

Глава 3. ОСОБЫЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

3.1. Общая характеристика особых режимов

Условиями нормального режима работы трехфазной сети переменного тока являются симметрия параметров и отсутствие высших гармоник тока и напряжения. Однако при работе электрических систем встречаются режимы, не удовлетворяющие этим условиям. Примером этого может являться режим, возникающий при длительной работе какой-либо линии с отключенным фазным проводом. Другим примером служит сеть, значительную часть нагрузки которой определяют выпрямительные установки. В первом случае оказывается существенно нарушенной симметрия параметров режима, во втором могут быть искажены синусоиды токов и напряжений в сети. Такие режимы называют особыми.

Несимметричные режимы в электрических сетях могут являться следствием различия либо сопротивлений в цепях отдельных фаз, либо заданных фазных токов нагрузки. Первый случай имеет место в неполнофазных режимах, а также при сооружении линий без транспозиции, с неполным или удлиненным циклом транспозиции. Длительные неполнофазные режимы осуществляются для повышения надежности электроснабжения и уменьшения ущерба от недоотпуска энергии в тех случаях, когда недоотпуск вызван повреждением одной или двух фаз сети. Использование удлиненных циклов транспозиции позволяет также повысить надежность работы электрической сети. Объясняется это тем, что значительная часть из общего числа аварий на воздушных линиях (ВЛ) связана с повреждениями на транспозиционных опорах, поэтому осуществление транспозиции в ограниченном числе точек линии снижает количество аварийных выходов линии из работы.

Различие по фазам нагрузочных токов вызывается либо однофазной нагрузкой, либо специфическими особенностями эксплуатационных режимов некоторых трехфазных потребителей (например, дуговых печей).

Искажение симметрии отрицательно сказывается на рабочих и технико-экономических характеристиках генераторов и потребителей электроэнергии. Это обстоятельство требует ограничения степени несимметрии, которая рассматривается ГОСТ как один из показателей нормируемого качества электроэнергии. Поэтому допустимость того или иного несимметричного режима должна проверяться соответствующими расчетами. В тех случаях, когда степень несимметрии принимает недопустимо большие значения, проводятся специальные мероприятия, позволяющие уменьшить несимметрию токов и напряжений. Одним из них является отключение элемента сети, являющегося источником появления несимметрии. Второе мероприятие заключается в сооружении резервных линий или установке резервных групп трансформаторов. Степень несимметрии может быть снижена также при уменьшении нагрузки сети, содержащей несимметричные элементы. В этом можно убедиться, рассмотрев схему тупиковой линии (рис. 3.1). Очевидно, что независимо от того, чем вызвана несимметрия режима — различием сопротивлений \dot{Z}_a , \dot{Z}_b и \dot{Z}_c или

несимметрией нагрузки, уменьшение токов нагрузки в пределе до нуля ($I_H \rightarrow 0$) должно приближать значение напряжения в конце линии к значению напряжения в ее начале. Рассматривая последнее как симметричное, можно прийти к выводу о снижении степени несимметрии при уменьшении нагрузки.

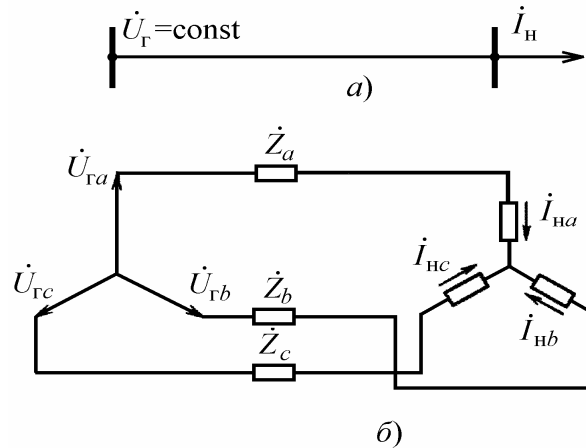


Рис. 3.1. Тупиковая линия: а – схема линии; б – схема замещения

Такое мероприятие может быть связано с определенным народнохозяйственным ущербом, если снижение нагрузки требует отключения части потребителей. Еще одним мероприятием является применение устройств, способных оказать симметрирующее воздействие на параметры режима сети. К числу таких устройств относятся батареи конденсаторов и некоторые типы статических регулируемых источников реактивной мощности.

Особые режимы, связанные с появлением высших гармоник тока и напряжения в электрической сети, приводят к искажению синусоид тока и напряжения. ГОСТ определяет предельно допустимое искажение синусоиды. Поэтому требуется оценка допустимости такого режима. При анализе несинусоидальных режимов более обоснованным является использование вероятностных методов расчетов.

Оценка должна быть выполнена как по признаку соответствия действующего значения всех высших гармоник нормируемому предельному значению, так и по условиям возможности возникновения резонансных явлений и перегрузки конденсаторных батарей.

3.2. Уравнения несимметричных режимов в фазных и симметричных координатах

Для анализа несимметричных режимов можно применять как метод симметричных составляющих, так и систему фазных координат. При расчете в фазных координатах напряжения и токи в любом месте сети содержат соответствующие фазные значения:

$$\dot{\mathbf{U}} = \begin{Bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{Bmatrix}; \quad \dot{\mathbf{I}} = \begin{Bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{Bmatrix}. \quad (3.1)$$

Рассмотрим уравнение режима для схемы участка трехфазной линии (рис. 3.2), каждая фаза которой характеризуется некоторым активным сопротивлением, сопротивлением самоиндукции, а также взаимной индуктивностью, имеющей место между данной и двумя другими фазами. Для рассматриваемого участка линии справедливы уравнения

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_a &= \dot{I}_a \dot{Z}_{aL} + \dot{I}_b \dot{Z}_{ab} + \dot{I}_c \dot{Z}_{ac}; \\ \Delta \dot{U}_b &= \dot{I}_a \dot{Z}_{ba} + \dot{I}_b \dot{Z}_{bL} + \dot{I}_c \dot{Z}_{bc}; \\ \Delta \dot{U}_c &= \dot{I}_a \dot{Z}_{ca} + \dot{I}_b \dot{Z}_{bc} + \dot{I}_c \dot{Z}_{cL}, \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

или в матричной форме

$$\Delta \dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{Z}}_{LM} \dot{\mathbf{I}}. \quad (3.3)$$

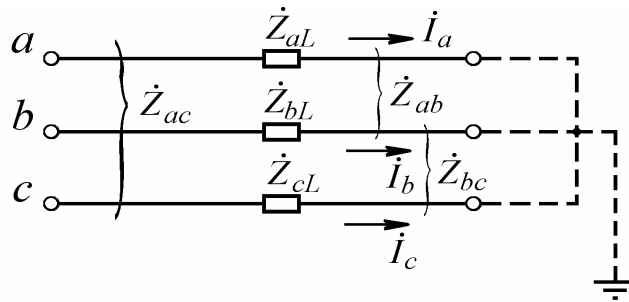


Рис. 3.2. Схема участка трехфазной линии

В уравнениях (3.2) и (3.3)

$$\dot{Z}_{ab} = \dot{Z}_{ba}; \quad \dot{Z}_{ac} = \dot{Z}_{ca}; \quad \dot{Z}_{bc} = \dot{Z}_{cb},$$

и матрица сопротивлений участка линии в фазных координатах

$$\dot{\mathbf{Z}}_{LM} = \begin{Bmatrix} \dot{Z}_{aL} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac} \\ \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{bL} & \dot{Z}_{bc} \\ \dot{Z}_{ac} & \dot{Z}_{bc} & \dot{Z}_{cL} \end{Bmatrix}. \quad (3.4)$$

Симметричный режим участка линии на рисунке описывается одним уравнением (закон Ома)

$$\Delta \dot{U} = \dot{Z} \dot{I}, \quad (3.5)$$

где \dot{I} – ток в линии; \dot{Z} – сопротивление участка симметричной линии; $\Delta \dot{U}$ – падение напряжения в сопротивлении \dot{Z} .

Действительно, если равны сопротивления фаз и взаимные индуктивности

между ними, при симметричной системе фазных токов система уравнений (3.2) может быть заменена одним уравнением (3.5). Сравнивая (3.2) и (3.5), легко убедиться, что несимметричный режим участка линии на рис. 3.2 описывается системой трех линейных уравнений вместо одного уравнения для симметричного режима. Это положение можно распространить и на сложную электрическую сеть с n независимыми узлами. Режим такой сети можно рассчитать, если решить обычные линейные уравнения узловых напряжений:

$$\Delta \dot{U} = \dot{Z}_y \dot{I}, \quad (3.6)$$

где размерность векторов падения напряжения $\Delta \dot{U}$, токов в узлах \dot{I} и матрицы собственных и взаимных узловых сопротивлений равна $3n$, где n – число независимых узлов.

При расчете несимметричного режима в фазных координатах каждый элемент, например вектор узловых токов \dot{I} , определяется (3.1), т.е. содержит комплексы фазных токов. Соответственно каждый элемент матрицы \dot{Z}_y определяется (3.4), т.е. содержит активные сопротивления, а также сопротивления самоиндукции и взаимоиндукции.

Расчет несимметричного режима в фазных координатах не применялся до использования ЭВМ, так как приводил к трехкратному увеличению размерности решаемой системы.

Наибольшее распространение получили расчеты несимметричных режимов с помощью метода симметричных составляющих.

При использовании метода симметричных составляющих параметры режима определяются в системе координат симметричных составляющих. Сущность метода симметричных составляющих заключается в представлении любой трехфазной несимметричной системы величин в виде суммы трех симметричных величин. На рис. 3.3 изображены три симметричные системы применительно к расчету тока.

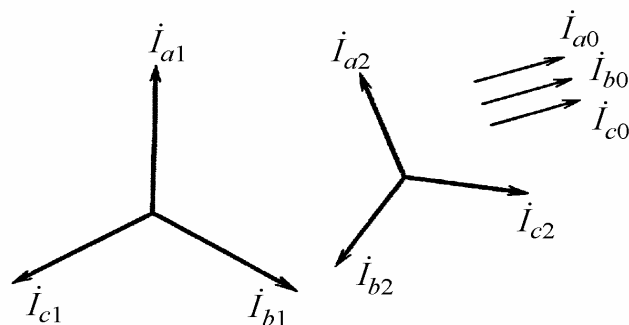


Рис. 3.3. Три симметричные системы тока

Токи фаз b и c можно выразить через ток фазы a следующим образом: для прямой последовательности:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{b1} &= \dot{I}_{a1} e^{-j2\pi/3} = \dot{I}_{a1} e^{j4\pi/3}; \\ \dot{I}_{c1} &= \dot{I}_{a1} e^{j2\pi/3} = \dot{I}_{a1} \cdot \dot{a}, \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

для обратной последовательности:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{b2} &= \dot{I}_{a2} e^{j2\pi/3} = \dot{I}_{a2} \cdot \dot{a}; \\ \dot{I}_{c2} &= \dot{I}_{a2} e^{j4\pi/3} = \dot{I}_{a2} \cdot \dot{a}^2. \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

В соответствии с методом симметричных составляющих с учетом (3.7) и (3.8) трехфазную несимметричную систему токов $\dot{\mathbf{I}}$ в выражении (3.1) можно представить в виде суммы трех симметричных величин:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b0} = \dot{a}^2 \dot{I}_{a1} + \dot{a} \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0} = \dot{a} \dot{I}_{a1} + \dot{a}^2 \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}. \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

В матричной форме уравнения (3.9) имеют вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_{a0} \end{pmatrix}$$

или

$$\dot{\mathbf{I}} = \dot{\mathbf{s}} \dot{\mathbf{I}}_s, \quad (3.10)$$

где

$$\dot{\mathbf{s}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \dot{a}^2 & \dot{a} & 1 \\ \dot{a} & \dot{a}^2 & 1 \end{pmatrix}$$

Матрица $\dot{\mathbf{s}}$ определяет переход от системы координат симметричных составляющих к системе фазных координат. Данная матрица имеет обратную:

$$\dot{\mathbf{s}}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Из (3.10) получим:

$$\dot{\mathbf{I}}_s = \dot{\mathbf{s}}^{-1} \dot{\mathbf{I}} \quad (3.11)$$

или

$$\left. \begin{aligned} i_{a1} &= \frac{1}{3}(i_a + \dot{a}i_b + \dot{a}^2 i_c) \\ i_{a2} &= \frac{1}{3}(i_a + \dot{a}^2 i_b + \dot{a} i_c) \\ i_{a0} &= \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Систему (3.12) можно легко получить, если решить уравнения (3.9). Матрица \dot{s}^{-1} , а также выражения (3.11) или (3.12) отражают переход из фазных координат в симметричные. Покажем, как с помощью матриц преобразования \dot{s} и \dot{s}^{-1} можно получить в системе координат симметричных составляющих уравнения закона Ома (3.2) или (3.3), ранее полученные в системе фазных координат.

Переход от системы симметричных составляющих к фазным координатам (3.10) справедлив и для таких параметров режима, как напряжение и падение напряжения:

$$\Delta \dot{U} = \dot{s} \Delta \dot{U}_s \quad (3.13)$$

С учетом (3.10) и (3.13) выражение (3.3) можно записать в следующем виде в системе симметричных координат:

$$\dot{s} \Delta \dot{U}_s = \dot{Z}_{LM} \dot{s} \dot{I}_s. \quad (3.14)$$

Отсюда следует, что

$$\Delta \dot{U}_s = \dot{s}^{-1} \dot{Z}_{LM} \dot{s} \dot{I}_s = \dot{Z}_s \dot{I}_s, \quad (3.15)$$

где матрица сопротивления участка линии в системе симметричных координат \dot{Z}_s определяется по матрице сопротивлений в фазных координатах \dot{Z}_{LM} таким выражением:

$$\dot{Z}_s = \dot{s}^{-1} \dot{Z}_{LM} \dot{s}. \quad (3.16)$$

По выражению, аналогичному (3.16) можно найти и другие пассивные параметры сети, например проводимости ветвей в системе симметричных координат.

Система уравнений (3.15) имеет ту же размерность, что и (3.3). Поэтому в общем случае при учете различных взаимных междуфазных индуктивностей, различных фазных активных сопротивлений и сопротивлений самоиндукции применение симметричных составляющих не приводит к понижению размерности систем уравнений, решаемых при расчете установившегося режима. Более того, в этом общем случае приходится дополнительно определять сопротивления в симметричных координатах по выражению (3.16). Таким образом, параметры элементов сети иногда проще определяются в системе фазных координат.

Достоинство метода симметричных составляющих

1. С его помощью проще определяются показатели несимметрии — составляющие обратной и нулевой последовательностей напряжений и токов. Для проверки требований по качеству напряжения в соответствии с ГОСТ необходимо вычислить эти показатели несимметрии.

2. Второе достоинство в том, что с его помощью в некоторых случаях можно выполнять расчет составляющих обратной последовательности с большей точностью, чем в фазных координатах.

Составляющие обратной последовательности в таких случаях имеют небольшую величину, поэтому определение их по результатам расчета в системе фазных координат, связанное с вычитанием близких величин, может привести к заметному понижению точности расчета.

3. Основное преимущество метода симметричных составляющих состоит в понижении размерности решаемой системы уравнений при расчете установившегося режима в частном, но практически важном случае, когда равны взаимные междофазные индуктивности, а также и фазные активные сопротивления и сопротивления самоиндукции. Например, при исследовании режимов, вызванных несимметричными нагрузками, можно не считаться с различием сопротивлений взаимной индукции между фазами и принять собственные сопротивления фаз одинаковыми.

В этом случае в (3.4) $\dot{Z}_L = \dot{Z}_{aL} = \dot{Z}_{bL} = \dot{Z}_{cL}$ — собственные сопротивления фаз; $\dot{Z}_M = \dot{Z}_{ba} = \dot{Z}_{ac} = \dot{Z}_{ca} = \dot{Z}_{bc} = \dot{Z}_{cb} = \dot{Z}_{ab}$ — среднее взаимное сопротивление фаз.

При этом из (3.16), (3.14) следует

$$\dot{\mathbf{Z}}_s = \dot{\mathbf{s}}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} \dot{Z}_{aL} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac} \\ \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{bL} & \dot{Z}_{bc} \\ \dot{Z}_{ac} & \dot{Z}_{bc} & \dot{Z}_{cL} \end{vmatrix} \cdot \dot{\mathbf{s}} = \begin{vmatrix} \dot{Z}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_0 \end{vmatrix}, \quad (3.17)$$

где

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = \dot{Z}_L - \dot{Z}_M \quad (3.18)$$

$$\dot{Z}_0 = \dot{Z}_L + 2\dot{Z}_M. \quad (3.19)$$

Выражение (3.15) можно записать в следующем виде:

$$\Delta \dot{\mathbf{U}}_s = \begin{vmatrix} \Delta \dot{U}_{a1} \\ \Delta \dot{U}_{a2} \\ \Delta \dot{U}_{a0} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{Z}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_{a0} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{I}_{a1} \cdot \dot{Z}_1 \\ \dot{I}_{a2} \cdot \dot{Z}_2 \\ \dot{I}_{a0} \cdot \dot{Z}_0 \end{vmatrix}. \quad (3.20)$$

Из (3.20) следует, что в рассматриваемом частном случае вместо системы из трех уравнений (3.15) можно решать независимо по уравнению для каждой последовательности, т.е. порядок решаемой системы понижается в 3 раза.

Иными словами, падение напряжения всех трех последовательностей определяется в рассматриваемых условиях только токами тех же

последовательностей, и, следовательно, режим определяется не системой уравнений, как в общем случае (3.15), а тремя независимыми уравнениями в (3.20).

Сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей называют коэффициенты пропорциональности между падением напряжения и током одной и той же последовательности. Для линии $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_L - \dot{Z}_M$ – сопротивление прямой последовательности; $\dot{Z}_2 = \dot{Z}_L - \dot{Z}_M$ – сопротивление обратной последовательности; $\dot{Z}_0 = \dot{Z}_L + 2\dot{Z}_M$ – сопротивление нулевой последовательности, причем $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 \neq \dot{Z}_0$.

Взаимная независимость уравнений (3.20) свидетельствует о *принципиальной возможности независимого расчета режимов, составленных из сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей*. Такая возможность и определяет целесообразность расчетов несимметричных режимов в системе координат симметричных составляющих при равенстве фазных сопротивлений схемы.

3.3. Параметры элементов сети и составление схем замещения при несимметричных режимах

Определение параметров элементов сети в схемах различных последовательностей связано в значительной мере с назначением проводимого расчета несимметричных режимов. Например, в случае рассмотрения режимов работы сети с резко выраженной несимметрией – с несимметричной нагрузкой или при неполнофазных режимах – значения параметров сети и их взаимное влияние могут быть оценены приближенно. В то же время при анализе режимов работы нетранспонированных линий с различными параметрами фаз в ряде случаев требуется более точный учет этих параметров. При этом приходится применять более точные методы расчетов, которые рассматриваются в специальных курсах. В соответствии с указанным ниже даются лишь основные сведения об определении параметров сети в схемах различных последовательностей.

В схемах прямой последовательности значения сопротивлений проводимостей любых элементов сети соответствуют их значениям симметричных режимов.

В схемах обратной последовательности для элементов сети, у которых взаимоиндукция между фазами не зависит от порядка чередования фаз, индуктивные сопротивления прямой и обратной последовательностей одинаковы $x_1 = x_2$. Такими элементами являются воздушные и кабельные линии, реакторы, конденсаторы, трансформаторы.

Во вращающихся машинах токи обратной последовательности создают магнитный поток статора, вращающийся против направления вращения ротора машины. Таким образом, этот магнитный поток имеет двойную угловую скорость по отношению к ротору машины. Магнитное сопротивление на пути этого

магнитного потока несколько отличается от соответствующего магнитного сопротивления для магнитного потока, созданного токами прямой последовательности, который вращается синхронно с ротором. В связи с этим в общем случае для вращающихся машин $x_2 \neq x_1$.

Для практически приближенных расчетов обычно принимают для турбогенераторов и явнополусных машин с демпферными обмотками $x_2 \approx x_d''$.

Нагрузки в схемах обратной последовательности обычно представляют неизменными поперечно включенными сопротивлениями для некоторого типичного состава ЭП. При основной частоте можно приближенно принимать в относительных единицах: для нагрузок, присоединенных к сети 6 – 10 кВ:

$$Z_{2*} = 0,18 + j0,24;$$

для нагрузок, присоединенных к сети 110 кВ:

$$Z_{2*} = 0,19 + j0,36.$$

Эти значения сопротивлений отнесены к полной рабочей мощности нагрузки и к номинальному напряжению сети, к которой она присоединена. Однофазные ЭП значительной мощности и ЭП с резкопеременной нагрузкой должны учитываться особо.

Схема нулевой последовательности. В синхронных машинах с симметричными обмотками магнитные потоки в обмотках статора, создаваемые токами нулевой последовательности, должны полностью компенсироваться. Практически обмотки статора имеют некоторую несимметрию, обусловленную конструктивными особенностями машины. В связи с этим часть магнитных потоков нулевой последовательности не является скомпенсированной. Это отражается в схеме нулевой последовательности сопротивлением относительно небольшого значения, его принимают обычно равным $x_0 = (0,15 \div 0,6)x_d''$.

Для реакторов расстояние между катушками достаточно велико, что обуславливает малую взаимоиндукцию между катушками. Поэтому приближенно принимают $x_0 \approx x_1$.

В воздушных линиях токи нулевой последовательности, проходящие по фазным проводам линии, возвращаются в заземленные нейтрали через землю (рис. 3.4, а). При этом продольное сопротивление нулевой последовательности z_0 линии зависит от сопротивления z_L , петли «провод – земля» и сопротивлений взаимной индукции z_M между двумя линиями «провод-земля». При частоте $f = 50$ Гц эти сопротивления имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} z_L &= r + r_3 + j \cdot 0,145 \lg \frac{D^3}{\rho} = r + 0,05 + j \cdot 0,145 \lg \frac{D^3}{\rho}; \\ z_M &= r_3 + j \cdot 0,145 \lg \frac{D^3}{D} = 0,05 + j \cdot 0,145 \lg \frac{D^3}{D}, \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

где $r_3 \approx 0,05$ Ом/км—активное сопротивление земли, соответствующее потере активной мощности при прохождении тока в земле; оно практически не зависит от проводимости земли, так как с ее изменением меняется плотность тока в земле; $D_3 \approx 1000$ м — эквивалентная глубина возврата тока через землю; D — расстояние между- проводами двух параллельных линий «провод — земля», для трехфазных линий $D = D_{\text{ср}}$.

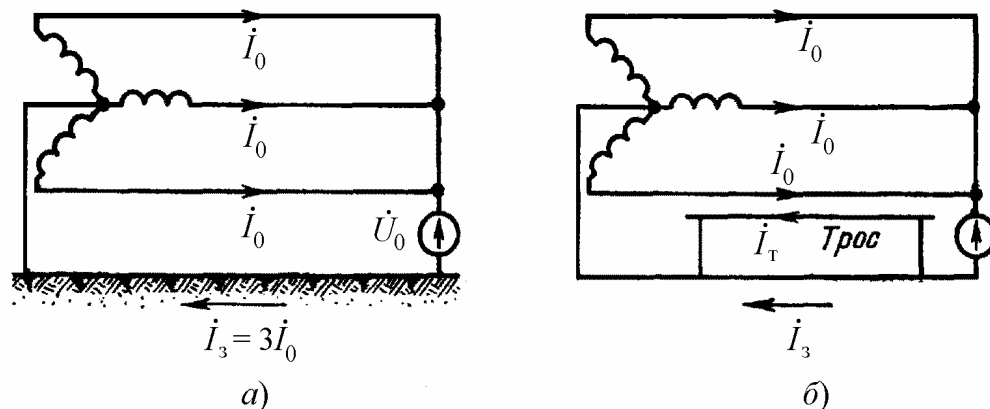


Рис. 3.4. Прохождение токов нулевой последовательности в линии: *а* — без троса на линии; *б* — с тросом на линии

Для одноцепной трехфазной линии сопротивление нулевой последовательности:

$$z_0 = z_L + 2z_{M \text{ ср}} = r + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{\rho_{\text{ср}}}, \quad (3.22)$$

где $\rho_{\text{ср}} = \sqrt{\rho D_{\text{ср}}^2}$ — средний геометрический радиус системы трех проводов линии (ρ — приведенный к поверхностному распределению тока радиус провода). Аналогично сопротивление прямой последовательности для такой линии получается:

$$z_1 = z_L + \dot{a}^2 z_{M \text{ ср}} + \dot{a} z_{M \text{ ср}} = z_L - z_{M \text{ ср}} = r + 0,145 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{\rho}, \quad (3.23)$$

(что соответствует симметричному режиму).

Таким образом, наличие взаимной индукции с другими фазами в системах прямой и обратной последовательностей уменьшает сопротивление фазы, а в системе нулевой последовательности значительно увеличивает его.

На сопротивление нулевой последовательности ВЛ влияет наличие многократно заземленных тросов и второй параллельной цепи. При наличии тросов обратный ток частично проходит в земле, а частично в тросе (рис. 3.4, *б*). Расстояние между проводами и тросами значительно меньше расстояний между проводами и током в земле, поэтому сопротивление петли «провод–трос» меньше сопротивления петли «провод–земля». Таким образом, наличие заземленного

троса приводит к уменьшению сопротивления нулевой последовательности линии. Степень уменьшения индуктивного сопротивления нулевой последовательности линии зависит от материала троса. Чем меньше активное сопротивление троса, тем больше доля обратного тока в нем и тем больше степень уменьшения индуктивного сопротивления нулевой последовательности. Стальные тросы практически мало влияют, а хорошо проводящие сталеалюминиевые тросы значительно уменьшают индуктивное сопротивление нулевой последовательности. Активное сопротивление нулевой последовательности линии возрастает при стальных тросах с большим активным сопротивлением и уменьшается при сталеалюминиевых тросах с малым активным сопротивлением.

Сопротивление нулевой последовательности двухцепных линий несколько больше (до 10 %), чем одноцепных, из-за влияния взаимоиндукции параллельной цепи.

В приближенных расчетах можно принимать приведенные ниже средние значения соотношений между индуктивными сопротивлениями x_0 в схеме нулевой последовательности и x_1 в схеме прямой последовательности:

Для одноцепных линий:	x_0/x_1
без тросов	3,5
со стальными тросами	3,0
со сталеалюминиевыми тросами	2,0
Для двухцепных линий:	
без тросов	5,5
со стальными тросами	4,7
со сталеалюминиевыми тросами	3,0

Поперечную емкостную проводимость в схемах замещения нулевой последовательности ВЛ можно приближенно определить по следующей формуле (аналогичной симметричному режиму):

$$b_0 = \frac{2,52}{\lg \frac{D_i}{\rho'_{\text{ср}}}}, \quad (3.24)$$

где $D_i = 1/3 \cdot (H_{aa} + H_{bb} + H_{cc})$ – среднее расстояние проводов фаз a , b и c до их зеркальных отражений относительно поверхности земли; $\rho'_{\text{ср}} = \sqrt{\rho_{\text{п}} D_{\text{ср}}^2}$ – средний геометрический радиус систем трех проводов линии ($\rho_{\text{п}}$ – внешний радиус поперечного сечения провода).

На значения емкостных проводимостей в схемах нулевой последовательности влияет наличие тросов, заземленных хотя бы в одном месте, а также параллельно проложенной цепи на тех же опорах. При учете этого влияния емкостные проводимости увеличиваются в пределах до нескольких процентов.

Для кабелей сопротивление в схемах нулевой последовательности наиболее надежно определяется путем замеров в реальных условиях. Приближенно можно считать, что в схеме нулевой последовательности $r_0 \approx 10 \cdot r_1$ и $x_0 \approx (3,5 \div 4,6) \cdot x_1$.

В трансформаторах (автотрансформаторах) активные сопротивления очень малы и их практически не учитывают. Индуктивные сопротивления нулевой последовательности зависят от конструктивного выполнения и схемы соединения обмоток трансформаторов. Токи нулевой последовательности не могут проходить через обмотки трансформаторов, соединенных в звезду без заземленной нейтрали или без нулевого провода. Это связано с тем, что при этих соединениях сумма токов трех фаз должна быть равна нулю, в то время как сумма токов нулевой последовательности трех фаз равна $3I_0$. Если линия заканчивается обмоткой трансформатора, соединенной в треугольник, то по линии также не могут проходить токи нулевой последовательности.

В этих случаях сопротивление нулевой последовательности $x_0 = \infty$. Конечное значение x_0 получается при приложении напряжения нулевой последовательности со стороны обмотки трансформатора, соединенной в звезду с заземленной нейтралью или с нулевым проводом.

Рассмотрим схемы нулевой последовательности для наиболее распространенных двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов (рис. 3.5). Для двухобмоточных трансформаторов независимо от их типа и конструкции при соединении обмоток по схеме Y_0/Δ (рис. 3.5, а) индуктивное сопротивление нулевой последовательности $x_0 = x_I + x_{II} = x_1$.

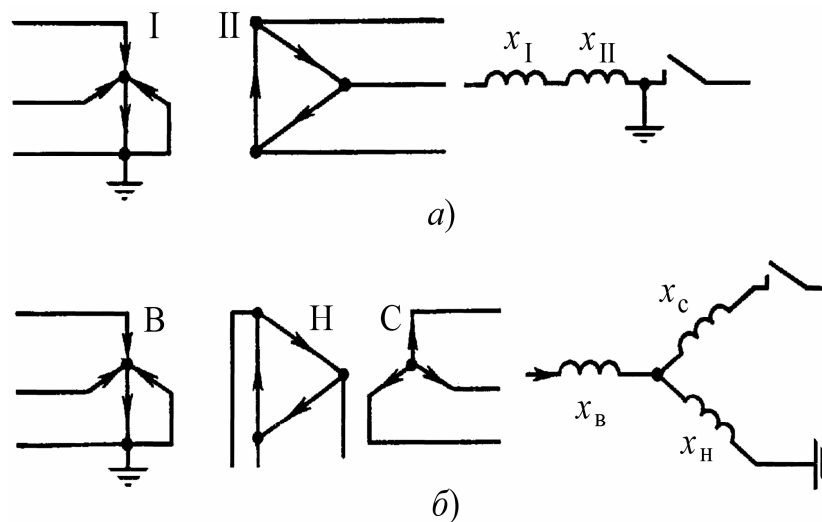


Рис. 3.5. Схемы замещения трансформаторов для токов нулевой последовательности: а) двухобмоточного; б) трехобмоточного

Во вторичной обмотке трансформатора наводится Э.Д.С. нулевой последовательности, и так как фазы обмоток соединены в треугольник, то в них возникают токи нулевой последовательности, не выходящие за пределы треугольника. Таким образом, вся наведенная во вторичной обмотке Э.Д.С. нулевой последовательности расходуется на проведение тока нулевой

последовательности в сопротивлении вторичной обмотки x_{II} . В схеме замещения это отражают условным заземлением конца ветви x_{II} и отключением внешней вторичной цепи (заземление конца ветви показывает, что этой ветвью заканчивается путь тока нулевой последовательности).

Схема замещения для токов нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора приведена на рис. 3.5, б. Сопротивления обмоток x_B , x_C , x_H определяют по стандартным формулам. Более подробно о схемах замещения, для трансформаторов с другими соединениями обмоток см. в [12].

Составление схем замещения различных последовательностей производится в зависимости от характера выполняемого расчета. Для режимов с несимметричными нагрузками и при неполнофазной работе отдельных элементов сети обычно схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей не связаны взаимно по ветвям линий. Сопротивления ВЛ в схемах прямой и обратной последовательностей определяются по

$$x = 0,1451g \frac{D_{cp}}{\rho} \quad (3.25)$$

($\rho = a \cdot \rho_{II}$ – приведенный к поверхностному распределению тока радиус провода; ρ_{II} – внешний радиус поперечного сечения провода; a – коэффициент, равный 0,75 для алюминиевых и 0,95 для сталеалюминиевых проводов).

Сопротивления ВЛ нулевой последовательности определяются по (3.22). В более общих случаях, когда параметры фаз различны (в нетранспонированных линиях), схемы разных последовательностей оказываются взаимно связанными и количество параметров элементов сети соответственно увеличивается. Правила определения дополнительных параметров здесь не рассматриваются.

Схема прямой последовательности составляется так же, как и для расчета соответствующего симметричного режима. Обычно ее составляют только для той части сети, где ожидается заметное влияние несимметрии. Остальную часть сети замещают условной эквивалентной нагрузкой или источником питания в соответствии с данными, полученными из расчетов симметричного режима.

Схема обратной последовательности, за исключением нагрузок, состоит из тех же элементов, что и схема прямой последовательности, так как токи прямой и обратной последовательностей проходят по одним и тем же путям. Обычно в схемы обратной последовательности вносятся дополнительные упрощения: не учитывается влияние поперечных ветвей линий и трансформаторов, активных сопротивлений линий и трансформаторов.

Схема нулевой последовательности существенно отличается от схем прямой и обратной последовательностей, так как токи нулевой последовательности проходят по другим путям – по трем фазам и возвращаются через землю, заземляющие тросы ВЛ, металлические оболочки кабелей и т.п. При составлении схемы нулевой последовательности следует установить возможные замкнутые контуры, по которым может проходить ток нулевой последовательности. Для этого прежде всего необходимо обращать внимание на схемы соединений

обмоток трансформаторов. Для образования указанных замкнутых контуров в рассматриваемом участке сети должны иметься заземленные нейтрали или нулевой провод. При нескольких заземленных нейтралях, электрически связанных между собой, токи нулевой последовательности разветвляются между ними.

Концы элементов схемы нулевой последовательности, через которые возвращаются токи нулевой последовательности, имеют потенциал земли. Их объединяют в одну общую точку, которая является началом схемы нулевой последовательности. Если нейтраль трансформатора или автотрансформатора заземлена через сопротивление, то его вводят в схему замещения нулевой последовательности утроенным значением. Это объясняется тем, что схему нулевой последовательности составляют для одной фазы, а через сопротивление нейтрали проходит сумма токов нулевой последовательности трех фаз. Для учета действительного падения напряжения в сопротивлении нейтрали его и увеличивают в 3 раза.

При исследовании несинусоидальных несимметричных режимов схемы всех трех последовательностей составляются на частоте каждой из гармоник ν . При этом индуктивные сопротивления и емкостные проводимости должны быть соответственно увеличены в ν раз по сравнению с теми же при основной частоте. Влиянием активных сопротивлений на параметры режима обычно можно пренебречь, его необходимо учитывать лишь при оценке экономичности режима. При этом должно быть учтено увеличение активных сопротивлений из-за повышения частоты.

Вопросы для самопроверки

1. Какие режимы называют особыми и почему их надо рассчитывать?
2. Как записать уравнение установившегося режима для участка трехфазной линии при несимметричной нагрузке?
3. В чем преимущества и недостатки применения симметричных составляющих и фазных координат для расчета несимметричных режимов?
4. При каких условиях метод расчета в симметричных координатах дает преимущество перед расчетом в фазных координатах?
5. В чем состоят основные принципы расчетов режимов при несинусоидальных токах нагрузки?

Глава 4. НЕПОЛНОФАЗНЫЕ РЕЖИМЫ

4.1. Работа линии с одной отключенной фазой

Рассмотрим простейшую схему электрической системы, изображенную на рис. 4.1.

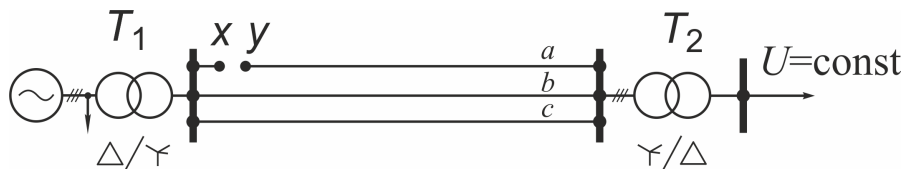


Рис. 4.1. Схема электрической сети с одной отключенной фазой

Часть энергии генератора распределяется на генераторном напряжении, а другая часть передается в мощную систему по линии электропередачи. Напряжение на шинах приемной подстанции считается неизменным.

Пусть в рассматриваемой системе отключается фаза *a* ЛЭП. В этом случае между точками разрыва линии в фазе *a* имеет место некоторая разность напряжений – рис. 4.2.

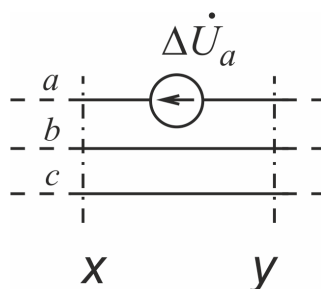


Рис. 4.2. Разность напряжений между точками разрыва

Для других фаз:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_a &\neq 0; \\ \Delta \dot{U}_b &= \Delta \dot{U}_c = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Эти условия являются одним из признаков неполнофазного режима. Кроме того, данный случай характеризуется условием:

$$\dot{I}_a = 0 \text{ при } \dot{I}_b \neq 0 \text{ и } \Delta \dot{I}_c \neq 0 \quad (4.2)$$

В системе координат симметричных составляющих условию (4.1) отвечает выражение

$$\begin{aligned} \left\| \begin{array}{l} \Delta \dot{U}_{a1} \\ \Delta \dot{U}_{a2} \\ \Delta \dot{U}_{a0} \end{array} \right\| &= \frac{1}{3} \left\| \begin{array}{lll} 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{array} \right\| \cdot \left\| \begin{array}{l} \Delta \dot{U}_a \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\| = \frac{1}{3} \left\| \begin{array}{l} \Delta \dot{U}_a \\ \Delta \dot{U}_a \\ \Delta \dot{U}_a \end{array} \right\| \end{aligned} \quad (4.3)$$

На рис. 4.3 показаны схемы замещения, составленные из сопротивлений токам

всех трех последовательностей, в которые между точками разрыва включены источники некоторого напряжения $\frac{1}{3}\Delta\dot{U}_a$.

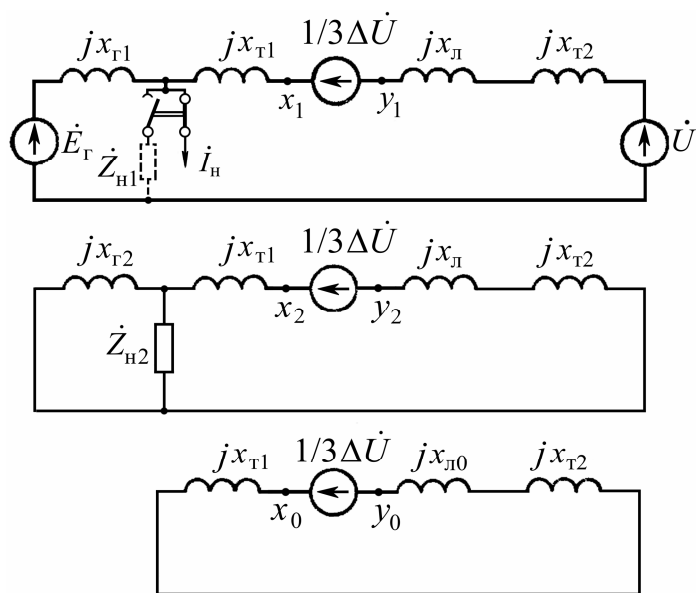


Рис. 4.3. Схемы замещения электрической сети

Эти схемы справедливы для случая симметрии параметров всех элементов в анализируемой системе. Режим каждой из схем может рассчитываться независимо, однако равенство напряжений между точками разрыва в схемах всех трех последовательностей позволяет составить одну, так называемую комплексную схему (рис. 4.4).

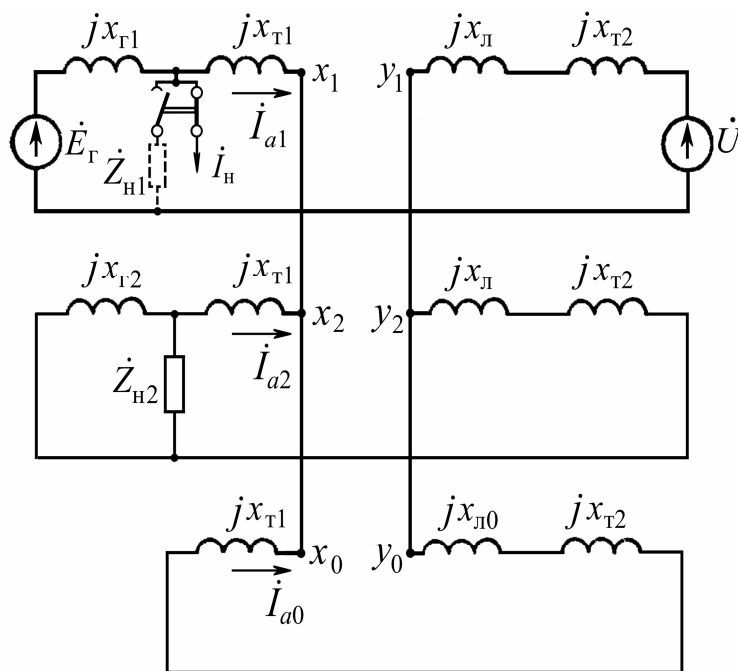


Рис. 4.4. Комплексная схема замещения

Условие (4.2) несимметрии в системе координат симметричных составляющих

имеет вид:

$$\dot{I}_a = 0 = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} \quad (4.4)$$

Комплексная схема удовлетворяет этому условию. В эту схему некоторыми сопротивлениями входят также генераторы и нагрузки электрических сетей.

Сопротивления обратной последовательности генераторов при составлении комплексной схемы должны приниматься по паспортным данным. Нагрузка в схему обратной последовательности вводится неизменным сопротивлением. В схему прямой последовательности нагрузка вводится, так же как и при расчетах симметричных режимов – задающим током или неизменным сопротивлением.

Расчет неполнофазных режимов в сетях с номинальным напряжением 110 кВ и выше усложняется учетом зарядной мощности линий. Емкости отдельных фаз линии, работающей в неполнофазном режиме, не равны друг другу. При этом зарядные токи в схемах каждой последовательности, строго говоря, определяются напряжением всех трех последовательностей. При расчетах режимов линии 220 – 110 кВ и ниже обычно вводят упрощающее допущение, что напряжение обратной и нулевой последовательностей оказывают на величину зарядных токов небольшое влияние. Обычно напряжение \dot{U}_1 существенно превышает напряжения \dot{U}_2 и \dot{U}_0 . Дополнительное упрощение расчета может быть получено, если принять, что составляющие зарядного тока в схемах обратной и нулевой последовательностей, вызванные напряжением прямой последовательности, не оказывают заметного влияния на результаты расчета и могут быть из схемы исключены.

Принцип составления комплексной схемы, полученной для случая отключения одной фазы в конкретной системе, остается справедливым и для любой другой системы. На рисунке 4.5 показана обобщенная комплексная схема, не связанная с конкретной конфигурацией.

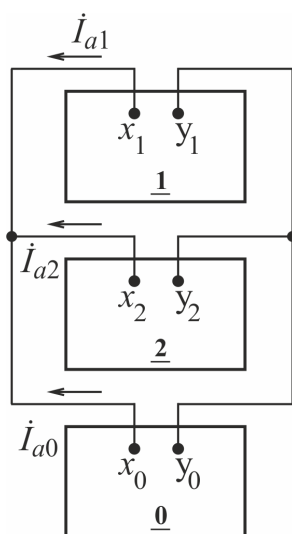


Рис. 4.5. Обобщенная комплексная схема замещения при отключении одной фазы

4.2. Работа линии с двумя отключенными фазами

Неполнофазный режим может быть вызван отключением двух фаз. Считая отключенными фазы b и c , для характеристики режима следует воспользоваться уравнениями:

$$\dot{I}_b = \dot{I}_c = 0$$

$$\Delta \dot{U}_a = 0 \text{ при } \Delta \dot{U}_b \neq 0, \Delta \dot{U}_c \neq 0$$

где $\Delta \dot{U}_b$ и $\Delta \dot{U}_c$ – разность напряжений между точками разрыва фаз b и c соответственно.

Этим условиям несимметрии в системе координат симметричных составляющих отвечают токи и напряжения, определяющиеся следующими соотношениями:

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_{a0} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_a \\ \dot{I}_a \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

$$\Delta \dot{U}_a = \Delta \dot{U}_{a1} + \Delta \dot{U}_{a2} + \Delta \dot{U}_{a0} = 0 \quad (4.6)$$

Комплексная схема, выполненная в обобщенной форме и соответствующая приведенным выше условиям, представлена на рис. 4.6:

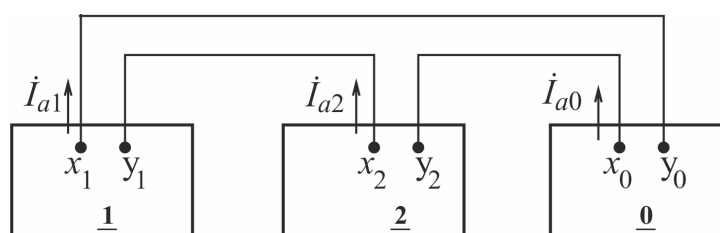


Рис. 4.6. Комплексная схема замещения при отключении двух фаз

При рассматриваемой форме несимметрии схемы обратной и нулевой последовательностей соединяются последовательно.

Расчет режима комплексных схем позволяет найти токи и напряжения трех последовательностей в интересующих ветвях и узлах исследуемой системы. Расчет выполняется теми же методами, что и при исследовании симметричных режимов. Токи, найденные в ветвях схемы прямой последовательности, и напряжения, найденные в ее узлах, являются токами и напряжениями прямой последовательности соответствующих ветвей и узлов. Аналогично параметры режима схем обратной и нулевой последовательностей характеризуют токи и напряжения этих последовательностей. Переход к системе фазных координат для каждой i -й ветви и каждого j -го узла может быть осуществлен с помощью

соотношений:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{I}}_i &= \dot{\mathbf{s}} \dot{\mathbf{I}}_{si} \\ \dot{\mathbf{U}}_j &= \dot{\mathbf{s}} \dot{\mathbf{U}}_{sj}\end{aligned}$$

4.3. Расчет параметров режима и построение векторной диаграммы

Рассмотрим пример построения векторной диаграммы фазных токов и напряжений применительно к расчету неполнофазного режима, вызванного отключением двух фаз одноцепной линии в простейшей системе (рис. 4.7).

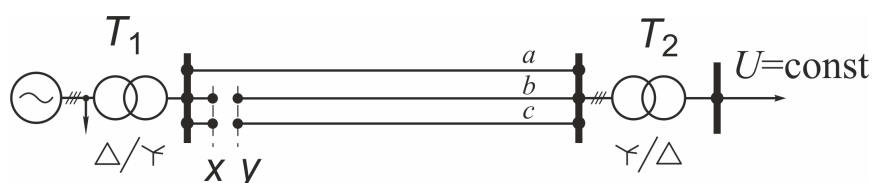


Рис. 4.7. Схема электрической сети с двумя отключенными фазами

Комплексная схема для рассматриваемого случая имеет вид (рис. 4.8).

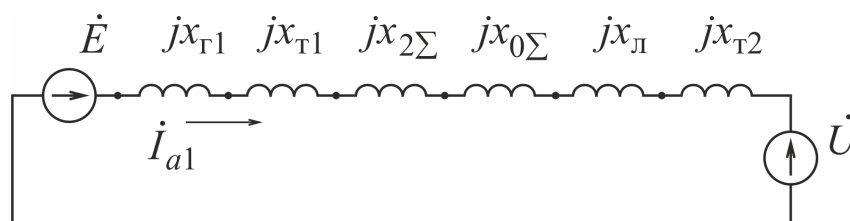


Рис. 4.8. Комплексная схема замещения электрической сети

Сопротивления схем обратной и нулевой последовательностей представлены соответствующими суммарными значениями $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$.

Пусть разность векторов Э.Д.С. генератора \dot{E} и напряжения на шинах системы \dot{U} определяется некоторым углом δ . Тогда, располагая для определенности вектор \dot{U} по действительной оси комплексной плоскости, получим в соответствии с комплексной схемой

$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})} = \frac{\dot{E}}{x_{\Sigma}} \cdot e^{j(\delta - \pi/2)} + \frac{\dot{U}}{x_{\Sigma}} \cdot e^{j(\pi/2)}. \quad (4.7)$$

Этому выражению отвечает следующая векторная диаграмма (рис. 4.9).

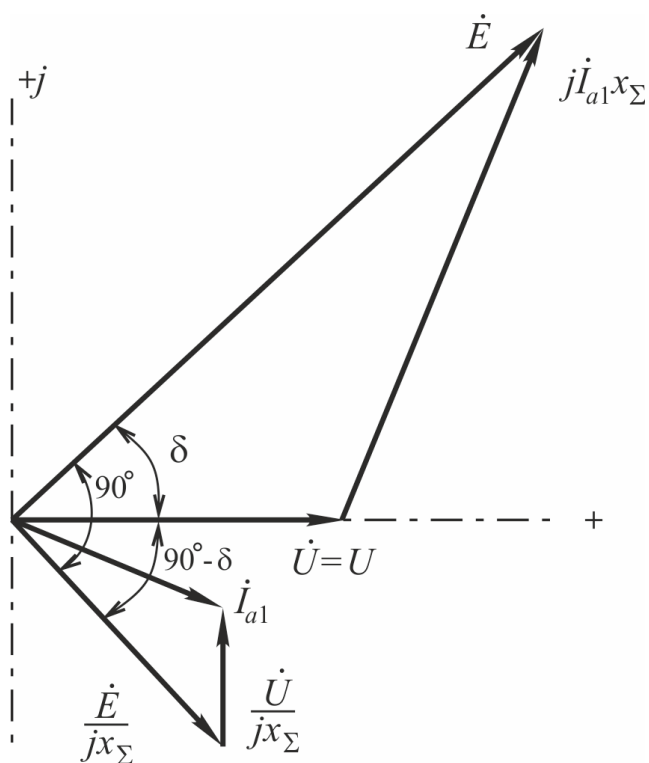
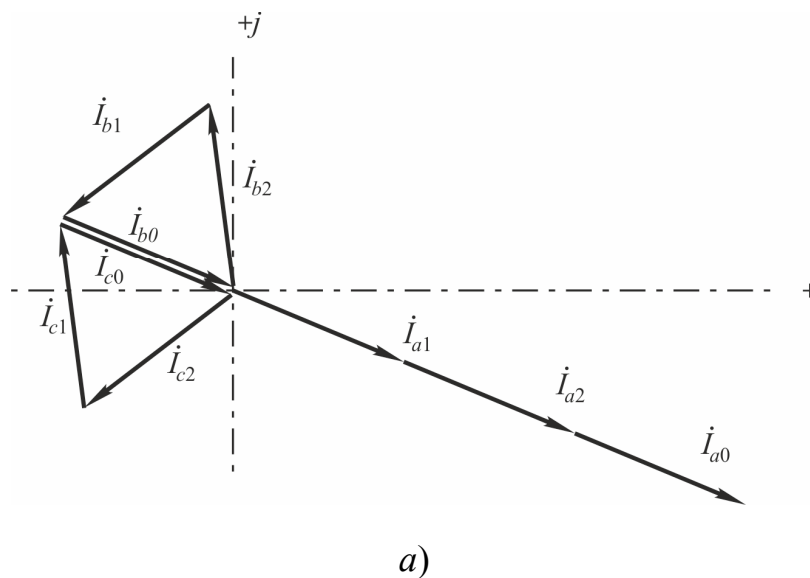


Рис. 4.9. Векторная диаграмма токов и напряжений

Принимая во внимание, что $\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0}$, строим полную систему токов в системе координат симметричных составляющих (рис. 4.10, а).

Векторная диаграмма токов в системе фазных координат получается для каждой из фаз путем сложения токов всех трех составляющих (рис. 4.10, б).

В результате такого сложения определяется модуль и аргумент тока в неповрежденной фазе a , тогда как токи в других двух фазах оказываются равными нулю.



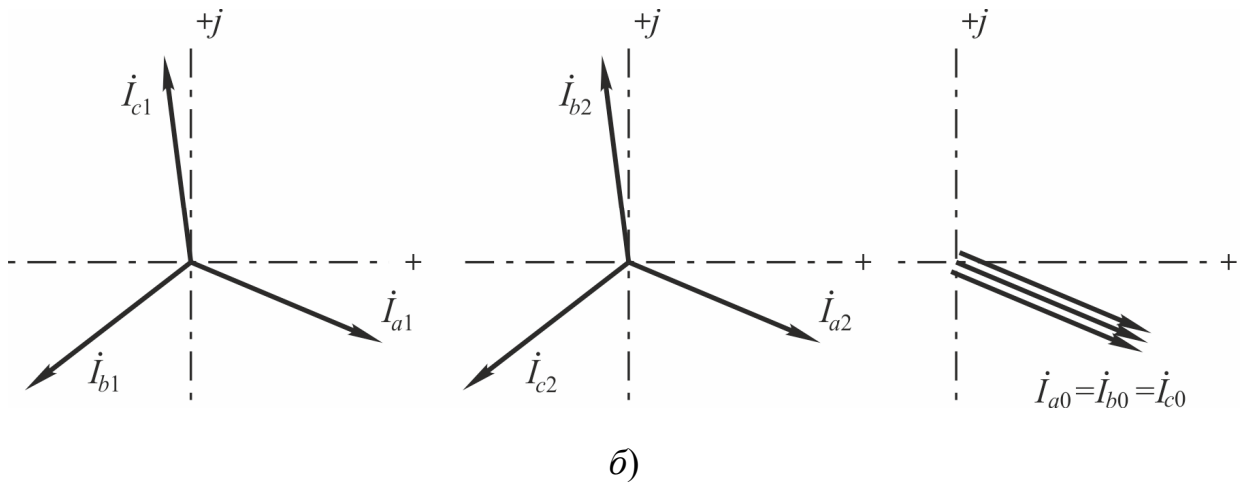


Рис. 4.10. Диаграмма в системе симметричных составляющих: а) полная система токов в системе координат симметричных составляющих; б) составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Векторная диаграмма фазных токов генераторов и фазных напряжений на его зажимах приведена на рис. 4.11. При ее построении учтено, что при трансформации изменяются не только модули напряжения и тока, но также и их аргументы. В тех случаях, когда необходимо найти фазные токи и напряжения в ветвях и узлах, отделенных от места разрыва трансформаторами, необходимо это учитывать.

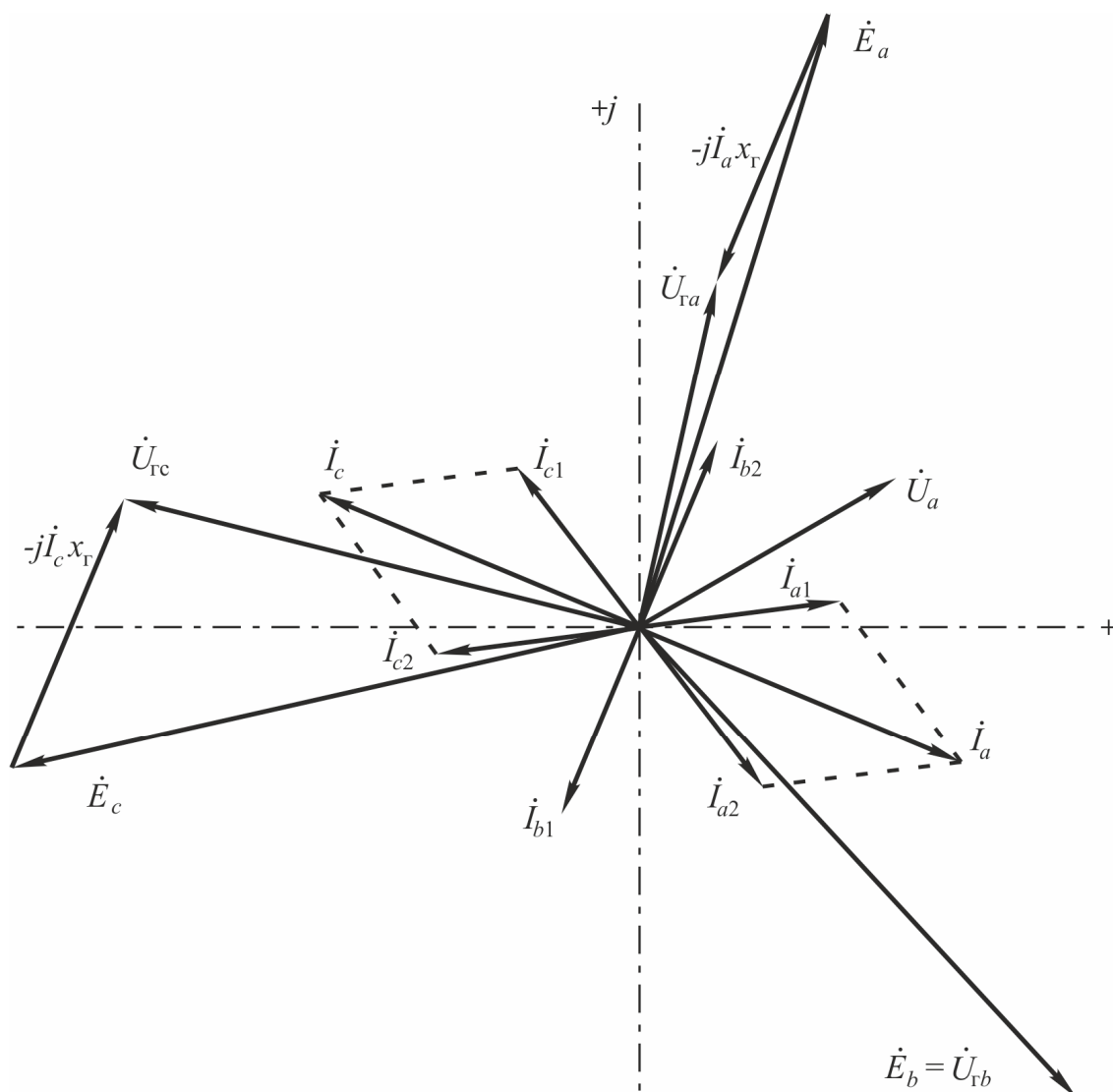


Рис. 4.11. Векторная диаграмма токов и напряжений в фазных координатах

Изменение аргументов определяется группой соединения обмоток трансформатора. Так, в нормальном симметричном режиме трансформатора, обмотки которого соединены по схеме $Y/\Delta-11$ напряжения и токи в обмотке низшего напряжения (на стороне треугольника) по фазе опережают напряжения и токи в обмотке высшего напряжения (на стороне звезды). Причем этот сдвиг для такого трансформатора составляет 30° . Такой же угол характеризует изменение аргументов векторов системы прямой последовательности, поскольку чередование этих векторов отвечает симметричному режиму. Система векторов токов и напряжений обратной последовательности при трансформации изменяется по фазе на угол, равный углу поворота системы векторов прямой последовательности, но противоположный ему по знаку. Токи нулевой последовательности через трансформатор, обмотки которого соединены в треугольник, как известно, не проходят, замыкаясь в этом треугольнике.

Все это учтено при построении диаграммы. Здесь вначале были нанесены вектора фазных Э.Д.С. генератора, образующих симметричную систему и поэтому сдвинутых в сторону опережения на 30° в сравнении с вектором \dot{E}_Γ .

Затем найдены положения систем векторов токов прямой и обратной последовательностей. Сложение этих векторов определяет токи в фазах генератора, причем токи a и c оказываются равными по модулю и противоположными по фазе, а ток фазы b оказывается равным нулю. Чтобы найти фазные напряжения на шинах генератора, из векторов фазных Э.Д.С. вычитаются векторы падений напряжения в сопротивлении генератора, определяемые его фазными токами.

4.4. Симметрирующий эффект батареи статических конденсаторов

Контролируемая степень несимметрии напряжений в узлах системы может определяться отношением:

$$a_{U(2)} = \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|}, \quad (4.8)$$

где $|\dot{U}_2|$ и $|\dot{U}_1|$ – модули напряжения прямой и обратной последовательностей в этих узлах.

Степень несимметрии токов определяется аналогичным по структуре выражением:

$$a_{I(2)} = \frac{|\dot{I}_2|}{|\dot{I}_1|}, \quad (4.9)$$

Уменьшить степень несимметрии как тока, так и напряжения можно путем включения в систему некоторого источника дополнительного задающего тока обратной последовательности. Выбирая модуль и аргумент этого тока таким образом, чтобы в интересующей ветви при сложении его с током \dot{I}_2 уменьшался модуль суммарного тока, можно уменьшить степень несимметрии тока в этой ветви до требуемых пределов.

Влияние дополнительного тока обратной последовательности на степень несимметрии напряжения нагрузки поясняется рис. 4.12, где показан участок схемы обратной последовательности.

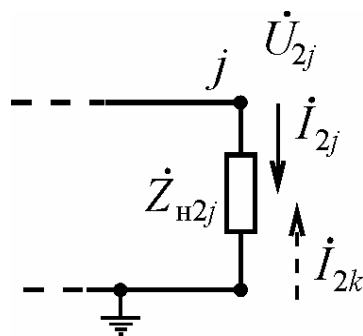


Рис. 4.12. Участок схемы обратной последовательности

При протекании тока \dot{I}_{2j} по сопротивлению обратной последовательности j -й нагрузки напряжение обратной последовательности:

$$\dot{U}_{2j} = \dot{I}_{2j} \dot{Z}_{н2j}.$$

Если по этому же сопротивлению будет протекать дополнительный ток обратной последовательности \dot{I}_{2k} , обусловленный действием некоторого источника задающего тока, то при соответствующем выборе модуля и аргумента тока \dot{I}_{2k} может иметь место уменьшение суммарного тока в сопротивлении нагрузки, а следовательно, и уменьшение напряжения \dot{U}_{2j} .

Источником дополнительного задающего тока обратной последовательности может служить батарея статических конденсаторов, работающая в несимметричном режиме. В общем случае для токов конденсаторной батареи всех трех последовательностей имеем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1k} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_{ak} + \dot{a}\dot{I}_{bk} + \dot{a}^2\dot{I}_{ck}); \\ \dot{I}_{2k} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_{ak} + \dot{a}^2\dot{I}_{bk} + \dot{a}\dot{I}_{ck}); \\ \dot{I}_{0k} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_{ak} + \dot{I}_{bk} + \dot{I}_{ck}). \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

Из этого уравнений, принимая во внимание очевидные соотношения из рис. 4.13, получаем:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ak} &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \\ \dot{I}_{bk} &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \\ \dot{I}_{ck} &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}; \end{aligned}$$

после преобразований можно получить:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1k} &= \frac{1}{3}[\dot{I}_{ab}(1-\dot{a}) + \dot{a}\dot{I}_{bc}(1-\dot{a}^2) - \dot{I}_{ca}(1-\dot{a}^2)]; \\ \dot{I}_{2k} &= \frac{1}{3}[\dot{I}_{ab}(1-\dot{a}^2) - \dot{a}\dot{I}_{bc}(1-\dot{a}) - \dot{I}_{ca}(1-\dot{a})]; \\ \dot{I}_{0k} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

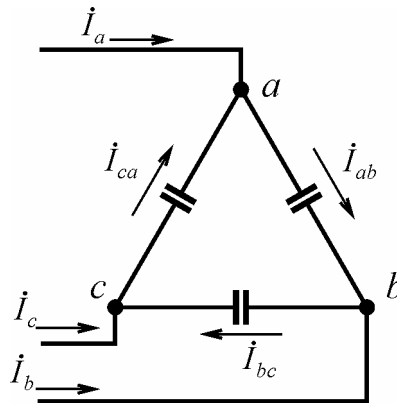


Рис. 4.13. Протекание токов через батарею статических конденсаторов

Дальнейшие выводы существенно упрощаются, если предположить, что симметрирующее воздействие конденсаторной батареи полностью исключает несимметрию напряжений на ее зажимах. Такое допущение близко к действительности, поскольку допускаемая степень несимметрии в системе отвечает весьма малому напряжению обратной последовательности.

При симметричном напряжении в точке включения батареи конденсаторов в сеть соотношение между приложенным напряжением и токами в ветвях батареи определяется векторной диаграммой, показанной на рис. 4.14. Векторная диаграмма позволяет установить, что при принятой ориентации векторов напряжения:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{a} I_{ab}; \quad \dot{I}_{bc} = I_{bc}; \quad \dot{I}_{ca} = \dot{a}^2 I_{ca}.$$

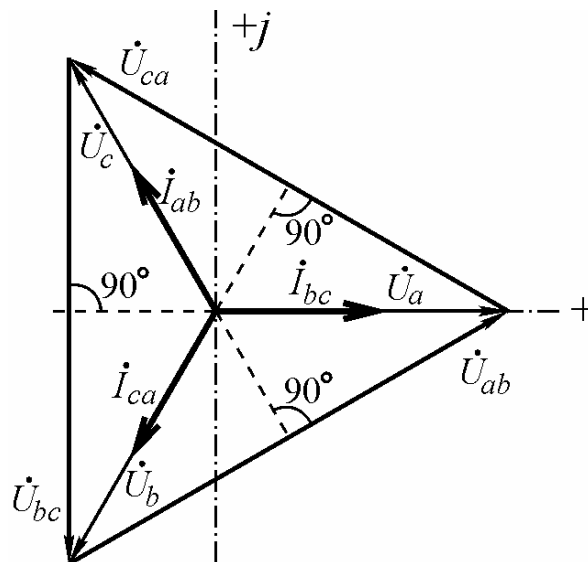


Рис. 4.14. Векторная диаграмма токов в конденсаторной батарее

При этом выражения (4.11) после дополнительных преобразований могут быть приведены к следующему виду:

$$\dot{I}_{1k} = \frac{j}{\sqrt{3}}(I_{ab} + I_{bc} + I_{ca}); \quad (4.12)$$

$$\dot{I}_{2k} = -\frac{j}{\sqrt{3}}(\dot{a}^2 I_{ab} + I_{bc} + \dot{a} I_{ca}). \quad (4.13)$$

Из (4.12) следует, что аргумент тока \dot{I}_{1k} в принятых условиях не зависит от аргументов токов в ветвях батареи. При изменении токов в этих ветвях изменяется только модуль тока прямой последовательности, тогда как его аргумент остается неизменным и равным тому значению, которое имеет место в симметричном режиме. Следовательно, применительно к системе токов прямой последовательности роль конденсаторной батареи как источника реактивной мощности сохраняется независимо от соотношения между токами I_{ab} , I_{bc} и I_{ca} .

Иные заключения можно сделать относительно тока обратной последовательности. Выражение для \dot{I}_{2k} (4.13) показывает, что изменение токов I_{ab} , I_{bc} и I_{ca} приводит к изменению не только модуля тока \dot{I}_{2k} , но также и его аргумента. Это свидетельствует о принципиальной возможности обеспечить необходимое симметрирующее воздействие на систему вне зависимости от того, какой для этого может потребоваться задающий ток \dot{I}_{2k} .

На рис. 4.15 показана векторная диаграмма, отвечающая правой части последнего выражения (4.13). В соответствии с этим выражением на комплексной плоскости отмечены направления векторов, пропорциональных единичным векторам 1 , $-\dot{a}$ и $-\dot{a}^2$, и указаны опережающие их на 90° векторы, характеризующие каждую из трех составляющих правой части выражения (4.13). Диаграмма показывает, что эти три составляющие, каждая из которых пропорциональна определенному междуфазному току батареи, разбивают комплексную плоскость на области I, II и III. Эти области, разграничиваются прямыми, сдвинутыми относительно друг друга на углы 120° .

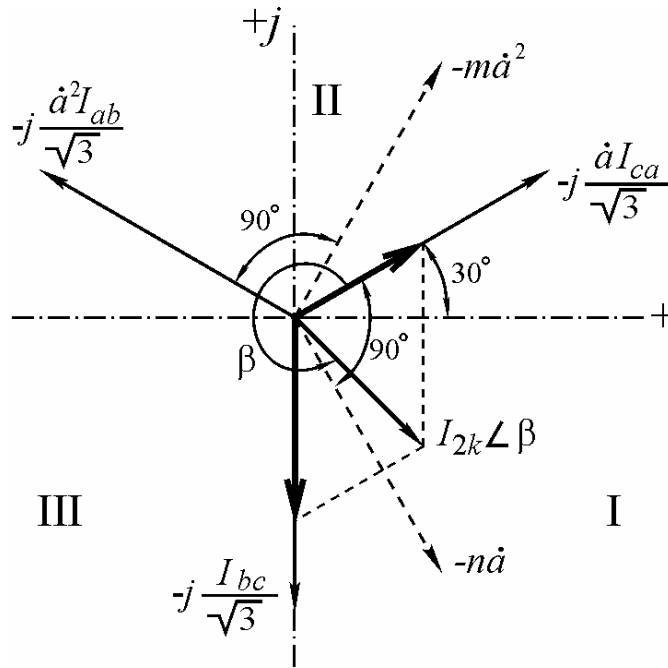


Рис. 4.15. Векторная диаграмма составляющих тока обратной последовательности через конденсаторную батарею

Пусть по условиям компенсации несимметрии в системе батарея конденсаторов должна создать задающий ток обратной последовательности, отмеченный на рис. 4.15 вектором $\dot{I}_{2k} = I_{2k} \angle \beta$. Нетрудно заметить, что такой ток может быть получен в результате суммирования токов \dot{I}_{ca} и \dot{I}_{bc} при токе $I_{ab} = 0$. Необходимые величины токов батареи могут быть найдены в результате построения, показанного на рис. 4.15. Решение может быть получено и аналитически из уравнения:

$$\dot{I}_{2k} (\cos \beta + j \sin \beta) = -\frac{j}{\sqrt{3}} (\dot{a} I_{ca} + I_{bc}), \quad (4.14)$$

левая часть которого характеризует ток, заданный условиями симметрирования, а правая – определяет ток обратной последовательности конденсаторной батареи при $I_{ab} = 0$. Учитывая, что $\dot{a} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$, можно, приравняв вещественные и мнимые слагающие в правой и левой частях уравнения (4.14), получить систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} I_{2k} \cos \beta &= \frac{1}{2} I_{ca}; \\ I_{2k} \sin \beta &= -\frac{1}{\sqrt{3}} I_{bc} + \frac{1}{2\sqrt{3}} I_{ca}, \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

откуда следует, что

$$I_{ca} = 2I_{2k} \cos \beta;$$

$$I_{bc} = I_{2k} (\cos \beta - \sqrt{3} \sin \beta).$$

Мощности конденсаторов, обеспечивающие необходимый симметрирующий эффект, в рассматриваемом случае находятся согласно уравнениям

$$Q_{kab} = 0;$$

$$Q_{kca} \approx 2U_{\text{ном}} I_{2k} \cos \beta;$$

$$Q_{kbc} \approx U_{\text{ном}} I_{2k} (\cos \beta - \sqrt{3} \sin \beta).$$

Аналогично можно установить, что в случае, когда по условиям симметрирования требуется получить задающий ток с аргументом, отвечающим неравенству $150^\circ > \beta > 30^\circ$ (в этом случае вектор задающего тока I_{2k} располагается во второй зоне, выделенной на рисунке), междуфазные токи батареи определяются соотношениями:

$$I_{ab} = I_{2k} (\sqrt{3} \sin \beta - \cos \beta);$$

$$I_{bc} = 0;$$

$$I_{ca} = I_{2k} (\sqrt{3} \sin \beta + \cos \beta).$$

При расположении вектора требуемого задающего тока обратной последовательности в третьей зоне, чему отвечает неравенство:

$$270^\circ > \beta > 150^\circ,$$

токи батареи конденсаторов выражаются следующим образом:

$$I_{ab} = -2I_{2k} \cos \beta;$$

$$I_{bc} = -I_{2k} (\cos \beta + \sqrt{3} \sin \beta);$$

$$I_{ca} = 0.$$

Перевод батарей в несимметричный режим для получения симметрирующего эффекта целесообразно осуществлять таким образом, чтобы конденсаторы в отключаемой ветви батареи могли быть включены в другие ветви. В этом случае, работая в несимметричном режиме, батарея, как это следует из (4.12), обусловит протекание в сети больших емкостных токов прямой последовательности, нежели при частичном отключении конденсаторов. Кроме того, предусматривая возможность переключения конденсаторов на различное междуфазное напряжение, во многих случаях можно получить необходимый симметрирующий эффект при меньшей установленной мощности батареи.

Вопросы для самопроверки

1. В чем принципиальное отличие схем замещения электрической сети при отключении одной и двух фаз?
2. Как изменится схема замещения при обрыве фазы (двух фаз) ЛЭП в середине линии?
3. Каким параметром можно описать степень несимметрии режима?
4. При каких начальных условиях произведен вывод уравнений для выбора необходимых мощностей конденсаторных батарей?
5. В чем заключается принцип симметрирования режима?