

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Электрические станции»

С.М. Силюк
Л.Н. Свита

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
к курсовой работе
по дисциплине

«Переходные процессы в электроэнергетических системах»

для студентов специальностей:

1-43 01 01 «Электрические станции»,

1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,

1-43 01 03 «Электроснабжение»,

1-53 01 04 «Автоматизация и управление
энергетическими процессами»

дневной и заочной форм обучения

Минск 2004

УДК 621.311.018.782.3

ББК 31.2

С 36

Рецензенты:

В.Н. Сацукевич, А.Н. Герасимович

Силюк С.М.

С 36 Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: Метод. пособие к курсовой работе по дисц. «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студ. спец. 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение», 1-53 01 04 «Автоматизация и управление энергетическими процессами» дневной и заочной форм обучения. / С.М. Силюк, Л.Н. Свита. – Мн.: БНТУ, 2004. – с.

ISBN 985-479-125-4.

Методическое пособие к курсовой работе составлено в соответствии с программой дисциплины «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах».

Приводятся краткие теоретические сведения, необходимые для самостоятельного выполнения курсовой работы, а также практические примеры по расчёту переходных процессов в электроэнергетических системах при симметричных и несимметричных коротких замыканиях и рекомендации по расчету токов короткого замыкания в распределительных сетях 0,4...35 кВ.

Данные этих расчётов необходимы для выбора электрических аппаратов, токоведущих частей электроустановок, устройств релейной защиты и автоматики.

УДК 621.311.018.782.3

ББК 31.2

ISBN 985-479-125-4

© С.М. Силюк,
Л.Н. Свита, 2004

Введение

1. Общие сведения о переходных процессах

Надежность работы электрической системы и ее отдельных элементов в значительной степени зависит от того, насколько правильно и полно при ее проектировании учтены опасные проявления переходных процессов.

Под переходными понимают процессы перехода от одного режима работы электрической цепи к другому, отличающемуся от предыдущего (например, амплитудой и фазой тока, частотой, значениями параметров схемы).

Переходные процессы возникают в электрических системах как при нормальной эксплуатации (включение и отключение нагрузок, источников питания, отдельных цепей, производство испытаний), так и в аварийных условиях (короткое замыкание, обрыв одной или двух фаз и др.).

Возникновение переходного процесса связано, с одной стороны, с изменением электромагнитного равновесия электрической системы, с другой – с нарушением баланса между электромагнитным моментом и моментом на валу электрической машины.

Исследование переходных процессов для многих задач можно в какой-то степени идеализировать, учитывая то обстоятельство, что благодаря довольно большой постоянной инерции электрических машин скорость протекания электромагнитных и электромеханических процессов различная.

Это позволяет в принципе единые по природе переходные процессы условно разделить на электромагнитные и электромеханические.

В настоящем методическом пособии рассматриваются только электромагнитные переходные процессы, вызванные коротким замыканием (КЗ) и местной несимметрией в сети (обрыв одной или двух фаз).

При изучении данного курса студент должен иметь четкое и ясное представление о физической природе переходных процессов. Не следует стремиться к механическому запоминанию громоздких формул. Необходимо четко представлять исходные положения при постановке задачи, основные этапы выводов и доказательств и уметь правильно формулировать и применять полученные при решении задачи результаты.

2. Общие сведения о коротких замыканиях

Замыканием называется всякое случайное или преднамеренное соединение между собой двух или более различных точек электрической цепи или сети. Коротким замыканием (КЗ) называется замыкание, приводящее к резкому изменению параметров режима электрической цепи или сети.

В системе с изолированной нейтралью замыкание одной из фаз на землю называется "простым замыканием". Основной причиной КЗ является нарушение изоляции электрического оборудования. Эти нарушения вызываются: перенапряжением, прямыми ударами молнии, старением изоляционных материалов, недостаточно тщательным уходом за оборудованием и механическими повреждениями. КЗ могут приводить ошибочные действия эксплуатирующего персонала и перекрытия токоведущих частей животными или птицами.

Чаще всего КЗ происходит через переходное сопротивление электрической дуги, возникающей в месте повреждения изоляции. Иногда возникают металлические КЗ без переходного сопротивления. В дальнейшем для определения возможных токов коротких замыканий рассматриваются лишь металлические КЗ.

В трехфазной системе возможны следующие виды коротких замыканий: трехфазное – $K^{(3)}$; двухфазное – $K^{(2)}$; однофазное – $K^{(1)}$; двухфазное на землю – $K^{(1,1)}$. Чаще всего встречаются однофазные КЗ (около 65 %) и значительно реже – трехфазные КЗ (около 5 %).

Трехфазное КЗ является симметричным, так как при нем все фазы остаются в одинаковых условиях, и симметрия токов (периодических составляющих) и напряжений не нарушается.

Остальные виды КЗ являются несимметричными.

Помимо КЗ в одной точке возможны КЗ одновременно в различных точках сети, а также КЗ с одновременным обрывом одной из фаз или другим нарушением симметрии трехфазной цепи. Эти нарушения режима относятся к сложным видам повреждений.

Последствиями коротких замыканий являются резкое увеличение тока в короткозамкнутой цепи и снижение напряжения в электрической сети, особенно вблизи места повреждения. Увеличение тока приводит к значительным механическим воздействиям на токоведущие части и изоляторы, на обмотки электрических машин. Прохождение больших токов вызывает повышенный нагрев токове-

душих частей и изоляции, что может привести к дальнейшему развитию аварии.

Резкое снижение напряжения при КЗ может привести к нарушению устойчивости параллельной работы генераторов и к системной аварии с большим народнохозяйственным ущербом.

Величина тока КЗ зависит от мощности генерирующих источников, электрической удаленности этих источников от места КЗ, вида КЗ, времени с момента возникновения короткого замыкания.

Для уменьшения последствий КЗ необходимо как можно быстрее отключить поврежденный участок, что достигается применением быстродействующих выключателей и релейной защиты с минимальной выдержкой времени. Немаловажную роль играют автоматическое регулирование и форсировка возбуждения генераторов, позволяющие поддерживать напряжение в аварийном режиме на необходимом уровне. Все электрические аппараты и токоведущие части электрических станций должны быть выбраны таким образом, чтобы исключалось их разрушение при прохождении по ним наибольших возможных токов КЗ, в связи с чем возникает необходимость расчета этих величин.

Данный предмет имеет прикладной характер, поэтому для лучшего усвоения курса студенты специальностей 1-43 01 01, 1-43 01 02, 1-43 01 03 и 1-53 01 04 всех видов обучения выполняют курсовую работу, которая посвящена расчету токов КЗ.

3. Задание на курсовую работу и график ее выполнения

При проектировании электрических систем и систем электроснабжения, а также в процессе их эксплуатации требуется производить ряд расчетов, среди которых важное место занимают расчеты процесса КЗ, т.е. вычисление токов и напряжений при заданном виде КЗ.

В связи с этим темой курсовой работы является определение аварийных токов и напряжений в электрической системе при внезапных КЗ, определяющих электромагнитный переходный процесс при заданных условиях.

Каждому студенту выдается индивидуальное задание на курсовую работу, которое разрабатывается руководителем и утверждается на кафедре. В задании указывается номер схемы электрической системы (рис. 1 – 4), данные параметров элементов системы (табл. 1), место и виды повреждений.

Таблица 1

Обозначение на схеме	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
1	2	3	4
C	$S_H = 1600 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $X_{*H} = 0,31$ $X_{*2} = 0,48$ $X_{*0} = 0,31$	$S = \infty$	$S_{K3} = 3000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $X_{*2} = 0,6$ $X_{*0} = 0,78$
$G_1^{(TГ)}$	$S_H = 300 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $\cos\varphi = 0,85$ $K_C = 0,48$ $X_d'' = 0,21$ $I_{*f} = 2,9$	$P_H = 260 \text{ МВт}$ $\cos\varphi = 0,8$ $K_C = 1,2$ $X_d'' = 0,24$ $I_{*f} = 2,8$	$P_H = 300 \text{ МВт}$ $\cos\varphi = 0,85$ $K_C = 1,15$ $X_d'' = 0,213$ $I_{*H} = 0,9$
$G_2^{(TГ)}$	$P_H = 100 \text{ МВт}$ $\cos\varphi = 0,85$ $K_C = 0,605$ $X_d'' = 0,18$ $I_{*f} = 2,5$	$S_H = 75 \text{ МВт}$ $\cos\varphi = 0,8$ $K_C = 0,75$ $X_d'' = 0,16$ $I_{*H} = 0,8$	$P_H = 50 \text{ МВт}$ $\cos\varphi = 0,8$ $K_C = 0,76$ $X_d'' = 0,13$ $I_{*f} = 2,7$
$G_3^{(TГ)}$	$S_H = 120 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $\cos\varphi = 0,85$ $K_C = 0,55$ $X_d'' = 0,213$ $I_{*H} = 0,95$	$P_H = 60 \text{ МВт}$ $\cos\varphi = 0,8$ $K_C = 0,73$ $X_d'' = 0,17$ $I_{*f} = 2,7$	$P_H = 100 \text{ МВт}$ $\cos\varphi = 0,85$ $K_C = 0,49$ $X_d'' = 0,2$ $I_{*H} = 0,9$
$G_4^{(TГ)}$	$S_H = 180 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $\cos\varphi = 0,8$ $K_C = 0,75$ $X_d'' = 0,19$ $I_{*H} = 0,84$	$P_H = 300 \text{ МВт}$ $\cos\varphi = 0,85$ $K_C = 0,6$ $X_d'' = 0,185$ $I_{*f} = 2,45$	$P_H = 600 \text{ МВт}$ $\cos\varphi = 0,85$ $K_C = 0,57$ $X_d'' = 0,21$ $I_{*f} = 2,5$

1	2	3	4
$G_5^{(ТГ)}$	$S_H = 200 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $\cos\varphi = 0,85$ $K_C = 0,58$ $X_d'' = 0,125$ $I_{*f} = 2,1$	$S_H = 400 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $\cos\varphi = 0,8$ $K_C = 0,6$ $X_d'' = 0,14$ $I_{*H} = 0,95$	$P_H = 250 \text{ МВт}$ $\cos\varphi = 0,8$ $K_C = 0,57$ $X_d'' = 0,137$ $I_{*f} = 2,3$
AT_1	$S_H = 250 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_{KBH-CH} = 10 \%$ $U_{KBH-HH} = 34 \%$ $U_{KCH-HH} = 22,5 \%$ $S_{HH} = 0,5 S_H$	$S_H = 200 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_{KBH-CH} = 10 \%$ $U_{KBH-HH} = 35 \%$ $U_{KCH-HH} = 22 \%$ $S_{HH} = 0,5 S_H$	$S_H = 125 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_{KBH-CH} = 10 \%$ $U_{KBH-HH} = 32 \%$ $U_{KCH-HH} = 21,5 \%$ $S_{HH} = 0,5 S_H$
T_1	$S_H = 200 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_{KBH-CH} = 10,5 \%$ $U_{KBH-HH} = 18 \%$ $U_{KCH-HH} = 6 \%$	$S_H = 400 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_{KBH-CH} = 11 \%$ $U_{KBH-HH} = 17,5 \%$ $U_{KCH-HH} = 6,5 \%$	$S_H = 750 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_{KBH-CH} = 10,5 \%$ $U_{KBH-HH} = 17 \%$ $U_{KCH-HH} = 6 \%$
T_2	$S_H = 450 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_K = 10,5\%$	$S_H = 300 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_K = 10\%$	$S_H = 400 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_K = 10,5\%$
T_3	$S_H = 125 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_K = 11\%$	$S_H = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_K = 11\%$	$S_H = 160 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_K = 10,5\%$
T_4	$S_H = 160 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_K = 11 \%$	$S_H = 80 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_K = 10 \%$	$S_H = 120 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_K = 10,5 \%$
T_5	$S_H = 250 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_K = 10, 5 \%$	$S_H = 600 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_K = 10 \%$	$S_H = 375 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_K = 11 \%$
T_6	$S_H = 80 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_{KBH-HH} = 10,5 \%$ $U_{KHH1-HH2} = 18 \%$ $S_{KHH1} = S_{HH2} = 0,5$	$S_H = 125 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_{KBH-HH} = 10,5 \%$ $U_{KHH1-HH2} = 14 \%$ $S_{KHH1} = S_{HH2} = 0,5$	$S_H = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_{KBH-HH} = 10,5 \%$ $U_{KHH1-HH2} = 14 \%$ $S_{KHH1} = S_{HH2} = 0,5$

1	2	3	4
H ₁	$S_H = 60 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 20 \text{ МВ} \cdot \text{А}$
H ₂	$S_H = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 200 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 180 \text{ МВ} \cdot \text{А}$
H ₃	$S_H = 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 20 \text{ МВ} \cdot \text{А}$
H ₄	$S_H = 130 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 80 \text{ МВ} \cdot \text{А}$
H ₅	$S_H = 150 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 120 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 115 \text{ МВ} \cdot \text{А}$
H ₆	$S_H = 30 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 50 \text{ МВ} \cdot \text{А}$
H ₇	$S_H = 70 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 50 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 80 \text{ МВ} \cdot \text{А}$
H ₈	$S_H = 50 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 30 \text{ МВ} \cdot \text{А}$	$S_H = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$
LR	$I_H = 2500 \text{ А}$ $U_H = 10 \text{ кВ}$ $X_P = 12 \%$	$I_H = 2000 \text{ А}$ $U_H = 10 \text{ кВ}$ $X_P = 0,105 \text{ Ом}$	$I_H = 2500 \text{ А}$ $U_H = 10 \text{ кВ}$ $X_P = 10 \%$
X _{N1}	$X_N = 1,2 \text{ Ом}$	$X_N = 0,8 \text{ Ом}$	$X_N = 1,0 \text{ Ом}$
X _{N2}	$X_{N^*} = 0,5$	$X_{N^*} = 0,65$	$X_{N^*} = 0,3$
W ₁	$l = 70 \text{ км}$	$l = 30 \text{ км}$	$l = 50 \text{ км}$
W ₂	$l = 90 \text{ км}$	$l = 120 \text{ км}$	$l = 90 \text{ км}$
W ₃	$l = 130 \text{ км}$	$l = 160 \text{ км}$	$l = 145 \text{ км}$
W ₄	$l = 60 \text{ км}$	$l = 70 \text{ км}$	$l = 40 \text{ км}$
W ₅	$l = 80 \text{ км}$	$l = 90 \text{ км}$	$l = 120 \text{ км}$
W ₆	$l = 50 \text{ км}$	$l = 108 \text{ км}$	$l = 90 \text{ км}$
W ₇	$l = 105 \text{ км}$	$l = 52 \text{ км}$	$l = 30 \text{ км}$
W ₈	$l = 280 \text{ км}$	$l = 235 \text{ км}$	$l = 305 \text{ км}$

Примечание. Все трансформаторы и автотрансформаторы – трехфазные и трехстержневые.

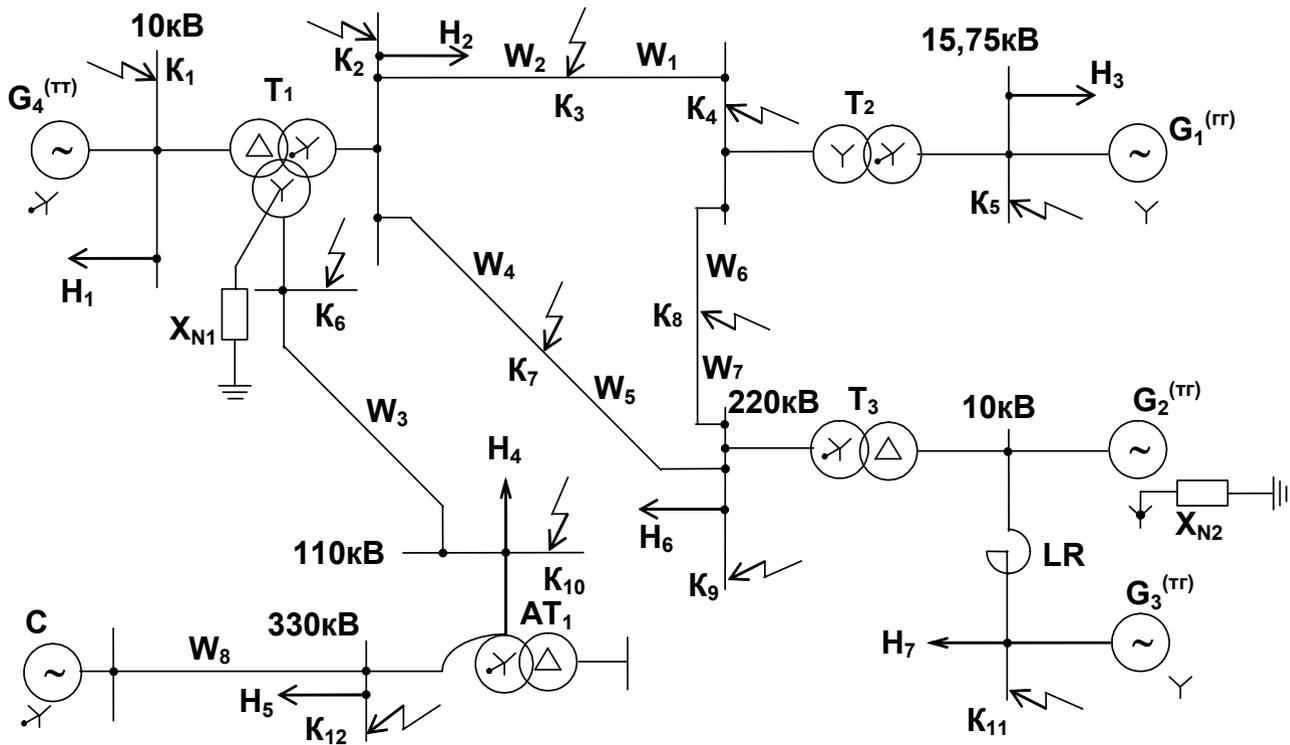


Рис. 1

10

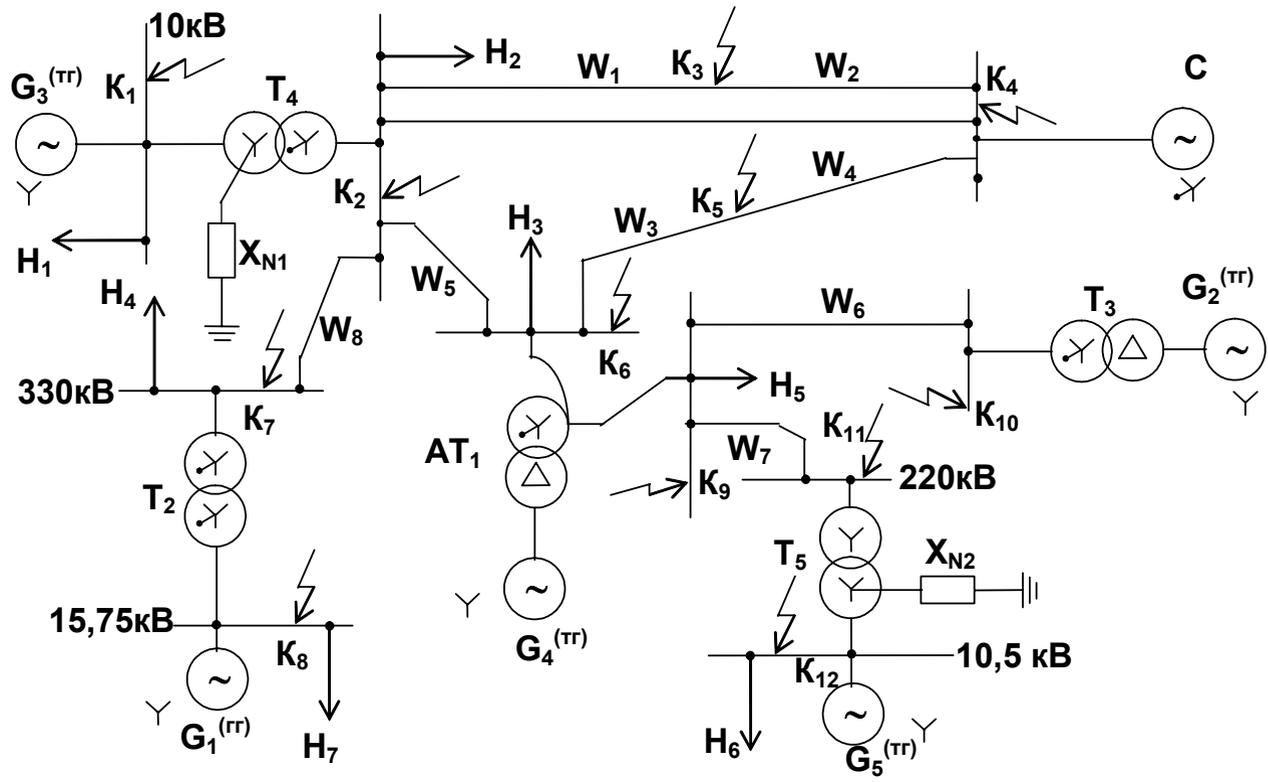


Рис. 2

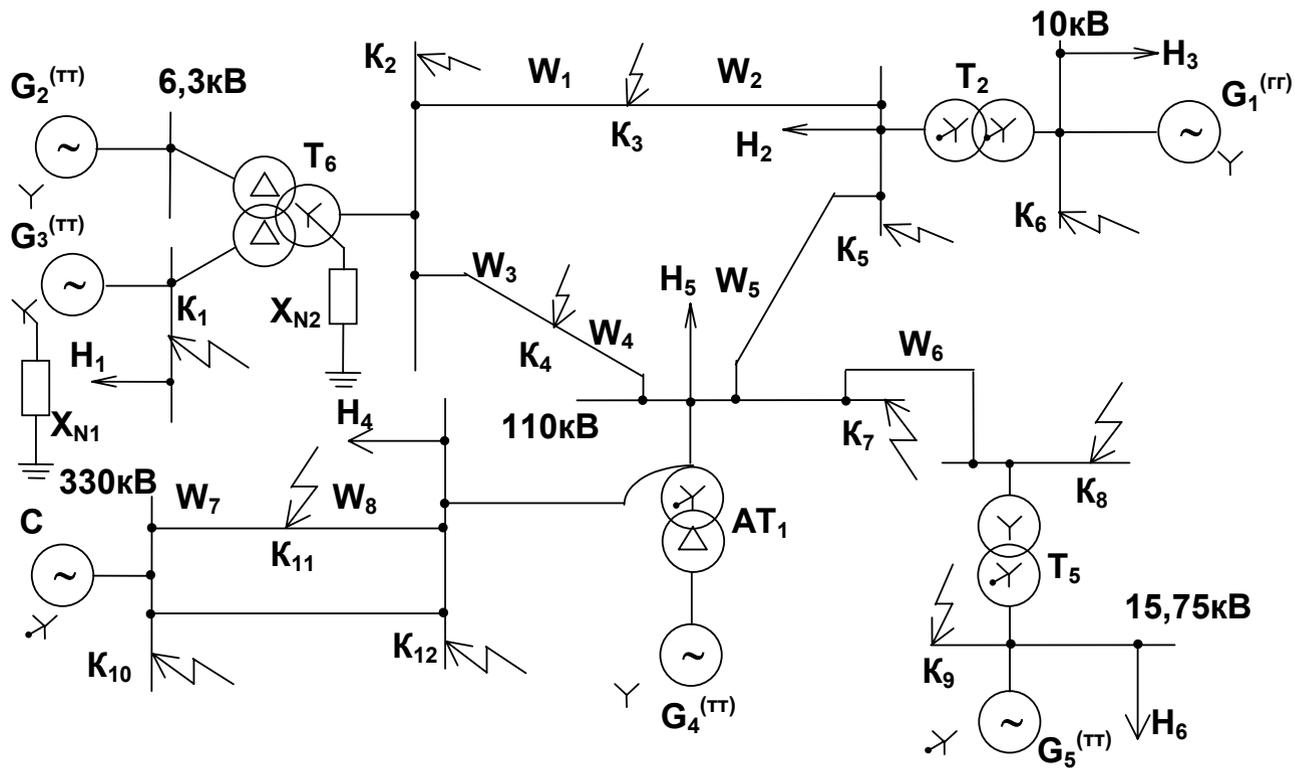


Рис. 3

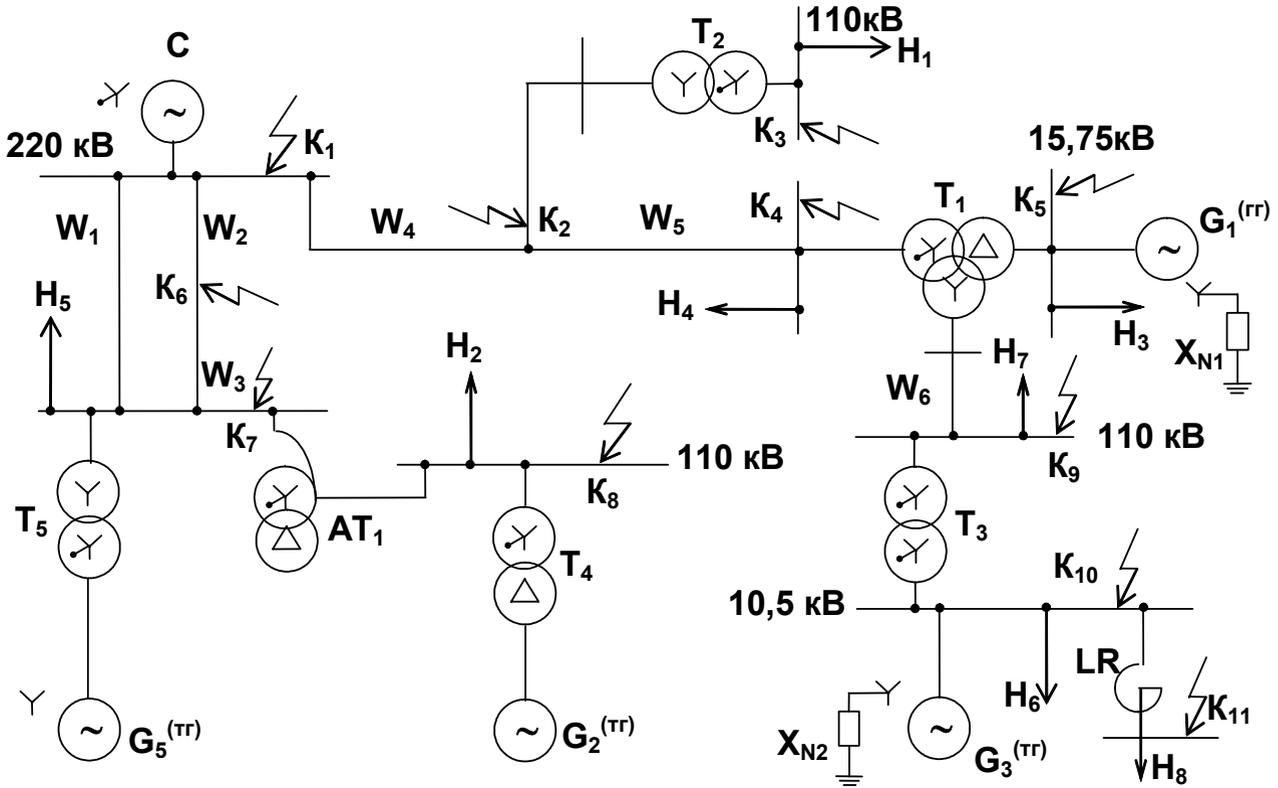


Рис. 4

В курсовой работе необходимо произвести расчет трехфазного или однофазного КЗ в сети 0,4 кВ для схемы, приведенной на рис. 5.

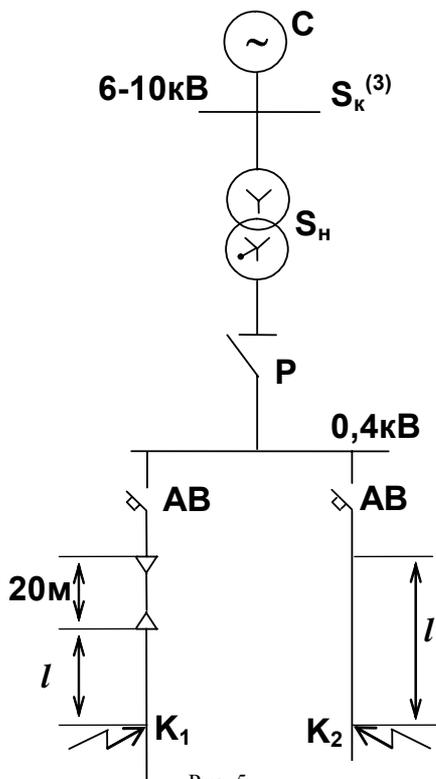


Рис. 5

Для этого в задании на работу приводится мощность КЗ системы $S_{к}^{(3)}$ на шинах, питающих распределительную сеть; мощность питающего трансформатора S_n ; место повреждения (K_1 или K_2), а также сечение F и длина l кабельной или воздушной линии, которые выполнены из алюминия.

В задании на курсовую работу могут входить специальные вопросы для более глубокой проработки одного из разделов по расчету токов КЗ. Здесь же указывается дата выдачи задания и срок сдачи законченной работы.

Прием задания к исполнению отмечается датой и подписью студента.

Выполнение курсовой работы в группах дневного отделения должно вестись по приводимому в задании графику.

В соответствии с графиком работы проводятся тематические групповые и индивидуальные консультации. Оформление расчетно-пояснительной записки должно вестись по мере завершения соответствующих разделов курсовой работы; полностью оформленная записка сдается руководителю для проверки.

4. Содержание и оформление пояснительной записки

Законченная курсовая работа представляется в виде пояснительной записки, в которой изложение следует вести от первого лица множественного числа (принимаем, вычисляем и т.д.). Пояснитель-

ная записка должна содержать титульный лист, задание, оглавление, краткое введение, освещение всех разделов, подлежащих выполнению в курсовой работе, и список использованной литературы.

В оглавлении перечисляются заголовки записки и указываются номера страниц, на которых они помещены.

Во введении приводятся перспективы развития энергетики Республики Беларусь и назначение расчетов токов КЗ.

Основная часть записки должна содержать исходные и преобразованные схемы, расчеты их параметров, а также величины определённых аварийных токов и напряжений.

Пояснительная записка выполняется чернилами от руки на одной стороне писчей бумаги формата А4. Страницы работы нумеруются арабскими цифрами. Титульный лист включают в общую нумерацию, которая должна быть сквозной (задание, рисунки, таблицы и т.д.). На титульном листе номер не ставят, на последующих страницах номер проставляют в правом верхнем углу. Объем расчетной записки составляет 20 – 25 страниц.

1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

1.1. Назначение и порядок выполнения расчетов

Современные энергосистемы включают в себя большое количество электростанций, трансформаторных подстанций, линий электропередач различного напряжения. Для выбора электрических аппаратов, проводников, шин, кабелей и токоограничивающих реакторов необходимо знать токи КЗ. При этом основная цель расчета состоит в определении периодической составляющей тока трехфазного КЗ в месте повреждения. Учет аperiodической составляющей производят приближенно.

Производить расчеты токов КЗ с учетом всех факторов достаточно сложно и часто практически невозможно. Вместе с тем, для решения вышеуказанных практических задач при проектировании и эксплуатации электроустановок оказывается достаточным располагать приближенными значениями токов КЗ. Поэтому при расчетах вводится ряд допущений, не оказывающих значительного влияния на точность и позволяющих существенно упростить расчет. К таким допущениям относятся следующие:

- 1) пренебрегают насыщением магнитных систем, что позволяет считать все уравнения, описывающие переходный процесс, линейными;
- 2) принимают, что ЭДС всех генерирующих источников совпадают по фазе (не учитывают качаний генераторов в процессе КЗ), что дает возможность перейти от комплексных величин к скалярным;
- 3) пренебрегают токами намагничивания силовых трансформаторов и автотрансформаторов;
- 4) трехфазная система сохраняет симметрию во всех точках, кроме места повреждения;
- 5) пренебрегают емкостными проводимостями, кроме случая простого замыкания на землю и расчета переходных процессов в длинных линиях электропередачи;
- 6) нагрузки учитываются приближенно некоторым постоянным сопротивлением, величина которого зависит от стадии переходного процесса;

7) пренебрегают учетом активных сопротивлений проводников в сетях 35 кВ и выше (если $r_{\Sigma} < \frac{1}{3} < x_{\Sigma}$).

8) приближенно учитывают затухание аperiodической составляющей тока КЗ в сложной схеме.

Следует иметь в виду, что эти допущения не вызывают ошибок, превышающих 5 %.

Расчет токов КЗ начинают с составления расчетной схемы, которая представляет собой однолинейную схему рассматриваемой системы с указанием тех элементов и их параметров, которые влияют на величину тока КЗ. Расчетная схема установки должна отражать нормальный режим работы.

По расчетной схеме составляют схему замещения. Схемой замещения называют электрическую схему, соответствующую по исходным данным расчетной схеме, но в которой все электромагнитные (трансформаторные) связи заменены электрическими. При этом активные элементы схемы (генерирующие источники и нагрузка) вводятся в схему замещения своими ЭДС и сопротивлениями соответствующего режима, а остальные пассивные элементы (трансформаторы и автотрансформаторы, воздушные и кабельные линии, реакторы) – только своими сопротивлениями. Таким образом, расчет токов при трехфазном КЗ выполняют в следующем порядке:

- 1) для рассматриваемой системы составляют расчетную схему;
- 2) по расчетной схеме составляют электрическую схему замещения;
- 3) путем постепенного преобразования приводят схему к простому виду, так, чтобы каждый источник питания или группа источников с результирующей ЭДС были связаны с точкой КЗ одним сопротивлением $X_{рез}$;

- 4) пользуясь законом Ома, по результирующим ЭДС и $X_{рез}$ определяют начальное значение периодической составляющей тока КЗ.

1.2. Составление схем замещения в относительных единицах

Сопротивление элементов электрических цепей может быть задано в именованных величинах и в процентах или относительных величинах. Для того чтобы схему замещения можно было преобразовать к простейшему виду, необходимо привести параметры элемен-

тов схем к одной какой-либо ступени напряжения и выразить эти параметры в единых масштабах. Последнее в установках напряжением свыше 1000 В удобнее производить с помощью системы относительных единиц (о.е.). Чтобы получить относительное значение какой-либо величины, нужно поделить ее на величину, принятую за единицу измерения. При этом за единицу измерения или, как принято называть, за базисную величину может быть принято любое количественное значение параметра соответствующей размерности.

Сущность системы о.е. заключается в том, что все фигурирующие в расчетах величины – сопротивления X , токи I , напряжения U и мощность S – выражаются не в обычных единицах (Ом, кА, кВ, МВ·А), а в долях от принятых за базисные единицы X_b, I_b, U_b, S_b .

Базисные величины связаны между собой законом Ома:

$$X_b = \frac{U_b}{\sqrt{3}I_b}$$

и уравнением мощности:

$$S_b = \sqrt{3} \cdot U_b \cdot I_b.$$

Из четырех базисных единиц только две выбираются произвольно, а две другие получаются из указанных соотношений.

Относительное значение любой величины при выбранных базисных условиях определяется по формуле

$$A_{*b} = \frac{A}{A_b}, \quad (1.1)$$

где A – значение величины в именованных единицах;

A_b – базисное значение этой же величины.

Звездочка * указывает, что величина выражена в о.е., индекс b – что она приведена к базисным условиям.

Используя выражение (1.1) для определения сопротивления в о.е., получим:

$$X_{*6} = \frac{X}{X_6} = X \frac{\sqrt{3}I_6}{U_6} = X \frac{\sqrt{3}I_6 U_6}{U_6 U_6} = X \frac{S_6}{U_6^2}, \quad (1.2)$$

где X – заданное индуктивное сопротивление, Ом на фазу.

Обычно относительные сопротивления элементов (генераторов, двигателей, трансформаторов и реакторов) задаются при номинальных условиях, т.е. за базисные величины приняты номинальные. Их величины определяются по выражению (1.2), где базисные величины заменяются соответствующими номинальными, т.е.

$$X_{*H} = X \frac{\sqrt{3}I_H}{U_H} = X \frac{S_H}{U_H^2}, \quad (1.3)$$

Чтобы вести расчет в о.е., необходимо все ЭДС и сопротивления элементов схемы выразить в о.е. при выбранных базисных условиях. Если эти величины заданы в именованных единицах, для их расчета служат выражения (1.1) и (1.2). Если они заданы в относительных номинальных единицах, то их пересчет к базисным условиям производится по следующим соотношениям:

$$E_{*6} = E_{*H} \frac{U_H}{U_6}; \quad (1.4)$$

$$X_{*6} = X_{*H} \frac{I_6}{I_H} \frac{U_H}{U_6}; \quad (1.5)$$

$$X_{*6} = X_{*H} \frac{S_6}{S_H} \frac{U_H^2}{U_6^2}. \quad (1.6)$$

Схема замещения может быть составлена точно, т.е. с учетом действительных коэффициентов трансформации участвующих трансформаторов, или приближенно, когда номинальное напряжение всех элементов, находящихся на одной ступени трансформации, принимают одинаковым и равным среднономинальному ($U_{ср.н}$) для данной ступени в соответствии со следующей шкалой: 765; 515; 340; 230; 158; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69;

0,4; 0,23; 0,127 кВ. В дальнейшем будем пользоваться приближенным приведением.

Практика расчетов токов КЗ показала, что наиболее целесообразно задаваться базисной мощностью и базисным напряжением, причем их значения принимают такими, чтобы счетная работа была простой. Базисную мощность можно принимать любой величины, но для удобства расчетов желательно принимать величину, кратную десяти или кратную установленной мощности генерирующих источников расчетной схемы.

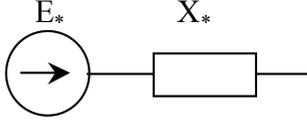
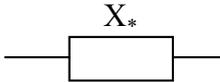
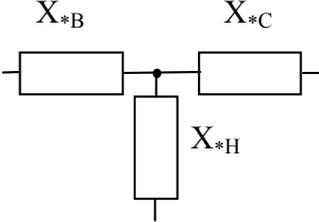
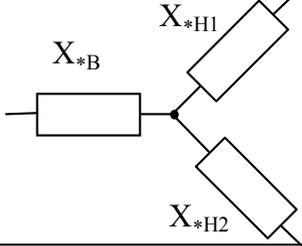
За базисное напряжение при приближенном приведении принимают средненоминальные напряжения ступеней $U_{\text{ср.н}}$. В этом случае пересчет относительных величин, выраженных при номинальных условиях, к базисным осуществляется по выражениям

$$E_{*б} = E_{*н}; \quad (1.7)$$

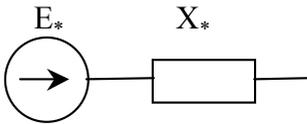
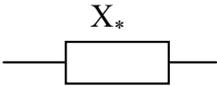
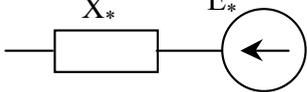
$$X_{*б} = X_{*н} \frac{I_б}{I_н} \quad \text{или} \quad X_{*б} = X_{*н} \frac{S_б}{S_н} \quad (1.8)$$

В табл. 1.1 даются схемы замещения элементов и формулы для определения их параметров в о.е. по приближенному приведению, в которых $S_б, S_н$ – базисная и номинальная мощность, МВ·А; $I_б$ – базисный ток, кА; $I_н, U_н$ – номинальный ток и напряжение, кА, кВ; $X_{*н}, E_{*н}$ – относительные сопротивления и ЭДС элементов схемы при их номинальных данных; $S_{\text{кз}}$ – мощность КЗ энергосистемы, МВ·А; S_∞ – система бесконечной мощности (система, в которой напряжение остается неизменным при любых изменениях режима); $X_{\text{уд}}$ – удельное сопротивление 1 км: для воздушных линий принимается равным 0,4 Ом/км, для кабельных – 0,08 Ом/км; l – длина ЛЭП, км; $U_{\text{к}}\%$ – напряжение КЗ трансформатора в процентах; $U_{\text{ср.н}}$ – среднее номинальное напряжение, кВ.

Сопротивления элементов схемы, приведенные к базисным условиям, наносят на схему замещения. Для этого каждый элемент в схеме замещения обозначают дробью: в числителе ставят порядковый номер элемента, а в знаменателе – значение относительного индуктивного сопротивления. ЭДС элементов придаются порядковые номера и указывается величина в о.е.

Элемент электроустановки	Исходный параметр	Схема замещения	Формулы для расчета параметров в о.е.
1	2	3	4
Генератор	E_{*H} X_{*H} S_{*H}		$E_* = E_{*H}$ $X_* = X_{*H} \frac{S_6}{S_H}$
Двухобмоточный трансформатор	$U_K\%$ S_H		$X_* = \frac{U_K\%}{100} \frac{S_6}{S_H}$
Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор)	$U_{KB-H}\%$ $U_{KB-C}\%$ $U_{KC-H}\%$ S_H		$X_{*i} = \frac{U_{Ki}\%}{100} \frac{S_6}{S_H}$, где $i = B, C, H$ $U_{KB} = 0,5(U_{KB-C} + U_{KB-H} - U_{KC-H})\%$ $U_{KC} = 0,5(U_{KB-C} + U_{KC-H} - U_{KB-H})\%$ $U_{KH} = 0,5(U_{KB-H} + U_{KC-H} - U_{KB-C})\%$
Двухобмоточный трансформатор с расщеплением на две ветви	S_H $U_{KB-H}\%$ $U_{KH1-H2}\%$ $S_1 = S_2 = 0,5 \cdot S_H$		$X_{*B} = [(U_{KB-H}\% - 0,5 U_{KH1-H2}\%)/100] \frac{S_6}{S_H}$ $X_{*H1} = X_{*H2} = \frac{U_{KH1-H2}\%}{100} \frac{S_6}{2S_H}$

Окончание табл. 1.1

1	2	3	4
Система	$S = \infty$ $S_{КЗ}$ $X_{*Н}, S_{*Н}$		$E_* = 1; X_* = 0$ $E_* = 1; X_* = \frac{S_6}{S_{КЗ}}$ $E_* = 1; X_* = X_{*Н} \frac{S_6}{S_{Н}}$
Линия электропередачи	$X_{уд}$ l $U_{Н}$		$X_* = X_{уд} l \frac{S_6}{U_{ср.н}^2}$
Реактор	$X_P, \text{Ом},$ $X_P\%, I_{Н}, U_{Н}$		$X_* = X_P \frac{S_6}{U_{ср.н}^2}$ $X_* = \frac{X_P\%}{100} \frac{I_6}{I_{Н}} \frac{U_{Н}}{U_{ср.н}^2}$
Обобщенная нагрузка	$E_{*Н}$ $X_{*Н}$ $S_{Н}$		$E_* = E_{*Н}$ $X_* = X_{*Н} \frac{S_6}{S_{Н}}$

Примечание. При расчете сопротивления реактора базисный ток должен быть приведен к ступени, на которой включен реактор.

Пример 1.1. Составить схему замещения и определить ее параметры для расчетной схемы, изображенной на рис. 1.1.

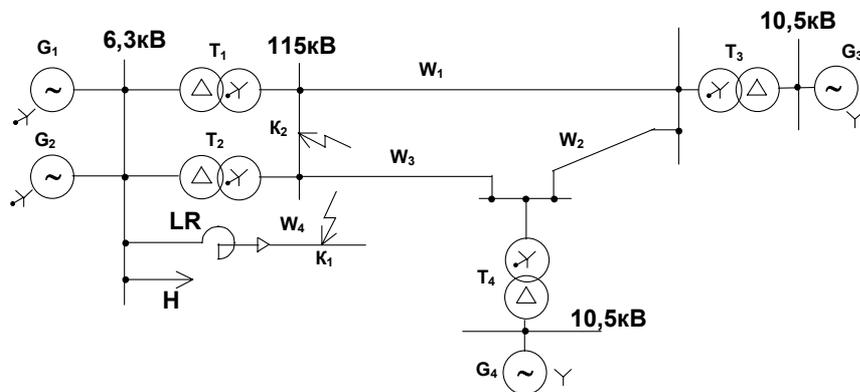


Рис. 1.1

Исходные данные элементов схемы:

генераторы: турбогенераторы (ТГ), гидрогенераторы (ГГ)

$$G_1 \text{ (ТГ)} - X_d'' = 0,2; \quad E_{*H} = 1,1; \quad S_H = 60 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \quad \cos\varphi = 0,8;$$

$$G_2 \text{ (ТГ)} - X_d'' = 0,15; \quad E_{*H} = 1,08; \quad S_H = 120 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \quad \cos\varphi = 0,8;$$

$$G_3 \text{ (ТГ)} - X_d'' = 0,18; \quad E_{*H} = 1,1; \quad S_H = 80 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \quad \cos\varphi = 0,8;$$

$$G_4 \text{ (ТГ)} - X_d'' = 0,12; \quad E_{*H} = 1,05; \quad S_H = 100 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \quad \cos\varphi = 0,8;$$

линии электропередач

$$W_1 - l = 80 \text{ км};$$

$$W_2 - l = 70 \text{ км};$$

$$W_3 - l = 60 \text{ км};$$

$$W_4 - l = 5 \text{ км};$$

трансформаторы

$$T_1 - S_H = 80 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \quad U_K = 10 \%;$$

$$T_2 - S_H = 120 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \quad U_K = 12 \%;$$

$$T_3 - S_H = 120 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \quad U_K = 14 \%;$$

$$T_4 - S_H = 140 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \quad U_K = 8 \%;$$

реакторы

$$LR - X_p = 6\%; \quad I_H = 1000 \text{ A}; \quad U_H = 6 \text{ кВ};$$

нагрузка

$$S_H = 30 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad E_{*H} = 0,8; \quad X_{*H} = 0,35.$$

Схема замещения для расчётов токов КЗ представлена на рис. 1.2.

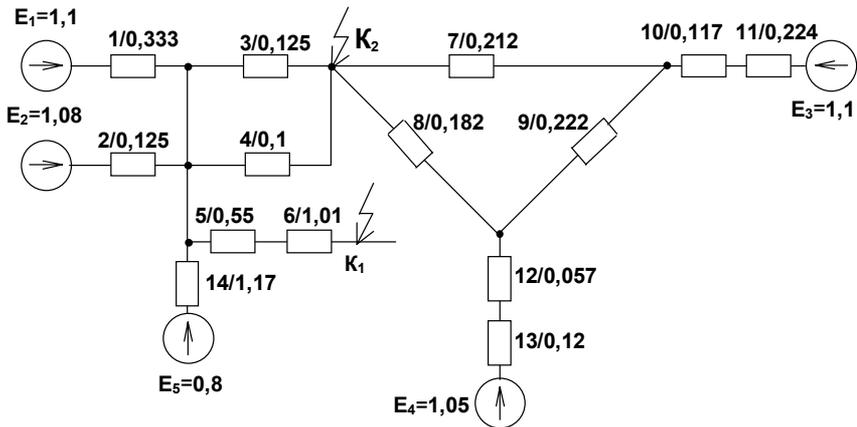


Рис. 1.2

Определим параметры элементов этой схемы замещения при

$$S_6 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad U_6 = 6,3 \text{ кВ}; \quad I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,15 \text{ кА}$$

по формулам в табл. 1.1:

Генераторы

$$\text{ЭДС} - E_i = E_{*H};$$

$$G_1 - E_1 = 1,1; \quad G_2 - E_2 = 1,08;$$

$$G_3 - E_3 = 1,1; \quad G_4 - E_4 = 1,05;$$

$$\text{сопротивления } X_* = X_d'' \frac{S_6}{S_H}.$$

$$G_1 - X_1 = 0,2 \cdot \frac{100}{60} = 0,333; \quad G_3 - X_{11} = 0,18 \cdot \frac{100}{80} = 0,224;$$

$$G_2 - X_2 = 0,15 \cdot \frac{100}{120} = 0,125; \quad G_4 - X_{13} = 0,12 \cdot \frac{100}{100} = 0,12;$$

трансформаторы

$$\text{сопротивления } X_* = \frac{U_{\kappa} \% S_{\bar{6}}}{100 S_{\text{H}}}.$$

$$T_1 - X_3 = \frac{10}{100} \cdot \frac{100}{80} = 0,125; \quad T_1 - X_4 = \frac{12}{100} \cdot \frac{100}{120} = 0,1;$$

$$T_3 - X_{10} = \frac{14}{100} \cdot \frac{100}{120} = 0,117; \quad T_4 - X_{12} = \frac{8}{100} \cdot \frac{100}{140} = 0,057;$$

линии электропередач

$$\text{сопротивления } X_* = X_{\text{уд}} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср.н}}^2}.$$

$$X_6 = 0,08 \cdot 5 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 1,01; \quad X_8 = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,182;$$

$$X_7 = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,212; \quad X_9 = 0,4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,222;$$

реактор

$$\text{сопротивление } X_* = \frac{X_p \%}{100} \cdot \frac{I_{\bar{6}}}{I_{\text{H}}} \cdot \frac{U_{\text{H}}}{U_{\text{ср.н}}};$$

$$LR - X_5 = \frac{6}{100} \cdot \frac{9,16}{1} \cdot \frac{6}{6,3} = 0,55;$$

нагрузка

$$\text{ЭДС} - E_* = E_{*\text{H}}; \quad H - E_5 = 0,8;$$

$$\text{сопротивление } X_* = X_{*н} \cdot \frac{S_6}{S_n}; \quad H - X_{14} = 0,35 \cdot \frac{100}{30} = 1,17.$$

1.3. Преобразование схем замещения

После того как схема замещения составлена и определены сопротивления всех элементов, она преобразуется к наиболее простому виду. Преобразование (свертывание) схемы выполняется в направлении от источника питания к месту КЗ. Поэтому преобразование схемы выгодно вести так, чтобы аварийная ветвь по возможности была сохранена до конца преобразования или в крайнем случае участвовала в нем только на последних его этапах. В частности, концы нагрузочных ветвей, ЭДС которых принимаются равными нулю (установившийся режим), не следует соединять с точкой трехфазного КЗ, а лучше эти ветви объединять с генераторами в эквивалентные ветви. При этом новым сопротивлениям и ЭДС, полученным при преобразованиях, даются возрастающие порядковые номера.

Для преобразования схем используются методы, известные из теоретических основ электротехники. Так, последовательные сопротивления суммируются непосредственно, параллельные – через проводимости, а при смешанных сопротивлениях используются те и другие методы. Схема, состоящая из последовательных, параллельных и смешанных сопротивлений, является простой схемой и легко преобразуется к простейшему виду.

Если схема содержит замкнутые контуры, она является сложной, и для преобразования ее к простейшему виду необходимо использовать более сложные приемы.

Преобразование треугольника (Δ) в звезду (Y), и наоборот (рис. 1.3). Сопротивления треугольника определяются через сопротивления звезды по формулам

$$X_{12} = X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_3}; \quad X_{13} = X_1 + X_3 + \frac{X_1 X_3}{X_2};$$

$$X_{23} = X_2 + X_3 + \frac{X_2 X_3}{X_1},$$
(1.9)

а сопротивление звезды – по формулам

$$X_1 = \frac{X_{12}X_{13}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}; \quad X_2 = \frac{X_{12}X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}; \quad (1.10)$$

$$X_3 = \frac{X_{13}X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}.$$

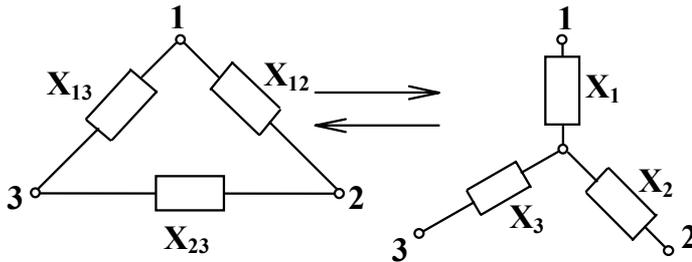


Рис. 1.3

Замена нескольких генераторов, сходящихся в одной точке, одним эквивалентным. Пусть имеется схема (рис. 1.4), содержащая n генераторов, сходящихся в точке "а". Тогда сопротивления и ЭДС преобразованной схемы рассчитываются по формулам

$$X_{\text{экв}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{X_i}}; \quad (1.11)$$

$$E_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \frac{1}{X_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{X_i}}. \quad (1.12)$$

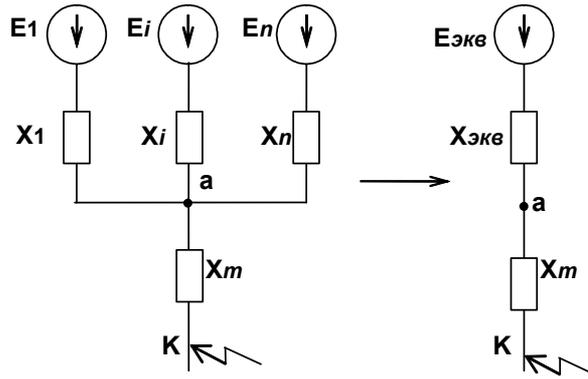


Рис. 1.4

Если в схеме две ЭДС, формулы упрощаются и имеют следующий вид:

$$E_{\text{экв}} = \frac{E_1 X_2 + E_2 X_1}{X_1 + X_2}; \quad X_{\text{экв}} = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2}. \quad (1.13)$$

Иногда пользуются так называемым способом токораспределения (коэффициентов распределения). В процессе преобразования схемы замещения часто возникает задача разделения так называемых связанных цепей. Этот случай показан на рис. 1.5.

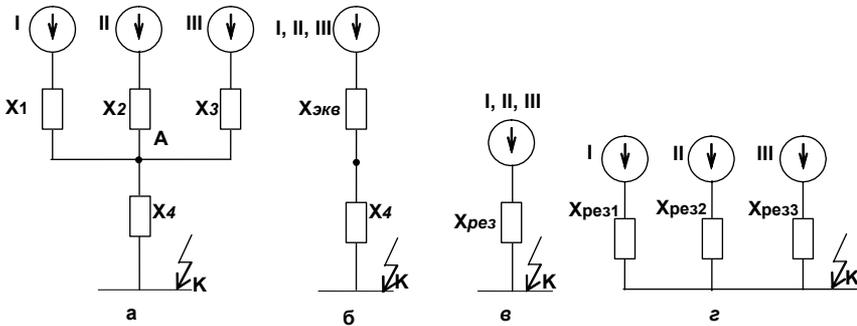


Рис. 1.5

Токи от источников I, II, III проходят через общее сопротивление X_4 . Для того чтобы определить ток, поступающий к точке КЗ от каждого источника, необходимо преобразовать схему к лучевому ви-

ду (при расчете по индивидуальному изменению), показанному на рис. 1.5, г. При расчете по схеме, полученной при таком преобразовании, токи, подтекающие в точку КЗ от отдельных источников, должны быть такими же, какими они получились бы в схеме до преобразования. Расчет производится в следующем порядке.

Составляют схему замещения для данной точки КЗ и путем постепенного преобразования приводят ее к виду, как на рис. 1.5, а, причем в общем случае число ветвей источников может быть любым. Далее определяют результирующее сопротивление схемы (рис. 1.5, в):

$$X_{рез} = X_{эқв} + X_4, \quad (1.14)$$

где $X_{эқв}$ – эквивалентное сопротивление всех источников питания относительно точки А схемы:

$$X_{эқв} = X_1 || X_2 || X_3. \quad (1.15)$$

Относительное значение периодической составляющей тока в месте повреждения принимают за единицу ($I_{*П} = 1$) и находят коэффициенты распределения, т.е. долю участия в токе КЗ каждого источника. На основании законов Кирхгофа можно записать:

$$I_{*П I} + I_{*П II} + I_{*П III} = I, \quad (1.16)$$

а также

$$\frac{I_{*П III}}{I_{*П}} = \frac{X_{эқв}}{X_1}; \quad \frac{I_{*П III}}{I_{*П}} = \frac{X_{эқв}}{X_2} \quad \text{и т.д.}$$

Отсюда коэффициенты распределения по ветвям определим по формулам

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= I_{*П I} = X_{эқв}/X_1; \\ C_2 &= I_{*П II} = X_{эқв}/X_2; \\ C_3 &= I_{*П III} = X_{эқв}/X_3. \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

Таким образом, используя коэффициенты распределения, можно по суммарному току в месте КЗ определить, как он распределится по ветвям. Правильность вычисления коэффициентов можно проверить по выполнению условия

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1. \quad (1.18)$$

Учитывая, что токораспределение по ветвям должно остаться неизменным, получаем (см. рис. 1.5, г):

$$X_{\text{рез1}} = X_{\text{рез}}/C_1; \quad X_{\text{рез2}} = X_{\text{рез}}/C_2; \quad X_{\text{рез3}} = X_{\text{рез}}/C_3. \quad (1.19)$$

Метод рассечения узла. Когда трехфазное КЗ находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями (рис. 1.6, а) и необходимо определить токи в этих ветвях, прибегают к методу разрезания узла по точке КЗ. На каждой образовавшейся отдельной ветви сохраняется точка КЗ (рис. 1.6, б).

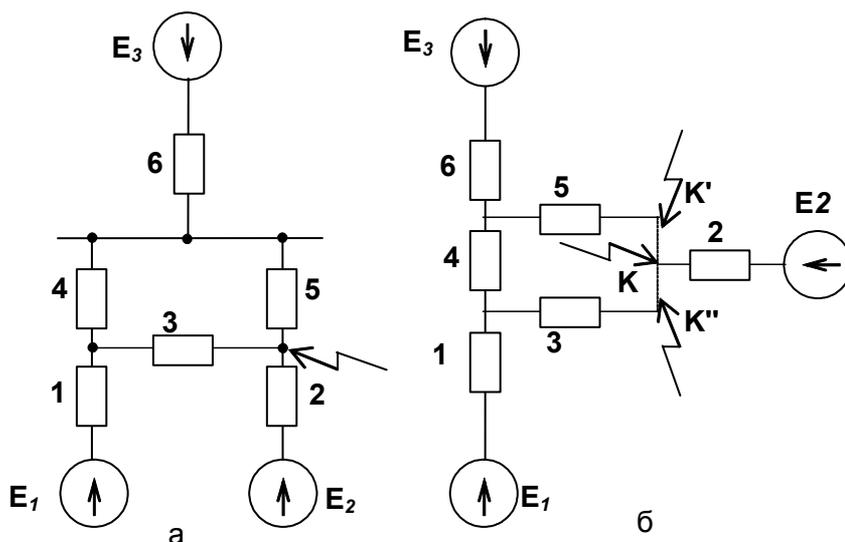


Рис. 1.6

Далее полученную схему нетрудно преобразовать относительно любой из точек КЗ, учитывая другие ветви с короткими замыканиями как обычные нагрузочные ветви с ЭДС, равными нулю. Такой прием особенно эффективен, когда нужно найти ток в одной из ветвей, присоединенных к точке КЗ.

Определенные трудности в упрощении схем возникают, когда точка КЗ находится в одном из узлов многоугольника, к другим узлам которого присоединены генерирующие ветви. Примером могут служить случаи КЗ в схемах, приведенных на рис. 1.7 и 1.8.

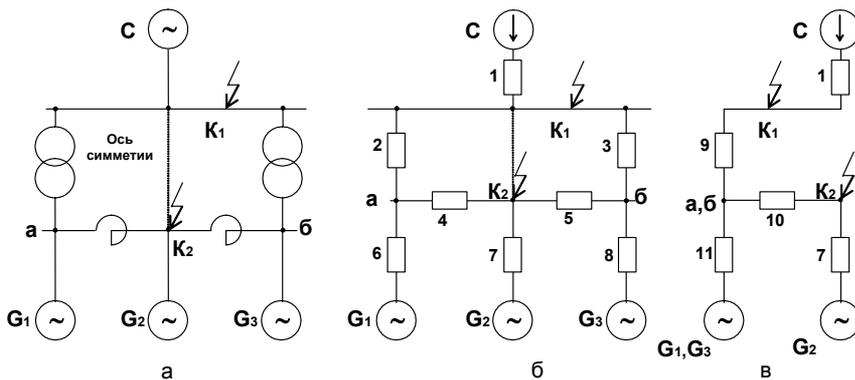


Рис. 1.7

Значительное упрощение схем достигается совмещением точек одинакового потенциала. Если точка КЗ делит схему на две симметричные части, например, точки K_1, K_2 (рис. 1.7, а), то при одинаковых характеристиках генераторов G_1, G_2 и трансформаторов узлы "а" и "б" схемы будут иметь одинаковые потенциалы, вследствие чего их можно совместить. При совмещении равнопотенциальных точек сопротивления одноименных точек складываются, как параллельные, и получают новую схему (рис. 1.7, в). В этой схеме $X_9 = X_2 \parallel X_3$; $X_{10} = X_4 / X_5$; $X_{11} = X_6 \parallel X_8$. Дальнейшее преобразование схемы производится по обычным правилам.

Рассмотрим случай, показанный на рис. 1.8. Здесь генераторы G_1 и G_2 имеют одинаковые ЭДС, вследствие чего их можно объединить в эквивалентную машину с $S = 2 \cdot S_n$. При таком объединении образуется треугольник сопротивлений (X_4, X_6, X_7), который преобразуется в звезду (X_9, X_{10}, X_{11}), как показано на рис. 1.8, б. В схеме на рис. 1.8, в определяют сопротивления $X_{12} = X_2 + X_9$ и $X_{13} = X_5 + X_{10}$. Получившийся в результате треугольник (X_3, X_{12}, X_{13}) преобразуется в звезду (X_{14}, X_{15}, X_{16}). После определения сопротивлений $X_{17} = X_1 + X_{14}$ и $X_{18} = X_{11} + X_{16}$ получаем окончательную схему, приведенную на рис. 1.8, г.

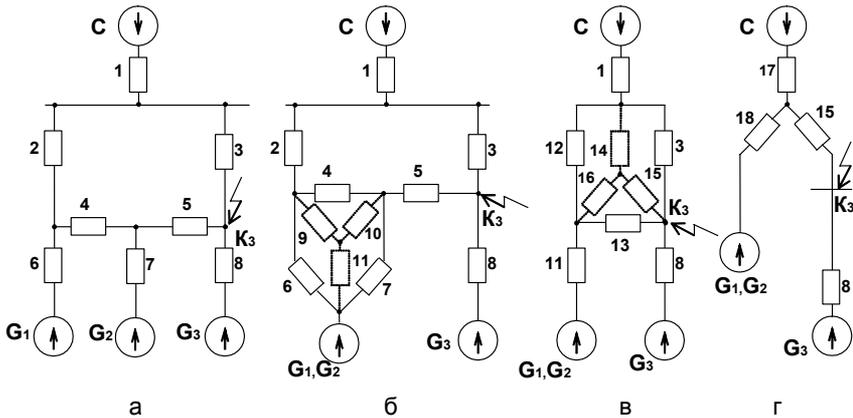


Рис. 1.8

Пример 1.2. Упростить схему замещения (см. рис. 1.2) при КЗ в точке K_1 .

Заменим несколько сопротивлений одним:

$$X_{15} = X_5 + X_6 = 0,55 + 1,01 = 1,56; \quad X_{16} = X_{10} + X_{11} = 0,117 + 0,224 = 0,341;$$

$$X_{17} = X_{12} + X_{13} = 0,057 + 0,12 = 0,177; \quad X_{18} = X_3 // X_4 = 0,125 // 0,1 = 0,057.$$

Используя указанные преобразования (заменяя Δ сопротивлений X_7, X_8, X_9 в Y X_{19}, X_{20}, X_{21} и ветви с E_1, X_1 и E_2, X_2 в ветвь E_6, X_{22} с учетом последовательного и параллельного соединения сопротивлений), можно схему, изображенную на рис. 1.2, привести к более простой (рис. 1.9) и определить ее новые параметры по формулам (1.10) и (1.13):

$$X_{19} = \frac{X_7 \cdot X_8}{X_7 + X_8 + X_9} = \frac{0,212 \cdot 0,182}{0,212 + 0,182 + 0,222} = 0,0625;$$

$$X_{20} = \frac{X_7 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} = \frac{0,212 \cdot 0,222}{0,212 + 0,182 + 0,222} = 0,0765;$$

$$X_{21} = \frac{X_8 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} = \frac{0,182 \cdot 0,212}{0,212 + 0,182 + 0,222} = 0,0655;$$

$$X_{22} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2} = \frac{0,333 \cdot 0,125}{0,333 + 0,125} = 0,091;$$

$$E_6 = \frac{E_1 \cdot X_2 + E_2 \cdot X_1}{X_1 + X_2} = \frac{1,1 \cdot 0,125 + 1,08 \cdot 0,333}{0,333 + 0,125} = 1,085;$$

$$X_{23} = X_{18} + X_{19} = 0,057 + 0,0625 = 0,118;$$

$$X_{24} = X_{16} + X_{20} = 0,341 + 0,0765 = 0,417;$$

$$X_{25} = X_{17} + X_{21} = 0,177 + 0,0655 = 0,242.$$

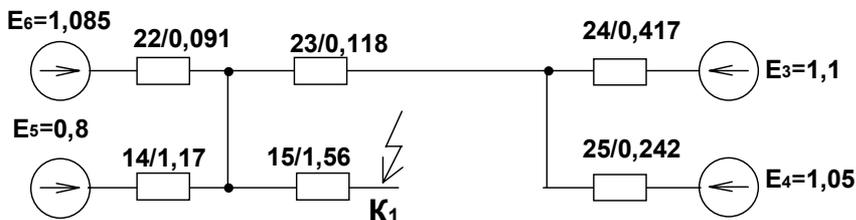


Рис. 1.9

Схему (на рис. 1.9) легко дальше привести к простейшему виду с помощью рассмотренных преобразований. По найденным результирующей ЭДС и результирующему сопротивлению определяем периодическую составляющую тока в месте КЗ.

После этого, постепенно разворачивая схему, можно найти токи в отдельных ветвях и напряжения в различных точках исходной схемы.

Преобразование схемы должно производиться в следующей очередности:

1. Необходимо проверить, нет ли в схеме точек одинакового потенциала и, если таковые обнаруживаются, совместить их.
2. Сложить последовательные и параллельные сопротивления.
3. Применить преобразование треугольника в звезду, или наоборот.
4. Определить относительное результирующее сопротивление всей схемы до места КЗ.

1.4. Аналитический расчет установившегося режима короткого замыкания

Под установившимся режимом понимают ту стадию процесса КЗ, когда все возникшие в начальный момент КЗ свободные токи практически затухли и полностью закончен подъем тока возбуждения под действием автоматического регулирования возбуждения (АРВ).

Обычно считают, что этот режим наступает уже через несколько секунд после возникновения КЗ. При этом предполагается, что скорость вращения генератора остается неизменной (синхронной). Такое представление установившегося режима является условным, так как подобный режим в современных электрических системах фактически не имеет места, ввиду того что релейная защита отключает участок сети, на котором произошло КЗ.

Поэтому названный режим не является характерным. Но знание уровня установившегося тока КЗ необходимо при определении ряда параметров (например, периодического тока КЗ), при выборе и настройке некоторых видов релейной защиты (например, токовых защит генератора).

В установившемся режиме генераторы вводятся в схему замещения относительным значением ЭДС E_{*q} и синхронной ненасыщенной реактивностью по продольной оси X_d , которые определяются по следующим выражениям:

$$E_{*q} = I_{*f} = \sqrt{(U_* \cos \varphi)^2 + (U_* \sin \varphi + I_* X_d)^2}; \quad (1.20)$$

$$X_d = \frac{C}{K_C}, \quad (1.21)$$

где U_* , I_* , $\cos \varphi$ – соответственно напряжение, ток в о.е. и коэффициент мощности, при которых работал генератор до КЗ;

C – относительное значение ЭДС ненасыщенного генератора при токе возбуждения, равном единице bv . Среднее значение C для турбогенераторов – 1,2, а для гидрогенераторов – 1,06;

K_C – отношение короткого замыкания. Среднее значение K_C для турбогенераторов равно 0,7, для гидрогенераторов – 1,1.

Если действительную характеристику холостого хода генератора заменить прямой, проходящей через начало координат и точку с координатами (1,1), будем иметь:

$$X_d = \frac{1}{K_C}. \quad (1.22)$$

Нагрузки учитываются в расчетной схеме генерирующими ветвями $E_{*н} = 0$ и относительным сопротивлением $X_{*н} = 1,2$, которое приведено к полной мощности нагрузки и $U_{ср.н}$ ступени, где присоединена данная нагрузка. Поэтому сопротивления X_d и $X_{*н}$ необходимо обязательно приводить к базисным условиям.

Следует отметить, что нагрузка, присоединенная непосредственно к точке КЗ, не играет роли, поэтому она в схему замещения не вводится.

Генераторы в установившемся режиме КЗ в зависимости от наличия или отсутствия АРВ характеризуются различными параметрами. В связи с этим расчет аварийных токов производится по-разному.

1.4.1. Расчет при отсутствии в схеме генераторов с АРВ

Когда генераторы не имеют АРВ, расчет установившегося режима трехфазного КЗ при принятых выше допущениях по существу сводится к определению токов и напряжений в линейной схеме, для которой известны все сопротивления и ЭДС.

Для расчета необходимо, используя все известные способы преобразования схем, найти результирующее сопротивление схемы относительно точки КЗ $X_{рез}$ с приложенной за ним результирующей ЭДС.

Пример 1.3. Определить величину установившегося тока при трехфазном КЗ в точке K_2 для расчетной схемы (см. рис. 1.1), в которой все генераторы без АРВ и до КЗ работали с номинальными параметрами.

Примем следующие базисные величины: $S_б = 100$ МВ·А; $U_б = 115$ кВ.

В этом случае генераторы будут введены в схему замещения следующими значениями ЭДС и сопротивлений:

$$G_1, G_2 \quad E_1 = E_2 = \sqrt{(1 \cdot 0,8)^2 + (1 \cdot 0,6 + 1 \cdot \frac{1,2}{0,7})^2} = 2,45;$$

$$X_1 = X_d \frac{S_б}{S_H} = \frac{C}{K_c} \frac{S_б}{S_H} = \frac{1,2}{0,7} \frac{100}{60} = 2,857;$$

$$X_2 = X_d \frac{S_б}{S_H} = \frac{1,2}{0,7} \frac{100}{120} = 1,428;$$

$$G_3, G_4 \quad E_3 = E_4 = \sqrt{(1 + 0,8)^2 + (1 \cdot 0,6 + 1 \cdot \frac{1,06}{1,1})^2} = 1,75;$$

$$X_{11} = X_d \frac{S_6}{S_H} = \frac{1,06}{1,1} \frac{100}{80} = 1,193;$$

$$X_{13} = X_d \frac{S_6}{S_H} = \frac{1,06}{1,1} \frac{100}{100} = 0,954.$$

Нагрузка в схему замещения введется $E_5 = E_{*H} = 0$ и сопротивлением

$$X_{14} = X_{*H} \frac{S_6}{S_H} = 1,2 \frac{100}{30} = 4.$$

Сопротивления пассивных элементов (линии, трансформаторы, реакторы) останутся теми же, что и в схеме, изображенной на рис. 1.2.

Используя методы преобразования схем, получим результирующую схему (рис. 1.10).

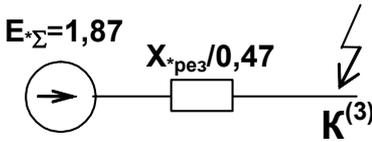


Рис. 1.10

По результирующим $E_{*\Sigma}$ и $X_{*рез}$ относительно места повреждения определяется ток КЗ:

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_{*\Sigma}}{X_{*рез}} = \frac{1,87}{0,47} = 3,97.$$

Для получения установившегося тока трехфазного КЗ в именованных единицах необходимо полученный результат умножить на базисный ток:

$$I_{\infty}^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_6 = 3,97 \cdot 0,5 = 1,987 \text{ кА},$$

где $I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,5 \text{ кА}.$

1.4.2. Расчет при наличии в схеме генераторов с АРВ

В настоящее время все генераторы, выпускаемые отечественной промышленностью, снабжаются и работают с АРВ.

Снижение напряжения на выводах генератора при КЗ приводит в действие устройство АРВ, которое стремится поддержать напряжение на уровне номинального путем увеличения тока возбуждения. Поэтому можно заранее предвидеть, что токи и напряжения в этих условиях будут всегда больше, чем при отсутствии АРВ. Однако рост тока возбуждения у генератора ограничен предельным током возбуждения $I_{*гр}$.

Следовательно, для каждого генератора можно установить наименьшую величину внешней реактивности при КЗ, за которой генератор при предельном возбуждении обеспечивает U_n на своих выводах. Такую реактивность называют критической $X_{*кр}$, которая может быть определена по формуле

$$X_{*кр} = X_d \frac{U_{*н}}{E_{*гр} - U_{*н}}; \quad (1.23)$$

связанный с ней критический ток:

$$I_{*кр} = \frac{U_{*н}}{X_{*кр}}. \quad (1.24)$$

Среднее значение $X_{*кр}$ для типовых генераторов при номинальных условиях составляет 0,5, а критического тока – 2.

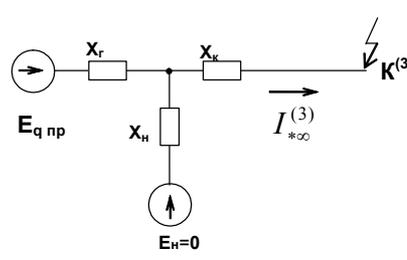
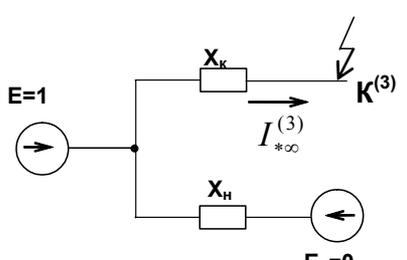
В установившемся режиме при трехфазном КЗ генератор, имеющий АРВ, может оказаться в одном из двух режимов – предельного возбуждения или нормального напряжения. Зная $X_{*кр}$ достаточно сопоставить с ним внешнюю реактивность $X_{*вн}$, чтобы однозначно решить вопрос, в каком режиме работает генератор.

Внешняя реактивность представляет собой суммарное сопротивление всех элементов сети, по которым протекает ток, от выводов генератора до точки КЗ.

При сравнении $X_{*вн}$ и $X_{*кр}$ следует помнить, что они должны быть приведены к общим базисным условиям.

В табл. 1.2 сведены все соотношения, характеризующие указанные выше возможные режимы генератора при КЗ.

Таблица 1.2

Режим предельного возбуждения	Режим нормального напряжения
$X_{*ВН} < X_{*кр}; I_{*f} = I_{*fпр}; U_* < U_{*Н};$	$X_{*ВН} \geq X_{*кр}; I_{*f} \leq I_{*fпр}; U_* = U_{*Н};$
	
$I_{*∞}^{(3)} = \frac{E_{\mathcal{E}}}{X_{\Sigma}}$	$I_{*∞}^{(3)} = \frac{1}{X_K}$

Пример 1.4. Определить установившийся ток трехфазного КЗ для схемы, изображенной на рис 1.11, и остаточное напряжение на выводах генератора.

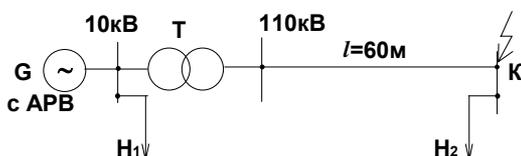


Рис. 1.11

Исходные данные:
 $G - S_H = 240 \text{ МВ} \cdot \text{А};$
 $K_c = 0,7;$
 $I_{*fпр} = 3;$
 $T - S_H = 240 \text{ МВ} \cdot \text{А};$
 $U_K\% = 10,5\%;$
 $H_1 - S_H = 24 \text{ МВ} \cdot \text{А};$
 $H_2 - S_H = 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$

Принимаем базисные условия: $S_0 = 240 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_0 = 115 \text{ кВ}.$

Схема замещения представлена на рис. 1.12 (нагрузка H_2 отсекается трехфазным КЗ, поэтому она в схему замещения не введена).

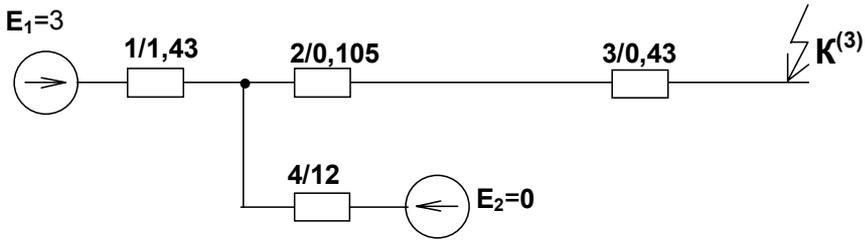


Рис. 1.12

Определим параметры схемы замещения:

$$E_1 = I_{*fnp} = 3;$$

$$X_1 = X_d \frac{S_6}{S_H} = \frac{1}{K_c} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{1}{0,7} \cdot \frac{240}{240} = 1,43;$$

$$X_2 = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{240}{240} = 0,105;$$

$$X_3 = X_{уд} \cdot \ell \cdot \frac{S_6}{U_{cp.H}^2} = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{240}{115^2} = 0,43;$$

$$X_4 = X_{*H} \frac{S_6}{S_H} = 1,2 \cdot \frac{240}{24} = 12;$$

$$X_{\Sigma} = \frac{X_1 \cdot X_4}{X_1 + X_4} + X_2 + X_3 = \frac{1,43 \cdot 12}{1,43 + 12} + 0,105 + 0,43 = 1,81.$$

Установим режим работы генератора:

$$X_{кр} = X_1 \frac{U_H}{E_1 - U_H} = 1,43 \frac{1}{3 - 1} = 0,715;$$

$$X_{вн} = (X_2 + X_3) // X_4 = \frac{(0,105 + 0,43)12}{0,105 + 0,43 + 12} = 0,51.$$

$X_{кр} > X_{вн}$, получаем режим предельного возбуждения.

Определим эквивалентную ЭДС:

$$E_э = \frac{E_1 \cdot X_4 + E_2 \cdot X_1}{X_1 + X_4} = \frac{3 \cdot 12}{1,43 + 12} = 2,7.$$

Определим результирующее сопротивление:

$$X_\Sigma = \frac{X_1 \cdot X_4}{X_1 + X_4} + X_2 + X_3 = \frac{1,43 \cdot 12}{1,43 + 12} + 0,105 + 0,43 = 1,81.$$

Вычислим установившийся ток трехфазного КЗ:

$$I_{*\infty}^{(3)} = \frac{E_э}{X_\Sigma} = \frac{2,7}{1,81} = 1,49;$$

$$I_\infty^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_б = 1,49 \cdot 1,2 = 1,8 \text{ кА.}$$

Для определения остаточного напряжения необходимо вычислить падение напряжения от протекания установившегося тока КЗ по сопротивлению от точки КЗ до рассматриваемой точки.

$$U_{*\text{ост}} = I_{*\infty} (X_2 + X_3) = 1,49(0,105 + 0,43) = 0,8;$$

$$U_{\text{ост}} = U_{*\text{ост}} \cdot \frac{U_б}{\sqrt{3}} = 0,8 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 4,6 \text{ кВ.}$$

Так как на практике расчеты токов КЗ в схеме с несколькими генераторами с АРВ производятся весьма редко, то на этом случае останавливаться не будем. Такие расчеты приведены в [1].

1.5. Вычисление начального сверхпереходного и ударного токов короткого замыкания

В начальный момент КЗ ($t = 0$) индуктивности цепи исключают внезапное изменение полного тока, поэтому значение последнего в начальный момент является известным: оно равно току в конце заданного предшествующего режима. Однако в изменяющихся условиях этот ток состоит уже из новых слагающих, возникающих в

данном процессе, – периодической, которая вызывается ЭДС, наводимой потоком ротора, и аperiodической, обусловленной изменением потока статора. Рассматривая внезапное изменение тока в начальный момент, имеют в виду изменение лишь одной из его слагающих, а именно – периодической. При этом аperiodическая слагающая обеспечивает в момент нарушения режима сохранение предшествующего мгновенного значения тока.

Особенностью начального момента переходного процесса в синхронном генераторе является то, что синхронная ЭДС претерпевает изменения. Поэтому необходимо в исследование ввести такие параметры, которые в начальный момент оставались бы неизменными и тем самым позволили бы связать предшествующий режим с переходным. Такими параметрами являются переходные (сверхпереходные) ЭДС и реактивности синхронной машины, определяемые на основе принципов постоянства результирующего потокосцепления обмотки возбуждения в момент изменения режима. Эти ЭДС остаются неизменными в начальный момент переходного процесса, и их значения вычисляются из предшествующего режима.

В начальный момент внезапного нарушения режима синхронная машина характеризуется следующими параметрами:

- при отсутствии демпферных обмоток – начальными переходными ЭДС E' , током I' и сопротивлением X'_d ;
- при наличии демпферных обмоток – начальными сверхпереходными ЭДС E'' , I' и X''_d .

Величину ЭДС для практических расчетов можно определить по выражению

$$E'' = U_* + I_* X''_d \sin \varphi. \quad (1.25)$$

Важный фактор в начальный момент внезапного нарушения режима – поведение подключенной нагрузки. Обычно нагрузка учитывается в том случае, если она непосредственно связана с точкой КЗ или находится в зоне малой электрической удаленности от нее ($X_k < 0,46$), или соизмерима по мощности с генераторами. При расчетах сверхпереходного режима индивидуально учитывают синхронные генераторы и компенсаторы, а также мощные синхронные и асинхронные двигатели. Электродвигатели относительно неболь-

шой мощности и все электродвигатели, связанные с точкой КЗ через трансформаторы или реакторы, относят к ближайшей обобщенной нагрузке.

Обобщенная нагрузка характеризуется сверхпереходными реактивностями и ЭДС, относительные величины которых при полной рабочей мощности нагрузки и $U_{\text{ср.н}}$ той ступени, где она присоединена, составляют примерно $X''_{*н} = 0,35$, $E''_{*н} = 0,85$.

При определении максимального мгновенного значения полного тока или, иначе, ударного тока (i_y) обычно учитывают затухание лишь аperiodической слагающей тока, считая, что амплитуда сверхпереходного тока за полпериода практически сохраняет свое начальное значение. При этом ударный ток определяется по формуле

$$i_y = K_y \sqrt{2} I'' \quad (1.26)$$

где K_y – ударный коэффициент, который показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической слагающей.

Для практических расчетов можно рекомендовать следующие значения K_y : при КЗ на шинах генератора и синхронного двигателя $K_y = 1,9$; в остальных случаях $K_y = 1,8$.

Для обобщенной нагрузки $K_y = 1$, поэтому ее необходимо выделять в отдельную ветвь, если она присоединена непосредственно к точке КЗ, т.е.

$$i_y = K_y \sqrt{2} I'' + \sqrt{2} I''_н \quad (1.27)$$

где I'' – начальный сверхпереходный ток от генераторов;

$I''_н$ – начальный сверхпереходный ток от нагрузок.

Пример 1.5. Определить сверхпереходный и ударный ток КЗ в точке K_2 для схемы (см. рис. 1.1), в которой все генераторы до КЗ работали с номинальными параметрами.

Примем следующие базисные величины: $S_б = 100$ МВ·А; $U_б = 115$ кВ. В этом случае генераторы будут введены в схему замещения следующими значениями ЭДС:

$$E''_1 = U_* + I_* X''_d \sin \varphi = 1 + 1 \cdot 0,2 \cdot 0,6 = 1,12 ;$$

$$E_2'' = 1 + 1 \cdot 0,15 \cdot 0,6 = 1,09;$$

$$E_3'' = 1 + 1 \cdot 0,18 \cdot 0,6 = 1,108;$$

$$E_4'' = 1 + 1 \cdot 0,12 \cdot 0,6 = 1,072.$$

Нагрузка в схему замещения введется ЭДС $E_5'' = 0,85$ и сопротивлением

$$X_{14} = X_{*н} \frac{S_6}{S_H} = 0,35 \frac{100}{30} = 1,166.$$

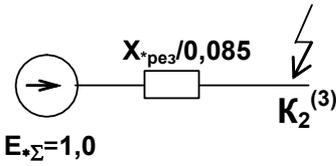


Рис. 1.13

Сопротивления генераторов и пассивных элементов остаются теми же, что и в схеме (см. рис. 1.2).

Преобразовав схему к простейшему виду (рис. 1.13), определим периодическую составляющую тока в начальный момент времени:

$$I_*^{(3)} = \frac{E_{*\Sigma}''}{X_{*рез}} = \frac{1,09}{0,085} = 12,82;$$

$$I''^{(3)} = I_*^{(3)} I_G = 12,82 \cdot 0,5 = 6,41 \text{ кА.}$$

Определим ударный ток:

$$i_y = K_y \sqrt{2} I'' = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 6,41 = 16,35 \text{ кА.}$$

1.6. Расчет переходных процессов по расчетным кривым

При аналитических способах определения токов КЗ сравнительно просто находится начальное значение сверхпереходного тока, ударный ток и установившийся ток КЗ. Все промежуточные значения токов КЗ определяются довольно громоздко, а для выбора электрических аппаратов при проектировании электрических станций и подстанций необходимо знать токи КЗ для произвольного момента времени. Поэтому на практике для определения тока КЗ для любого момента времени

пользуются расчетными кривыми (рис. 1.14), позволяющими определить ток КЗ весьма просто и с достаточной точностью.

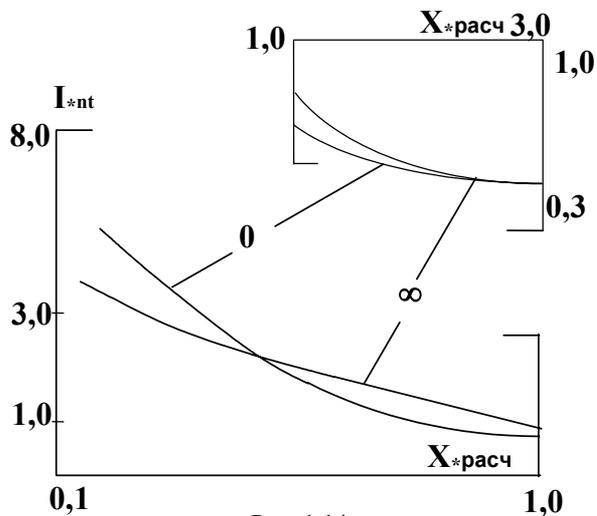


Рис. 1.14

Построение этих кривых осуществлено исходя из схемы (рис. 1.15).

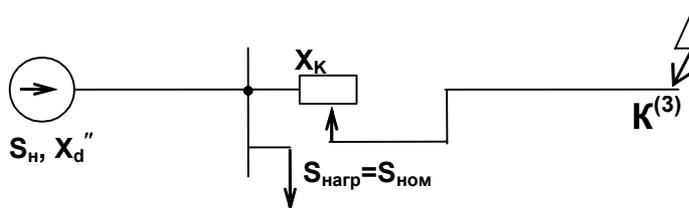


Рис 1.15

В этой схеме генератор представлен своим сверхпереходным сопротивлением X_d'' и полной номинальной мощностью S_n , линия – переменным сопротивлением X_k , и к шинам генератора подсоединена номинальная нагрузка.

При изменяющемся X_k линии делались трехфазные КЗ различной длительности, и соответственно этому строились расчетные кривые. За базисную мощность схемы (рис. 1.15) принималась номинальная

мощность генератора, поэтому X_d'' генератора, X_k линии и X_H'' нагрузки были приведены к номинальной мощности генератора. Кривые позволяют найти только относительное значение периодической слагающей тока КЗ. Аperiodическая слагающая, как затухающая до нуля приблизительно за 0,2 с, практический интерес представляет редко, но всегда учитывается в ударном токе. Такие специальные кривые, представляющие собой зависимости относительной величины периодической составляющей тока в месте КЗ от $X_{расч}$ для разных моментов времени, приводятся в справочной литературе [1, 3].

Под расчетным сопротивлением $X_{расч}$ принята сумма сверхпереходной реактивности генератора X_d'' (независимо от момента КЗ) и реактивности аварийной цепи X_k , выраженной в о.е. при номинальных условиях генератора, т.е. $X_{расч} = X_d'' + X_k$. В $X_{расч}$ не отражено наличие нагрузки. Наличие нагрузки учтено при построении расчетных кривых.

Так как на практике сопротивления схемы замещения приводятся к произвольно выбранной базисной мощности, а кривые построены при базисной мощности, равной номинальной мощности генератора, то для получения $X_{расч}$ по $X_{рез}$, полученному при произвольной базисной мощности, необходимо пересчитать $X_{рез}$ с приведением его к номинальной мощности всех генераторов рассматриваемой схемы. Это делается по формуле

$$X_{расч} = X_{рез} \frac{S_{H\Sigma}}{S_{\delta}}; \quad S_{H\Sigma} = S_{H1} + S_{H2} + \dots + S_{Hn}, \quad (1.27)$$

где $S_{H1}, S_{H2}, \dots, S_{Hn}$ – номинальные мощности генераторов, участвующих в питании данной схемы.

Кривые построены до значения $X_{расч} = 3$. Если $X_{расч} \geq 3$, то относительное значение периодической слагающей тока КЗ во времени остается неизменным и определяется по формуле

$$I_{*nt} = \frac{1}{X_{расч}}. \quad (1.28)$$

Для определения I_*'' по расчетным кривым необходимо пользоваться кривой для времени $t = 0$, а при определении $I_{*\infty}$ – для $t = \infty$. При определении тока КЗ по расчетным кривым в именованных единицах необходимо относительную величину тока умножить не на базисный ток, а на номинальный ток луча, который определяется по выражению

$$I_n = \frac{S_n \Sigma}{\sqrt{3} U_6}. \quad (1.29)$$

При пользовании кривыми делаются допущения, что ЭДС всех генераторов, участвующих в схеме, равны между собой. Поэтому при преобразовании схемы к простейшему виду ЭДС не эквивалентируются.

Методика пользования расчетными кривыми достаточно проста. Для нахождения по ним значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени необходимо определить $X_{*расч}$ относительно рассматриваемой точки КЗ, используя схему замещения для начального момента КЗ. Нагрузки в схему замещения не вводятся, за исключением тех, которые подключены непосредственно к месту повреждения. Их учет производится индивидуально путем введения составляющих ЭДС и сопротивлений, характеризующих нагрузку в сверхпереходном режиме. По $X_{*расч}$ из расчетных кривых определяют величину периодической составляющей тока для данного момента времени. Начальное значение периодической составляющей тока определяется как сумма периодических составляющих генерирующих источников и нагрузки.

Расчетные кривые можно применять к сложным системам с большим числом генераторов. При этом возможны два варианта расчета:

- 1) по общему изменению тока;
- 2) по индивидуальному изменению тока.

1.6.1. Расчет по общему изменению тока

Расчет по общему изменению тока наиболее применим для схем с однотипными генераторами, условия работы которых при КЗ отличаются незначительно, а также при приближенных расчетах токов в схемах с разнотипными генераторами. Этот расчет основан на допу-

щении, что все генераторы, участвующие в схеме, могут быть заменены одним эквивалентным генератором номинальной мощности.

Пример 1.6. Определить I'' , i_y , I_∞ при трехфазном КЗ в точке K для схемы, изображенной на рис. 1.16, а. Необходимые для расчета данные приведены на схеме. Все генераторы снабжены устройствами АРВ.

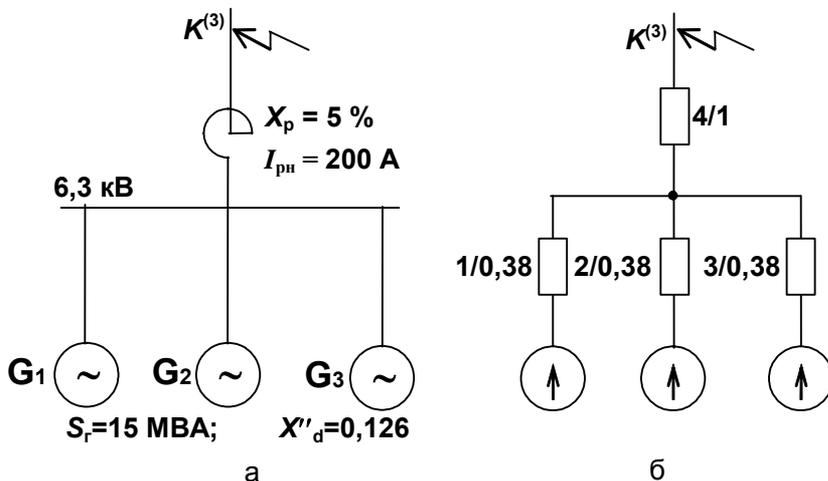


Рис. 1.16

В данном случае за базисную мощность удобнее принять $S_6 = S_{H\Sigma} = 3 \cdot 15 = 45 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и $U_6 = 6,3 \text{ кВ}$. Тогда

$$I_6 = I_{H\Sigma} = \frac{S_{H\Sigma}}{\sqrt{3}U_6} = \frac{45}{\sqrt{3} \cdot 6.3} = 4,1 \text{ кА}.$$

Приводим все сопротивления к базисной мощности. Сопротивления генераторов:

$$X_1 = X_2 = X_3 = X_d'' \frac{S_6}{S_{\Gamma \text{ ном}}} = 0,126 \cdot \frac{45}{15} = 0,38.$$

Сопротивление реактора

$$X_4 = \frac{X_p \%}{100} \frac{I_6}{I_H} \frac{U_H}{U_{Hcp}} = 0,05 \frac{4,1}{0,2} \cdot \frac{6}{6,3} = 1.$$

Схема замещения приведена на рис. 1.16, б.

Расчетное сопротивление цепи до точки К:

$$X_{расч} = X_{рез} \frac{S_{H\Sigma}}{S_6} = \left(\frac{0,38}{3} + 1 \right) \cdot \frac{45}{45} = 1,13.$$

По полученному расчетному сопротивлению из расчетных кривых для времени $t = 0$ и $t = \infty$ определяем периодические составляющие тока:

$$I_{*nkt=0} = 0,9; \quad I_{*nkt=\infty} = 1,02.$$

Получим токи КЗ в именованных единицах:

$$I'' = 0,9 \cdot 4,1 = 3,7 \text{ кА}; \quad I_\infty = 1,02 \cdot 4,1 = 4,2 \text{ кА};$$

$$i_y = \sqrt{2} K_y I'' = 2,55 \cdot 3,7 = 9,4 \text{ кА}.$$

Обратим внимание, что в данном примере начальное значение сверхпереходного тока получилось меньше установившегося тока КЗ. Объясняется это тем, что точка КЗ является удаленной от генераторов, поэтому регуляторы возбуждения АРВ обеспечили увеличение тока в установившемся режиме.

Расчет по общему изменению тока может привести к существенным погрешностям при объединении разнотипных генераторов (турбо- и гидрогенераторов), генераторов с АРВ и без АРВ и в особенности генераторов большой и малой мощности, когда первые имеют значительную удаленность относительно точки КЗ. В этих случаях и при наличии в схемах систем бесконечной мощности, когда расчет по общему изменению тока вообще не осуществим, рекомендуется выполнять расчет по индивидуальному изменению тока.

1.6.2. Расчет по индивидуальному изменению тока

Расчетные кривые построены для расчетных схем, симметричных относительно места короткого замыкания, т.е. все генераторы однотипны и с одинаковыми относительными сопротивлениями по отношению к месту КЗ. Но действительные расчетные схемы, как правило, отличаются от вышеуказанных. Поэтому для асимметричных схем (при разнотипных источниках питания относительно места КЗ) должно учитываться индивидуальное изменение тока в отдельных генераторах (или лучах). Расчет по индивидуальному изменению тока, т.е. приведение к лучевой схеме (см. рис. 1.5), основан на допущении, что процессы КЗ отдельных генераторов независимы и могут быть представлены как процессы в простейших цепях, сходящихся в общей точке КЗ. В этом случае эквивалентная суммарная реактивность n -й цепи принимается равной $X_{\text{рез}}/C_n$, где C_n – коэффициент распределения тока для данной ветви (такое преобразование схемы приводится в п. 1.3).

Сущность этого метода заключается в том, что генераторы, находящиеся в одинаковых или близких условиях, объединяются в группы и выделяются в отдельные ветви. Практика показывает, что в схеме любой сложности обычно достаточно выделения двух-трех групп. Токи от каждой ветви находятся отдельно (как и при расчете по общему изменению). Если помимо генераторов в схеме имеется источник бесконечной мощности, то периодическая слагающая тока от него принимается неизменной в течение всего процесса КЗ и определяется по формуле

$$I_{\text{ПС}} = \frac{I_0}{X_{*c}}, \quad (1.30)$$

где $X_{*c} = X_{\text{рез}}/C_c$ – эквивалентная реактивность луча системы.

Ток в месте повреждения определяется как сумма токов всех ветвей.

Пример 1.7. Определить I'' , i_y , I_∞ при трехфазном КЗ в точке K_2 для схемы (см. рис. 1.1), в которой все генераторы без АРВ.

Принимаем базисные условия: $S_0 = 100 \text{ МВ}\cdot\text{А}$; $U_0 = 115 \text{ кВ}$.

Составляем схему замещения, в которой генераторы учитываем своими сверхпереходными сопротивлениями и величинами полной мощности генерирующих ветвей. Нагрузку в схему замещения не вводим. Схема замещения при принятых базисных условиях показана на рис. 1.17.

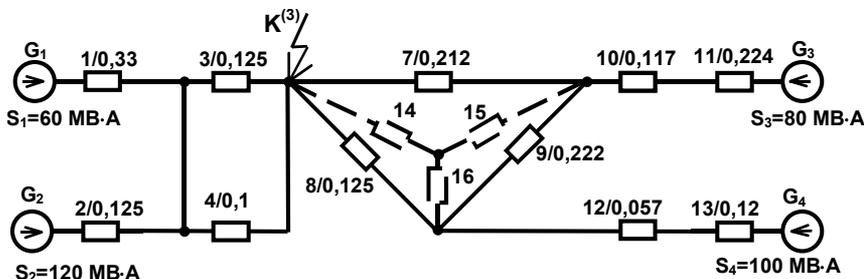


Рис. 1.17

Используя известные методы преобразования, получим схему (рис 1.18):

$$X_{14} = \frac{X_7 \cdot X_8}{X_7 + X_8 + X_9} = \frac{0,212 \cdot 0,182}{0,212 + 0,182 + 0,222} = 0,0625;$$

$$X_{17} = X_3 // X_4 = \frac{0,125 \cdot 0,1}{0,125 + 0,1} = 0,0555;$$

$$X_{18} = \frac{X_7 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} + X_{10} + X_{11} = 0,0765 + 0,117 + 0,224 = 0,417;$$

$$X_{19} = \frac{X_8 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} + X_{12} + X_{13} = 0,0655 + 0,057 + 0,12 = 0,242.$$

Так как генераторы G_1 и G_2 однотипны и по отношению к точке КЗ находятся в близких условиях, объединим их в один эквивалентный генератор суммарной мощностью $S_5 = S_1 + S_2 = 180$ МВ·А и эквивалентным сопротивлением

$$X_{20} = X_1 // X_2 = \frac{0,333 \cdot 0,125}{0,458} = 0,091.$$

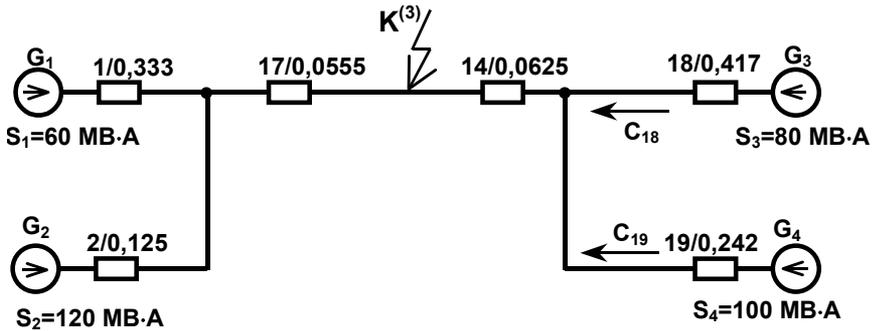


Рис. 1.18

Генераторы G_3 и G_4 связаны с точкой КЗ через общее сопротивление X_{14} . Преобразование схемы к лучевой (рис. 1.19) производим с помощью коэффициентов распределения тока:

$$X_{\text{эКВ}} = X_{18} // X_{19} = \frac{0,417 \cdot 0,242}{0,417 + 0,242} = 0,153;$$

$$X_{\text{рез}} = X_{\text{эКВ}} + X_{14} = 0,153 + 0,0625 = 0,216;$$

$$C_{18} = \frac{X_{\text{эКВ}}}{X_{18}} = \frac{0,153}{0,417} = 0,368; \quad C_{19} = \frac{X_{\text{эКВ}}}{X_{19}} = \frac{0,153}{0,242} = 0,632;$$

$$X_{21} = \frac{X_{\text{эКВ}}}{C_{18}} = \frac{0,216}{0,368} = 0,59; \quad X_{22} = \frac{X_{\text{эКВ}}}{C_{19}} = \frac{0,216}{0,632} = 0,343;$$

$$X_{23} = X_{20} + X_{17} = 0,091 + 0,0555 = 0,1465.$$

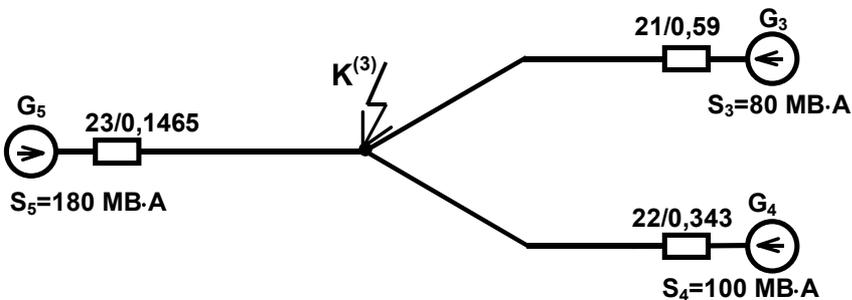


Рис. 1.19

Дальнейший расчет заключается в применении метода расчетных кривых для каждой ветви в отдельности:

$$X_{*расч5} = X_{23} \frac{S_5}{S_6} = 0,1465 \cdot \frac{180}{100} = 0,264 ;$$

$$X_{*расч3} = X_{21} \frac{S_3}{S_6} = 0,59 \cdot \frac{80}{100} = 0,264 ;$$

$$X_{*расч4} = X_{22} \frac{S_4}{S_6} = 0,349 \cdot \frac{100}{100} = 0,343 .$$

По кривым для турбогенераторов определим ток от G_5 :

$$I_{*5nkt=0} = 3,9 ; \quad I_{*5nkt=\infty} = 1,3 .$$

Ток в именованных единицах следующий

$$I_5'' = I_{*5nkt=0} I_{H5} = 3,9 \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 115} = 3,51 \text{ кА};$$

$$I_{5\infty} = I_{*5nkt=\infty} I_{H5} = 1,3 \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 115} = 1,16 \text{ кА}.$$

По кривым для гидрогенераторов определим

$$I_{*3nkt=0} = 2,3 ; \quad I_{*3nkt=\infty} = 1,4 ; \quad I_{*4nkt=0} = 3,3 ; \quad I_{*4nkt=\infty} = 1,6 .$$

Ток в именованных единицах от G_3 и G_4 :

$$I_3'' = I_{*3nkt=0} I_{H3} = 2,3 \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,92 \text{ кА};$$

$$I_{3\infty} = I_{*3nkt=\infty} I_{H3} = 1,4 \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,54 \text{ кА};$$

$$I_{4\infty} = I_{*4nkt=\infty} I_{H4} = 1,6 \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,8 \text{ кА};$$

$$I_4'' = I_{*4nkt=0} I_{H4} = 3,3 \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 1,67 \text{ кА}.$$

Суммарные токи КЗ в точке K определим по формулам

$$I'' = I_5'' + I_3'' + I_4'' = 3,51 + 0,92 + 1,67 = 6,1 \text{ кА};$$

$$I_{\infty}'' = I_{5\infty}'' + I_{3\infty}'' + I_{4\infty}'' = 1,16 + 0,54 + 0,8 = 2,5 \text{ кА}.$$

Ударный ток вычислим по формуле

$$i_y = K_y \sqrt{2} I'' = 2,55 \cdot 6,1 = 15,6 \text{ кА}.$$

Пример 1.28. Преобразовать схему замещения (рис. 1.20) к лучевому виду (для расчета по расчетным кривым). Параметры элементов схемы приведены к базисным условиям: $S_6 = 1000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ и $U_{\text{срн}} = 115 \text{ кВ}$.

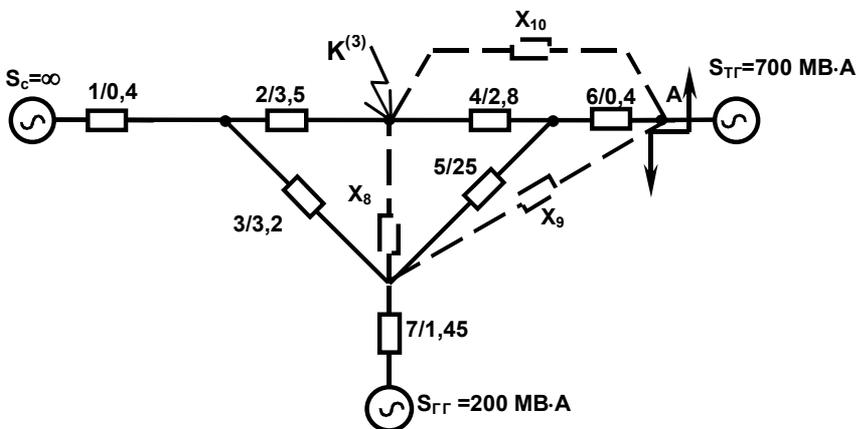


Рис. 1.20

Преобразуем Y с сопротивлениями 4, 5, 6 в Δ с сопротивлениями 8, 9, 10:

$$X_8 = X_4 + X_5 + \frac{X_4 \cdot X_5}{X_6} = 2,8 + 2,5 + \frac{2,8 \cdot 2,5}{0,4} = 22,8;$$

$$X_9 = 2,5 + 0,4 + \frac{2,5 \cdot 0,4}{2,8} = 3,26; \quad X_{10} = 2,8 + 0,4 + \frac{2,8 \cdot 0,4}{2,5} = 3,65.$$

Произведем расщепление узла А и одновременно преобразуем Δ с X_2, X_3, X_8 в Y с сопротивлениями X_{11}, X_{12}, X_{13} . Получим схему, изображенную на рис. 1.21.

$$X_{11} = \frac{X_2 \cdot X_3}{X_2 + X_3 + X_8} = 0,38; \quad X_{12} = \frac{X_2 \cdot X_8}{X_2 + X_3 + X_8} = 2,7;$$

$$X_{13} = \frac{X_3 \cdot X_8}{X_2 + X_3 + X_8} = 2,47.$$

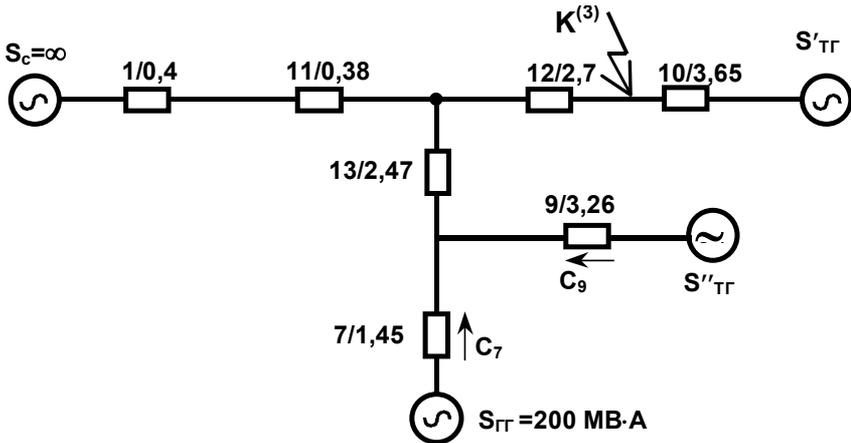


Рис. 1.21

$$X_{14} = X_1 + X_{11} = 0,78; \quad X_{\text{эКВ}} = \frac{X_7 \cdot X_9}{X_7 + X_9} = 1;$$

$$C_7 = \frac{X_{\text{эКВ}}}{X_7} = \frac{1}{1,45} = 0,69; \quad C_9 = \frac{X_{\text{эКВ}}}{X_9} = \frac{1}{3,26} = 0,31;$$

$$X_{\text{рез}} = X_{\text{эКВ}} + X_{13} = 1 + 2,47 = 3,47;$$

$$X_{15} = \frac{X_{\text{рез}}}{C_7} = \frac{3,47}{0,69} = 5; \quad X_{16} = \frac{X_{\text{рез}}}{C_9} = \frac{3,47}{0,31} = 11,2.$$

Аналогичным образом, преобразуя схему, приведенную на рис. 1.22, получим схему, изображенную на рис. 1.23.

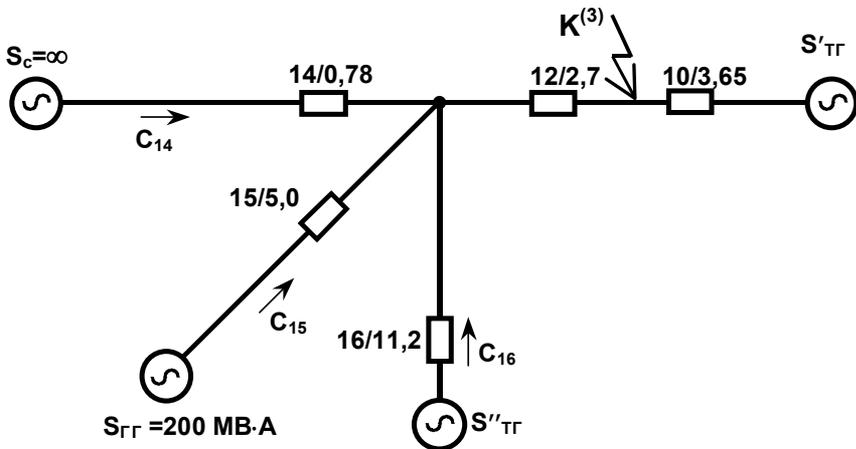


Рис. 1.22

Объединим рассеченный узел с турбогенератором в один, после чего получим окончательную расчетную схему, приведенную на рис. 1.24.

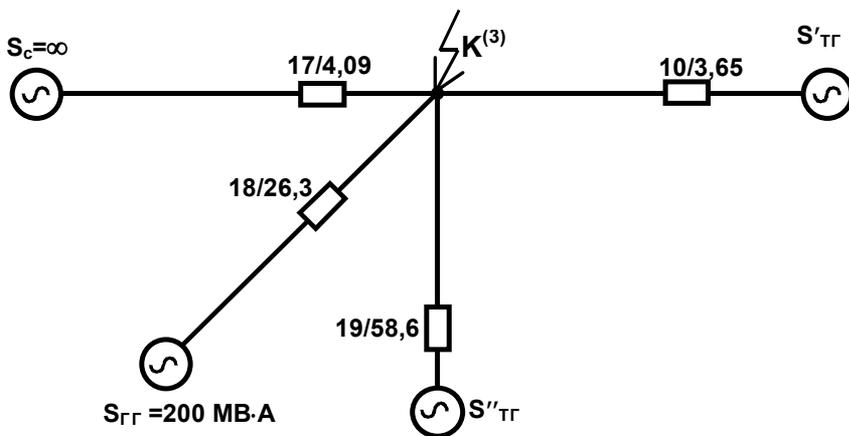


Рис. 1.23

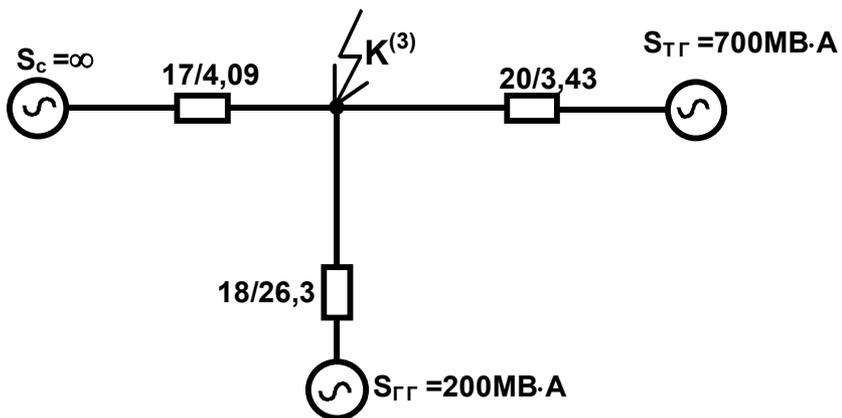


Рис. 1.24

$$X_{20} = \frac{X_{10} \cdot X_{19}}{X_{10} + X_{19}} = \frac{3,65 \cdot 58,6}{3,65 + 58,6} = 3,43.$$

2. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КЗ

2.1. Общие положения

Токи в поврежденных фазах при несимметричных КЗ значительно превышают токи неповрежденных фаз и по значению в ряде случаев могут превосходить токи трехфазного КЗ. В связи с этим появляется необходимость в расчетах параметров несимметричных КЗ.

При однофазных и двухфазных КЗ, когда трехфазная система становится несимметричной, фазы оказываются в разных условиях, что не позволяет выполнить расчет трехфазного КЗ только для одной из фаз. Для определения токов, возникающих при несимметричных КЗ, потребовалось бы составлять несколько уравнений Кирхгофа для многих контуров и узлов, образующихся в рассматриваемой несимметричной трехфазной системе. Решение этих уравнений с учетом индивидуальных связей между фазами даже для сравнительно простой схемы является сложной задачей.

В целях упрощения расчета токов КЗ делаются допущения, при которых трехфазная система сохраняет симметрию во всех точках, кроме места повреждения, что не вносит в расчет существенных погрешностей, так как это допущение практически отвечает действительности. Расчет переходных процессов даже при этом допущении существенно затруднен тем, что при несимметричных повреждениях образуется пульсирующее поле ротора, вызывающее полный спектр высших гармоник ЭДС генератора. Для большинства задач проектирования и эксплуатации электрических систем обычно определяют лишь основные гармоники искомых величин. При таком принятом в дальнейшем ограничении наибольшие преимущества для расчета переходных процессов, вызванных поперечной (несимметричные КЗ) и продольной (обрыв одной или двух фаз) несимметрией, имеет метод симметричных составляющих.

Сущность этого метода заключается в том, что любую несимметричную трехфазную систему векторов (токов, напряжений и т.п.) можно представить в виде трех симметричных систем. Одна из них имеет прямую последовательность чередования фаз ($A_1 - B_1 - C_1$), другая – обратную ($A_2 - C_2 - B_2$). Третья система, называемая системой нулевой последовательности, состоит из трех равных векторов, совпадающих по фазе (A_0, B_0, C_0).

Для симметричных систем применение метода симметричных составляющих значительно упрощается, так как в этом случае каждая из симметричных составляющих системы напряжений пропорциональна соответствующей составляющей системы токов. Законы Ома и Кирхгофа применимы в отдельности к нулевым, прямым и обратным симметричным составляющим. Токи прямой, обратной и нулевой последовательностей вызывают падения напряжения только соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей. Большим достоинством метода симметричных составляющих применительно к расчету КЗ является то, что он сводит вычисление токов и напряжений при несимметричных КЗ к простому вычислению этих же величин при некотором условном (фиктивном) трехфазном КЗ. Поэтому все изложенное ранее в отношении расчета токов и напряжений при трехфазном КЗ используется и при вычислении этих величин при несимметричных замыканиях.

Применение этого метода рассмотрим для случая несимметричного КЗ в простейшей схеме (рис. 2.1), элементы которой для токов ($\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$) последовательностей обладают соответственно результирующими сопротивлениями $X_{\Sigma 1}, X_{\Sigma 2}, X_{\Sigma 0}$. ЭДС генераторов в силу симметричного выполнения статорной обмотки является ЭДС только прямой последовательности. Что касается ЭДС, вызванных реакцией токов других последовательностей, то их будем учитывать в виде падений напряжений с обратным знаком в соответствующих реактивностях машины, т.е. ЭДС генераторов обратной и нулевой последовательностей в схемах замещения этих последовательностей будут равными нулю.

Разложив в месте повреждения несимметричную систему фазных напряжений и токов, протекающих по элементам схемы, на симметричные составляющие $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_0$ и $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$, на основании второго закона Кирхгофа для каждой последовательности одной из фаз можно записать следующие уравнения в комплексной форме:

$$\underline{E}_{\Sigma 1} = \underline{U}_1 + j\underline{I}_1 X_{\Sigma 1}; \quad (2.1)$$

$$0 = \underline{U}_2 + j\underline{I}_2 X_{\Sigma 2}; \quad (2.2)$$

$$0 = \underline{U}_0 + j\underline{I}_0 X_{\Sigma 0}. \quad (2.3)$$

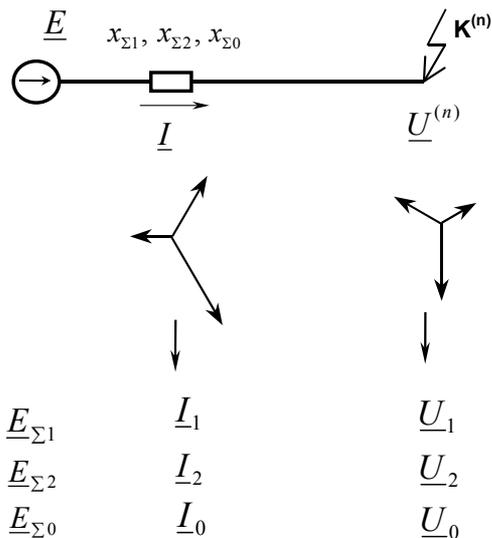


Рис. 2.1

При однократной продольной несимметрии (обрыв одной или двух фаз) уравнения (2.1) – (2.3) будут иметь такой же вид, только вместо фазных напряжений \underline{U}_1 , \underline{U}_2 , \underline{U}_0 в них следует ввести падения напряжений $\Delta \underline{U}$ соответствующих последовательностей на концах местной несимметрии. Сопротивления $X_{\Sigma 1}$, $X_{\Sigma 2}$, $X_{\Sigma 0}$ в этом случае должны быть результирующими сопротивлениями соответствующих схем при продольной несимметрии.

Система трех уравнений (2.1) – (2.3) содержит шесть неизвестных величин: три составляющие напряжения и три составляющие тока. Недостающие для расчета этих величин три уравнения получают из граничных условий, которыми характеризуется тот или иной вид повреждения. Это позволяет по известной несимметрии в месте повреждения установить соответствующие соотношения между токами и напряжениями отдельных последовательностей.

При разложении известной несимметрии на составляющие определяются составляющие последовательностей той особой фазы, для которой записаны уравнения (2.1) – (2.3). Обычно такой фазой принимаются фаза А и симметричные составляющие (токов или напряжений). \underline{E}_{A1} , \underline{E}_{A2} , \underline{E}_0 рассчитываются по известной несимметрии \underline{E}_A , \underline{E}_B , \underline{E}_C (рис. 2.2) по выражениям

$$\underline{E}_{A1} = \frac{1}{3}(\underline{E}_A + a\underline{E}_B + a^2\underline{E}_C); \quad (2.4)$$

$$\underline{E}_{A2} = \frac{1}{3}(\underline{E}_A + a^2\underline{E}_B + a\underline{E}_C); \quad (2.5)$$

$$\underline{E}_o = \frac{1}{3}(\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C), \quad (2.6)$$

где $a = e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – фазный множитель;

$$a^2 = e^{j\frac{4}{3}\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 - a = -j\sqrt{3};$$

$$a - a^2 = j\sqrt{3}; \quad a^2 + a + 1 = 0.$$

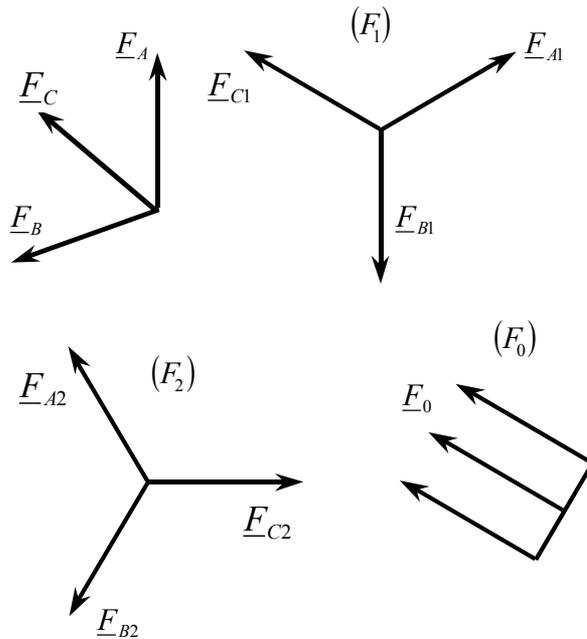


Рис. 2.2

В результате совместного решения уравнений (2.1) – (2.3) с уравнениями граничных условий находят симметричные составляющие токов и напряжений в месте повреждения для принятой особой фазы А. Вычисление фазных токов и напряжений фаз, охваченных аварийным режимом, производят по соотношениям

$$\underline{F}_A = \underline{F}_{A1} + \underline{F}_{A2} + \underline{F}_o; \quad (2.7)$$

$$\underline{F}_B = a^2 \underline{F}_{A1} + a \underline{F}_{A2} + \underline{F}_o; \quad (2.8)$$

$$\underline{F}_C = a \underline{F}_{A1} + a^2 \underline{F}_{A2} + \underline{F}_o. \quad (2.9)$$

Таким образом, расчет переходных процессов при несимметричных КЗ сводится к определению результирующего сопротивления схемы замещения каждой последовательности, нахождению токов и напряжений симметричных составляющих из решения приведенной системы уравнений, а по ним – полных фазных токов и напряжений в месте повреждения.

2.2. Составление схем замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей

В симметричных трехфазных цепях с ненасыщенными магнитными элементами может быть применен принцип наложения, предполагающий, что отдельные составляющие действуют независимо друг от друга. Это обстоятельство позволяет составлять отдельные схемы замещения для каждой последовательности. Поэтому для анализа и расчета несимметричных КЗ в общем случае необходимо составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности.

При симметричных трехфазных КЗ напряжение в месте повреждения равно нулю. При несимметричных КЗ напряжение прямой последовательности в месте повреждения не равно нулю. Поскольку напряжение в месте КЗ несимметрично, то в нем присутствуют также составляющие обратной, а при КЗ на землю – и нулевой последовательностей. Ясно, что по мере продвижения по цепи от места короткого замыкания к источникам питания напряжение прямой последо-

вательности возрастает от U_1 до E_1 , а напряжение обратной и нулевой последовательностей уменьшается соответственно от U_2 и U_0 до нуля.

Схемы замещения отдельных последовательностей составляются только для одной фазы, как это делается в случае симметричного трехфазного КЗ.

Схема прямой последовательности является обычной схемой, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима. В зависимости от применяемого метода расчета и интересующего момента переходного процесса в эту схему вводят генераторы и нагрузки соответствующими реактивностями и ЭДС.

По конфигурации схема замещения обратной последовательности будет полностью повторять схему замещения прямой последовательности и отличается лишь тем, что в схеме обратной последовательности ЭДС всех генерирующих источников принимаются равными нулю; кроме того, считают, что сопротивления обратной последовательности генераторов и нагрузок не зависят от вида несимметрии и продолжительности переходного процесса.

Схема нулевой последовательности, как и схема обратной, не содержит ЭДС. Конфигурация схемы нулевой последовательности определяется схемой сети повышенных напряжений (110 кВ и выше), схемами соединения обмоток трансформаторов и режимом заземления их нейтралей.

Напряжения различных последовательностей при составлении соответствующих схем замещения прикладываются между местом повреждения и обратным проводом (для нулевой последовательности обратным проводом служит земля).

Токи прямой и обратной последовательности являются трехфазными симметричными токами. Токи нулевой последовательности являются однофазным током, разветвленным между фазами и возвращающимся через землю и параллельные ей цепи. Путь циркуляции токов нулевой последовательности резко отличается от путей протекания токов прямой и обратной последовательностей, что и обуславливает значительное отличие схемы нулевой последовательности от двух других схем. Это отличие заключается не только в конфигурациях схем, но и в значениях параметров схемы замещения. Параметры элементов схем для токов обратной и нулевой последовательности приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Элементы схем замещения	Параметры элементов для токов			Примечание
	прямой послед.	обратной послед.	нулевой послед.	
Реактор	X_1	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$	
Трансформатор	X_1	$X_2 = X_1$	см. табл. 2.2	
Синхронные машины: без демпф. обмоток	X_1	$X_2 = 1,45 X'_d \frac{S_6}{S_H}$	$X_0 = (0,15 - 0,6) X''_d \cdot \frac{S_6}{S_H}$	В практ. расчетах $X_2 \approx X_1$
с демпф. обмотками	X_1	$X_2 = 1,22 X''_d \frac{S_6}{S_H}$		
Асинхронные двигатели	X_1	$X_2 = X_1$	по данным зав.-изгот.	
Обобщенная нагрузка	X_1	$X_2 = 0,35 \frac{S_6}{S_H}$		
Кабели	X_1	$X_2 = X_1$	$X_0 = (3,5 - 4,6) X_1$	
Воздушные ЛЭП:	X_1	$X_2 = X_1$		
одноцепная ЛЭП без тросов			$X_0 = 3,5 X_1$	
то же со стальными тросами			$X_0 = 3 X_1$	
то же с хорошо проводящими тросами			$X_0 = 2 X_1$	
двухцепная ЛЭП без тросов			$X_0 = 5,5 X_1$	
то же со стальными тросами			$X_0 = 4,7 X_1$	
то же с хорошо проводящими тросами			$X_0 = 3 X_1$	

Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов определяется схемой соединения обмоток и конструктивным исполнением. Так, если несимметрия возникла со стороны трансформатора, где обмотка соединена в треугольник или

звезду без заземленной нейтрали, токи нулевой последовательности не могут проходить через данный трансформатор, и его сопротивление в схемах замещения нулевой последовательности равно бесконечности.

Путь для циркуляции токов нулевой последовательности имеет место лишь в тех трансформаторах, которые со стороны места повреждения имеют обмотку, соединенную в звезду с заземлением нейтрали. В этом случае сопротивление трансформатора должно быть учтено в схеме замещения нулевой последовательности.

Основные варианты соединения обмоток силовых трансформаторов, схемы замещения их для токов нулевой последовательности и формулы определения результирующего сопротивления нулевой последовательности данной ветви приведены в табл. 2.2.

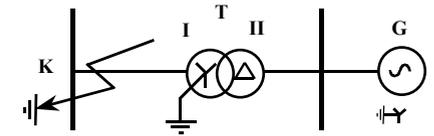
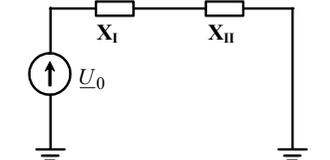
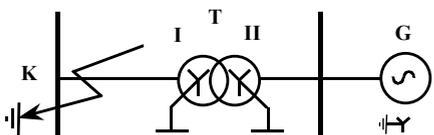
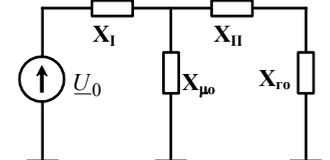
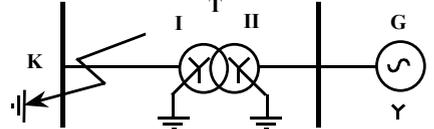
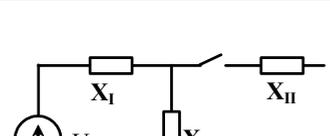
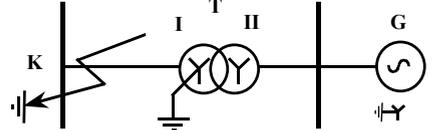
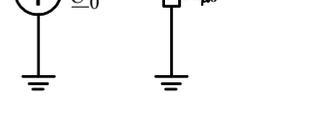
Силовые автотрансформаторы работают с глухозаземленной нейтралью и, как правило, имеют обмотку, соединенную треугольником.

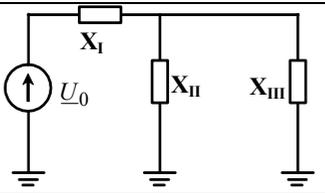
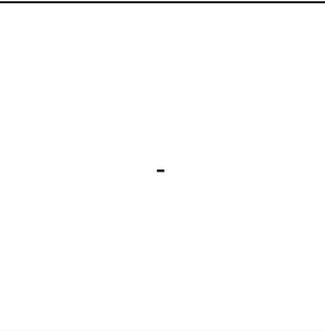
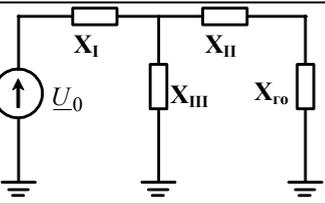
Схема замещения такого автотрансформатора аналогична схеме замещения силового трансформатора с соединением обмоток $Y_0/Y_0/\Delta$.

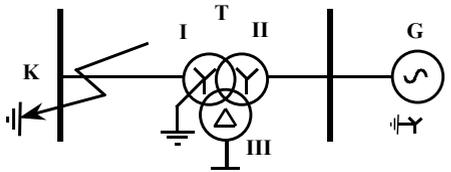
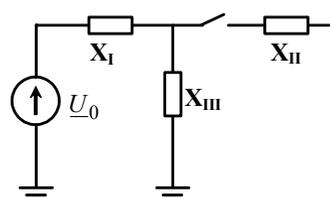
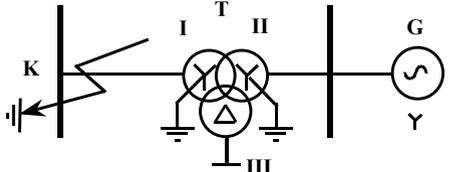
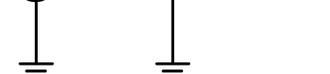
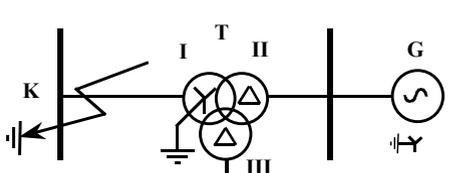
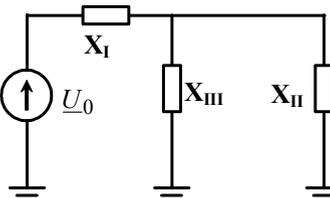
Как видно из табл. 2.2, для всех трансформаторов независимо от их типа и конструкции при соединении обмоток по схеме Y_0/Δ и $Y_0/\Delta-\Delta$ сопротивление нулевой последовательности равно сопротивлению прямой последовательности. Если при соединении обмоток Y_0/Y_0 (табл. 2.2, 2.3) обеспечен путь для токов нулевой последовательности только со стороны одной из обмоток, а также если обмотки имеют соединение Y_0/Y , то для групп из трех однофазных, а также для четырех- и пятистержневых и броневого трансформаторов будем иметь $X_{\mu 0} = \infty$, а для трехфазных трехстержневых трансформаторов $X_0 = X_I + X_{\mu 0}$. Сопротивления отдельных обмоток двухобмоточного трансформатора приблизительно одинаковы и равны половине $U_k\%$, т.е. $X_I = X_{II} = 0,5X_1$.

При составлении схемы замещения нулевой последовательности прежде всего необходимо выяснить наличие замкнутого контура для токов нулевой последовательности. Для образования такого контура необходимо, чтобы в цепи, электрически связанной с точкой КЗ, имелась хотя бы одна заземленная нейтраль. При наличии нескольких электрически связанных между собой заземленных нейтралей токи нулевой последовательности разветвляются между ними.

Если в короткозамкнутой цепи имеются трансформаторы, то при наличии определенных условий токи нулевой последовательности могут трансформироваться.

№ п/п	Схема соединения обмоток силового трансформатора	Схема замещения силового трансформатора	Результирующее сопротивление нулевой последовательности ветви с трансформатором
1	2	3	4
1			$X_0 = X_I + X_{II} = X_I$
2			$X_0 = X_I + X_{\mu 0} // (X_{II} + X_{r0})$
3			$X_0 = X_I + X_{\mu 0}$
			

1	2	3	4
4		$X_0 = X_I + X_{II} // X_{III}$	
5		$X_0 = \infty$	
6		$X_0 = X_I + X_{III} // (X_{II} + X_{r0})$	

1	2	3	4
7			$X_0 = X_I + X_{III}$
8			$X_0 = X_I + X_{III}$
9			$X_0 = X_I + X_{II}/X_{III}$

$X_{\mu 0}$ – реактивность намагничивания нулевой последовательности трансформатора $X_{\mu 0} = (0,3 \div 1)$ при номинальных параметрах трансформатора;

$X_{Г0}$ – результирующее сопротивление нулевой последовательности внешней цепи (генератора).

Для трансформаторов с соединением обмоток по схеме Y_0/Y_0 токи нулевой последовательности могут трансформироваться лишь при условии наличия с обеих сторон путей для их прохождения. Это в равной мере относится и к трехобмоточным трансформаторам. В трансформаторе с соединением обмоток Y_0/Δ ток нулевой последовательности со стороны звезды наводит в треугольнике ток той же последовательности. Этот ток проходит по соединенной в треугольник обмотке, не выходя за ее пределы. Токи в линии со стороны обмотки трансформатора, соединенной в треугольник, не содержат нулевой составляющей. Поэтому вся присоединенная со стороны треугольника сеть в схему нулевой последовательности не входит даже в том случае, если в ней имеются заземленные нейтрали.

Составление схемы замещения нулевой последовательности необходимо начинать с места повреждения. При этом считается, что все три фазы в этой точке замкнуты накоротко, и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. Далее в схему замещения вводятся все те элементы, по которым протекают токи.

Если в нейтральных (генераторов, трансформаторов) имеются сопротивления, то они вводятся в схему нулевой последовательности с коэффициентом 3, учитывающим падение напряжения в этом сопротивлении, вызываемое суммой токов нулевой последовательности всех трех фаз. Сопротивление заземления нейтрали в схеме замещения нулевой последовательности включается последовательно с сопротивлением той обмотки, в нейтраль которой оно присоединено.

При преобразовании схемы нулевой последовательности необходимо иметь в виду, что концы элементов схемы, через которые возвращаются токи нулевой последовательности, имеют потенциал земли. Поэтому их можно объединить в одну общую точку.

Результирующее сопротивление схем отдельных последовательностей определяют при помощи тех же приемов преобразования схем, которые использовались ранее при вычислении токов трехфазного КЗ.

При расчете несимметричных КЗ по расчетным кривым в силу приближенности данного метода для генераторов принято $X_2 = X_1$, поэтому можно ограничиться составлением только двух схем: прямой и нулевой последовательностей.

Пример 2.1. Составить схему замещения нулевой последовательности для схемы (рис. 2.3, а), в которой обмотки трансформатора и прочие элементы обозначены порядковыми номерами.

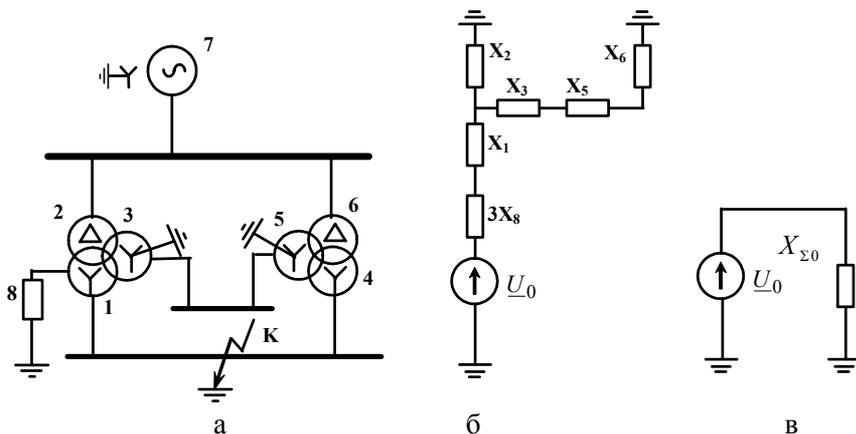


Рис. 2.3

Если сопротивление заземления нейтрали (X_8) задано в омах, то для получения его в о.е. воспользуется формулой

$$X_{*8} = X_8 \frac{S_6}{U_{\text{ср н}}^2}, \quad (2.10)$$

где $U_{\text{ср н}}$ – среднее номинальное напряжение обмотки, нейтраль которой заземлена через X_8 .

После последовательного и параллельного сложения соответствующих сопротивлений схема преобразуется к виду, приведенному на рис. 2.3, в, где $X_{\Sigma 0} = (X_6 + X_5 + X_3) // X_2 + X_1 + 3X_8$.

Пример 2.2. Определить результирующие сопротивления схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей при поперечной несимметрии в точке K_2 схемы (см. рис. 1.1). Данные

генераторов, трансформаторов, линий электропередач такие же, как и в примере 1.1.

Схему замещения прямой последовательности рассматривать не будем, так как результирующие ЭДС и сопротивления ее были определены ($E_{\Sigma} = 1,09$; $X_{\Sigma 1} = 0,05$) в примере 1.5.

Схема замещения обратной последовательности приведена на рис. 2.4. Сопротивления элементов этой схемы определены через сопротивления схем прямой последовательности по формулам, приведенным в табл. 2.1. Сопротивления генераторов приняты равными $1,22 \cdot X_d^n \frac{S_6}{S_H}$.

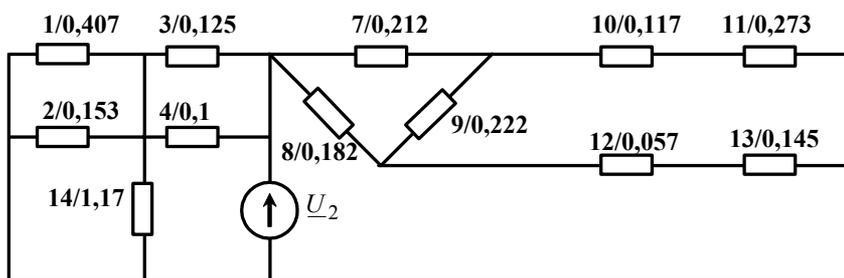


Рис. 2.4

Дальнейшее преобразование схемы заключается в определении результирующего сопротивления относительно места повреждения (рис. 2.5):

$$X_{15} = X_1 // X_2 = 0,111; \quad X_{16} = X_3 // X_4 = 0,0555;$$

$$X_{17} = X_{10} + X_{11} = 0,39; \quad X_{18} = X_{12} + X_{13} = 0,203;$$

$$X_{19} = \frac{X_7 \cdot X_8}{X_7 + X_8 + X_9} = 0,0625; \quad X_{20} = \frac{X_7 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} = 0,0765;$$

$$X_{21} = \frac{X_8 \cdot X_9}{X_7 + X_8 + X_9} = 0,0655; \quad X_{22} = X_{15} // X_{14} + X_{16} = 0,157;$$

$$X_{23} = (X_{20} + X_{17}) // (X_{21} + X_{18}) + X_{19} = 0,17.$$

Результирующее сопротивление схемы обратной последовательности (рис. 2.6) $X_{\Sigma 2} = X_{22} // X_{23} = 0,082$.

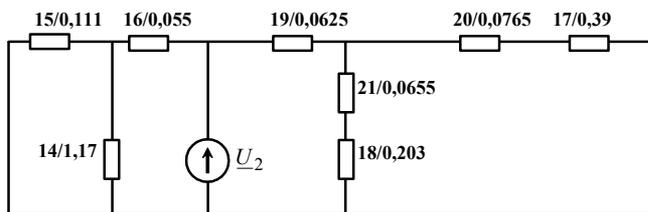


Рис. 2.5

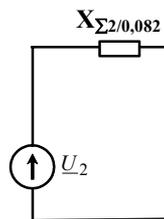


Рис. 2.6

Схема замещения нулевой последовательности приведена на рис. 2.7. Сопротивление линий определено в ней, как для одноцепных ЛЭП с хорошо проводящими тросами. После преобразования треугольника в звезду последовательного и параллельного сложений соответствующих сопротивлений схема преобразуется к виду, приведенному на рис. 2.8., где $X_{\Sigma 0} = 0,0742$.

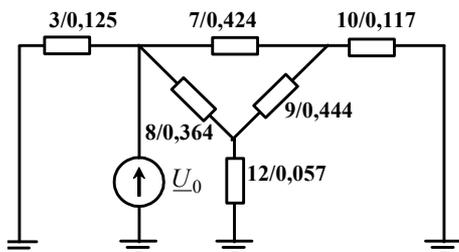


Рис. 2.7

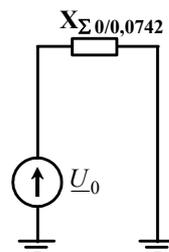


Рис. 2.8

2.3. Аналитический расчет аварийных токов и напряжений при несимметричных повреждениях

Определение аварийных токов и напряжений производится в предположении, что схемы отдельных последовательностей составлены для соответствующего режима и приведены к простейшему виду, т.е. найдены результирующая ЭДС $E_{\Sigma 1}$ и результирующие реактивности $X_{\Sigma 1}$, $X_{\Sigma 2}$, $X_{\Sigma 0}$ схем. Для удобства рассуждений (наглядности) КЗ рассматриваются не на проводах, а на отпайках, отходящих от проводов линий, причем сопротивление отпаек равно нулю.

За положительное направление токов принимается направление к месту повреждения. Для упрощения записи индексы вида КЗ при величинах опускаются.

2.3.1. Двухфазное короткое замыкание

Для этого вида КЗ (рис. 2.9) токи нулевой последовательности отсутствуют. Замыкание между фазами В и С характеризуется следующими граничными условиями в месте повреждения: ток в фазе А равен нулю, так как она не охвачена аварийным режимом; сумма токов фаз В и С равна нулю, что следует из первого закона Кирхгофа; фазные напряжения фаз В и С одинаковы, так как фазы электрически соединены между собой, т.е.

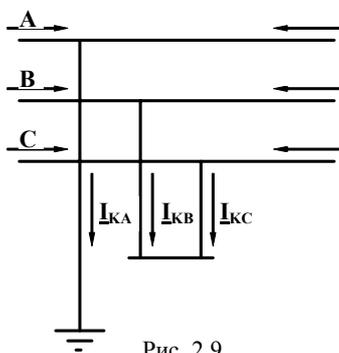


Рис. 2.9

$$\underline{I}_{KA} = 0; \quad (2.11)$$

$$\underline{I}_{KB} + \underline{I}_{KC} = 0 \text{ или } \underline{I}_{KB} = -\underline{I}_{KC}; \quad (2.12)$$

$$\underline{U}_{KB} = \underline{U}_{KC}. \quad (2.13)$$

Из совместного решения уравнений (2.1) – (2.3) и (2.11) – (2.13) находятся составляющие токов и напряжений:

$$\underline{I}_{KA1} = -\underline{I}_{KA2}; \quad \underline{I}_{K0} = 0; \quad (2.14)$$

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2} = jX_{\Sigma 2} \underline{I}_{KA1}; \quad (2.15)$$

$$\underline{I}_{KA1} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{j(X_{\Sigma 1} + X_{\Sigma 2})}. \quad (2.16)$$

Теперь легко находим ток КЗ в фазах В и С по (2.8) – (2.9) с учетом (2.14):

$$\underline{I}_{KB} = -j\sqrt{3}\underline{I}_{KA1}; \quad \underline{I}_{KC} = j\sqrt{3}\underline{I}_{KA1}. \quad (2.17)$$

Фазные напряжения \underline{U}_{KA} , \underline{U}_{KB} , \underline{U}_{KC} находим по (2.7) – (2.9) при условии, что $\underline{U}_{K0} = 0$:

$$\underline{U}_{KA} = 2jX_{\Sigma 2}\underline{I}_{KA1}; \quad (2.18)$$

$$\underline{U}_{KB} = \underline{U}_{KC} = -jX_{\Sigma 2}\underline{I}_{KA1}. \quad (2.19)$$

Обратим внимание на то, что напряжение неповрежденной фазы в два раза выше напряжения поврежденных фаз и противоположно по знаку. На рис. 2.10, а, б представлены векторные диаграммы токов и напряжений в точке КЗ при двухфазном КЗ.

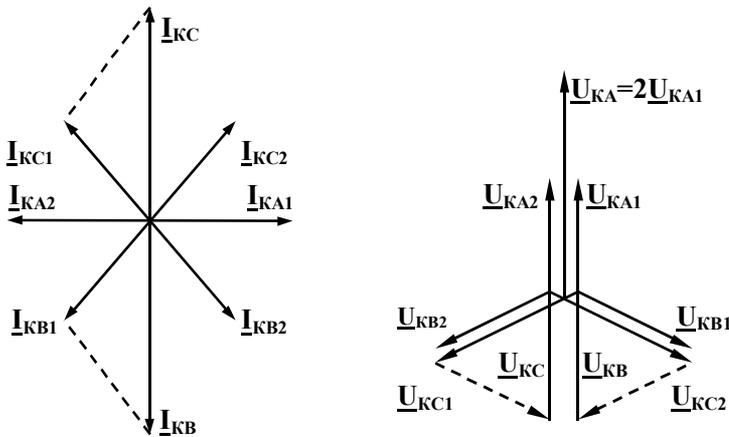


Рис. 2.10

Пример 2.3. Определить аналитическим способом токи и напряжения двухфазного КЗ для схемы (см. рис. 1.1).

Применительно к рассматриваемой схеме, составленной для сверхпереходного режима, при двухфазном КЗ в точке K_2 имеем результирующие сопротивления схем $X_{\Sigma 1} = 0,085$, $X_{\Sigma 2} = 0,082$ и результирующую ЭДС $E_{\Sigma 1} = 1,09$.

Комплексные действующие значения основной гармоники симметричных составляющих, фазных токов и напряжений в о.е., рассчитанных по (2.14) – (2.19), будут равны:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{KA1} = -\underline{I}_{KA2} &= \frac{1,09}{j(0,085 + 0,082)} = -j6,52; \\ \underline{I}_{KB} = -\underline{I}_{KC} &= -j\sqrt{3}(-j6,52) = -11,29; \\ \underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2} &= j0,082(-j6,52) = 0,535; \\ \underline{U}_{KA} &= 2 \cdot j0,082(-j6,52) = 1,07; \\ \underline{U}_{KB} = \underline{U}_{KC} &= -j0,082(-j6,52) = -0,535. \end{aligned}$$

2.3.2. Однофазное короткое замыкание

При КЗ на землю фазы *A* (рис. 2.11) граничные условия в месте повреждения будут следующими: токи фаз *B* и *C* равны нулю, так как они не охвачены аварийным режимом; фазное напряжение фазы *A* равно нулю, так как она электрически соединена с землей, т.е.

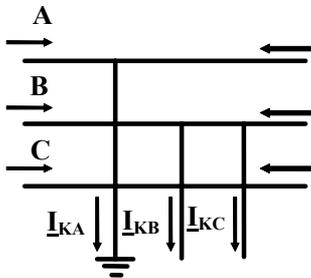


Рис. 2.11

$$\underline{I}_{KB} = 0; \quad (2.20)$$

$$\underline{I}_{KC} = 0; \quad (2.21)$$

$$\underline{U}_{KA} = 0. \quad (2.22)$$

Решая совместно (2.1) – (2.3) и (2.20) – (2.22), находим составляющие фазных токов и напряжений:

$$\underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{K0} = \frac{1}{3} \underline{I}_{KA}; \quad (2.23)$$

$$\underline{I}_{KA1} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{j(X_{\Sigma 1} + X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0})}; \quad (2.24)$$

$$\underline{U}_{KA1} = j(X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}) \cdot \underline{I}_{KA1}; \quad (2.25)$$

$$\underline{U}_{KA2} = -jX_{\Sigma 2} \underline{I}_{KA1}; \quad (2.26)$$

$$\underline{U}_{K0} = -jX_{\Sigma 0} \underline{I}_{KA1}. \quad (2.27)$$

Ток в месте повреждения определим по формуле

$$\underline{I}_{KA} = 3\underline{I}_{KA1}. \quad (2.28)$$

Фазные напряжения \underline{U}_{KB} и \underline{U}_{KC} в месте повреждения находим по (2.8) и (2.9):

$$\underline{U}_{KB} = j[(a^2 - a)X_{\Sigma 2} + (a^2 - 1)X_{\Sigma 0}]\underline{I}_{KA1}; \quad (2.29)$$

$$\underline{U}_{KC} = j[(a - a^2)X_{\Sigma 2} + (a - 1)X_{\Sigma 0}]\underline{I}_{KA1}. \quad (2.30)$$

На рис. 2.12 представлены векторные диаграммы токов и напряжений при однофазном КЗ. Векторная диаграмма токов строится на основании формулы (2.23), а напряжений – исходя из того, что $\underline{U}_{KA1} = -(\underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0})$. Угол θ между векторами \underline{U}_{KB} и \underline{U}_{KC} изменяется от 60° до 180° .

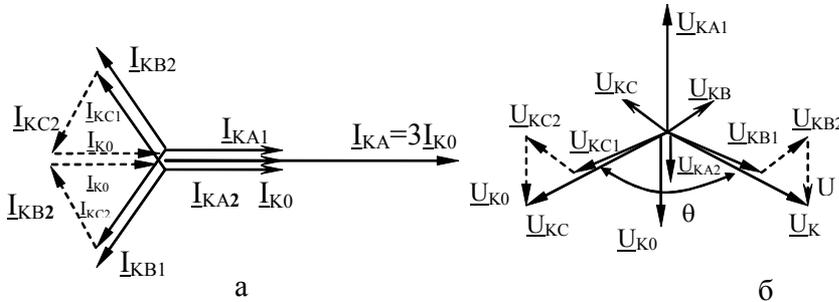


Рис. 2.12

Пример 2.4. Определить аналитическим способом токи и напряжения однофазного КЗ для схемы (см. рис.1.1).

Для нашего примера при однофазном КЗ в точке K_2 ($X_{\Sigma 1} = 0,085$, $X_{\Sigma 2} = 0,082$, $X_{\Sigma 0} = 0,0742$, $E_{\Sigma 1} = 1,09$) будем иметь в соответствии с (2.23) – (2.30):

$$\underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{K0} = \frac{1,09}{j(0,085 + 0,082 + 0,0742)} = -j4,52;$$

$$\underline{I}_{KA} = 3(-j4,52) = -j13,56;$$

$$\underline{U}_{KA1} = j(0,082 + 0,07420)(-j4,52) = 0,706 ;$$

$$\underline{U}_{KA2} = -j0,082(-j4,52) = -0,371 ;$$

$$\underline{U}_{K0} = -j0,0742(-j4,52) = -0,335 ;$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{KB} &= j[(-j\sqrt{3}) \cdot j0,082 + (-1,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}) \cdot j0,0742](-j4,52) = \\ &= 0,502 - j0,93 ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{KC} &= j[(j\sqrt{3}) \cdot j0,082 + (-1,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}) \cdot j0,0742](-j4,52) = \\ &= -0,502 - j0,93 . \end{aligned}$$

2.3.3. Двухфазное короткое замыкание на землю

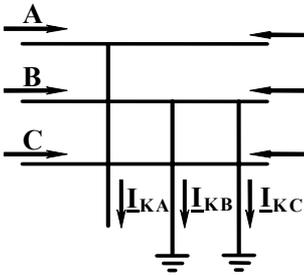


Рис. 2.13

Для этого вида КЗ (рис. 2.13) граничные условия в месте повреждения будут следующие: $\underline{I}_{KA} = 0$; $\underline{U}_{KB} = 0$; $\underline{U}_{KC} = 0$. Симметричные составляющие токов и напряжений находятся так же, как и в предыдущих случаях:

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2} = \underline{U}_{K0} = \frac{1}{3} \underline{U}_{KA} = \underline{I}_{KA1} \frac{X_{\Sigma 0} X_{\Sigma 2}}{X_{\Sigma 0} + X_{\Sigma 2}} ; \quad (2.31)$$

$$\underline{I}_{KA1} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{j(X_{\Sigma 1} + \frac{X_{\Sigma 2} X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}})} ; \quad (2.32)$$

$$\underline{I}_{KA2} = -\underline{I}_{KA1} \cdot \frac{X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}} ; \quad (2.33)$$

$$\underline{I}_{K0} = -\underline{I}_{KA1} \cdot \frac{X_{\Sigma 2}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}} . \quad (2.34)$$

Токи поврежденных фаз в месте КЗ находим по (2.8) и (2.9):

$$\underline{I}_{KB} = \left(a^2 - \frac{X_{\Sigma 2} + aX_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}} \right) \underline{I}_{KA1}; \quad (2.35)$$

$$\underline{I}_{KC} = \left(a - \frac{X_{\Sigma 2} + a^2 X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}} \right) \underline{I}_{KA1}. \quad (2.36)$$

На рис. 2.14 представлены векторные диаграммы токов и напряжений при двухфазном КЗ на землю.

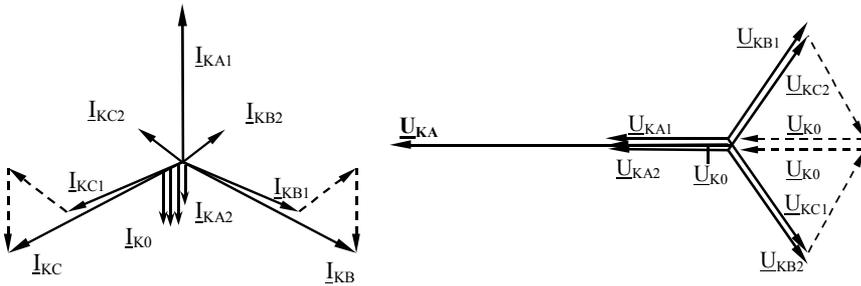


Рис. 2.14

Векторная диаграмма токов (см. рис. 2.14) построена исходя из того, что ток $\underline{I}_{KA1} = -(\underline{I}_{KA2} + \underline{I}_{K0})$, а векторная диаграмма напряжений – согласно уравнению (2.31).

Пример 2.5. Определить аналитическим способом токи и напряжения двухфазного КЗ на землю для схемы (см. рис.1.1).

Как и в предыдущих случаях, при двухфазном КЗ на землю в точке K_2 имеем: $X_{\Sigma 1} = 0,085$, $X_{\Sigma 2} = 0,082$, $X_{\Sigma 0} = 0,0742$, $E_{\Sigma 1} = 1,09$. Тогда по (2.31) – (2.36) находим:

$$\underline{I}_{KA1} = \frac{1,09}{j(0,085 + 0,082 // 0,0742)} = -j8,79;$$

$$\underline{I}_{KA2} = j8,79 \frac{0,0742}{0,082 + 0,0742} = j4,16;$$

$$\underline{I}_{K0} = j8,79 \frac{0,082}{0,082 + 0,0742} = j4,63;$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{KB} &= (-0,5 - j0,86 - \frac{0,082 + (-0,5 + j0,86) \cdot 0,0742}{0,082 + 0,0742})(-j8,79) = \\ &= -11,14 + j6,93; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{KC} &= (-0,5 + j0,86 - \frac{0,082 + (-0,5 - j0,86) \cdot 0,0742}{0,082 + 0,0742})(-j8,79) = \\ &= 11,14 + j6,93; \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2} = \underline{U}_{K00} = j0,082 // j0,0742(-j8,79) = 0,343;$$

$$\underline{U}_{KA} = 3\underline{U}_{KA1} = 3 \cdot 0,343 = 1,029.$$

2.4. Правило эквивалентности прямой последовательности и его применение в расчетах

Анализ выражений для определения тока прямой последовательности при различных видах КЗ позволяет написать общее выражение для определения его величины в месте несимметричного повреждения:

$$\underline{I}_{K1}^{(n)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{j(X_{\Sigma 1} + X_{\Delta}^{(n)})}; \quad (2.37)$$

где $X_{\Delta}^{(n)}$ – дополнительная реактивность, вводимая в схему прямой последовательности, величина которой в зависимости от вида КЗ определяется только значениями $X_{\Sigma 2}$ и $X_{\Sigma 0}$.

Кроме того, поскольку фазные токи в месте КЗ также пропорциональны току прямой последовательности, то величину тока любого вида КЗ можно найти из общего выражения:

$$\underline{I}_K^{(n)} = m^{(n)} \underline{I}_{K1}^{(n)}, \quad (2.38)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида КЗ.

Значения $X_{\Delta}^{(n)}$ и $m^{(n)}$ для различных видов КЗ приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Вид короткого замыкания	$X_{\Delta}^{(n)}$	Коэффициент $m^{(n)}$
Трёхфазное КЗ (3)	0	1
Двухфазное КЗ (2)	$X_{\Sigma 2}$	$\sqrt{3}$
Однофазное КЗ (1)	$X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}$	3
Двухфазное КЗ на землю (1.1)	$\frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}$	$\sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}}$

Обобщенная запись выражения (2.37) позволила Н.Н. Щедрину сформулировать следующее правило.

Ток прямой последовательности при любом несимметричном КЗ может быть определен как ток при трехфазном КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ на дополнительную реактивность $X_{\Delta}^{(n)}$, которая не зависит от параметров схемы прямой последовательности и для каждого вида КЗ определяется результирующими сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей ($X_{\Sigma 2}$ и $X_{\Sigma 0}$) относительно рассматриваемой точки схемы и видом повреждения.

Это правило Н.Н. Щедрина (эквивалентности прямой последовательности) справедливо при условии, что рассматривается только основная гармоника тока несимметричного КЗ.

При любом несимметричном КЗ в точке K_2 схемы (см. рис. 1.1) порядок расчета аварийного тока в месте повреждения с использованием правила эквивалентности прямой последовательности будет следующим.

Составляются схема замещения обратной и нулевой последовательностей относительно места повреждения, из которых получают результирующие сопротивления $X_{\Sigma 2}$ и $X_{\Sigma 0}$.

По значениям $X_{\Sigma 2}$ и $X_{\Sigma 0}$ определяется для рассматриваемого вида КЗ величина шунта $X_{\Delta}^{(n)}$.

Составляется схема замещения прямой последовательности относительно места повреждения.

Точка КЗ удаляется за сопротивление, равное величине шунта.

$$I_{*Kt}^{(2)} = \sqrt{3} I_{*K1t}^{(2)};$$

$$I_{*Kt}^{(1)} = 3 I_{*K1t}^{(1)};$$

$$I_{*Kt}^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{*\Sigma 2} X_{*\Sigma 0}}{(X_{*\Sigma 2} + X_{*\Sigma 0})^2}} \cdot I_{*K1t}^{(1,1)}.$$

Определяется ток прямой последовательности:

$$\underline{I}_1^{(n)} = \underline{I}_K^{(3)}. \quad (2.39)$$

Определяется полный ток в месте повреждения:

$$\underline{I}_K^{(n)} = m^{(n)} \underline{I}_{K1}^{(n)}. \quad (2.40)$$

Напряжение прямой последовательности в месте повреждения при любом несимметричном КЗ (как видно из рис. 2.15) определяется по выражению

$$\underline{U}_{K1}^{(n)} = \underline{I}_{K1}^{(n)} X_{\Delta}^{(n)}. \quad (2.41)$$

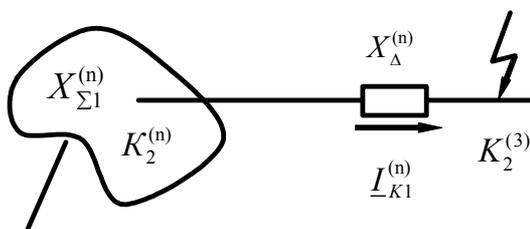


Схема замещения прямой последовательности

Рис. 2.15

Важно отметить, что величина тока прямой последовательности в месте КЗ, а также связанные с ней величины токов других последовательностей зависят от сопротивлений всех последовательностей элементов рассматриваемой схемы. Так, если нейтраль трансформатора, на выводах которого имеется однофазное или двухфазное замыкание на землю, заземлить через какое-либо сопротивление, то это скажется на величинах токов всех последовательностей, хотя токи прямой и обратной последовательностей через это сопротивление и не протекают.

2.5. Расчет несимметричных КЗ по расчетным кривым

Расчетные кривые могут быть использованы для определения тока прямой последовательности в произвольный момент переходного процесса любого несимметричного КЗ. Для этого в соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности необходимо в схеме замещения прямой последовательности точку КЗ удалить за величину шунта $X_{\Delta}^{(n)}$ для данного вида КЗ и рассматривать его как симметричное. Расчет тока прямой последовательности в месте повреждения можно производить как по общему, так и по индивидуальному изменению токов.

В общем случае при расчете с учетом индивидуального изменения токов расчетная реактивность выделяемой генерирующей ветви при любом несимметричном КЗ определяется по формуле

$$X_{\text{расч}}^{(n)} = \frac{X_{\Sigma 1} + X_{\Delta}^{(n)}}{C_M} \frac{S_{\text{нм}}}{S_{\text{б}}}, \quad (2.42)$$

где $X_{\Sigma 1}$ и $X_{\Delta}^{(n)}$ – результирующая реактивность прямой последовательности (для начального момента) и дополнительная реактивность для данного вида КЗ;

$S_{\text{нм}}$ – суммарная номинальная мощность генератора выделяемой ветви, МВ·А;

C_M – коэффициент распределения для той же ветви, определяемый в схеме прямой последовательности, т.е. тот же коэффициент распределения, что и при трехфазном КЗ в рассматриваемой точке.

При расчете по общему изменению, очевидно, $C = I$, а под $S_{\text{нм}}$ следует понимать суммарную номинальную мощность всех генераторов схемы.

В силу приближенности данного метода расчета для упрощения всегда можно принимать $X_{\Sigma 2} = X_{\Sigma 1}$, т.е. считать результирующую реактивность обратной последовательности равной результирующей реактивности, определяемой для трехфазного КЗ в той же точке. По найденной расчетной реактивности при данном виде КЗ, используя соответствующие расчетные кривые, находят для заданного момента времени t относительную величину тока прямой последовательности.

Величина периодической слагающей тока в месте КЗ при этом будет определяться по формуле

$$I_{Kt}^{(n)} = m^{(n)} I_{*K1t}^{(n)} I_{H\Sigma}, \text{ кА} \quad (2.43)$$

или при расчете с учетом индивидуального изменения – по формуле

$$I_{Kt}^{(n)} = m^{(n)} (I_{*K1tI}^{(n)} I_{HI} + I_{*K1tII}^{(n)} I_{HII} + \dots + I_{*K1tM}^{(n)} I_{HIM}), \text{ кА} \quad (2.44)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент пропорциональности, значения которого для каждого вида КЗ приведены ранее;

$I_{H\Sigma}$ – суммарный номинальный ток генераторов, приведенный к напряжению той ступени, где рассматривается КЗ;

$I_{HI}, I_{HII}, \dots, I_{HIM}$ – номинальные токи тех же ветвей, приведенные к напряжению той ступени, где рассматривается КЗ;

$I_{*K1tI}^{(n)}, I_{*K1tII}^{(n)}, \dots, I_{*K1tM}^{(n)}$ – относительные токи прямой последовательности, найденные по расчетным кривым для выделенных ветвей I, II, ..., M.

Источник бесконечной мощности при расчете несимметричных КЗ следует учитывать так же, как и при расчете трехфазного КЗ.

Его реактивность можно определить по выражению $X_{*C} = \frac{X_{\Sigma}^{(n)}}{C_C}$,

считая в нем $X_{\Sigma}^{(n)} = X_{\Sigma 1} + X_{\Delta}^{(n)}$. Затем найденный по (1.30) ток

прямой последовательности от этого источника следует прибавить к току той же последовательности других генераторов.

Пример 2.6. Определить установившийся и сверхпереходный токи для схемы (см. рис. 1.1) при однофазном КЗ в точке K_2 . Расчет произвести по индивидуальному изменению тока.

Воспользуемся схемой замещения, приведенной на рис. 1.19.

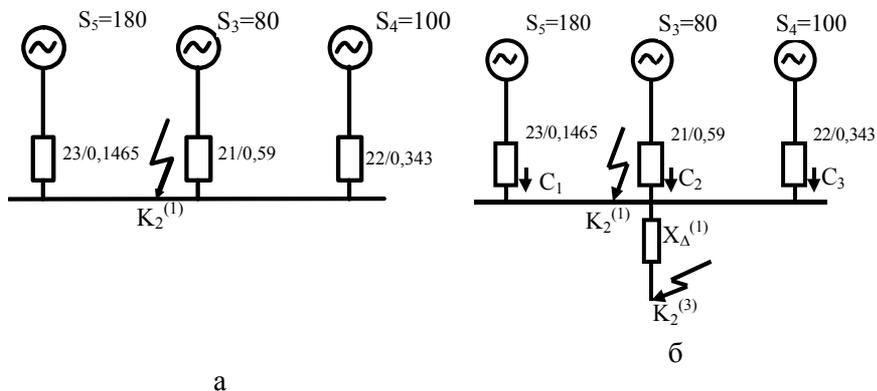


Рис. 2.16

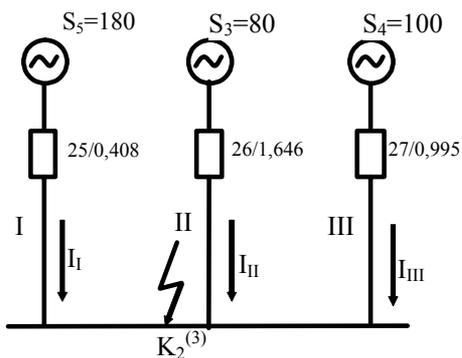


Рис. 2.17

Удалим место повреждения за величину шунта $X_{\Delta}^{(1)}$ (рис. 2.16, б).

Пользуясь способом токораспределения, приводим схему, изображенную на рис. 2.16, б, к схеме, приведенной на рис. 2.17.

$$X_{\text{ЭКВ}} = X_{21} // X_{22} // X_{23} = 0,09;$$

$$X_{\text{рез}} = X_{\text{ЭКВ}} + X_{\Delta}^{(1)} = 0,09 + 0,1562 = 0,2462,$$

где $X_{\Delta}^{(1)} = X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0} = 0,082 + 0,0742 = 0,1562$;

$$C_1 = \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{23}} = \frac{0,09}{0,1465} = 0,61;$$

$$C_{II} = \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{21}} = \frac{0,09}{0,59} = 0,14 ;$$

$$C_{III} = \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{22}} = \frac{0,09}{0,343} = 0,25 ;$$

$$X_{25} = \frac{X_{\text{рез}}}{C_I} = \frac{0,2462}{0,61} = 0,408 ;$$

$$X_{26} = \frac{0,2462}{0,14} = 1,646 ;$$

$$X_{27} = \frac{0,2462}{0,25} = 0,955 .$$

Определим расчетные значения сопротивлений каждого луча:

$$X_{I\text{расч}}^{(1)} = X_{25} \cdot \frac{S_5}{S_6} = 0,408 \frac{180}{100} = 0,7344 ;$$

$$X_{II\text{расч}}^{(1)} = X_{26} \cdot \frac{S_3}{S_6} = 1,646 \frac{80}{100} = 1,317 ;$$

$$X_{III\text{расч}}^{(1)} = X_{27} \cdot \frac{S_4}{S_6} = 0,955 \frac{100}{100} = 0,955 .$$

По расчетным кривым определяем токи прямой последовательности в ветвях:

$$I_{*1t=0I}^{(1)} = 1,37 ; \quad I_{*1t=\infty I}^{(1)} = 1,45 ; \quad I_{*1t=0II}^{(1)} = 0,72 ;$$

$$I_{*1t=\infty II}^{(1)} = 0,885 ; \quad I_{*1t=0III}^{(1)} = 1,13 ; \quad I_{*1t=\infty III}^{(1)} = 1,32 .$$

Пользуясь выражением (2.44), определяем величину периодической слагающей тока в точке K_2 :

$$I''^{(1)} = 3(1,37 \cdot 0,9037 + 0,72 \cdot 0,4016 + 1,13 \cdot 0,502) = 3,823 \text{ кА};$$

$$I_{\infty}^{(1)} = 3(1,45 \cdot 0,9037 + 0,885 \cdot 0,4016 + 1,32 \cdot 0,502) = 2,328 \text{ кА}.$$

3. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ 0,4 – 35 кВ

3.1. Особенности расчетов токов КЗ в распределительных сетях

Под распределительными сетями (р.с.) понимают воздушные и кабельные сети в городах и сельской местности напряжением 0,4 – 35 кВ, по которым электроэнергия передается потребителям от питающих центров - электростанций и подстанций энергосистем. В распределительную сеть входят линии 6 – 35 кВ от шин питающих центров, понижающие трансформаторы, воздушные и кабельные линии низшего напряжения 0,4 кВ до вводов в жилые дома и небольшие предприятия.

Основной особенностью р.с. является соотношение сопротивлений линий и трансформаторов питающей их энергосистемы с сопротивлениями линий и трансформаторов рассчитываемой сети, что позволяет значительно упростить расчеты.

Путем преобразования все генераторы и сети энергосистемы (рис. 3.1) можно привести к простейшей схеме замещения (рис. 3.1, б), в которой все генераторы заменяются одним эквивалентным генератором с ЭДС E_c , а сопротивления всех линий, трансформаторов и генераторов до шин подстанции, питающей р.с., заменяются сопротивлением энергосистемы Z_c . Сопротивления линий и трансформаторов р.с. от шин питающей подстанции до места КЗ суммируются и заменяются одним сопротивлением $Z_{p.c}$. Таким образом, вся расчетная схема приводится к схеме, изображенной на рис. 3.1, б. Для современных мощных энергосистем суммарное сопротивление $Z_k = Z_c + Z_{p.c}$ оказывается очень велико, а ток КЗ мал. В результате короткое замыкание не сопровождается понижением напряжения генераторов и работой их регуляторов возбуждения, что позволяет не учитывать переходные процессы в генераторах. Последнее обстоятельство позволяет считать, что при КЗ за понижающим трансформатором напряжение на выводах его первичной обмотки практически остается неизменным и равным своему номинальному значению.

Поэтому ток трехфазного КЗ $I_K^{(3)}$ через сопротивление Z_K определяется по закону Ома: $I_K^{(3)} = \frac{E_c}{Z_c + Z_{p.c}}$. В практических расчетах фазовая ЭДС генераторов E_c пересчитывается и заменяется средне-номинальным напряжением $U_{cp.n.}$. Тогда

$$I_K^{(3)} = \frac{U_{cp.n.}}{\sqrt{3}(Z_c + Z_{K.c})}. \quad (3.1)$$

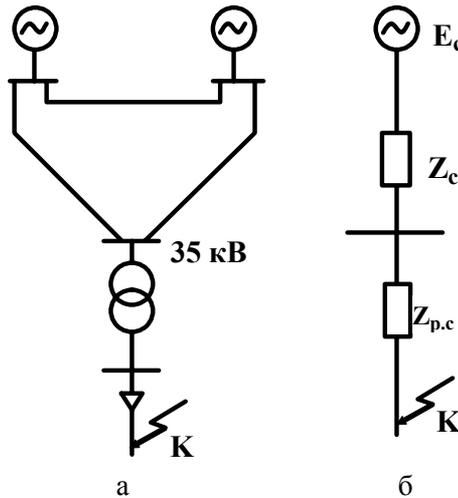


Рис. 3.1

Величина Z_c определяется довольно сложным расчетом, который обычно выполняется с помощью ЭВМ или специальных расчетных моделей. В результате для всех подстанций и электростанций энергосистемы определяется ток КЗ на шинах $I_{ш}^{(3)}$, питающих р.с., а по нему определяется Z_c для расчетов токов КЗ в самой распределительной сети:

$$Z_c = \frac{U_{cp.n.}}{\sqrt{3}I_{ш}^{(3)}}. \quad (3.2)$$

Иногда вместо тока трехфазного КЗ задается мощность КЗ – $S_{КЗ}$. Это – условная величина, равная $S_{КЗ} = \sqrt{3}U_{срн}I_{ш}^{(3)}$. Сопротивление энергосистемы в этом случае определяется по выражению

$$Z_c = \frac{U_{срн}^2}{S_{КЗ}}. \quad (3.3)$$

Следовательно, исходными данными для расчетов токов КЗ в распределительных сетях являются величины $U_{срн}$ и Z_c . Величина $Z_{рс}$ определяется для каждого конкретного случая по данным рассчитываемой сети.

В ряде случаев сопротивление Z_c по сравнению с $Z_{рс}$ настолько мало, что им можно пренебречь и принять $Z_c = 0$. В этом случае можно считать, что р.с. питается от системы бесконечной мощности, и ток трехфазного КЗ определяется по выражению

$$I_{к}^{(3)} = \frac{U_{срн}}{\sqrt{3}Z_{рс}}. \quad (3.4)$$

Следующая особенность р.с. – это необходимость учета активных сопротивлений. В современных сетях с напряжением 110 кВ и выше активные сопротивления настолько малы по сравнению с индуктивными, что ими обычно пренебрегают и считают полное сопротивление цепи чисто индуктивным: $Z = X$. Такое допущение практически не сказывается на точности расчетов, но серьезно облегчает их, позволяя все преобразования схем и расчет сопротивлений выполнять арифметически, а не геометрически. Считается, что пренебрегать активным сопротивлением можно, если $x/r > 3$. При этом определение тока КЗ без учета активного сопротивления дает ошибку не более 5 %.

В р.с. индуктивное сопротивление воздушных линий X составляет 0,3 Ом/км, активное сопротивление r для алюминиевых проводов сечением 16 – 70 мм² колеблется в пределах 2...0,5 Ом/км; отно-

шение x/r при этом значительно меньше 3 и колеблется в пределах 0,15...0,6. Индуктивное сопротивление кабелей с сечением 16 – 240 мм² для напряжений до 1000 В составляет 0,06 Ом/км, а для напряжений 6 – 10 кВ – 0,08 Ом/км, и отношение x/r еще меньше, чем у воздушных линий. Те же выводы можно сделать, рассмотрев x/r у трансформаторов. Поэтому одним из основных требований является обязательный учет активных сопротивлений сети. В этом случае расчетное уравнение (3.1) приводится к окончательному виду:

$$I_k^{(3)} = \frac{U_{\text{ср н}}}{\sqrt{3} \sqrt{(X_c + X_{\text{pc}})^2 + r_{\text{pc}}^2}}. \quad (3.5)$$

Важной особенностью р.с. является возможность не учитывать апериодическую составляющую тока КЗ, которая вследствие большого значения активного сопротивления затухает очень быстро, за сотые доли секунды.

В р.с. при КЗ активное сопротивление проводов увеличивается за счет нагрева их током КЗ, что вызывает уменьшение тока, которое условно называют тепловым спадом тока. Этот эффект особенно сильно проявляется на участке воздушной сети, выполненной стальными проводами. Поэтому расчетным условием для распределительных сетей является трехфазное КЗ, для которого и производятся все расчеты.

3.2. Расчет токов короткого замыкания в сетях напряжением до 1000 В

Точность расчета токов КЗ в низковольтных сетях (0,23 – 0,69 кВ) зависит главным образом от того, насколько правильно и полно учтены все сопротивления короткозамкнутой цепи.

При составлении схем замещения в качестве основной ступени следует выбирать ступень напряжения, на которой находится точка замыкания. Поскольку сопротивления большинства элементов рассматриваемых сетей задаются в именованных единицах, то весь расчет обычно ведут также в именованных единицах, при этом ввиду малости самих сопротивлений их выражают в миллиомах (МОм).

Если сопротивление системы до данного трансформатора известно, оно пересчитывается в миллиомы и прибавляется к сопротивлениям остальных элементов цепи. Так, если известна мощность КЗ на стороне первичной обмотки трансформатора, то сопротивление системы в мОм определяется по формуле

$$X_c = U_{\text{ср н}}^2 10^3 / S_{\text{КЗ}},$$

где $U_{\text{ср н}}$ – средненоминальное напряжение ступени, на которой находится точка КЗ, кВ;

$S_{\text{КЗ}}$ – мощность КЗ, кВ·А.

Активное и индуктивное сопротивления понижающего трансформатора в миллиомах, приведенные к ступени низшего напряжения, определяются по следующим формулам:

$$r_T = \frac{P_K U_H^2}{S_H^2} 10^6; \quad (3.6)$$

$$X_T = \frac{U_H^2 \sqrt{U_K^2 - \left(\frac{P_K}{10S_H}\right)^2}}{S_H} 10^4, \quad (3.7)$$

где S_H – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

U_H – номинальное напряжение вторичной обмотки, кВ;

P_K – потери КЗ в трансформаторе, кВт;

U_K – напряжение КЗ трансформатора, %.

Все необходимые данные указываются в ГОСТах, каталогах и на щитах трансформаторов. Отметим, что сопротивления r_T и x_T можно принять по справочным данным, которые приведены в прил. П10 [1].

Индуктивное сопротивление воздушных и кабельных линий длиной l подсчитывается по формулам

$$X_{\text{вл}} = X_{\text{уд в}} \cdot l, \quad (3.8)$$

$$X_{\text{кл}} = X_{\text{уд кл}} \cdot l, \quad (3.9)$$

где $X_{уд в}$ – удельное индуктивное сопротивление воздушных линий, $X_{уд в} = 0,3$ мОм/м;

$X_{уд к}$ – то же кабельных линий, $X_{уд к} = 0,06$ мОм/м.

Активное сопротивление в мОм воздушных и кабельных линий вычисляют по известному выражению:

$$r = \rho \frac{l}{S} 10^3, \quad (3.10)$$

где ρ – удельное сопротивление (для алюминия при расчете токов КЗ рекомендуется брать $\rho = 3 \cdot 10^{-2}$ Ом·мм²/м);

l – длина линии, м;

S – сечение проводов линии, мм².

Величины $X_{уд в}$, $X_{уд к}$ и r в зависимости от сечения проводника более точно можно определить по справочным данным [2].

При расчетах токов КЗ в сетях до 1000 В в ряде случаев приходится учитывать активные и индуктивные сопротивления шин, обмоток трансформаторов тока и реле автоматических выключателей, переходные сопротивления в контактах рубильников, выключателей, предохранителей. Точные данные для некоторых конструкций можно найти только в фирменных каталогах и подобных справочных материалах; для приближенных вычислений можно пользоваться средними значениями сопротивлений по приложению П10 [1]. Следует отметить, что количество различных конструкций этих аппаратов очень велико, точные значения их сопротивлений найти трудно, а абсолютная величина их по сравнению с сопротивлениями силовых трансформаторов и линий мала, поэтому во многих случаях они не учитываются.

Преобразование схемы для определения токов КЗ в рассматриваемых сетях чаще всего сводится к сложению последовательно соединенных активных и индуктивных сопротивлений.

Величина ударного тока КЗ вычисляется так же, как и в высоковольтных сетях.

Асинхронные электродвигатели следует учитывать только в том случае, если они расположены в непосредственной близости от места КЗ. Влияние асинхронных двигателей на величину ударного тока учитывается так же, как и в высоковольтных установках, а именно

путем прибавления к нему величины $i_m = 6,5I_H$, где I_H – номинальный ток электродвигателей, участвующих в питании точки КЗ, т.е.

$$i_y = \sqrt{2}K_y I_k^{(3)} + 6,5I_H, \quad (3.11)$$

Пример 3.1. Определить ток трехфазного КЗ в точке K_1 для схемы (рис. 5). Трансформатор мощностью 400 кВ·А питается от системы бесконечной мощности, которая соединена со сборкой 400 В алюминиевыми шинами (50 х 5) мм². Шины расположены в одной плоскости, расстояние между ними – 240 мм. Общая длина шин от выводов трансформатора до автоматических выключателей отходящих линий – 15 м. На стороне 0,4 кВ трансформатора установлен рубильник Р на 1000 А, на отходящих линиях – автоматические выключатели АВ на 200 А и трансформаторы тока 200/5. Воздушная линия длиной 200 м выполнена алюминиевыми проводами сечением (3 х 70 + 1 х 35) мм² и соединена со сборкой 0,4 кВ алюминиевым кабелем длиной 20 м, сечением (3 х 70 + 1 х 25) мм² в алюминиевой оболочке.

Среднее геометрическое расстояние между шинами $1,26 \cdot 240 = 300$ мм. По прил. П10 [1] активное сопротивление шин $r = 0,142 \times 15 = 2,12$ мОм; индуктивное – $x = 0,2 \cdot 15 = 3$ мОм.

Величины активных и индуктивных сопротивлений элементов короткозамкнутой цепи приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Элементы схемы	r , мОм	x , мОм
Трансформатор	5,7	17
Шины	2,12	3
Рубильник	0,08	-
Автомат	$0,36 + 0,6 = 0,96$	0,28
Трансформатор тока	0,19	0,17
Кабель	8,86	1,6
Воздушные линии	82,4	64
Результирующие сопротивления	100,31	86,05

Рассчитаем ток трехфазного КЗ в конце воздушной линии по (3.5):

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{100,31^2 + 86,05^2}} = 1690 \text{ А.}$$

Если пренебречь сопротивлениями шин и аппаратуры, ток КЗ будет равен

$$I_{\text{к}}^{(3)} = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{97,06^2 + 82,6^2}} = 1740 \text{ А.}$$

Разница результатов двух расчетов – около 3 %. Поэтому во многих случаях при расчете токов КЗ на воздушных линиях 0,4 кВ сопротивлением шин и аппаратуры можно пренебречь. Для оценки возможности упрощения расчетов можно руководствоваться требованиями правил устройств электроустановок (ПУЭ) по чувствительности релейных защит.

В четырехпроводных сетях 400/230 В и 230/133 В с заземленным нулем, как правило, приходится выполнять расчет токов как трехфазного, так и однофазного КЗ. Вызвано это тем, что ток однофазного КЗ в таких сетях сильно зависит от схемы соединения обмоток питающего их трансформатора и конструкции нулевого заземляющего провода и обычно значительно меньше токов трехфазного КЗ.

Обычная защита от междуфазных КЗ в этом случае часто не обеспечивает необходимой чувствительности, вследствие чего приходится ставить специальную защиту от однофазных КЗ. Для выяснения возможного наименьшего тока при этом виде замыкания и рассчитывается ток однофазного КЗ по выражению

$$I_{\text{е}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср н}}}{\sqrt{(2r_{\Sigma 1} + r_{\Sigma 0})^2 + (2x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 0})^2}}, \quad (3.12)$$

где $r_{\Sigma 1}$ и $x_{\Sigma 1}$ – суммарные активные и индуктивные сопротивления прямой последовательности цепи до точки КЗ, мОм;

$r_{\Sigma 0}$ и $x_{\Sigma 0}$ – то же нулевой последовательности, мОм.

Спротивления нулевой последовательности всех элементов входящих в схему нулевой последовательности определяют по данным справочной литературы [1 – 3].

ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ **«Электромагнитные переходные процессы** **в электроэнергетических системах»**

1. Введение. Понятие о переходных процессах

Введение. Основные понятия и определения. Классификация электромагнитных переходных процессов. Причины возникновения и следствия. Назначение расчетов и требования, предъявляемые к ним. Допущения, принимаемые при исследовании и практических расчетах переходных процессов.

Система относительных единиц и ее применение при расчетах. Составление схемы замещения и выражение ее элементов в относительных и именованных единицах. Точный и приближенный учет коэффициентов трансформации. Методы преобразования схем замещения.

Литература: [1], гл. 1, 2, с. 12 – 57;

[3], гл. 1, 2, с. 5 – 31.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы причины возникновения переходных процессов и каковы следствия этих процессов?
2. От чего зависит точность результатов расчета режима КЗ?
3. Почему в случае применения системы относительных единиц конечный результат расчета режима КЗ не зависит от выбора базисных условий?
4. Что понимают под металлическим замыканием?
5. Перечислите основные виды коротких замыканий в электрических системах. Какова вероятность каждого из видов КЗ?
6. Какие основные допущения принимаются при расчетах токов КЗ?
7. На чем основано составление приближенной схемы замещения?
8. Какие методы преобразования схем замещения используются при расчетах КЗ?

2. Электромагнитные переходные процессы при сохранении симметрии трехфазной цепи

Переходный процесс в простейших трехфазных цепях

Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании в неразветвленной цепи, питаемой источником синусоидального напряжения постоянной частоты и амплитуды. Изменение свободных составляющих токов и напряжений. Характер изменения тока и напряжения во времени. Ударный ток и ударный коэффициент. Действующие значения полных величин и их отдельных составляющих.

Переходный процесс в неподвижных магнитосвязанных цепях

Переходный процесс при включении воздушного трансформатора с закороченной вторичной обмоткой. Влияние рассеяния и его учет. Внезапное короткое замыкание трансформатора. Переходный процесс при включении трансформатора на холостой ход.

Установившийся режим короткого замыкания

Основные характеристики и параметры синхронной машины при симметричном установившемся режиме. Влияние и учет нагрузки в установившемся режиме. Расчет установившегося тока при отсутствии автоматического регулирования возбуждения (АРВ). Влияние и учет АРВ. Критическая реактивность и критический ток. Практический расчет установившегося режима короткого замыкания.

Начальный момент внезапного нарушения режима

Переходные ЭДС и реактивности синхронной машины. Баланс магнитных потоков в синхронной машине без демпферных контуров при нормальном режиме и в момент внезапного его изменения. Сверхпереходные ЭДС и реактивности синхронной машины. Баланс магнитных потоков в синхронной машине с демпферными контурами при нормальном режиме и в момент внезапного его нарушения. Векторные диаграммы и схемы замещения синхронной машины для начального момента переходного процесса. Характе-

ристики двигателей и обобщенной нагрузки в начальный момент переходного процесса. Практический расчет начальных значений переходного, сверхпереходного и ударного токов при трехфазных коротких замыканиях.

Внезапное короткое замыкание синхронной машины

Внезапное короткое замыкание синхронной машины без демпферных контуров. Составляющие токов статора и ротора. Свободные составляющие токов и постоянные времени их затухания. Влияние и приближенный учет демпферных обмоток. Переходный процесс в генераторе с демпферными обмотками при внезапном коротком замыкании. Постоянные времени затухания переходной и сверхпереходной составляющих токов. Влияние АРВ и его практический учет при внезапном коротком замыкании. Понятие о взаимном влиянии машин на характер изменения токов в них при переходном режиме.

Практические методы расчета переходного процесса трехфазного короткого замыкания в электрической системе

Расчет режима КЗ в цепи при достаточно большой мощности источника питания («системы»). Расчет начального и ударного токов. Практические приемы учета аperiodической слагающей при определении ударного тока и наибольшего действующего значения тока КЗ.

Метод расчетных кривых и его применение для расчета режимов КЗ в сложных электрических системах. Расчет по общему и индивидуальному изменению. Приближенный учет «системы». Приближенный учет качаний генераторов в электрической системе при исследовании режимов КЗ. Метод спрямленных характеристик.

Литература: [1], гл. 3 (3.1 – 3.3); 4 – 7, 9, 10;

[3], гл. 3 – 6, с. 42 – 112.

Вопросы для самопроверки

1. Почему в момент возникновения КЗ в электрической системе мгновенное значение тока в каждой фазе любой ветви, обладающей индуктивностью, остается неизменным, т.е. равным мгновенному значению тока предшествующего режима?

2. В какой момент времени после возникновения КЗ, в какой фазе и при каких условиях мгновенное значение тока оказывается наибольшим?
3. Что такое ударный ток КЗ?
4. В каких пределах лежит значение ударного коэффициента и какими параметрами оно определяется?
5. Какое сопротивление называется критическим и какой ток называется критическим?
6. Как определить величину внешнего сопротивления для генератора, работающего в сложной электрической системе?
7. Как проявляется действие АРВ в установившемся режиме КЗ и какие режимы возможны у генератора с АРВ?
8. Какое влияние на режим КЗ оказывает нагрузка, питающаяся с генераторных шин, в случае номинального напряжения на этих шинах?
9. Как наиболее просто определить величину установившегося тока в генераторе при КЗ на его выводах?
10. Как зависит постоянная времени затухания свободного переходного процесса в цепи одиночного генератора от величины внешнего реактивного сопротивления и почему?
11. Какое практическое значение имеет скорость затухания аperiodической слагающей тока КЗ?
12. Чему равно в любой момент времени суммарное значение аperiodических слагающих тока для всех трех фаз при трехфазном КЗ?
13. Как произвести графически разложение на слагающие кривой тока КЗ, полученной в виде осциллограммы для цепи одиночного генератора без АРВ?
14. Почему свободный сверхпереходный процесс обнаруживается даже при отсутствии в машине специальных успокоительных обмоток?
15. Как должны быть введены в схему замещения генераторы и нагрузки для расчета начального сверхпереходного тока?
16. Напишите уравнение для полного тока при внезапном КЗ синхронной машины без демпферных обмоток.
17. Какое влияние оказывают демпферные обмотки?
18. Как рассчитывается ток КЗ от «системы»?
19. В чем сущность метода расчетных кривых?

20. Как по расчетным кривым для генераторов с АРВ определить время, по истечении которого при данной удаленности КЗ напряжение на выводах одиночного генератора достигнет номинального значения?

21. Почему при пользовании расчетными кривыми ветвь «системы» нельзя объединить с ветвями генераторов заданной суммарной мощности в один эквивалентный источник питания?

22. Почему коэффициенты распределения определяются по схеме, в которой ЭДС всех источников питания принимаются одинаковыми независимо, например, от момента времени, для которого определяется ток КЗ?

23. Каковы основные преимущества метода спрямленных характеристик по сравнению с методом расчетных кривых?

3. Электромагнитные переходные процессы при нарушении симметрии трехфазной цепи

Особенности исследования несимметричных переходных процессов. Образование высших гармоник при нарушении симметрии трехфазной системы. Системы уравнений Кирхгофа при несимметрии. Метод симметричных составляющих как средство, облегчающее анализ несимметричных переходных процессов.

Расчет переходного процесса при однократной поперечной несимметрии. Граничные условия и соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений для основных видов несимметричных коротких замыканий. Выражения для составляющих токов и напряжений в месте короткого замыкания. Векторные диаграммы токов и напряжений. Правило эквивалентности прямой последовательности. Комплексные схемы замещения.

Применение практических методов для расчета несимметричных коротких замыканий. Применение расчетных установок и моделей. Распределение и трансформация токов и напряжений отдельных последовательностей.

Схема замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Сопротивление электрических машин, нагрузки, трансформаторов, автотрансформаторов, воздушных и кабельных линий для токов обратной и нулевой последовательностей. Составление схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Сравнение различных видов коротких замыканий. Характер изменения тока и напряжения прямой последовательности генератора при различных коротких замыканиях в одной и той же точке. Сравнение токов различных видов коротких замыканий. Токи в земле при замыканиях одной и двух фаз на землю.

Расчет переходного процесса при однократной продольной несимметрии. Граничные условия и соотношения между симметричными составляющими для случаев обрыва одной и двух фаз. Выражения для составляющих токов и напряжений в месте продольной несимметрии. Определение напряжений. Построение векторных диаграмм токов и напряжений. Комплексные схемы замещения при обрыве одной и двух фаз. Правило эквивалентности прямой последовательности. Применение принципа наложения.

Литература: [1], гл. 11 – 15;

[3], гл. 7 – 9, с. 117 – 194.

Вопросы для самопроверки

1. Почему реактивное сопротивление воздушной линии для токов нулевой последовательности значительно больше, чем для токов прямой и обратной последовательностей?
2. Как влияет наличие заземленных тросов на сопротивление нулевой последовательности линии электропередачи?
3. В каком случае больше влияние взаимной индуктивности между параллельными цепями линии: при протекании токов нулевой последовательности или при протекании токов прямой и обратной последовательностей?
4. С помощью каких мероприятий можно снизить уровни тока однофазного КЗ?
5. В каком месте при несимметричном КЗ напряжения обратной и нулевой последовательностей обычно получаются наибольшими?
6. Почему сопротивление обратной последовательности синхронного генератора не зависит от времени?
7. Как изменится индуктивность линии провод-земля при изменении частоты тока?
8. Чему равно отношение между начальными сверхпереходными токами двухфазного и трехфазного замыканий?

9. Чем вызвано образование высших гармоник при несимметричных режимах синхронной машины?

10. Какое влияние оказывает заземление нейтралей трансформаторов на схему нулевой последовательности?

11. Как влияет конструктивное выполнение трансформатора на его величину сопротивления нулевой последовательности?

12. Как повернутся составляющие тока и напряжения при переходе через трансформатор Y/Δ -9?

13. Чем отличаются схемы различных последовательностей при обрывах фаз от схем при коротких замыканиях?

14. Сформулируйте правило эквивалентности прямой последовательности.

15. Почему нагрузка не учитывается в схеме замещения нулевой последовательности?

16. Как учитываются переходные сопротивления в месте КЗ при расчете несимметричных режимов?

4. Электромагнитные переходные процессы при особых условиях

Сложные виды повреждений в системе. Характеристика сложных видов повреждений. Общий путь определения токов и напряжения с использованием граничных условий в точках несимметрии. Использование комплексных схем. Двойное замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью. Однофазное короткое замыкание с одновременным обрывом той же фазы.

Замыкания в распределительных сетях и системах электроснабжения. Замыкание на землю в сети с незаземленной нейтралью. Векторные диаграммы напряжений и токов. Комплексная схема замещения. Учет изменения параметров проводников сети.

Расчет токов короткого замыкания в установках напряжением до 1000 В. Учет активных и индуктивных сопротивлений отдельных элементов таких установок. Учет сопротивлений контактных соединений.

Короткие замыкания в длинных линиях передачи переменного тока. Понятие о методах расчета короткого замыкания в длинных линиях.

Влияние качаний синхронных машин на протекание электромагнитного переходного процесса. Токи и напряжения при сдвиге векторов ЭДС по фазе.

Литература: [1], гл. 16 – 19;
[3], гл. 10, с. 195 – 225.

Вопросы для самопроверки

1. К каким последствиям приводят однофазные замыкания на землю в сетях с незаземленной нейтралью?
2. Каково назначение дугогасящих катушек и когда они устанавливаются?
3. Что такое тепловой спад тока КЗ и в каких случаях его следует учитывать?
4. Каковы особенности расчета токов КЗ в установках напряжением до 1000 В?
5. Чему равен ударный коэффициент при коротком замыкании за трансформатором мощностью 250 кВА?
6. Какое влияние оказывает на переходные процессы в длинных линиях продольная компенсация?
7. Чем отличаются схемы различных последовательностей для сложных случаев несимметричного КЗ от тех же случаев несимметричного короткого замыкания в одном месте цепи?
8. Какими уравнениями записываются граничные условия для случая двухфазного КЗ на землю в одном месте цепи при одновременном отключении одной из поврежденных фаз в другом месте цепи?
9. Как и когда можно применять принцип наложения в случаях исследования режима сложного несимметричного КЗ?
10. Как приближенно учитываются качания генераторов в расчетах КЗ?

Перечень лабораторных работ

1. Распределение токов КЗ и остаточных напряжений на расчетной модели при коротких замыканиях.
2. Переходный процесс в простейшей трехфазной цепи при внезапном коротком замыкании.

3. Определение сопротивления трансформаторов токам нулевой последовательности.
4. Составление схем замещения нулевой последовательности.
5. Исследование токов и напряжений в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью при замыканиях на землю.
6. Исследование несимметричных повреждений методом симметричных составляющих.

Перечень тем практических занятий

1. Составление схем замещения и приведение параметров схем к базисным условиям.
2. Аналитический расчет установившегося тока КЗ при симметричном коротком замыкании.
3. Аналитический расчет начального тока КЗ при симметричном коротком замыкании.
4. Расчет установившегося и начального тока КЗ по расчетным кривым при симметричном КЗ.
5. Составление схем замещения для токов обратной и нулевой последовательностей.
6. Аналитический расчет установившегося и начального токов КЗ при несимметричных коротких замыканиях.
7. Расчет установившегося и начального тока КЗ по расчетным кривым при несимметричных коротких замыканиях.
8. Расчет токов КЗ в электроустановках до 1000 В.
9. Построение векторных диаграмм токов и напряжений в месте несимметричных КЗ.

Литература

1. У л ь я н о в С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
2. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
3. С и л ю к С. М., С в и т а Л. Н. Электромагнитные переходные процессы: Учебное пособие для вузов. – Мн.: «Технопринт», 2000. – 262 с.

Содержание

В в е д е н и е	3
1. Общие сведения о переходных процессах.	3
2. Общие сведения о коротких замыканиях.	4
3. Задание на курсовую работу и график ее выполнения.	5
4. Содержание и оформление пояснительной записки.	
1. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.	15
1.1. Назначение и порядок выполнения расчетов.	15
1.2. Составление схем замещения в относительных единицах.	16
1.3. Преобразование схем замещения.	25
1.4. Аналитический расчет установившегося режима короткого замыкания.	32
1.4.1. Расчет при отсутствии в схеме генераторов с АРВ.	34
1.4.2. Расчет при наличии в схеме генераторов с АРВ.	36
1.5. Вычисление начального сверхпереходного и ударного токов короткого замыкания.	39
1.6. Расчет переходных процессов по расчётным кривым.	42
1.6.1. Расчет по общему изменению тока.	45
1.6.2. Расчет по индивидуальному изменению тока.	48
2. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КЗ.	56
2.1. Общие положения.	56
2.2. Составление схем замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.	60
2.3. Аналитический расчет аварийных токов и напряжений при несимметричных повреждениях.	70
2.3.1. Двухфазное короткое замыкание.	71
2.3.2. Однофазное короткое замыкание.	73
2.3.3. Двухфазное короткое замыкание на землю.	75
2.4. Правило эквивалентности прямой последовательности и его применение в расчетах.	77
2.5. Расчет несимметричных КЗ по расчетным кривым.	80
3. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ 0,4 – 35 КВ.	84
3.1. Особенности расчетов токов КЗ в распределительных сетях.	84

3.2. Расчет токов короткого замыкания в сетях напряжением до 1000 В.	87
ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах».	92
Л и т е р а т у р а.	101