда для тока прямой последовательности в месте замыкания M имеем:

$$I_{MA1} = \frac{(a - a^2) \dot{E}_A}{3x_{H1} + x_{M1} + x_{N1} + x_D} = \frac{\sqrt{3} e^{j30^\circ} j21,4}{j(3 \cdot 8,42 + 5 + 48,36)} = 0,47 e^{j30^\circ}, \text{ ка,}$$

и для других последовательностей:

$$I_{MA2} = a I_{MA1} = 0,47 e^{j150^\circ} \text{ и } I_{MO} = a^2 I_{MA1} = 0,47 e^{j270^\circ} = -j0,47 \text{ ка.}$$

Для замыкания в точке N явлюсично находим:

$$I_{NA1} = 0,47 e^{-j30^\circ}, \text{ ка; } I_{NA2} = 0,47 e^{-j150^\circ}, \text{ ка и } I_{NO} = j0,47 \text{ ка.}$$

В фазах обмотки высшего напряжения трансформатора имеем:

$$I_{HA1} = I_{MA1} + I_{NA1} = 0,47 (e^{j30^\circ} + e^{-j30^\circ}) = 0,47 \sqrt{3} = 0,815 \text{ ка,}$$

$$I_{HA2} = I_{MA2} + I_{NA2} = 0,47 (e^{j150^\circ} + e^{-j150^\circ}) = -0,47 \sqrt{3} = -0,815 \text{ ка.}$$

Но найденным симметричным составляющим построены векторные диаграммы токов, которые приведены на рис. 8.2. Следует об-

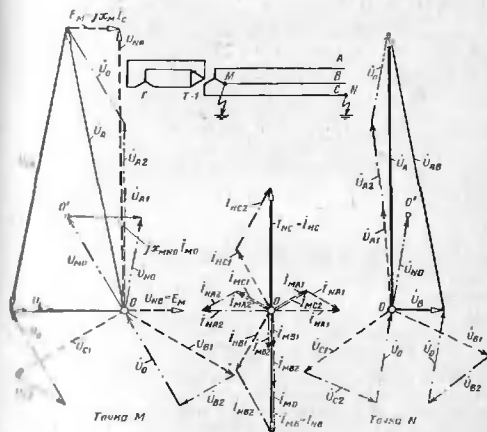


Рис. 8-2 К задаче 8-2. Исходная схема и векторные диаграммы токов и напряжений.

ратить внимание, что токи в местах замыкания на землю складываются из симметричных составляющих всех последовательностей, которые в поврежденных фазах одинаковы. С другой стороны, эти же фазные токи в трансформаторе состоят из суммы токов только прямой и обратной последовательностей. Их полные величины составляют (как было ранее установлено):

$$I_{MB} = I_{NB} = 3(-j0,47) = -j1,41 \text{ кА} = -I_{NC} = -I_{NC}$$

Для симметричных составляющих напряжений в точке M имеем:

$$\dot{U}_{MA1} = j21,4 - 0,815j(5,22 + 3,2) = j21,4 - j6,9 = j14,5 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{MA2} = 0 - (-0,815)j(5,22 + 3,2) = j6,9 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{MO} = -(a^2 \dot{U}_{MA1} + a \dot{U}_{MA2}) = -(a^2 j14,5 + a j6,9) = -6,6 + j10,7 \text{ кВ}.$$

Построенная по этим составляющим векторная диаграмма напряжений в точке M показана на рис. 8-2.

Для построения векторной диаграммы напряжений в точке N можно найти их симметричные составляющие, например для прямой последовательности

$$\dot{U}_{NA1} = \dot{U}_{MA1} - I_{NA1} X_{MN1} = j14,5 - 0,47e^{-j30^\circ} j5 = -1,2 + j13 \text{ кВ}$$

и т. д. Однако в данном случае такое построение можно сделать проще, не прибегая к симметричным составляющим. В самом деле, в точке N $\dot{U}_C = 0$, а напряжения фаз A и B отличаются от напряжений тех же фаз в точке M на величину э. д. с., наводимой в них током фазы C линии, т. е.

$$\dot{E}_M = -I_C X_M = -j1,41j4,38 = 6,2 \text{ кВ},$$

где реактивность взаимной индукции между фазами линии

$$X_M = \frac{x_0 - x_1}{3} = \frac{18,1 - 5}{3} = 4,38 \text{ Ом}.$$

На рис. 8-2 векторы $\dot{E}_M = \dot{U}_{NB}$ и \dot{U}_{NA} на диаграмме слева показаны пунктиром; векторная диаграмма напряжений в точке N , построенная по симметричным составляющим, показана на рис. 8-2 справа.

Задача 8-3

Используя метод расчетных кривых, определить наибольшее и наименьшее значения периодической слагающей тока в земле при двойном замыкании на землю в точках M и N схемы на рис. 8-1. Считать, что точка M расположена в начале линии, а точка N — в конце линии. Генератор снабжен автоматическим регулированием возбуждения.

428

Решение. В решении задачи 8-1 было найдено, что модуль сверхпереходного тока в месте замыкания на землю (при $l=1$) составляет

$$I'' = \frac{37}{16,84 + 9,35} = \frac{37}{26,19} = 1,41 \text{ кА},$$

при этом составляющая прямой последовательности сверхпереходного тока генератора будет:

$$I''_1 = \frac{I''}{\sqrt{3}} = \frac{37/\sqrt{3}}{26,19} = \frac{21,4}{26,19} = 0,82 \text{ кА}.$$

Результирующая реактивность, по которой определяется совпадения прямая последовательности сверхпереходного тока ге-

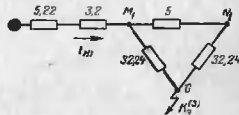


Рис. 8-3. К задаче 8-3. Приближенная производная схема прямой последовательности при двойном замыкании на землю.

нератора, как видно, равна $X^{(1-1)} = 26,19 \text{ Ом}$. Следовательно, расчетная реактивность генератора для данного вида короткого замыкания будет:

$$X_{\text{расч}}^{(1-1)} = 26,19 \cdot \frac{37,5}{37,5} = 0,72.$$

На кривых на рис. П-7 для этого значения $X_{\text{расч}}$ находим:

$$I_{1\text{макс}} = 1,46 \text{ (при } t = \infty);$$

$$I_{1\text{мин}} = 1,18 \text{ (при } t = 0,5 \text{ сек)}.$$

Целевые величины токов будут:

$$I_{\text{макс}} = \sqrt{3} \cdot 1,46 \cdot 0,585 = 1,48 \text{ кА};$$

$$I_{\text{мин}} = \sqrt{3} \cdot 1,18 \cdot 0,585 = 1,19 \text{ кА},$$

где $I_n = \frac{37,5}{\sqrt{3} \cdot 37} = 0,585 \text{ кА}$ — номинальный ток генератора, приведенный к стороне высшего напряжения.

Для уточнения еще на использовании для решения приближенной производной схемы прямой последовательности. Для рассматриваемых условий она представлена на рис. 8-3. Здесь каждая из точек M и N связана с точкой O нулевого потенциала через реактивность

$$X_{GM1} = X_{GN1} = \frac{2}{3} X_D = \frac{2}{3} \cdot 48,36 = 32,24 \text{ Ом}$$

(значение $X_D = 48,36 \text{ Ом}$ при $l=1$, см. решение задачи 8-1).

Результирующая реактивность этой схемы составляет:

$$x(1-n) = 5,22 + 3,2 + (5 + 32,24)/32,24 = 25,72 \text{ Ом},$$

т. е. она меньше ранее найденной величины на

$$\frac{26,19 - 25,72}{26,19} \cdot 100 = 1,8\%.$$

Столь малое различие практически не повлияло бы на конечный результат проводимого расчета.

Задача 8-4

К шинам генераторного напряжения через реактор с реактивностью x (Ом) присоединена отходящая к потребителю цепь. На те же шины включает генератор, у которого $x''_d = x$. Генератор предельно работает на холостом ходу с номинальным напряжением.

Требуется провести сравнение начальных фазных токов и напряжений прямой последовательности за реактором при двойном замыкании на землю, когда одна точка замыкания находится на шинах, а другая — за реактором, с соответствующими величинами при двухфазном коротком замыкании за реактором. Установить пределы соотношений между сравниваемыми величинами, а также соотношение для частного случая, когда реактивность реактора $x = 10x''_d$.

Задача 8-5

Блок, состоящий из генератора, трансформатора и однофазной линии, параметры которых даны в задаче 8-1, связан через трехобмоточный трансформатор с системой С (схема на рис. 8-4). Этот трансформатор имеет 40 Мва, 115/37/10,5 кв, $\cos \varphi = 10,5\%$; напряжение системы С можно считать практически неизменным и равным 115 кв.

На линии предполагается двойное короткое замыкание на землю в точках М и N. Требуется построить кривые изменения тока в земле, наибольшего и наименьшего фазных токов со стороны каждого трансформатора в зависимости от положения:

- точки N на линии при сохранении точки M в начале линии;
 - точки M на линии при сохранении точки N в конце линии.
- Для случая, когда точки M и N расположены по концам линии, построить векторные диаграммы напряжений в этих точках и токов в линии и в трансформаторах на стороне 37 кв.

Решение провести для начального момента короткого замыкания, считая, что генератор предварительно работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Решение. Аналогично задаче 8-1, решение проведем в именованных единицах, относим все элементы к стороне линии. В дополнение к схеме прямой последовательности на рис. 8-1,б вводим реактивность трансформатора T-2 (его обмоток 115 и 37 кв) $x_{T-2} = 3,6$ Ом. Приведенное напряжение системы $U = \frac{115}{\sqrt{3}} = 21,4$ кв, т. е.

оно совпадает с приведенной э. д. с. генератора,

На рис. 8-5 показана схема замещения прямой последовательности, где начала генерирующих ветвей объединены вместе. Она соответствует случаю перемещения точки N; под п, как и ранее, следует понимать относительное расстояние точки N от точки M. Схема обратной последовательности такая же, но в ней лишь отсутствуют э. д. с. Наконец, схема нулевой последовательности полностью сохраняется той же, что и на рис. 8-1,г.

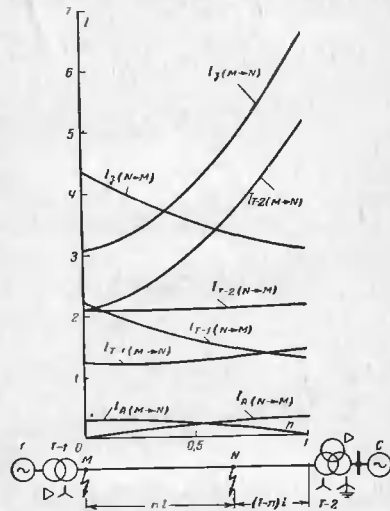


Рис. 8-4. К задаче 8-5. Исходная схема и кривые изменения токов в зависимости от взаимного положения точек двойного замыкания на землю.

Проведя преобразование треугольника в эквивалентную звезду, для реактивности лучей последней получим:

$$x_{H1} = x_{H2} = 1,78 + 2,47(1-n); \quad x_{M1} = x_{M2} = 2,47n; \\ x_{N1} = x_{N2} = 1,06 + 1,47(1-n).$$

Учитывая равенство реактивностей прямой и обратной последовательности, для суммарной реактивности при двойном коротком

замыкания имеем:

$$x_{\Sigma}^{(1-1)} = 2 \{ 3[1,78 + 2,47(1-n)] + 2,47n + 1,06n + 1,47(1-n)n \} + 18,1n = 2,94(8,66 + 4,51n - n^2), \text{ ом.}$$

Принимая $\dot{E}_A = j21,4 \text{ кВ}$, для тока прямой последовательности имеем:

$$I_{MA1} = \frac{(1-a^2)\dot{E}_A}{jx_{\Sigma}^{(1-1)}} = \frac{\sqrt{3} e^{j30^\circ} j21,4}{j2,94(8,66 + 4,51n - n^2)},$$

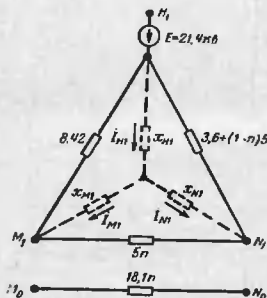


Рис. 8-5. К задаче 8-5. Схема замещения прямой (обратной) и нулевой последовательностей.

что при $n=1$ дает $I_{MA1} = 1,03e^{j30^\circ}$, ка; для других последовательностей

$$I_{MA2} = a I_{MA1} = 1,03e^{j150^\circ}, \text{ ка}$$

и

$$I_{M0} = a^2 I_{MA1} = 1,03e^{j270^\circ} = -j1,03 \text{ ка.}$$

Ток в местах замыкания на землю (он же ток в земле) при $n=1$ будет:

$$I_{MB} = -I_{NC} = I_n = 3I_{M0} = -j3 \cdot 1,03 = -j3,09 \text{ ка.}$$

Найдем распределение токов, для чего предварительно определим коэффициенты распределения в условных режимах M и N , т. е. при $n=1$ имеем:

432

со стороны трансформатора $T-1$

$$C^{(M)} = \frac{3,6+5}{17,02} = 0,505 \text{ и } C^{(N)} = \frac{3,6}{17,02} = 0,211$$

(где 17,02 — суммарная реактивность от генератора до системы); со стороны трансформатора $T-2$

$$C^{(M)} = 1 - 0,505 = 0,495;$$

$$C^{(N)} = 1 - 0,211 = 0,789.$$

Эти коэффициенты справедливы и для схемы обратной последовательности, поскольку она тождественна схеме прямой последовательности. Предшествовавший ток в фазах отсутствовал, поэтому для фазных токов со стороны трансформатора $T-1$ имеем:

$$I_A = -(C^{(M)} - C^{(N)}) I_{A0} = -(0,505 - 0,211)(-j1,03) = j0,3 \text{ ка;}$$

$$I_B = (2C^{(M)} + C^{(N)}) I_{M0} = (2 \cdot 0,505 + 0,211)(-j1,03) = -j1,26 \text{ ка;}$$

$$I_C = -(C^{(M)} + 2C^{(N)}) I_{M0} = -(0,505 + 2 \cdot 0,211)(-j1,03) = j0,96 \text{ ка.}$$

Аналогично для фазных токов со стороны трансформатора $T-2$:

$$I_A = -j0,3 \text{ ка; } I_B = -j1,83 \text{ ка; } I_C = j2,13 \text{ ка.}$$

Для симметричных составляющих напряжений в точке M имеем:

$$\dot{U}_{A1} = \dot{E}_A - I_{M1}[(a-a^2)x_{H1} + a j x_{M1}] = 21,4 + j1,03(j\sqrt{3}j1,78 + a \cdot 2,47) = 1,28 + j16 \text{ кВ;}$$

$$\dot{U}_{A2} = -I_{M2}[(a^2-a)x_{H2} + a^2 x_{M2}] =$$

$$= j1,03(-j\sqrt{3}j1,78 + a^2 \cdot 2,47) = 1,28 + j5,23 \text{ кВ;}$$

$$\dot{U}_0 = -(a^2 \dot{U}_{A1} + a \dot{U}_{A2}) = -[a^2(1,28 + j16) + a(1,28 + j5,23)] = -8,08 + j10,62 \text{ кВ.}$$

Аналогично для напряжений в точке N :

$$\dot{U}_{A1} = -0,55 + j17,28 \text{ кВ; } \dot{U}_{A2} = -0,55 + j4,12 \text{ кВ;}$$

$$\dot{U}_0 = 10,9 + j10,7 \text{ кВ.}$$

Построенные по найденным симметричным составляющим векторные диаграммы токов и напряжений приведены на рис. 8-6. Отметим, что

$$\dot{U}_{M1} - \dot{U}_{M2} = 10,9 + j10,7 + 8,08 - j10,62 \approx$$

$$\approx 18,98 \approx j_{M0} x_{M0} = -j1,03 j_{18,1} = 18,7 \text{ кВ.}$$

Изомные кривые изменения токов в зависимости от взаимного положения точек замыкания на землю представлены на рис. 8-4. Путь $(N \rightarrow M)$ и $(M \rightarrow N)$ указывают, что данная кривая отчетливо случайно перемещения точки N относительно неподвижной точ-

88 С. А. Ульянова

433

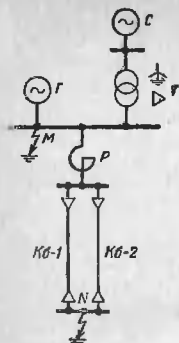


Рис. 8-7. К задаче 8-7. Исходная схема.

трансформатор $T-2$ 15 *Мва*, 37/10,5 кв, $u_k=7,5\%$;
линии $Л-1$ 6 км, $Л-2$ 8,5 км, $Л-3$ 4,4 км, $x_1=0,4$ Ом/км, для $Л-1$ и $Л-3$ $x_0=2x_1$ и для $Л-2$ $x_0=2,6 x_1$.

Для начального момента указанного двойного замыкания требуется построить векторные диаграммы токов в линиях и напряжения в точках M' , P и N' . Активными сопротивлениями, кроме заданных следует пренебречь.

Решение. Схемы замещения прямой (обратной) и нулевой последовательностей, где сопротивления в э. д. с. выражены в относительных единицах при базисных условиях, за которые приняты $S_{баз}=100$ *Мва* и $U_{баз}=U_{вр}$, показаны на рис. 8-9, б и г. Для приведенных схем прямой (обратной) последовательности в виду трехлучной звезды достаточно треугольник заменить эквивалентной звездой (рис. 8-9, в), после чего найдем:

$$x_{M1}=0,2; \quad x_{M1'}=0,146+0,056=0,202; \quad x_{N1'}=0,152+0,128=0,28.$$

Также же реактивности будут и для схемы обратной последовательности.

Из схемы нулевой последовательности (рис. 8-9, з) имеем:

$$x_{M0} = 0,202 + 0,652 + 0,256 = 1,2.$$

Находим значение реактивности

$$x_D = 3x_{L2} + x_{M2} + x_{N2} + x_{M'0} = 3 \cdot 0,2 + 0,202 + 0,28 + 1,2 = 2,28.$$

система C — источник бесконечной мощности с неизменным напряжением 230 кв;

трансформатор $T-63$ *Мва*, 230/10,5 кв, $u_k=12\%$;

реактор P 10 кв, 600 а, $x=5\%$;
кабели $КБ-1$ и $КБ-2$ одинаковые, каждый 2 км, $x_1=0,08$ Ом/км, $x_0=0,5 x_1$.

Задача 8-8

В схеме на рис. 8-9, а произошло двойное замыкание на землю — в точке M' (фаза B) и в точке N' (фаза C), при этом в каждой из них замыкание произошло через активное сопротивление $r_{г.м.1}=r_{г.м.2}=r_{г.м.3}=7,65$ Ом.

Элементы схемы на рис. 8-9, а характеризуются следующими данными: генератор G 30 *Мва*, 10,5 кв, $x''_d=0,12 \approx x'_d$ предварительно работает на холостом ходу с номинальным напряжением;

система C — источник бесконечной мощности с неизменным напряжением (15 кв);

трансформатор $T-1$ 31,5 *Мва*, 116/37/6,3 кв, $u_{вс} = 10,5\%$;

Приним $\dot{E}_A = j1$, найдем ток прямой последовательности

$$\begin{aligned} I_{MA1} &= \frac{(1-a^2)\dot{E}_A}{2 \cdot 3r_{г.м.} + j(3x_{N1} + x_{M1} + x_{N1'} + x_D)} = \\ &= \frac{(1-a^2)j1}{2 \cdot 3 \cdot 0,56 + j(3 \cdot 0,2 + 0,202 + 0,28 + 2,28)} = 0,365 \angle 75^\circ \end{aligned}$$

$$I_{M0} = a^2 I_{MA1} = a^2 \cdot 0,365 \angle 75^\circ = 0,365 \angle -45^\circ.$$

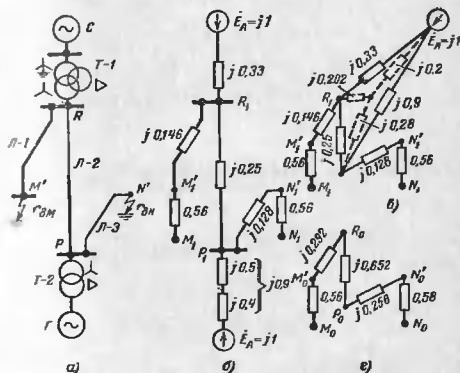


Рис. 8-9. К задаче 8-8.

а — исходная схема; б и в — схемы прямой (обратной) последовательности; г — схема нулевой последовательности.

Ток в месте замыкания

$$I_{MB} = 3 \cdot 0,365 \angle -45^\circ = 1,1 \angle -45^\circ = -I_{NC},$$

и, так

$$I_{MB} = 1,1 \cdot \frac{100}{\sqrt{3 \cdot 37}} \angle -45^\circ = 1,72 \angle -45^\circ, \text{ ка.}$$

Для определения токов в фазах линии $Л-2$ предварительно найдем для этой линии значения коэффициентов распределения в режиме M

$$K^{(M)} = 1 - \frac{0,33}{0,33 + 0,25 + 0,9} = 0,22;$$

в режиме N

$$C^{(N)} = -1 \cdot \frac{0,9}{0,33 + 0,25 + 0,9} = -0,61.$$

В нулевой последовательности, очевидно, $C_0=1$.
Искомые фазные токи линии Л-2:

$$I_A = (1 - C^{(M)} + C^{(N)}) I_{M0} = (1 - 0,22 - 0,61) 0,365 \angle -45^\circ = 0,064 \angle -45^\circ;$$

$$I_B = (1 + 2C^{(M)} + C^{(N)}) I_{M0} = (1 + 2 \cdot 0,22 - 0,61) 0,365 \angle -45^\circ = 0,304 \angle -45^\circ;$$

$$I_C = (1 - C^{(M)} - 2C^{(N)}) I_{M0} = (1 - 0,22 + 2 \cdot 0,61) 0,365 \angle -45^\circ = 0,736 \angle -45^\circ.$$

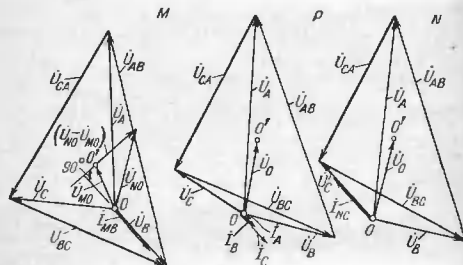


Рис. 8-10. К задаче 8-8. Векторные диаграммы токов и напряжений.

Напряжения нулевой последовательности в точках M' и N' :

$$\dot{U}_{M0} = -a^2 j + 0,365 \angle -45^\circ [3 \cdot 0,56 + j(3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,2)] = 0,37 \angle 118^\circ;$$

$$\dot{U}_{N0} = -a j - 0,365 \angle -45^\circ [3 \cdot 0,56 + j(3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,28)] = 0,65 \angle 78^\circ;$$

их разность

$$\begin{aligned} \dot{U}_{N'0} - \dot{U}_{M'0} &= 0,65 \angle 78^\circ - 0,37 \angle 118^\circ = \\ &= 0,44 \angle 45^\circ = 0,365 \angle -45^\circ \cdot 1,2 \angle 90^\circ. \end{aligned}$$

Фазные напряжения в точке M' :

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= (1 - a^2) j + \\ &+ 0,365 \angle -45^\circ [3 \cdot 0,56 + j(3 \cdot 0,2 + 0,2)] = 1,38 \angle 95,5^\circ; \\ \dot{U}_B &= 3 \cdot 0,56 \cdot 0,365 \angle -45^\circ = 0,61 \angle -45^\circ; \\ \dot{U}_C &= (a - a^2) j + \\ &+ 0,365 \angle -45^\circ [3 \cdot 0,56 + j(3 \cdot 0,2 + 0,2)] = 0,82 \angle 117^\circ. \end{aligned}$$

Аналогично определяются фазные напряжения в точке N' :

$$\dot{U}_A = 1,6 \angle 85^\circ; \dot{U}_B = 0,75 \angle -10^\circ; \dot{U}_C = 0,61 \angle 135^\circ.$$

Для перевода в именованные единицы все найденные значения фазных напряжений должны быть умножены на базисное фазное напряжение, т. е.

$$U_{ф.б} = 37 \sqrt{3} = 21,4 \text{ кВ.}$$

Требуемые векторные диаграммы токов и напряжений представлена на рис. 8-10.

Задача 8-9

Построить векторные диаграммы напряжений в точках M' и N' схемы на рис. 8-9а, считая, что замыкание на землю фазы B в точке M' произошло через активное сопротивление $r_{длм} = 2 \cdot 7,65 = 15,3 \text{ Ом}$, а в точке N' произошло металлическое замыкание на землю фазы C . Построение произвести для начального момента видящегося вида повреждения.

Задача 8-10

В схеме на рис. 8-11 произошло двойное металлическое короткое замыкание в точке B (фаза B) и N (фаза C). Используя метод спрямленных характеристик, определить фазные токи сегн

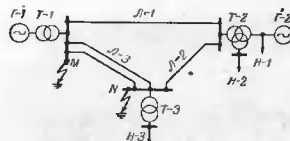


Рис. 8-11. К задаче 8-10. Исходная схема.

110 кВ для момента времени 0,3 сек после возникновения указанного замыкания. Предполагается, что данная сеть работает с заземлением вострали через дугогасящее устройство.

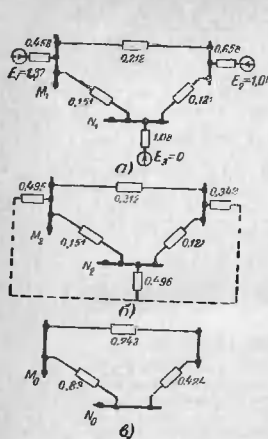


Рис. 8-12. К задаче 8-10.

а, б, в — схемы соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей.

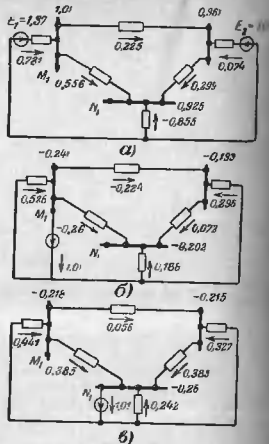


Рис. 8-13. К задаче 8-10. Токораспределение в схеме прямой последовательности.

а — режим при отсутствии замыканий; б — режим M_1 ; в — режим N_2 .

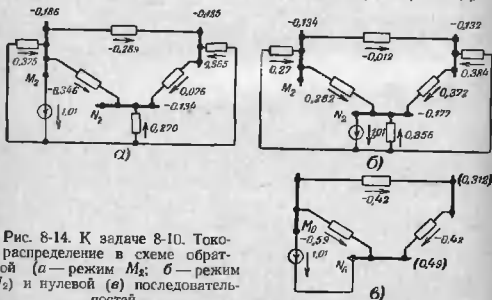


Рис. 8-14. К задаче 8-10. Токораспределение в схеме обратной (а — режим M_2 ; б — режим N_2) и нулевой (в) последовательностей.

Элементы схемы характеризуются следующими данными: генератор Г-1 125 Мва, 15,75 кв, $E=1,3$, $x_1=0,41$, $x_2=0,45$; генератор Г-2 60 Мва, 6,3 кв, $E=1,33$, $x_1=0,39$, $x_2=0,14$; относительные величины э. д. с. и реактивностей прямой последовательности генераторов приняты по соответствующим кривым (рис. П1-9,а) для $t=0,3$ сек при значении АРВ; трансформатор Т-1 120 Мва, 121/15,75 кв, $u_{\Sigma}=10,5\%$; трансформатор Т-2 60 Мва, 115/38,5/6,3 кв, $u_{BC}=17\%$, $u_{II}=10,5\%$, $u_{CH}=6\%$;

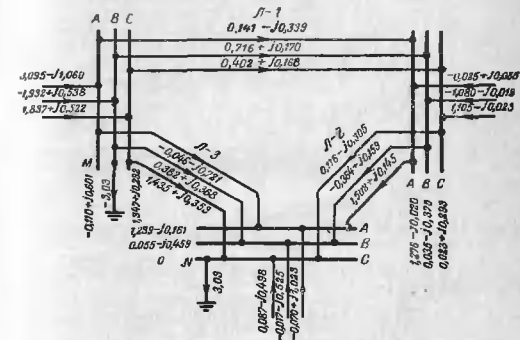


Рис. 8-15. К задаче 8-10. Фазные токи и напряжения в сети 110 кв при двойном замыкании на землю в точках М и N.

трансформатор Т-3 120 Мва, 110/11 кв, $u_{\Sigma}=10,5\%$; нагрузки Н-1 и Н-2 по 30 Мва, нагрузка Н-3 120 Мва; линии Л-1 70 км, Л-2 40 км, Л-3 100 км, $x_1=0,4$ ом/км одной цепи; для Л-1 и Л-2 $x_0=3,5\Omega$, для Л-3 $x_0=5,5\Omega$.

Решение. Проводим решение в относительных единицах при $S_{\text{б}}=100$ Мва и $U_{\text{б}}=115$ кв на стороне высшего напряжения.

После приведения всех элементов к базисным условиям (с учетом заданных коэффициентов трансформации трансформаторов) и простейших преобразований схемы отдельных последовательностей приобретают вид приведенных на рис. 8-12. Их дальнейшее преобразование к элементарному виду также не представляет труда. Конечные значения параметров таких элементарных схем получаются следующими:

$$E_M = 1,009; E_N = 0,925; x_{H1} = 0,2; x_{M1} = 0,0386; \\ x_{N1} = 0,0574; x_{12} = 0,133; x_{M2} = 0,0516; x_{N2} = 0,042 \\ \text{и } x_{MNO} = 0,485.$$

При этом модуль токов всех последовательностей в точках замыкания на землю в относительных базисных единицах составляет $I_1 = I_2 = I_0 = 1,01$.

Найдем распределение токов в сети. На рис. 8-13 показано распределение токов прямой последовательности для трех режимов,

т. е. при отсутствии замыканий (рис. 8-13,а), при условном режиме M_1 (рис. 8-13,б) и при условном режиме N_1 (рис. 8-13,в). Стрелками указаны принятые положительные направления для каждого участка схемы. Числа у узлов показывают относительные величины напряжений прямой последовательности в этих режимах.

Аналогичные режимы для схемы обратной последовательности показаны на рис. 8-14,а и б. Распределение токов нулевой последовательности приведено на рис. 8-14,в, где у узлов указаны в скобках относительные значения напряжений нулевой последовательности относительно точки M_0 .

Для получения фазных величин следует просуммировать соответствующие симметричные составляющие. Результаты такого суммирования представлены на трехлинейной схеме на рис. 8-15. Для большей наглядности построены векторные диаграммы токов в линии Л-3 и напряжений по ее концам (точки М и N), которые показаны на рис. 8-16.

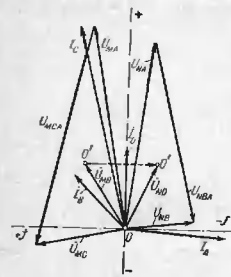


Рис. 8-16. К задаче 8-10. Векторные диаграммы токов в линии Л-3 и напряжений в точках М и N при двойном замыкании на землю.

трехлинейной схеме на рис. 8-15. Для большей наглядности построены векторные диаграммы токов в линии Л-3 и напряжений по ее концам (точки М и N), которые показаны на рис. 8-16.

Задача 8-11

В конце линии 110 кВ присоединен понижающий трансформатор Т 40 Мва, 110/6,6 кВ, $u_{\%} = 10,5\%$, Y_0/Δ -11, который работает на холостом ходу. Линия имеет длину 100 км (ее $x_1 = 0,4$ Ом/км, $x_0 = -1,36$ Ом/км); она присоединена к узлу системы С, мощность которой бесконечно велика ($x_1 = x_2 = x_0 = 0$); напряжение узла 115 кВ (рис. 8-17,а).

В конце линии произошло однофазное короткое замыкание (точка К), вследствие чего отключилась поврежденная фаза линейного выключателя. Требуется определить ток в поврежденной фазе линии и трансформатора до отключения фазы выключателя и после ее отключения.

Решение. Схемы обратной и нулевой последовательности, где реактивности элементов выражены в омах, представлены на рис. 8-17,б и в.

При отсутствии обрыва $x_{12} = x_{22} = 40$ Ом, $x_{02} = 136/32 = 26$ Ом

и величина токов $I_{H1} = I_{H2} = I_{K0} = \frac{115/\sqrt{3}}{2 \cdot 80 + 26} = 0,63$ кА;

в поврежденной фазе линии

$$I = 2 \cdot 0,63 + 0,63 \cdot \frac{26}{132} = 1,385 \text{ кА};$$

в поврежденной фазе трансформатора

$$I = 3 \cdot 0,63 - 1,385 = 0,505 \text{ кА}$$

(или иначе $I = 0,630 \cdot \frac{26}{32} = 0,505 \text{ кА}$).

После отключения фазы выключателя ток в месте короткого замыкания (он же ток в поврежденной фазе трансформатора) мож-

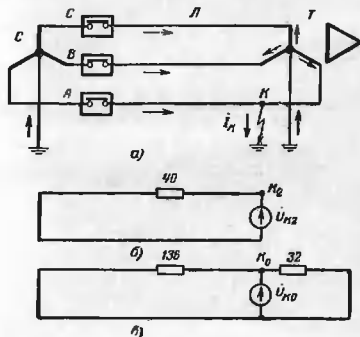


Рис. 8-17. К задаче 8-11.

а — исходная схема; б — схема обратной последовательности; в — схема нулевой последовательности.

но определить по формуле, приведенной в [Л. 12] стр. 641. Однако для рассматриваемых условий нетрудно вывести необходимое расчетное выражение.

Обратимся к схеме на рис. 8-17,а, где стрелками указаны принятые положительные направления токов. Поскольку трансформатор не нагружен и его ток намагничивания пренебрегаем, то со стороны трансформатора протекают только токи нулевой последовательности. Следовательно, для фазных токов со стороны системы после отключения фазы А линейного выключателя можно написать:

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_0 = 0; \quad (1)$$

$$I_B = a^2 I_{A1} + a I_{A2} + I_0 = -I_{K0}; \quad (2)$$

$$I_C = a I_{A1} + a^2 I_{A2} + I_0 = -I_{K0}; \quad (3)$$

Сложив (2) и (3), получим соотношение

$$I_{A1} = I_{A2} \quad (4)$$

при котором из (1) имеем:

$$I_0 = -2I_{A1} \quad (5)$$

Из (2) [или (3)] с учетом (4) и (5) находим:

$$I_{00} = -\frac{2}{3} I_{00} \quad (6)$$

и

$$I_{000} = 3I_{A1} \quad (7)$$

Из (6) следует, что токи в нейтралях системы и трансформатора имеют противоположные направления, а по величине ток в нейтрали системы $I = 3I_0 = 2I_{00} = 2I_{00}$, т. е. в 2 раза больше тока в месте короткого замыкания.

Последнее непосредственно вытекает из первого закона Кирхгофа для схемы на рис. 8-17,а, если иметь в виду, что токи фаз В и С одинаковы и каждый из них равен току в месте короткого замыкания.

Если x_1 , x_2 и x_0 — реактивности соответствующих последовательностей со стороны системы, в x_T — реактивность трансформатора, то для напряжения нулевой последовательности в месте короткого замыкания можно написать:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{00} &= \frac{1}{3} (\dot{U}_{KB} + \dot{U}_{KC}) = \\ &= \frac{1}{3} (a^2 \dot{U}_A - ja^2 I_{A1} x_1 - ja I_{A2} x_2 - j I_{00} x_0 + a \dot{U}_A - \\ &\quad - ja I_{A2} x_2 - j I_{00} x_0) = -j I_{00} x_T, \end{aligned}$$

откуда после подстановки соотношений (4), (5) и (7) и выполнения необходимых преобразований получим:

$$I_{00} = I_K = 3I_{A1} = \frac{3\dot{U}_A}{j(x_1 + x_2 + 4x_0 + 9x_T)} \quad (8)$$

где \dot{U}_A — напряжение фазы А системы.

Подставив в (8) числовые значения величин, для модуля тока найдем:

$$I_{00} = \frac{3 \cdot 115 \cdot \sqrt{3}}{40 + 40 + 4 \cdot 136 + 9 \cdot 32} = 0,22 \text{ кА,}$$

при этом ток в нейтрали системы будет:

$$I = 2 \cdot 0,22 = 0,44 \text{ кА}$$

и в нейтрали трансформатора:

$$I = 3 \cdot 0,22 = 0,66 \text{ кА.}$$

Задача 8-12

На понижающей подстанции, питающейся от системы С по однофазной линии передачи 110 кВ, установлены два трансформатора, каждый 40 Мва, 110/6,6 кВ, $u_n = 10,5\%$, $Y_0/\Delta-11$; нейтраль одного трансформатора заземлена наглухо, а другого — изолирована (рис. 8-18,а). На стороне пониженного напряжения подстанции присоединена промышленная нагрузка мощностью 50 Мва. Линия имеет

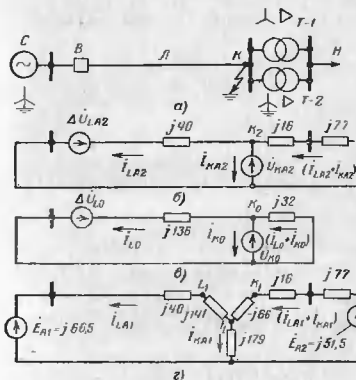


Рис. 8-18. К задаче 8-12.

а — исходная схема; б — схема обратной последовательности; в — схема нулевой последовательности; г — схема прямой последовательности.

принадлежность 100 км; ее реактивности: $x_1 = 0,4$ Ом/км и $x_0 = 1,36$ Ом/км.

Мощность системы С практически бесконечно велика ($x_1 = x_2 = x_0 = 0$); ее напряжение 115 кВ.

В конце линии (точка К) произошло короткое замыкание на землю фазы А, при этом та же фаза линейной выключателя отключилась. Требуется построить векторные диаграммы токов линии вблизи ее концов. Построение произвести для начального момента короткого замыкания, характеризуя нагрузку средними значениями в амперметрах (т. е. в относительных единицах $x'' = x_2 = 0,35$ и $E''_0 = 1$).

Решение. Схемы обратной и нулевой последовательностей приведены на рис. 8-18,б и в. Реактивности их элементов выражены в омах и приведены к стороне высшего напряжения. Два парал-

ленно работающих трансформатора в схеме обратной последовательности (рис. 8-18,б) представлены одной реактивностью.

По этим схемам находим реактивности:

$x_{KA2} = 93 \text{ ом}$ (определяется при $I_{L2} = 0$); $x_{L2} = 40 + 93 = 133 \text{ ом}$ (определяется при $I_{KA2} = 0$); $x_{KL2} = 93 \text{ ом}$ (определяется как величина напряжения в точке K_2 при $I_{KA2} = 0$ и $I_{LA2} = 1$).

Аналогично $x_{KB0} = x_{KL0} = 32 \text{ ом}$ и $x_{L0} = 136 + 32 = 168 \text{ ом}$.

Значения коэффициентов производных уравнений прямой последовательности для заданного вида сложной несимметрии будут:

$$x_K = x_{KA2} + x_{KB0} - \frac{(x_{KL2} - x_{KL0})^2}{x_{L2} + x_{L0}} = 93 + 32 - \frac{(93 - 32)^2}{133 + 168} = 112,6 \text{ ом};$$

$$x_L = \frac{x_{L2} x_{L0}}{x_{L2} + x_{L0}} = \frac{133 \cdot 168}{133 + 168} = 74,5 \text{ ом};$$

$$x_{KL} = -\frac{x_{KL2} x_{L0} + x_{KL0} x_{L2}}{x_{L2} + x_{L0}} = -\frac{93 \cdot 168 + 32 \cdot 133}{133 + 168} = -66 \text{ ом}.$$

Реактивности производной схемы составляют:

$$x_K - x_{KI} = 112,6 - (-66) = 179 \text{ ом}; \quad x_L - x_{LI} = 74,5 - (-66) = 141 \text{ ом}.$$

Вводя ее в схему прямой последовательности, получим схему на рис. 8-18,а, где источники введены своими фазными э. д. с. (K_0). Результатирующие э. д. с. и реактивность этой схемы получаются следующими:

$$\dot{E}_{A\Sigma} = j53,3 \text{ кв} \text{ и } x_{\Sigma} = 202 \text{ ом}.$$

Симметричные составляющие тока в месте короткого замыкания будут:

$$I_{KA1} = I_{KA2} = I_{K0} = \frac{j53,3}{j202} \cdot 10^3 = 265 \text{ а}.$$

Ток в месте короткого замыкания $I_{KA} = 3 \cdot 265 = 795 \text{ а}$.

Найдем распределение симметричных составляющих тока.

Напряжения прямой последовательности точки F_1 в схеме на рис. 8-18,а

$$\dot{U}_{FA1} = 179 \cdot 265 = 47,100 \text{ в}.$$

Токи прямой последовательности (в соответствии с принятыми на рис. 8-18,а положительными направлениями) в начале линии

$$I_{LA1} = \frac{j(47,100 - 66,500)}{j(40 + 141)} = -105 \text{ а};$$

в конце линии

$$I_{A1} = 265 - 105 = 160 \text{ а}.$$

Напряжение прямой последовательности в месте короткого замыкания

$$\dot{U}_{KA1} = j47,100 + j(-66 \cdot 160) = j36,500 \text{ а};$$

в же точки L_1

$$\dot{U}_{LA1} = j47,100 - j(-141 \cdot 105) = j61,900 \text{ в}.$$

Симметричные составляющие разности фазных напряжений в месте замыкания

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{L0} = j(61,900 - 36,500) = j25,400 \text{ в}.$$

В соответствии со схемой на рис. 8-18,б можно написать:

$$j25,400 = -j40 I_{LA2} - j93(265 + I_{LA2}), \text{ откуда } I_{LA2} = 6 \text{ а, и, следовательно, в конце линии } I_{A2} = 265 + 6 = 271 \text{ а}.$$

Из граничного условия для разомкнутой фазы линии имеем:

$$I_{L0} = -(-105 + 6) = 99 \text{ а};$$

соответственно в конце линии

$$I_0 = 265 + 99 = 364 \text{ а}.$$

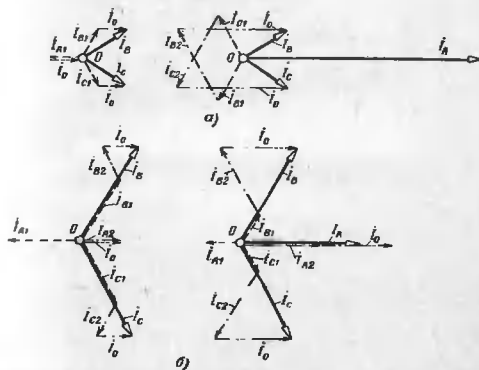


Рис. 8-19. К задаче 8-12. Векторные диаграммы токов и напряжений.

Можно убедиться, что ток поврежденной фазы в конце линии $I_A = 160 + 271 + 304 = 735$ а, т. е., как и следовательно ожидать, он равен току в месте короткого замыкания.

На рис. 8-19,а представлены высокие векторные диаграммы токов (слева — в начале линии, справа — в конце линии).

Для сравнения на рис. 8-19,б представлены аналогичные векторные диаграммы для последующих моментов времени, когда в схеме прямой последовательности нагрузка учитывается реактивностью $x_1=1,2$ (в относительных единицах) и з. д. с. $E=0$. В этом случае ток в месте короткого замыкания снижается до $I_{KA}=390$ а и симметричные составляющие тока фазы А:

в начале линии

$$I_1 = -240 \text{ а}, I_2 = 123 \text{ а} \text{ и } I_0 = 117 \text{ а};$$

в конце линии

$$I_1 = -110 \text{ а}, I_2 = 253 \text{ а} \text{ и } I_0 = 247 \text{ а}.$$

Задача 8-13

Блок, состоящий из генератора Г, трансформатора Т, линии Л и автотрансформатора АТ, присоединен к узлу системы С, напря-

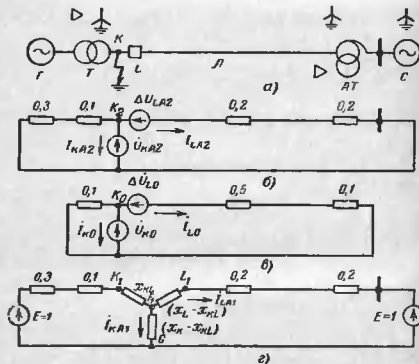


Рис. 8-20. К задаче 8-13.

а — исходная схема; б — схема обратной последовательности; в — схема нулевой последовательности; г — схема прямой последовательности.

жение в котором практически незаметно и составляет 230 кВ (рис. 8-20,а).

На стороне высшего напряжения трансформатора Т произошло однофазное короткое замыкание (точка К), при этом однофаз-

но отключалась поврежденная фаза линейного выключателя. Требуется определить ток в месте короткого и фазные токи трансформатора на стороне высшего напряжения, а также фазные напряжения в точке К. По найденным величинам построить векторные диаграммы токов и напряжений. Решение провести для начального момента заданного вида повреждения, считая, что генератор предварительно работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Элементы схемы характеризуются следующими данными:

генератор Г 58 Мва, 10,5 кВ, $x'_d = 0,29 \cdot x_d$;

трансформатор Т 60 Мва, 115/10,5 кВ, $u = 10\%$; $Y_0/\Delta-11$;

автотрансформатор АТ 60 Мва, 230/115/6,3 кВ, $u_{BC} = 20\%$,

$u_{HI} = 10\%$, $u_{CH} = 10\%$, $Y_0/\Delta-11$;

линия Л 110 км, $x_1 = 0,4$ ом/км, $x_0 = 1,0$ ом/км (линия с хорошо проводящими тросами);

нейтраль системы С заземлена наглухо, ее реактивности $x_1 = x_2 = x_0 = 0$.

Решение. Решение проведем с использованием производной схемы прямой последовательности. Для этого обратимся к схемам обратной и нулевой последовательностей (рис. 8-20,б и в), где реактивности элементов выражены в относительных единицах при базисных условиях, за которые приняты $S_0 = 60$ Мва и $U_0 = U_{115}$, при этом базисный ток на стороне 115 кВ составляет $I_0 = 300$ а.

Найдем значения коэффициентов частных уравнений (формы Z) для схем обратной и нулевой последовательности.

Из схемы на рис. 8-20,б имеем:

$$x_{K2} = 0,3 + 0,1 = 0,4 \text{ (определяется при } I_{LA2} = 0);$$

$$x_{L2} = 0,3 + 0,1 + 0,2 + 0,2 = 0,8 \text{ (определяется при } I_{KA2} = 0);$$

$$x_{K12} = 0,1 + 0,3 = 0,4 \text{ (определяется как величина напряжения после К при } I_{KA2} = 0 \text{ и } I_{LA2} = 1).$$

Аналогично из схемы на рис. 8-20,в находим:

$$x_{K0} = 0,1 = x_{KL0} \text{ и } x_{L0} = 0,7.$$

Для рассматриваемого случая двойной несимметрии значения коэффициентов производных уравнений прямой последовательности будут:

$$x_K = x_{K2} + x_{K0} - \frac{(x_{KL2} - x_{KL0})^2}{x_{L2} + x_{L0}} =$$

$$= 0,4 + 0,1 - \frac{(0,4 - 0,1)^2}{0,8 + 0,7} = 0,44;$$

$$x_L = \frac{x_{L2} x_{L0}}{x_{L2} + x_{L0}} = \frac{0,8 \cdot 0,7}{0,8 + 0,7} = 0,374;$$

$$x_{KL} = -\frac{x_{KL2} x_{L0} + x_{KL0} x_{L2}}{x_{L2} + x_{L0}} = -\frac{0,4 \cdot 0,7 + 0,1 \cdot 0,8}{0,8 + 0,7} = -0,24.$$

Цифры производной схемы будут:

$$x_K - x_{KL} = 0,44 - (-0,24) = 0,68;$$

$$x_L - x_{KL} = 0,374 - (-0,24) = 0,614;$$

$$x_{KL} = -0,24.$$

Вводя эти элементы в схему прямой последовательности, получим схему на рис. 8-20а. Найдем ее результирующую реактивность

$$x_{\Sigma} = 0,4 - 0,24 = 0,16; \quad x_c = 0,4 + 0,614 = 1,014; \\ x_{\Sigma} = (0,16 // 1,014) + 0,68 = 0,82.$$

Ток прямой последовательности в месте короткого замыкания (принимаем $\dot{E}_A = j1$)

$$I_{KA1} = \frac{j1}{j0,82} = 1,22,$$

и ток в месте короткого замыкания

$$I_{KA} = 3 \cdot 1,22 = 3,66 \text{ или } I_{KA} = 3,66 \cdot 300 \approx 1100 \text{ а.}$$

Найдем распределение токов и напряжений.

Напряжение прямой последовательности в точке F_1 (рис. 8-20, в) $\dot{U}_{A1} = j0,68 \cdot 1,22 = j0,83$.

Ток прямой последовательности трансформатора

$$I_{A1} = \frac{j(1 - 0,83)}{j0,16} = 1,06;$$

линии

$$I_{A1} = 1,06 - 1,22 = -0,16.$$

Напряжение прямой последовательности в месте короткого замыкания

$$\dot{U}_{KA1} = j0,83 - j0,24 \cdot 1,06 = j0,575;$$

за обрывом (точка L_1)

$$\dot{U}_{A1} = j0,83 + j0,614 \cdot 0,16 = j0,93.$$

Симметричные составляющие разности фазных напряжений в месте разрыва

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{LD} = j(0,575 - 0,93) = -j0,355.$$

Зная $\Delta \dot{U}_{LA2}$ и I_{KA2} , легко определить по схеме на рис. 8-20, б

ток I_{LA2} :

$$-j0,353 = -j0,4 I_{LA2} - j0,4(1,22 + I_{LA2}),$$

откуда

$$I_{LA2} = -0,17.$$

Напряжением обратной последовательности в месте короткого замыкания составляет:

$$-\dot{U}_{KA2} = -j0,4(1,22 - 0,17) = -j0,42.$$

Составляющие нулевой последовательности \dot{I}_{10} и \dot{U}_{10} аналогичным образом можно определить, используя схему на рис. 8-20, в.

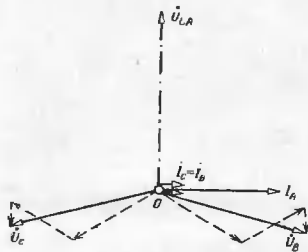


Рис. 8-21. К задаче 8-13. Векторные диаграммы токов и напряжений.

Однако проще их определить по граничным условиям, т. е.

$$I_{L3} = -(I_{LA1} + I_{LA2}) = -(-0,16 - 0,17) = 0,33$$

$$\dot{U}_{10} = -(\dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{KA2}) = -(j0,575 - j0,42) = -j0,155.$$

Фазные токи трансформатора на стороне высшего напряжения будут:

$$I_A = (1,22 - 0,16) + (1,22 - 0,17) + (1,22 + 0,33) = 3,66;$$

$$I_B = a^2(1,22 - 0,16) + a(1,22 - 0,17) + (1,22 + 0,33) = 0,5;$$

$$I_C \approx I_B = 0,5$$

и

$$I_A = 3,66 \cdot 300 = 1100 \text{ а и } I_B \approx I_C = 160 \text{ а.}$$

На рис. 8-21 представлена векторная диаграмма токов трансформатора. Там же построена векторная диаграмма напряжений в месте короткого замыкания. Пунктиром с точкой проведен вектор напряжения фазы А за местом разрыва.

Заметим, что при отсутствии разрыва ток в месте короткого замыкания составляет $I_K = 1850 \text{ а}$, т. е. больше на 68%.

Задача 8-14

Для условий предыдущей задачи определить ток в месте короткого замыкания, используя для данного вида повреждения расчетную формулу для тока прямой последовательности.

Решение. В соответствии с расчетной формулой для данного вида повреждения

$$I_{кЛ1} = \frac{\dot{E}_A}{j(x_{\Sigma}^{(1)} + \alpha x_{L1})}$$

предварительно находим:

результатирующую реактивность схемы при однофазном коротком замыкании при отсутствии обрыва, т. е. согласно схемам на рис. 8-20, б и в

$$x_{\Sigma}^{(1)} = 2 \cdot \frac{0,4}{2} + (0,1 // 0,6) = 0,486;$$

значение реактивности

$$x_{L1} = \frac{x_{L1} x_{L0}}{x_{L1} + 2x_{L0}} = \frac{0,8 \cdot 0,7}{0,8 + 2 \cdot 0,7} = 0,254;$$

значение коэффициента

$$\alpha = \left(\frac{x_{K L0}}{x_{L0}} + 2 \frac{x_{K L1}}{x_{L1}} \right)^2 = \left(\frac{0,1}{0,7} + 2 \frac{0,4}{0,8} \right)^2 = 1,3.$$

Все участвующие в этих выражениях реактивности определены в решении предыдущей задачи.

Ток прямой последовательности в месте короткого замыкания будет:

$$I_{кЛ1} = \frac{jI}{j(0,486 + 1,3 \cdot 0,254)} = 1,22$$

и искомый ток

$$I_{кЛ} = 3 \cdot 1,22 = 3,66 \text{ или } I_{кЛ} = 3,66 \cdot 300 \approx 1100 \text{ а,}$$

т. е., как и следовало ожидать, та же величина, которая была найдена ранее.

Задача 8-15

Для схемы на рис. 8-20, а и при исходных данных задачи 8-13, считая, что однофазное короткое произошло на выводе линейного выключателя в сторону линии и эта фаза выключателя отключилась, требуется определить начальное значение переходного тока в месте короткого и его распределение между нейтралью трансформатора Т и автотрансформатора АТ. Сопоставить полученные величины с их значениями при отсутствии обрыва.

452

Задача 8-16

Представленный на схеме рис. 8-20, а блок передает в систему мощность 54 Мвт при $\cos \varphi = 1$ на приемном конце. Параметры элементов блока те же, что и в задаче 8-13.

Для случая однофазного короткого замыкания в точке К с одновременным отключением той же фазы линейного выключателя требуется определить возможный диапазон изменения фазных токов трансформатора в связи с изменением углового сдвига переходной э. д. с. генератора относительно напряжения системы. Считать, что модуль переходной э. д. с. генератора сохраняется неизменным.

Решение. Расчет проводим в относительных единицах при принятых в решении задачи 8-13 базисных условиях, т. е. $S_0 = 60 \text{ Мва}$ и $U_0 = U_{ср}$.

Относительная величина предшествующего нагрузочного тока составляет:

$$I = \frac{54}{60} = 0,9.$$

Приближенное значение переходной э. д. с. генератора

$$E' = \sqrt{1^2 + (0,9 \cdot 0,8)^2} = 1,23,$$

где $x_{\Sigma} = 0,3 + 0,1 + 0,2 + 0,2 = 0,8$ — суммарная переходная реактивность блока в нормальном режиме.

Из выражения активной мощности в нормальном режиме находим начальное значение $\sin \delta'_0$:

$$P_0 = 0,9 = \frac{1,23 \cdot 1}{0,8} \sin \delta'_0, \text{ откуда } \sin \delta'_0 = 0,59.$$

В соответствии со схемой на рис. 8-20, г, где

$$x_{KL} = -0,24; x_n - x_{KL} = 0,68 \text{ и } x_L - x_{KL} = 0,614,$$

находим взаимную реактивность между генератором и системой при рассматриваемых аварийных условиях

$$x'_{г.с} = (0,4 - 0,24) + (0,4 + 0,614) + \frac{(0,4 - 0,24)(0,4 + 0,614)}{0,68} = 1,41.$$

Максимальная мощность, которая может быть передана в аварийном режиме, составляет:

$$P_{\text{макс}} = \frac{1,23 \cdot 1}{1,41} = 0,87.$$

Величина отношения

$$T = \frac{P_0}{P_{\text{макс}}} = \frac{0,9}{0,87} \approx 1.$$

453

Обращаясь к кривым на рис. П-10,в (для $\sin \delta'_0=0,6$), видим, что при $T=1$ и достаточной длительности короткого замыкания генератор выпадает из синхронизма.

Для определения искомого диапазона изменения фазных токов, очевидно, следует рассмотреть два крайних случая, когда $\delta'=180^\circ$ и $\delta'=0$.

При $\delta'=180^\circ$, т. е. $E'_{\dot{A}} = -j1,23$ и $\dot{U}_{\dot{A}C} = j1$, эквивалентная

э. д. с. схемы на рис. 8-20,а будет:

$$\dot{E}_{\dot{B}A} = \frac{-j1,23j1,014 + j1j0,16}{j(1,014 + 0,16)} = -j0,93.$$

Ток прямой последовательности в месте короткого замыкания

$$I_{KA1} = \frac{-j0,93}{j0,82} = -1,13,$$

где $j0,82$ — результирующая реактивная схема на рис. 8-20,а относительно точки короткого замыкания.

Ток прямой последовательности трансформатора составляет:

$$I_{A1} = \frac{-j1,23 - (-1,13j0,68)}{j(0,4 - 0,24)} = -2,87;$$

напряжение прямой последовательности в месте короткого замыкания

$$\dot{U}_{KA1} = -j1,23 - (-2,87j0,4) = -j0,08.$$

Ток прямой последовательности в линии

$$I_{LA1} = -2,87 - (-1,13) = -1,74.$$

Напряжение прямой последовательности за обрывом

$$\dot{U}_{LA1} = -1,13j0,68 - (-1,74j0,614) = j0,3.$$

Симметричные составляющие разности фазных напряжений в месте обрыва

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{L0} = -0,08 - 0,3 = -0,38.$$

Из уравнения, составленного для схемы на рис. 8-20, б,

$$-j0,38 = -j0,8I_{LA2} - j(-1,13 \cdot 0,4)$$

выводим:

$$I_{LA2} = 1,04.$$

Из граничного условия имеем:

$$I_{L0} = -(-1,74 + 1,04) = 0,7.$$

Таким образом, модуль тока в здоровых фазах (B и C) будет:

$$I_B = I_C = |a^2(-1,74) + a \cdot 1,04 + 0,7| = 2,62$$

и в поврежденной фазе трансформатора $I_A = 3 \cdot 1,13 = 3,39 = I_K$.

Аналогичный подсчет при $\delta'=0$ дает:

$$I_B = I_C = 0,5 \text{ и } I_K = I_A = 4,38.$$

Следовательно, фазные токи могут изменяться в диапазонах:

$$I_B = I_C = 0,5 \div 2,62 \text{ или } 150 \div 786 \text{ а;}$$

$$I_K = I_A = 3,39 \div 4,38 \text{ или } 1017 \div 1314 \text{ а.}$$

Ток в фазе A линии, разумеется, отсутствует, поскольку данная фаза имеет разрыв.

Отметим, что в здоровых фазах ток (уравнительный) достигает наибольшей величины при $\delta'=180^\circ$, при этом ток в месте короткого замыкания, напротив, имеет свое наименьшее значение. В данном случае диапазон изменения тока в здоровых фазах значительно больше, чем диапазон изменения тока в месте короткого замыкания.

Задача 8-17

В условии задачи 8-16 внесено единственное изменение, а именно, однофазное короткое замыкание в схеме на рис. 8-20,а производится на выводе линейного выключателя в сторону линии. При этом, как и в задаче 8-16, эта фаза выключателя отключается.

Требуется определить наименьшую величину тока в месте короткого замыкания, произведя учет сдвига переходной э. д. с. генератора относительно напряжения системы.

Задача 8-18

Используя метод расчетных кривых, определить наименьшую величину тока в месте однофазного короткого замыкания в точке K схемы на рис. 8-22,а при одновременном отключении той же фазы линейного выключателя B .

Схема на рис. 8-22,а та же, что и на рис. 8-20,а. Данные ее элементов сохраняются теми, которые указаны в условии задачи 8-13.

Решение. Для решения используем составленную в решении задачи 8-13 схему прямой последовательности, включающую в себя преложенную производную схему прямой последовательности. Такая схема показана на рис. 8-20,б и повторно представлена на рис. 8-22,б. Реактивности ее элементов выражены в относительных единицах при базисных условиях, за которые приняты $S_0=60 \text{ Mva}$ $U_0=U_{\text{ср}}$ на каждой ступени напряжения.

Результующая реактивность схемы на рис. 8-22,б составляет:

$$x_{\Sigma} = 0,82,$$

при этом реактивность ветви генератора до точки F_1

$$x_{\Gamma} = 0,3 + 0,1 - 0,24 = 0,16$$

и ветви системы до той же точки

$$x_{\text{С}} = 0,2 + 0,2 + 0,614 = 1,014.$$

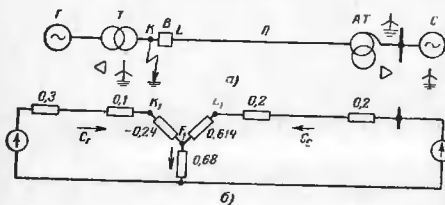


Рис. 8-22 К задаче 8-18.

а — исходная схема; б — дробная схема прямой последовательности.

Коэффициенты распределения прямой последовательности для этих ветвей будут:

$$C_{\Gamma} = \frac{1,014}{0,16 + 1,014} = 0,875 \text{ и } C_{\text{С}} = 1 - 0,875 = 0,125.$$

Расчетная реактивность заданного гидрогенератора 58 *Мва* без демпферных обмоток составляет:

$$x_{\text{расч}} = \frac{0,82 \cdot 58}{0,875 \cdot 60} = 0,905.$$

Реактивность от системы до точки нулевого потенциала в схеме на рис. 8-22,б

$$x_{\text{ФЛ}} = \frac{0,82}{0,125} = 6,55.$$

По кривым на рис. П-8 для $x_{\text{расч}} = 0,905$ находим наименьшее значение тока прямой последовательности $I_1 = 1,11$, которое после пересчета к базисному тону будет:

$$I_1 = 1,11 \cdot \frac{58}{60} = 1,07.$$

Ток прямой последовательности в месте короткого замыкания будет:

$$I_{1\text{к}} = 1,07 + \frac{1}{6,55} = 1,22.$$

Искомый ток в месте короткого замыкания

$$I_{\text{к}} = 3 \cdot 1,22 \cdot 300 = 1100 \text{ а,}$$

где

$$I_0 = \frac{60 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 115} = 300 \text{ а.}$$

Следует отметить, что совпадение найденной величины тока с полученной величиной в решении задачи 8-13 является лишь случайным.

Задача 8-19

Найти токи в нейтральной трансформатора T и автотрансформатора AT схемы на рис. 8-22,а при заданных условиях предыдущей задачи.

Задача 8-20

В схеме на рис. 8-23,а в конце воздушной линии (точка K) произошло однофазное короткое замыкание, при этом через 1 *сек* выключатель B поврежденной фазы отключился, затем спустя еще 1 *сек* произошло отключение двух других фаз выключателя B .

Для указания переходного процесса требуется построить кривую изменения во времени действующего значения периодической составляющей тока в месте короткого замыкания, а также на фазной схеме показать распределение фазных токов линии и обмоток трансформаторов (и в нейтральной последней) в момент $t = 1$ *сек* до отключения выключателя поврежденной фазы и после его отключения.

Элементы схемы на рис. 8-23,а характеризуются следующими данными:

генератор G 127,8 *Мва*, 13,8 *кв*, $x'_d = 0,2$, $x_d = 0,52$, $x_2 = 0,2$, $T_{\text{дп}} = 3,8$ *сек*, $I_{\text{нр}} = 3,2$, $T_c = 0$, АРН включено; предвзвешенно работающий на холостом ходу с номинальным напряжением; трансформатор $T-1$ 125 *Мва*, 230/13,8 *кв*, $u_{\text{н}} = 12\%$, $Y_0/\Delta-11$; трансформатор $T-2$ 80 *Мва*, 230/10,5 *кв*, $u_{\text{н}} = 12\%$, $Y_0/\Delta-11$; линия L 16 *км*, $x_1 = 0,407$ *ом/км*, $x_0 = 3,3$ *ом/км*.

Решение. Проведем решение в именованных единицах, относим все элементы к ступени напряжения линии передачи (230 *кв*). Схемы обратной и нулевой последовательностей представлены соответственно на рис. 8-23,б и в. До отключения фазы выключателя B $\Delta U_{\text{Л}} = \Delta \dot{U}_{\text{Л}} = 0$ и значения реактивностей будут:

$$x_{\Sigma} = 83 + 50,8 + 6,5 = 140,3 \text{ ом; } x_{0\Sigma} = (50,8 + 21,5)/79,5 =$$

$$= 37,8 \text{ ом.}$$

Для прямой последовательности до отключения фазы выключателя имеем:

$$x'_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = 140,3 \text{ ом} \text{ и } x_{1\Sigma} = 216 + 50,8 + 6,5 = 273,3 \text{ ом.}$$

Значения токов до отключения фазы выключателя:

$$I_{K1} = \frac{230/\sqrt{3}}{2 \cdot 140,3 + 37,8} = \frac{132}{318,4} = 0,415 \text{ кА};$$

$$I_{K1'} = \frac{3,2 \cdot 230/\sqrt{3}}{273,3 + 140,3 + 37,8} = \frac{8,2 \cdot 132}{451,4} = 0,935 \text{ у.а.}$$

Напряжения прямой последовательности генератора:

$$U_{11} = 0,415(50,8 + 6,5 + 140,3 + 37,8) = 98 \text{ кВ}; \text{ аналогично } U_{11'} = 220 \text{ кВ.}$$

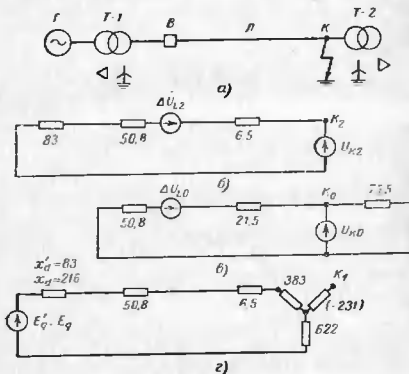


Рис. 8-23. К задаче 8-20.

а — исходная схема; б — схема обратной; в — нулевой и в — прямой последовательностей.

Напряжение прямой последовательности генератора достигнет нормального значения (его приведенная величина $\frac{230}{\sqrt{3}} = 132 \text{ кВ}$) в момент t , определяемый из уравнения

$$132 = 220 + (98 - 220) e^{-t/2,7},$$

откуда $t = 0,86 \text{ сек.}$, т. е. режим нормального напряжения генератора наступает прежде, чем происходит отключение фазы выключателя.

В последнем уравнении постоянная времени определена из выражения

$$T_d = T_{10} \frac{x'_{d\Sigma}(t)}{x'_{d\Sigma}} = 3,8 \frac{318,4}{451,4} = 2,7 \text{ сек.}$$

Таким образом, величина тока короткого замыкания к $t \geq 0,86 \text{ сек}$ достигнет

$$I_{K1} = \frac{132}{318,4 - 83} = 0,56 \text{ кА}$$

и переходная э. д. с. в момент отключения фазы выключателя будет

$$E'_{q0} = 132 + 0,56 \cdot 83 = 178,5 \text{ кВ.}$$

Следовательно, в интервале от 0 до 0,86 сек ток в месте короткого возрастает по экспоненте с постоянной времени $T_d = 2,7 \text{ сек}$ от $I'_{K1} = 3 \cdot 0,415 = 1,245 \text{ кА}$ до $I_{K1} = 3 \cdot 0,56 = 1,68 \text{ кА}$, а в интервале от 0,86 до 1 сек остается неизменным и равным $I_{K1} = 1,68 \text{ кА}$. Эта закономерность представлена соответствующим участком кривой на рис. 8-24. Там же дополнительно проведены кривые изменения по времени переходной э. д. с. E'_{q0} и напряжению прямой последовательности U_1 генератора.

После отключения фазы выключателя для составления производной схемы прямой последовательности из схем на рис. 8-23, б в имеем:

$$x_{10} = x_{L1} = x_{K12} = \infty; \quad x_{K0} = 79,5 \text{ ом}; \quad x_{L0} = 50,8 + 21,5 + 79,5 = 151,8 \text{ ом} \text{ и } x_{K10} = 79,5 \text{ ом.}$$

Ускоряя получаемые неопределенности в выражениях для x_{K1} и x_{K1L} , найдем:

$$x_{K1} = 390,3 \text{ ом}; \quad x_{L1} = 151,8 \text{ ом} \text{ и } x_{K1L} = -231,3 \text{ ом.}$$

Для трехлучевой производной схемы прямой последовательности имеем:

$$x_{K1} - x_{K1L} = 390,3 + 231,3 = 621,6 \approx 622 \text{ ом};$$

$$x_{L1} - x_{K1L} = 151,8 + 231,3 = 383,1 \approx 383 \text{ ом};$$

$$x_{K1L} = -231,3 \approx -231 \text{ ом.}$$

Внеся эту схему в схему прямой последовательности (рис. 8-23, в), найдем результирующие реактивности:

$$x'_{1\Sigma} = 83 + 50,8 + 6,5 + 383 + 622 = 1,145 \text{ ом};$$

$$x_{2\Sigma} = 216 + 50,8 + 6,5 + 383 + 622 = 1,278 \text{ ом.}$$

Ток прямой последовательности в момент отключения фазы выключателя составляет

$$I_{n1} = \frac{178,5}{1145} = 0,155 \text{ кА},$$

и напряжение прямой последовательности генератора в этот момент

$$\dot{U}_1 = 0,155 (1145 - 83) = 165 \text{ кВ}$$

или

$$U_1 = \sqrt{3} \cdot 165 \cdot \frac{13,8}{230} = 17,1 \text{ кВ (линейное напряжение)}.$$

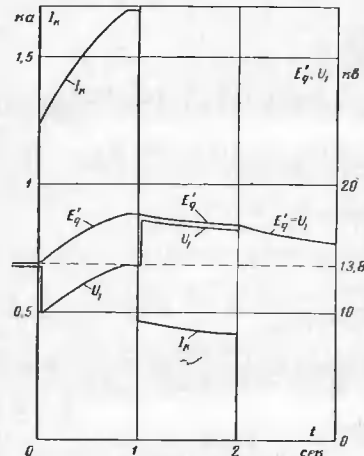


Рис. 8-24. К задаче 8-20. Кривые изменения тока I_n , э. д. с. E'_q и напряжения прямой последовательности U_1 генератора в зависимости от времени.

Снижение тока прямой последовательности будет происходить по экспоненте с постоянной времени

$$T'_{e1} = 3,8 \cdot \frac{1145}{1278} = 3,4 \text{ сек.}$$

стремясь в пределе к

$$I_{n1} = \frac{132}{1278} = 0,103 \text{ кА}.$$

Ток прямой последовательности через 1 сек после отключения фазы выключателя

$$I_{n1} = 0,103 + (0,155 - 0,103) e^{-1/3,4} = 0,142 \text{ кА}.$$

Таким образом, в интервале от 1 до 2 сек ток в месте короткого замыкания изменится от $I_n = 3 \cdot 0,155 = 0,465 \text{ кА}$ до $I_n = 3 \cdot 0,142 = 0,426 \text{ кА}$.

После отключения короткого замыкания напряжение генератора составляет:

$$\dot{U} = E'_q = 0,142 \cdot 1145 = 162,5 \text{ кВ}$$

или

$$U = E'_q = \sqrt{3} \cdot 162,5 \cdot \frac{13,8}{230} = 16,9 \text{ кВ (линейное)},$$

и по экспоненте с постоянной времени $T_{10} = 3,8 \text{ сек}$ оно будет затухать до своего номинального значения 13,8 кВ.

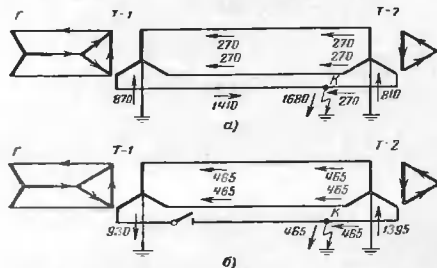


Рис. 8-25. К задаче 8-20. Распределение токов через 1 сек. а — до отключения фазы выключателя; б — после отключения фазы выключателя.

Полученные закономерности изменения тока I_n , напряжения U_1 и э. д. с. E'_q генератора представлены соответствующими кривыми на рис. 8-24.

Распределение токов в фазах линии и трансформаторов в моменты до и после отключения фазы выключателя показано на трехлинейных схемах рис. 8-25, а и б. Интересно сопоставить величины и направления токов в нейтралах обоих трансформаторов.

Как видно, несмотря на то, что после отключения фазы выключателя ток в месте короткого замыкания резко уменьшился, токи в обеих нейтралях, напротив, возросли; при этом в нейтрали трансформатора $T-1$ ток меняет свое направление.

Задача 8-21

В схеме на рис. 8-26 линия передачи работает в неполнофазном режиме; одна ее фаза отключена и наглухо заземлена с обоих концов. На подстанции за понижающим трансформатором $T-2$ 60 *Мва*, 230/10,5 *кв*, $u_n=12\%$, $Y_0/\Delta-11$ приключена нагрузка мощностью 71 *Мва*. Остальные элементы схемы характеризуются следующими данными:



Рис. 8-26. К задаче 8-21. Исходная схема.

генератор G 127,8 *Мва*, 13,8 *кв*, $x_0=0,52$, $x_2=0,147$, АРВ включено, $I_{нр}=3,1$;

трансформатор $T-1$ 125 *Мва*, 230/13,8 *кв*, $u_n=12\%$, $Y_0/\Delta-11$;

линия передачи L 86 *км*, $x_1=0,407$ *ом/км*, $x_0=3,3 x_1$.
Для нагрузки принять средние параметры, т. е. $x_1=1,2$ и $x_2=0,35$, считая их отнесенными к заданной мощности нагрузки.

При замыкании на землю отключенной фазы трансформатора $T-2$ на стороне 230 *кв* требуется определить установившийся ток в фазах линии и в нейтралях обоих трансформаторов.

Задача 8-22

На рис. 8-27,а показана схема станции, которая через двухцепную линию передачи и автотрансформатор AT связана с крупной электрической системой C . Параметры элементов этой схемы следующие:

генераторы $G-1$ и $G-2$ одинаковые, каждый 58,8 *Мва*, 10,5 *кв*, $x_2=0,143$; работают с возбуждением $I_{нр}=2,2$, АРВ включено;

трансформаторы $T-1$ и $T-2$ одинаковые, каждый 60 *Мва*, 115/37/10,5 *кв*, $u_{BC}=17\%$, $u_{BH}=10,5\%$, $u_{CH}=6,5\%$.

$Y_0/\Delta-12,11$;

автотрансформатор AT 125 *Мва*, 230/115/6,3 *кв*, $u_{BC}=14,6\%$;
 $u_{CH}=29,2\%$, $u_{BH}=43,8\%$; $Y_0/\Delta-11$;

линия 60 *км*, $x_1=0,4$ *ом/км* одной цепи, $x_0=3,5 x_1$ (без учета другой цепи), $x_{0-н}=2x_1$;

нагрузки $H-1$ и $H-2$ одинаковые, каждая 10 *Мва*, $H-3$ 16 *Мва*; их реактивности, отнесенные к своим мощностям, составляют $x_1=1,2$ и $x_2=0,35$.

Система C — напряжение поддерживает практически неизменным и равным 230 *кв*; реактивности $x_1=x_2=0$ и $x_0=62$ *ом*.

На расстоянии 20 *км* от станции на одной цепи линии оборвался фазный провод и его конец в сторону станции замкнулся на землю, в то время как другой конец остался изолированным (рис. 8-27,а). Для момента $t=1$ *сек* после возникновения указанного повреждения требуется построить векторные диаграммы токов неповрежденной цепи и напряжений на шинах станции (точка N). Решение провести с использованием метода спрямленных характеристик.

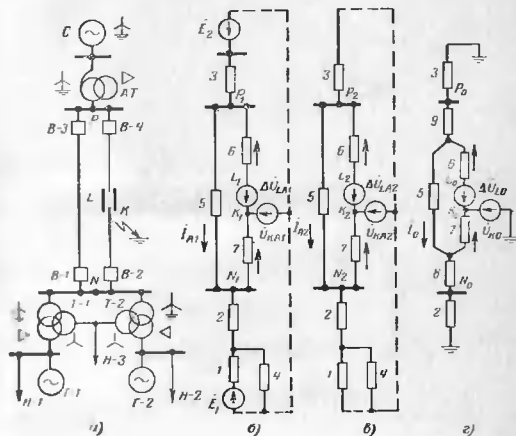


Рис. 8-27. К задаче 8-22.

а — исходная схема; б — схема прямой, в — обратной и г — нулевой последовательностей.

Решение. Выполним решение в относительных единицах, приняв за базисные условия $S_6=100$ *Мва* и $U_6=U_{cp}$ (на каждой ступени трансформатора).

По кривым на рис. П-9,а для $t=1$ *сек* при $I_{нр}=2,2$ находим для генераторов значения расчетных э. д. с. $E_t=1,44$ и реактивности $x_t=0,43$, которые соответствуют режиму подъема возбуждения.

После предварительных преобразований (используя имеющуюся симметрию в схеме) схемы отдельных последовательностей приобретают вид, как показано на рис. 8-27,б, в и г. Значения э. д. с. и реактивностей их элементов, приведенные к базисным условиям, вычисляются следующими:

в схеме прямой последовательности (рис. 8-27,б)

$x_1=0,37; x_2=0,09; x_3=0,117; x_4=3,33; x_5=0,181; x_6=0,121; x_7=0,01;$
 $E_1=1,44$ и $E_2=1;$

в схеме обратной последовательности (рис. 8-27,б)

$x_1=0,122; x_4=0,87;$ у остальных элементов реактивности те же, что и в схеме прямой последовательности;

в схеме нулевой последовательности (рис. 8-27,с) $x_2=0,09;$
 $x_3=0,117; x_5=0,271; x_6=0,181; x_7=0,09; x_8=0,121; x_9=0,242.$

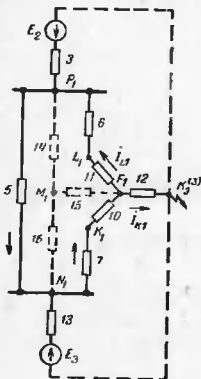


Рис. 8-28. К задаче 8-22.
 Полная схема прямой последовательности.

Из схем обратной и нулевой последовательности находим значения реактивностей:

$$x_{10} = 0,06 + 0,197 / (0,181 + 0,117) = 0,179$$

(где $0,197 = 0,122 / 0,87 + 0,09$);

$$x_{L2} = 0,121 + 0,06 + 0,181 / (0,197 + 0,117) = 0,296;$$

$$x_{KL2} = 0,06 + \frac{0,181}{0,197 + 0,117 + 0,181} \cdot 0,197 = 0,134;$$

$$x_{10} = 0,09 + 0,208 / (0,271 + 0,242 + 0,117) = 0,247;$$

$$x_{L0} = 0,181 + 0,09 + 0,271 / (0,208 + 0,117 + 0,242) = 0,454;$$

$$x_{KL0} = 0,09 + \frac{0,271}{0,271 + 0,208 + 0,117 + 0,242} \cdot 0,208 = 0,157.$$

Реактивности ветвей производной схемы прямой последовательности будут:

$$x_K = 0,179 + 0,247 - \frac{(0,134 - 0,157)^2}{0,296 + 0,454} = 0,426;$$

$$x_L = 0,296 / 0,454 = 0,179;$$

$$x_{KL} = \frac{0,134 \cdot 0,454 + 0,157 \cdot 0,296}{0,296 + 0,454} = -0,143 = x_{10};$$

$$x_K - x_{KL} = 0,426 - (-0,143) = 0,569 = x_{10};$$

$$x_L - x_{KL} = 0,179 - (-0,143) = 0,322 = x_{11}.$$

Полная схема прямой последовательности с введенной в нее производной схемой, представлена на рис. 8-28. В ней $E_0=1,29$ и

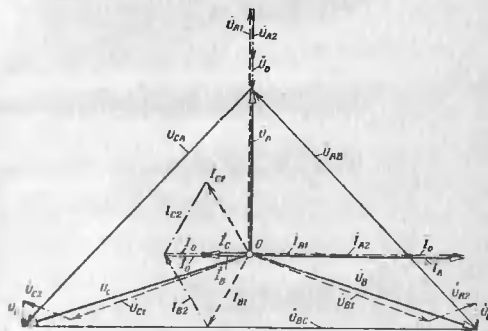


Рис. 8-29. К задаче 8-22. Векторные диаграммы токов и напряжений.

$x_{10}=0,424.$ Реактивности ветвей эквивалентной звезды имеют величины: $x_{10}=0,148; x_{10}=-0,068$ и $x_{10}=-0,028.$ Дальнейшее преобразование этой схемы приводит к

$$E_L = 1,11 \text{ и } x_L = 0,66.$$

Ток прямой последовательности в месте короткого замыкания

$$I_{K1} = \frac{1,11}{0,66} = 1,68.$$

Проверим правильность выбранного режима генераторов.

Напряжение в точке M_1 схемы на рис. 8-28 составляет:

$$\dot{U}_1 = 1,68(0,569 - 0,068) = 0,84.$$

Ток прямой последовательности от станции

$$I_1 = \frac{1,29 - 0,84}{0,424 - 0,028} = 1,08.$$

Напряжение прямой последовательности генераторов $U_1 = 0,84 + 1,08(0,09 - 0,028) = 0,91 < 1$, следовательно, режим генераторов выбран правильно.

Произведя, как в решении предыдущих задач, распределение токов отдельных последовательностей, найдем, что симметричные составляющие токов неповрежденной цепи линии (считая поврежденной фазу A) будут:

$$I_{A1} = 331 \text{ а}; I_{A2} = 339 \text{ а} \text{ и } I_0 = 180 \text{ а}$$

и симметричные составляющие напряжений в точке N

$$\dot{U}_{A1} = j54 \text{ кв}; \dot{U}_{A2} = -j13,4 \text{ кв} \text{ и } \dot{U}_0 = -j7,2 \text{ кв}.$$

При определении симметричных составляющих токов и напряжений принято, что вектор э. д. с. фазы A направлен по положительной мнимой оси комплексной плоскости.

На рис. 8-29 показаны искомые векторные диаграммы токов и напряжений.

Задача 8-23

Для условий предыдущей задачи, используя промежуточные результаты ее решения, построить векторные диаграммы токов в выключателях $B-2$ и $B-4$ (поврежденной цепи линии схемы на рис. 8-27,а) и напряжений в конце линии (точка P).

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ БЕЗ РЕШЕНИЯ

1-4. а) До замыкания выключателя B :
в отставшей фазе $i = 72,7 \text{ ка}$, в опережающей фазе $i = 71 \text{ ка}$.

После замыкания выключателя B :

в отставшей фазе $i = 140 \text{ ка}$, в опережающей фазе $i = 138 \text{ ка}$.

б) До замыкания выключателя B :

в отставшей фазе $i = 178 \text{ ка}$, в опережающей фазе $i = 173 \text{ ка}$.

После замыкания выключателя B :

в отставшей фазе $i = 122 \text{ ка}$, в опережающей фазе $i = 116 \text{ ка}$.

1-11. Увеличатся в 2,72 раза.

1-12. $x = 6\%$; $U = 83,5\%$.

1-14. а) 1 300 а; б) 1 560 а; в) 1 730 а.

1-16. $\phi = 180^\circ$; C ; $I = 1 800 \text{ а}$.

1-20. 18,9 ка.

2-4. $I''_K = 6 \text{ ка}$ (вместо 6,8 ка, т. е. меньше примерно на 12%).

2-5. При коротком замыкании в точке $K-2$, когда выключатель B выключен, $I''_K = 15,2 \text{ ка}$, и когда он отключен, $I''_K = 11,7 \text{ ка}$; приближенное решение дает значения токов больше соответственно на 6,6 и 3,4%.

При коротком в точке $K-4$, когда выключатель B выключен, $I''_K = 4,57 \text{ ка}$, и когда он отключен, $I''_K = 4,12 \text{ ка}$; приближенное решение дает значения токов больше соответственно на 6,1 и 5%.

2-8. При коротком замыкании на средней секции выключателя B не играет роли; при коротком на крайних секциях ток на 8% меньше, чем при включенном выключателе B .

2-10. а) $S_N = 5 100 \text{ Мва}$; б) На 220 кв $S_N = 4 600 \text{ Мва}$, на 115 кв $S_N = 2 060 \text{ Мва}$ и на 10,5 кв $S_N = 950 \text{ Мва}$.

2-12. $x_c = 5,23 \text{ ом}$; $i_{\text{макс}} = 107 \text{ ка}$.

2-16. $x = 0,62$. С ростом мощности нагрузки искомая величина реактивности уменьшается.

2-17. $i_T = 21 \text{ ка}$; $U = 0,81 \cdot 6,3 = 5,1 \text{ кв}$.

2-24. Два двигателя.

2-26. 25 Мва .

2-28. 6,5 ка.

2-29. $I_{\text{пуск}} = 765 \text{ а}$; $i_{\text{макс}} = 1 860 \text{ а}$; $U = 98,8\%$.

2-30. Сравнимые условия самозапуска практически равноценны. Для успешного самозапуска суммарная включенная мощность двигателей должна быть уменьшена примерно на 30%.

2-31. а) $i_{\text{макс}} = 2,34 \text{ ка}$; $U = 92\%$; $M = 0,68$.

б) $i_{\text{макс}} = 2,44 \text{ ка}$; $U = 96\%$; $M = 0,74$.

в) $i_T = 13,3 \text{ ка}$; $U = 54\%$; $M = 0$ и $M = 0,68$.

2-33. $x = 1 \text{ ом}$. Остаточное напряжение $U = 0,9 \cdot 10,5 = 9,45 \text{ кв}$.

3-3. $I_I = 1 290 \text{ а}$.

3-6. а) $S_{Г-2}/S_{Г-1} = 2.$

б) Уменьшится на 16,7%; $I_{Г-1} = 0,53I_{н}; I_{Г-2} = 0,47I_{н}.$

3-10. $x_n = 0,37 \text{ ом}; I_r = 7,95 \text{ кА}; I_c = 8,24 \text{ кА}.$

3-11. $U = 48\%; I_k = 11,7 \text{ кА}; I_c = 21,4 \text{ кА}.$

4-7. Для построения искомым кривых должны быть использованы следующие выражения:

а) $U = 0,5 + 0,16e^{-t/3,75};$

б) $U = 1,65 - 0,99e^{-t/3,75}$ до $t = 1,6 \text{ сек},$ после чего $U = U_n = 1.$

4-9. Ответ сформулирован в тексте задачи.

4-12. а) 600 а; б) 980 а; в) 1 000 а.

4-14. Искомые кривые должны быть построены по следующим выражениям:

а) В процессе короткого замыкания

$$I_t = 1,2 + e^{-t/0,8}; U_t = 0,3 + 0,25e^{-t/0,8};$$

$$E_{qt} = 0,6 + 0,5e^{-t/0,8}; E_{qt} = 1,51 + 1,24e^{-t/0,8};$$

после отключения короткого замыкания

$$I = 0; U_t = E_{qt} = E_{qt} = 1,51 + (0,7 - 1,51)e^{-t/2},$$

где t — время после отключения короткого.

б) В процессе короткого замыкания

$$I_t = 3,2 - e^{-t/0,8}; U_t = 0,8 - 0,25e^{-t/0,8};$$

$$E_{qt} = 1,6 - 0,5e^{-t/0,8}; E_{qt} = 4 - 1,25e^{-t/0,8};$$

после отключения короткого замыкания

$$I = 0; U_t = E_{qt} = E_{qt} = 1 + 0,5e^{-t/2},$$

где t — время после отключения короткого.

4-19. При $x_{\text{min}} > 0,9.$ Снизится на 6,4%.

4-20. $x_{1q} = 0,675; k_y = 1,95.$

4-24.

$$\Delta I_t = 1,95 [1 - (1 + 0,682t)e^{-t/0,22} - 0,945 (e^{-t/1,22} - e^{-t/0,22})];$$

$$\Delta I_{1d} = 1,95 [0,955te^{-t/0,22} - 0,233 (e^{-t/2,22} - e^{-t/0,22})];$$

$$\Delta I_d = 1,65 [1 - (1 - 0,273t)e^{-t/0,22} - 1,178 (e^{-t/2,22} - e^{-t/0,22})].$$

4-26. При наличии продольной демпферной обмотки

$$\overset{\circ}{I}_r = 0,38e^{-t/1,4} + 0,62e^{-t/0,12};$$

$$\overset{\circ}{I}_{1d} = 0,633 (e^{-t/1,4} - e^{-t/0,12});$$

$$\overset{\circ}{I}_r + \overset{\circ}{I}_{1d} = 1,013e^{-t/1,4} - 0,013e^{-t/0,12}.$$

При отсутствии продольной демпферной обмотки

$$\overset{\circ}{I}_r = 1e^{-t/0,64}.$$

Максимальное напряжение на обмотке возбуждения 2 270 в.

4-33. а) $I_t = 0,92e^{-3,84t} + 1;$

$$U_{Лт} = 0,7 - 0,276e^{-3,84t};$$

$$b) I_t = 0,74 + 0,19e^{-0,18t} + 0,81e^{-3,74t};$$

$$U_{Лт} = 0,74 + 0,20e^{-0,18t} - 0,03e^{-3,74t};$$

$$U_{Лт} = 0,52 + 0,14e^{-0,18t} - 0,28e^{-3,74t};$$

$$в) I_t = 1,48 - 0,59e^{-0,18t} + 0,85e^{-3,74t};$$

$$U_{Лт} = 1,48 - 0,62e^{-0,18t} - 0,03e^{-3,74t} + 0,06e^{-2t};$$

$$U_{Лт} = 1,04 - 0,45e^{-0,18t} - 0,29e^{-3,74t} + 0,08e^{-2t}.$$

Выражения в п. «в» справедливы для интервала до 1,4 сек, после чего напряжение генератора остается на нормальном уровне и изменения тока и напряжения двигателя происходят приблизительно так же, как в п. «а». Следует обратить внимание, что при заданных параметрах выражение для тока в п. «в» не содержит слагаемого с декрементом затухания (-2).

5-3. $x = 0,152; U = 0,45$ и $U = 0,37.$

5-5. К моменту отключения В-3 $U = 0,44$ и после его отключения $U = 0,52.$

К моменту отключения В-2 $U = 0,55$ и после его отключения $U = 0,82.$

5-7. При коротком в К-1 — на 35%; при коротком в К-2 — на 17%.

5-8. При коротком в К-1 $S_{н} = 495 \text{ Маа};$ при коротком в К-2 $S_{н} = 276 \text{ Маа}.$

5-11. $\cos \delta \geq 0,825 - 0,087 \frac{(1 + n^2)}{n}.$

Минимум при $n = 1, \delta = 49^\circ.$

5-13. а) 3 сек; б) 1,6 сек.

5-14. Ток через 1,5 сек в линии Л-1 $I = 2,52 \text{ кА},$ в Л-2 $I = 1,56 \text{ кА}$ и в Л-3 $I = 0,2 \text{ кА}.$

5-18. 5,3 ка.

5-21. $I_{Г-1} = 0,345 + 0,303e^{-0,279t} + 0,067e^{-0,533t};$

$$I_{Г-2} = 0,552 + 0,232e^{-0,279t} - 0,069e^{-0,533t};$$

$$I_n = 0,897 + 0,535e^{-0,279t} - 0,002e^{-0,533t}.$$

5-22. б) При $T_c = 0$ и $t \leq 1,8 \text{ сек}$

$$I_{Г-1} = 0,063 - 0,413e^{-0,28t} + 1,513e^{-0,587t};$$

$$I_{Г-2} = 1,81 - 0,468e^{-0,28t} - 0,955e^{-0,587t};$$

$$I_n = 1,863 + 0,881e^{-0,28t} + 0,558e^{-0,587t};$$

$$U_{Г-1} = 0,932 - 0,441e^{-0,28t} + 0,279e^{-0,587t};$$

$$U_{\Gamma-2} = 1,294 - 0,535e^{-0,28t} + 0,068e^{-0,587t};$$

для $t \geq 1,8$ сек:

$$I_K = 1,48 + 0,05e^{-0,643t}; I_{\Gamma-1} = 0,18 + 0,175e^{-0,643t};$$

$$I_{\Gamma-2} = 1,30 - 0,125e^{-0,643t}; U_{\Gamma-1} = 0,74 + 0,025e^{-0,643t};$$

$$U_{\Gamma-2} = 1.$$

При $T_0 = 1$ сек и $t \leq 3,5$ сек:

$$I_{\Gamma-1} = 0,053 - 0,668e^{-0,28t} + 2,918e^{-0,587t} - 1,15e^{-t};$$

$$I_{\Gamma-2} = 1,810 - 0,733e^{-0,28t} - 1,84e^{-0,587t} + 1,15e^{-t};$$

$$I_K = 1,863 - 1,401e^{-0,28t} + 1,078e^{-0,587t};$$

$$U_{\Gamma-1} = 0,932 - 0,701e^{-0,28t} + 0,539e^{-0,587t};$$

$$U_{\Gamma-2} = 1,294 - 0,847e^{-0,28t} + 0,171e^{-0,587t} + 0,23e^{-t};$$

для $t > 3,5$ сек.

Все величины сохраняют практически те же значения, что и при $t = 3,5$ сек.

5-24. а) $I_{\Gamma-1} = 0,33 + 0,82e^{-0,505t};$

$$I_{\Gamma-2} = 0,76 - 0,37e^{-0,505t};$$

$$I_K = 1,09 + 0,45e^{-0,505t};$$

$$U_{\Gamma-1} = 0,545 + 0,225e^{-0,505t};$$

$$U_{\Gamma-2} = 0,696 + 0,148e^{-0,505t};$$

б) $I_{\Gamma-1} = 2,24 - 1,09e^{-0,505t};$

$$I_{\Gamma-2} = -0,11 + 0,50e^{-0,505t};$$

$$I_K = 2,13 - 0,59e^{-0,505t};$$

$$U_{\Gamma-1} = 1,065 - 0,255e^{-0,505t};$$

$$U_{\Gamma-2} = 1,044 - 0,20e^{-0,505t}.$$

Эти выражения справедливы для $t \leq 3$ сек; при $t \geq 3$ сек

$$I_{\Gamma-1} = I_K = 2; I_{\Gamma-2} = 0; U_{\Gamma-1} = U_{\Gamma-2} = 1.$$

в) $I_{\Gamma-1} = 2,24 - 3,04e^{-0,505t} + 1,95e^{-t};$

$$I_{\Gamma-2} = -0,11 + 1,39e^{-0,505t} - 0,89e^{-t};$$

$$I_K = 2,13 - 1,65e^{-0,505t} + 1,06e^{-t};$$

$$U_{\Gamma-1} = 1,065 - 0,825e^{-0,505t} + 0,53e^{-t};$$

$$U_{\Gamma-2} = 1,044 - 0,556e^{-0,505t} + 0,356e^{-t}.$$

Эти выражения справедливы для $t \leq 5$ сек; при $t \geq 5$ сек то же, что в п. «б» при $t > 3$ сек.

470

Генератор с $T_{\Gamma 0}$ со эквивалентен источнику с неизменным напряжением, приложенным за реактивностью x'_e .

6-5. В 1,44 раза.

6-10. Ответ сформулирован в условии задачи.

6-12. При коротких замыканиях в точке К-2 $I^{(3)} = 19,7$ кА, $I^{(1)} = 12$ кА и через 1 сек $I^{(3)} = 13,6$ кА и $I^{(1)} = 11,1$ кА.

6-13.

а) $I_d^{(3)}: I_d^{(1,1)}: I_d^{(2)}: I_d^{(1)} = 2,22:2,38:2,79:2,88 =$

$$= 1:1,07:1,26:1,3;$$

б) $I_K^{(3)}: I_K^{(1,1)}: I_K^{(2)}: I_K^{(1)} = 2,55:3,29:2,1:3,2 =$

$$= 1:1,29:0,82:1,26;$$

в) $I_f^{(3)}: I_f^{(1,1)}: I_f^{(2)}: I_f^{(1)} = 4,16:5,87:3,19:4,56 = 1:1,41:0,77:1,1;$

а) $I_f^{(3)}: I_f^{(1,1)}: I_f^{(2)}: I_f^{(1)} = 2,55:2,51:2,42:1,85 =$

$$= 1:0,98:1,04:0,73;$$

б) $I_f^{(3)}: I_f^{(1,1)}: I_f^{(2)}: I_f^{(1)} = 4,16:4,48:3,68:2,63 = 1:1,08:0,89:0,63;$

г) $U_{\Gamma 1}^{(3)}: U_{\Gamma 1}^{(1,1)}: U_{\Gamma 1}^{(2)}: U_{\Gamma 1}^{(1)} = 0,25:0,37:0,62:0,66 =$

$$= 1:1,49:2,48:2,66;$$

д) $U_{\Gamma 1}^{(3)}: U_{\Gamma 1}^{(1,1)}: U_{\Gamma 1}^{(2)}: U_{\Gamma 1}^{(1)} = 0,47:0,74:1,0:1,0 = 1:1,59:2,14:2,14.$

п-10, а) $\frac{I_{\Gamma-2}}{I_{\Gamma-1}} = \frac{7+3n}{3n-1};$ б) $\frac{I_{\Gamma-2}}{I_{\Gamma-1}} = \frac{3-n}{3+7n}$

где $n = S_B/S_A$.

6-17. $x = \frac{1-n}{3n}$ Ом; $\frac{I_{\Gamma-2}}{I_{\Gamma-1}} = \frac{1+5n}{15+n}$ (для поврежденной фазы);

для Т-1

$$\frac{I_B}{I_A} = \frac{1-n}{5+n}$$

и для Т-2

$$\frac{I_B}{I_A} = \frac{1-n}{1+5n}$$

п-10, 9,5 Ом.

п-21. Трехфазное короткое замыкание:

$$I_A = aI_B = a^2I_C = 3,18; I_a = aI_b = a^2I_c = 3,18 \angle 30^\circ.$$

д) Однофазное короткое замыкание:

$$I_A = 0; I_B = I_C = 2,75 \angle -90^\circ; I_o = I_c = 1,58 \angle 90^\circ; I_b = 3,16 \angle 90^\circ.$$

471

Однфазное короткое замыкание:

$$I_A = 4,03; I_B = I_C = 0; I_0 = -I_C = 2,32.$$

Двухфазное короткое замыкание на землю:

$$I_A = 0; I_B = I_C = 3,9 \angle -135^\circ; I_0 = I_0 = 2,26 \angle 45^\circ; \\ I_2 = 3,2 \angle -90^\circ.$$

Значения токов даны в относительных единицах при номинальных условиях генератора.

6-30. $I_{0T-2} = 200$ а; наведенный ток $I_0 = 114$ а.

6-31. Наибольший ток $I_K^{(1)} = 2,5$ ка (при коротком на расстоянии 45 км от станции); его распределение: со стороны станции 1,2 ка и от системы 1,3 ка.

6-39. 7,16 ка. При этом оказывается практически безразлично, будет ли однофазное короткое замыкание на стороне 230 кв или на стороне 115 кв.

6-43. Однофазное (фаза В) короткое замыкание на расстоянии 60 км. Со стороны системы $I_{B1} = I_{B2} = 916$ а, $I_0 = 570$ а и в узле М

$$\dot{U}_{B1} = j118,3 \text{ кв}, \dot{U}_{B2} = -j14,7 \text{ кв}, \dot{U}_0 = -j11,4 \text{ кв}.$$

6-46. а) В нейтрали автотрансформатора 3270 а; в нейтрали системы 1290 а.

б) Коэффициент несимметрии напряжений $b_2 = 0,075$.

Фазные токи автотрансформатора на стороне 230 кв: в одной фазе 770 а, в двух других по 385 а.

6-49. 4,6 ка. При определении расчетного тока учтен отсос тока нулевой последовательности трансформатором Т-3.

6-51. При $n=0$ $k=0,48$; при $n=0,5$ $k=0,83$; при $n=1$ $k=0,6$, где n — относительное расстояние точки короткого на линии II от станции;

$k = \frac{I_1^{(1-1)}}{I_2^{(2)}}$ — отношение тока обратной последовательности при двух-

фазном коротком замыкании на землю к току той же последовательности при обычном двухфазном коротком замыкании; это отношение одинаково для всех ветвей схемы и не зависит от времени переходного процесса.

6-55. Наибольшее значение угла $\delta' = 62^\circ$; оно наступает через 0,5 сек. Если короткое произошло на фазе А, то искомые токи будут: $I_A = 1,35$ ка; $I_B = 0,94$ ка; $I_C = 1,0$ ка и в генераторе $I_a = I_b = 16,8$ ка; $I_c = 22,5$ ка.

7-3. а) Величина искомого тока практически остается той же.

б) В данном случае генератор выпадает из синхронизма; наибольший фазный ток генератора возрастает до 2,48 (когда э. д. с. E' в противофазе с напряжением системы U_c), т. е. увеличение составляет 35%.

7-6. а) В К6-1 и К6-3 $I_2 = 123$ а, $I_0 = 52$ а; в К6-2 и К6-4 $I_2 = 88$ а, $I_0 = 20$ а.

б) В К6-1 и К6-3 $I_2 = 117$ а, $I_0 = 62,5$ а; в К6-2 и К6-4 $I_2 = I_0 = 0$. в) В К6-1 и К6-3 $I_2 = 147,5$ а, $I_0 = 0$; в К6-2 и К6-4 $I_2 = I_0 = 0$.

7-8. Для передачи той же активной мощности (46 Мвт) при сокращении э. д. с. $E_g = 141/\sqrt{3}$ кв угол δ'_0 должен быть увеличен до 61° . При этом величины токов будут:

$$\text{в фазах линии} \\ I_B = I_C = 397 \text{ а (вместо 250 а при ДПЗ);} \\ \text{в земле} \\ I_0 = 423 \text{ а (вместо 250 а при ДПЗ);}$$

в фазах каждого генератора

$$I_A = I_C = 1320 \text{ а (вместо 1440 а при ДПЗ),} \\ I_b = 2275 \text{ а (вместо 1440 а при ДПЗ).}$$

Коэффициент несимметрии токов $b_2 = 0,013$ при ДПЗ).

7-9. $I_{1\text{ген}} = 3,78$; $M_{1\text{ген}} = 0,4 M_{1\text{генн}}$; $I_B = I_C = 179$ а; $I_0 = 139$ а.

7-11. Токи фазы А со стороны системы: в цепи I

$$I_1 = 0,42 \text{ ка}, I_2 = -0,38 \text{ ка};$$

в цепи II

$$I_1 = 0,73 \text{ ка}, I_2 = -0,68 \text{ ка}.$$

Напряжения фазы А на шнках системы:

$$\dot{U}_1 = j49,2 \text{ ке}, \dot{U}_2 = 15,9 \text{ ке};$$

то же на шнках нагрузки:

$$\dot{U}_1 = j36,5 \text{ ке}, \dot{U}_2 = j27 \text{ ке}.$$

8-4. Отношение фазных токов

$$\frac{I^{(1-1)}}{I^{(2)}} = \frac{1+n}{1+0,5}.$$

$$\text{где } n = \frac{x_p}{x''_d}.$$

Отношение напряжений прямой последовательности за реактором

$$\frac{U_1^{(1-1)}}{U_1^{(2)}} = \frac{2}{2+n} \sqrt{1+n+\frac{n^2}{3}}.$$

При $n=10$

$$\frac{I^{(1-1)}}{I^{(2)}} = 1,83 \text{ и } \frac{U_1^{(1-1)}}{U_1^{(2)}} = 1,11.$$

Пределы изменения:

$$1 \leq \frac{l(1-\nu)}{l(\nu)} < 2 \text{ и } 1 \leq \frac{l(1-\nu)}{l(\nu^2)} < 1,15.$$

8-7. $I_{\text{макс}} = 7,25 \text{ кА}$ (в каждом кабеле).

8-9. В точке M'

$$\dot{U}_A = 0,99 \angle 71,5^\circ; \dot{U}_B = 1,22 \angle -45^\circ; \dot{U}_C = 0,59 \angle -137^\circ.$$

В точке N''

$$\dot{U}_A = 1,28 \angle 67^\circ; \dot{U}_B = 1,25 \angle -29^\circ; \dot{U}_C = 0.$$

Эти напряжения выражены в относительных единицах при

$$\dot{U}_{0,0} = 21,4 \text{ кВ.}$$

8-15. $I_N = 660 \text{ А}$. Токи в нейтралях: трансформатора $I = 115 \text{ А}$ и автотрансформатора $I = 545 \text{ А}$.

При отсутствии обрыва $I_N = 3830 \text{ А}$ и в нейтралях: трансформатора $I = 3800 \text{ А}$ и автотрансформатора $I = 530 \text{ А}$.

8-17. $I_{\text{к.макс}} = 695 \text{ А}$ при $\delta'_{\text{мин}} \approx 70^\circ$.

8-19. В нейтраль трансформатора T $I = 1400 \text{ А}$; в нейтраль автотрансформатора AT $I = 300 \text{ А}$.

8-21. В отключенной и заземленной с обоих концов фазе линии ток $I = 15 \text{ А}$; в каждой из двух других фаз ток $I = 320 \text{ А}$.

Ток в нейтраль трансформатора T $I = 30 \text{ А}$; в нейтраль трансформатора $T-2$ $I = 390 \text{ А}$.

8-23. Симметричные составляющие токов фазы A :
в выключателе $B-2$

$$I_1 = 869 \text{ А}, I_2 = 848 \text{ А}, I_0 = 803 \text{ А};$$

в выключателе $B-4$ $I_1 = 29 \text{ А}, I_2 = 8,5 \text{ А}, I_0 = -37,5 \text{ А}$.

Симметричные составляющие напряжения фазы A в точке N

$$\dot{U}_1 = 61,2 \text{ кВ}, \dot{U}_2 = -5,1 \text{ кВ}, \dot{U}_0 = -3,4 \text{ кВ.}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ П-1

Формулы приведения отдельных величин при составлении схемы замещения

В линеальных элементах

$$\dot{E} = (k_1 k_2 \dots k_n) E, \text{ кВ } (\phi)$$

$$\dot{U} = (k_1 k_2 \dots k_n) U, \text{ кВ } (\phi)$$

$$\dot{I} = \frac{1}{(k_1 k_2 \dots k_n)} I, \text{ кА } (\phi)$$

$$S = S \cdot M_{\text{ва}} (\text{вт})$$

$$\dot{Z} = (k_1 k_2 \dots k_n)^2 Z = (k_1 k_2 \dots k_n)^2 Z_0 \sqrt{\frac{U_n}{U_0}} \sqrt{3} I_n =$$

$$= (k_1 k_2 \dots k_n)^2 Z_{\text{тн}} \frac{U_n^2}{U_0^2} \text{ Ом,}$$

где k_1, k_2, \dots, k_n — коэффициенты трансформации в направлении от основной (базисной) ступени к той ступени, элемент которой поддается приведению

В отключенных элементах

а) С учетом действительных коэффициентов трансформации

$$E^{(0)} = E U_0 = E_{(0)} U_0 U_0$$

$$U^{(0)} = U U_0 = U_{(0)} U_0 U_0$$

$$I^{(0)} = I I_0 = I_{(0)} I_0$$

$$S^{(0)} = S S_0 = S_{(0)} S_0$$

$$\begin{aligned} Z^{(0)} &= Z I_0 = Z \sqrt{3} \frac{I_0}{U_0} = Z S_0 / U_0^2 = \\ &= Z_{(0)} \frac{I_0}{I_n} \frac{U_n}{U_0} = Z_{(0)} \frac{S_0}{S_n} \left(\frac{U_n}{U_0} \right)^2, \end{aligned}$$

где U_0, I_0, Z_0 — базисные напряжение, ток, сопротивление трансформации, на которой выполняются подлежащие приведению величины

В комплексных единицах

В относительных единицах

б) По средним номинальным напряжениям (приближенно).

$$\vec{E} = (U_{cp,6}/U_{cp}) E, \text{ кВ (б)}$$

$$\vec{U} = (U_{cp,6}/U_{cp}) U, \text{ кВ (б)}$$

$$I = (U_{cp}/U_{cp,6}) I, \text{ кА (а)}$$

$$S^* = S, \text{ МВА (ва)}$$

$$\vec{Z} = (U_{cp,6}/U_{cp}) \vec{Z} = Z_{(n)} \frac{U_{cp,6}}{\sqrt{3} I_n} = Z_{(n)} \frac{U_{cp,6}}{S_n}, \text{ Ом.}$$

где $U_{cp,6}$, U_{cp} — средние номинальные напряжения ступеней, выбранной за базу (основную), и ступени, с которой производится пересчет

$$E_{(n)} = E U_{cp,6} = E_{(n)}$$

$$U_{(n)} = U U_{cp,6} = U_{(n)}$$

$$I_{(n)} = I I_{(n)}$$

$$S_{(n)} = S U_{cp,6} = I I_{(n)} S = I_{(n)} S_{(n)}$$

$$Z_{(n)} = Z \frac{\sqrt{3} I_{(n)}}{U_{cp,6}} = Z \frac{S_{(n)}}{U_{(n)}^2} = Z_{(n)} \frac{S_{(n)}}{S_n}$$

при условии, что на каждой ступени трансформации базисное напряжение совпадает со средним номинальным напряжением

Имена средних номинальных напряжений: 50; 330; 220; 132; 110; 37; 10; 10,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,225 кВ.

ПРИЛОЖЕНИЕ П-2

Основные формулы преобразования схем и их ходовые токораспределения

№ п/п	Преобразование	Схема до преобразования	Схема после преобразования	Обозначения	Сопоставления элементов схемы после преобразования	Распределение токов в исходной схеме
1	Последовательное соединение			+	$Z_0 = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$	$I_1 = I_2 = \dots = I_n$
2	Параллельное соединение				где $Z_0 = \frac{1}{Y_0}$ $Y_0 = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n$ $Y_1 = \frac{1}{Z_1}$ $Y_2 = \frac{1}{Z_2}$, ... $Y_n = \frac{1}{Z_n}$	$I_n = \frac{Z_0}{Z_n} I$

При двух ветвях
 $Z_0 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$

3				$\dot{E}_0 = \frac{1}{Y_p} \sum_{k=1}^n Y_k \dot{E}_k$ <p> $Y_1, Y_2, \dots, Y_n, Y_0$ — см. п. 2 При двух ветвях $\dot{E}_0 = \frac{\dot{E}_1 Z_2 + \dot{E}_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}$ </p>	$I_n = \frac{\dot{E}_n - \dot{U}_p}{Z_n}$
4				$Z_F = \frac{Z_{FG} Z_{HF}}{Z_{FG} + Z_{GH} + Z_{HF}}$ $Z_G = \frac{Z_{FG} Z_{GH}}{Z_{FG} + Z_{GH} + Z_{HF}}$ $Z_H = \frac{Z_{GH} Z_{HF}}{Z_{FG} + Z_{GH} + Z_{HF}}$	$I_{FG} = \frac{I_F Z_G - I_G Z_G}{Z_{FG}}$ $I_{GH} = \frac{I_G Z_G - I_H Z_H}{Z_{GH}}$ $I_{HF} = \frac{I_H Z_H - I_F Z_F}{Z_{HF}}$
5				$Z_{FG} = Z_F + Z_G + \frac{Z_F Z_G}{Z_H}$ $Z_{GH} = Z_G + Z_H + \frac{Z_G Z_H}{Z_F}$ $Z_{HF} = Z_H + Z_F + \frac{Z_H Z_F}{Z_G}$	$I_F = I_{FG} - I_{HF}$ $I_G = I_{GH} - I_{FG}$ $I_H = I_{HF} - I_{GH}$

№ п/п	Схема до преобразования	Схема после преобразования	Обозначения	Соприимления элементов схемы после преобразования	Распределение токов в исходной схеме
6				$\dot{E}_G = \frac{\dot{E}_{FG} Z_G + \dot{E}_{FG} (Z_{HF} + Z_{GH})}{Z_{FG} + Z_{GH} + \frac{Z_{FG} Z_{GH}}{Z_H}}$ $\dot{E}_H = \frac{\dot{E}_{FG} (Z_{FG} + Z_{GH}) + \dot{E}_{FG} Z_{HF}}{Z_{FG} + Z_{GH} + \frac{Z_{FG} Z_{GH}}{Z_H}}$ <p>Соприимления те же, что в п. 4</p>	$I_{FG} = \frac{\dot{E}_{FG} - \dot{E}_G + I_{GF} Z_G + I_{GF} Z_G}{Z_{FG}}$ $I_{GH} = \frac{Z_{GH}}{Z_{FG} - \dot{E}_H + \dot{E}_G - I_{GF} Z_G}$
7				$Z_{FG} = Z_F Z_G Y$ $Z_{GH} = Z_G Z_H Y$ <p>.....</p> <p>где $SY = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4$ Аналогично в три больших числе ветвей</p>	$I_F = I_{FG} + I_{FH} - I_{JF}$ $I_G = I_{GH} + I_{GD} - I_{FG}$ $I_H = I_{HF} + I_{HE} - I_{GH}$ $I_J = I_{JH} - I_{GJ} - I_{HJ}$

Основные соотношения метода симметричных составляющих и выражения для симметричных составляющих токов и напряжений в месте повреждения и продольной несимметричной электрической системы

Основные свойства фазного множителя

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$a^3 = e^{j360^\circ} = 1; \quad a^{n+3} = a^n \quad (\text{где } n - \text{целое число});$$

$$a^2 + a + 1 = 0; \quad a^2 - a = -j\sqrt{3}; \quad a - a^2 = j\sqrt{3};$$

$$1 - a = \sqrt{3} e^{-j30^\circ} = \frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$1 - a^2 = \sqrt{3} e^{j30^\circ} = \frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Симметричные составляющие токов и напряжений в месте несимметричных коротких замыканий

Разложение фазных величин на симметричные составляющие

ллюции:

$$F_0 = \frac{1}{3}(F_A + F_B + F_C); \quad F_{A1} = \frac{1}{3}(F_A + a^2 F_B + a F_C);$$

$$F_{A2} = \frac{1}{3}(F_A + a F_B + a^2 F_C).$$

Определение фазных величин по симметричным составляющим (фаза A):

$$F_A = F_{A1} + F_{A2} + F_0; \quad F_B = a^2 F_{A1} + a F_{A2} + F_0;$$

$$F_C = a F_{A1} + a^2 F_{A2} + F_0$$

Двухфазное



Одnofазное



Двухфазное на земле



Определение величин

$$I_{A1} = \frac{E_{A1}}{Z_{12} + Z_{21} + r_x}$$

$$E_{A1} = \frac{E_{A1}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00} + 3r_x}$$

$$E_{A2} = \frac{E_{A2}}{Z_{11} + r_n + [(Z_{22} + r_n)/(Z_{00} + r_n + 3r_{n,0})]}$$

 I_{A2}
 I_{A1}

$$= \frac{(Z_{00} + r_n + 3r_{n,0})}{(Z_{22} + r_n) + (Z_{00} + r_n)/(Z_{00} + r_n + 3r_{n,0})} I_{A1}$$

 I_0
 0
 I_{A1}

$$= \frac{(Z_{22} + r_n)}{(Z_{22} + r_n) + (Z_{00} + r_n)/(Z_{00} + r_n + 3r_{n,0})} I_{A1}$$

 U_{A1}

$$(Z_{22} + r_n) I_{A1}$$

$$(Z_{22} + Z_{00} + 3r_n) I_{A1}$$

$$[r_n + (Z_{22} + r_n)/(Z_{00} + r_n)/(Z_{00} + r_n + 3r_{n,0})] I_{A1}$$

 U_{A2}

$$Z_{22} I_{A1}$$

$$-Z_{00} I_{A1}$$

$$\frac{Z_{22}(Z_{00} + r_n + 3r_{n,0})}{Z_{22} + Z_{00} + 2r_n + 3r_{n,0}} I_{A1}$$

 U_0

Предшествующее значение

$$-Z_{00} I_{A1}$$

$$\frac{Z_{00}(Z_{22} + r_n)}{Z_{22} + Z_{00} + 2r_n + 3r_{n,0}} I_{A1}$$

Определяемые величины	Однократная продольная несимметрия	
	Несимметрия одной фазы $Z_{L1}^{(1)}$	Несимметрия двух фаз $Z_{L1}^{(2)}$
	Сопротивление в одной фазе	Сопротивления в двух фазах
	Образы одной фазы	Образы двух фаз
$I_{LA1} =$	$\frac{E_{A\Delta 3}}{Z_{L12} + Z_{L1}^{(1)}}$	$\frac{E_{A\Delta 3}}{Z_{L12} + Z_{L1}^{(2)}}$
$Z_{BL}^{(2)} =$	$\frac{Z_{L12} // Z_{L03}}{3}$	$\frac{Z_{L12} // Z_{L03}}{3} + (Z_{L1} // Z_{L03})$
$I_{Lq2} =$	$\frac{Z_{L1}^{(1)}}{Z_{L12} + Z_{L1}^{(1)}} I_{LA1}$	$\frac{Z_{L1}^{(2)}}{Z_{L12} + Z_{L1}^{(2)}} I_{LA1}$
$I_{L0} =$	$\frac{Z_{L03}^{(1)}}{Z_{L12} + Z_{L1}^{(1)}} I_{LA1}$	$\frac{Z_{L03}^{(2)}}{Z_{L12} + Z_{L1}^{(2)}} I_{LA1}$
$\Delta \dot{U}_{LA1} =$	$Z_{BL}^{(1)} I_{LA1}$	$Z_{BL}^{(2)} I_{LA1}$
$\Delta \dot{U}_{Lq2} =$	$\Delta \dot{U}_{LA1}$	$-\frac{Z_{L12}(Z - Z_{BL}^{(2)})}{Z + Z_{L12}} I_{LA1}$
$\Delta \dot{U}_{L0} =$	$\Delta \dot{U}_{LA1}$	$-\frac{Z_{L03}(Z - Z_{BL}^{(2)})}{Z + Z_{L12}} I_{LA1}$

Примечание. $Z_{L12} = Z_{L23} = Z_{L31}$; $Z_{L03} = Z_{L30} = Z_{L02} = Z_{L20} = Z_{L01} = Z_{L10} = Z_{L00}$ — сопротивление от фазы до фазы, от фазы до нулевой точки, от нулевой точки до нулевой точки.

Вспомогательные графики и кривые для выполнения расчетов

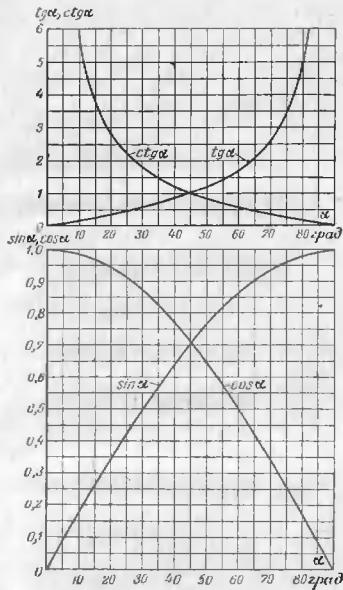


Рис. П-1. Графики изменения тригонометрических функций.

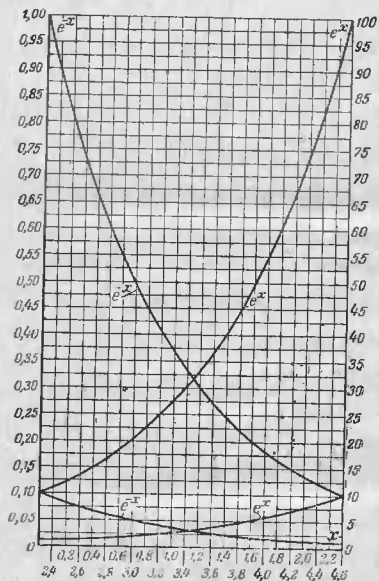


Рис. П-2. Графики изменения показательных функций.

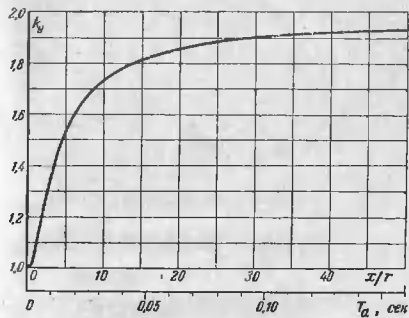


Рис. П-3. Кривая зависимости ударного коэффициента от постоянной времени T_a (для отношения x/r).

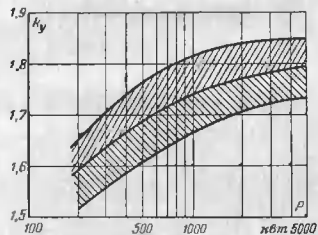


Рис. П-4. Значения ударного коэффициента для асинхронных двигателей.

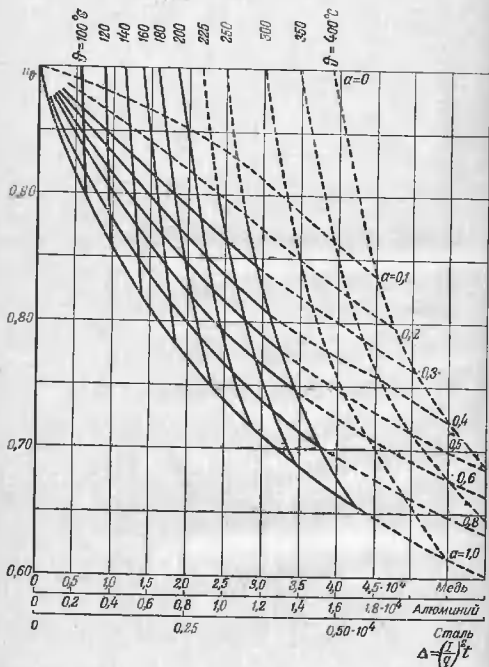


Рис. П-5. Диаграмма для учета теплового спада тока короткого замыкания.

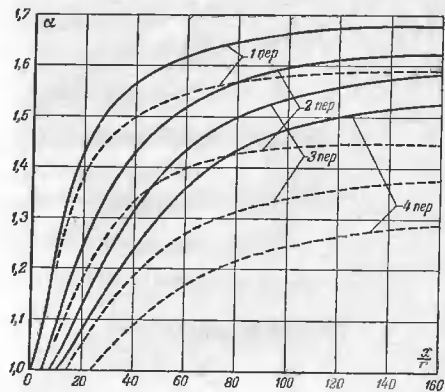


Рис. П-6. Кривые для определения коэффициента α . Сплошные кривые — без учета затухания периодической составляющей тока короткого замыкания; пунктирные кривые — с учетом затухания периодической составляющей тока короткого замыкания.

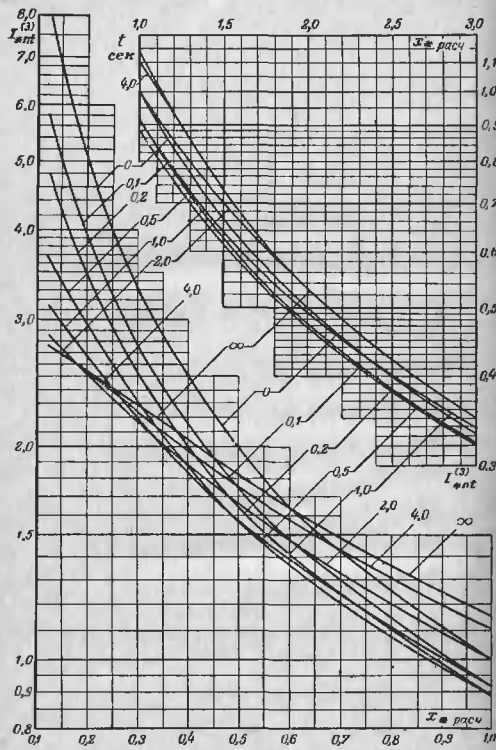


Рис. П-7. Расчетные кривые для турбогенератора с автоматическим регулированием возбуждения.

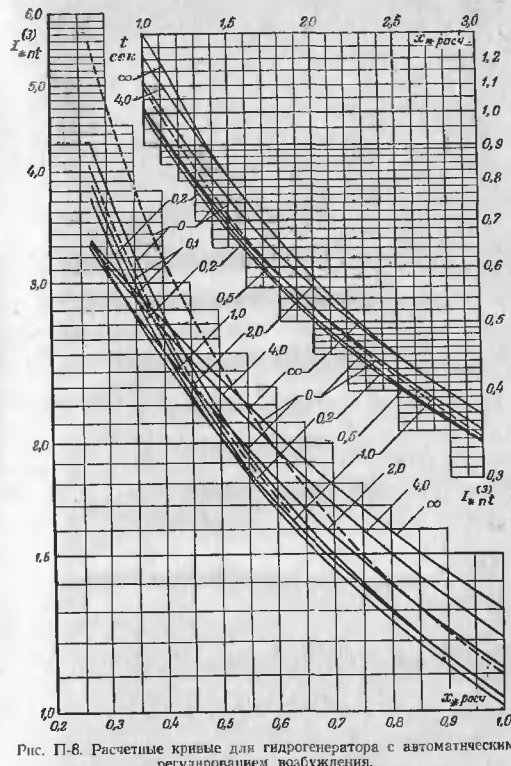


Рис. П-8. Расчетные кривые для гидрогенератора с автоматическим регулированием возбуждения.

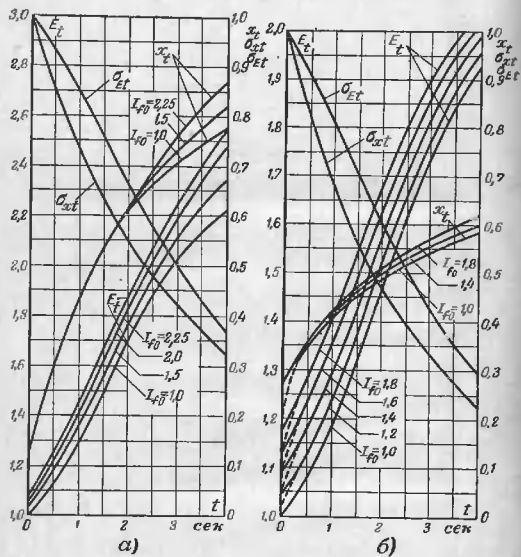


Рис. 11-9. Кривые для определения расчетных E_1 и x_1 генераторов с АВР.
а — для турбогенератора; б — для гидрогенератора.

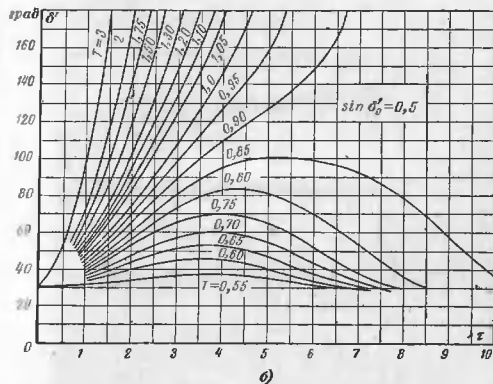
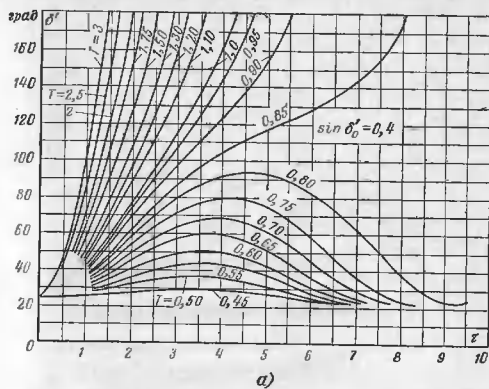


Рис. 11-10, а и б. Типовые графики изменения углов δ' и функции расчетного времени τ .

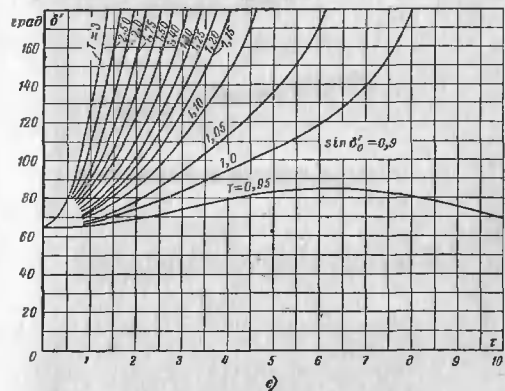
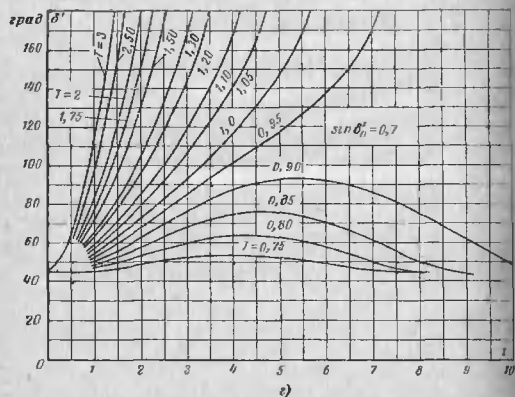
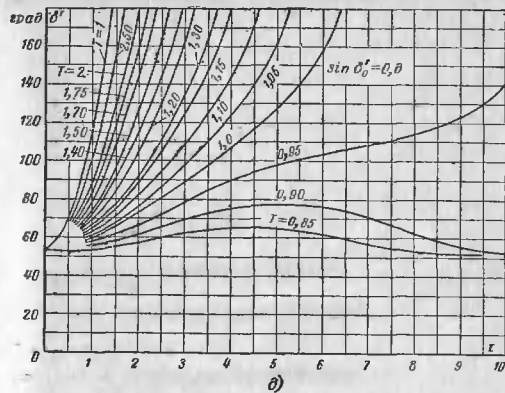
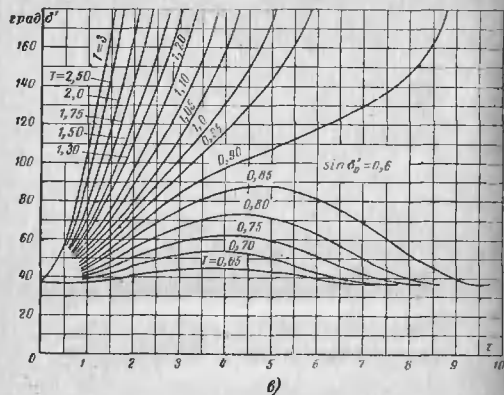


Рис. П-10,в и г.

Рис. П-10,д и е.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушила А. В., Страхов С. В., Основы электрических цепей, Госэнергоиздат, 1963.
2. Ионкин П. А., Мельников Н. А., Даревский А. И., Кухаркин Е. С., Теоретические основы электротехники, ч. 1, изд-во «Высшая школа», 1965.
3. Вайнер К. Ф., Эванс Р. Д., Метод симметричных составляющих, ОНТИ НКТП СССР, 1936.
4. Щедрин Н. Н., Токи короткого замыкания высоковольтных систем, ОНТИ, 1935.
5. Горев А. А., Переходные процессы синхронной машины, Госэнергоиздат, 1950.
6. Великов В. А., Жуков Л. А., Переходные процессы в электрических системах, Госэнергоиздат, 1953.
7. Щедрин Н. Н., Ульянов С. А., Задачи по расчету коротких замыканий, Госэнергоиздат, 1955.
8. Атабеков Г. И., Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей, Госэнергоиздат, 1957.
9. Важнов А. И., Основы теории переходных процессов синхронной машины, Госэнергоиздат, 1960.
10. Ковач К. П., Рац И., Переходные процессы в машинах переменного тока, Госэнергоиздат, 1963.
11. Великов В. А., Переходные электромеханические процессы в электрических системах, изд-во «Энергия», 1964.
12. Ульянов С. А., Электромагнитные переходные процессы в электрических системах, изд-во «Энергия», 1964.
13. Качатуров А. А., Ударные токи и моменты, возникающие при несинхронном включении генераторов, «Электричество», 1956, № 2.
14. Мамиконянц Л. Г., Качатуров А. А., Условия применения несинхронных включений в энергосистемах, «Электричество», 1965, № 1.
15. Качатуров А. А., Несинхронное АПВ, асинхронный режим и резонансизация в энергетических системах (лекция), изд. ВЭЭИ, 1966.
16. Аянцимова Н. Д., Великов В. А., Ежков В. В., Жуков Л. А., Надеждин С. В., Розанов М. Н., Федоров Д. А., Шовьянов А. Н., под ред. В. А. Великова, Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях, изд-во «Энергия», 1967.
17. Электротехнический справочник, изд-во «Энергия», 1964.
18. Данилевич Я. В., Домбровский В. В., Казовский Е. Я., Параметры электрических машин переменного тока, изд-во «Наука», 1965.

19. Щедрин Н. Н., К теории сложных несимметричных режимов электрических систем, «Электричество», 1946, № 5.

20. Щедрин Н. Н., Некоторые дополнения к вопросу о расчете двойных несимметричных коммутаций в электрических системах, Труды института энергетики АН УССР, вып. 7, 1954.

21. Чернин А. Б., Вычисление электрических величин и поведение релейной защиты при неполюсовых режимах в электрических системах, Госэнергоиздат, 1963.

22. Костаян Г. Г., Расчет режимов сложных повреждений по результатам расчета более простых режимов, «Электричество», 1960, № 11.