НЕГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

**ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ**

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ
СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ
ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Учебное пособие

Чебоксары 2015

УДК 621.316.11
ББК 31.279

Печатается по решению Ученого совета НОУ ДПО «ИПК РЗА»

Щедрин В.А.
Щ36 Примеры расчетов симметричных и несимметричных повреждений в электроэнергетических системах. Учебное пособие / Щедрин В.А. – Чебоксары: ИПК РЗА, 2015. – 140 с.

В методическом пособии приведены краткие методические указания по теории расчетов электромагнитных процессов в электроэнергетических системах и даны примеры решения конкретных задач при различных видах коротких замыканий и продольной несимметрии.

Пособие предназначено для специалистов в области электроэнергетики, обучающихся на курсах повышения квалификации, а также для студентов и магистрантов электроэнергетических специальностей вузов.

Научный редактор А.В. Булычев, д-р техн. наук, профессор

УДК 621.316.11
ББК 31.279
© ИПК РЗА, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Постановка и решение аналитических и числовых задач является одним из наиболее эффективных и общепринятых методов обучения. Процесс обучения при этом становится активным, творческим и привлекательным для участников. Это способствует более глубокому усвоению теории, расчетов, изложенных в фундаментальных работах [1-4], позволяет концентрировать внимание на ее ключевых положениях и приобрести необходимые навыки выполнения расчетов.

Принимая во внимание существующую и развивающуюся в последнее время тенденцию выразить все составляющие токов короткого замыкания для произвольного момента времени через базовую величину – начальное значение периодической составляющей, в пособии основной упор делается на изучение методов определения именно периодической составляющей для первого момента изменения режима. Для большей наглядности методы расчета повреждений иллюстрируются подробными числовыми примерами, в которых использованы как именованные, так и относительные единицы. Красной нитью через все разделы пособия проходит идея о том, что конкретные примеры полезнее общих правил и теоретических рассуждений. В пособии широко представлены задачи, взятые из инженерной практики, что окажет существенную помощь студентам, а также специалистам, повышающим свою квалификацию.

Преследуя цель сосредоточиться в основном на принципиальных моментах анализа переходных процессов, незатененных многочисленными цифровыми выкладками, в пособии рассматриваются примеры очень простых схем энергосистем. Что касается реальных расчетов в сложных электрических системах, то они проводятся сейчас на ЭВМ с помощью специальных вычислительных программ и комплексов, разработанных в различных научных организациях, высших учебных заведениях и на предприятиях.

Из всего многообразия электромагнитных переходных процессов в электрических системах к наиболее распространенным относятся процессы, возникающие при различных коротких замыканиях, включениях и отключениях электрооборудования, при появлении продольной несимметрии или неполнофазных режимов, а также при сложных видах повреждений. Короткое замыкание (КЗ) – это всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальными условиями работы электрическое соединение (замыкание) между различными точками или фазами электроустановок, а также между фазой и землей в сетях с заземленной нейтралью. Продольная несимметрия – это в общем случае некоторый последовательно включенный элемент или участок трехфазной системы с неодинаковыми фазными сопротивлениями. Неполнофазный режим, представляющий собой обрыв (отключение) одной или двух фаз, является частным случаем продольной несимметрии. Сложный вид повреждения – это совокупность нескольких одновременных нарушений в электрической системе, например, коротких замыканий и продольной несимметрии отдельных участков электрической сети.

Наибольший интерес для инженеров-электроэнергетиков представляют анализ и расчет коротких замыканий, к которым могут быть сведены и расчеты коммутаций в энергосистемах. Возникновение коротких замыканий в электрических системах обусловливается рядом причин. К основной из них можно отнести повреждения изоляции электрооборудования, обусловленные старением изоляционных материалов, внутренними и атмосферными перенапряжениями или случайными механическими воздействиями, например, при строительно-монтажных работах и т. п. Короткие замыкания могут также вызываться неправильными действиями эксплуатационного персонала, приводящими в процессе оперативных переключений к перекрытию фаз.

Во время короткого замыкания возрастают токи в элементах электрической системы, что может привести к повреждению или

электродинамической и термической нестойкости электрооборудования. Возрастание токов сопровождается, как правило, глубоким снижением напряжения на шинах нагрузки, что может повлечь за собой опрокидывание (останов) электродвигателей или нарушение устойчивости всей энергосистемы. При задержке отключения релейной защитой ветви с коротким замыканием также может произойти нарушение динамической устойчивости генераторов электростанций, что неблагоприятно отразится на работе всей энергетической системы. Из сказанного следует, что расчеты коротких замыканий необходимо проводить не только при выборе электротехнического оборудования на стадии проектирования, но и при настройке и наладке релейной защиты и автоматики. Кроме этого, такие расчеты необходимы для определения условий и режимов работы энергетических систем, например, для анализа происшедших аварий, проведения натурных испытаний в условиях эксплуатации.

В зависимости от назначения расчетов выбирается расчетный вид короткого замыкания. Часто решающим для окончательного вывода о возможности работы установки в условиях короткого замыкания оказывается трехфазное замыкание. Оно является симметричным, так как при нем не нарушается симметрия токов и напряжений электрической системы, если выполнено условие равенства параметров всех трех фаз. Изучение процесса трехфазного короткого замыкания важно как само по себе, так и в связи с тем, что применение правила эквивалентности прямой последовательности позволяет свести рассмотрение любого несимметричного короткого замыкания к некоторому условному трехфазному. Кроме того, процесс включения электрических двигателей, компенсаторов или невозбужденных синхронных генераторов и других трехфазных приемников электрической энергии (нагрузок) можно рассматривать как трехфазное короткое замыкание за некоторым сопротивлением.

Расчет несимметричных режимов с учетом всех влияющих факторов представляет собой трудную задачу. Поэтому на практике стремятся к упрощениям, например, ограничивают расчет

определением электрических величин лишь для начального момента времени переходного процесса или для установившегося режима, когда электродвижущие силы (ЭДС) источников и сопротивления элементов системы принимаются неизменными. Как правило, для расчета несимметричных повреждений используют метод преобразования координат, например, к симметричным составляющим или к другим координатам, упрощающим запись и решение уравнений.

Важнейшую роль при анализе и расчете коротких замыканий играет выбор расчетных условий, которые формируются на основе опыта эксплуатации электроустановок и которые должны быть наиболее тяжелыми с точки зрения работы электрооборудования, но в то же самое время вероятными в функционировании электроэнергетических систем и электроустановок. Обычно расчетные условия определяются для каждого отдельного элемента энергосистемы, подлежащего проверке по режиму короткого замыкания. Известно, что в соответствии с ПУЭ по режиму короткого замыкания допускается не проверять некоторые проводники и электрические аппараты, например, защищенные плавкими предохранителями или относящиеся к цепям маломощных, неответственных потребителей, имеющих резервирование в электрической и технологической части.

К расчетным условиям, помимо расчетной схемы, относят также вид, расчетные точки и расчетную продолжительность короткого замыкания. Обратим в этой связи внимание на то, что в зависимости от целей проверки оборудования или выбора установок релейной защиты в качестве расчетного замыкания может быть принят тот или иной вид короткого замыкания. Например, при проверке на термическую стойкость проводников и аппаратов в цепях генераторного напряжения электростанций расчетным может оказаться двухфазное короткое замыкание, как обусловливающее наибольший нагрев. Часто при проверке коммутационной способности аппаратов расчетным является однофазное короткое замыкание на землю или сразу два: однофазное и трехфазное, если

задается разная коммутационная способность выключателей для данных видов короткого замыкания. Что касается выбора расчетных точек, то они берутся на той стороне элемента электроустановки, где предполагаются наиболее тяжелые условия режима его работы. Существует ряд указаний относительно выбора точки короткого замыкания, которыми надлежит руководствоваться при выполнении конкретных расчетов. Расчетным условием является и продолжительность короткого замыкания. Особенно это имеет значение для проверок проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость. Так, например, для токопроводов и трансформаторов тока в цепях генераторов мощностью 60 МВт и более расчетная продолжительность составляет сумму времен действия основной защиты и полного времени отключения генераторного выключателя. При проверке же кабелей на невозгораемость расчетная продолжительность складывается уже из времени действия резервной релейной защиты и полного времени отключения выключателя присоединения. Естественно, что при выборе расчетных условий необходимо исходить из требований стандартов и руководящих указаний, предназначенных для использования инженерами-энергетиками на стадии проектирования и эксплуатации электроустановок.

Как уже сказано, наиболее просто и достаточно строго может быть определено значение лишь периодической составляющей тока короткого замыкания. Нахождение же апериодической составляющей и полного тока в произвольный момент времени с учетом всего многообразия явлений и всех имеющих место при коротких замыканиях или продольной несимметрии условий и влияющих факторов исключительно сложно и практически неосуществимо. В связи с этим в инженерной практике широко применяются приближенные методы расчета, базирующиеся на целом ряде допущений, не приводящих к погрешностям, превышающим 10 %, что вполне приемлемо.

Ряд допущений носит общий характер и подразумевается всегда. В частности, в расчетах, как правило, пренебрегают:

насыщением магнитных систем генераторов и трансформаторов; токами намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов; емкостными проводимостями фаз линий, шин и других элементов относительно земли и междуфазными емкостями электрических установок; активными сопротивлениями различных элементов сети. Два последних допущения принимаются не всегда, они специально оговариваются при проведении анализа и расчета конкретных видов повреждений.

Помимо названных основных допущений могут быть приняты и другие, например, о приближенном учете электрических нагрузок в зависимости от стадии переходного процесса или об отсутствии качаний роторов синхронных машин и т. д.

Расчеты токов короткого замыкания и других повреждений выполняются применительно к схемам замещения, которые обычно представляются совокупностью сопротивлений и проводимостей или обобщенных параметров в виде собственных и взаимных сопротивлений и проводимостей. Режим любой цепи исчерпывающе характеризуется уравнениями Кирхгофа. Наряду с ними в практике расчетов сложных систем находят применение уравнения узлового и контурного методов в матричной форме, исключительно удобной для анализа на ЭВМ. Гораздо чаще используются программы, основанные на применении метода узловых напряжений [5]. Это связано с неоднозначностью процедуры выделения независимых контуров. Расчеты начальных и установившихся токов короткого замыкания ничем не отличаются от расчета установившегося режима электрической цепи при заданных ЭДС или токах, приложенных к узлам. Проблемы анализа таких режимов общеизвестны. Одним из путей преодоления трудностей, связанных с большим числом элементов в схемах и переменных в уравнениях, является эквивалентирование. Оно вполне допустимо при преобразованиях схем и определении токов короткого замыкания. Более эффективным подходом в этом случае можно считать применение диакоптических методов [5].

Теоретические положения и многие практические примеры, рассматриваемые в данном учебном пособии, заимствованы из книги автора, изданной ранее [5].

Автор выражает глубочайшую признательность и благодарность аспиранту ЧГУ П.Л. Воронову и бакалавру ЧГУ Е.Г. Ларионовой за оказанную ими помощь в обработке материалов и подготовке их к печати, а также – всем участникам обсуждения и редактирования.

1. СОСТАВЛЕНИЕ И УПРОЩЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ЕДИНИЦ

Анализ и расчет повреждений в энергосистемах, как правило, начинается с составления расчетных схем замещения. Они включают в себя параметры источников электроэнергии (генераторов и синхронных компенсаторов), крупных синхронных и асинхронных двигателей, подпитывающих место повреждения, а также других элементов электрической сети (трансформаторов, реакторов, ЛЭП, конденсаторов и т.д.), связывающих источники с точкой повреждения.

Параметры схем замещения могут быть определены несколькими способами: в именованных единицах без приведения к одной базисной (основной) ступени трансформации; в именованных единицах с приведением к основной ступени по точным (действительным) или приближенным (номинальным) коэффициентам трансформации; в относительных единицах с приведением элементов системы к произвольно выбранным базисным условиям.

Шкала средних напряжений, по которым могут быть вычислены средние коэффициенты трансформации, включает следующие значения: 0,127; 0,230; 0,4; 0,525; 0,690; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770; 1175 кВ [3].

При решении задач в именованных единицах в случае приведения параметров к одной ступени трансформации необходимо пользоваться известными расчетными формулами приведения:
для сопротивлений

$$\overset{\circ}{Z} = Z \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 \cdot \ldots \cdot k_n^2; \tag{1.1}$$

для напряжений или ЭДС

$$\overset{\circ}{U}\left(\overset{\circ}{E}\right) = U(E) \cdot k_1 \cdot k_2 \ldots \cdot k_n, \tag{1.2}$$

где Z – сопротивление элемента, Ом; $U(E)$ – напряжение или ЭДС, кВ, на данной ступени; $k_1, k_2 \ldots k_n$ – коэффициенты трансформации различных ступеней; $\overset{\circ}{Z}, \overset{\circ}{U}\left(\overset{\circ}{E}\right)$ – приведенные параметры.

Следует иметь в виду, что коэффициенты трансформации при приведении параметров берутся в направлении от основной ступени к ступени, элемент которой приводится к основной.

Применение систем относительных единиц, которые ранее встречались при изучении теории электрических машин и сетей, требует дополнительного рассмотрения. Многие авторы используют различные системы относительных единиц без их обсуждения и строгого обоснования. Это может иногда приводить к недоразумениям, ошибкам, в особенности при анализе различных характеристик сети в переходных или несимметричных режимах.

Относительные единицы позволяют упростить анализ и расчет электроэнергетических систем, содержащих электрические машины. Это происходит потому, что уравнения в безразмерных величинах имеют очень простую форму и порядок записи, а также удобны при сопоставлении их для различных устройств, поскольку в относительных единицах величины не зависят от целого ряда факторов: геометрических размеров, напряжения на зажимах, номинальной мощности и т. д. Кроме этого, относительные единицы позволяют упростить анализ многофазных цепей в симметричных режимах, помогают избежать ошибок в процессе пересчета рабочих характеристик из одной системы координат в другую, осуществить нормализацию времени, полезную при анализе устройств, работающих на переменных частотах.

Естественно, что точность вычислений не зависит от принятой системы единиц, в чем нетрудно убедиться на опыте. Поэтому большую роль в выборе системы единиц играют привычка и навыки, приобретенные в процессе проведения расчетов. Например, расчет на ЭВМ режима работы электрической цепи, подавляющее число параметров которой задано в именованных единицах, вряд ли целесообразно проводить в относительных единицах, а расчет тока короткого замыкания на выводах синхронной машины удобнее всего выполнить в относительных единицах.

Чтобы определить значения параметров элементов в системе относительных единиц, необходимо выбрать базисные величины.

Когда речь идет о расчетах токов короткого замыкания или продольной несимметрии, то приходится оперировать, как правило, четырьмя основными параметрами электрической системы: полной мощностью – S, напряжением – U, сопротивлением – Z и током – I. Их связывают известные соотношения $S = \sqrt{3}UI; U{=}\sqrt{3}ZI$, где U – линейное напряжение трехфазной цепи.

Из этих выражений следует, что в качестве базисных параметров можно произвольно выбрать лишь два, а остальные получаются автоматически. На практике чаще всего задаются базисными значениями мощности – $S_{\text{б}}$, которую стремятся выбирать кратной 10, и напряжения – $U_{\text{б}}$, обычно принимаемого равным номинальному или среднему значению напряжения какой-либо ступени трансформации. Тогда базисные ток и сопротивление рассчитываются по формулам:

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{б}}}; \tag{1.3}$$

$$Z_{\text{б}} = \frac{U_{\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{б}}} = \frac{{U_{\text{б}}}^2}{S_{\text{б}}}. \tag{1.4}$$

Относительные величины при выбранных базисных условиях определяются следующими выражениями:

$$\underset{*}{E}_{(\text{б})} = \frac{E}{U_{\text{б}}}; \ \underset{*}{U}_{(\text{б})} = \frac{U}{U_{\text{б}}}; \ \underset{*}{S}_{(\text{б})} = \frac{S}{S_{\text{б}}}; \ \underset{*}{I}_{(\text{б})} = \frac{I}{I_{\text{б}}}; \ \underset{*}{Z}_{(\text{б})} = \frac{Z}{Z_{\text{б}}}, \tag{1.5}$$

где индекс ($*$ – “звездочка”) указывает на то, что речь идет об относительной величине, приведенной к базисным условиям, о чем свидетельствует нижний индекс – б. Во многих случаях при расчетах оба индекса опускают.

Обратим особое внимание на физическую сущность выражения сопротивления в относительных единицах

$$\underset{*}{Z}_{(\text{б})} = \frac{Z}{Z_{\text{б}}} = \frac{Z\sqrt{3}I_{\text{б}}}{U_{\text{б}}} = \underset{*}{\Delta U}_{(\text{б})}, \tag{1.6}$$

из которого следует, что сопротивление в относительных единицах численно равно относительному значению падения напряжения на этом сопротивлении при протекании через него базисного тока.

Следовательно, относительная величина сопротивления всегда больше единицы, если по нему проходит базисный ток, превышающий номинальный ток данного элемента. Это очень важная характеристика, по которой можно судить о пропускной способности элемента электрической системы.

Для удобства решения задач целесообразно заранее определить формулы пересчета, позволяющие находить параметры в системе относительных единиц непосредственно с помощью произвольно выбранных $S_б$ и $U_б$.

Если сопротивление элемента задано в омах, то согласно выражениям (1.5) находится

$$\underset{*}{Z}_{(б)} = Z\frac{S_б}{U_б^2}. \qquad (1.7)$$

Если сопротивление элемента задано в относительных единицах и приведено к номинальным условиям $U_{ном}$ и $S_{ном}$, то можно получить:

$$\underset{*}{Z}_{(б)} = \underset{*}{Z}_{(ном)}\frac{S_б}{U_б^2}\cdot\frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}. \qquad (1.8)$$

Иногда сопротивление элемента задается в процентах, например, для трансформатора – $Z_Т(\%) \approx u_к(\%)$, реактора - $X_Р(\%)$ и т.д. В этих случаях можно принимать $\underset{*}{Z}_{(ном)} = z(\%)/100$. Для реактора, который характеризуется номинальным током, а не номинальной мощностью, более удобным является выражение

$$\underset{*}{X}_{Р(б)} = \frac{X_Р(\%)}{100}\cdot\frac{I_б}{U_б}\cdot\frac{U_{ном}}{I_{ном}}. \qquad (1.9)$$

Можно отметить, что формулы (1.7), (1.8), (1.9) дают также возможность определять сопротивления элементов в именованных единицах через известные значения сопротивлений в относительных единицах.

При наличии в схеме нескольких ступеней трансформации необходимо устанавливать базисные напряжение и ток на каждой из них путем следующих пересчетов:

$$\overset{\circ}{U}_б = U_б\left(\frac{1}{k_1\cdot k_2\cdot \ldots\cdot k_n}\right);\ \overset{\circ}{I}_б = I_б(k_1\cdot k_2\cdot \ldots\cdot k_n), \qquad (1.10)$$

где коэффициенты трансформации k_i принимаются в направлении от основной ступени к той ступени, элементы которой приводятся к базисным условиям. Мощность принимается неизменной на всех ступенях трансформации. Вместо $U_б$ и $I_б$ в формулы (1.7), (1.8), (1.9) тогда подставляются значения базисных напряжений $\overset{\circ}{U}_б$ и токов $\overset{\circ}{I}_б$ конкретной ступени.

Следовательно, при приведении сопротивлений к основной или базовой ступени коэффициенты трансформации после нахождения базисных параметров на конкретных ступенях учитываются автоматически.

Отметим, что в случае, когда базисное напряжение принимается равным номинальному (среднему) значению напряжения на данной ступени, формулы (1.8) и (1.9) упрощаются, приобретая вид:

$$\underset{*}{Z}_{(б)} = \underset{*}{Z}_{(ном)} \cdot \frac{S_б}{S_{ном}};\ \underset{*}{X}_{Р(б)} = \frac{X_Р(\%)}{100} \cdot \frac{I_б}{I_{ном}}. \qquad (1.11)$$

Для иллюстрации сведений о системах единиц и их применения приводится ряд числовых примеров.

ПРИМЕР 1

Для заданной схемы (рис. 1.1, *а*) вычислить ток трехфазного короткого замыкания в точке *К* в предположении, что последнее произошло при работе генератора на холостом ходу с номинальным напряжением $U_{ГН}$ = 10,5 кВ.

Расчет провести точным и приближенным методами в именованных и относительных единицах, если известны следующие исходные данные: генератор Г - ТВФ-60; $U_{ном}$ = 10,5 кВ; cosφ = 0,8; $\underset{*}{X}_{Г(н)}$ =0,125; трансформатор Т-1 - ТД-80000; $u_к$ =10,5%; $k_{Т-1}$ = =121/10,5 кВ; воздушная линия Л – l = 100 км; $X_{0,Л}$ = 0,4 Ом/км; трансформатор Т-2 - ТДГ-20000; $u_к$ = 10,5%; $k_{Т-2}$ = 110/6,6 кВ; реактор Р - РБА6-300-6; $U_{Р\,ном}$ = 6 кВ; $I_{Р\,ном}$ = 0,3 кА; $X_Р$ = 6%; кабельная линия КЛ – l = 1 км; $X_{0,КЛ}$ = 0,08 Ом/км.

Рекомендуется пренебречь активными сопротивлениями всех элементов цепи.

Решение

1. Составляется схема замещения, показанная на рис. 1.1, *б*. В качестве основной ступени принимается ступень, на которой расположена точка короткого замыкания (III на рис. 1.1, *а*; $U_{\text{ном}}$ = =6,3 кВ).

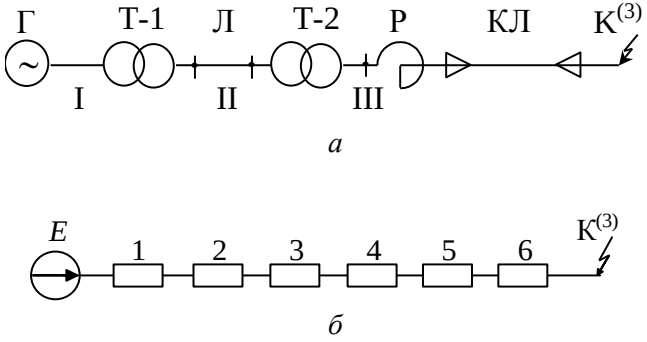


Рис. 1.1

Определяются параметры схемы замещения точным методом (с учетом действительных коэффициентов трансформации) в системе именованных единиц.

ЭДС:

$$E_{\text{Гф}} = \frac{U_{\text{Гхх}}}{\sqrt{3}} = \frac{10{,}5}{\sqrt{3}} = 6{,}07 \text{ кВ};$$

$$\overset{\circ}{E}_{\text{Гф}} = E_{\text{Гф}} \cdot k_1 \cdot k_2 = 6{,}07 \cdot \frac{121}{10{,}5} \cdot \frac{6{,}6}{110} = 4{,}2 \text{ кВ}.$$

Индуктивные сопротивления:

– генератора

$$\overset{\circ}{X}_{1} = \underset{*}{X}_{\text{Гн}} \frac{U_{\text{Гн}}^2}{S_{\text{Гн}}} \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 =$$

$$= 0{,}125 \cdot \frac{10{,}5^2 \cdot 0{,}8}{60} \cdot \left(\frac{121}{10{,}5}\right)^2 \cdot \left(\frac{6{,}6}{110}\right)^2 = 0{,}088 \text{ Ом};$$

– трансформатора Т-1

$$\overset{\circ}{X}_2 = \frac{u_k(\%)}{100} \cdot \frac{U_{\text{Т}-1}^2}{S_{\text{Т}-1}} \cdot k_2^2 = 0{,}105 \cdot \frac{121^2}{80} \cdot \left(\frac{6{,}6}{110}\right)^2 = 0{,}069 \text{ Ом};$$

– линии Л

$$\overset{\circ}{X}_3 = X_{0\text{Л}} \cdot l \cdot k_2^2 = 0{,}4 \cdot 100 \cdot \left(\frac{6{,}6}{110}\right)^2 = 0{,}144 \text{ Ом};$$

– трансформатора Т-2

$$\overset{\circ}{X}_4 = \frac{u_k(\%)}{100} \cdot \frac{U_{\text{Т}-2}^2}{S_{\text{Т}-2}} = 0{,}105 \cdot \frac{6{,}6}{20} = 0{,}229 \text{ Ом};$$

– реактора Р

$$\overset{\circ}{X}_5 = \frac{X_{\text{Р}}(\%)}{100} \cdot \frac{U_{\text{РН}}}{\sqrt{3} I_{\text{РН}}} = 0{,}06 \cdot \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0{,}3} = 0{,}694 \text{ Ом};$$

– кабельной линии КЛ

$$\overset{\circ}{X}_6 = X_{0\text{КЛ}} \cdot l = 0{,}08 \cdot 1 = 0{,}08 \text{ Ом}.$$

Тогда результирующее сопротивление относительно точки короткого замыкания будет

$$X_{\Sigma} = \sum_{1}^{6} X_i = 1{,}304 \text{ Ом}.$$

С помощью него находится искомый ток трехфазного короткого замыкания

$$I_{\text{К}}^{(3)} = \frac{\overset{\circ}{E}_{\text{Гф}}}{X_{\Sigma}} = \frac{4{,}2}{1{,}304} = 3{,}22 \text{ кА}.$$

2. Вычисляется тот же ток в исследуемой схеме, но приближенным (по средним коэффициентам трансформации) методом. Для этого вновь рассчитываются сопротивления и ЭДС в системе именованных единиц, приведенные к основной ступени:

$$\overset{\circ}{X}_1 = 0{,}125 \cdot \frac{10{,}5^2 \cdot 0{,}8}{60} \cdot \left(\frac{115}{10{,}5}\right)^2 \cdot \left(\frac{6{,}3}{115}\right)^2 = 0{,}066 \text{ Ом};$$

$$\overset{\circ}{X}_2 = 0{,}105 \cdot \frac{115^2}{80} \cdot \left(\frac{6{,}3}{115}\right)^2 = 0{,}052 \text{ Ом};$$

$$\overset{\circ}{X}_3 = 0{,}4 \cdot 100 \cdot \left(\frac{6{,}3}{115}\right)^2 = 0{,}12 \text{ Ом};$$

$$\overset{\circ}{X}_4 = 0{,}105 \cdot \frac{6{,}3^2}{20} = 0{,}208 \text{ Ом}; \ \overset{\circ}{X}_5 = 0{,}694 \text{ Ом}; \ \overset{\circ}{X}_6 = 0{,}08 \text{ Ом};$$

$$\overset{\circ}{E}_{\text{Гф}} = 6{,}07 \cdot \frac{115}{10{,}5} \cdot \frac{6{,}3}{115} = 3{,}642 \text{ кВ}.$$

Определив суммарное сопротивление X_Σ = 1,22 Ом, можно найти искомый ток короткого замыкания

$$I_{\text{К}}^{(3)} = \frac{3{,}642}{1{,}22} = 2{,}985 \text{ кА}.$$

Полученное значение тока оказалось меньше по сравнению с найденным точным методом. Ошибка составляет

$$\Delta = \frac{(3{,}22 - 2{,}985)}{3{,}22} \cdot 100\% = 7{,}3\%.$$

3. Воспользовавшись системой относительных единиц, определяется тот же ток точным методом.

Принимаются базисная мощность $S_{\text{б}} = 100$ МВА и базисное напряжение первой ступени $U_{\text{б}\,I} = 10{,}5$ кВ. Тогда базисные напряжения ступеней II и III составят:

$$U_{\text{б}\,II} = 10{,}5 \cdot \frac{121}{10{,}5} = 121 \text{ кВ}; \ U_{\text{б}\,III} = 10{,}5 \cdot \frac{121}{10{,}5} \cdot \frac{6{,}6}{110} = 7{,}26 \text{ кВ};$$

а базисный ток на основной ступени будет равен:

$$I_{\text{б}\,III} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 7{,}26} = 7{,}962 \text{ кА}.$$

Индуктивные сопротивления элементов при базисных условиях примут значения:

$$\underset{*}{X}_{1(\text{б})} = \underset{*}{X}_{\text{Г}(\text{н})} \cdot \frac{U_{\text{Гн}}^2}{S_{\text{Гн}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{U_{\text{б}\,I}^2} = 0{,}125 \cdot \frac{100 \cdot 0{,}8}{60} \cdot \left(\frac{10{,}5}{10{,}5}\right)^2 = 0{,}167 \text{ о.е.};$$

$$\underset{*}{X}_{2(\text{б})} = \underset{*}{X}_{\text{Т}-1(\text{н})} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{U_{\text{б}\,II}^2} = 0{,}105 \cdot \frac{100}{80} \cdot \left(\frac{121}{121}\right)^2 = 0{,}131 \text{ о.е.};$$

$$X_{3(б)}^{*} = X_{0Л} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{б\,II}^2} = 0{,}4 \cdot 100 \cdot \frac{100}{121^2} = 0{,}273 \text{ о.е.};$$

$$X_{4(б)}^{*} = X_{Т-2(н)}^{*} \cdot \frac{S_б}{S_н} \cdot \frac{U_{ном}^2}{U_{б\,III}^2} = 0{,}105 \cdot \frac{100}{20} \cdot \left(\frac{6{,}6}{7{,}26}\right)^2 = 0{,}434 \text{ о.е.};$$

$$X_{5(б)}^{*} = \frac{X_Р(\%)}{100} \cdot \frac{I_б}{U_{б\,III}} \cdot \frac{U_{ном}}{I_{ном}} = 0{,}06 \cdot \frac{7{,}962 \cdot 6}{0{,}3 \cdot 7{,}26} = 1{,}316 \text{ о.е.};$$

$$X_{6(б)}^{*} = X_{0Л} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{б\,III}^2} = 0{,}08 \cdot \frac{100}{7{,}26^2} = 0{,}151 \text{ о.е.}$$

Результирующая реактивность цепи при этом будет X_Σ = =2,472 о.е. Коль скоро ЭДС генератора

$$E_{(б)}^{*} = \frac{E}{U_{б\,I}} = \frac{10{,}5}{10{,}5} = 1,$$

то ток трехфазного короткого замыкания в системе относительных единиц будет

$$I_{(б)}^{(3)*} = \frac{E_{(б)}^{*}}{X_\Sigma} = \frac{1}{2{,}472} = 0{,}404 \text{ о.е.}$$

Следовательно, искомый ток в именованных единицах составит

$$I_К^{(3)} = I_{(б)}^{(3)*} \cdot I_{б\,III} = 0{,}404 \cdot 7{,}962 = 3{,}22 \text{ кА}.$$

Он в точности такой же, как и найденный в п. 1.

4. В заключение проводится расчет тока короткого замыкания упрощенным методом в системе относительных единиц при тех же самых базисных условиях. Последовательно получается:

базисные напряжения $U_{б\,II} = 115$ кВ, $U_{б\,III} = 6{,}3$ кВ, т.е. равные средним значениям напряжений соответствующих ступеней:

$$I_{б\,III} = \frac{S_б}{\sqrt{3}U_{б\,III}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6{,}3} = 9{,}175 \text{ кА};$$

$$X_{1(б)}^{*} = X_{Г(н)}^{*} \cdot \frac{U_{Гн}^2}{S_{Гн}} \cdot \frac{U_{ном}^2}{U_{б\,I}^2} = 0{,}125 \cdot \frac{100 \cdot 0{,}8}{60} \cdot \left(\frac{10{,}5}{10{,}5}\right)^2 = 0{,}167 \text{ о.е.};$$

$$X_{2(б)}^{*} = X_{Т-1(н)}^{*} \cdot \frac{S_б}{S_н} \cdot \frac{U_{ном}^2}{U_{б\,II}^2} = 0{,}105 \cdot \frac{100}{80} \cdot \left(\frac{115}{115}\right)^2 = 0{,}131 \text{ о. е.};$$

$$X_{3(б)}^{*} = X_{0Л} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{б\,II}^2} = 0{,}4 \cdot 100 \cdot \frac{100}{115^2} = 0{,}302 \text{ о. е.};$$

$$X_{4(б)}^{*} = X_{Т-2(н)}^{*} \cdot \frac{S_б}{S_н} \cdot \frac{U_{ном}^2}{U_{б\,III}^2} = 0{,}105 \cdot \frac{100}{20} \left(\frac{6{,}3}{6{,}3}\right)^2 = 0{,}525 \text{ о. е.};$$

$$X_{5(б)}^{*} = \frac{X_Р(\%)}{100} \cdot \frac{I_б}{I_{ном}} \cdot \frac{U_{ном}}{U_{б\,III}} = 0{,}06 \cdot \frac{9{,}175 \cdot 6}{0{,}3 \cdot 6{,}3} = 1{,}746 \text{ о. е.};$$

$$X_{6(б)}^{*} = X_{0Л} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_{б\,III}^2} = 0{,}08 \cdot \frac{100}{6{,}3^2} = 0{,}202 \text{ о. е.};$$

$$X_Σ = 3{,}074 \text{ о. е.}; E_{(б)}^{*} = 1;$$

$$I_{(б)}^{(3)*} = \frac{E_{(б)}^{*}}{X_Σ} = \frac{1}{3{,}074} = 0{,}325 \text{ о. е.};$$

$$I_К^{(3)} = I_{(б)}^{(3)*} \cdot I_{б\,III} = 0{,}325 \cdot 9{,}175 = 2{,}984 \text{ кА}.$$

2. ВЫБОР РАСЧЕТНОГО СЛУЧАЯ. УДАРНЫЙ ТОК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Простейшую трехфазную передачу энергии от трехфазного источника к потребителю можно представить цепью, схема которой показана на рис. 2.1.

Трехфазный генератор, три обмотки которого расположены на статоре так, что наводимые в них ЭДС смещены по фазе на 120°, соединен на рис. 2.1 в звезду.

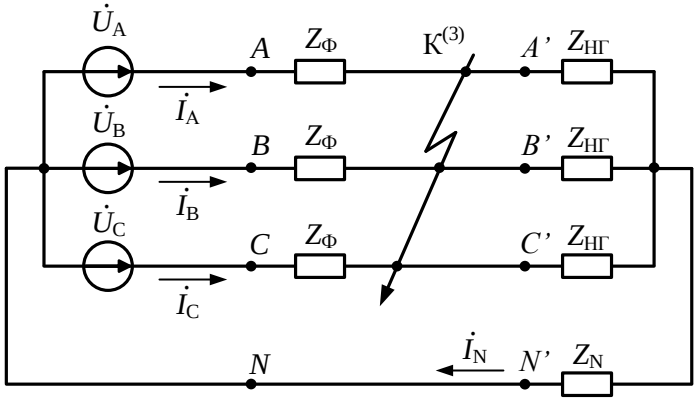


Рис. 2.1

На его зажимах имеют место фазные напряжения, равные по величине и сдвинутые по фазе относительно друг друга на 120°.

Естественно предположить из соображений полной симметрии, что и токи в фазных проводах одинаковы по величине и смещены по фазе на 120°. На основании первого закона Кирхгофа и условия $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_A(1 + a^2 + a) = 0$, где $a = 1\angle 120°$ и $a^2 = 1\angle -120°$ можно сказать, что в симметричной трехфазной системе нейтральный провод оказывается излишним, поскольку ток в нем равен нулю.

Следовательно, любое полное фазное напряжение генератора прикладывается к последовательно включенным сопротивлениям $Z_Ф$ и $Z_{НГ}$ и по закону Ома

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_Ф + Z_{НГ}};\ \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_Ф + Z_{НГ}};\ \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_Ф + Z_{НГ}}.$$

Отсюда следует, что расчет симметричной трехфазной цепи можно вести для одной фазы независимо от всех остальных, т.е. расчету подлежит цепь, показанная на рис. 2.2, отнесенная, например, к фазе *A*.

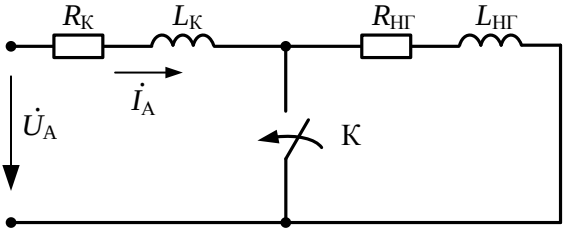


Рис. 2.2

Суммарная мощность генераторов, работающих параллельно на общие шины энергосистемы, может в сотни и тысячи раз превосходить мощности отдельных потребителей или целых узлов нагрузки. В этих случаях синусоидальное напряжение на шинах системы остается практически неизменным по амплитуде и частоте при различных коммутациях в подключенной к шинам внешней цепи. Генератор (система), напряжение на зажимах (шинах) которого остается постоянным при любых изменениях во внешней цепи, называется источником (системой) неограниченной, или бесконечной, мощности. В природе источников бесконечной мощности быть не может, однако на практике допущение неизменности напряжения в каком-либо узле достаточно близко к действительности, когда переходный процесс рассматривается в цепи, имеющей сравнительно большую электрическую удаленность (сопротивление) относительно данного узла. Очевидно, что сопротивление источника неограниченной мощности равно нулю.

Поскольку во многих практических расчетах токов короткого замыкания такое допущение используется очень часто, рассматривается переходный процесс при трехфазном коротком замыкании в простейшей трехфазной цепи, питающейся от источника неограниченной мощности.

Предполагается, что металлическое трехфазное короткое замыкание $К^{(3)}$ происходит вблизи выводов нагрузки, как условно изображено на рис. 2.1. До короткого замыкания в сопротивлении нагрузки проходил установившийся ток под действием неизменного синусоидального напряжения источника, которое в момент замыкания было равно в фазе A $u_{\text{А}} = U_m \sin(\omega t + \psi)$, где ψ – начальная фаза, или фаза включения. Коль скоро соединение трех фаз в месте повреждения не нарушает симметрии цепи, расчет переходного процесса в ней можно свести к расчету одной фазы, т.е. схемы на рис. 2.2, для которой возникновение трехфазного короткого замыкания эквивалентно включению ключа K.

В результате коммутации исходная цепь разбивается на две части: замкнутый контур, в котором запасенная магнитная энергия в индуктивности нагрузки $L_{\text{НГ}}$ в течение непродолжительного времени превращается в тепло на активном сопротивлении $R_{\text{НГ}}$; контур источника, в котором имеет место интересующий нас переходный процесс и проходит ток трехфазного короткого замыкания от системы неограниченной мощности. Ток в месте короткого замыкания равен сумме токов обоих контуров.

Обозначив полное сопротивление цепи короткого замыкания через $\underline{Z}_{\text{К}} = R_{\text{К}} + j\omega L_{\text{К}} = \underline{Z}_{\Phi}$ и приложенное напряжение $u_{\text{А}} = u_{\text{К}}$, можно записать дифференциальное уравнение цепи в виде

$$u_{\text{К}} = R_{\text{К}} i_{\text{К}} + L_{\text{К}} \frac{di_{\text{К}}}{dt}, \qquad (2.1)$$

где $i_{\text{К}}$ – мгновенное значение тока короткого замыкания.

Решение этого уравнения – искомый ток, который находится как сумма частного решения – принужденного тока и решения однородного уравнения – свободного тока в виде $i_{\text{К}} = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}}$.

Принужденный, или установившийся, ток

$$i_{\text{пр}} = \frac{U_m}{Z_{\text{К}}}\sin(\omega t + \psi - \varphi_{\text{К}}) \tag{2.2}$$

где

$$Z_K = \sqrt{R_{\text{К}}^2 + (\omega L_{\text{К}})^2};\ \varphi_K = \text{arctg}\frac{\omega L_{\text{К}}}{R_{\text{К}}}.$$

Свободный ток выражается через постоянную интегрирования A в виде

$$i_{\text{св}} = A \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}, \tag{2.3}$$

где $T_{\text{К}} = L_{\text{К}}/R_{\text{К}}$ – постоянная времени изменения свободной составляющей тока. Значение A определяется из начального условия для тока в индуктивности. Поскольку в ветви короткого замыкания до коммутации проходил ток нагрузки, обусловленный полным сопротивлением цепи, т.е.

$$Z_n = \sqrt{(R_{\text{К}} + R_{\text{НГ}})^2 + (\omega L_{\text{К}} + \omega L_{\text{НГ}})^2},$$
$$i_n = \frac{U_m}{Z_n}\sin(\omega t + \psi - \varphi_n),$$

то в первый момент переходного процесса

$$i_{\text{К}}(0+) = i_{\text{пр}}(0+) + A = i_{\text{пр}}(0-)$$

и тогда получается:

$$A = i_{\text{пр}}(0-) - i_{\text{пр}}(0+) = \frac{U_m}{Z_n}\sin(\psi - \varphi_n) - \frac{U_m}{Z_{\text{К}}}\sin(\psi - \varphi_{\text{К}}).$$

Следовательно, мгновенное значение тока короткого замыкания в общем случае определяется выражением

$$i_K = \frac{U_m}{Z_{\text{К}}}\sin(\omega t + \psi - \varphi_{\text{К}}) + \left[\frac{U_m}{Z_n}\sin(\psi - \varphi_n) - \frac{U_m}{Z_{\text{К}}}\sin(\psi - \varphi_{\text{К}})\right] e^{-\frac{t}{T_a}}. \tag{2.4}$$

Первое слагаемое правой части этого выражения называют периодической составляющей тока короткого замыкания, второе – апериодической составляющей.

Нетрудно видеть, что апериодическая составляющая тока короткого замыкания зависит от предшествующего режима и фазы включения ψ. Предшествующий режим определяется характером

нагрузки. Если нагрузка имеет индуктивно-активный характер, как в нашем случае, то значение апериодической составляющей в первый момент меньше амплитуды периодической составляющей тока короткого замыкания.

При предшествующем опережающем токе, когда нагрузка активно-емкостная, начальное значение апериодической составляющей может превысить амплитуду периодической составляющей. Наконец, когда короткое замыкание происходит на ненагруженной линии, т. е. работавшей до КЗ в режиме холостого хода, начальное значение апериодической составляющей достигает амплитудного значения периодической составляющей.

Случай емкостного характера нагрузки в электрических системах маловероятен, поэтому в качестве расчетного случая как вероятного и в то же время самого простого, целесообразно выбирать короткое замыкание после холостого хода.

Используя начальное условие для расчетного случая $i_n(0-)=0$, можно найти постоянную интегрирования

$$A=-\frac{U_m}{Z_\text{К}}\sin(\psi-\varphi_\text{К})=-I_m\sin(\psi-\varphi_\text{К})$$

и полный ток короткого замыкания

$$i_\text{К}=I_m\sin(\omega t+\psi-\varphi_\text{К})-I_m\sin(\psi-\varphi_\text{К})\,e^{-\frac{t}{T_a}}. \qquad (2.5)$$

Апериодическая составляющая тока короткого замыкания отсутствует, если в момент включения $(\psi-\varphi_\text{К})=k\pi$, т.е. когда принужденная составляющая тока в фазе *A* в этот момент проходит через ноль и результирующий ток совпадает с периодической составляющей. При разности углов $(\psi-\varphi_\text{К})=(2k+1)\pi/2$ апериодическая составляющая максимальна и равна I_m – амплитуде периодической.

Можно подчеркнуть, что апериодические составляющие в других фазах отличаются и определение трехфазного короткого замыкания как симметричного, строго говоря, справедливо только применительно к периодическим составляющим фазных токов.

Можно отметить, что наибольшее значение результирующего тока не может превзойти двойного значения амплитуды периодической составляющей. Как видно из осциллограммы тока короткого замыкания для расчетного случая (рис. 2.3), оно имеет место приблизительно через половину периода после короткого замыкания (включения ключа *К*).

Анализ показывает, что искомый максимум мгновенного значения полного тока имеет место, когда начальная фаза приложенного напряжения равна нулю.

В реальных электрических сетях $\varphi_{\text{К}} \approx \pi/2$ и условия возникновения наибольшей величины апериодической составляющей тока и максимума полного тока практически совпадают. На рис. 2.3 изображен именно этот случай.

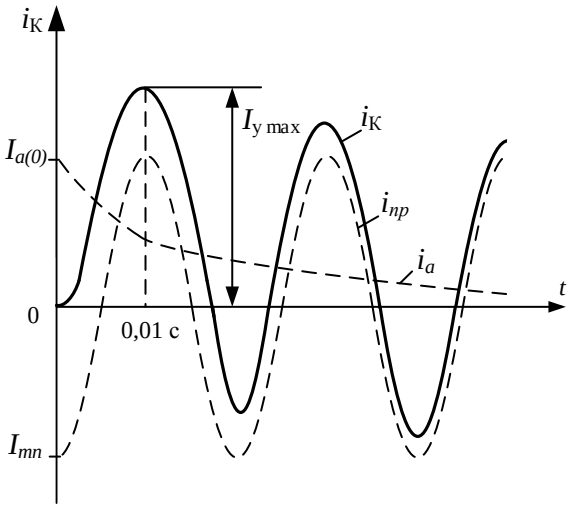


Рис. 2.3

Пиковое, или наибольшее, значение полного тока трехфазного короткого замыкания $I_{\text{y max}}$ называют ударным током. Он наступает приблизительно через полпериода, что при частоте f=50 Гц составляет 0,01 с с момента возникновения короткого замыкания.

Для него принято также обозначение $i_{\text{у}}$.

Ударный ток вычисляется по формуле, вытекающей из анализа графика тока (рис. 2.3):

$$I_{\text{у max}} = I_m + I_m e^{-\frac{0{,}01}{T_a}} = \left(1 + e^{-\frac{0{,}01}{T_a}}\right) I_m = K_{\text{у}} I_m,$$

где $K_{\text{у}}$ – ударный коэффициент, находящийся в пределах $1 < K_{\text{у}} < 2$, что соответствует предельным значениям постоянной времени затухания апериодической составляющей T_a.

Выражая ударный ток через действующее значение периодической составляющей, которая при питании от источника неограниченной мощности остается неизменной в течение всего времени переходного процесса, можно получить формулу:

$$I_{\text{у max}} = \sqrt{2} K_{\text{у}} I_{\text{п}}. \qquad (2.6)$$

Ударный коэффициент вычисляется наиболее просто для цепи, представляющей собой последовательное соединение элементов R_L и X_L. Для этого достаточно определить постоянную времени $T_a = X_{\Sigma}/\omega R_{\Sigma}$, выраженную через результирующие сопротивления цепи. Очевидно, чем меньше T_a, тем быстрее затухает апериодическая составляющая и тем меньше ударный коэффициент. В электроустановках высокого напряжения она практически приближается к нулю уже через 0,3-0,5 с, а в установках низкого напряжения незаметна с самого начала переходного процесса.

В инженерной практике часто используют понятие наибольшего действующего значения полного тока короткого замыкания. При этом имеют в виду, что оно определяется для первого периода переходного процесса расчетного случая. Тогда можно считать, что действующее значение периодической составляющей будет $I_{\text{п}m}/\sqrt{2}$. В общем случае, когда периодическая составляющая затухает, амплитуду ее принимают по огибающей для момента, соответствующего середине первого периода. Что касается апериодической составляющей, то ее действующее значение условно принимается равным мгновенному значению в момент, находящийся посередине первого периода, т. е. $I_{at} = i_{at}$. Естественно, что так же

можно найти действующие значения составляющих тока для любого заданного времени. При условии, что $i_{a(0)} = I_{\text{п}m}$, справедливого для расчетного случая, получается:

$$I_{\text{у}} = \sqrt{I_{\text{п}}^2 + \left[(K_{\text{у}} - 1)\sqrt{2} I_{\text{п}}\right]^2} = I_{\text{п}} \sqrt{1 + 2(K_{\text{у}} - 1)^2},$$

где $K_{\text{у}}$ – ударный коэффициент.

ПРИМЕР 2

Две системы С-1 и С-2 (рис. 2.4) связаны между собой линиями Л-1 (150 км, АСУ - 400), Л-2 (100 км, АСУ - 300) и автотрансформатором АТ (160 МВА, 220/121/11 кВ; $u_{\text{к ВС}}$ = 28%, $u_{\text{к ВН}}$ = 10%, $u_{\text{к СН}}$ = 18%).

Каждую из систем можно рассматривать как источник неограниченной мощности с неизменными и совпадающими по фазе напряжениями 220 и 121 кВ. К третьей обмотке через кабельную линию КЛ-3 (l = 1 км, А-3×120, X_0 = 0,07 Ом/км, R_0 = 0,27 Ом/км) подключается узел нагрузки. На расстоянии 0,3 км от шин подстанции происходит трехфазное короткое замыкание.

Требуется рассчитать ударный ток в ветви кабельной линии, проходящий от шин подстанции к месту повреждения. Для трансформатора рекомендуется принять отношение *X/R*=30.

Решение

Выбираются базисные условия, соответствующие параметрам автотрансформатора, и находятся параметры элементов схемы замещения (рис. 2.5):

$$X_1 = X_{0\text{Л}1} \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2} = 0{,}4 \cdot 150 \cdot \frac{160}{220^2} = 0{,}2 \text{ о. е.};$$

$$R_1 = R_{0\text{Л}1} \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2} = 0{,}11 \cdot 150 \cdot \frac{160}{220^2} = 0{,}055 \text{ о. е.};$$

$$X_2 = 0{,}4 \cdot 100 \cdot \frac{160}{121^2} = 0{,}44 \text{ о. е.};$$

$$R_2 = 0{,}105 \cdot 100 \cdot \frac{160}{121^2} = 0{,}115 \text{ о. е.};$$

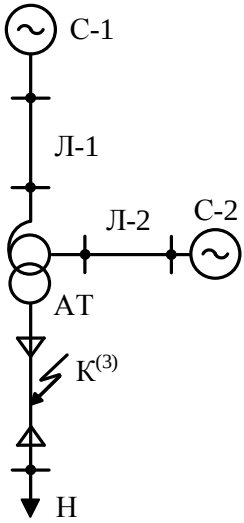


Рис. 2.4

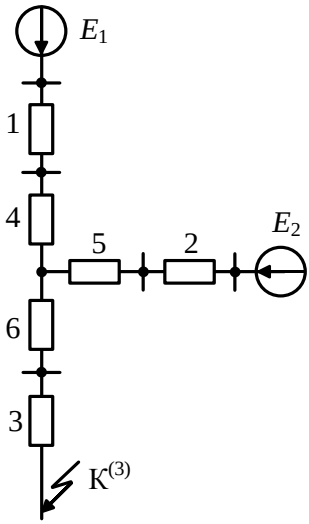


Рис. 2.5

$$X_3 = 0{,}3X_{0\text{КЛ3}} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_б^2} = 0{,}3 \cdot 0{,}07 \cdot \frac{160}{11^2} = 0{,}027 \text{ о. е.};$$

$$R_3 = 0{,}3R_{0\text{КЛ3}} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_б^2} = 0{,}3 \cdot 0{,}27 \cdot \frac{160}{11^2} = 0{,}107 \text{ о. е.};$$

$$X_4 = 0{,}1; R_4 = 0{,}0033;$$

$$X_5 = 0; R_5 = 0;$$

$$X_6 = 0{,}18; R_6 = 0{,}006;$$

$$\overset{*}{E_1} = \overset{*}{E_2} = 1.$$

Далее определяются результирующие сопротивления и $T_{aэ}$ по методу экстремальных частот:

$$X_{\Sigma(R_i=0)} = X_3 + X_6\frac{X_2\cdot(X_1+X_4)}{X_2+X_1+X_4} = \\ = 0{,}027 + 0{,}18\frac{0{,}44\cdot(0{,}2+0{,}1)}{0{,}44+0{,}3} = 0{,}385;$$

$$R_{\Sigma(X_i=0)} = 0{,}107 + 0{,}006 + \frac{(0{,}0033\cdot 0{,}055)\cdot 0{,}115}{0{,}0583+0{,}115} = 0{,}152;$$

$$T_{aэ} = \frac{X_{\Sigma(R_i=0)}}{\omega\cdot R_{\Sigma(X_i=0)}} = \frac{0{,}385}{314\cdot 0{,}152} = 0{,}00806 \text{ с.}$$

Вычисляются действующее значение периодической составляющей тока КЗ и ударный ток:

$$I_{\text{п}} = \frac{E_\Sigma}{X_\Sigma} = \frac{1}{0{,}385} = 2{,}59;$$

$$I_{\text{у max}} = \sqrt{2}I_{\text{п}}K_{\text{у}}I_{\text{б}} = \sqrt{2}\cdot 2{,}59\left(1+e^{-\frac{0{,}01}{0{,}00806}}\right)\cdot\frac{160}{\sqrt{3}\cdot 11} = 39{,}5 \text{ кА.}$$

Для сравнения токов находится эквивалентная постоянная времени по методу результирующего сопротивления. Для этого вычисляется результирующее сопротивление:

$$Z_\Sigma = \frac{(0{,}0583+j0{,}3)(0{,}115+j0{,}44)}{0{,}1733+j0{,}74} + j0{,}207 + 0{,}113 = \\ = 0{,}153 + j0{,}386.$$

Тогда модуль полного сопротивления $Z = 0{,}415$ и

$$T_{aэ} = \frac{X_{\Sigma(R_i=0)}}{\omega\cdot R_{\Sigma(X_i=0)}} = \frac{0{,}386}{314\cdot 0{,}153} = 0{,}00803 \text{ с.}$$

Фактически постоянная времени не изменилась. Пренебрежение активным сопротивлением приводит к увеличению ударного тока, который при учете активной составляющей сопротивления будет

$$I_{\text{у max}} = \frac{1}{0{,}415}\cdot\sqrt{2}\left(1+e^{-\frac{0{,}01}{0{,}00803}}\right)\cdot\frac{160}{\sqrt{3}\cdot 11} = 36{,}75 \text{ кА.}$$

Погрешность от неучета активного сопротивления составляет

$$\Delta = \frac{39{,}5 - 36{,}75}{36{,}75} \cdot 100\% = 7{,}48\%.$$

Следовательно, в схемах рассмотренного типа более существенным является задача учета активных сопротивлений при определении модуля периодической составляющей тока, нежели уточнение $T_{a\text{э}}$.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОГО ПЕРЕХОДНОГО И СВЕРХПЕРЕХОДНОГО ТОКОВ ТРЕХФАЗНОГО КЗ

3.1. Трехфазное короткое замыкание на выводах синхронного генератора

Короткое замыкание на шинах или в цепи генератора приводит к скачкообразному изменению его параметров и резкому увеличению токов. Токи короткого замыкания во всех контурах генератора могут быть найдены из решения системы полных уравнений Парка – Горева. Характер и значения токов в начале переходного процесса проще определять, если рассматривать контуры машины сверхпроводящими и считать, что искомые токи обеспечивают постоянство потокосцеплений со всеми контурами генератора. Выполнение данного условия возможно лишь при наличии в контурах постоянных составляющих, способных создавать неизменное потокосцепление. Вместе с этим из-за взаимного перемещения контуров статора и ротора относительно друг друга в контурах машины непременно должны появиться дополнительные гармонические токи основной частоты. Наличие магнитной и электрической несимметрии ротора вызывает также дополнительные гармонические токи в контурах статора. Они колеблются с двойной частотой, поскольку магнитная проводимость для неподвижного потока статора изменяется периодически с двойной частотой.

Следовательно, при внезапном трехфазном коротком замыкании синхронного генератора в его обмотках (контурах), помимо существовавших там токов, возникают дополнительные составляющие: в обмотках статора – постоянная, основной частоты и двойной частоты; в обмотках ротора – постоянная и гармоническая основной частоты. Между постоянными и гармоническими составляющими токов статора и ротора существует трансформаторная связь. Амплитуды дополнительных составляющих токов, возникающих при коротком замыкании, затухают в реальной машине под влиянием активных сопротивлений контуров. Разумеется, зная индуктивные

сопротивления и постоянные времени, можно рассчитать токи короткого замыкания.

Все сказанное относится и к машинам с успокоительными обмотками. Отметим лишь, что наличие демпферных контуров существенно снижает и без того малые амплитуды гармонических составляющих токов статора, изменяющихся с двойной частотой, которыми в принципе и так иногда пренебрегают.

Ранее постоянные составляющие токов назывались нами апериодическими составляющими. Апериодические или постоянные составляющие токов в статоре и демпферных обмотках затухают до нуля, так как в них нет источников постоянного напряжения, и, следовательно, до нуля затухает гармоническая составляющая в роторе и вторая гармоническая составляющая в статоре генератора. В то же время апериодическая составляющая ротора будет затухать до определенного значения, обусловленного напряжением возбудителя. В статоре основная гармоническая будет затухать до некоторого установившегося значения тока короткого замыкания.

Наибольший интерес представляет периодическая составляющая тока статора, для выяснения затухания которой необходимо учесть активные сопротивления роторных цепей.

3.2. Теорема о постоянстве потокосцепления, переходные ЭДС и сопротивления синхронной машины

Одним из наиболее полезных принципов для анализа переходных процессов в индуктивных электрических цепях является теорема о постоянстве потокосцепления. Ее можно сформулировать следующим образом: потокосцепление любой замкнутой электрической цепи, содержащей конечные активные сопротивления и ЭДС, не может измениться мгновенно (скачкообразно).

Для ее доказательства достаточно рассмотреть какую-нибудь замкнутую цепь (контур), состоящую из m ветвей. Предполагается,

что каждая ветвь может содержать индуктивность, активное сопротивление и ЭДС или один из этих элементов. Ни одна из ветвей контура не содержит емкости. Тогда на основании законов электротехники получится

$$\sum_{1}^{m} R_i\, i + \frac{d\psi}{dt} = \sum_{1}^{m} e_i,$$

где ψ - потокосцепление, относящееся ко всему контуру.

Нужно проинтегрировать это уравнение по t в пределах от 0 до Δt, с учетом того, что Δt стремится к нулю:

$$\sum_{1}^{m} R_i \int_{0}^{\Delta t} i dt + \Delta\psi = \sum_{1}^{m} R_i \int_{0}^{\Delta t} e_i dt.$$

Если R_i и e_i ветвей имеют конечные значения, то при указанных условиях оба интеграла стремятся к нулю и, следовательно, $\Delta\psi$ также стремится к нулю, что и доказывает приведенную выше теорему.

В особом случае, когда $R_i = 0$ и отсутствует ЭДС, а с контуром сцеплены трубки потока взаимной индукции и самоиндукции, исходное уравнение упрощается, преобразуясь к виду $d\psi/dt = 0$, откуда после интегрирования ψ= const, т.е. потокосцепление любой замкнутой (сверхпроводящей) электрической цепи без ЭДС остается неизменным.

Реальные контуры синхронной машины обладают очень малыми активными сопротивлениями. На отрезке времени переходного процесса, который значительно меньше постоянной времени контура L_k/R_k, вполне можно рассматривать такие контуры как сверхпроводящие и использовать указанную теорему.

При этом теорему можно применять одновременно для всех обмоток, если скорость вращения машины близка к синхронной и напряжение на обмотке возбуждения не изменяется. В тех случаях, когда данные условия не выполняются, можно считать, что идеальной проводимостью обладают только некоторые обмотки, например статора или ротора. Рассматриваются переходные процессы при

изменении режима работы машины без демпферных контуров. Пренебрегая апериодической составляющей переходного тока статора, можно использовать принцип неизменности суммарного потокосцепления только в отношении обмотки возбуждения генератора, имея в виду его идеализированную модель и систему уравнений в координатах d, q, 0.

Потокосцепление какой-либо обмотки определяется как произведение тока, создающего магнитный поток, на индуктивность или взаимоиндуктивность: $\psi = L \cdot i$. В системе относительных единиц, полагая $\omega = 1$, получится $L = X$ и $\psi = X \cdot i$.

Очевидно, что при отсутствии демпферных контуров магнитные потоки в поперечной оси связаны лишь с поперечной обмоткой статора и ее током i_q. В продольной же оси магнитные потоки пронизывают и обмотку возбуждения ротора, вызывая в ней появление свободных переходных токов. В общем случае нагруженной синхронной машины с обмоткой возбуждения связаны три магнитных потока: полезный поток Φ_d, создаваемый в воздушном зазоре машины током возбуждения i_f; поток рассеяния $\Phi_{\sigma f} = \sigma_f \cdot \Phi_d$, пропорциональный возбуждению и сцепленный только с обмоткой ротора; продольный поток реакции статора Φ_{ad}, обусловленный током i_d статора по продольной оси, т.е. полный поток, сцепленный с обмоткой возбуждения, $\Phi_{df} = \Phi_d + \sigma_f \Phi_d - \Phi_{ad} = (1+\sigma_f) \Phi_d - \Phi_{ad}$.

Потокосцепление магнитного потока $(1+\sigma_f)\Phi_d$, сцепляющегося с обмоткой возбуждения и создаваемого током i_f, можно записать в системе относительных единиц в форме произведения $X_f \cdot i_f$ [1,10]. Тогда суммарное потокосцепление обмотки возбуждения, не претерпевающее изменения в начальный момент, выражается формулой

$$\psi_{fd} = i_f X_f - I_d X_{ad}, \qquad (3.1)$$

где $X_f = X_{\sigma f} + X_{ad}$ – индуктивное сопротивление обмотки возбуждения; X_{ad} – взаимная индуктивность между обмотками ротора и статора или индуктивное сопротивление реакции статора;

I_d – периодическая составляющая тока в продольной обмотке статора. Принятое обозначение I_d для тока вместо i_d подтверждает тот факт, что в анализе не учитывается апериодическая составляющая тока статора.

Соответственно, результирующее потокосцепление продольной обмотки статора определяется выражением

$$\psi_d = i_f X_{ad} - I_d X_d. \tag{3.2}$$

Тогда из упрощенных уравнений Парка – Горева определяется

$$u_q = \psi_d$$

и, следовательно,

$$u_q = \left(\psi_{fd} + X_{ad} I_d\right) \frac{X_{ad}}{X_f} - X_d I_d$$

или

$$u_q = \psi_{fd} \frac{X_{ad}}{X_f} - I_d \left(X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f} \right) = E'_q - X'_d I_d, \tag{3.3}$$

где $E'_q = \psi_{fd} \frac{X_{ad}}{X_f}$ - переходная ЭДС синхронной машины;

$X'_d = X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f}$ - переходное индуктивное сопротивление машины.

В системе относительных единиц при $\omega = 1$ значения ЭДС численно равны значениям потокосцепления. Векторы ЭДС и потокосцеплений, их вызвавших, располагаются по разным осям системы координат и имеют различные подстрочные индексы, поскольку ЭДС по фазе отстает от потокосцепления на $\pi/2$.

Переходную ЭДС E'_q нельзя каким-либо способом измерить, ее можно лишь рассчитать, ибо она не является истинной ЭДС генератора. Она представляет собой некоторую условную величину, которая пропорциональна суммарному потокосцеплению ψ_{fd}, остающемуся неизменным в первый момент изменения режима работы синхронной машины. Следовательно, и саму ЭДС E'_q отличает одно чрезвычайно важное свойство.

Она остается постоянной в начальный момент изменения режима, т.е.

$$E'_{q0+} = E'_{q0-}.$$

Это позволяет, используя (3.3), найти в первый момент переходного процесса значение тока I_d при заданном изменении напряжения u_q, что невозможно сделать с помощью соотношения

$$u_q = E_q - X_d I_d, \qquad (3.4)$$

поскольку ЭДС E_q пропорциональна току i_f , который претерпевает скачкообразное изменение в момент коммутации.

Переходную ЭДС нетрудно определить [2,4] из предшествующего режима работы машины с помощью построения ее векторной диаграммы по известным параметрам режима U, I, $\cos\varphi$ (рис. 3.1).

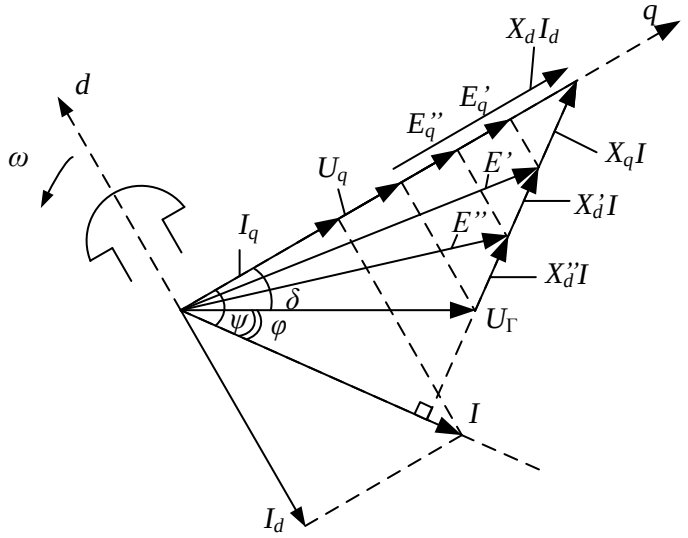


Рис. 3.1

Из диаграммы следует важное соотношение

$$E'_q \approx E' = \sqrt{(U\cos\varphi)^2 + (U\sin\varphi + X'_d I)^2},$$

которое и служит на практике для вычисления переходной ЭДС.

В первый момент любого изменения режима работы синхронная машина может рассматриваться как трансформатор. Ее переходное сопротивление при этом логично выразить через сопротивления рассеяния обмоток ротора и статора следующим образом:

$$X'_d = (X_d - X_{ad}) + X_{ad} - \frac{X_{ad}^2}{X_f} = X_{\sigma c} + \frac{X_{ad}\left(X_f - X_{ad}\right)}{X_{ad}+X_{\sigma f}};$$

$$X'_d = X_{\sigma c} + \frac{X_{ad}X_{\sigma f}}{X_{ad}+X_{\sigma f}}. \qquad (3.5)$$

Выражению (3.5) соответствует схема замещения, представленная на рис. 3.2.

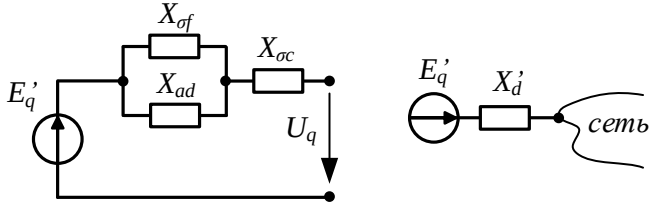


Рис. 3.2

Таким образом, в начальный момент переходного процесса расчетная схема замещения синхронной машины без демпферных контуров может быть представлена в виде своего переходного сопротивления X'_d и расчетной ЭДС E'_q, которая обладает замечательным свойством: $E'_{q0+} = E'_{q0-}$. Переходное сопротивление X'_d обычно задается в паспорте машины, а расчетное значение ЭДС E'_q определяется из предшествующего режима работы машины.

Переходный ток в обмотке возбуждения при нарушении режима работы машины можно найти из рассмотрения уравнения

$$u_f = i_f R_f + \frac{d\psi_{fd}}{dt}, \qquad (3.6)$$

входящего в систему Парка – Горева. Разделив его на R_f, можно получить выражение

$$\frac{u_f}{R_f} = i_f + \frac{1}{R_f}\frac{d\psi_{fd}}{dt} = i_{f\infty}, \qquad (3.7)$$

где $i_{f\infty}$ - установившийся ток возбуждения, пропорциональный напряжению возбуждения, которое в отсутствие автоматического регулирования (АРВ) не отличается от первоначального. Умножив далее обе части равенства (3.7) на X_{ad}, можно найти

$$i_f X_{ad} + \frac{X_{ad}}{R_f}\frac{d\psi_{fd}}{dt} = i_{f\infty} X_{ad}, \qquad (3.8)$$

где $i_f X_{ad}$ – потокосцепление обмотки статора, создаваемое полным током возбуждения. ЭДС, обусловленная этим потокосцеплением, соответствует ЭДС холостого хода машины E_q, которая изменяется во времени и вместе с i_f претерпевает скачки при коммутациях. Выражение справа в (3.8) дает вынужденное значение этой ЭДС в установившемся режиме $E_{q\infty} = i_{f\infty} X_{ad}$. Оно, если АРВ отсутствует, равно значению ЭДС в предшествующем режиме E_{q0}.

Переходя к уравнению для ЭДС, можно получить

$$E_q + \frac{X_{ad}}{R_f}\frac{d\psi_{fd}}{dt} = E_{q\infty}$$

или

$$E_{q\infty} = E_q + \frac{X_f}{R_f}\frac{X_{ad}}{X_f}\frac{d\psi_{fd}}{dt} = E_q + T_{f0}\frac{d\frac{X_{ad}}{X_f}\psi_{fd}}{dt}, \qquad (3.9)$$

где $T_{f0} = X_f/R_f$ – постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутом статоре.

Подстановка (3.8) в (3.9) дает искомое дифференциальное уравнение, описывающее протекающие электромагнитные процессы в синхронной машине при разомкнутом статоре:

$$E_{q\infty} = E_q + T_{f0}\frac{dE'_q}{dt}. \qquad (3.10)$$

Оно включает два переменных параметра E_q и E'_q, а для его решения необходимо установить дополнительное уравнение связи между этими переменными, вытекающее из векторной диаграммы (рис. 3.1)

$$U_q = E'_q - X'_d I_d = E_q - X_d I_d. \qquad (3.11)$$

Исключив из последнего выражения ток I_d, можно определить требуемое дополнительное уравнение в виде

$$E'_q = \frac{X'_d}{X_d} E_q + \frac{X_d - X'_d}{X_d} U_q. \quad (3.12)$$

Система из уравнений (3.10) и (3.12) позволяет достаточно полно в пределах приведенных выше допущений рассматривать различные переходные режимы работы синхронной машины.

Тогда при КЗ на выводах генератора напряжение $U_q = 0$ и переходная ЭДС

$$E'_q = \frac{X'_d}{X_d} E_q + \frac{X_d - X'_d}{X_d} U_q = \frac{X'_d}{X_d} E_q. \quad (3.13)$$

Подставив (3.13) в дифференциальное уравнение (3.10), можно получить

$$E_{q\infty} = E_q + T'_d \frac{dE_q}{dt}, \quad (3.14)$$

где $T'_d = T_{f0} \frac{X'_d}{X_d}$ - постоянная времени обмотки возбуждения при короткозамкнутом статоре.

Уравнение (3.14) легко интегрируется и его решение имеет вид

$$E_q = E_{q\infty} + (E_{q0+} - E_{q\infty}) e^{-\frac{t}{T'_d}},$$

где $E_{q\infty} = E_{q0-}$ - ЭДС генератора до короткого замыкания. Ее можно вычислить из предшествующего режима по формуле

$$E_{q0-} = \sqrt{(U\cos\varphi)^2 + (U\sin\varphi + X_d I)^2}.$$

Значение ЭДС $E_{q0+} = E'_{q0} \frac{X_d}{X'_d}$ может быть рассчитано с помощью начального значения переходной ЭДС генератора $E'_{q0+} = E'_{q0-}$, сохраняющей свое значение в первый момент изменения режима постоянным.

Из уравнения $E_q - X_d I_d = U_q$ при $U_q = 0$ может быть найден ток $I_d = E_q/X_d$ или для произвольного момента времени

$$I_{dt} = \frac{E_{q\infty}}{X_d} + \left(\frac{E'_{q0+}}{X'_d} - \frac{E_{q\infty}}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}}. \quad (3.15)$$

При трехфазном коротком замыкании генератора, работающего на шины неограниченной мощности, справедливы все найденные выше зависимости для ЭДС и тока, поскольку при данном виде КЗ связь генератора с системой разрывается и она не оказывает никакого влияния на режим работы генератора. Однако КЗ может произойти не на выводах машины, а за некоторым внешним сопротивлением $X_{\text{ВН}}$. В этом случае в расчетных формулах используются полные или индуктивные результирующие сопротивления машины и сети $X_{d\Sigma} = X_d + X_{\text{ВН}}$; $X'_{d\Sigma} = X'_d + X_{\text{ВН}}$ и постоянную времени

$$T'_d = T_{f0}\frac{X'_d + X_{\text{ВН}}}{X_d + X_{\text{ВН}}}. \qquad (3.16)$$

Наличие внешнего сопротивления ограничивает ток короткого замыкания и замедляет затухание свободных токов.

3.3. Влияние и приближенный учет демпферных обмоток

Оценим влияние демпферных обмоток или эквивалентных им цепей на переходные процессы при коротком замыкании в цепи статора синхронной машины. Главное отличие в характере изменения токов при КЗ и наличии демпферных обмоток состоит в том, что компенсация реакции статора в продольной оси машины обусловливается теперь не только токами в обмотке возбуждения, но и токами в демпферных обмотках. При этом в момент нарушения режима возникают токи в демпферных контурах, которые совместно с изменившимся током в обмотке возбуждения создают поток компенсации реакции якоря, возникшей при КЗ.

Токи в демпферных обмотках затухают гораздо быстрее, чем токи в обмотке возбуждения. По мере их затухания происходит перераспределение токов в этих обмотках. Кроме того, имеет место переходный процесс и в демпферных обмотках (контурах), расположенных в поперечной оси машины. Токи, в них возникающие, компенсируют поток поперечной реакции якоря, но не

полностью из-за рассеяния потока демпферных обмоток. Реакция якоря проявляется полностью лишь после полного затухания токов в демпферных контурах. Для машины с демпферными контурами, подобно тому, как это было сделано для машин без демпферных обмоток, можно найти некоторые индуктивные сопротивления X_d'' и X_q'', а также ЭДС E_d'' и E_q''. Эти параметры называются сверхпереходными. Расчетные сверхпереходные ЭДС обладают замечательным свойством неизменности в первый момент изменения режима, например, короткого замыкания.

Для определения этих параметров можно воспользоваться упрощенными уравнениями Парка – Горева, представив их в виде

$$U_q = E_q'' - X_d'' i_d;\ U_d = E_d'' - X_q'' i_q.$$

С этой целью необходимо при заданном токе статора выразить из уравнений для потокосцеплений обмотки возбуждения и демпферных обмоток токи i_f, i_D и i_Q, а затем подставить их в уравнения для напряжений U_d и U_q статора. В результате некоторых преобразований получаются искомые уравнения, в которых вводятся обозначения:

$$E_q'' = \frac{\psi_f\left(X_D X_{ad} - {X_{ad}}^2\right) + \psi_D\left(X_f X_{ad} - {X_{ad}}^2\right)}{X_f X_D - {X_{ad}}^2};$$

$$E_d'' = -\psi_Q \frac{X_{ad}}{X_Q};$$

$$X_d'' = \frac{X_d X_Q - {X_{aq}}^2}{X_Q};$$

$$X_d'' = X_d - \frac{{X_{ad}}^2\left(X_D + X_f - 2X_{ad}\right)}{X_f X_D - {X_{ad}}^2}.$$

В этом случае принято упрощающее допущение, что взаимные сопротивления между тремя обмотками в продольной оси равны, т.е. $X_{af} = X_{aD} = X_{fD} = X_{ad}$.

Если ввести индуктивные сопротивления рассеяния для всех пяти обмоток $X_\sigma = X_d - X_{ad}$; $X_{\sigma f} = X_f - X_{ad}$ и т.д., то можно на основании формул

$$X_d'' = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma D}}};\ X_q'' = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_{\sigma Q}}}$$

получить схемы замещения для определения сверхпереходных сопротивлений по продольной и поперечной оси при наличии демпферных обмоток. Схема замещения в продольной оси машины приведена на рис. 3.3.

Схемы замещения наглядно показывают взаимную связь между приведенными токами отдельных обмоток. Еще раз подчеркнем, что при отсутствии активных сопротивлений схемы отражают лишь начальный момент переходного процесса. К данным схемам замещения можно было бы прийти и другим путем. Например, представив машину в первый момент как трансформатор и затем выполнив постепенно развязку индуктивных связей по известным правилам электротехники.

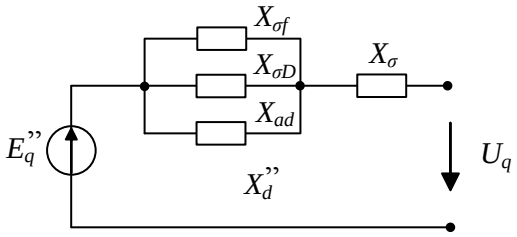


Рис. 3.3

Введенные сверхпереходные реактивности или индуктивные сопротивления представляют собой характерные параметры машины. Эти параметры всегда задаются заводом-изготовителем. Однако знание отдельных параметров синхронных машин не облегчает анализ переходных процессов.

Для получения приемлемых результатов в анализе делается ряд упрощающих допущений. Так, все демпферные контуры машины

представляются в виде двух обмоток. Одна из них располагается по продольной, а другая по поперечной оси. Отметим, однако, что в последнее время при анализе процессов в турбогенераторах нередко вводят в рассмотрение ряд обмоток. Кроме этого в момент изменения напряжения на выводах обмотки якоря или обмотки возбуждения синхронной машины с демпферными контурами все контуры можно рассматривать как идеальные и характер токов во всех контурах определяется условием постоянства их потокосцеплений. Поэтому физическая картина в машине с демпферными контурами не отличается от картины, имеющей место в машине без демпферных контуров.

ПРИМЕР 3

Определить начальный переходный и сверхпереходный токи КЗ генератора СВ-1130/250-48 (рис. 3.4). Генератор работал с номинальной нагрузкой $S_Г$ = 235 МВА; cosφ = 0,85; $U_{ном}$ = 15,75 кВ; $X'_d = 0{,}345$; $X_q = 0{,}65$; $X''_d = 0{,}205$.

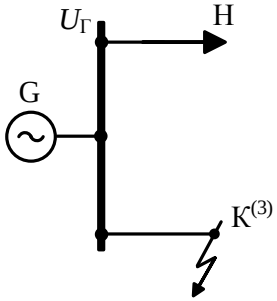


Рис. 3.4

Решение

Определяется E'_q из векторной диаграммы генератора. Для построения векторной диаграммы (рис. 3.1) вычисляется

предварительно угол δ, определяющий направление оси q относительно вектора напряжения $U_Г$:

$$\delta = \psi - \varphi = 54° - 32° = 22°,$$

где

$$\psi = \operatorname{arctg}\frac{U\sin\varphi + IX_q}{U\cos\varphi} = \operatorname{arctg}\frac{1\cdot 0{,}527 + 1\cdot 0{,}65}{1\cdot 0{,}85} = 54^0;$$

$$\varphi = \arccos 0{,}85 = 32^0.$$

Вычислив

$$I_d = I\sin 54^0 = 0{,}809;$$

$$I_q = I\cos 54^0 = 0{,}588;$$

$$U_q = I\cos 22^0 = 0{,}927,$$

можно найти

$$E'_q = U_q + X'_d \cdot I_d = 0{,}927 + 0{,}345 \cdot 0{,}809 = 1{,}21.$$

Приближенное значение E'_q находится по формуле

$$E'_q \approx \sqrt{(U\cos\varphi)^2 + (U\sin\varphi + IX'_d)^2};$$

$$E'_q \approx \sqrt{(1\cdot 0{,}85)^2 + (1\cdot 0{,}527 + 1\cdot 0{,}345)^2} = 1{,}22,$$

т.е. преувеличение менее 1%.

Сверхпереходная ЭДС E''_q вычисляется по формуле

$$E''_q \approx \sqrt{(1\cdot 0{,}85)^2 + (1\cdot 0{,}527 + 1\cdot 0{,}205)^2} = 1{,}12.$$

Начальные значения переходного и сверхпереходного токов КЗ генератора соответственно:

$$I'_0 = \frac{E'_q}{X'_d}\cdot I_\delta = \frac{1{,}21}{0{,}345}\cdot\frac{235}{\sqrt{3}\cdot 15{,}75} = 30{,}3 \text{ кА};$$

$$I''_0 = \frac{E''_q}{X''_d}\cdot I_\delta = \frac{1{,}12}{0{,}205}\cdot\frac{235}{\sqrt{3}\cdot 15{,}75} = 47{,}1 \text{ кА}.$$

ПРИМЕР 4

При трехфазном коротком замыкании за реактором (рис. 3.5) требуется определить ударный ток в месте КЗ и остаточное напряжение на шинах в начальный момент.

Параметры схемы: система С - источник неограниченной мощности, $U_{С}$ = 115 кВ; компенсатор КС-10000-6,10 МВА, $U_{КС}$ = 6,6 кВ, $X''_d = 0{,}22$, $R_{КС}$ = 0,018; трансформатор ТДТН-80 – $S_{ном}$ = 80 МВА; $k_{Т}$ = 115/38,5/6,6; $u_{КВС}$= 17%; $u_{КВН}$= 10,5%; $u_{КСН}$= 6%; линия Л – l = 50 км; $X_{0,Л}$ = 0,4 Ом/км; $R_{0,Л}$ = 0,27 Ом/км; реактор РБА-6-600-6, $P_{К}$ = 4,6 кВт; нагрузка НГ-11-$S_{ном}$ = 40 МВА; НГ - 2 – $S_{ном}$ = 30 МВА; $X_{НГ}$ = 0,35; $E_{НГ}$ = 0,85 при $U_{СР}$ = 6,3 кВ и 37 кВ; $R_{НГ}$ = 0,25$X_{НГ}$.

КС работает в режиме выдачи реактивной мощности.

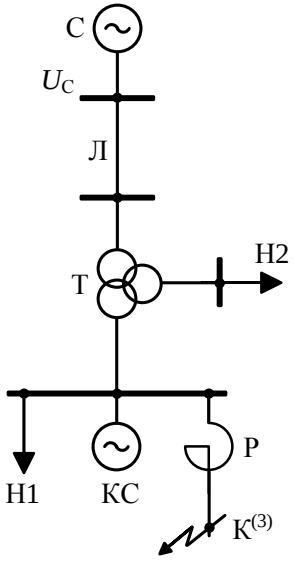


Рис. 3.5

Решение

Принимаются

$$S_{б} = 100 \text{ МВА и } U_{б\,I} = 115 \text{ кВ},$$

тогда

$$U_{б\,II} = 6{,}6\ \text{кВ};\ U_{б\,III} = 38{,}5\ \text{кВ};\ I_{б\,I} = 0{,}502\ \text{кА};\ I_{б\,II} = 8{,}75\ \text{кА}.$$

Выражаются все величины, входящие в схему замещения (рис. 3.6), в относительных единицах при выбранных базисных условиях.

Сопротивления элементов схемы замещения:

– линии:

$$X_1 = X_Л = X_{0Л1} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_б^2} = 0{,}40 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0{,}151;$$

$$R_1 = R_Л = R_{0Л1} \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_б^2} = 0{,}27 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0{,}102;$$

– трансформатора:

$$X_2 = X_{Т,В} = \frac{u_К}{100} \cdot \frac{u_{КВС} + u_{КВН} - u_{КСН}}{u_К} \cdot \frac{U_{НВ}^2}{S_{ном,Т}} \cdot \frac{S_б}{U_{б\,I}^2} =$$

$$= 0{,}5 \cdot \frac{17 + 10{,}5 - 6}{100} \cdot \frac{115^2}{80} \cdot \frac{100}{115^2} = 0{,}134;$$

$$X_3 = X_{Т,С} = \frac{u_К}{100} \cdot \frac{u_{КВС} + u_{КСН} - u_{КВН}}{u_К} \cdot \frac{U_{НН}^2}{S_{ном,Т}} \cdot \frac{S_б}{U_{б\,III}^2} =$$

$$= 0{,}5 \cdot \frac{17 + 6 - 10{,}5}{100} \cdot \frac{38{,}5^2}{80} \cdot \frac{100}{38{,}5^2} = 0{,}078;$$

$$X_4 = X_{Т,Н} = \frac{u_К}{100} \cdot \frac{u_{КВН} + u_{КСН} - u_{КВС}}{u_К} \cdot \frac{U_{НН}^2}{S_{ном,Т}} \cdot \frac{S_б}{U_{б\,II}^2} =$$

$$= 0{,}5 \cdot \frac{10{,}5 + 6 - 17}{100} \cdot \frac{6{,}6^2}{80} \cdot \frac{100}{6{,}6^2} \approx 0;$$

– реактора:

$$X_6 = X_Р = \frac{X_Р\%}{100} \cdot \frac{U_{ном}}{I_{ном}} \cdot \frac{I_{б\,II}}{U_{б\,II}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{6}{0{,}6} \cdot \frac{8{,}75}{6{,}6} = 0{,}795;$$

$$R_6 = R_Р = \frac{P_К}{I_Н^2} \cdot \frac{S_б}{U_{б\,II}^2} = \frac{4600}{600^2} \cdot \frac{100}{6{,}6^2} = 0{,}0294;$$

– компенсатора:

$$X_7 = X_{\text{КС}} = X_d'' \frac{U_{\text{Н}}^2}{S_{\text{Н}}} \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}\,II}^2} = 0{,}22 \cdot \frac{6{,}6^2}{10} \cdot \frac{100}{6{,}6^2} = 2{,}2;$$

$$R_7 = R_{\text{КС}} = R_{\text{КС(Н)}} \frac{U_{\text{Н}}^2}{S_{\text{Н}}} \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}\,II}^2} = 0{,}018 \cdot \frac{6{,}6^2}{10} \cdot \frac{100}{6{,}6^2} = 0{,}18;$$

– нагрузок:

$$X_5 = X_{\text{НГ2}} = X_{\text{НГ}} \frac{U_{\text{ср}}^2}{S_{\text{Н}}} \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}\,III}^2} = 0{,}35 \cdot \frac{37^2}{30} \cdot \frac{100}{38{,}5^2} = 1{,}08;$$

$$R_5 = 0{,}25 \cdot X_5 = 0{,}27;$$

$$X_8 = X_{\text{НГ1}} = X_{\text{НГ}} \frac{U_{\text{ср}}^2}{S_{\text{Н}}} \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}\,II}^2} = 0{,}35 \cdot \frac{6{,}3^2}{40} \cdot \frac{100}{6{,}6^2} = 0{,}8;$$

$$R_8 = 0{,}25 \cdot X_8 = 0{,}2.$$

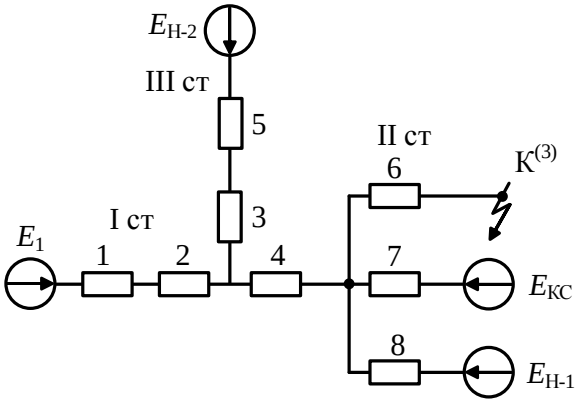


Рис. 3.6

Активные сопротивления трансформатора можно определить в соответствии с [1], пользуясь примерным для данного трансформатора соотношением *X/r* = 25.

Вычисляются ЭДС источников. Учитывается и влияние нагрузок, хотя ими можно и пренебречь как электрически удаленными от места КЗ.

$$E_1 = E_{\text{С}} = \frac{U_{\text{С}}}{U_{\text{б}\,I}} = \frac{115}{115} = 1;$$

$$E_{\text{Н}-1} = E_{\text{НГ}} \cdot \frac{U_{\text{ср}}}{U_{\text{б}\,II}} = 0{,}85 \cdot \frac{6{,}3}{6{,}6} = 0{,}81;$$

$$E_{\text{Н}-2} = 0{,}85.$$

ЭДС синхронного компенсатора принимается равной среднему значению $K_{\text{КС}}$ = 1,2, поскольку точно не задан предшествующий режим его работы. ЭДС КС не нужно пересчитывать, так как базисные и номинальные условия совпадают.

Схема преобразуется относительно точки КЗ, и вычисляются результирующие ЭДС и сопротивления:

$$X_9 = X_1 + X_2 = 0{,}151 + 0{,}134 = 0{,}285;$$

$$X_{10} = X_3 + X_5 = 0{,}078 + 1{,}08 = 1{,}158;$$

$$X_{11} = X_9 // X_{10} + X_4 = \frac{1{,}158 \cdot 0{,}285}{1{,}443} + 0 = 0{,}229;$$

$$E_{\text{Э}1} = \frac{E_1 \cdot X_{10} + E_{\text{Н}-2} \cdot X_9}{X_9 + X_{10}} = \frac{1{,}158 \cdot 1 + 0{,}285 \cdot 0{,}82}{1{,}443} = 0{,}96;$$

$$X_{12} = X_{11} // X_7 // X_8 = \frac{0{,}229 \cdot 2{,}2 \cdot 0{,}8}{0{,}229 \cdot 2{,}2 + 2{,}2 \cdot 0{,}8 + 0{,}229 \cdot 0{,}8} = 0{,}165;$$

$$X''_{\Sigma} = X_{12} + X_6 = 0{,}165 + 0{,}795 = 0{,}965;$$

$$E_{\text{Э}2} = \frac{E_{\text{КС}} \cdot X_8 + E_{\text{Н}-1} \cdot X_7}{X_8 + X_7} = \frac{1{,}2 \cdot 0{,}8 + 0{,}81 \cdot 2{,}2}{0{,}8 + 0{,}2} = 0{,}914;$$

$$E''_{\Sigma} = \frac{E_{Э1} \cdot X_{12} + E_{Э2} \cdot X_{11}}{X_{11} + X_{12}} = 0{,}947.$$

Следовательно, начальный сверхпереходный ток в месте КЗ будет

$$I'' = \frac{E''_{\Sigma}}{X''_{\Sigma}} = \frac{0{,}947}{0{,}96} = 0{,}99$$

или

$$I'' = 0{,}99 \cdot 8{,}75 = 8{,}67 \text{ кА}.$$

Остаточное напряжение на шинах в долях от базисного напряжения ступени

$$U_{\text{ост}} = I'' \cdot X_6 \cdot U_{\text{б } II} = 0{,}99 \cdot 0{,}796 \cdot 6{,}6 = 5{,}2 \text{ кВ}.$$

Ударный ток короткого замыкания можно вычислить, определив ударный коэффициент. Наиболее просто это можно сделать методом экстремальных частот, вычислив относительно места КЗ R_{Σ} при всех X_{Σ}, равных нулю:

$$R_9 = R_1 + R_2 = 0{,}107;$$

$$R_{10} = R_3 + R_5 = 0{,}295;$$

$$R_{11} = R_9 // R_{10} = 0{,}079;$$

$$R_{12} = R_{11} // R_7 // R_8 = \frac{0{,}079 \cdot 0{,}18 \cdot 0{,}218}{0{,}079 \cdot 0{,}18 + 0{,}079 \cdot 0{,}218 + 0{,}218 \cdot 0{,}18} = \\ = 0{,}044;$$

$$R_{\Sigma} = R_{12} + R_6 = 0{,}044 + 0{,}0294 = 0{,}0734.$$

Соотношению $X_{\Sigma}/R_{\Sigma} = 0{,}965/0{,}0734 = 13{,}2$ соответствует $T_a = 13{,}2/314 = 0{,}042$ с.

Следовательно, $k_{\text{у}} = 1{,}78$ и ударный ток

$$i_{\text{у}} = k_{\text{у}}\sqrt{2} \cdot I'' = 1{,}78 \cdot \sqrt{2} \cdot 8{,}67 = 21{,}9 \text{ кА}.$$

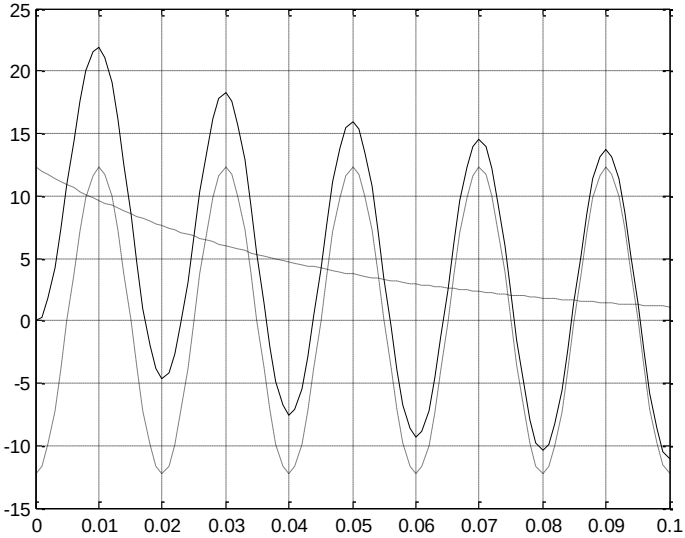


Рис. 3.7

На рис. 3.7 представлена осциллограмма тока короткого замыкания в точке $К^{(3)}$, а также периодическая и апериодическая составляющие этого тока.

ПРИМЕР 5

Для сети на рис. 3.8 найти начальные сверхпереходные ток $К^{(3)}$ в точках $К_1^{(3)}$ и $К_2^{(3)}$ и ударные токи в этих же точках, сравнив их, если известны параметры элементов сети:

система С: $S_{\text{С}} = \infty$; $U_{\text{С}} = 118$ кВ; синхронные двигатели СД-1: $P = 5$ МВт; $\cos\varphi = 0{,}9$; $X_d'' = 0{,}2$; $X_{\text{Д}}/R_{\text{Д}}$=25; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; СД-2: $P = 2$ МВт; $\cos\varphi = 0{,}9$; $X_d'' = 0{,}2$; $X_{\text{Д}}/R_{\text{Д}}$=15; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; трансформатор

Т: $S_{\text{Т}} = 16$ МВА; $u_{\text{к}}\% = 10{,}5\%$; $k_{\text{Т}}$=115/6,6; $X_{\text{Т}}/R_{\text{Т}}$=12; линия Л: l=50 км; $X_{0,\text{Л}} = 0{,}4$ Ом/ км; $R_{0,\text{Л}} = 0{,}27$ Ом/км; кабель КЛ: l=1 км; $X_{0,\text{КЛ}} = 0{,}08$ Ом/км; $R_{0,\text{КЛ}} = 0{,}26$ Ом/км.

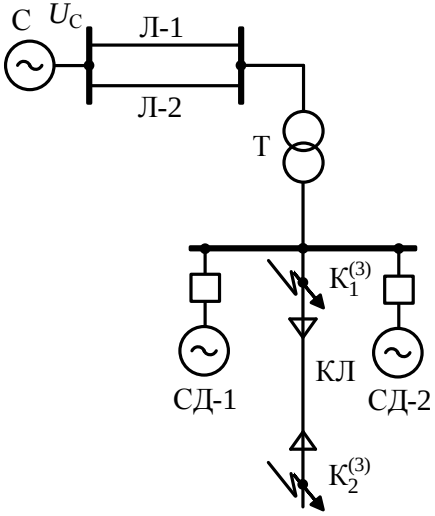


Рис. 3.8

Решение

1. Строится схема замещения (рис. 3.9).
2. Выбираются базисные условия:

$$S_{\text{б}} = 100 \text{ МВА};$$

$$U_{\text{б}\,I} = 6 \text{ кВ};\ U_{\text{б}\,II} = 6 \cdot \frac{115}{6{,}6} = 104{,}5 \text{ кВ};$$

$$I_{\text{б}\,I} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6} = 9{,}63 \text{ кА}.$$

3. Рассчитываются параметры:

$$X_{\text{С}} = 0;\ E_{\text{С}} = \frac{U_{\text{С}}}{U_{\text{б}}} = \frac{118}{104{,}5} = 1{,}13;$$

$$X_1 = X_2 = X_{1,\text{Л}} = X_{2,\text{Л}} = X_{0,\text{Л}} l \frac{S_{\text{б}}}{{U_{\text{б}\,II}}^2} = 0{,}4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{104{,}5^2} = 0{,}183;$$

$$R_{1,Л} = R_{2,Л} = 0{,}124;$$

$$X_З = X_Т = \frac{u_к\%}{100}\frac{S_б}{S_{ном}}\left(\frac{U_{ном}}{U_{б\,II}}\right)^2 = \frac{10{,}5}{100}\cdot\frac{100}{16}\cdot\left(\frac{115}{104{,}5}\right)^2 = 0{,}794;$$

$$R_З = 0{,}066;$$

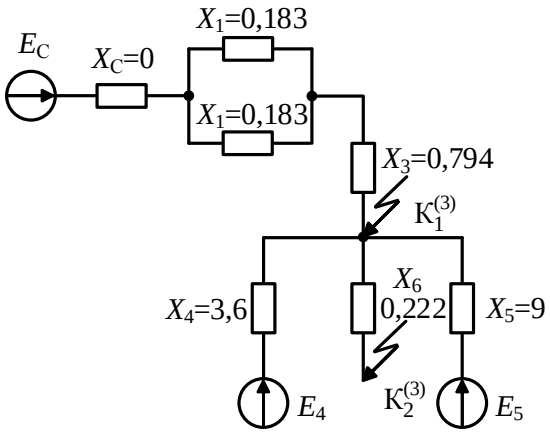


Рис. 3.9

$$X_4 = X_{СД-1} = X_d'' \frac{S_б}{S_{ном}}\left(\frac{U_{ном}}{U_{б\,I}}\right)^2 = 0{,}2\cdot\frac{100}{5/0{,}9}\cdot\left(\frac{6}{6}\right)^2 = 3{,}6;$$

$$R_4 = 0{,}144;$$

$$X_5 = X_{СД-2} = 0{,}2\cdot\frac{100}{2/0{,}9}\cdot\left(\frac{6}{6}\right)^2 = 9; R_5 = 0{,}6;$$

$$X_6 = X_{КЛ} = X_{0,КЛ}\cdot l\cdot\frac{S_б}{U_{б\,I}{}^2} = 0{,}08\cdot 1\cdot\frac{100}{6^2} = 0{,}222;$$

$$R_6 = 0{,}722.$$

Предполагается, что СД работают с $U_{ном}$ и $I_{ном}$ в режиме перевозбуждения. Так как СМ обратимы, то такие же параметры можно принять и для равных по мощности генераторов. Например, можно предположить, что это машины небольшой ГАЭС.

Ясно, что

$$E_q'' = E_4'' = E_5'' = \sqrt{(U\cos\varphi)^2 + (U\sin\varphi + X_d'' I)^2} =$$

$$= \sqrt{(1\cdot 0{,}9)^2 + (1\cdot 0{,}435 + 0{,}2\cdot 1)^2} = 1{,}1.$$

4. Упрощается схема относительно узлов $К_1^{(3)}$ и $К_2^{(3)}$:

$$X_{11} = \frac{X_1}{2} = \frac{0{,}183}{2} = 0{,}091;$$

$$X_{12} = X_{11} + X_3 = 0{,}091 + 0{,}794 = 0{,}885;$$

$$X_{13} = X_4 // X_5 = \frac{3{,}6\cdot 9}{3{,}6+9} = 2{,}57.$$

Получается упрощенная схема на рис. 3.10.

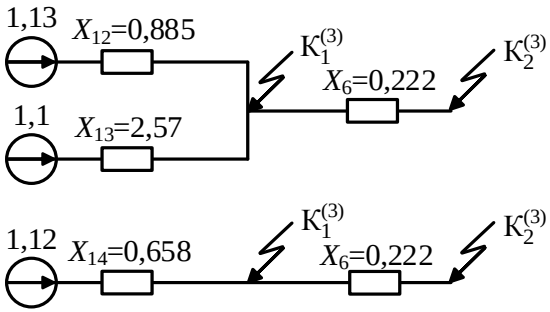


Рис. 3.10

Коль скоро E_4 и E_5 равны, то $E_{Э4,5} = 1{,}1$. Далее находятся

$$X_{14} = X_{13} // X_{12} = 0{,}658;$$

$$E_Э = E_С // E_{Э4,5} = \frac{1{,}13\cdot 2{,}57 + 1{,}1\cdot 0{,}885}{2{,}57 + 0{,}885} = 1{,}12.$$

5. Вычисляется ток в $К_1^{(3)}$:

$$I_0'' = \frac{E_q''}{X_d'' + X_{вн}};$$

$$I''_{0,К_1^{(3)}} = \frac{1{,}12}{0{,}658} = 1{,}7;\ I''_{К_1^{(3)}} = 1{,}7\cdot 9{,}63 = 16{,}38 \text{ кА},$$

где $I_\delta = 9{,}63$ кА.

Определяются

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{у}} I_0'';$$

$$T_{a\text{э}} = \frac{X_{\Sigma_{R_i=0}}}{\omega R_{\Sigma_{X_i=0}}};$$

$$T_{a\text{э}} = \frac{0{,}685}{314 \cdot 0{,}06} = 0{,}0349 \text{ с};$$

$$k_{\text{у}} = 1 + e^{-\frac{0{,}01}{T_a}} = 1 + e^{-\frac{0{,}01}{0{,}0349}} = 1{,}73;$$

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \cdot 1{,}73 \cdot 16{,}38 = 39{,}95 \text{ кА}.$$

6. Рассчитываются токи в $К_2^{(3)}$:

Поскольку $R_{\text{КЛ}} = 0{,}26 \cdot (100/6^2) = 0{,}722$ и $R_\Sigma > \frac{1}{3} X_\Sigma$, то его нужно учитывать обязательно.

Вычисляется модуль полного сопротивления

$$z = \sqrt{0{,}722^2 + (0{,}658 + 0{,}222)^2} = 1{,}12.$$

Тогда ток

$$I''_{0,К_2^{(3)}} = \frac{1{,}12}{1{,}12} = 1;\ k_{\text{у}} = 1{,}1.$$

$$I_{\text{уд max}} = i_{\text{уд } К_2^{(3)}} = \sqrt{2} \cdot 1{,}1 \cdot 9{,}63 = 14{,}93 \text{ кА},$$

т.е. он в 2,68 раз меньше тока в начале кабеля.

7. Напряжение на шинах будет $U_{\text{ШЛ}} = \underset{*}{U}_{\text{Ш}} U_{\delta I}$;

$$\underset{*}{U}_{\text{Ш}} = \underset{*}{z}_{\text{КЛ}} \underset{*}{I_0''} = \sqrt{0{,}222^2 + 0{,}722^2} \cdot 1 \cdot 6 = 4{,}52 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{ШЛ}} = \underset{*}{U}_{\text{ш}} U_{\delta\text{Л}}$$

Примечание

Подключение нагрузки, пуск (самозапуск) электродвигателей можно рассматривать как трехфазное короткое замыкание за пусковыми сопротивлениями данных элементов энергосистемы. Для СД пусковое сопротивление равно X_d'' и, следовательно, пусковой ток будет равен:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{E_{\text{С}}}{X_{12} + X_{13}} = \frac{1{,}13}{0{,}885 + 2{,}57} = 0{,}327 \text{ о. е.};$$

$$I_{\text{пуск}} = 0{,}327 \cdot 9{,}63 = 3{,}147 \text{ кА}.$$

Поскольку $X_{\Sigma} = 3{,}455;\ R_{\Sigma} = 0{,}244$, то

$$T_a = \frac{X_{\Sigma(R_i=0)}}{\omega \cdot R_{\Sigma(X_i=0)}} = \frac{3{,}455}{314 \cdot 0{,}244} = 0{,}045 \text{ с}, k_{\text{у}} = 1{,}8.$$

Следовательно, при пуске обоих двигателей ударный ток будет

$$I_{\text{уд max}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{у}} \cdot I_{\text{пуск}} = \sqrt{2} \cdot 1{,}8 \cdot 3{,}147 = 7{,}99 \text{ кА},$$

а остаточное напряжение на шинах

$$U_{\text{ост}} = I_{\text{пуск}} \cdot X_{13} \cdot U_{\text{б}\,I} = 0{,}327 \cdot 2{,}57 \cdot 6 = 5{,}04 \text{ кВ}.$$

4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

4.1. Токи и напряжения в месте несимметричного короткого замыкания

Условимся считать, что для заданной точки короткого замыкания схемы отдельных последовательностей уже приведены к простейшему виду и нам известны результирующая ЭДС источников питания $\dot{E}_1$ (фазное значение) и результирующие сопротивления всей цепи короткого замыкания $Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$.

Кроме того, для упрощения дальнейших выкладок условимся рассматривать короткое замыкание на некотором условном ответвлении, сопротивления фаз которого равны нулю. Токи в фазах этого ответвления являются токами в месте короткого замыкания. За положительное направление токов принимается направление их в точку короткого замыкания.

I. Двухфазное короткое замыкание. Если двухфазное короткое замыкание происходит между фазами *B* и *C* (рис. 4.1, *а*), то для ответвления короткого замыкания можно написать очевидные граничные условия:

$$\dot{I}_{\text{кА}}^{(2)} = 0;\ \dot{I}_{\text{кВ}}^{(2)} = -\dot{I}_{\text{кС}}^{(2)};\ \dot{U}_{\text{кВ}}^{(2)} - \dot{U}_{\text{кС}}^{(2)} = 0. \qquad (4.1)$$

Коль скоро двухфазное короткое замыкание является уравновешенным, то

$$\dot{I}_{\text{к0}} = 0;\ \dot{U}_{\text{к0}} = 0.$$

Приняв фазу *A* за расчетную, можно, руководствуясь формулами для симметричных составляющих, записать

$$\dot{I}_{\text{кА}}^{(2)} = \dot{I}_{\text{кА1}}^{(2)} + \dot{I}_{\text{кА2}}^{(2)} = 0,$$

откуда получается первое следствие из граничных условий

$$\dot{I}_{\text{кА1}}^{(2)} = -\dot{I}_{\text{кА2}}^{(2)}. \qquad (4.2)$$

Используя формулы для симметричных составляющих и учитывая, что $\dot{U}_{\text{кВ}}^{(2)} = \dot{U}_{\text{кС}}^{(2)}$, легко установить второе следствие, т.е. равенство симметричных составляющих напряжения в месте короткого замыкания

$$\dot{U}_{\text{кА1}}^{(2)} = \dot{U}_{\text{кА2}}^{(2)}. \tag{4.3}$$

В соответствии с этим можно записать

$$E_{1\Sigma} - \dot{I}_{\text{кА1}}^{(2)} Z_{1\Sigma} = -\dot{I}_{\text{кА2}}^{(2)} Z_{2\Sigma} = \dot{I}_{\text{кА1}}^{(2)} Z_{2\Sigma},$$

откуда можно найти

$$\dot{I}_{\text{кА1}}^{(2)} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma}}. \tag{4.4}$$

Теперь нетрудно определить токи короткого замыкания в поврежденных фазах:

$$\dot{I}_{\text{кВ}}^{(2)} = a^2 \dot{I}_{\text{кА1}}^{(2)} + a\dot{I}_{\text{кА2}}^{(2)} = (a^2 - a)\dot{I}_{\text{кА1}}^{(2)} = -j\sqrt{3}\dot{I}_{\text{кА1}}^{(2)};$$

$$\dot{I}_{\text{кС}}^{(2)} = j\sqrt{3}\dot{I}_{\text{кА1}}^{(2)}.$$

Таким образом, абсолютная величина тока короткого замыкания в поврежденных фазах, если пренебречь активными сопротивлениями, будет

$$I_{\text{кА}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma}}. \tag{4.5}$$

Используя полученные соотношения, можно построить векторные диаграммы токов и напряжений в месте короткого замыкания (рис. 4.1 *б, в*). Каждая диаграмма снабжена собственной системой координатных осей.

Выше было показано, что при двухфазном коротком замыкании

$$\dot{U}_{\text{кА1}}^{(2)} = \dot{U}_{\text{кА2}}^{(2)}.$$

Это позволяет соединить концы схем прямой и обратной последовательностей, как это показано на (рис. 4.1, *г*), в результате чего получается так называемая комплексная схема для двухфазного короткого замыкания, полностью отвечающая характеризующим его соотношениям, рассмотренным ранее.

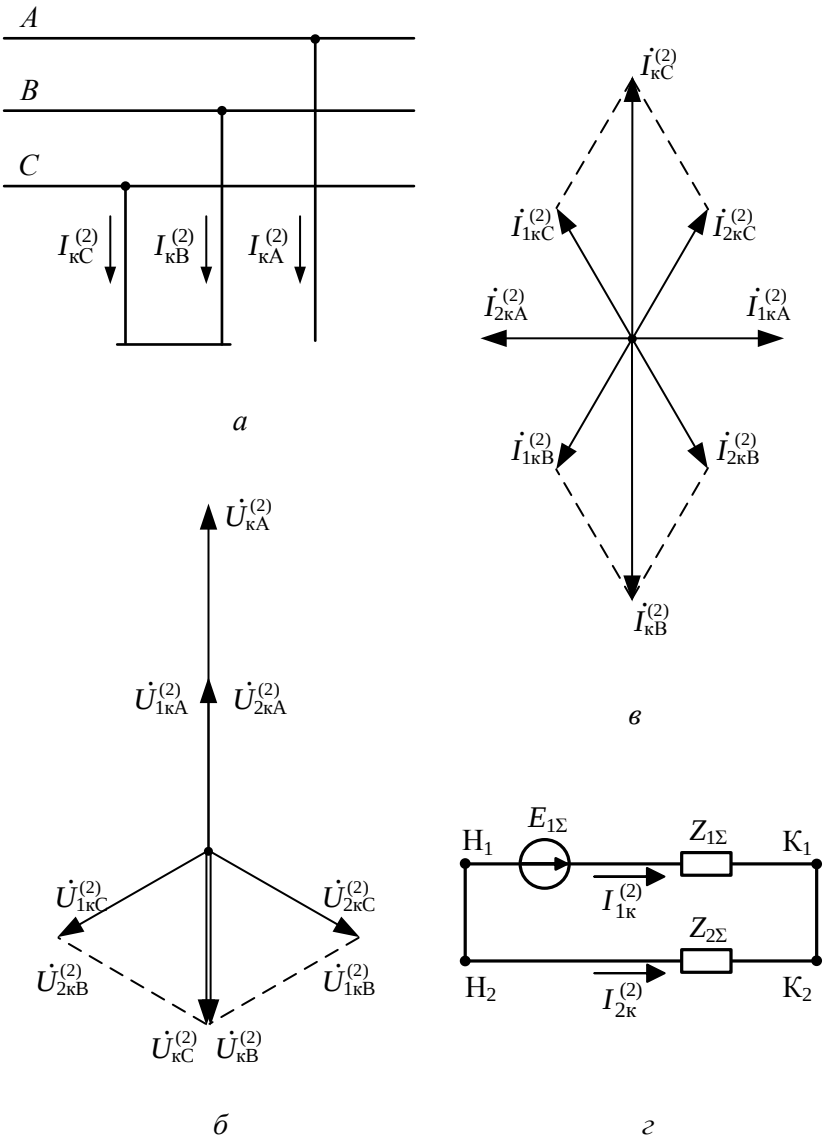

A
B
C
$I_{кC}^{(2)}$
$I_{кB}^{(2)}$
$I_{кA}^{(2)}$
а
$\dot{I}_{кC}^{(2)}$
$\dot{I}_{1кC}^{(2)}$
$\dot{I}_{2кC}^{(2)}$
$\dot{I}_{2кA}^{(2)}$
$\dot{I}_{1кA}^{(2)}$
$\dot{I}_{1кB}^{(2)}$
$\dot{I}_{2кB}^{(2)}$
$\dot{I}_{кB}^{(2)}$
в
$\dot{U}_{кA}^{(2)}$
$\dot{U}_{1кA}^{(2)}$
$\dot{U}_{2кA}^{(2)}$
$\dot{U}_{1кC}^{(2)}$
$\dot{U}_{2кC}^{(2)}$
$\dot{U}_{2кB}^{(2)}$
$\dot{U}_{1кB}^{(2)}$
$\dot{U}_{кC}^{(2)}$
$\dot{U}_{кB}^{(2)}$
б
$E_{1\Sigma}$
$Z_{1\Sigma}$
H_1
K_1
$I_{1к}^{(2)}$
$Z_{2\Sigma}$
H_2
K_2
$I_{2к}^{(2)}$
г

Рис. 4.1

II. Однофазное короткое замыкание на землю. Пусть замкнута на землю фаза *A* (рис. 4.2, *а*). Тогда нетрудно записать граничные условия для этого вида КЗ:

$$\dot{I}_{\text{кВ}}^{(1)} = 0;\ \dot{I}_{\text{кС}}^{(1)} = 0;\ \dot{U}_{\text{кА}}^{(1)} = 0. \qquad (4.6)$$

Приняв фазу *A* за расчетную, можно, используя соотношения для симметричных составляющих, записать следствия из граничных условий:

$$\dot{I}_{\text{кА1}}^{(1)} = \dot{I}_{\text{кА2}}^{(1)} = \dot{I}_{\text{кА0}}^{(1)} = \frac{1}{3}\dot{I}_{\text{кА}}^{(1)};$$
$$\dot{U}_{\text{кА}}^{(1)} = \dot{U}_{\text{кА1}}^{(1)} + \dot{U}_{\text{кА2}}^{(1)} + \dot{U}_{\text{кА0}}^{(1)} = 0. \qquad (4.7)$$

Используя полученные следствия и уравнения схем замещения последовательностей, можно определить ток и напряжение прямой последовательности в месте однофазного КЗ:

$$\dot{I}_{\text{кА1}}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}, \dot{U}_{\text{кА1}}^{(1)} = \dot{I}_{\text{кА1}}^{(1)}(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}).$$

Абсолютная величина тока КЗ в поврежденной фазе при R_i=0 всех ветвей будет:

$$I_{\text{к}}^{(1)} = \frac{3E_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}. \qquad (4.8)$$

На основании полученных соотношений можно построить векторные диаграммы токов и напряжений в месте короткого замыкания (рис.4.2 *б, в*).

Комплексная схема, удовлетворяющая всем соотношениям при однофазном коротком замыкании, приведена на рис. 4.2, *г*.

III. Двухфазное короткое замыкание на землю. Пусть происходит перекрытие фаз *B* и *C* с одновременным замыканием на землю в той же точке (рис. 4.3, *а*). Это короткое замыкание характеризуется следующими граничными условиями:

$$\dot{I}_{\text{кА}}^{(1,1)} = 0;\ \dot{U}_{\text{кВ}}^{(1,1)} = 0;\ \dot{U}_{\text{кС}}^{(1,1)} = 0, \qquad (4.9)$$

следствиями из которых являются уравнения:

$$\dot{I}_{\text{кА1}}^{(1,1)} + \dot{I}_{\text{кА2}}^{(1,1)} + \dot{I}_{\text{кА0}}^{(1,1)} = 0;\ \dot{U}_{\text{кА1}}^{(1,1)} = \dot{U}_{\text{кА2}}^{(1,1)} = \dot{U}_{\text{кА0}}^{(1,1)}. \qquad (4.10)$$

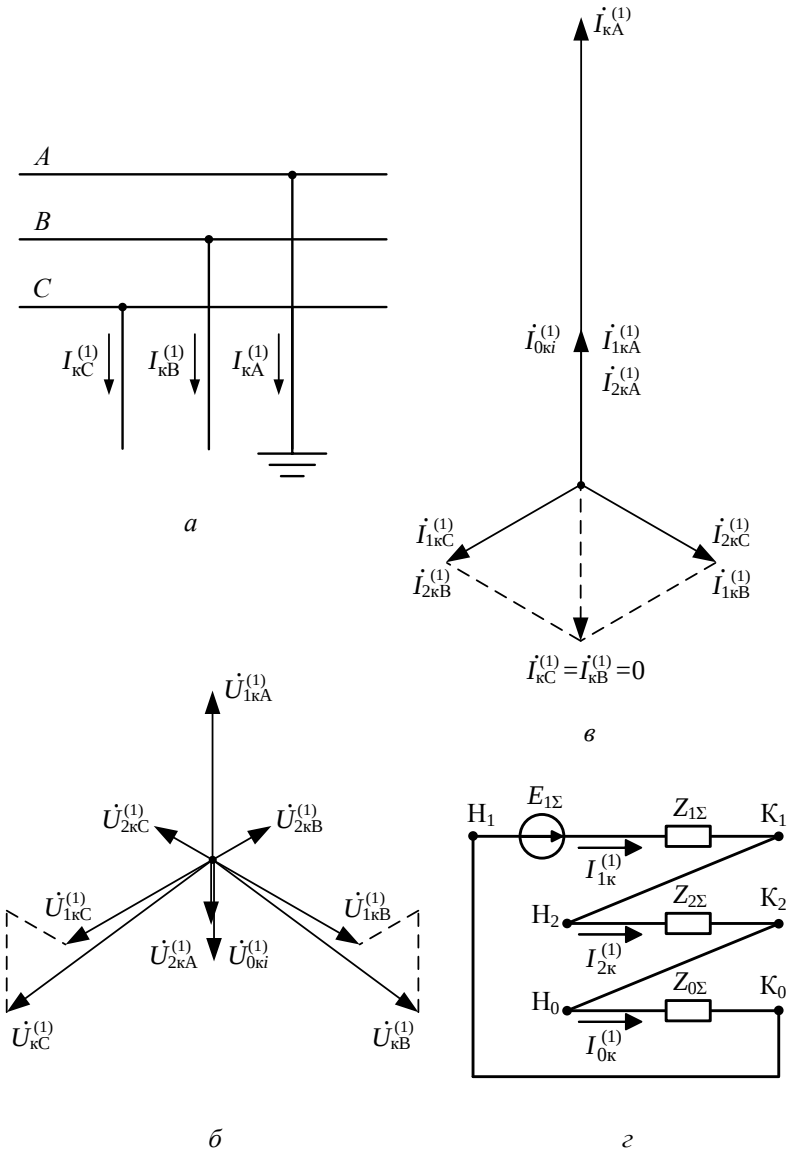

A
B
C
$I_{кC}^{(1)}$
$I_{кB}^{(1)}$
$I_{кA}^{(1)}$
а
$\dot{I}_{кA}^{(1)}$
$\dot{I}_{0кi}^{(1)}$
$\dot{I}_{1кA}^{(1)}$
$\dot{I}_{2кA}^{(1)}$
$\dot{I}_{1кC}^{(1)}$
$\dot{I}_{2кC}^{(1)}$
$\dot{I}_{2кB}^{(1)}$
$\dot{I}_{1кB}^{(1)}$
$\dot{I}_{кC}^{(1)}=\dot{I}_{кB}^{(1)}=0$
в
$\dot{U}_{1кA}^{(1)}$
$\dot{U}_{2кC}^{(1)}$
$\dot{U}_{2кB}^{(1)}$
$\dot{U}_{1кC}^{(1)}$
$\dot{U}_{1кB}^{(1)}$
$\dot{U}_{2кA}^{(1)}$
$\dot{U}_{0кi}^{(1)}$
$\dot{U}_{кC}^{(1)}$
$\dot{U}_{кB}^{(1)}$
б
H_1
$E_{1\Sigma}$
$Z_{1\Sigma}$
K_1
$I_{1к}^{(1)}$
H_2
$Z_{2\Sigma}$
K_2
$I_{2к}^{(1)}$
H_0
$Z_{0\Sigma}$
K_0
$I_{0к}^{(1)}$
г

Рис. 4.2

Находим ток и напряжение прямой последовательности в месте короткого замыкания:

$$\dot{I}_{к1}^{(1,1)} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + \dfrac{Z_{2\Sigma}Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}}, \dot{U}_{к1}^{(1,1)} = \dot{I}_{к1}^{(1,1)} \cdot \frac{Z_{2\Sigma}Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}.$$

Абсолютное значение токов в поврежденных фазах можно определить с помощью тока прямой последовательности, используя коэффициент $m^{(1,1)}$, который находится приближенно в предположении, что активные сопротивления элементов сети R_i=0:

$$I_{к}^{(1,1)} = m^{(1,1)} I_{к1}^{(1,1)} = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}\, I_{к1}^{(1,1)}. \qquad (4.11)$$

Полное напряжение неповрежденной фазы в месте короткого замыкания

$$\dot{U}_{кА}^{(1,1)} = 3\dot{U}_{кА1}^{(1,1)}.$$

Ток, возвращающийся через землю, равен трем токам нулевой последовательности в точке короткого замыкания. Векторные диаграммы токов и напряжений показаны для данного вида КЗ на рис. 4.3, *б, в.* Из следствий получается комплексная схема замещения, приведенная на рис. 4.3, *г.*

4.2. Правило эквивалентности прямой последовательности

Из обобщенных формул для определения токов при несимметричных коротких замыканиях видно, что абсолютная величина тока при любом виде короткого замыкания пропорциональна току прямой последовательности в месте короткого замыкания и может быть определена по формуле:

$$I_{к}^{(n)} = m^{(n)} I_{к1}^{(n)}, \qquad (4.12)$$

где $m^{(n)}$ коэффициент пропорциональности, зависящий от вида короткого замыкания; $I_{к1}^{(n)}$ – ток прямой последовательности для рассматриваемого вида короткого замыкания.

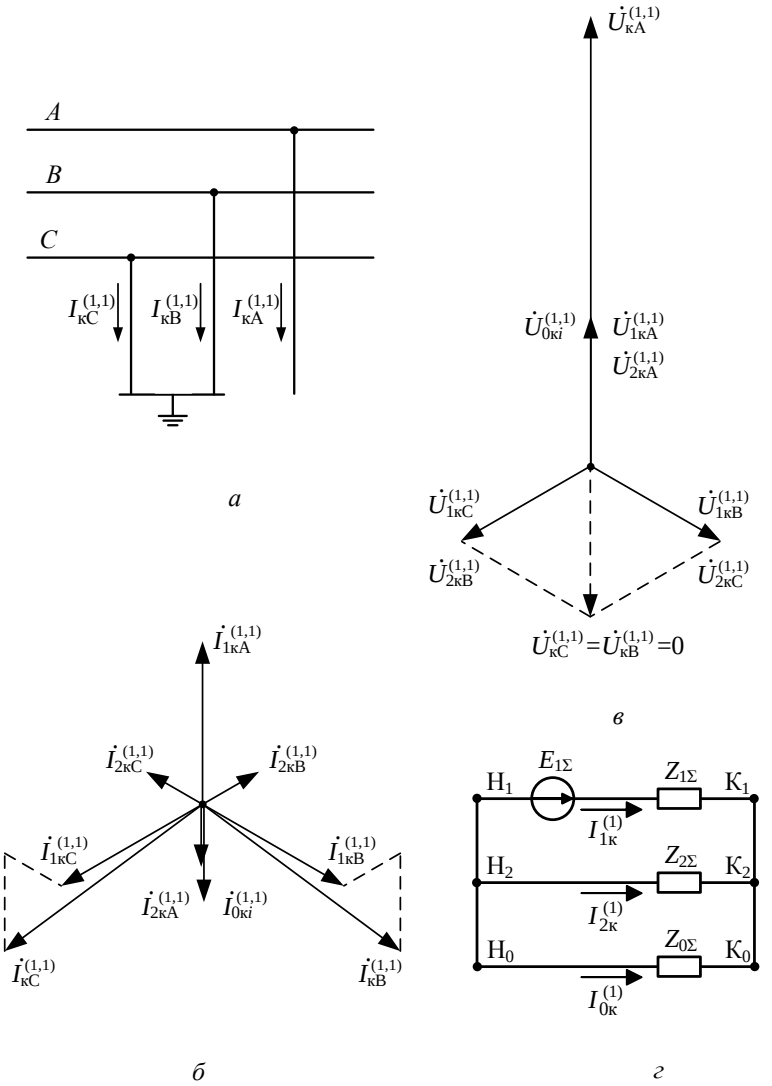

A
B
C
$I_{кC}^{(1,1)}$
$I_{кB}^{(1,1)}$
$I_{кA}^{(1,1)}$
а
$\dot{U}_{кA}^{(1,1)}$
$\dot{U}_{0кi}^{(1,1)}$
$\dot{U}_{1кA}^{(1,1)}$
$\dot{U}_{2кA}^{(1,1)}$
$\dot{U}_{1кC}^{(1,1)}$
$\dot{U}_{1кB}^{(1,1)}$
$\dot{U}_{2кB}^{(1,1)}$
$\dot{U}_{2кC}^{(1,1)}$
$\dot{U}_{кC}^{(1,1)}=\dot{U}_{кB}^{(1,1)}=0$
в
$\dot{I}_{1кA}^{(1,1)}$
$\dot{I}_{2кC}^{(1,1)}$
$\dot{I}_{2кB}^{(1,1)}$
$\dot{I}_{1кC}^{(1,1)}$
$\dot{I}_{1кB}^{(1,1)}$
$\dot{I}_{2кA}^{(1,1)}$
$\dot{I}_{0кi}^{(1,1)}$
$\dot{I}_{кC}^{(1,1)}$
$\dot{I}_{кB}^{(1,1)}$
б
$E_{1\Sigma}$
$Z_{1\Sigma}$
H_1
K_1
$I_{1к}^{(1)}$
H_2
$Z_{2\Sigma}$
K_2
$I_{2к}^{(1)}$
H_0
$Z_{0\Sigma}$
K_0
$I_{0к}^{(1)}$
г

Рис. 4.3

Величина тока прямой последовательности в месте короткого замыкания определяется по общему выражению:

$$\dot{I}_{к1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{доп}^{(n)}}, \quad (4.13)$$

где $Z_{доп}^{(n)}$ – дополнительное сопротивление, вводимое в схему прямой последовательности, величина которого зависит от вида кроткого замыкания.

Значения $Z_{доп}^{(n)}$ и $m^{(n)}$ приведены в табл. 1. Полученные и обобщенные выше формулы позволили Н.Н. Щедрину впервые сформулировать правило эквивалентности прямой последовательности. Оно звучит так: ток прямой последовательности любого несимметричного короткого замыкания определяется как ток при некотором условном трехфазном коротком замыкании за дополнительным сопротивлением $Z_{доп}^{(n)}$. При этом ток короткого замыкания вычисляется по току прямой последовательности и коэффициенту $m^{(n)}$ по формуле (4.12).

Таблица 1 - Значения $Z_{доп}^{(n)}$ и $m^{(n)}$ для различных видов короткого замыкания

Вид повреждения	Индекс короткого замыкания (n)	$Z_{доп}^{(n)}$	$m^{(n)}$
Трехфазное КЗ	(3)	0	1
Двухфазное КЗ	(2)	$Z_{2\Sigma}$	$\sqrt{3}$
Однофазное КЗ	(1)	$Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}$	3
Двухфазное КЗ на землю	(1,1)	$\frac{Z_{2\Sigma} \cdot Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}$	$\sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$

Можно отметить, что $Z_{доп}^{(n)}$ в рассматриваемой точке остается неизменной для всего процесса короткого замыкания. Таким образом, сформулированное правило эквивалентности прямой последовательности позволяет перенести на расчет

несимметричных коротких замыканий все методы, справедливые и применяемые для расчета трехфазного короткого замыкания.

4.3. Составление схем замещения различных последовательностей

В случае применения метода симметричных составляющих к расчету продольной и поперечной несимметрии первоочередным шагом является составление схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. При этом возможны два варианта составления схем. В первом варианте составляются отдельные, не связанные друг с другом схемы последовательностей, по которым находят результирующие сопротивления и ЭДС (только в схеме прямой последовательности) относительно места несимметрии. Второй вариант основан на построении комплексных схем замещения, в которые явно не вводятся напряжения симметричных составляющих в месте несимметрии, а схемы отдельных последовательностей объединяются друг с другом соответствующим образом.

Схема прямой последовательности составляется точно также, как и схема замещения при расчете симметричного режима или трехфазного короткого замыкания. В зависимости от требований к точности расчета сопротивления всех элементов определяются с учетом действительных коэффициентов трансформации или приближенно по средним номинальным значениям напряжений в относительных или именованных единицах.

Коль скоро пути циркуляции токов обратной последовательности те же, что и токов прямой последовательности, то схема обратной последовательности по конфигурации (структуре) аналогична схеме прямой последовательности. Ее отличие состоит в том, что в ней отсутствуют (равны нулю) ЭДС всех генерирующих ветвей.

Кроме того, предполагается, что сопротивления обратной последовательности электрических машин и нагрузок постоянны и не зависят от вида и условий возникшей несимметрии и времени переходного процесса.

Пути циркуляции токов нулевой последовательности значительно отличаются от путей, по которым проходят токи прямой и обратной последовательностей, поскольку токи нулевой последовательности в фазах представляют собой разветвления однофазного тока, который возвращается к месту несимметрии через землю и параллельные ей цепи. Поэтому конфигурация (структура) схемы нулевой последовательности существенно иная. Ее во многом определяют соединения обмоток трансформаторов и автотрансформаторов и местоположение заземленных нейтралей. Для циркуляции тока нулевой последовательности при замыкании на землю необходима, по меньшей мере, еще хотя бы одна заземленная точка (нейтраль). При большом числе заземленных нейтралей возникает множество параллельных контуров, по которым протекают токи нулевой последовательности. Сопротивления, через которые заземляются нейтрали генераторов, двигателей, нагрузок, трансформаторов, должны вводиться в схему замещения нулевой последовательности утроенной величиной. Это обусловлено тем, что схема замещения составляется для одной фазы и требуется соблюсти выполнение закона Кирхгофа, поскольку через сопротивления нейтралей протекают токи всех трех фаз.

Составление схем замещения прямой и обратной последовательностей можно начинать из любой точки исследуемой схемы. Началом этих схем принято называть точки H_1 и H_2 , в которых объединены свободные концы всех генераторных и нагрузочных ветвей, т.е. точки нулевого потенциала схем последовательностей. Концами схем прямой и обратной последовательностей называют точки K_1 и K_2, соответствующие месту несимметрии, например, $K^{(n)}$. Между этими точками и точкой нулевого потенциала прикладываются напряжения соответствующих последовательностей, возникающие в результате несимметрии. То же самое можно сказать и в отношении точек H_0 и K_0 схемы нулевой последовательности. Однако составление схемы нулевой последовательности рекомендуется начинать всегда от точки, где возникла поперечная или продольная

несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. Поскольку трансформация токов нулевой последовательности возможна только при определенных условиях, то в схему нулевой последовательности могут не входить большие части энергосистемы. Например, это все элементы сети за трансформатором с соединением его обмоток Y_0/Δ, когда напряжение нулевой последовательности приложено со стороны Y_0 . Следовательно, конфигурация схемы нулевой последовательности, как правило, существенно отличается от конфигурации схем прямой и обратной последовательностей. Кроме того, в ряде случаев, когда учитываются емкостные проводимости фаз относительно земли, появляются дополнительные пути циркуляции токов нулевой последовательности. Если нейтрали генераторов и трансформаторов не заземлены, то путь тока нулевой последовательности через емкости является единственным. Обычно емкостная проводимость вводится в схему замещения нулевой последовательности как нагрузочная ветвь.

При составлении схемы замещения нулевой последовательности некоторую трудность представляет учет взаимоиндукции между параллельными линиями, в особенности, когда на протяженном участке, например, вблизи мощных подстанций, проходит несколько магнитно-связанных линий или параллельных взаимовлияющих линий с распределенными параметрами [4]. Схемы замещения рассматриваемой совокупности линий при расчетах на ЭВМ наиболее целесообразно представлять в виде полного многоугольника. В случае параллельных линий, не имеющих общих точек по концам, в схеме каждая из вершин многоугольника, соответствующая входам участка линий, связывается отдельной ветвью с остальными вершинами. При n линиях получается схема с $2n$ входами и $в = n(2n-1)$ ветвями. Например, число ветвей для 6 или 8 линий будет характеризоваться соответственно 66 или 120 проводимостями. Исходными данными для получения параметров этих ветвей служат матричные уравнения падения напряжения на участках параллельных линий:

$$\Delta U_{\alpha} = Z_{\alpha\beta} i^{\beta},$$

где i^{β} – матрица токов линий; $Z_{\alpha\beta}$ – матрица собственных и взаимных сопротивлений ветвей.

Зная матрицу сопротивлений $Z_{\alpha\beta}$, нетрудно получить матрицу проводимостей $Y^{\beta\alpha}$, с помощью которой затем составляется схема полного многоугольника.

В дальнейшем рассматривается ряд примеров расчета несимметричных повреждений в энергосистемах.

ПРИМЕР 6

Определить, при каком возбуждении генератора напряжение прямой последовательности на его выводах (рис. 4.4) составит 80% от номинального при двухфазном КЗ в точке К. При этом условии построить векторные диаграммы токов и напряжений генератора.

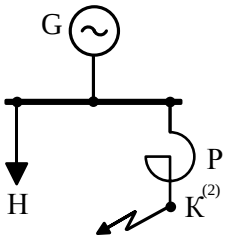


Рис. 4.4

Параметры схемы: генератор Г – $S_{Г}$ = 62,5 МВА; X_d = 1,84; $I_{f\,пр}$ = 3; $U_{Г}$ = 6,3 кВ; X_2 = 0,17; нагрузка НГ – $S_{НГ}$ = 40 МВА; реактор Р – $U_{Р}$ =6 кВ; $I_{НР}$ = 0,3 кА; $X_{Р}$ = 6%.

Решение

При базисных условиях

$$S_{б} = 62{,}5 \text{ МВА};\ U_{б} = 6{,}3 \text{ кВ};\ I_{б} = \frac{62{,}5}{\sqrt{3} \cdot 6{,}3} = 5{,}74 \text{ кА}$$

вычисляются сопротивления нагрузки и реактора:

$$X_{1НГ} = 1{,}2 \cdot \frac{S_б}{S_{ном}} = 1{,}2 \cdot \frac{62{,}5}{40} = 1{,}88;$$

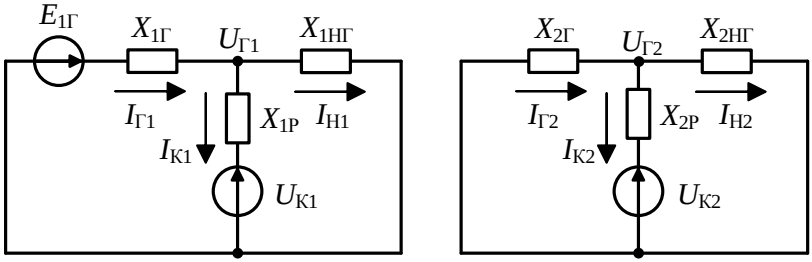
$$X_{2НГ} = 0{,}35 \cdot \frac{S_б}{S_{ном}} = 0{,}35 \cdot \frac{62{,}5}{40} = 0{,}55;$$

$$X_{1Р} = X_{2Р} = \frac{X_Р\%}{100} \cdot \frac{U_{ном}}{I_{ном}} \cdot \frac{I_б}{U_б} = \frac{6}{100} \cdot \frac{5{,}74}{0{,}3} \cdot \frac{6}{6{,}3} = 1{,}09.$$

Для нагрузки приняты средние рекомендуемые значения индуктивных сопротивлений в установившемся режиме

$$X_{1НГ} = 1{,}2;\ X_{2НГ} = 0{,}35 \text{ и } E_{1НГ} = 0; E_{2НГ} = 0.$$

Составляются схемы замещения прямой и обратной последовательностей (рис. 4.5, *а*, *б*).



а *б*

Рис. 4.5

Коль скоро задано $U_{Г1} = 0{,}8$, то ЭДС генератора E_q вводится как неизвестный параметр. Известно, что при спрямлении характеристики холостого хода генератора через точки (1,1) $E_q = I_f$. Следовательно, вычислив E_q, можно найти и искомый ток возбуждения I_f. Определяются результирующие сопротивления относительно места КЗ:

$$X_{1Σ} = X_{1Р} + X_{1Г}//X_{1НГ} = 1{,}09 + \frac{1{,}84 \cdot 1{,}88}{3{,}72} = 2{,}02;$$

$$X_{2Σ} = X_{2Р} + X_{2Г}//X_{2НГ} = 1{,}09 + \frac{0{,}55 \cdot 0{,}17}{0{,}72} = 1{,}22;$$

тогда ЭДС

$$E_{1\Sigma} = \frac{E_{1\Г} \cdot X_{1\НГ}}{X_{1\НГ} + X_{1\Г}} = \frac{1{,}88 \cdot E_{1\Г}}{1{,}88 + 1{,}84} = 0{,}505 \cdot E_{1\Г}.$$

Ток прямой последовательности в месте КЗ

$$I_{\К1} = \frac{E_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma}} = \frac{0{,}505 \cdot E_{1\Г}}{2{,}02 + 1{,}22} = 0{,}156 \cdot E_{1\Г}.$$

Напряжение прямой последовательности генератора

$$U_{\Г1} = U_{\К1} + X_{1\Р} \cdot I_{\К1}$$

или с учетом, что $U_{\К1} = X_{2\Sigma} \cdot I_{\К1}$: $U_{\Г1} = (X_{2\Sigma} + X_{1\Р})I_{\К1}$;
отсюда

$$I_{\К1} = \frac{0{,}8}{1{,}22 + 1{,}09} = 0{,}346;$$

$$E_{1\Г} = \frac{0{,}346}{0{,}156} = 2{,}22.$$

Следовательно, искомое значение тока возбуждения $E_q = I_f = 2{,}22$.

Для построения векторных диаграмм из схем замещения определяются токи генератора:

$$I_{\Г1} = I_{\К1} + I_{\Н1} = I_{\К1} + \frac{U_{\Г1}}{X_{1\НГ}} = 0{,}346 + \frac{0{,}8}{1{,}88} = 0{,}771;$$

$$I_{\Г2} = I_{\К2} + I_{\Н2} = I_{\К2} + \frac{U_{\Г2}}{X_{2\НГ}} = -0{,}346 + \frac{0{,}044}{0{,}55} = -0{,}266,$$

где $U_{\Г2} = X_{\Р2}I_{\К2} + U_{\К2} = -1{,}09 \cdot 0{,}346 + 1{,}22 \cdot 0{,}346 = 0{,}044$.

По вычисленным значениям токов и напряжений генератора строятся векторные диаграммы (рис. 4.6).

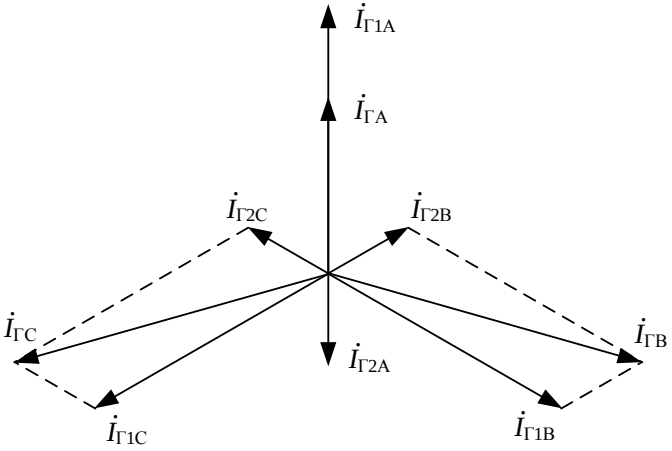
Токи и напряжения в поврежденных фазах можно вычислить с помощью симметричных составляющих фазы *A* по выражениям

$$\dot{I}_{\ГВ} = 0{,}771a^2 - 0{,}266a = -0{,}253 - j0{,}9;$$

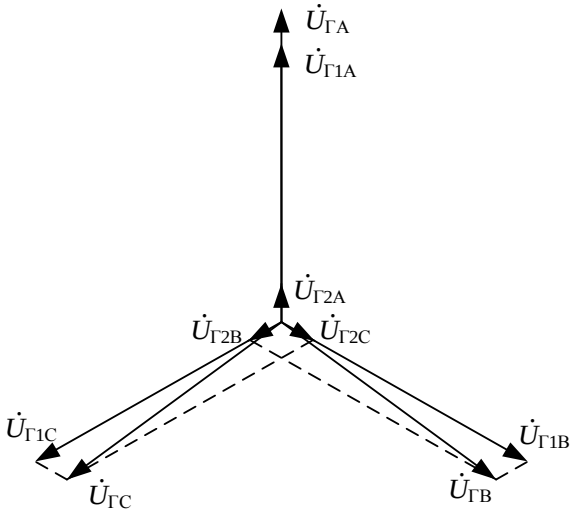
$$\dot{I}_{\ГС} = 0{,}771a - 0{,}266a^2 = -0{,}253 + j0{,}9;$$

$$\dot{U}_{\ГВ} = 0{,}8a^2 + 0{,}044a = -0{,}422 - j0{,}65;$$

$$\dot{U}_{\ГС} = 0{,}8a - 0{,}044a^2 = -0{,}422 + j0{,}65.$$


$\dot{I}_{Г1A}$
$\dot{I}_{ГA}$
$\dot{I}_{Г2C}$
$\dot{I}_{Г2B}$
$\dot{I}_{ГC}$
$\dot{I}_{ГB}$
$\dot{I}_{Г2A}$
$\dot{I}_{Г1C}$
$\dot{I}_{Г1B}$

а


$\dot{U}_{ГA}$
$\dot{U}_{Г1A}$
$\dot{U}_{Г2A}$
$\dot{U}_{Г2B}$
$\dot{U}_{Г2C}$
$\dot{U}_{Г1C}$
$\dot{U}_{Г1B}$
$\dot{U}_{ГC}$
$\dot{U}_{ГB}$

б

Рис. 4.6

ПРИМЕР 7

Найти сопротивление X_N, которое следует включить в нейтраль трансформатора Т-2 (рис. 4.7), чтобы при установившемся однофазном КЗ токи в поврежденных фазах трансформаторов на стороне высшего напряжения были равны. Для этих условий построить векторные диаграммы токов обоих трансформаторов и определить напряжение на нейтрали Т-2. Параметры схемы: генератор Г – $S_Г$ =117 МВА; $U_Г$ = 13,8 кВ; X_d = 1,51; X_2 = 0,22; $I_{f\,пр}$ = =4; трансформаторы: Т1 – $S_{ном}$ = 40,5 МВА; $k_Т$ = 115/13,8; $u_к$ = 10,5%; Т2 – $S_{ном}$ = 60 МВА; $k_Т$ = 115/13,8; $u_к$ = 10,5%.

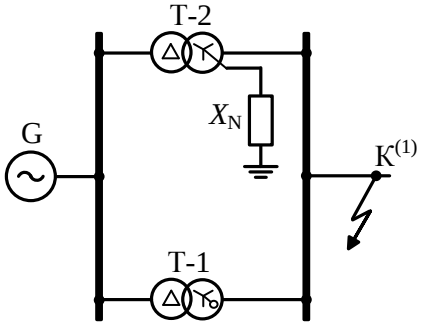


Рис. 4.7

Решение

Принимаются базисные условия $S_б = 60$ МВА; $U_б = 115$ кВ и вычисляются сопротивления элементов схемы замещения:

$$X_{1Г} = X_d \cdot \frac{S_б}{S_{ном\,Г}} = 1{,}51 \cdot \frac{60}{117} = 0{,}775;$$

$$X_{2Г} = X_2 \cdot \frac{S_б}{S_{ном\,Г}} = 0{,}22 \cdot \frac{60}{117} = 0{,}113;$$

$$X_{1,Т-1} = X_{2,Т-1} = X_{0,Т-1} = \frac{u_К}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном,Т-1}} = 0{,}105 \cdot \frac{60}{40{,}5} = 0{,}156;$$

$$X_{1,\text{т}-2} = X_{2,\text{т}-2} = X_{0,\text{т}-2} = 0{,}105.$$

Составляется комплексная схема замещения (рис. 4.8).

Для выяснения режима работы генератора находится критическое сопротивление:

$$X_{\text{кр}} = X_d \frac{I}{E_{\text{пр}} - I} = 0{,}775 \cdot \frac{1}{4-1} = 0{,}258.$$

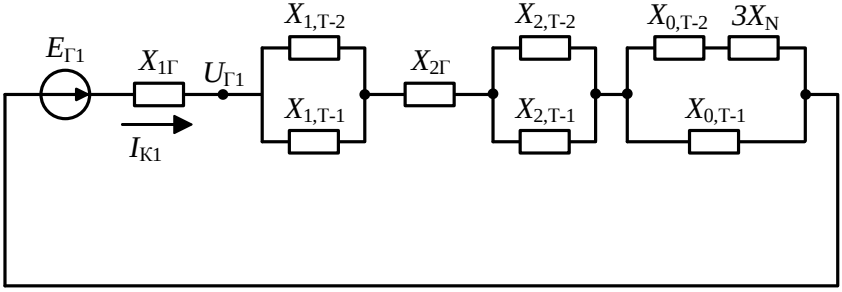


Рис. 4.8

Из комплексной схемы замещения видно, что $X_{\text{вн}} > X_{\text{кр}}$. Следовательно, можно предположить, что генератор работает в режиме номинального напряжения. Тогда принимается, что $U_{\text{Г}1} = 1$.

Приняв $I_{\text{К}1}$ в месте КЗ равным единице, можно вычислить коэффициенты распределения токов через трансформаторы:

$$I_{\text{Т}-1_{1,2}} = I_{\text{К}1} \frac{X_{1,\text{Т}-2}}{X_{1,\text{Т}-2} + X_{1,\text{Т}-1}} = \frac{0{,}105}{0{,}105 + 0{,}156} = 0{,}4;$$

$$I_{\text{Т}-2_{1,2}} = I_{\text{К}1} \frac{X_{1,\text{Т}-1}}{X_{1,\text{Т}-2} + X_{1,\text{Т}-1}} = \frac{0{,}156}{0{,}105 + 0{,}156} = 0{,}6;$$

аналогично для токов нулевой последовательности

$$I_{\text{Т}-1_0} = \frac{0{,}105 + 3X_N}{0{,}105 + 0{,}156 + 3X_N};\ I_{\text{Т}-2_0} = \frac{0{,}156}{0{,}105 + 0{,}156 + 3X_N}.$$

По условию задачи токи в поврежденной фазе трансформаторов

$$2I_{\text{Т}-1_{1,2}} + I_{\text{Т}-1_0} = 2I_{\text{Т}-2_{1,2}} + I_{\text{Т}-2_0},$$

следовательно, каждый из них равен половине полного тока однофазного КЗ в месте повреждения:

$$0{,}8 + I_{\text{Т}-1_0} = 1{,}2 + I_{\text{Т}-2_0} = \frac{I_{\text{К}}}{2} = \frac{3I_{\text{К1}}}{2} = 1{,}5,$$

так как ток $I_{\text{К1}}$ приняли равным единице.

Вычислив из последнего равенства, например, $I_{\text{Т}-2_0} = 0{,}3$, можно найти X_{N} из условия

$$0{,}3 = \frac{0{,}156}{0{,}156 + 0{,}105 + 3X_{\text{N}}};$$

откуда $X_{\text{N}} = 0{,}086$ или

$$X_{\text{N}} = 0{,}086 \cdot \frac{115^2}{60} = 19 \text{ Ом}.$$

Для построения диаграмм из комплексной схемы замещения и правила эквивалентности прямой последовательности определяются токи в трансформаторах. За особую примем фазу А.

Для Т-1:

$$I_{1\text{A}} = I_{2\text{A}} = 0{,}4 \cdot I_{\text{К1}} = 0{,}4 \cdot 2{,}88 = 1{,}15;$$

$$I_{0\text{A}} = 0{,}7 \cdot I_{\text{К1}} = 2{,}02;$$

$$\dot{I}_{\text{A}} = \dot{I}_{1\text{A}} + \dot{I}_{2\text{A}} + \dot{I}_{0\text{A}} = 2 \cdot 1{,}15 + 2{,}02 = 4{,}32.$$

Для Т-2:

$$I_{1\text{A}} = I_{2\text{A}} = 0{,}6 \cdot I_{\text{К1}} = 0{,}6 \cdot 2{,}88 = 1{,}73;\ I_{0\text{A}} = 0{,}3 \cdot I_{\text{К1}} = 0{,}86;$$

$$\dot{I}_{\text{A}} = \dot{I}_{1\text{A}} + \dot{I}_{2\text{A}} + \dot{I}_{0\text{A}} = 2 \cdot 1{,}73 + 0{,}86 = 4{,}32.$$

$$I_{\text{К1}} = \frac{E_{\text{Г1}}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} = \frac{1}{0{,}063 + 0{,}176 + 0{,}108} = 2{,}88;$$

$$X_{1\Sigma} = X_{1,\text{Т}-1}//X_{1,\text{Т}-2} = 0{,}156//0{,}105 = 0{,}063;$$

$$X_{2\Sigma} = X_{2\text{Г}} + X_{2,\text{Т}-1}//X_{2,\text{Т}-2} = 0{,}113 + 0{,}063 = 0{,}176;$$

$$X_{0\Sigma} = X_{0,\text{Т}-1}//(X_{0,\text{Т}-2} + 3X_N) = 0{,}156//(0{,}105 + 3 \cdot 0{,}086) = 0{,}108;$$

Ток однофазного КЗ:

$$I_{\text{К}} = 3 \cdot 2{,}88 = 8{,}64.$$

Для полученных результатов строятся векторные диаграммы (рис. 4.9).

Ток в нейтрали трансформатора Т-2

$$I_{\mathrm{N}_{\mathrm{T}-2}} = 3I_{0,\mathrm{T}-2} = 3 \cdot 0{,}3 I_{\mathrm{K}1} \frac{S_{\mathrm{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{б}\,I}} = 3 \cdot 2{,}88 \cdot 0{,}3 \cdot \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0{,}78 \text{ кА}.$$

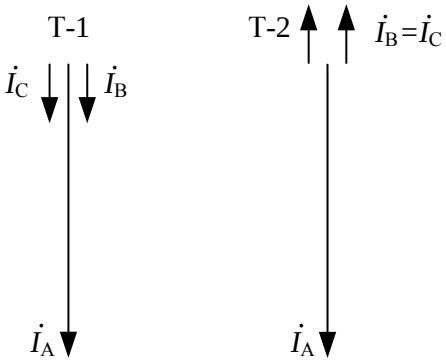


Рис. 4.9

Напряжение на нейтрали

$$U_{\mathrm{N}_{\mathrm{T}-2}} = 3I_{0,\mathrm{T}-2}X_{\mathrm{N}} = 0{,}78 \cdot 19 = 14{,}8 \text{ кВ}.$$

ПРИМЕР 8

Найти коэффициент несимметрии токов СК при $\mathrm{K}^{(2)}$. Построить векторную диаграмму напряжений в точке *m* линии (сразу за трансформатором) в схеме (рис. 4.10) для $t = 0$ с параметрами: система С – $S_{\mathrm{C}} = \infty$, $U_{\mathrm{C}} = 105$ кВ; линия Л – $l = 75$ км; $X_0 = 0{,}4$ Ом/км; синхронный компенсатор СК – $S_{\mathrm{CK}} = 100$ МВА, $U_{\text{ном}} = 11$ кВ; $X''_d = 0{,}3$; $X_2 = 0{,}45$; трансформатор Т – $S_{\text{ном}} = 125$ МВА; $k_{\mathrm{T}} = 116{,}6/11$; $u_{\mathrm{k}} = 10{,}5\%$.

Трансформатор 9-ой группы соединения. СК работает с номинальной нагрузкой, выдавая $Q_{\mathrm{CK\,ном}}$ в сеть.

Решение

Выбираются базисные условия:

$$S_{\mathrm{б}} = 100 \text{ МВА}; \; U_{\mathrm{б}\,I} = 11 \text{ кВ}; \; U_{\mathrm{б}\,II} = 116{,}6 \text{ кВ}.$$

Вычисляются:

$$X_{\text{Л}} = 0{,}4 \cdot 75 \cdot \frac{100}{116{,}6^2} = 0{,}22;\ X_{\text{Т}} = 0{,}105 \cdot \frac{100}{125} = 0{,}08;$$

$$U_{\text{С}} = \frac{U_{\text{С}}}{U_{6\,II}} = \frac{105}{116{,}6} = 0{,}9;$$

$$E_{\text{СК1}} = E''_{\text{СК}} = U + X''_d I = 1 + 0{,}3 \cdot 1 = 1{,}3.$$

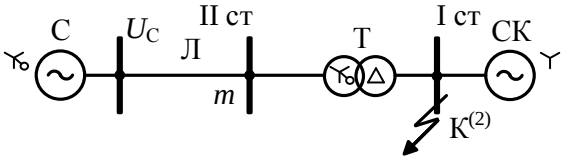


Рис. 4.10

Комплексная схема замещения имеет вид:

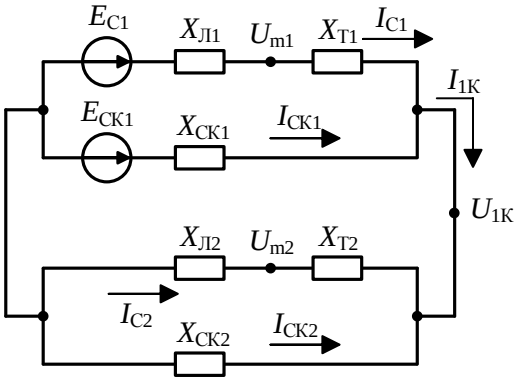


Рис. 4.11

Из схемы (рис. 4.11) находятся:

$$E_{\Sigma 1} = E_{\text{СК1}} // E_{\text{С}} = \frac{1{,}3 \cdot 0{,}3 + 0{,}9 \cdot 0{,}3}{0{,}3 + 0{,}3} = 1{,}1;$$

$$X_{1\Sigma} = (X_{\text{Л1}} + X_{\text{Т1}}) // X_{\text{СК1}} = (0{,}22 + 0{,}08) // 0{,}3 = 0{,}15;$$

$$X_{2\Sigma} = (X_{\text{Л2}} + X_{\text{Т2}}) // X_{\text{СК2}} = (0{,}22 + 0{,}08) // 0{,}45 = 0{,}18.$$

Вычисляются токи последовательностей в месте КЗ

$$I_{1К} = -I_{2К} = \frac{E_{Э1}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma}} = \frac{1{,}1}{0{,}15 + 0{,}18} = 3{,}34$$

и напряжений

$$U_{1К} = U_{2К} = X_{2\Sigma} \cdot I_{1К} = 0{,}18 \cdot 3{,}34 = 0{,}6.$$

Находятся токи в цепи СК

$$I_{1\,СК} = \frac{E_{СК1} - U_{1К}}{X_{СК1}} = \frac{1{,}3 - 0{,}6}{0{,}3} = 2{,}34;$$

$$I_{2\,СК} = \frac{E_{СК2} - U_{2К}}{X_{СК2}} = \frac{0 - 0{,}6}{0{,}45} = -1{,}34$$

и коэффициент несимметрии

$$k_{несим} = \frac{I_{2\,СК}}{I_{1\,СК}} = -\frac{1{,}34}{2{,}34} = -0{,}57.$$

Для построения диаграммы напряжений вычисляются U_{m1}, U_{m2}. Сначала определяются $I_{С1}$ и $I_{С2}$.

$$I_{С1} = \frac{E_С - U_{1К}}{X_{Л1} + X_{Т1}} = \frac{0{,}9 - 0{,}6}{0{,}3} = 1;$$

$$I_{С2} = \frac{E_С - U_{1К}}{X_{Л2} + X_{Т2}} = \frac{0 - 0{,}6}{0{,}3} = -2.$$

Тогда

$$U_{m1} = U_{1К} + I_{С1} \cdot X_{Т1} = 0{,}6 + 1 \cdot 0{,}08 = 0{,}68;$$

$$U_{m2} = U_{2К} + I_{С2} \cdot X_{Т2} = 0{,}6 - 2 \cdot 0{,}08 = 0{,}44.$$

Переход осуществляется через трансформатор с *НН* на *ВН,* и диаграммы токов и напряжений деформируются. С учетом 9-ой группы соединения обмоток трансформатора строятся диаграммы напряжений в точке *m* и токов в ветви системы (рис. 4.12).

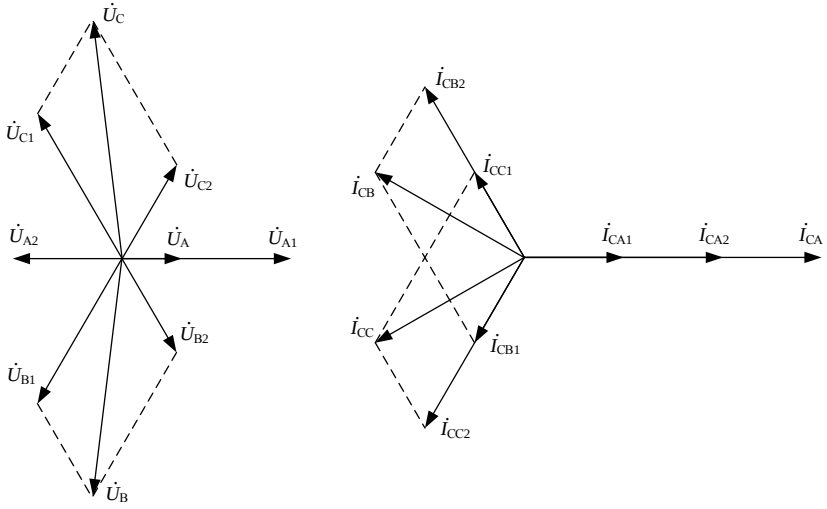


Рис. 4.12

$$U_{\text{Am}} = 0{,}22;\ U_{\text{Bm}} = U_{\text{Cm}} \approx 0{,}88;\ I_{\text{CA}} = 3;\ I_{\text{CB}} = I_{\text{CC}} \approx 1{,}7.$$

4.4. Деформация векторных диаграмм токов и напряжений при удалении от места повреждения и при переходе через трансформатор

В предыдущем примере построение диаграмм выполнено с учетом их деформации. Этот факт заслуживает более глубокого рассмотрения.

Ранее при выводе основных соотношений и расчетных выражений, характеризующих каждый вид короткого замыкания, были приведены векторные диаграммы токов и напряжений в месте короткого замыкания. Однако эти векторные диаграммы токов и напряжений деформируются при разных видах короткого замыкания по мере удаления от места повреждения и при переходе через трансформатор. Изучение данной проблемы вызывает практический интерес при проектировании и анализе работы

устройств релейной защиты и автоматизации, применяемых в современных электрических системах.

Обратимся к схеме рис. 4.13, *а*, где в конце воздушной линии предполагается тот или иной вид несимметричного короткого замыкания. На этом же рисунке показан характер эпюр напряжений отдельных последовательностей вдоль элементов. Из эпюр видно, что по мере приближения к генератору напряжение прямой последовательности возрастает и становится равным его ЭДС, а напряжения обратной и нулевой последовательностей, напротив, уменьшаются (для однофазного КЗ по абсолютной величине). При указанном на рис. 4.13, *а* соединении обмоток трансформатора напряжение нулевой последовательности за трансформатором отсутствует. Эпюры напряжений построены качественно, но из соотношения между $U_{К2}$ и $U_{К0}$ при однофазном КЗ можно сделать вывод, что $X_{0\Sigma} > X_{2\Sigma}$. Другое соотношение между сопротивлениями $X_{0\Sigma}$ и $X_{2\Sigma}$ изменит эпюры напряжений U_0 и U_2. Векторные диаграммы напряжений при удалении от точки КЗ деформируются и отличаются от диаграмм в месте повреждения. Для точек, расположенных ближе к источнику питания, эта деформация становится все больше, поскольку напряжения последовательностей изменяются и диаграмма становится полностью симметричной у источника, где сохраняется система векторов ЭДС.

Применительно к схеме, рассматриваемой на рис. 4.13, *а*, могут быть построены векторные диаграммы токов и напряжений, например, в месте двухфазного короткого замыкания и в начале линии. Очевидно, что они будут заметно отличаться друг от друга.
Чтобы найти значения симметричных составляющих в отдельных ветвях или узлах сложной системы, необходимо поочередно рассмотреть каждую схему последовательностей в отдельности и вычислить соответствующие токи и напряжения.

Фазные токи и напряжения при несимметричных режимах или процессах проще всего находить путем суммирования симметричных составляющих. При расчетах на ЭВМ результат получается автоматически. Если решение производится вручную, то целесообразно

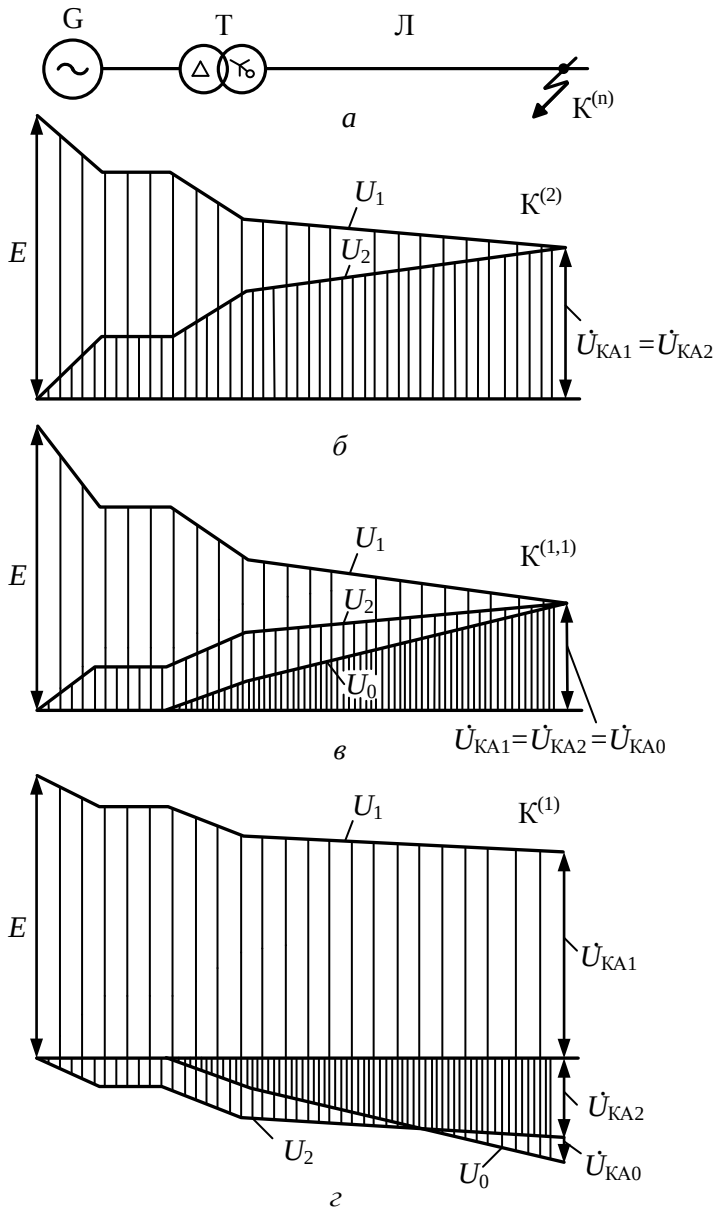

G
T
Л
K(n)
а
E
U1
U2
K(2)
U̇КА1 = U̇КА2
б
E
U1
U2
U0
K(1,1)
U̇КА1=U̇КА2=U̇КА0
в
E
U1
K(1)
U̇КА1
U̇КА2
U̇КА0
U2
U0
г

Рис. 4.13

использовать метод постепенного развертывания схем, начиная от места повреждения. Вследствие того, что схемы обратной и нулевой последовательностей являются пассивными и их элементы остаются неизменными в течение всего переходного процесса, часто представляется удобным метод коэффициентов распределения. Желательно в этом случае принимать за единицу ток каждой последовательности в месте несимметричного повреждения.

При поперечной и продольной несимметриях в одной и той же точке эти коэффициенты различны. Однако при разных видах несимметрии одного характера (т. е. или поперечной, или продольной), возникающей в одной и той же точке системы, они одинаковы. Определение фазных величин за трансформаторами представляет особый интерес. Здесь нужно иметь в виду, что токи и напряжения разных последовательностей при переходе через трансформатор изменяются не только по величине, но и по фазе в зависимости от соединения его обмоток.

Следовательно, векторные диаграммы токов и напряжений при переходе через трансформатор деформируются, и их фазные значения на стороне низшего напряжения *НН* могут существенным образом отличаться от значений на стороне высшего напряжения *ВН* трансформатора, даже если электрические величины выражены в системе относительных единиц. Эта деформация обусловлена угловыми сдвигами векторов при преобразовании и определяется соответственно группой соединения обмоток трансформатора. Наиболее простые соотношения получаются для трансформаторов, имеющих соединение обмоток по 12-й группе *Y/Y*-12, так как в этом случае угловые сдвиги электрических величин вообще отсутствуют. Наибольший интерес представляют трансформаторы с нечетными группами соединения Y/Δ и, в частности, широко применяемые трансформаторы 11-й группы соединения ($Y/\Delta - 11$).

Группу соединения трансформатора нетрудно определить или по схеме соединения его обмоток, или по векторным диаграммам фазных величин. Все эти вопросы будут рассмотрены на примере

трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta - 11$, представленного схематично на рис. 4.14.

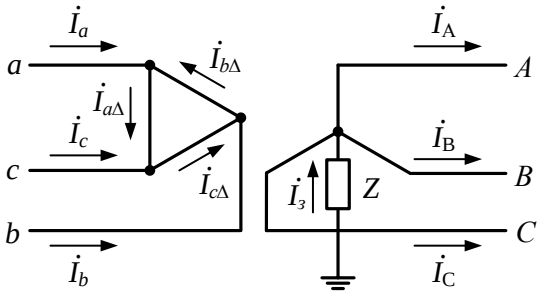


Рис. 4.14

Если предположить, что известно число витков фазных обмоток W_Y и W_Δ, то линейный коэффициент трансформации будет

$$K_\text{T} = \sqrt{3}\frac{W_Y}{W_\Delta}.$$

При известных фазных токах на высшей стороне трансформатора можно рассчитать фазные токи в обмотках, соединенных в «треугольник»:

$$\dot{I}_{\Delta a} = \frac{W_Y}{W_\Delta}\dot{I}_\text{A};\ \dot{I}_{\Delta\text{в}} = \frac{W_Y}{W_\Delta}\dot{I}_\text{B};\ \dot{I}_{\Delta c} = \frac{W_Y}{W_\Delta}\dot{I}_\text{C}.$$

В соответствии с принятыми положительными направлениями для токов в линейных проводах за «треугольником» для тока фазы *a* на стороне *НН* определяются:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{\Delta a} - \dot{I}_{\Delta\text{в}} = \frac{W_Y}{W_\Delta}\left(\dot{I}_\text{A} - \dot{I}_\text{B}\right) = \frac{K_\text{T}}{\sqrt{3}}\left(\dot{I}_\text{A} - \dot{I}_\text{B}\right).$$

Выразив фазные токи через симметричные составляющие, последовательно можно найти:

$$\dot{I}_a = \frac{K_\text{T}}{\sqrt{3}}\left(\dot{I}_{\text{A}1} + \dot{I}_{\text{A}2} + \dot{I}_{\text{A}0} - \dot{I}_{\text{A}1}a^2 - \dot{I}_{\text{A}2}a - \dot{I}_{\text{A}0}\right);$$

$$\dot{I}_a = \left[\dot{I}_{\text{A}1}(1 - a^2) + \dot{I}_{\text{A}2}(1 - a)\right]\frac{K_\text{T}}{\sqrt{3}};$$

$$\dot{I}_a = K_{\text{T}}\left(\dot{I}_{\text{A1}}e^{j30^\circ} + \dot{I}_{\text{A2}}e^{-j30^\circ}\right). \qquad (4.14)$$

Аналогичные выражения могут быть найдены и для фазных напряжений за «треугольником». Из полученных соотношений видно, что в линейных проводах за «треугольником» отсутствуют токи нулевой последовательности, и фазные напряжения не зависят от напряжений нулевой последовательности, имеющих место на стороне «звезды» трансформатора.

Таким образом, можно сделать следующий вывод: при переходе со стороны «звезды» на сторону «треугольника» трансформатора, обмотки которого соединены по группе $Y_0/\Delta - 11$, векторы прямой последовательности поворачиваются на 30° в направлении вращения фазных векторов, а векторы обратной последовательности на тот же угол в противоположном направлении.

На рис. 4.15 дана диаграмма токов и напряжений, показывающая сдвиг векторов прямой и обратной последовательностей для трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta - 11$.

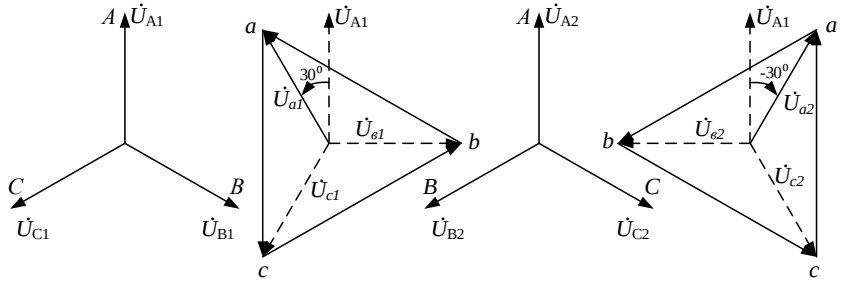


Рис. 4.15

Правилу трансформации симметричных составляющих можно придать общий характер. Для этого достаточно ввести предложенное Н.А. Мельниковым понятие комплексного коэффициента трансформации. Соответственно имеем для прямой и обратной последовательностей:

$$\dot{K}_1 = K_{\text{T}}e^{j30^\circ N}, \dot{K}_2 = K_{\text{T}}e^{-j30^\circ N}, \qquad (4.15)$$

где N – номер группы соединения обмоток трансформатора.

Зная симметричные составляющие напряжений на стороне *ВН* трансформатора $\dot{U}_{\mathrm{A1}}$ и $\dot{U}_{\mathrm{A2}}$, можно найти симметричные составляющие на стороне *НН* за «треугольником» по формулам:

$$\dot{U}_{a1} = \frac{\dot{U}_{\mathrm{A1}}}{\dot{K}_1} = \frac{1}{K_{\mathrm{T}}}\dot{U}_{\mathrm{A1}}e^{-j30°N};$$

$$\dot{U}_{a2} = \frac{\dot{U}_{\mathrm{A2}}}{\dot{K}_2} = \frac{1}{K_{\mathrm{T}}}\dot{U}_{\mathrm{A2}}e^{+j30°N}.$$

Значения $\dot{U}_{\mathrm{A1}}$ и $\dot{U}_{\mathrm{A2}}$ в представленных формулах включают и падения напряжения в самом трансформаторе.

Аналогичные выражения для токов можно получить, воспользовавшись условием инвариантности мощности для случая, когда компоненты матрицы преобразования *С* комплексные числа, т.е.

$$p = u^* i = u^{*\prime} i' = p'.$$

Индекс (*) в выражении для мощности обозначает сопряженную комплексную величину. Когда ток преобразуется по формуле $i = Ci'$, то $u^*Ci = u^{*\prime}i'$. Последнее выражение есть тождество. Следовательно, $u^*C = u^{*\prime}$. Тогда взяв сопряжение от обеих частей, можно определить:

$$uC^* = u' = C_t^* u; u = C_t^{*-1}u'.$$

Поскольку $C_t^{*-1} = 1/K$, то $C = K^*$, и токи последовательностей будут:

$$\dot{I}_{a1} = K_1^*\dot{I}_{A1} = K_{\mathrm{T}}\dot{I}_{a1}e^{-j30°N}; \dot{I}_{a2} = K_2^*\dot{I}_{A2} = K_{\mathrm{T}}\dot{I}_{a2}e^{+j30} \quad (4.16)$$

Эти соотношения позволяют найти измененное положение векторов обеих последовательностей для любого значения *N*. Если соединение обмоток трансформатора, например, *Y/Y*-2, то при переходе через трансформатор векторная диаграмма токов прямой последовательности повернется по часовой стрелке на 60º, а обратной на тот же угол в противоположном направлении.

Еще более простым и наглядным способом определения углов поворота векторов при переходе через трансформатор является известное правило часового циферблата, суть которого состоит в

следующем. Если известный вектор прямой последовательности на стороне *ВН* совместить с большой стрелкой часов и установить его на цифру 12, то после перехода на сторону *НН* трансформатора он, как малая стрелка часов, повернется и установится так, что укажет время, соответствующее номеру *N* группы соединения обмоток трансформатора. Например, для трансформатора Y_0/Δ-3 вектор прямой последовательности повернется на угол 90º по часовой стрелке (на три часа), а вектор обратной последовательности – на угол 90º в противоположном направлении (на девять часов).

Простое правило циферблата часов позволяет по векторным диаграммам с двух сторон трансформатора устанавливать его группу соединения обмоток. В самом деле, пусть, например, нужно определить, какой группе соединения обмоток соответствуют диаграммы линейных и фазных величин, показанные на рис. 4.16, *а, б.*

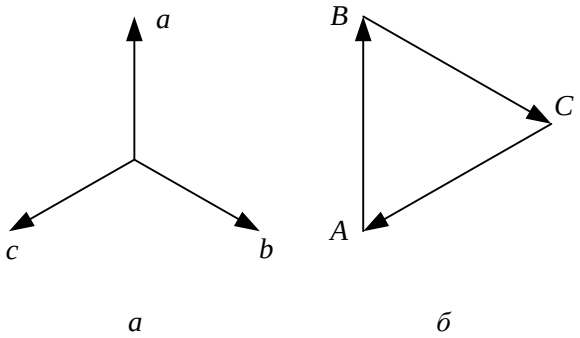


Рис. 4.16

Из диаграмм видно, что на стороне высокого напряжения *ВН* обмотки трансформатора соединены в «треугольник», на стороне *НН* – в «звезду». Чтобы определить группу соединения, необходимо выяснить относительное расположение этих фазных или линейных векторов напряжений с обеих сторон данного трансформатора. Если вектор на стороне *ВН* (например, *ВА*) совместить с большой стрелкой часов и направить на цифру 12, то вектор (*ba*) на стороне *НН*, будучи направлен как малая стрелка часов, определит номер

группы (стрелка покажет на 5 часов), т.е. это будет соединение по 5 - й группе $\Delta/Y-5$.

Точно так же, имея схему соединения обмоток, можно по маркировке фаз трансформатора установить его группу.

Например, пусть нужно по заданной схеме рис. 4.17, *а,* определить группу соединений обмоток трансформатора.

Для ответа на данный вопрос выполняется построение простых векторных диаграмм (рис. 4.17, *б, в*).

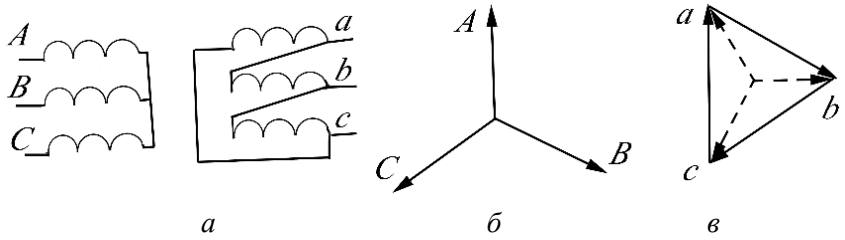


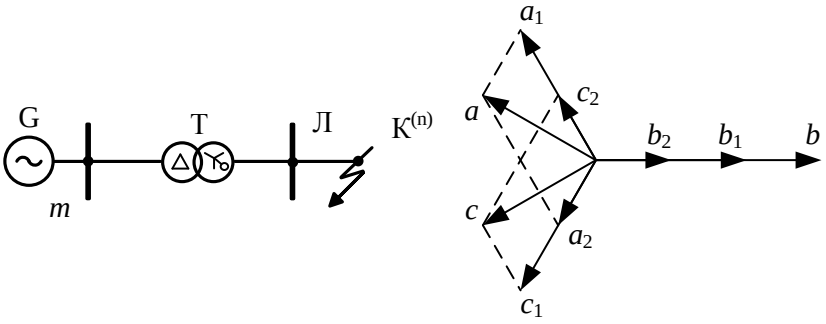
Рис. 4.17

На них можно определить направления одноименных векторов (*А* и *а*), построив «треугольник» линейных напряжений на стороне *НН* трансформатора и «звезду» фазных напряжений на стороне *ВН* с учетом взаимного расположения фаз (рис. 4.17, *в*). Видно, что вектор *а*, направлен на 11 часов. Следовательно, рассматриваемый трансформатор относится к 11-й группе соединений $Y/\Delta-11$.

Эти же приемы помогают по диаграммам определять вид короткого замыкания. Например, пусть задана диаграмма в точке *m* (рис. 4.18, *а*) на стороне НН трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta-11$, и требуется определить вид КЗ, произошедшего в точке $К^{(n)}$ на линии (рис. 4.18, *б*).

Коль скоро диаграмма дана на стороне *НН* трансформатора, то если перейти на сторону *ВН*, векторы прямой последовательности следует повернуть на 30° по часовой стрелке, а векторы обратной последовательности на тот же угол в противоположном направлении. При переходе через трансформатор со стороны *НН* на *ВН*

угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак. Тогда напряжения U_{A1} и U_{A2} будут расположены на одной прямой, что характерно для особой фазы, но сдвинуты на 180°. Очевидно, что при приближении к точке $K^{(n)}$ вектор U_{A1} немного уменьшится, а вектор U_{A2} возрастет. Разность этих векторов будет напряжением нулевой последовательности U_{A0}, что справедливо для $K^{(1)}$, т. е. на линии имеет место однофазное КЗ фазы *A*.



а *б*

Рис. 4.18

Еще раз заметим, что наиболее простые соотношения получаются для трансформатора с соединением обмоток по группе 12, так как в этом случае угловые смещения токов и напряжений вообще отсутствуют. При этом, когда имеется соединение Y_0/Y_0, должны быть учтены трансформируемые составляющие нулевой последовательности.

При нечетной группе соединения обмоток в тех случаях, когда не требуется знание истинной взаимной ориентировки векторных диаграмм на обеих сторонах трансформатора, можно для простоты считать его соединение по группе 3 (или 9), поскольку при этом векторы прямой и обратной последовательностей поворачиваются на 90º в противоположных направлениях. Очевидно, векторы прямой последовательности можно оставить без смещения, но векторы обратной последовательности сдвинуть на 180º. Отсюда вытекает простое и удобное для практики правило: при переходе

через трансформатор с соединением *Y/Δ* (или *Δ/Y*) достаточно только у векторов обратной последовательности изменить знак на противоположный.

Следует иметь в виду, что отказ от учета действительной группы соединения обмоток трансформатора приводит к несовпадению обозначений линейных проводов за трансформатором с маркировкой, отвечающей действительной группе соединений.

Важно особо подчеркнуть, что если токи и напряжения выражены в относительных единицах, то при их трансформации должны учитываться только угловые сдвиги, обусловленные соответствующей группой соединения обмоток трансформатора.

ПРИМЕР 9

Определить X_{N} в нейтрали системы (рис. 4.19), при котором токи при КЗ на землю одинаковы в нейтрали системы и трансформатора. Для этих условий построить диаграмму токов в ветви системы и диаграмму напряжений на стороне НН трансформатора при $\text{К}^{(1,1)}$.

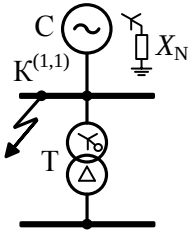


Рис. 4.19

Параметры схемы - система С: $S_{\text{C}} = 300$ МВА; $U_{\text{C}} = 115$ кВ; $X_{\text{C1}} = X_{\text{C2}} = 0{,}3$; $X_{\text{C0}} = 0{,}1$; трансформатор Т: $S_{\text{T}} = 75$ МВА; $u_{\text{k}}\% = 10\%$; k_{T}=115/6,3.

Трансформатор работает в режиме холостого хода.

Решение

Выбираются базисные условия

$$S_{\text{б}} = S_{\text{С}} = 100\ \text{МВА}; U_{\text{б}} = U_{\text{С}} = 115\ \text{кВ},$$

и находится

$$X_{\text{Т}} = \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{номТ}}} = 0{,}1 \cdot \frac{300}{75} = 0{,}4.$$

Составляются схемы замещения отдельных последовательностей (рис. 4.20).

$$X_{1\Sigma} = X_{\text{С}1} = 0{,}3;\ X_{2\Sigma} = X_{\text{С}2} = 0{,}3.$$

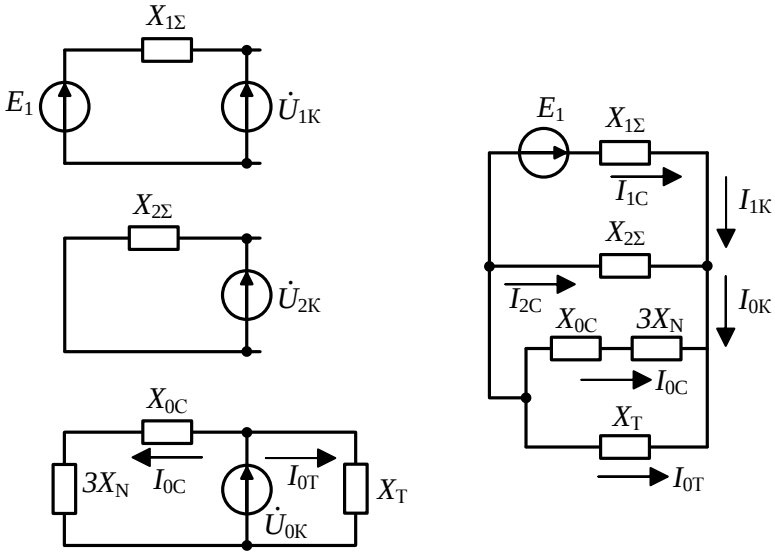


Рис. 4.20

Токи нулевой последовательности (показаны на комплексной схеме) $I_{0\text{С}} = I_{0\text{Т}}$.

Следовательно,

$$X_{\text{Т}} = 3X_{\text{N}} + X_{\text{С}0};$$
$$0{,}4 = 3X_{\text{N}} + 0{,}1;$$

$$X_{\text{N}} = \frac{0{,}4 - 0{,}1}{3} = 0{,}1;$$

$$X_{0\Sigma} = (X_{0\text{C}} + 3X_{\text{N}})//X_{\text{T}} = \frac{0{,}4}{2} = 0{,}2;$$

$$X_{\Sigma} = X_{1\Sigma} + \frac{X_{0\Sigma} \cdot X_{2\Sigma}}{X_{0\Sigma} + X_{2\Sigma}} = 0{,}3 + \frac{0{,}3 \cdot 0{,}2}{0{,}3 + 0{,}2} = 0{,}42;$$

$$I_{1\text{К}} = \frac{E_{1\Sigma}}{X_{\Sigma}} = \frac{1}{0{,}42} = 2{,}38;$$

$$I_{1\text{C}} = I_{1\text{К}} = 2{,}38;$$

$$U_{1\text{К}} = E_{1\Sigma} - X_{1\Sigma} I_{1\Sigma} = 1 - 0{,}3 \cdot 2{,}38 = 0{,}286;$$

$$I_{2\text{К}} = -I_{1\text{К}} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{0\Sigma} + X_{2\Sigma}} = -2{,}38 \cdot \frac{0{,}2}{0{,}2 + 0{,}3} = -0{,}952;$$

$$I_{2\text{C}} = I_{2\text{К}} = -0{,}952;$$

$$U_{2\text{К}} = U_{1\text{К}} = 0{,}286;$$

$$I_{0\text{К}} = -I_{1\text{К}} \frac{X_{2\Sigma}}{X_{0\Sigma} + X_{2\Sigma}} = -2{,}38 \cdot \frac{0{,}3}{0{,}2 + 0{,}3} = -1{,}428;$$

$$I_{0\text{C}} = \frac{I_{0\text{К}}}{2} = -0{,}714;$$

$$U_{0\text{К}} = I_{0\text{C}}(X_{0\text{C}} + 3X_{\text{N}}) = 0{,}286.$$

Из диаграммы (рис. 4.21):

$$I_{\text{BC}} = I_{\text{CC}} \approx 3{,}2.$$

$$I^{(1,1)} = 3{,}2 \cdot \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 115} = 4{,}82 \text{ кА}.$$

Для построения диаграммы находятся напряжения U_{1a} и U_{2a} за трансформатором на стороне *НН*. Если номер группы соединения обмоток не задан, то принимается $N = 11$, поскольку практически все трансформаторы в отечественных энергосистемах относятся к 11 - ой группе. Раз трансформатор на холостом ходу, то в о.е. $\dot{U}_{1a} = \dot{U}_{1\text{К}}$ и $\dot{U}_{2a} = \dot{U}_{2\text{К}}$. За «треугольником» напряжение $\dot{U}_{0a} = 0$.

Из диаграммы в относительных единицах получается

$$U_a = U_c = 0{,}494$$

или в именованных единицах

$$U_a = U_c = 3{,}12 \text{ кВ};\ U_b = 0.$$

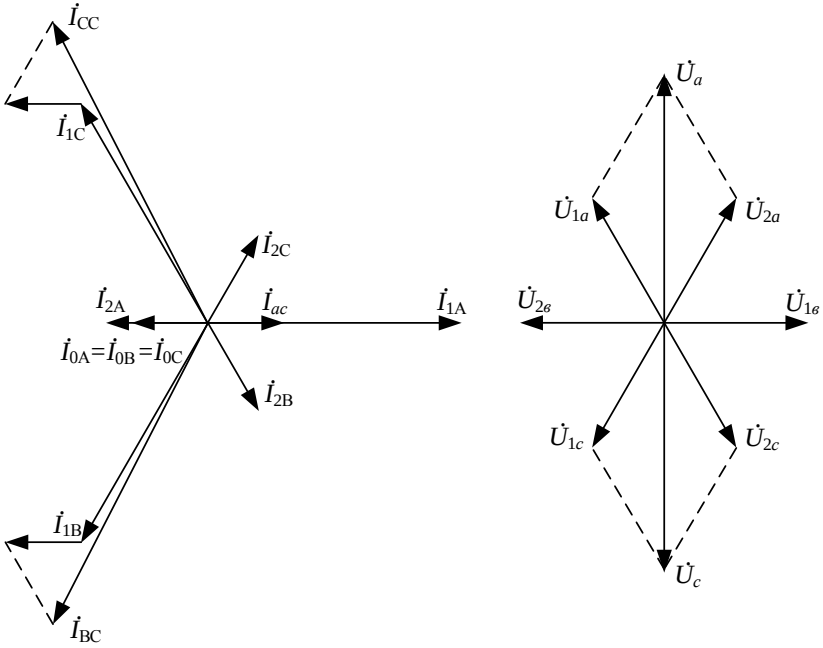


Рис. 4.21

Примечание

При К$^{(1)}$ в исследуемой схеме X_{N} в нейтрали системы было бы тем же. Однако возникает часто вопрос о токах в земле при К$^{(1)}$ и К$^{(1,1)}$. Их отношение нетрудно найти, используя комплексные схемы замещения (рис. 4.22, *а*, *б*).

Ток в земле

$$I_{\text{з}}^{(n)} = 3I_0.$$

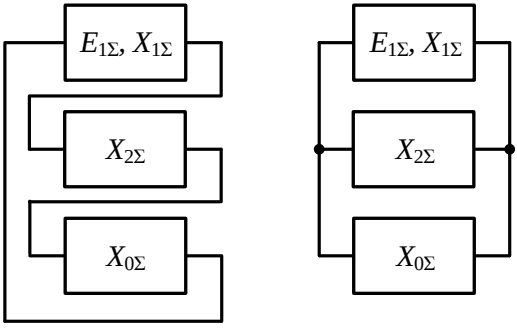
Из комплексных схем находятся токи

$$I_{0\text{К}}^{(1)} = I_{1\text{К}}^{(1)} = I_{2\text{К}}^{(1)} = \frac{E_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}};$$

$$I_0^{(1,1)} = I_{1\text{К}} \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}};$$

$$I_0^{(1,1)} = \frac{E_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma}//X_{0\Sigma}} \cdot \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} = \frac{E_{1\Sigma}X_{2\Sigma}}{X_{1\Sigma}X_{0\Sigma} + X_{1\Sigma}X_{2\Sigma} + X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}};$$

$$\frac{I_0^{(1)}}{I_0^{(1,1)}} = \frac{X_{1\Sigma}X_{0\Sigma} + X_{1\Sigma}X_{2\Sigma} + X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{{X_{2\Sigma}}^2 + X_{1\Sigma}X_{2\Sigma} + X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}.$$



а *б*

Рис. 4.22

При условии, что $X_{1\Sigma} \cong X_{2\Sigma}$

$$\frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma} + {X_{2\Sigma}}^2 + X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{{X_{2\Sigma}}^2 + {X_{2\Sigma}}^2 + X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}} = \frac{2X_{2\Sigma}X_{0\Sigma} + {X_{2\Sigma}}^2}{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma} + 2{X_{2\Sigma}}^2} = \frac{2X_{0\Sigma} + X_{2\Sigma}}{X_{0\Sigma} + 2X_{2\Sigma}}.$$

Следовательно, если $X_{0\Sigma} > X_{2\Sigma}$, то

$$I_0^{(1)} > I_0^{(1,1)}.$$

Здесь уместно обратить внимание на особенности вычисления токов в нейтрали автотрансформаторов.

ПРИМЕР 10

Пусть требуется для схемы (рис. 4.23) найти ток в нейтрали АТ при $К^{(1)}$ и при $К^{(1,1)}$, если $S_{АТ} = 200$ МВА; $U_С = 230$ кВ; $k_{АТ} = 230/115/10{,}5$; $X_В = 0{,}21$; $X_С = 0{,}63$; $X_Н = 0{,}63$; $S_С = 1400$МВА; $X_{С1} = X_{С2} = 0{,}3$; $X_{С0} = 0{,}8$.

Решение

Выбираются базисные условия:

$$U_{б} = U_{ср} = 230 \text{ кВ и } S_{б} = 1400 \text{ МВА},$$

находится

$$I_{б\,I} = \frac{1400}{\sqrt{3} \cdot 230} = 3{,}52 \text{ кА}; \; I_{б\,II} = \frac{1400}{\sqrt{3} \cdot 115} = 7{,}04 \text{ кА}.$$

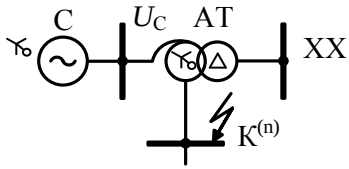


Рис. 4.23

Составляется схема замещения (рис. 4.24) для $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$, и вычисляются суммарные сопротивления последовательностей:

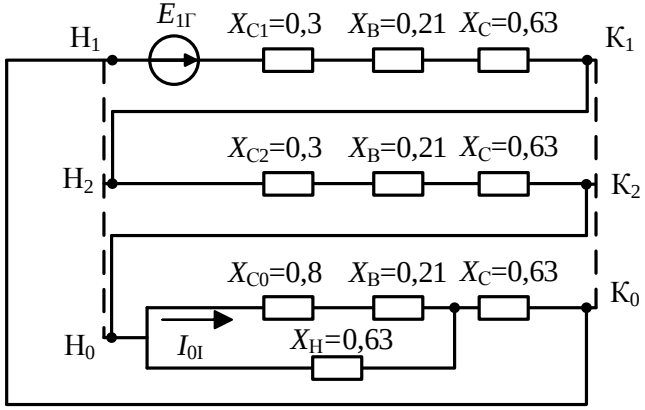


Рис. 4.24

$$X_{1\Sigma} = X_{C1} + X_B + X_C = 0{,}3 + 0{,}21 + 0{,}63 = 1{,}14;$$
$$X_{2\Sigma} = X_{C2} + X_B + X_C = 0{,}3 + 0{,}21 + 0{,}63 = 1{,}14;$$
$$X_{0\Sigma} = (X_{C0} + X_B)//X_H + X_C = (0{,}8 + 0{,}21)//0{,}63 + 0{,}63 = 1{,}02;$$
$$X_{\Sigma}^{(1)} = 3{,}3.$$

Тогда для К$^{(1)}$ определяются:

$$I_{1К} = I_{2К} = I_{0К} = \frac{1}{3{,}3} = 0{,}3.$$

Следовательно,

$$I_К^{(1)} = 0{,}9;\ I_К = 0{,}9 \cdot 7{,}04 = 6{,}4 \text{ кА}.$$

Для К$^{(1,1)}$ можно найти (по схеме, обозначенной пунктиром)

$$X_\Sigma^{(1,1)} = X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} = 1{,}68;$$

$$I_{1К}^{(1,1)} = \frac{1}{1{,}68} = 0{,}6;$$

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} =$$

$$= \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{1{,}14 \cdot 1{,}02}{(1{,}14 + 1{,}02)^2}} = 1{,}52;$$

$$I_К^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot I_{1К}^{(1,1)} = 1{,}52 \cdot 0{,}6 = 0{,}912;$$

$$I_К^{(1)} = 0{,}912 \cdot 7{,}04 = 6{,}42 \text{ кА}.$$

Чтобы найти ток в нейтрали АТ, необходимо определить токи нулевой последовательности первичной и вторичной обмоток АТ в [кА], приведенные к каждой из обмоток, а затем взять утроенную разность этих токов.

Для К$^{(1)}$ можно в относительных единицах получается:

$$I_{0\,I}^{(1)} = 0{,}3 \cdot \frac{0{,}63}{0{,}8 + 0{,}63 + 0{,}21} = 0{,}117;$$

$$I_{0\,II}^{(1)} = 0{,}3.$$

Тогда токи в [кА] будут соответственно 2,112 кА и 0,412 кА.

Ток в нейтрали АТ

$$I_{N\,АТ}^{(1)} = 3 \cdot (2{,}112 - 0{,}412) = 5{,}15 \text{ кА}.$$

Для К$^{(1,1)}$ аналогично определяется:

$$I_{0\,I}^{(1,1)} = 0{,}29 \cdot \frac{0{,}63}{0{,}8 + 0{,}63 + 0{,}21} = 0{,}11;$$

$$I_{0\,\mathrm{II}}^{(1,1)} = 0{,}6 \cdot \frac{1{,}14}{1{,}14 + 1{,}02} = 0{,}29;$$

$$I_{\mathrm{N\,AT}}^{(1,1)} = 3 \cdot (0{,}29 \cdot 7{,}04 - 0{,}11 \cdot 3{,}52) = 4{,}96 \text{ кА}.$$

ПРИМЕР 11

В электропередаче (рис. 4.25) найти токи и напряжения в ЛЭП для двух случаев: 1) $К^{(1)}$ в конце Л-1 при отключенных выключателях со стороны нагрузки; 2) то же $К^{(1)}$ в конце Л-1, но с наложенными закоротками трех фаз по концам Л-2. Нагрузка отключена. Параметры системы заданы: система С – $U_С$ = 115 кВ; $X_С$ = 20 Ом; линия Л – $X_{Ф\ Л\text{-}1,2}$=74 Ом; $X_{М,\ Л\text{-}1,2}$ =34 Ом; $X_{М,\ I\text{-}II}$ =31 Ом (между Л-I и Л-II взаимоиндуктивность).

Решение

Задача элементарно проста. Ее можно решить методом симметричных составляющих. Однако существуют некоторые нюансы, обусловленные учетом взаимоиндукции. Проще всего можно решить ее, исходя из чисто физических соображений.

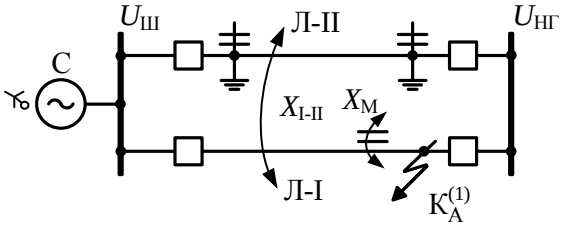


Рис. 4.25

I. Первый случай.

Поскольку при $К^{(1)}$ в фазе *А* и отключенных выключателях в конце Л-1 и Л-2 существует лишь один замкнутый контур, то нетрудно рассчитать по схеме (рис. 4.26) ток в фазе *А* линии Л-1:

$$\dot{I}_{\text{А}}^{(1)} = \frac{E_{\text{Аф}}}{j(X_{\text{С}} + X_{\text{Ф Л}-1,2})} = \frac{66{,}5}{j(20+74)} = -j0{,}707 \text{ кА}.$$

Тогда напряжение фазы *А* на шинах системы будет

$$U_{\text{АШ}} = \dot{I}_{\text{А}}^{(1)} \cdot X_{\text{Ф Л}-1,2} = -j0{,}707 \cdot j74 = 52{,}35 \text{ кВ}.$$

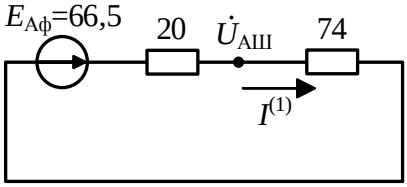


Рис. 4.26

Напряжения на шинах фаз *В* и *С* системы, очевидно, равны фазным ЭДС системы, т.е.

$$U_{\text{ВШ}} = U_{\text{СШ}} = E_{\text{Вф}} = E_{\text{Сф}} = 66{,}5 \text{ кВ}.$$

На (рис. 4.27, *а*) представлена векторная диаграмма напряжений и тока в начале Л-1.

Из-за взаимоиндукции в фазах *В* и *С* в линии Л-I наводятся ЭДС, равные

$$E_{\text{Н}} = -\dot{I}_{\text{А}}^{(1)} \cdot X_{\text{М,Л}-1,2} = -(-j0{,}707 \cdot j34) = -24 \text{ кВ}.$$

Тогда фазные напряжения в конце Л-I определяются из векторной диаграммы (рис. 4.27, *б*).

Напряжение фазы *А* в месте К$^{(1)}$ Л-1 будет $U_{\text{АК}} = 0$. Напряжения $U_{\text{ВК}}$ и $U_{\text{СК}}$ можно найти, используя теорему косинусов

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\widehat{a\,b}}.$$

Определяются

$$U_{\text{ВК}} = U_{\text{СК}} = \sqrt{66{,}5^2 + 24^2 + 2 \cdot 66{,}5 \cdot 24 \cdot 0{,}5} = 81{,}2 \text{ кВ}.$$

В каждой из фаз Л-II наводимые ЭДС будут равны

$$E_{\text{Н,II}} = -\dot{I}_{\text{А}}^{(1)} \cdot X_{\text{М,I}-\text{II}} = -(-j0{,}707 \cdot j31) = -21{,}91 \text{ кВ}.$$

II. Второй случай (Л-II заземлена).

Закоротки на Л-II рассматриваются как заземления, накладываемые с двух сторон линии при ее ремонте. Совокупность трех фаз Л-II в принципе представляет собой некоторый эквивалентный трос в режиме $К^{(1)}$ на Л-I.

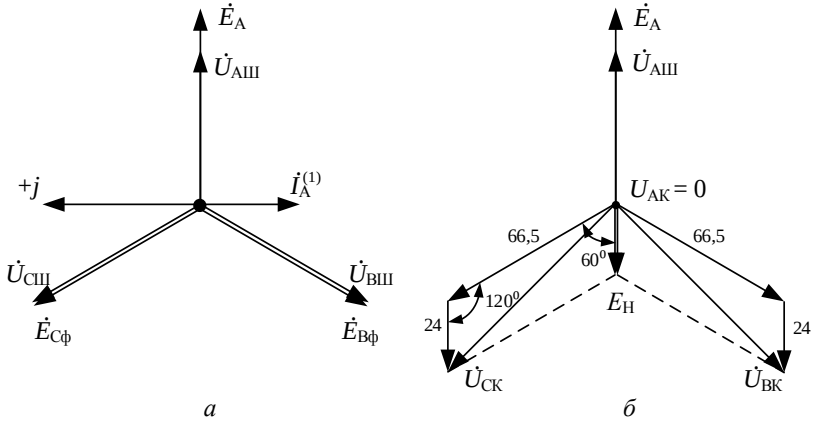


Рис. 4.27

Следовательно, для фазы *А* линии Л-I

$$66{,}5 = \dot{I}_A j(20 + 74) + 3\,\dot{I}_{II} \cdot j31;$$

и для Л-II:

$$0 = \dot{I}_A j31 + \dot{I}_{II} \cdot j74 + 2\,\dot{I}_{II} \cdot j34.$$

Из второго уравнения можно найти

$$\dot{I}_{II} = -\dot{I}_A \frac{j31}{j(74 + 68)} = -0{,}218\dot{I}_A;$$

Тогда из первого уравнения можно определить

$$66{,}5 = \dot{I}_A \cdot j94 + 3 \cdot j31(-0{,}218)\dot{I}_A =$$
$$= \dot{I}_A(j94 - j20{,}302) = j73{,}69\dot{I}_A.$$

Отсюда ток в фазе *А* линии Л-1 будет

$$\dot{I}_A = \frac{66{,}5}{j73{,}69} = -j0{,}902 \text{ кА},$$

и ток в фазах линии Л-II

$$\dot{I}_{II} = -j0{,}902 \cdot (-0{,}218) = j0{,}197 \text{ кА}.$$

Определяются модули напряжений $U_{\text{ШЛ}}$ для фаз *B* и *C*:

$$U_{\text{ВШ}} = U_{\text{СШ}} = 66{,}5 \text{ кВ}.$$

Для фазы *A* напряжение

$$U_{\text{АШ}} = E_{\text{Аф}} - \dot{I}_{\text{А}} X_{\text{С}} = 66{,}5 - (-j0{,}902 \cdot j20) = 48{,}46 \text{ кВ}.$$

ЭДС, наведенные в фазах *B* и *C* Л-I, будут:

$$\dot{E}_{\text{НВ}} = \dot{E}_{\text{НС}} = -j34 \cdot (-j0{,}902) - 3 \cdot j0{,}197 \cdot j31 = -12{,}3 \text{ кВ};$$

Тогда модули напряжений в конце Л-I по теореме косинусов будут равны

$$U_{\text{ВК}} = U_{\text{СК}} = \sqrt{66{,}5^2 + 12{,}3^2 + 2 \cdot 66{,}5 \cdot 12{,}3 \cdot 0{,}5} = 74{,}8 \text{ кВ}.$$

Из анализа видно, что наличие “троса” приводит к увеличению тока $I^{(1)}_{\text{К,Л}-1}$ на 27,6%, а также к уменьшению напряжений неповрежденных фаз на

$$\frac{81{,}2 - 74{,}8}{81{,}2} \cdot 100\% = 7{,}88\%.$$

Примечание

В решении задачи используются законы Кирхгофа и Фарадея. Для простых схем – это удобно, но для сложных все же надо применять метод симметричных составляющих. Давайте решим эту задачу для случая I методом симметричных составляющих.

1) Строится комплексная схема замещения для однофазного КЗ в виде (рис. 4.28).

2) Находятся результирующие сопротивления схем различных последовательностей:

$$X_{1\Sigma} = X_{\text{С}} + X_{\text{Л}-\text{I}} - X_{\text{М}}; X_{2\Sigma} = X_{\text{С}} + X_{\text{Л}-\text{I}} - X_{\text{М}};$$
$$X_{0\Sigma} = X_{\text{С}} + X_{\text{Л}-\text{I}} + 2X_{\text{М}}.$$

Получается,

$$X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = j(20 + 74 - 34) = j60 \text{ Ом};$$
$$X_{0\Sigma} = j(20 + 74 + 2 \cdot 34) = j162 \text{ Ом}.$$

3) Вычисляется ток КЗ

$$\dot{I}_A^{(1)} = \frac{3 \cdot E_{\text{Аф}}}{jX_{\Sigma}} = \frac{3 \cdot 66{,}5}{j(2 \cdot 60 + 162)} = 0{,}707 \text{ кА}$$

и определяются:

– симметричные составляющие токов в месте КЗ (точка $К^{(1)}$):

$$I_{А1} = I_{А2} = I_{А0} = I_{1К} = \frac{\dot{I}_{А}^{(1)}}{3} = 0{,}236 \text{ кА},$$

– симметричные составляющие напряжений:

$$\dot{U}_{А1} = j(14{,}14 + 38{,}18) = j52{,}32 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{А2} = -I_{А2}X_{2\Sigma} = -0{,}236 \cdot j60 = -j14{,}14 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{А0} = -I_{А0}X_{0\Sigma} = -0{,}236 \cdot j162 = -j38{,}18 \text{ кВ}.$$

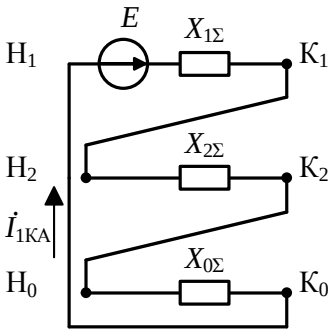


Рис. 4.28

4) Определяются фазные напряжения в конце Л-1:

$$\dot{U}_{А} = 0;$$

$$\dot{U}_{В} = \dot{U}_{А1}a^2 + \dot{U}_{А2}a + \dot{U}_{А0} = j52{,}32\left(-0{,}5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) +$$

$$+\left(-0{,}5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)j14{,}14 - j38{,}18 = -57{,}25 - j57{,}59;$$

$$U_{В} = U_{С} = \sqrt{57{,}25^2 + 57{,}59^2} = 81{,}2 \text{ кВ}.$$

Заметим, что результаты обоих расчетов совпадают.

Что касается второго случая, то решение методом симметричных составляющих имеет лишь одну особенность в определении сопротивления нулевой последовательности.

Если $X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = j(20 + 74 - 34) = j60$ Ом те же, то

$$X_{0\Sigma} = jX_{0Л}^{(т)} - jX_{0Т} = j(20 + 74 + 2 \cdot 34) - j\frac{(3 \cdot 31)^2}{74 + 2 \cdot 34} = j98 \text{ Ом}.$$

Тогда ток поврежденной фазы:

$$\dot{I}_{A} = \frac{3 \cdot E_{Aф}}{jX_{\Sigma}} = \frac{3 \cdot 66{,}5}{j60 + j60 + j98} = -j0{,}91 \text{ кА}.$$

Дополнение

При расчете несимметричных повреждений целесообразно пользоваться средними значениями отношений сопротивлений нулевой и прямой последовательностей. На рис. 4.29 приведен участок трехфазной линии со взаимоиндукцией между фазами.

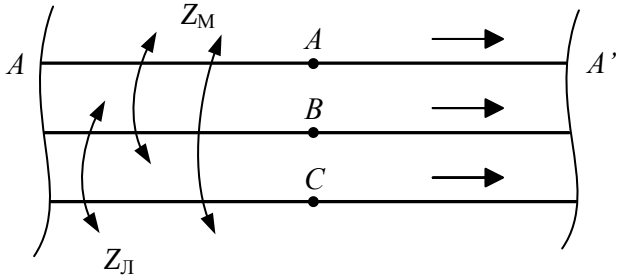


Рис. 4.29

Для участка линии записываются уравнения в виде:

$$I_A = \dot{I}_A;\ I_B = \dot{I}_A a^2;\ I_C = \dot{I}_A a;$$
$$\Delta\dot{U}_{1AA'} = Z_Л\dot{I}_A + Z_М\dot{I}_B + Z_М\dot{I}_C;$$
$$\Delta\dot{U}_{1AA'} = (Z_Л - Z_М)\dot{I}_B = Z_1\dot{I}_A;$$
$$\Delta\dot{U}_{0AA'} = (Z_Л + 2Z_М)\dot{I}_A = Z_0\dot{I}_A.$$

Следовательно, получается

$$Z_1 = Z_Л + Z_М a + Z_М a^2;$$
$$Z_1 = Z_Л - Z_М;$$
$$Z_0 = Z_Л + Z_М + Z_М = Z_Л + 2Z_М.$$

Из этих выражений можно определить, что $Z_0 = Z_1 + 3Z_{\text{М}}$. Наличие заземленного троса (рис. 4.30) меняет это соотношение.

Из рис. 4.30 следуют уравнения:

$$\dot{U}_0 - \dot{U}_{0'} = Z_0\dot{I}_0 - Z_{0\text{Л}\text{Т}}\, I_{0\text{Т}};$$

$$0 = Z_{0\text{Т}}\, I_{0\text{Т}} - Z_{0\text{Л}\text{Т}}\dot{I}_0;$$

$$\dot{I}_{0\text{Т}} = \frac{Z_{0\text{Л}\text{Т}}\, I_0}{Z_{0\text{Т}}};\ \Delta\dot{U}_{00'} = \left(Z_0 - \frac{{Z_{0\text{Л}\text{Т}}}^2}{Z_{0\text{Т}}} \right)\dot{I}_0;$$

$$Z_{0\text{Л}}^{(\text{т})} = Z_0 - \frac{{Z_{0\text{Л}\text{Т}}}^2}{Z_{0\text{Т}}}.$$

Нетрудно видеть, что сопротивление нулевой последовательности линии с тросом существенно меньше, особенно если трос выполнен из хорошо проводящего материала.

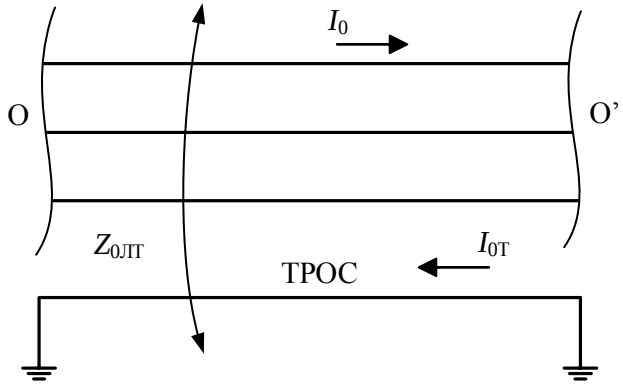


Рис. 4.30

В табл. 2 приведены отношения индуктивных сопротивлений X_0/X_1 для различных ЛЭП, которыми рекомендуется пользоваться при анализе и расчете несимметричных повреждений.

Таблица 2 - Рекомендуемые отношения X_0/X_1 для ЛЭП с алюминиевыми и стальными тросами

X_0/X_1 для ЛЭП	
одноцепная без Т	3,5
одноцепная с СТ	3,0
одноцепная с АТ	2,0
двухцепная без Т	5,5
двухцепная с СТ	4,7
двухцепная с АТ	3,0

ПРИМЕР 12

Найти на линии точку К$^{(1)}$, ток однофазного КЗ в которой наименьший. При этом условии построить диаграмму токов со стороны системы для первого момента времени КЗ (t=0), считая, что до КЗ генератор работал с током $I_{НГ} = 0{,}2I_{ном}$ и cosφ = 0,8.

Параметры схемы (рис. 4.31) заданы: генератор Г – $S_Г$ = 240 МВА; $U_Г$ = 10,5 кВ; $X''_d = 0{,}2$; трансформаторы Т1 – $S_{Т\text{-}1}$ = 120 МВА; $k_Т$ = 10,5/115; $u_к$ = 10%; Т2 –$S_{Т\text{-}2}$ =80 МВА; $k_Т$ = 115/230; $u_к$ = 10%; система С – $S_С = \infty$, $U_С$ = 230 кВ; X_N = 18,3 Ом; линия Л – l = 137,8 км; $X_{1,0}$ = 0,4 Ом/км; $X_{0,0} = 4X_{1,0}$.

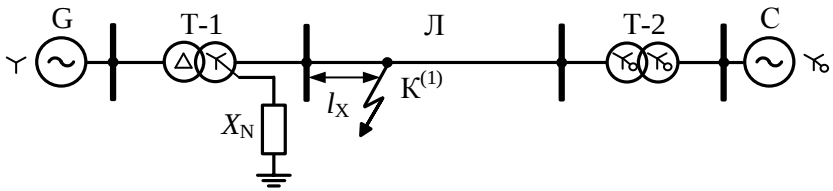


Рис. 4.31

Решение

1. Составляется комплексная схема замещения для заданной сети (рис. 4.32). Если l = 1, то l_* - относительное расстояние до точки К$^{(1)}$. Схема обратной последовательности повторяет схему прямой

последовательности без ЭДС. Схему нулевой последовательности желательно строить всегда от точки К$^{(1)}$ (места КЗ).

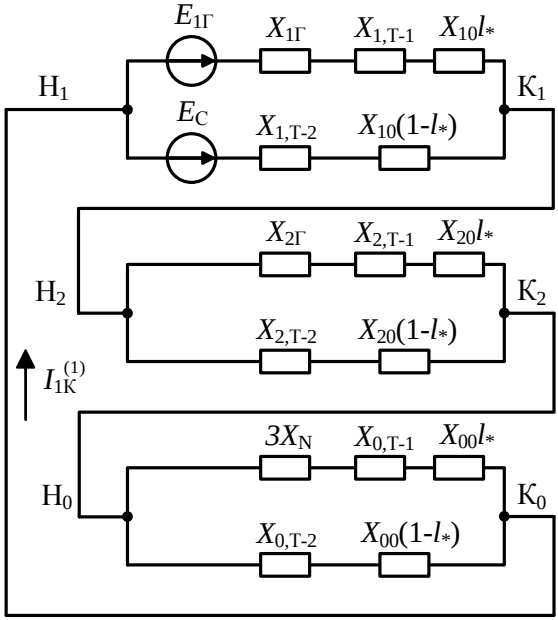


Рис. 4.32

2. Выбираются базисные условия и рассчитываются значения параметров в о.е.:

$S_б = 240$ МВА; $U_{б\,I} = 10{,}5$ кВ; $U_{б\,II} = 115$ кВ; $U_{б\,III} = 230$ кВ.

Все $U_{бi} = U_{срi}$.

Коль скоро К$^{(1)}$ для $t = 0$, то

$$X_{1Г} = X_{2Г} = X''_d \cdot \frac{S_б}{S_{ном}} = 0{,}2 \cdot \frac{240}{240} = 0{,}2;$$

$$X_{1,Т-1} = X_{2,Т-1} = \frac{u_к\%}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном}} \cdot \left(\frac{U_{ном}}{U_б}\right)^2 = \frac{10}{100} \cdot \frac{240}{120} = 0{,}2;$$

$$X_{1,Т-2} = X_{2,Т-2} = \frac{10}{100} \cdot \frac{240}{80} = 0{,}3;$$

$$3\,X_{\text{N}} = 3 \cdot 18{,}3 \cdot \frac{S_{\text{б}}}{{U_{\text{б}\,II}}^2} = 3 \cdot 18{,}3 \cdot \frac{240}{115^2} = 1;$$

$$X_{1{,}0} l_* = X_{2{,}0} l_* = 0{,}4 \cdot \frac{240}{115^2} \cdot l_* \cdot 137{,}8 = 1 \cdot l_*;$$

$$X_{1{,}0}(1 - l_*) = 0{,}4 \cdot \frac{240}{115^2} \cdot (1 - l_*) \cdot 137{,}8 = (1 - l_*);$$

$$X_{0{,}0} l_* = 4\, l_*;$$

$$X_{0{,}0}(1 - l_*)4 = 4(1 - l_*).$$

3. Чтобы найти l_*, необходимо выразить суммарное сопротивление $X_{\Sigma}^{(1)} = (X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + + X_{0\Sigma})$ через l_*, а затем взять производную $\frac{dX_{\Sigma}^{(1)}}{dl_{\text{X}}}$, приравняв ее к нулю.

Следовательно,

$$X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = \frac{(0{,}2 + 0{,}2 + l_*)(0{,}3 + (1 - l_*))}{0{,}2 + 0{,}2 + l_* + 0{,}3 + 1 - l_*} =$$

$$= 0{,}329 + 0{,}588 l_{\text{X}} - 0{,}588 {l_*}^2;$$

$$X_{0\Sigma} = 0{,}938 + 2{,}254 l_* - 2{,}909 {l_*}^2;$$

$$X_{\Sigma}^{(1)} = 2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma} = 1{,}596 + 3{,}43 l_* - 4{,}085 {l_*}^2.$$

Тогда

$$\frac{dX_{\Sigma}^{(1)}}{dl_*} = 3{,}43 - 8{,}17 l_* = 0;$$

$$l_* = \frac{3{,}43}{8{,}17} = 0{,}42.$$

Взяв вторую производную, можно убедиться, что она отрицательна. Следовательно, существует максимум сопротивления, а значит, минимум тока.

Таким образом, К$^{(1)}$ происходит на расстоянии $l_* = 0{,}42 \cdot 137{,}8 = 57{,}87$ км от шин Т-1.

4. Находятся токи со стороны системы. Для этого последовательно вычисляются сопротивления:

$$X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = 0{,}472;$$

$$X_{0\Sigma} = 1{,}372;\ X_{\Sigma}^{(1)} = 2{,}316;$$

ЭДС E_q'' из условия $E_{q(0-)}'' = E_{q(0+)}''$:

$$E_q'' \approx E'' = \sqrt{(U\cos\varphi)^2 + (U\sin\varphi + X_d'' I)^2};$$

$$E'' = \sqrt{(1\cdot\cos\varphi)^2 + (1\cdot\sin\varphi + 0{,}2\cdot 0{,}2)^2} =$$

$$= \sqrt{0{,}8^2 + (0{,}6 + 0{,}2\cdot 0{,}2)^2} \approx 1;$$

$$E_q'' \approx 1.$$

Следовательно, поскольку $E_{\text{С}} = U_{\text{С}}/U_\delta = 1$, то $E_{\Sigma 1} = 1$.

Тогда ток прямой последовательности в месте КЗ равен

$$I_{1\text{К}}^{(1)} = \frac{E_{1\Sigma}}{X_\Sigma^{(1)}} = \frac{1}{2{,}316} = 0{,}432.$$

Поскольку $E_{\text{С}1} = E_{\text{Г}1} = 1$, то токи в ветви системы определяются по правилу «чужого» сопротивления:

$$I_{1\text{С}} = 0{,}432\cdot\frac{0{,}2 + 0{,}2 + 0{,}42}{0{,}2 + 0{,}2 + 0{,}42 + 0{,}3 + 0{,}58} = 0{,}202;$$

$$I_{2\text{С}} = 0{,}202;$$

$$I_{0\text{С}} = 0{,}432\cdot\frac{0{,}2 + 1 + 4\cdot 0{,}42}{0{,}2 + 1 + 4\cdot 0{,}42 + 0{,}3 + 4\cdot 0{,}58} = 0{,}226.$$

Токи в ветви генератора:

$$I_{1\text{Г}} = 0{,}432 - 0{,}202 = 0{,}23;$$

$$I_{2\text{Г}} = 0{,}23;$$

$$I_{0\text{Г}} = 0{,}432 - 0{,}226 = 0{,}206.$$

Ток $I_{0\text{Г}} = 0$, так как за обмоткой Т-1, соединенной в «треугольник» ток нулевой последовательности отсутствует.

5. Строятся векторные диаграммы со стороны Г и С (рис. 4.33, *а*, *б*, *в*).

а – векторная диаграмма токов в ЛЭП со стороны системы;

б – векторная диаграмма токов в ЛЭП со стороны генератора;

в – векторная диаграмма токов в ветви генератора в предположении, что трансформатор Т-1 имеет 11-ую группу соединения

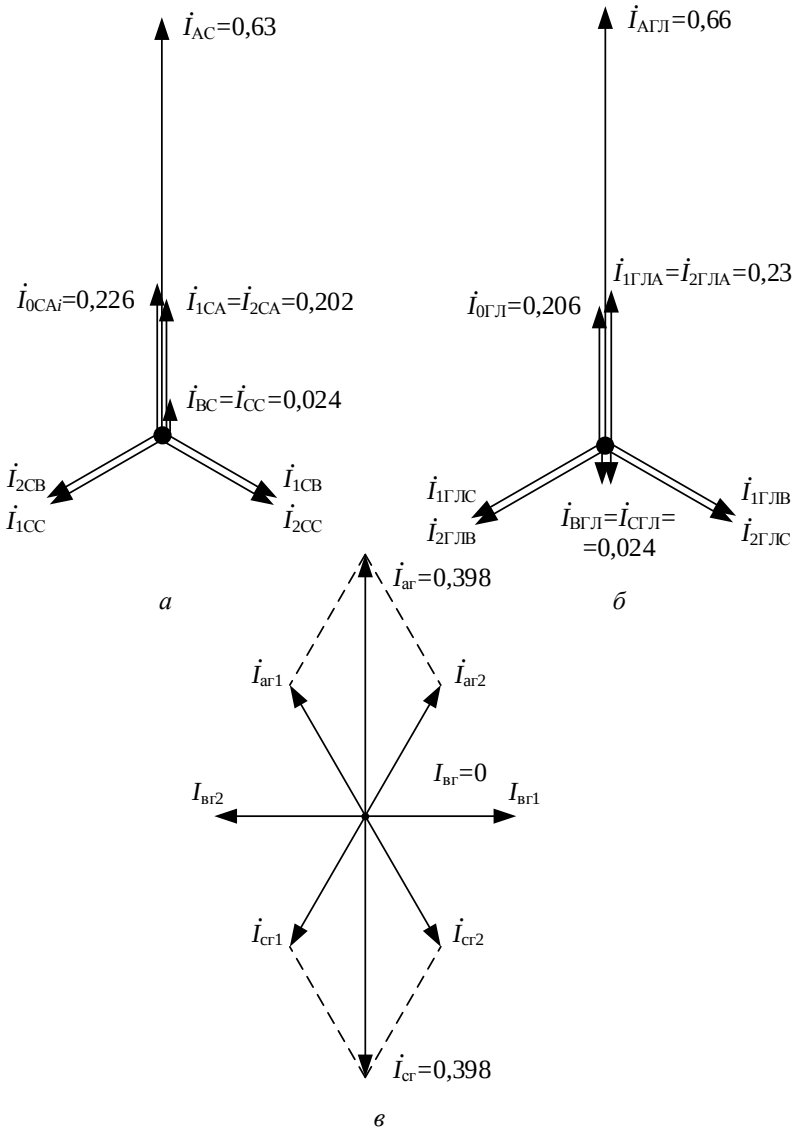

$\dot{I}_{АС}$=0,63
$\dot{I}_{0САi}$=0,226
$\dot{I}_{1СА}$=$\dot{I}_{2СА}$=0,202
$\dot{I}_{ВС}$=$\dot{I}_{СС}$=0,024
$\dot{I}_{2СВ}$
$\dot{I}_{1СС}$
$\dot{I}_{1СВ}$
$\dot{I}_{2СС}$
а
$\dot{I}_{АГЛ}$=0,66
$\dot{I}_{1ГЛА}$=$\dot{I}_{2ГЛА}$=0,23
$\dot{I}_{0ГЛ}$=0,206
$\dot{I}_{1ГЛС}$
$\dot{I}_{2ГЛВ}$
$\dot{I}_{ВГЛ}$=$\dot{I}_{СГЛ}$=
=0,024
$\dot{I}_{1ГЛВ}$
$\dot{I}_{2ГЛС}$
б
$\dot{I}_{аг}$=0,398
$\dot{I}_{аг1}$
$\dot{I}_{аг2}$
$I_{вг}$=0
$I_{вг2}$
$I_{вг1}$
$\dot{I}_{сг1}$
$\dot{I}_{сг2}$
$\dot{I}_{сг}$=0,398
в

Рис. 4.33

ПРИМЕР 13

На расстоянии $l_К$ = 18,3 км от понижающей подстанции заданной схемы (рис. 4.34) произошло перекрытие на землю трех фаз одной из цепей двухцепной линии передачи. От действия релейной защиты поврежденная цепь практически одновременно через 0,5 с была отключена с обоих концов выключателями В-1 и В-2. Спустя еще 1 с от действия АПВ выключатель В-1 был снова включен. При этом оказалось, что в этой цепи сохранилось однофазное КЗ, вследствие чего данный выключатель снова через 0,5 с отключил короткое замыкание. Определить значение тока в момент второго отключения выключателя В-1 и построить векторную диаграмму напряжений в начале линии для того же момента времени, считая, что в предшествующем режиме генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением.

Параметры схемы: генератор – $S_Г$ = 117 МВА; $U_Г$ = 10,5 кВ; X_d =1,8; $I_{f\,пр}$ = 3,3; $X'_d = X_2$ = 0,2; T_e = 0; T_{f0} = 6,2 с; трансформаторы: Т1 – $S_{ном}$ = 120 МВА; $k_Т$ = 121/10,5; $u_к$ = 10%; Т2 – $S_{ном}$ = 60 МВА; $k_Т$ = 110/6,6; $u_к$ = 10,5%; линия Л – l = 62,2 км; X_1 = 0,4 Ом/км; X_0 = =1,4 Ом/км; $X_{0,1-2}$ = 0,67 Ом/км.

Сопротивление $X_{0Л}$ дано для одной цепи линии без учета влияния другой цепи.

Решение

Принимаются $S_б$ = 100 МВА; $U_{б\,I}$ = 10,5 кВ и определяются

$$U_{б\,II} = 10{,}5 \cdot \frac{121}{10{,}5} = 121 \text{ кВ};$$

$$I_{б\,II} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 121} = 0{,}48 \text{ кА}.$$

Составляется схема замещения для первоначального трехфазного КЗ и вычисляются сопротивления всех элементов схемы замещения. Значения вычисленных сопротивлений показаны на схеме замещения (рис. 4.35, *а*). Там же приведены ЭДС

генератора: в начальном переходном режиме $E' = 1$, так как до КЗ генератор работал на холостом ходу, и в установившемся режиме КЗ $E_{\text{пр}} = 3{,}3$, когда генератор работает в режиме предельного возбуждения. Для генератора вычислены при базисных условиях соответственно переходное и установившееся сопротивления:

$$X'_d = 0{,}171;\ X_d = 1{,}54.$$

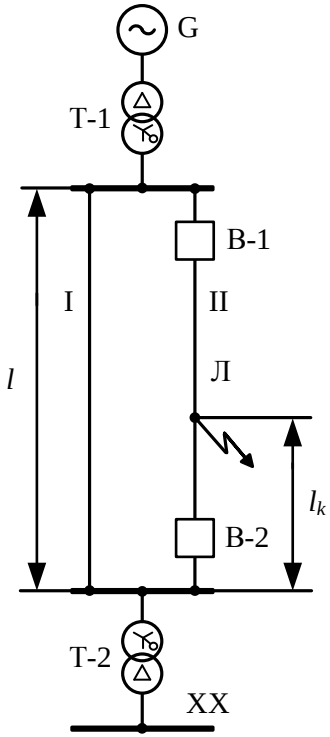


Рис. 4.34

Для момента времени t = 0 результирующее сопротивление схемы относительно места КЗ будет $X'_{\Sigma} = 0{,}337$ и для установившегося режима, когда генератор введен сопротивлением $X_d, X_{d\Sigma} = 1{,}71$.

Вычислив постоянную времени

$$T'_d = T_{f0}\frac{X'_d + X_{\text{вн}}}{X_d + X_{\text{вн}}} = 6{,}2 \cdot \frac{0{,}337}{1{,}71} = 1{,}23 \text{ с},$$

начальное и установившееся значения тока КЗ:

$$I'_0 = \frac{1}{0{,}337} = 2{,}97;$$

$$I_\infty = \frac{3{,}3}{1{,}71} = 1{,}93.$$

Определяется значение тока трехфазного КЗ через 0,5 с в момент отключения В-1 и В-2:

$$I_{t=0{,}5} = I_\infty + (I'_0 - I_\infty)e^{-\frac{t}{T'_d}} = 1{,}93 + (2{,}97 - 1{,}93)e^{-\frac{0{,}5}{1{,}23}} = 2{,}63.$$

Переходная ЭДС генератора E' для этого же момента времени будет

$$E'_t = 0{,}337 \cdot 2{,}63 = 0{,}885.$$

Отключение обоих выключателей приводит к увеличению переходной ЭДС, и к моменту времени $t = 1$ с ее значение достигает величины

$$E'_{t=1\text{ с}} = 1 + (0{,}885 - 1)e^{-\frac{1}{6{,}2}} = 0{,}902.$$

В последнем выражении новое установившееся значение переходной ЭДС $E' = 1$ и постоянная времени равна T_{f0}, поскольку статор разомкнут (генератор на холостом ходу).

При повторном включении выключателя В-1 в схеме замещения (см. рис. 4.35, *а*) из-за разрыва цепи выключателем В-2 меняются значения сопротивлений прямой последовательности:

$$X'_1 = 0{,}379;\ X_1 = 1{,}748.$$

Схема замещения обратной последовательности имеет аналогичный вид и

$$X_2 = X_1 = 0{,}379.$$

Для расчета тока однофазного КЗ, появляющегося в момент нового включения выключателя В-1, составляется схема замещения нулевой последовательности (рис. 4.35, *б*).

Суммарное сопротивление нулевой последовательности (рис. 4.35, *б*)

$$X_{0\Sigma} = 0{,}409.$$

При составлении схемы замещения нулевой последовательности учтена взаимоиндукция между цепями линии электропередачи. Электрическая цепь преобразована в цепь без взаимоиндукции с учетом того, что линии связаны на длине от шин до места КЗ, т.е. $l = 43{,}9$ км.

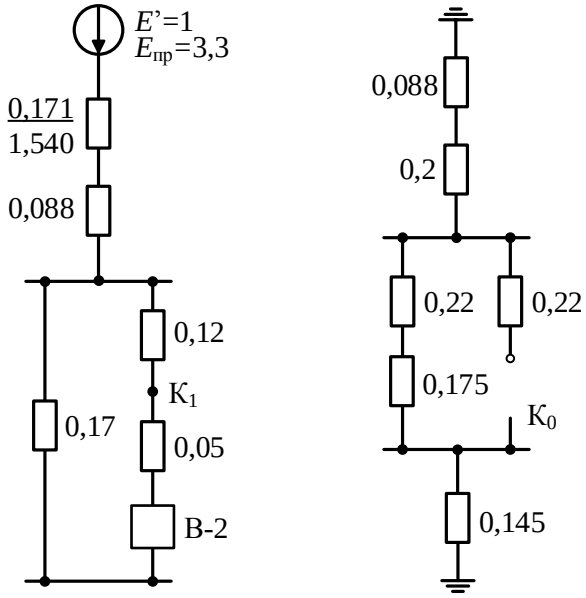


Рис. 4.35

Для случая новой коммутации определяются в моменты времени $t = 0$ и в установившемся режиме результирующие сопротивления при однофазном КЗ:

$$X_0^{\prime(1)} = 2 \cdot 0{,}379 + 0{,}409 = 1{,}167;$$

$$X_{\infty}^{(1)} = 1{,}743 + 0{,}379 + 0{,}409 = 2{,}536,$$

постоянная времени при однофазном КЗ:

$$T_d'^{(1)} = \frac{1{,}167}{2{,}536} \cdot 6{,}2 = 2{,}86 \text{ с.}$$

Используя правило эквивалентности прямой последовательности, можно найти напряжения прямой последовательности генератора

– для $t = 0$:

$$U'_{\text{I}0} = \frac{0{,}902}{1{,}167} \cdot (0{,}088 + 0{,}12 + 0{,}379 + 0{,}409) = 0{,}77;$$

– для установившегося режима:

$$U_{\text{I}\infty} = \frac{3{,}3}{2{,}536} \cdot (0{,}088 + 0{,}12 + 0{,}379 + 0{,}409) = 1{,}3;$$

– через t = 0,5 с, т.е. в момент времени нового отключения выключателя В-1:

$$U_{\text{К}_{t=0{,}5}} = 1{,}3 + (0{,}77 - 1{,}3)e^{-\frac{0{,}5}{2{,}86}} = 0{,}855.$$

Следовательно, подъем возбуждения к этому времени еще не закончен.

Искомый ток находим по напряжению на выводах генератора:

$$I_{\text{К}_{t=0{,}5}}^{(1)} = \frac{3 \cdot 0{,}855}{1{,}167 \cdot 1{,}71} = 2{,}57 \text{ или } I_{\text{К}_{t=0{,}5}}^{(1)} = 1{,}23 \text{ кА.}$$

Зная ток КЗ и используя следствия из граничных условий для случая однофазного КЗ, можно вычислить напряжения последовательностей в начале линии и построить диаграмму напряжений для момента времени t = 0,5 с после включения линии на однофазное КЗ. Напряжения последовательностей в месте КЗ:

$$U_{1\text{К}} = (X_{0\Sigma} + X_{2\Sigma})I_{1\text{К}} = 0{,}788 \cdot \frac{2{,}57}{3} = 0{,}68;$$

$$U_{2\text{К}} = -X_{2\Sigma}I_{1\text{К}}^{(1)} = 0{,}379 \cdot \frac{2{,}57}{3} = -0{,}326;$$

$$U_{0\text{К}} = -X_{0\Sigma}I_{1\text{К}}^{(1)} = 0{,}409 \cdot \frac{2{,}57}{3} = -0{,}354.$$

Напряжения последовательностей в начале линии на шинах в момент $t = 0{,}5$ с:

$$U_{1\text{Ш }0{,}5} = 0{,}68 + \frac{2{,}57}{3} \cdot 0{,}12 = 0{,}78;$$

$$U_{2\text{Ш }0{,}5} = -0{,}326 + \frac{2{,}57}{3} \cdot 0{,}12 = -0{,}225;$$

$$U_{0\text{Ш }0{,}5} = -0{,}354 + \frac{2{,}57}{3} \cdot 0{,}22 + \frac{0{,}166}{0{,}288} \cdot 0{,}2 = -0{,}051.$$

По известным напряжениям последовательностей строится векторная диаграмма (рис. 4.36).

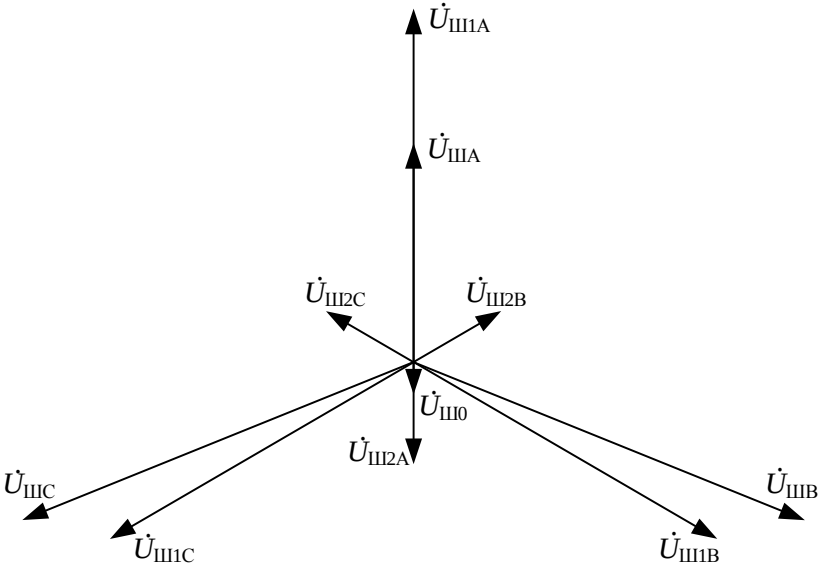


Рис. 4.36

Значения фазных напряжений на шинах определяются из диаграммы или с помощью операторов поворота a и a^2 на $\pm 120^0$.

ПРИМЕР 14

Для схемы, представленной на (рис. 4.37, *а*), требуется оценить пуск синхронного двигателя при неисправной одной фазе реактора (пусковые реакторы включены только в фазы В и С), если известны следующие параметры: $S_{\text{С}} = \infty$; $U_{\text{С}} = 110$ кВ; трансформатор Т – $S_{\text{Т}} =$ $=40$ МВА; $k_{\text{Т}} = 110/6{,}6$; нагрузка НГ – $S_{\text{НГ}} = 25$ МВ·А; $U_{\text{НГ}} = 6{,}3$ кВ; синхронный двигатель СД – $U_{\text{СД}} = 6$ кВ; $S_{\text{СД}} = 11{,}45$ МВА; $I^{*}_{\text{пуск}} = 6{,}7$; реактор типа РБК-6-600-6.

Решение

Отсутствие одной фазы пускового реактора в схеме рассматривается как однократная несимметрия, которую целесообразно представить (рис. 4.37, *б*) включением в фазу *А* дополнительного сопротивления ($-X_{\text{Р}}$).

С учетом сказанного на основании граничных условий строится комплексная схема замещения, изображенная на рис. 4.37, *в*. В расчетной схеме отсутствует схема нулевой последовательности, поскольку место продольной несимметрии не связано с заземленными нейтралями и нет путей для токов нулевой последовательности.

На комплексной схеме замещения цифрами обозначены значения сопротивлений всех элементов и ЭДС источников, рассчитанные в относительных единицах при выбранных базисных условиях

$$S_{\text{б}} = 40 \text{ МВА};\ U_{\text{б}\,I} = 110 \text{ кВ}; U_{\delta II} = 6{,}6 \text{ кВ}, I_{\text{б}\,II} = \frac{40}{\sqrt{3}\cdot 6{,}6} = 3{,}5 \text{ кА}.$$

Они определены по известным соотношениям:

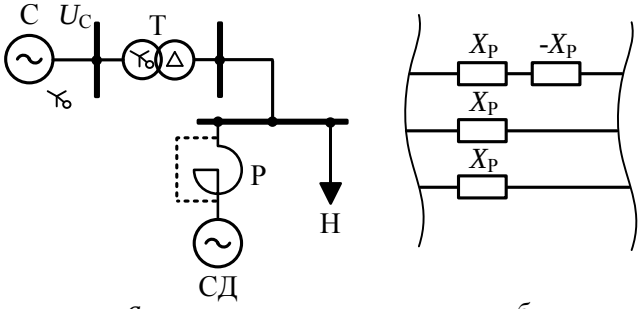
$$X_{\text{Р}} = \frac{X_{\text{Р}}}{100}\frac{I_{\text{б}}}{I_{\text{РН}}}\frac{U_{\text{РН}}}{U_{\text{б}}} = \frac{6}{100}\cdot\frac{3{,}5}{0{,}6}\cdot\frac{6}{6{,}6} = 0{,}32;$$

$$X_{1\text{СД}} = X_{2\text{СД}} = \frac{1}{6{,}7}\cdot\frac{40}{11{,}5}\cdot\left(\frac{6}{6{,}6}\right)^{2} = 0{,}43;$$

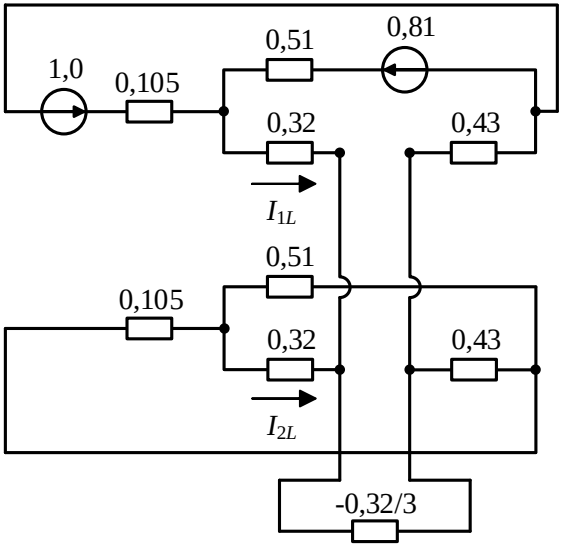
$$X_{1НГ} = X_{2НГ} = 0{,}35 \cdot \frac{40}{25} \cdot \left(\frac{6{,}3}{6{,}6}\right)^2 = 0{,}51;$$

$$X_{Т} = \frac{10{,}5}{100} \cdot \frac{40}{40} \cdot \left(\frac{6{,}6}{6{,}6}\right)^2 = 0{,}105;$$

$$U_{С} = 1;\ E''_{НГ} = \frac{6{,}3}{6{,}6} \cdot 0{,}85 = 0{,}81;$$



а *б*



в

Рис. 4.37

Далее из схемы замещения поэтапно находятся:

– суммарное сопротивление обратной последовательности

$$X_{2\Sigma} = 0{,}43 + 0{,}32 + 0{,}105//0{,}51 = 0{,}84;$$

– дополнительное сопротивление, включаемое в рассечку схемы прямой последовательности

$$\Delta X^{(1)} = 0{,}84//(-0{,}32/3) = -0{,}095;$$

– эквивалентные сопротивление и ЭДС прямой последовательности

$$X_{1\Sigma} = 0{,}105//0{,}51 + 0{,}32 + 0{,}43 - 0{,}095 = 0{,}745;$$

$$E_{1\Sigma} = (1 \cdot 0{,}51 + 0{,}81 \cdot 0{,}105)//(0{,}51 + 0{,}105) = 0{,}97.$$

Зная сопротивления и ЭДС, можно вычислить токи последовательностей в ветви двигателя:

$$I_{1L} = \frac{0{,}97}{0{,}745} = 1{,}3;$$

$$I_{2L} = -1{,}3 \cdot \frac{-0{,}095}{0{,}84} = 0{,}147.$$

Следовательно, пусковой ток двигателя будет

$$I_{n\text{Д}} = (1{,}3 + 0{,}147) \cdot 3{,}5 = 5{,}06 \text{ кА}.$$

Если пуск двигателя осуществляется по нормальной схеме, т.е. при включении реакторов во все фазы, то ток определяется

$$I_{n\text{Д}} = \frac{0{,}97 \cdot 3{,}5}{0{,}087 + 0{,}32 + 0{,}43} = 4{,}06 \text{ кА}.$$

Таким образом, отсутствие реактора в одной из фаз приводит к увеличению пускового тока приблизительно на 25%.

ПРИМЕР 15

Для проверки параметров срабатывания релейной защиты требуется определить установившийся ток КЗ за реактором для схемы на рис. 4.38 при включенном и отключенном выключателе связи с системой и заданных параметрах элементов сети:

Система С – $S_{\text{С}} = \infty$; $U_{\text{С}} = 115$ кВ; трансформатор Т – $S_{\text{Т}} = 25$ МВА; $k_{\text{Т}} = 115/10{,}5$; $u_{\text{к}} = 10{,}5\%$; турбогенератор ТГ – $S_{\text{ном}} = 75$ МВА; $U_{\text{Г}} =$

=10,5 кВ; ОКЗ =0,68; $I_{f\,\text{хх}}$ = 615 А; $I_{f\,\text{пр}}$ = 2370 А; нагрузка НГ – $S_{\text{НГ}}$ = =40 МВА; cosφ = =0,8; реактор Р – $I_{\text{Р ном}}$ = 300 А; $U_{\text{Р ном}}$ = 10 кВ; $X_{\text{Р}}$ = 6%.

Для обоих случаев оценить влияние АРВ.

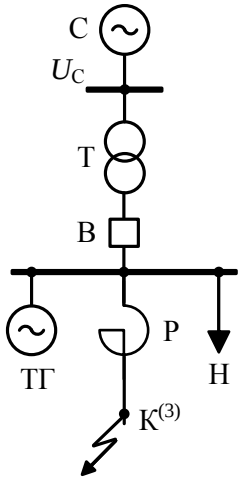


Рис. 4.38

Решение

Выбрав базисные условия: $S_{\text{б}}$ = 75 МВА; $U_{\text{б}\,I}$ = 10,5 кВ, можно определить:

$$I_{\text{б}\,I} = \frac{75}{\sqrt{3}\cdot 10{,}5} = 4{,}13 \text{ кА};$$

$$U_{\text{б}\,II} = 10{,}5 \cdot \frac{115}{10{,}5} = 115 \text{ кВ}.$$

Тогда сопротивления элементов схемы замещения (рис. 4.39), приведенные к базисным условиям, будут:

$$X_{\text{Г}} = \frac{1}{\text{ОКЗ}} = \frac{1}{0{,}68} = 1{,}47;\ X_{\text{НГ}} = 1{,}2 \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НГ}}} = 1{,}2 \cdot \frac{75}{40} = 2{,}25;$$

$$X_{\text{Р}} = 0{,}06 \cdot \frac{4{,}13}{0{,}3} \cdot \frac{10}{10{,}5} = 0{,}83;\ X_{\text{Т}} = 0{,}105 \cdot \frac{75}{25} = 0{,}315.$$

Коль скоро рассматривается установившийся режим КЗ, то ЭДС нагрузки принимается равной $E_{НГ}$= 0. Предшествующее значение ЭДС турбогенератора определяется по формуле

$$E_q = \sqrt{(U\cos\varphi)^2 + (U\sin\varphi + X_d I)^2}.$$

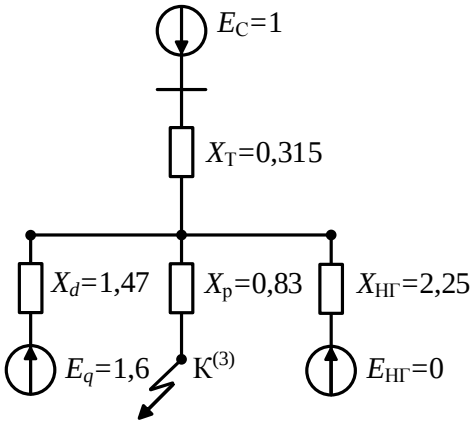


Рис. 4.39

Генератор работает в предшествующем режиме с

$$U_{Г*} = 1 \text{ и } I_{Г*} = \frac{S_{НГ}}{S_{Г\,ном}} = \frac{40}{75} = 0{,}535.$$

Следовательно,

$$E_q = \sqrt{(1\cdot 0{,}8)^2 + (1\cdot 0{,}6 + 0{,}535\cdot 1{,}47)^2} = 1{,}6.$$

Заметим, что эквивалентные значения ЭДС и сопротивления генератора и нагрузки тогда будут равны:

$$E_\Sigma = \frac{E_Г X_{НГ} + E_{НГ} X_Г}{X_{НГ} + X_Г} = \frac{1{,}6\cdot 2{,}25}{2{,}25 + 1{,}47} = 0{,}97;$$

$$X_\Sigma = X_{НГ}//X_Г = \frac{2{,}25\cdot 1{,}47}{2{,}25 + 1{,}47} = 0{,}89.$$

Если В отключен, а АРВ отсутствует, то можно определить:

$$I_К = \frac{0{,}97}{0{,}89 + 0{,}83} = 0{,}56; U_Г = 0{,}56\cdot 0{,}83 = 0{,}47;$$

$$I_{\Gamma} = \frac{1{,}6 - 0{,}47}{1{,}47} = 0{,}77.$$

При подключении системы (В включен) в отсутствие АРВ:

$$E'_{\Sigma} = \frac{0{,}97 \cdot 0{,}315 + 1 \cdot 0{,}89}{0{,}89 + 0{,}315} = 0{,}992;\ X'_{\Sigma} = \frac{0{,}315 \cdot 0{,}89}{0{,}315 + 0{,}89} = 0{,}23.$$

Следовательно,

$$I_{\text{К}} = 0{,}992/(0{,}23 + 0{,}89) = 0{,}9,$$

что на 61% больше, чем в отсутствие связи с системой:

$$U_{\Gamma} = 0{,}9 \cdot 0{,}83 = 0{,}75,$$

что значительно выше, при этом ток в ветви генератора становится на 25% меньше и составляет $I_{\Gamma} = (1{,}6 - 0{,}75)/1{,}47 = 0{,}58$.

Определяются те же электромагнитные параметры, но при включенном АРВ генератора. Определив $I_{f\text{пр}} = 2310/615 = 3{,}85$, можно вычислить критическое сопротивление

$$X_{\text{кр}} = X_d \frac{U_{\Gamma\,\text{ном}}}{E_{q\text{пр}} - U_{\Gamma\,\text{ном}}} = 1{,}47 \cdot \frac{1}{3{,}85 - 1} = 0{,}52.$$

Напомним, что $X_{\text{кр}}$ – это такое наименьшее сопротивление внешней сети, при коротком замыкании за которым генератор, работающий с предельным током возбуждения, способен еще обеспечить номинальное напряжение на своих зажимах $U_{\Gamma *} = 1$.

Заметим также, что при спрямлении характеристики холостого хода генератора через точку (1,1) справедливы соотношения $I_{f\text{пр}*} = E_{q\,\text{пр}*}$; $X_d = 1/\text{ОКЗ}$.

Поскольку внешнее сопротивление сети при отключенном выключателе В равно

$$X_{\text{вн}} = \frac{X_{\text{Р}} \cdot X_{\text{НГ}}}{X_{\text{Р}} + X_{\text{НГ}}} = \frac{0{,}83 \cdot 2{,}25}{0{,}83 + 2{,}25} = 0{,}61,$$

то в установившемся режиме при КЗ за реактором данный генератор будет работать в режиме номинального напряжения с U_{Γ}=1. Тогда ток в месте КЗ будет

$$I_{\text{К}} = 1/0{,}83 = 1{,}21,$$

а ток в генераторе

$$I_{\Gamma} = 1{,}21 + 1/2{,}25 = 1{,}66.$$

Этому току соответствует

$$E_q = 1 + 1{,}66 \cdot 1{,}47 = 3{,}44$$

или току возбуждения

$$I_{f\,\text{к}} = 3{,}44 \cdot 615 = 2110\ \text{А}.$$

При подключении системы возникает принципиальный вопрос о режиме работы генератора совместно с системой. Если предположить, что напряжения системы и генератора совпадают по фазе, то подключение системы не изменяет ситуацию и никак не сказывается на токе в месте КЗ. Однако, на самом деле, фазы напряжения системы и ЭДС генератора отличаются и при КЗ имеет место уравнительный ток между системой и генератором, который увеличивает реакцию статора и стремится снизить напряжение генератора. Но генератор будет при наличии запаса возбуждения какое-то время препятствовать этому, доводя ток возбуждения до $I_{f\text{пр}}$. Если угол между $U_\text{С}$ и E_q генератора будет продолжать увеличиваться, то $U_\text{Г}$ начнет снижаться. Можно для каждого конкретного случая найти угол δ, соответствующий $E_{q\ \text{пр}}$, при котором напряжение генератора равно номинальному значению $U_{\text{Г ном}}$.

После подключения системы выключателем В схема представит собой «трехлучевую звезду» (рис. 4.40, *а*).

Преобразуя «звезду» в «треугольник», можно найти сопротивление ветви Г-С (рис. 4.40, *б*)

$$X_\text{ГС} = 1{,}47 + 0{,}315 + \frac{0{,}315 \cdot 1{,}47}{0{,}61} = 2{,}55.$$

Аналогично вычисляются сопротивления

$$X_\text{ГК} = 0{,}49;$$

$$X_\text{СК} = 1{,}06.$$

Тогда ток в ветви, образованной параллельным соединением ветвей нагрузки и реактора при угле δ между $E_\text{Г}$ и $U_\text{С}$ будет

$$\dot{I} = -j\frac{1}{1{,}06} - j\frac{3{,}85\angle\delta}{4{,}98} = -j0{,}94 - j0{,}78\angle\delta.$$

Модуль тока

$$I = \sqrt{0{,}78^2 + 0{,}94^2 + 2 \cdot 0{,}78 \cdot 0{,}94 \cdot cos\,\delta}.$$

Угол δ можно найти из условия

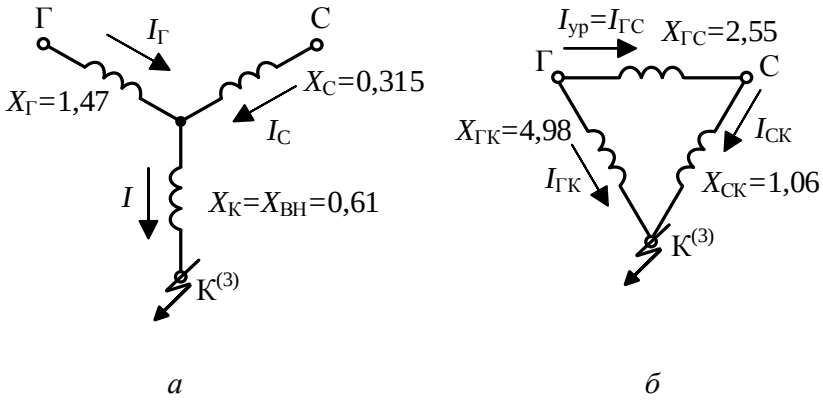
$$U_\Gamma = X_К I = 0{,}61\sqrt{1{,}5 + 1{,}47\,cos\,\delta} = 1.$$

Отсюда $cos\,\delta = 0{,}81$ и $\delta = 36^0$.

Чтобы рассчитать токи от системы и от генератора при данном условии когда $E_{f\ пр}$=3,85 и $E_С$=1, надо найти собственные сопротивления (проводимости) цепи (рис. 4.40, *б*)

$$X_{ГГ} = \frac{4{,}98 \cdot 2{,}25}{4{,}98 + 2{,}25} = 1{,}69;$$

$$X_{СС} = \frac{1{,}06 \cdot 2{,}25}{1{,}06 + 2{,}25} = 0{,}75.$$



а *б*

Рис. 4.40

Тогда токи будут равны

$$\dot{I}_\Gamma = 3{,}85\angle 36^0 \cdot \frac{1}{j1{,}69} - 1 \cdot \frac{1}{j2{,}25} = 1{,}94\angle -46^0;$$

$$\dot{I}_С = 1 \cdot \frac{1}{j0{,}75} - 3{,}85\angle 36^0 \cdot \frac{1}{j2{,}55} = 0{,}89\angle -175^0.$$

Для полученных соотношений построена векторная диаграмма (рис. 4.41).

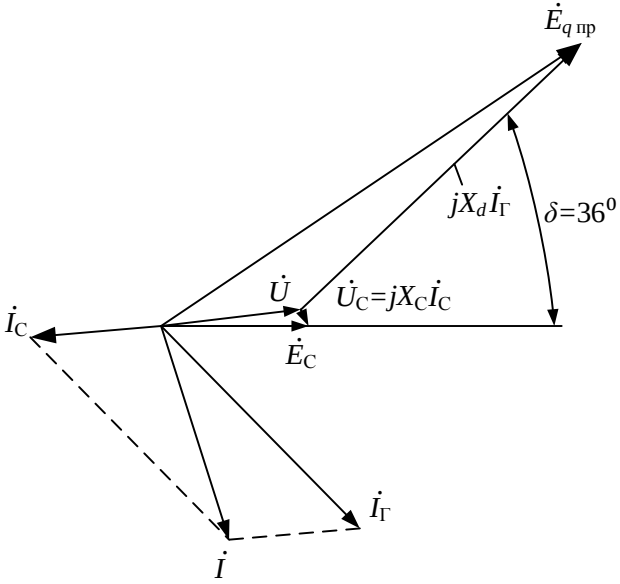


Рис. 4.41

Из расчета видно, что при предельном угле $\delta=36^0$ значение тока в ветви генератора увеличилось на 16,9%:

$$\Delta\% = \frac{1{,}94 - 1{,}66}{1{,}66} \cdot 100\% = 16{,}9\%.$$

ПРИМЕР 16

Для схемы рис. 4.42 вычислить токи однофазного короткого замыкания (КЗ) в местах установки зашит при КЗ в расчетных точках: К1, К2, К3, К4. В расчете принять следующие условия:

- определяются установившиеся значения токов КЗ;
- активными сопротивлениями элементов схемы пренебречь;
- расчет производится в именованных единицах;
- нейтрали всех трансформаторов 110/10 кВ заземлены.

Параметры основных элементов схемы: система: система представляет собой питающий трансформатор мощностью $S_{Т1}$=200 МВА; $u_к$ =10,5%; номинальное напряжение $U_С$ = =110 кВ;воздушные линии электропередачи: длина и тип провода $l_{Л1}$ = 60 км АС-150, $l_{Л2}$ = 20 км АС-150, $l_{Л3}$ = 50 км АС-150, $l_{Л4}$ = 15 км АС-120; силовые трансформаторы: Т1: $S_{Т1}$ = 16МВА, $u_к$ =10,5%, $k_Т$ = =115/11; Т2: $S_{Т2}$ = 10 МВА, $u_к$ =10,5%, $k_Т$ = 115/11; Т3: $S_{Т3}$ = 25 МВА, $u_к$ = 10,5% , $k_Т$ = 115/11.

Решение

Расчет начинается с обозначения на принципиальной схеме ступеней напряжения. Затем выбирается основное напряжение. Все вычисленные сопротивления и электродвижущие силы элементов схемы приводятся к данному напряжению.

В исходной схеме есть 2 ступени напряжения: 115 кВ и 10,5 кВ. В качестве основной выбирается ступень № I ($U_{осн}$ = 115 кВ).

При определении параметров схемы замещения приведенные значения ЭДС источников энергии и сопротивления различных элементов схемы следует определяются по формулам

$$\overset{\circ}{E} = E \cdot k_{Т1} \cdot k_{Т2} \cdot \ldots \cdot k_{Тm};$$

$$\overset{\circ}{X} = X \cdot {k_{Т1}}^2 \cdot {k_{Т2}}^2 \cdot \ldots \cdot {k_{Тm}}^2,$$

где $\overset{\circ}{E}$ и $\overset{\circ}{X}$ – приведенные значения ЭДС источника энергии и сопротивления какого-либо элемента исходной расчетной схемы; E и X – их истинные значения; $k_{Т1}, k_{Т2}, k_{Тm}$– коэффициенты трансформации трансформаторов или автотрансформаторов, включенных между ступенью напряжения сети, где находятся элементы с подлежащими приведению ЭДС E и сопротивлением X, и основной ступенью напряжения.

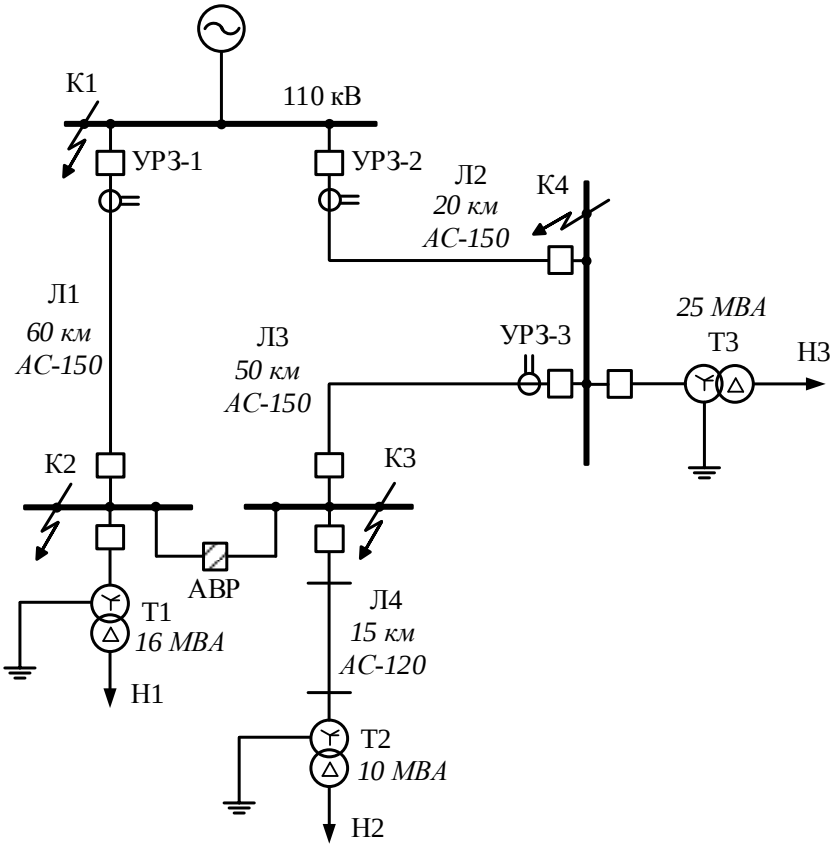


Рис. 4.42 — Исходная расчетная схема

Для расчета однофазного КЗ необходимо составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей и определить их результирующие сопротивления $X_{1\Sigma}$, $X_{2\Sigma}$, $X_{0\Sigma}$ до точки К-1.

1. Схема замещения прямой последовательности представлена на рис. 4.43.

Вычисляются параметры элементов схемы замещения прямой последовательности:

1) Система:

ЭДС системы вычисляется по формуле

$$E_{\text{С}} = \frac{U_{\text{ср}}}{\sqrt{3}} = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66{,}4 \text{ кВ}.$$

Сопротивление системы (система представляет собой силовой трансформатор питающей подстанции):

$$X_{\text{С}} = \frac{u_{\text{к}}\%}{100}\frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном Т}}} = \frac{10{,}5}{100}\cdot\frac{110^2}{200} = 6{,}35 \text{ Ом}.$$

2) ЛЭП:

Сопротивление ЛЭП определяется по формуле (сопротивления линии прямой и обратной последовательности равны)

$$X_{1,\text{Л1}} = X_{2,\text{Л1}} = X_{1\text{уд,Л1}} \cdot l_{\text{Л1}} = 0{,}4 \cdot 60 = 24 \text{ Ом}.$$

Удельные сопротивления для данного типа провода определяются из справочной литературы [3].

Сопротивления остальных линий вычислены аналогично и сведены в табл. 3.

Таблица 3 — Вычисление сопротивлений прямой последовательности ЛЭП

№ Линии	Л1	Л2	Л3	Л4
Марка провода	АС-150	АС-150	АС-150	АС-120
Удельное сопротивление прямой, обратной последовательностей, Ом/км	0,4	0,4	0,4	0,4
Длина линии, км	60	20	50	15
Сопротивление линии, Ом	24	8	20	6

3) Силовые трансформаторы

Сопротивление трансформатора вычисляется по формуле

$$X_{1,\text{Т1}} = \frac{u_\text{к}\%}{100} \cdot \frac{{U_\text{б}}^2}{S_\text{ном}} = \frac{10{,}5}{100} \cdot \frac{110^2}{16} = 79{,}41 \text{ Ом}.$$

Сопротивления остальных трансформаторов вычислены аналогично и сведены в табл. 4.

Таблица 4 — Вычисление сопротивлений прямой последовательности трансформаторов

№ Трансформатора	Т1	Т2	Т3
Марка трансформатора	ТДН-16000/110	ТДН-10000/110	ТДН-25000/110
Номинальная мощность, МВА	16	10	25
Напряжение короткого замыкания, %	10,5	10,5	10,5
Сопротивление трансформатора, Ом	79,41	127,05	50,82

4) Нагрузка

Сопротивление нагрузки:

$$X_{1,\text{Н1}} = 1{,}2 \cdot \frac{{U_\text{ном}}^2}{S_\text{ном}} \cdot {k_\text{Т}}^2 = 1{,}2 \cdot \frac{10{,}5^2}{8} \cdot \left(\frac{115}{11}\right)^2 = 1807{,}5 \text{ Ом};$$

Сопротивления остальных нагрузок вычислены аналогично и сведены в табл. 5.

Таблица 5 — Вычисление сопротивлений нагрузок

№ Нагрузки	Н1	Н2	Н3
Номинальная мощность, МВА	8	5	15
Сопротивление прямой последовательности, о.е.	1,2	1,2	1,2
Сопротивление нагрузки прямой последовательности, Ом	1807,5	2892	964

Вычисляются сопротивления элементов схемы и наносятся на схему замещения.

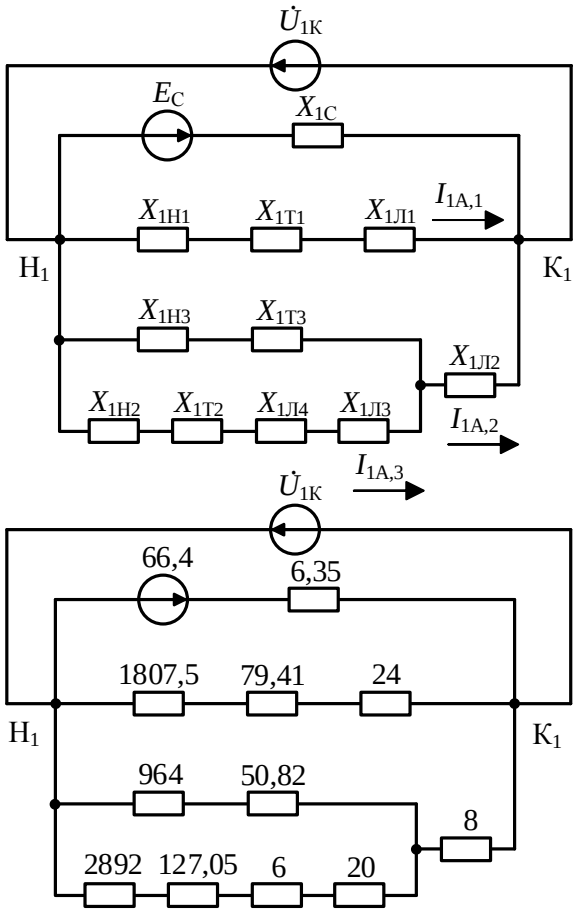


Рис. 4.43 — Схема замещения прямой последовательности

Схема замещения прямой последовательности преобразуется относительно места КЗ.

$$X_{1,1} = (X_{1Т3} + X_{1Н3})//(X_{1Л3} + X_{1Л4} + X_{1Т2} + X_{1Н2}) + X_{1Л2} = \\ = \frac{(50{,}82 + 964)\cdot(20 + 6 + 127{,}05 + 2892)}{50{,}82 + 964 + 20 + 6 + 127{,}05 + 2892} + 8 = \\ = 769{,}15 \text{ Ом};$$

$$X_{2,1} = X_1//(X_{1Л1} + X_{1Т1} + X_{1Н1}) = 548{,}41 \text{ Ом};$$

$$X_{1\Sigma} = X_{1С}//X_2 = \frac{6{,}35 \cdot 548{,}41}{6{,}35 + 548{,}41} = 6{,}28 \text{ Ом};$$

$$E_{1\Sigma} = \frac{E_С \cdot X_2}{X_{1С} + X_2} = \frac{66{,}4 \cdot 548{,}41}{66{,}4 + 548{,}41} = 65{,}64 \text{ кВ}.$$

2. Схема замещения обратной последовательности, как правило, не отличается от схемы замещения прямой последовательности, за исключением того, что сопротивления нагрузки принимаются равными X=0,35 в относительных единицах. Схема замещения обратной последовательности представлена на рис 4.44.

Сопротивления обратной последовательности трансформаторов и линий принимаются равными их сопротивлениям прямой последовательности, а сопротивления нагрузок вычисляются следующим образом:

Сопротивление нагрузки:

$$X_{2,Н1} = 0{,}35 \cdot \frac{{U_{ном}}^2}{S_{ном}} \cdot {k_Т}^2 = 0{,}35 \cdot \frac{10{,}5^2}{8} \cdot \left(\frac{115}{11}\right)^2 = 527{,}2 \text{ Ом};$$

Сопротивления остальных нагрузок вычислены аналогично и сведены в табл. 6.

Таблица 6 — Вычисление сопротивлений нагрузок

№ Нагрузки	Н1	Н2	Н3
Номинальная мощность, МВА	8	5	15
Сопротивление обратной последовательности, о.е.	0,35	0,35	0,35
Сопротивление нагрузки обратной последовательности, Ом	527,2	843,5	281,17

Вычислив сопротивления элементов схемы, наносим их на схему замещения.

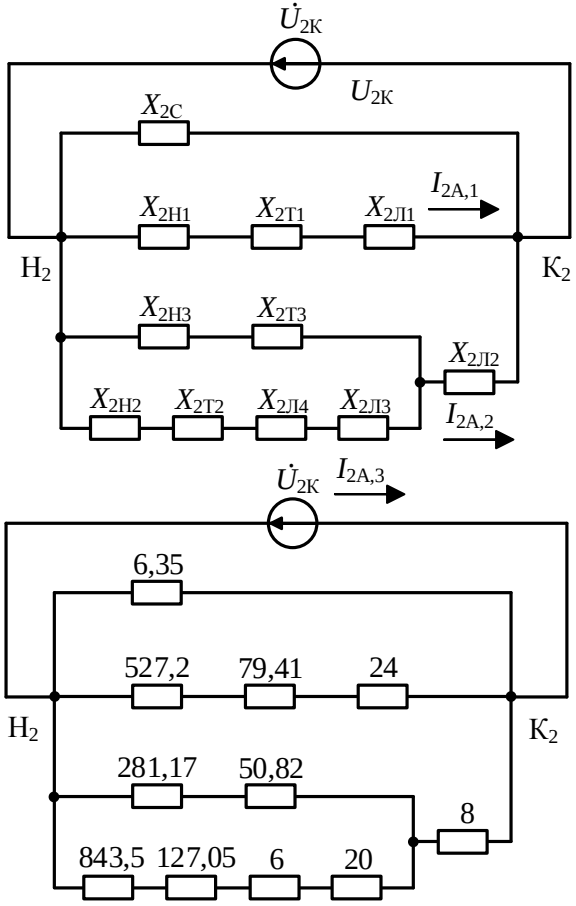


Рис. 4.44 — Схема замещения обратной последовательности

Схема замещения обратной последовательности преобразуется относительно места КЗ.

$$X_{1,2} = (X_{2Т3} + X_{2Н3})// (X_{2Л3} + X_{2Л4} + X_{2Т2} + X_{2Н2}) + X_{2Л2} = \\ = \frac{(50{,}82 + 281{,}17) \cdot (20 + 6 + 127{,}05 + 843{,}5)}{50{,}82 + 281{,}17 + 20 + 6 + 127{,}05 + 843{,}5} + 8 \\ = 257{,}03 \text{ Ом};$$

$$X_{2,2} = X_1// (X_{2Л1} + X_{2Т1} + X_{2Н1}) = 182{,}6 \text{ Ом};$$

$$X_{2\Sigma} = X_{2С}// X_2 = \frac{6{,}35 \cdot 182{,}6}{6{,}35 + 182{,}6} = 6{,}13 \text{ Ом}.$$

3. Схема замещения нулевой последовательности представлена на рис. 4.45.

Сопротивления нулевой последовательности элементов схемы.

1) Сопротивления нулевой последовательности системы и трансформаторов, у которых хотя бы одна обмотка соединена в треугольник, допустимо принимать равными сопротивлениям прямой последовательности. В исходной рабочей схеме данной задачи у всех трансформаторов имеется обмотка, соединенная в треугольник, поэтому их сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности равны.

2) Линии

Значение отношения между сопротивлениями прямой и обратной последовательностей для такого типа линии равно 3,5.

Табл. 7 — Вычисление сопротивлений нулевой последовательности ЛЭП

№ Линии	Л1	Л2	Л3	Л4
Марка провода	АС-150	АС-150	АС-150	АС-120
Удельное сопротивление нулевой последовательности, Ом/км	1,4	1,4	1,4	1,4
Длина линии, км	60	20	50	15
Сопротивление Л нулевой последовательности, Ом	84	28	70	21

3) Сопротивления нагрузок в данном случае не входят в схему замещения нулевой последовательности, поскольку они подключены к обмоткам трансформаторов, соединенным в треугольник, что препятствует прохождению через сопротивления нагрузки токов нулевой последовательности.

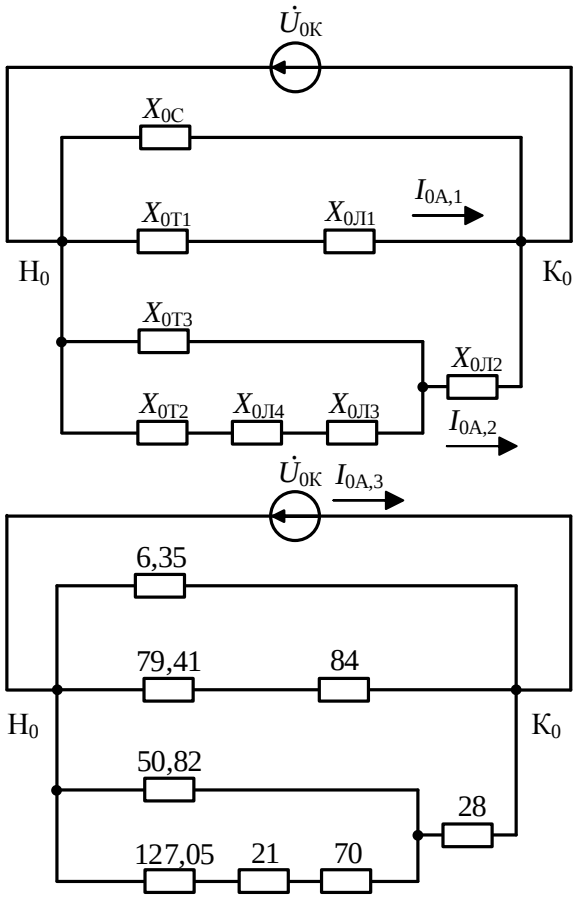


Рис. 4.45 — Схема замещения нулевой последовательности

Схема замещения нулевой последовательности преобразуется относительно места КЗ.

$$X_{1,0} = X_{0Т3} // (X_{0Л3} + X_{0Л4} + X_{0Т2}) + X_{0Л2} =$$
$$= \frac{50{,}82 \cdot (70 + 21 + 127{,}05)}{50{,}82 + 70 + 21 + 127{,}05} + 28 = 69{,}21 \text{ Ом};$$
$$X_{2,0} = X_1 // (X_{0Л1} + X_{0Т1}) = \frac{69{,}21 \cdot (84 + 79{,}41)}{69{,}21 + 84 + 79{,}41} = 48{,}62 \text{ Ом};$$
$$X_{0\Sigma} = X_{2С} // X_2 = \frac{6{,}35 \cdot 48{,}62}{6{,}35 + 48{,}62} = 5{,}63 \text{ Ом}.$$

Комплексная схема замещения однофазного КЗ показана на рис. 4.46. Она построена на основании следствий из граничных условий:

$$\dot{I}_{1К}^{(1)} = \dot{I}_{2К}^{(1)} = \dot{I}_{0К}^{(1)};\ \dot{U}_{1К}^{(1)} + \dot{U}_{2К}^{(1)} + \dot{U}_{0К}^{(1)} = 0.$$

Получив результирующие сопротивления $X_{1\Sigma}$, $X_{2\Sigma}$, $X_{0\Sigma}$, подставляем их в упрощенную комплексную схему замещения для расчета тока однофазного КЗ.

Упрощенная комплексная схема показана на рис. 4.47.

Определение тока и напряжения в месте КЗ.

Ток прямой последовательности в поврежденной фазе определяется по формуле

$$I_{1А} = \frac{E_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} = \frac{65{,}64}{6{,}28 + 6{,}14 + 5{,}62} = 3{,}64 \text{ кА}.$$

Токи прямой, обратной и нулевой последовательностей в поврежденной фазе при однофазном КЗ равны.

$$I_{1КА} = I_{2КА} = I_{0КА} = 3{,}64 \text{ кА}.$$

Ток поврежденной фазы

$$I_{КА} = I_{1КА} + I_{2КА} + I_{0КА} = 3 \cdot 3{,}64 = 10{,}92 \text{ кА}.$$

Токи в «здоровых фазах» отсутствуют.

$$I_В = 0;\ I_С = 0.$$

Напряжение прямой последовательности в месте повреждения, исходя из комплексной схемы замещения, определяется по формуле

$$\dot{U}_{1КА} = j(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) \cdot I_{1КА} = j(6{,}13 + 5{,}63) \cdot 3{,}64 = j42{,}81 \text{ кВ}.$$

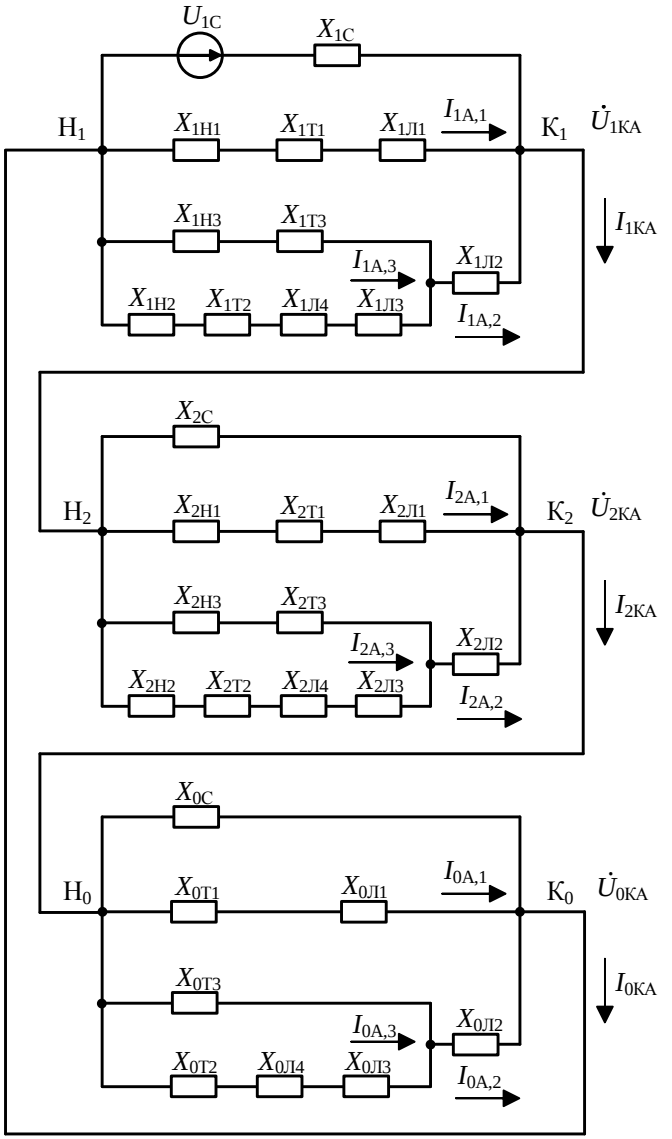


Рис. 4.46 — Комплексная схема замещения однофазного КЗ

Напряжение обратной последовательности

$$\dot{U}_{2\text{КА}} = -jX_{2\Sigma} \cdot I_{2\text{КА}} = j(-6{,}13 \cdot 3{,}64) = -j22{,}31 \text{ кВ}.$$

Напряжение нулевой последовательности

$$\dot{U}_{0\text{КА}} = -jX_{0\Sigma} \cdot I_{0\text{КА}} = j(-5{,}63 \cdot 3{,}64) = -j20{,}5 \text{ кВ}.$$

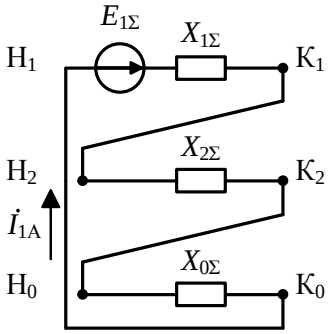


Рис. 4.47 — Упрощенная комплексная схема

Напряжение прямой последовательности в месте повреждения, исходя из комплексной схемы замещения, определяется по формуле

$$\dot{U}_{1\text{КА}} = j(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) \cdot I_{1\text{КА}} = j(6{,}13 + 5{,}63) \cdot 3{,}64 = j42{,}81 \text{ кВ}.$$

Напряжение обратной последовательности

$$\dot{U}_{2\text{КА}} = -jX_{2\Sigma} \cdot I_{2\text{КА}} = j(-6{,}13 \cdot 3{,}64) = -j22{,}31 \text{ кВ}.$$

Напряжение нулевой последовательности

$$\dot{U}_{0\text{КА}} = -jX_{0\Sigma} \cdot I_{0\text{КА}} = j(-5{,}63 \cdot 3{,}64) = -j20{,}5 \text{ кВ}.$$

Используя метод симметричных составляющих, можем определить напряжение на «здоровых фазах».

$$\dot{U}_{\text{КВ}} = a^2\dot{U}_{1\text{КА}} + a\dot{U}_{2\text{КА}} + \dot{U}_{0\text{КА}} =$$

$$= j(a^2 \cdot 42{,}81 \ - a \cdot 22{,}31 - 20{,}5) = (56{,}4 - j30{,}75) \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{\text{КС}} = a\dot{U}_{1\text{КА}} + a^2\dot{U}_{2\text{КА}} + \dot{U}_{0\text{КА}} =$$

$$= j(a \cdot 42{,}81 - a^2 \cdot 22{,}31 - 20{,}5) = (-56{,}4 - j30{,}75) \text{ кВ}.$$

Напряжение поврежденной фазы равно нулю.

$$U_{\text{КА}} = \dot{U}_{1\text{КА}} + \dot{U}_{2\text{КА}} + \dot{U}_{0\text{КА}} = 0.$$

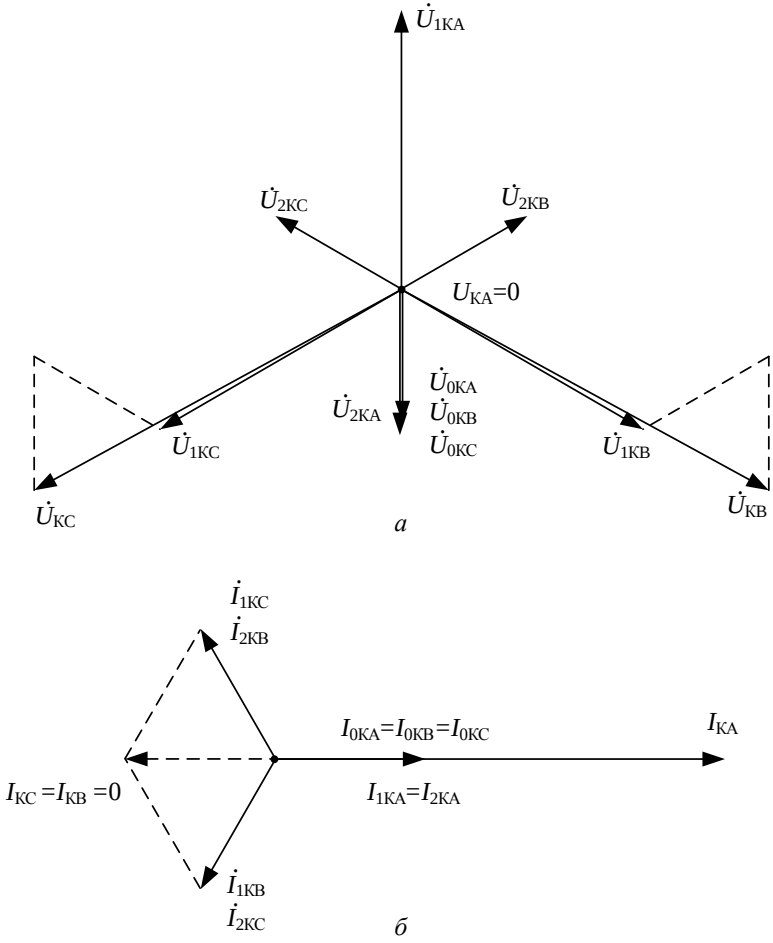


Рис. 4.48 — Векторные диаграммы напряжений (*а*) и токов (*б*) в точке короткого замыкания

Токи в местах расположения защит.

В месте расположения защиты УРЗ-1:

$$\dot{I}_{1\text{A},1} = \frac{0 - \dot{U}_{1\text{КА}}}{j(X_{1,\text{Н1}} + X_{1,\text{Т1}} + X_{1,\text{Л1}})} = \frac{-j42{,}81}{j(1807{,}5 + 79{,}41 + 24)} = \\ = -0{,}0224 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{2\text{A},1} = \frac{0 - \dot{U}_{2\text{КА}}}{j(X_{2,\text{Н1}} + X_{2,\text{Т1}} + X_{2,\text{Л1}})} = \frac{j22{,}31}{j(527{,}2 + 79{,}41 + 24)} = \\ = 0{,}0354 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{0\text{A},1} = \frac{0 - \dot{U}_{0\text{КА}}}{j(X_{0,\text{Т1}} + X_{0,\text{Л1}})} = \frac{j20{,}5}{j(79{,}41 + 84)} = 0{,}125 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{\text{A},1} = \dot{I}_{1\text{A},1} + \dot{I}_{2\text{A},1} + \dot{I}_{0\text{A},1} = -0{,}0224 + 0{,}0354 + 0{,}125 = 0{,}138 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{\text{B},1} = a^2\dot{I}_{1\text{A},1} + a\dot{I}_{2\text{A},1} + \dot{I}_{0\text{A},1} = \\ = a^2 \cdot (-0{,}0224) + a \cdot 0{,}0354 + 0{,}125 = (0{,}1185 + j0{,}05) \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{\text{C},1} = a\dot{I}_{1\text{A},1} + a^2\dot{I}_{2\text{A},1} + \dot{I}_{0\text{A},1} = \\ = a \cdot (-0{,}0224) + a^2 \cdot 0{,}0354 + 0{,}125 = (0{,}1185 - j0{,}05) \text{ кА}.$$

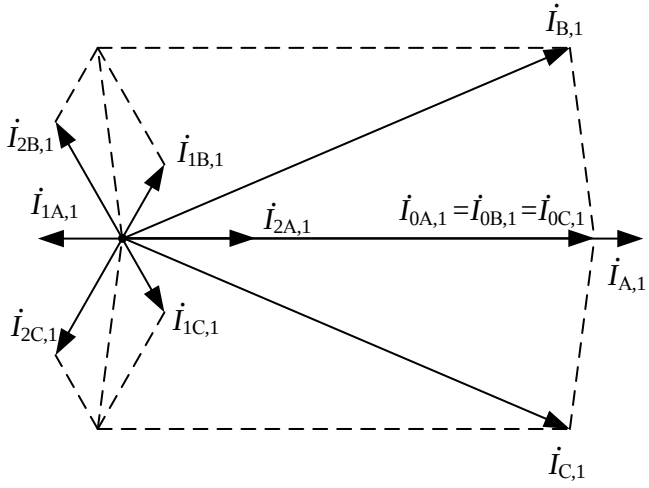


Рис. 4.49 — Векторная диаграмма токов в месте расположения защиты УРЗ-1

В месте расположения защиты УРЗ-2:

$$\dot{I}_{1А,2} = \frac{0 - \dot{U}_{1КА}}{jX_{1,1}} = \frac{-j42{,}81}{j769{,}15} = -0{,}056 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{2А,2} = \frac{0 - \dot{U}_{2КА}}{jX_{1,2}} = \frac{j22{,}31}{j257{,}03} = 0{,}087 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{0А,2} = \frac{0 - \dot{U}_{0КА}}{jX_{1,0}} = \frac{j20{,}5}{j69{,}21} = 0{,}3 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{А,2} = \dot{I}_{1А,2} + \dot{I}_{2А,2} + \dot{I}_{0А,2} = -0{,}056 + 0{,}087 + 0{,}3 = 0{,}331 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{В,2} = a^2\dot{I}_{1А,2} + a\dot{I}_{2А,2} + \dot{I}_{0А,2} =$$
$$= a^2 \cdot (-0{,}056) + a \cdot 0{,}087 + 0{,}3 = (0{,}285 + j0{,}124) \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{С,2} = a\dot{I}_{1А,2} + a^2\dot{I}_{2А,2} + \dot{I}_{0А,2} =$$
$$= a \cdot (-0{,}056) + a^2 \cdot 0{,}087 + 0{,}3 = (0{,}285 - j0{,}124) \text{ кА}.$$

В месте расположения защиты УРЗ-3:

$$\dot{I}_{1А,3} = \dot{I}_{1А,2}\frac{(X_{1Н2} + X_{1Т2} + X_{1Л4} + X_{1Л3})}{(X_{1Н2} + X_{1Т2} + X_{1Л4} + X_{1Л3} + X_{1Т3} + X_{1Н3})} =$$
$$= -0{,}056 \cdot \frac{(2892 + 127{,}05 + 6 + 20)}{(2892 + 127{,}05 + 6 + 20 + 50{,}82 + 964)} =$$
$$= -0{,}042 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{2А,3} = \dot{I}_{2А,2}\frac{(X_{2Н2} + X_{2Т2} + X_{2Л4} + X_{2Л3})}{(X_{2Н2} + X_{2Т2} + X_{2Л4} + X_{2Л3} + X_{2Т3} + X_{2Н3})} =$$
$$= 0{,}087 \cdot \frac{(843{,}5 + 127{,}05 + 6 + 20)}{(843{,}5 + 127{,}05 + 6 + 20 + 50{,}82 + 281{,}17)} =$$
$$= 0{,}065 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{0\text{A},3} = \dot{I}_{0\text{A},2}\frac{(X_{0\text{T}2} + X_{0\text{Л}4} + X_{1\text{Л}3})}{(X_{0\text{T}2} + X_{0\text{Л}4} + X_{0\text{Л}3} + X_{0\text{Л}2} + X_{0\text{T}3})} = \\ = 0{,}3 \cdot \frac{(127{,}05 + 21 + 70)}{(127{,}05 + 21 + 70 + 50{,}82)} = 0{,}243 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{\text{A},3} = \dot{I}_{1\text{A},3} + \dot{I}_{2\text{A},3} + \dot{I}_{0\text{A},3} = -0{,}042 \ + 0{,}065 + 0{,}243 = 0{,}266 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{\text{B},3} = a^2\dot{I}_{1\text{A},3} + a\dot{I}_{2\text{A},3} + \dot{I}_{0\text{A},3} = a^2 \cdot (-0{,}042) + a \cdot 0{,}065 + 0{,}243 = \\ = (0{,}232 + j0{,}093) \text{ кА};$$

$$\dot{I}_{\text{C},3} = a\dot{I}_{1\text{A},3} + a^2\dot{I}_{2\text{A},3} + \dot{I}_{0\text{A},3} = a \cdot (-0{,}042) + a^2 \cdot 0{,}065 + 0{,}243 = \\ = (0{,}232 - j0{,}093) \text{ кА}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ульянов С.А.* Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1964. – 704 с.

2. *Руководящие* указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦЭНАС, 2001. – 152 с.

3. *Неклепаев Б.Н.* Электрическая часть станций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособие для вузов / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

4. *Руководящие* указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

5. *Щедрин В.А.* Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие / В.А. Щедрин. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. – 422 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

1. СОСТАВЛЕНИЕ И УПРОЩЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ЕДИНИЦ 10

2. ВЫБОР РАСЧЕТНОГО СЛУЧАЯ. УДАРНЫЙ ТОК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ 20

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОГО ПЕРЕХОДНОГО И СВЕРХПЕРЕХОДНОГО ТОКОВ ТРЕХФАЗНОГО КЗ 31

3.1. Трехфазное короткое замыкание на выводах синхронного генератора 31

3.2. Теорема о постоянстве потокосцепления, переходные ЭДС и сопротивления синхронной машины 32

3.3. Влияние и приближенный учет демпферных обмоток 40

4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ 56

4.1. Токи и напряжения в месте несимметричного короткого замыкания 56

4.2. Правило эквивалентности прямой последовательности . 61

4.3. Составление схем замещения различных последовательностей 64

4.4. Деформация векторных диаграмм токов и напряжений при удалении от места повреждения и при переходе через трансформатор 77

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 137

НЕГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИНСТИТУТ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Перечень программ повышения квалификации НОУ ДПО «ИПК РЗА»:

- Релейная защита в распределительных электрических сетях. Новые технологии
- Режимы нейтрали современных распределительных электрических сетей 6-35 кВ. Защита от перенапряжений
- Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем. Новые технологии
- Управление режимами компенсации емкостных токов замыкания на землю
- Определение места повреждения на линиях электропередачи. Аппаратные и программные методы
- Дальнее и ближнее резервирование защит трансформаторов ответвительных подстанций
- Расчеты релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем
- Резидентное и прикладное программное обеспечение микропроцессорных устройств производства «НПП Бреслер»
- Моделирование процессов в электроэнергетических системах
- Электрооборудование. Новые функциональные возможности
- Электроснабжение. Новые технологии
- Оборудование, выпускаемое «НПП Бреслер». Применение в проектах и эксплуатация
- Способы выполнения автоматики управления дугогасящими реакторами производства «НПП Бреслер»
- Программно-технический комплекс мониторинга и управления энергообъектом BresMon производства «НПП Бреслер»
- Особенности проверки сложных устройств РЗиА при помощи оборудования серии «РЕТОМ»
- Проверка и настройка высокочастотной аппаратуры релейной защиты и автоматики с помощью испытательного комплекса РЕТОМ-ВЧ
- Особенности испытаний энергооборудования при помощи оборудования серии «РЕТОМ»
- Применение испытательного оборудования серии «РЕТОМ» для диагностики устройств РЗА и первичного оборудования энергетики
- Электробезопасность
- Охрана труда для руководителей и специалистов
- Обеспечение пожарной безопасности энергетических и промышленных предприятий

Директор ИПК РЗА
доктор технических наук, профессор А.В. Булычев

Щедрин Владимир Александрович

Примеры расчетов симметричных и несимметричных повреждений в электроэнергетических системах

Учебное пособие

Редактор И.Б. Булычева

Компьютерная верстка Е.Г. Ларионова

Отпечатано с готового оригинал-макета