

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.В.ДВ.02.02 Симметричные составляющие несимметричной
трехфазной системы**

Направление подготовки (специальность) 35.04.06 Агроинженерия
Профиль образовательной программы Электротехнологии и электрооборудова-
ние в сельском хозяйстве
Форма обучения очная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Методические указания по проведению практических занятий.....	3
1.1 Практическое занятие №1, 2 - Разложение несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие.....	3
1.2 Практическое занятие №3,4 - Степень несимметрии и мощность несимметричной трехфазной системы.....	7
1.3 Практическое занятие №5,6 - Действие трехфазной несимметричной системы напряжений на симметричный трехфазный приемник энергии.....	13
1.4 Практическое занятие №7 - Нахождение токов короткого замыкания в симметричных трехфазных системах.....	17

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

1.1 Практическое занятие №1,2 (4 часа).

Тема: «Разложение несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие»

1.1.1 Задание для работы: рассмотреть принцип разложения несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие

1.1.2 Краткое описание проводимого занятия:

Трехфазные цепи являются одним из видов цепей синусоидального тока, и, следовательно, для них в полной мере применимы методы расчета и анализа цепей в символической форме. Анализ трехфазных цепей удобно осуществлять с использованием векторных диаграмм, позволяющих достаточно просто определять фазовые сдвиги между токами и напряжениями. Однако существующая определенная специфика трехфазных цепей вносит характерные особенности в их расчет.

Основным признаком классификации трехфазных систем ЭДС, напряжений и токов является их симметричность.

Симметричные трехфазные системы

Условиями симметричности является равенство мгновенных (комплексных) значений ЭДС фаз генератора. Мгновенные и комплексные значения ЭДС трехфазного симметричного генератора имеют вид:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\omega t + \psi) \rightarrow \dot{E}_A = E_A e^{j\psi}; \\ e_B &= E_m \sin(\omega t + \psi - 120^\circ) \rightarrow \dot{E}_B = \dot{E}_A e^{-j120^\circ} = \dot{E}_A e^{j240^\circ} = a^2 \dot{E}_A; \\ e_C &= E_m \sin(\omega t + \psi - 240^\circ) \rightarrow \dot{E}_C = \dot{E}_A e^{-j240^\circ} = \dot{E}_A e^{j120^\circ} = a \dot{E}_A, \end{aligned} \quad (1)$$

где a – оператор поворота, причем

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^3 = 1, \quad a^4 = a \text{ и т.д.}$$

Условием симметричности трехфазного приемника является равенство комплексных сопротивлений соответствующих фаз: т.е. если $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$ (фазы нагрузки соединены звездой, рис. 1, а) или $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$ (фазы нагрузки соединены треугольником, см. рис. 1, б). В противном случае приемник является несимметричным.

Существуют трехфазные системы, в которых нулевые точки генератора O и нагрузки o_1 соединяются проводом с сопротивлением $\underline{Z}_N = 0$ или $\underline{Z}_N \neq 0$ (см. рис. 1, в). Такой провод называют нулевым или нейтральным проводом.

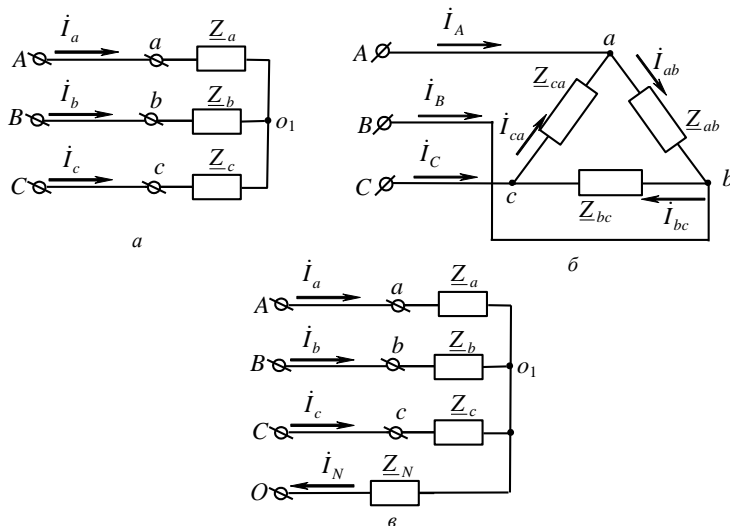


Рис. 1

Если к симметричной трехфазной цепи приложена симметричная трехфазная система напряжений генератора, то в ней будет действовать симметричная система токов. Такой режим работы трехфазной цепи называется симметричным. В этом режиме токи и напряжения соответствующих фаз равны по модулю и сдвинуты по фазе на $\pm 120^\circ$. Расчет таких цепей проводится для одной (базовой) фазы, в качестве которой обычно принимают фазу A . При этом соответствующие величины в других фазах получают формальным добавлением к аргументу переменной фазы A фазового сдвига $\pm 120^\circ$ при сохранении неизменным ее модуля.

Для симметричной трехфазной системы при соединении нагрузки звездой (см. рис. 1, а) существуют следующие зависимости между действующими значениями линейных и фазных напряжений и токов:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}; \quad I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}, \quad (2)$$

между комплексными значениями токов фаз

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{E}_A}{Z_a} = I_a e^{j\varphi}; \quad \dot{I}_b = \dot{I}_a e^{-j120^\circ} = I_a e^{j(\varphi-120^\circ)}; \quad \dot{I}_c = \dot{I}_a e^{j120^\circ} = I_a e^{j(\varphi+120^\circ)}. \quad (3)$$

При наличии нейтрального провода ток в этом проводе определяется по первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c, \quad (4)$$

при отсутствии нейтрального провода

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0. \quad (5)$$

Для симметричной трехфазной системы при соединении нагрузки треугольником (см. рис. 1, б) действующие значения линейных и фазных напряжений и токов связаны соотношениями:

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}; \quad I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}, \quad (6)$$

комплексные значения токов фаз

$$\dot{I}_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}} = I_{ab} e^{j\varphi}; \quad \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ab} e^{-j120^\circ} = I_{ab} e^{j(\varphi-120^\circ)}; \quad \dot{I}_{ca} = \dot{I}_{ab} e^{j120^\circ} = I_{ab} e^{j(\varphi+120^\circ)}, \quad (7)$$

комплексные значения линейных токов

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \dot{I}_{ab} e^{-j30^\circ} = \sqrt{3} I_{ab} e^{j(\varphi-30^\circ)}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_A e^{-j120^\circ} = \sqrt{3} I_{ab} e^{j(\varphi-150^\circ)}; \quad (8)$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_A e^{j120^\circ} = \sqrt{3} I_{ab} e^{j(\varphi+90^\circ)}.$$

Комплексная, полная, активная и реактивная мощности в симметричной трехфазной системе определяются соответственно по указанным ниже формулам для схем «звезда – звезда»

$$\tilde{S}_\lambda = 3 \dot{U}_\phi \dot{I}_\phi^*; \quad S_\lambda = 3 U_\phi I_\phi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{ф}};$$

$$P_{\text{потр}_\lambda} = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{ф}} \cos \varphi = 3 I_\phi^2 R_\phi = \frac{U_\phi^2}{R_\phi};$$

$$Q_{\text{потр}_\lambda} = 3 U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{ф}} \sin \varphi = 3 I_\phi^2 X_\phi = \frac{U_\phi^2}{X_\phi}.$$

(9)

для схем «треугольник – треугольник»

$$\begin{aligned}
\tilde{S}_{\Delta} &= 3\dot{U}_{\phi} I_{\phi}^*; \quad S_{\Delta} = 3U_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{3}U_{\phi} I_L; \\
P_{\text{потр}_{\Delta}} &= 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{\phi} I_L \cos \varphi = 3I_{\phi}^2 R_{\phi} = I_L^2 R_{\phi}; \\
Q_{\text{потр}_{\Delta}} &= 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi = \sqrt{3}U_{\phi} I_L \sin \varphi = 3I_{\phi}^2 X_{\phi} = I_L^2 X_{\phi},
\end{aligned} \tag{10}$$

Несимметричные трехфазные системы

Если хотя бы одно из условий симметрии не выполняется, трехфазная цепь работает в несимметричном режиме. Такие режимы при подключении статической нагрузки рассчитываются любым из известных методов расчета линейных электрических цепей с источниками гармонических воздействий. Как правило, падением напряжения на внутреннем сопротивлении генератора пренебрегают и фазные напряжения генератора заменяются соответствующими идеальными источниками ЭДС. Поскольку в трехфазных цепях, помимо значений токов, обычно представляют интерес также величины потенциалов узлов, в большинстве случаев для расчета применяется метод узловых потенциалов.

Если заданы линейные напряжения, удобно рассчитывать трехфазные цепи при соединении фаз нагрузки в *треугольник*. Пусть в схеме (см. рис. 1, б) нагрузка несимметрична и $\underline{Z}_{ab} \neq \underline{Z}_{bc} \neq \underline{Z}_{ca}$. Тогда при известных комплексах линейных напряжений в соответствии с законом Ома фазные токи

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}. \tag{11}$$

По найденным фазным токам приемника на основании первого закона Кирхгофа определяются линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \tag{12}$$

Если к трехфазному генератору, фазы которого соединены *звездой* (рис. 2), подключен приемник электрической энергии, фазы которого также соединены звездой, то в случае несимметричной трехфазной системы между нейтральными (нулевыми) точками приемника и генератора возникает напряжение смещения нейтрали

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_a + \dot{E}_B \underline{Y}_b + \dot{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}, \tag{13}$$

здесь $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ – комплексы ЭДС соответствующих фаз генератора; $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c, \underline{Y}_N$ – комплексные проводимости соответствующих фаз нагрузки и нейтрального (нулевого) провода.

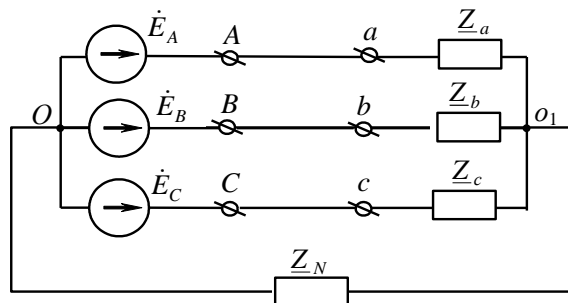


Рис. 2

Напряжение на фазах нагрузки

$$\begin{aligned}
\dot{U}_a &= \dot{I}_a \underline{Z}_a = \dot{E}_A - \dot{U}_N; \quad \dot{U}_b = \dot{I}_b \underline{Z}_b = \dot{E}_B - \dot{U}_N; \\
\dot{U}_c &= \dot{I}_c \underline{Z}_c = \dot{E}_C - \dot{U}_N.
\end{aligned} \tag{14}$$

Токи в фазах

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a \underline{Y}_a; \quad \dot{I}_b = \dot{U}_b \underline{Y}_b; \quad \dot{I}_c = \dot{U}_c \underline{Y}_c. \quad (15)$$

Ток нейтрального провода

$$\dot{I}_N = \dot{U}_N \underline{Y}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c. \quad (16)$$

При расчете трехфазной системы «звезда – звезда с нейтральным проводом с сопротивлением $\underline{Z}_N = 0$ » нет необходимости рассчитывать напряжение смещения нейтрали, поскольку $\dot{U}_N = 0$. В этом случае трехфазную систему можно рассматривать как совокупность трех независимых контуров и рассчитывать каждый контур известными методами расчета цепей синусоидального тока. Целесообразно использовать векторные диаграммы при расчете таких цепей.

В случае отсутствия нейтрального провода в формуле (13) проводимость нейтрального провода \underline{Y}_N принимают равной нулю. При этом, если генератор симметричный, а симметрия нагрузки нарушена сопротивлением нагрузки, подключенном в одной из фаз (например, $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z} \neq \underline{Z}_a$), удобно для определения напряжения смещения нейтрали воспользоваться формулой:

$$\dot{U}_N = \dot{E}_A \frac{\underline{Y}_a - \underline{Y}}{\underline{Y}_a + 2\underline{Y}}, \quad (17)$$

для оставшихся случаев $\underline{Z}_a = \underline{Z}_c = \underline{Z} \neq \underline{Z}_b$ и $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z} \neq \underline{Z}_c$ соответственно

$$\dot{U}_N = \dot{E}_B \frac{\underline{Y}_b - \underline{Y}}{\underline{Y}_b + 2\underline{Y}}; \quad \dot{U}_N = \dot{E}_C \frac{\underline{Y}_c - \underline{Y}}{\underline{Y}_c + 2\underline{Y}}. \quad (18)$$

Если нагрузка соединена звездой без нейтрального провода и известны линейные напряжения $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$, то фазные напряжения $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ нагрузки находятся по формулам:

$$\dot{U}_a = \frac{\dot{U}_{AB} \underline{Y}_b - \dot{U}_{CA} \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}; \quad \dot{U}_b = \frac{\dot{U}_{BC} \underline{Y}_c - \dot{U}_{AB} \underline{Y}_a}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}; \quad \dot{U}_c = \frac{\dot{U}_{CA} \underline{Y}_a - \dot{U}_{BC} \underline{Y}_b}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}. \quad (19)$$

Для любой трехфазной системы сумма комплексных значений линейных напряжений равна нулю:

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0. \quad (20)$$

1.1.3 Результаты и выводы: рассмотрен принцип разложения несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие

1.2 Практическое занятие №3,4 (4 часа).

Тема: «Степень несимметрии и мощность несимметричной трехфазной системы»

1.2.1 Задание для работы: рассмотреть вопрос о степени несимметрии и мощности несимметричной трехфазной системы

1.2.2 Краткое описание проводимого занятия:

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.

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. 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 ($\dot{I}_H \rightarrow 0$) 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.

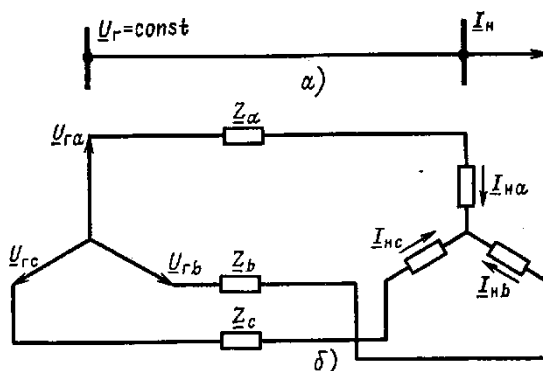


Рис. 1. Тупиковая линия: а — схема линии; б — схема замещения

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 (ИРМ).

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.

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.

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:

$$\dot{\mathbf{U}} = \begin{Bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{Bmatrix}; \quad \dot{\mathbf{I}} = \begin{Bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Рассмотрим уравнение режима для схемы участка трехфазной линии, 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 (рис.) справедливы уравнения

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_a &= \dot{I}_a \dot{Z}_{aL} + \dot{I}_b \dot{Z}_{ab} + \dot{I}_c \dot{Z}_{ac}; \\ \Delta \dot{U}_b &= \dot{I}_a \dot{Z}_{ba} + \dot{I}_b \dot{Z}_{bL} + \dot{I}_c \dot{Z}_{bc}; \\ \Delta \dot{U}_c &= \dot{I}_a \dot{Z}_{ca} + \dot{I}_b \dot{Z}_{bc} + \dot{I}_c \dot{Z}_{cL}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

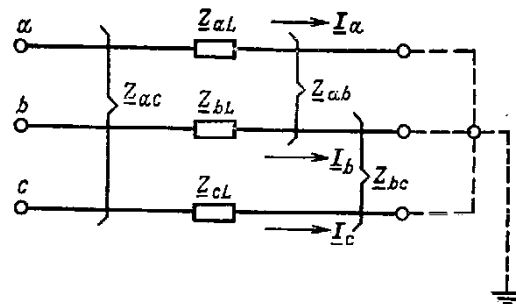


Схема участка трехфазной линии

или в матричной форме

$$\Delta \dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{Z}}_{LM} \dot{\mathbf{I}}. \quad (3)$$

В уравнениях (2) и (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

$$\dot{\mathbf{Z}}_{LM} = \begin{Bmatrix} \dot{Z}_{aL} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac} \\ \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{bL} & \dot{Z}_{bc} \\ \dot{Z}_{ac} & \dot{Z}_{bc} & \dot{Z}_{cL} \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

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

$$\Delta \dot{U} = \dot{Z} \dot{I}, \quad (5)$$

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 (2) может быть заменена одним уравнением (5). Сравнивая (2) и (5), легко убедиться, что несимметричный режим участка линии на рис. 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

$$\Delta \dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{Z}}_y \dot{\mathbf{I}}, \quad (6)$$

где размерность векторов падения напряжения $\Delta \dot{\mathbf{U}}$, токов в узлах $\dot{\mathbf{I}}$ 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 $\dot{\mathbf{I}}$, определяется (1), т.е. содержит комплексы фазных токов. Соответственно каждый элемент матрицы $\dot{\mathbf{Z}}_y$ определяется (4), т.е. содержит активные сопротивления, а также сопротивления самоиндукции и взаимной индукции.

Расчет несимметричного режима в фазных координатах не применялся до использования ЭВМ, так как приводил к трехкратному увеличению размерности решаемой системы. В настоящее время у нас в стране и за рубежом разрабатываются методы расчета несимметричных режимов на ЭВМ в фазных координатах.

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 изображены три симметричные системы применительно к расчету тока.

Токи фаз b и c можно выразить через ток фазы a следующим образом: для прямой последовательности (рис. 3, а)

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{b1} &= \dot{I}_{a1} e^{-j2\pi/3} = \dot{I}_{a1} e^{j4\pi/3}; \\ \dot{I}_{c1} &= \dot{I}_{a1} e^{j2\pi/3} = \dot{I}_{a1} \cdot \dot{a}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

для обратной последовательности (рис. 3, б)

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{b2} &= \dot{I}_{a2} e^{j2\pi/3} = \dot{I}_{a2} \cdot \dot{a}; \\ \dot{I}_{c2} &= \dot{I}_{a2} e^{j4\pi/3} = \dot{I}_{a2} \cdot \dot{a}^2. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

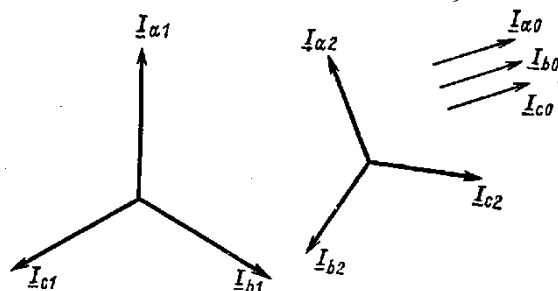


Рис. 3. Три симметричные системы тока

В соответствии с методом симметричных составляющих с учетом (7) и (8) трехфазную несимметричную систему токов $\dot{\mathbf{I}}$ в выражении (1) можно представить в виде суммы трех симметричных величин:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b0} = \dot{a}^2 \dot{I}_{a1} + \dot{a} \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0} = \dot{a} \dot{I}_{a1} + \dot{a}^2 \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В матричной форме уравнения (9) имеют вид

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

или

$$\dot{\mathbf{I}} = \dot{\mathbf{s}} \dot{\mathbf{I}}_s, \quad (10)$$

где

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

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

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

Из (10) получим

$$\dot{\mathbf{I}}_s = \dot{\mathbf{s}}^{-1} \dot{\mathbf{I}} \quad (11)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{a} \dot{I}_b + \dot{a}^2 \dot{I}_c) \\ \dot{I}_{a2} &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{a}^2 \dot{I}_b + \dot{a} \dot{I}_c) \\ \dot{I}_{a0} &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Систему (12) можно легко получить, если решить уравнения (9). Матрица $\dot{\mathbf{s}}^{-1}$, а также выражения (11) или (12) отражают переход из фазных координат в симметричные. Покажем, как с помощью матриц преобразования $\dot{\mathbf{s}}$ и $\dot{\mathbf{s}}^{-1}$ получить в системе координат симметричных составляющих уравнения закона Ома (2) или (3), ранее полученные в системе фазных координат.

Переход от системы симметричных составляющих к фазным координатам (10) справедлив и для таких параметров режима, как напряжение и падение напряжения:

$$\Delta \dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{s}} \Delta \dot{\mathbf{U}}_s \quad (13)$$

С учетом (10) и (13) выражение (3) можно записать в следующем виде в системе симметричных координат:

$$\dot{\mathbf{s}} \Delta \dot{\mathbf{U}}_s = \dot{\mathbf{Z}}_{LM} \dot{\mathbf{I}}_s. \quad (14)$$

Отсюда следует, что

$$\Delta \dot{U}_s = \dot{s}^{-1} \dot{Z}_{LM} \dot{s} \dot{I}_s = \dot{Z}_s \dot{I}_s, \quad (15)$$

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

$$\dot{Z}_s = \dot{s}^{-1} \dot{Z}_{LM} \dot{s}. \quad (16)$$

По выражению, аналогичному (16) можно найти и другие пассивные параметры сети, например проводимости ветвей в системе симметричных координат.

Система уравнений (15) имеет ту же размерность, что и (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 (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.

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 междуфазные 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 (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 (16), (14) следует

$$\dot{Z}_s = \dot{s}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} \dot{Z}_{aL} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac} \\ \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{bL} & \dot{Z}_{bc} \\ \dot{Z}_{ac} & \dot{Z}_{bc} & \dot{Z}_{cL} \end{vmatrix} \cdot \dot{s} = \begin{vmatrix} \dot{Z}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_0 \end{vmatrix}, \quad (17)$$

где

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = \dot{Z}_L - \dot{Z}_M \quad (18)$$

$$\dot{Z}_0 = \dot{Z}_L + 2\dot{Z}_M. \quad (19)$$

Выражение (15) можно записать в следующем виде:

$$\Delta \dot{U}_s = \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{a1} \\ \Delta \dot{U}_{a2} \\ \Delta \dot{U}_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Z}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Z}_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{a1} \cdot \dot{Z}_1 \\ \dot{I}_{a2} \cdot \dot{Z}_2 \\ \dot{I}_{a0} \cdot \dot{Z}_0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Из (20) следует, что в рассматриваемом частном случае вместо системы из трех уравнений (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 (15), а тремя независимыми уравнениями в (20).

Сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей называют коэффициентами 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 (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.

1.2.3 Результаты и выводы: рассмотрен вопрос о степени несимметрии и мощности несимметричной трехфазной системы

1.3 Практическое занятие №5,6 (4 часа).

Тема: «Действие трехфазной несимметричной системы напряжений на симметричный трехфазный приемник энергии»

1.3.1 Задание для работы: рассмотреть действие трехфазной несимметричной системы напряжений на симметричный трехфазный приемник энергии

1.3.2 Краткое описание проводимого занятия:

В схеме замещения прямой последовательности элементы сети представляются ветвями с неизменным сопротивлением так же, как и при расчетах параметров симметричных режимов работы.

Напряжения питающей системы или генераторов вводятся только в прямую последовательность. Эти величины вводятся фазными значениями. При этом в схемах замещения по элементам сети протекают токи равные симметричным составляющим. Симметричные составляющие напряжений определяются умножением симметричных составляющих токов на соответствующие сопротивления в схемах замещения.

Параметры схем замещения токам обратной последовательности воздушных и кабельных линий, реакторов, конденсаторов и трансформаторов принимают равными параметрам в схеме замещения прямой последовательности. Сопротивления обратной последовательности генераторов определяют по задаваемой в справочной литературе относительной величине x_2 .

Сопротивления нагрузок зависят от состава и режима работы. Значения сопротивления обратной последовательности комплексной нагрузки, подключаемой к узлам с напряжением 6 - 10 кВ ($R_2 + jX_2$): металлургия $0.3 + j0.43$; горнорудная $0.16 + j0.28$; химия $0.11 + j0.25$; машиностроение $0.2 + j0.35$; коммунально-бытовая $0.1 + j0.33$; нефтедобыча $0.13 + j0.26$; электротяга $1.06 + j0.83$; бытовая $0.17 + j0.23$; газовая, асинхронный привод $0.12 + j0.17$; газовая, синхронный привод $0.05 + j0.29$; сельскохозяйственная

0,17+j0,24; легкая 0,16+j0,29; угледобыча шахтная 0,18+j0,32; угледобыча открытая 0,1+j0,276. Сопротивление нагрузок в относительных единицах можно принимать в схеме замещения обратной последовательности, присоединенных к сети 6-10 кВ, $Z_2=0,18+j0,24$, для нагрузок, присоединенных к сети 110 кВ, $Z_2=0,19+j0,36$.

Схема замещения системы токам нулевой последовательности по структуре отличается от схемы замещения прямой и обратной. Это обусловлено тем, что токи нулевой последовательности за трансформатором с соединением обмоток в треугольник отсутствуют.

Для приближенных расчетов учитывают увеличение активного удельного сопротивления линии в нулевой последовательности на 0,15 Ом/км, а индуктивное увеличивается в зависимости от наличия тросов. Для одноцепных линий без тросов $X_2=3.5X_1$, со стальными тросами $X_2=3X_1$, со сталеалюминевыми тросами $X_2=2X_1$.

Расчет параметров несимметричного режима строится на ряде допущений. Любая несимметричная трехфазная система фазных токов (напряжений) может быть представлена тремя системами симметричных составляющих - прямой, обратной и нулевой последовательностей. Между параметрами фаз и симметричными составляющими следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1} &= (\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C)/3, \quad \dot{I}_{A2} = (\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C)/3, \\ \dot{I}_{A0} &= (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)/3, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{B0}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{C0},$$

где вектора поворота равны следующим значениям

$$a = -0.5 + j\sqrt{3}/2, \quad a^2 = -0.5 - j\sqrt{3}/2. \quad (2)$$

Параметры фаз могут быть определены через симметричные составляющие, полученные для фазы А:

$$\dot{I}_{B1} = a^2\dot{I}_{A1}, \quad \dot{I}_{B2} = a\dot{I}_{A2}, \quad \dot{I}_{C1} = a\dot{I}_{A1}, \quad \dot{I}_{C2} = a^2\dot{I}_{A2}, \quad \dot{I}_{B0} = \dot{I}_{A0} = \dot{I}_{C0}. \quad (3)$$

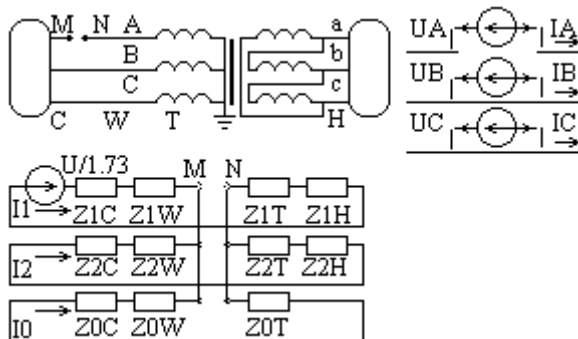


Рис.1.

Принципиальная схема электропередачи, схема без разрыва и расширенная схема замещения неполнофазной электропередачи.

После перехода через трансформатор с соединением обмоток звезда-треугольник фазные параметры определяются симметричными составляющими прямой и обратной последовательностей:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2}, \quad \dot{U}_b = \dot{U}_{b1} + \dot{U}_{b2} = a^2\dot{U}_{a1} + a\dot{U}_{a2}, \quad (4)$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_{c1} + \dot{U}_{c2} = a\dot{U}_{a1} + a^2\dot{U}_{a2}.$$

Линейные напряжения могут быть выражены через фазные напряжения, либо через симметричные составляющие напряжений

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{U}_a - \dot{U}_b = (1 - a^2)\dot{U}_{a1} + (1 - a)\dot{U}_{a2} \\ \dot{U}_{bc} &= \dot{U}_b - \dot{U}_c = (a^2 - a)\dot{U}_{a1} + (a - a^2)\dot{U}_{a2} \\ \dot{U}_{ca} &= \dot{U}_c - \dot{U}_a = (a - 1)\dot{U}_{a1} + (a^2 - 1)\dot{U}_{a2} \end{aligned} \quad (5)$$

В соответствии с методом симметричных составляющих несимметричную схему с разрывом фазы приводят к схеме без разрыва путем введения в место разрыва соответствующего напряжения, либо сопротивления. Вид расширенной схемы замещения и расчетные выражения вытекают из анализа уравнений составленных для граничных условий

$$\dot{I}_A = 0, \dot{U}_B = 0, \dot{U}_C = 0. \quad (6)$$

Представим несимметричные токи и напряжения через симметричные составляющие

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}, \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0}, \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{C0}. \end{aligned} \quad (7)$$

Выразим напряжения через симметричные составляющие фазы А

$$\begin{aligned} \dot{U}_B &= a^2 \dot{U}_{A1} + a \dot{U}_{A2} + \dot{U}_0, \\ \dot{U}_C &= a \dot{U}_{A1} + a^2 \dot{U}_{A2} + \dot{U}_0. \end{aligned} \quad (8)$$

Из последних уравнений следует, что

$$\dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2} = \dot{U}_0. \quad (9)$$

Это равенство симметричных составляющих напряжений позволяет объединять в месте обрыва схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей и создать единую схему замещения при расчете параметров неполнофазных режимов работы.

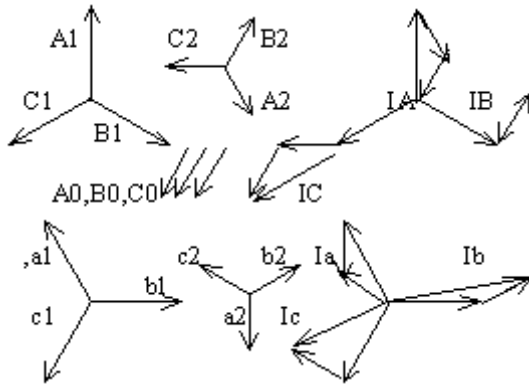


Рис.2. Симметричные составляющие и фазные токи на стороне звезды и треугольника трансформатора в неполнофазном режиме.

В соответствии со схемой замещения определяем симметричные составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1} &= (U / \sqrt{3}) / (\dot{Z}_{11} + \dot{Z}_{22} \dot{Z}_{00} / (\dot{Z}_{22} + \dot{Z}_{00})), \\ \dot{I}_{A2} &= -\dot{I}_{A1} \dot{Z}_{00} / (\dot{Z}_{22} + \dot{Z}_{00}), \\ \dot{I}_{A0} &= -\dot{I}_{A1} \dot{Z}_{22} / (\dot{Z}_{22} + \dot{Z}_{00}), \end{aligned} \quad (10)$$

где U - линейное напряжение питающей системы, Z_{11} - результирующее сопротивление схемы замещения прямой последовательности, Z_{22} - результирующее сопротивление схемы замещения обратной последовательности, Z_{00} - результирующее сопротивление схемы замещения нулевой последовательности. Использование модуля напряжения питающей системы означает, что на векторной диаграмме вектора токов и напряжений ориентированы относительно этого вектора.

По схеме замещения могут быть получены симметричные составляющие токов и напряжений. Следует учитывать, что величина тока в нейтрали силового трансформатора соответствует утроенному значению тока

нулевой последовательности. Ограничения в применении несимметричных режимов могут быть связаны не только с несимметрией токов и напряжений, но и с недопустимым снижением напряжения на шинах нагрузки. Ориентировочно эти показатели могут быть определены по дополнительным сопротивлениям в схеме замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для получения более точных результатов проводится расчет параметров режима с учетом трансформации параметров.

В соответствии с требованиями к качеству электрической энергии [11] нормальное допустимое значение коэффициента обратной последовательности напряжений K_{2U} должно быть не более 2%, а максимальное не более 4%.

Коэффициент обратной последовательности в процентах вычисляют по формуле

$$K_{2U} = 100U_{2(1)}/U_{НОМ}, \quad (11)$$

где $U_{2(1)}$ - действующее значение обратной последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений;

$U_{НОМ}$ - номинальное значение междуфазного напряжения.

При определении симметричных составляющих напряжений на стороне треугольника силового трансформатора с группой соединения обмоток звезда треугольник - 11, следует учесть, что токи прямой последовательности сдвигаются на угол $+30$ градусов, а токи обратной на угол -30 градусов

Учитывая также то, что напряжения на стороне треугольника не зависят от составляющих нулевой последовательности на стороне звезды трансформатора, получаем следующие выражения для составляющих напряжений прямой и обратной последовательностей на стороне низшего напряжения приемной подстанции:

$$\dot{U}_{a1} = \dot{I}_{A1} \dot{Z}_{1H} e^{j30} / k_T, \quad \dot{U}_{a2} = \dot{I}_{A2} \dot{Z}_{2H} e^{-j30} / k_T, \quad (12)$$

где Z_{1H} - сопротивление нагрузки токам прямой последовательности, Z_{2H} - сопротивление нагрузки токам обратной последовательности, k_T - коэффициент трансформации силового трансформатора.

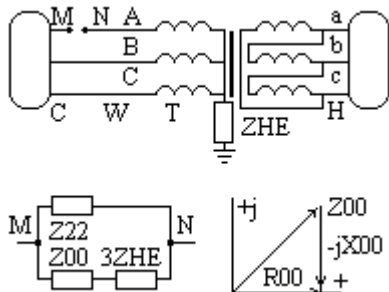


Рис.3. Принципиальная схема, часть схемы замещения включаемой в место разрыва и векторная диаграмма при включении в нейтраль батареи конденсаторов.

Фазные и линейные напряжения определяются через симметричные составляющие:

$$U_a = U_{a1} + U_{a2}; \quad U_b = U_{b1} + U_{b2}; \quad U_c = U_{c1} + U_{c2}; \quad (13)$$

где симметричные составляющие напряжений фаз b и c определяются через симметричные составляющие фазы a

$$U_{b1} = a^2 U_{a1}, \quad U_{c1} = a U_{a1}, \quad U_{b2} = a U_{a2}, \quad U_{c2} = a^2 U_{a2}. \quad (14)$$

Определим значения линейных напряжений по фазным значениям на шинах нагрузки

$$U_{ab} = U_a - U_b; \quad U_{bc} = U_b - U_c; \quad U_{ca} = U_c - U_a. \quad (15)$$

Симметрирование неполнофазных режимов возможно различными способами с использованием дополнительных устройств либо устройств, которые в нормальных режимах выполняют другие функции.

Одним из способов симметрирования параметров режима является уменьшение сопротивления нулевой последовательности, что влечет перераспределение токов нулевой и обратной последовательностей.

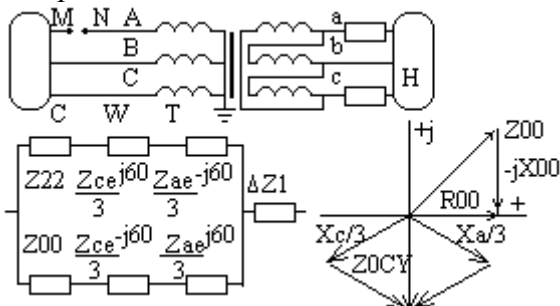


Рис.4. Принципиальная схема, часть схемы замещения включаемой в место разрыва и векторная диаграмма при включении СУ в фазы.

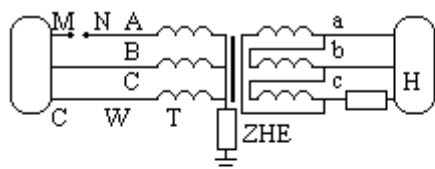


Рис.7.5. Включение СУ в фазу и нейтраль.

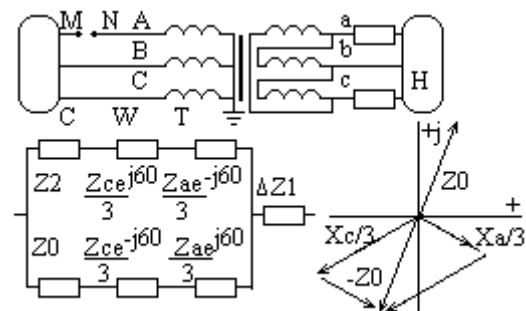
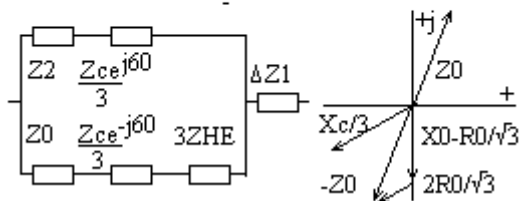


Рис.7.6. Принципиальная схема, часть схемы замещения включаемой в место разрыва и векторная диаграмма при включении СУ в фазы.

В этом случае уменьшается и общее сопротивление, составленное из суммарных сопротивлений обратной и нулевой последовательностей, что приводит к снижению потерь напряжения в несимметричном режиме. При включении батарей конденсаторов в нейтраль силовых трансформаторов сопротивление нулевой последовательности может быть уменьшено до действительной составляющей R_0 , а несимметрия токов снижена до

$$I_2/I_1 = |R_{00}|/|R_{00} + \dot{Z}_{22}|. \quad (16)$$

При включении равных батарей конденсаторов в фазы на стороне НН трансформатора сопротивление нулевой последовательности можно уменьшить до R_{00} , а несимметрию токов снизить до значения

$$I_2/I_1 = |R_{00}|/|R_{00} - jX_{00} + \dot{Z}_{22}|. \quad (17)$$

При введении в схему дополнительных устройств изменяются сопротивления токам прямой, обратной и нулевой последовательностей. Продольное включение элементов симметрирующих устройств позволяет снижать несимметрию без регулирования самих устройств. Мощность симметрирующих устройств определяется мощностью нагрузки и необходимой степенью компенсации сопротивления обратной последовательности электропередачи.

Введение неравных емкостей в фазы или емкости в нейтраль и фазу трансформатора позволяет полностью исключить несимметрию напряжений на шинах нагрузки.

Для снижения несимметрии напряжений и повышения напряжения на шинах нагрузки возможно уменьшение мощности нагрузки либо применение симметрирующих устройств.

1.3.3 Результаты и выводы: рассмотрено действие трехфазной несимметричной системы напряжений на симметричный трехфазный приемник энергии

1.4 Практическое занятие №7 (2 часа).

Тема: «Нахождение токов короткого замыкания в симметричных трехфазных системах»

1.4.1 Задание для работы: рассмотреть принцип нахождения токов короткого замыкания в симметричных трехфазных системах

1.4.2 Краткое описание проводимого занятия:

Основной причиной нарушения нормального режима работы системы электроснабжения (СЭС) является возникновение коротких замыканий (КЗ) в сети или элементах электрооборудования вследствие повреждения изоляции или неправильных действий обслуживающего персонала. Для снижения ущерба, обусловленного выходом из строя электрооборудования при протекании токов КЗ, а также для быстрого восстановления нормального режима работы СЭС необходимо правильно определять токи КЗ и по ним выбирать электрооборудование, защитную аппаратуру и средства ограничения токов КЗ.

Коротким замыканием называется непосредственное соединение между любыми точками разных фаз, фазы и нулевого провода или фазы с землей, не предусмотренное нормальными условиями работы установки.

Основные виды коротких замыканий в электрических системах:

1. *Трёхфазное КЗ*, при котором все три фазы замыкаются между собой в одной точке. Точка трехфазного КЗ обозначается $K^{(3)}$. Токи, напряжения, мощности и другие величины, относящиеся к трехфазному КЗ, обозначаются $I^{(3)}$, $U^{(3)}$, $S^{(3)}$ и т.д.

2. *Двухфазное КЗ*, при котором происходит замыкание двух фаз между собой. Точка двухфазного КЗ условно обозначается $K^{(2)}$. Токи, напряжения, мощности и другие величины, относящиеся к двухфазному КЗ, обозначаются $I^{(2)}$, $U^{(2)}$, $S^{(2)}$ и т.д.

3. *Однофазное КЗ*, при котором происходит замыкание одной из фаз на нулевой провод или землю. Условное обозначение точки однофазного КЗ $K^{(1)}$. Токи, напряжения, мощности другие величины, относящиеся однофазному КЗ, обозначаются $I^{(1)}$, $U^{(1)}$, $S^{(1)}$ и т.д.

Встречаются и другие виды КЗ, связанные с обрывами проводов и одновременными замыканиями провод различных фаз.

Трёхфазное КЗ является симметричным, поскольку при нём все три фазы оказываются в одинаковых условиях. Все остальные виды коротких замыканий являются несимметричным, так как при них фазы не остаются в одинаковых условиях, вследствие чего системы токов и напряжений получают искаженными.

При возникновении КЗ общее электрическое сопротивление цепи системы электроснабжения уменьшается, вследствие чего токи в ветвях системы резко увеличиваются, а напряжения на отдельных участках системы снижаются.

Элементы электрических систем обладают активными и реактивными (индуктивными или ёмкостными) сопротивлениями, поэтому при внезапном нарушении нормального режима работы (при возникновении КЗ) электрическая система представляет собой колебательный контур. Токи в ветвях системы и напряжения в отдельных её частях будут изменяться в течение некоторого времени после возникновения КЗ в соответствии с параметрами этого контура. Т.е. за время короткого замыкания в цепи поврежденного участка протекает переходный процесс.

При КЗ в каждой из фаз наряду с периодической составляющей тока (слагающей тока переменного знака) имеет место апериодическая составляющая тока (слагающая постоянного знака), которая также может изменять знак, но через большие промежутки времени по сравнению с периодической.

Мгновенное значение полного тока КЗ для произвольного момента времени:

$$i_t = i_{n,t} + i_{a,t} = \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(\omega t + \varphi - \alpha_k) + i_{a0} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (1)$$

где I_n - действующее значение периодической составляющей тока КЗ; i_{a0} - апериодическая составляющая тока КЗ в момент времени $t = 0$; ω - угловая частота

переменного тока; φ - фазовый угол напряжения источника в момент времени $t = 0$; α_k - угол сдвига тока в цепи КЗ относительно напряжения источника; $T_a = L_k / r_k = x_k / \omega \cdot r_k$ - постоянная времени цепи КЗ; L_k , x_k , r_k - индуктивность, индуктивное и активное сопротивление цепи КЗ.

Периодическая составляющая I_t тока КЗ (рис. 1) одинакова для всех трёх фаз и определяется для любого момента времени значением ординаты огибающей, деленной на $\sqrt{2}$. Аперриодическая составляющая i_a тока КЗ различна для всех трёх фаз (см. рис. 2) и изменяется в зависимости от момента возникновения КЗ.

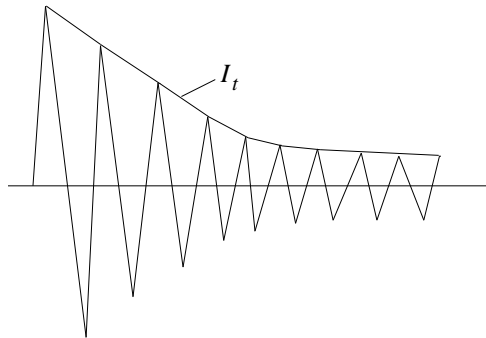


Рис. 1. Изменение во времени периодической составляющей тока КЗ.

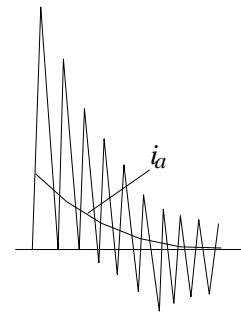


Рис. 2. Примерный вид тока при трёхфазном КЗ и аперриодической составляющей.

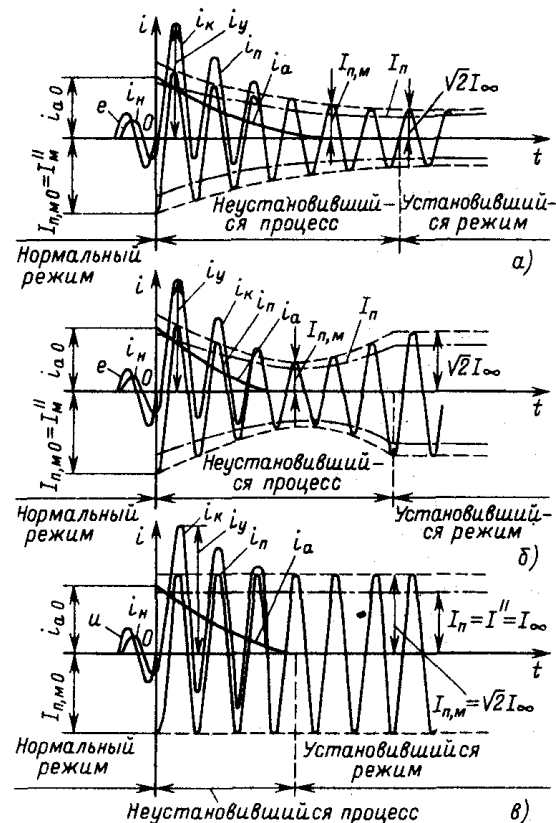


Рис. 3. Изменение во времени периодической составляющей тока КЗ:
а) при питании от генераторов без АВР; б) при питании от генераторов с АВР; в) при питании от энергосистемы.

Амплитуда периодической составляющей изменяется в переходном процессе в соответствии с изменением ЭДС источника КЗ (рис. 3). При мощности источника, соизмеримой с мощностью элемента, где рассматривается КЗ, а также отсутствии АРВ генераторов ЭДС источника уменьшается от начального значения $E_{нач.}$ до установившегося $E_{уст.}$, вследствие чего амплитуда периодической составляющей изменяется от $I_{n,m0} = \sqrt{2} \cdot I$ (сверхпереходной ток КЗ) до $\sqrt{2} \cdot I_{\infty}$ (установившейся то КЗ) (рис. 3,а).

При наличии АРВ генераторов периодическая составляющая тока КЗ изменяется, как показано на рис. 3,б. Снижение периодической составляющей в начальный период КЗ объясняется инерционностью действия устройства АРВ, которое начинает работать через 0,08-0,3 с после возникновения КЗ. С повышением тока возбуждения генератора увеличивается его ЭДС и соответственно периодическая составляющая тока КЗ вплоть до установившегося значения.

Если мощность источника существенно больше мощности элемента, где рассматривается КЗ, что соответствует источнику неограниченной мощности, у которого внутреннее сопротивление равно нулю, то ЭДС источника является постоянной. Поэтому периодическая составляющая тока КЗ неизменна в течение переходного процесса (рис. 3,в), т. е.

$$I_{n,m0} = I_{n,m} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot I'' . \quad (2)$$

Апериодическая составляющая тока КЗ $i_{a,t}$ различна во всех фазах и может изменяться в зависимости от момента возникновения КЗ и предшествующего режима (в пределах периода). Скорость затухания апериодической составляющей тока зависит от соотношения между активным и индуктивным сопротивлением цепи КЗ, т.е. от постоянной T_a : чем больше активное сопротивление цепи, тем интенсивнее затухание. Апериодическая составляющая тока КЗ заметно проявляется лишь в первые 0,1-0,2 с после возникновения КЗ. Обычно $i_{a,t}$ определяется по наибольшему возможному мгновенному значению, которое (в цепях с преобладающим индуктивным сопротивлением $\alpha_k \approx 90^\circ$) имеет место в момент прохождения напряжения источника через нулевое значение ($\varphi = 0$) и отсутствия тока нагрузки. При этом $i_{a0} = I_{a,m} = I_{n,m}$. В данном случае полный ток КЗ имеет наибольшее значение. Указанные условия являются расчетными при определении токов КЗ.

Максимальный мгновенный ток КЗ имеет место примерно через полпериода, т.е. через 0,01 с после возникновения КЗ. Наибольший возможный мгновенный ток КЗ называют ударным током i_y (рис. 3). Его определяют для момента $t = 0,01$ с:

$$i_y = I_{n,m} + I_{a,m} \cdot e^{\frac{0,01}{T_a}} = I_{n,m} (1 + e^{\frac{0,01}{T_a}}) = \sqrt{2} \cdot I_n \cdot k_y , \quad (3)$$

где $k_y = (1 + e^{\frac{0,01}{T_a}})$ - ударный коэффициент, зависящий от постоянной времени цепи КЗ.

Действующее значение полного тока КЗ для произвольного момента времени определяют из выражения:

$$I_{k,t} = \sqrt{I_{n,t}^2 + I_{a,t}^2} , \quad (4)$$

где $I_{n,t}$ - действующее значение периодической составляющей тока КЗ; $I_{a,t}$ - действующее значение апериодической составляющей, равной

$$I_{a,t} = i_{a,t} = i_{a0} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (5)$$

Наибольшее действующее значение ударного тока за первый период от начала процесса КЗ:

$$I_y = I_n \cdot \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}. \quad (6)$$

Мощность КЗ для произвольного момента времени:

$$S_t = \sqrt{3} \cdot U_{\text{сети, ном.}} \cdot I_t. \quad (7)$$

Источники питания КЗ. При расчёте токов КЗ принимают, что источниками питания места КЗ являются турбо- и гидрогенераторы, синхронные компенсаторы и двигатели, асинхронные двигатели. Влияние асинхронных двигателей учитывается только в начальный момент времени и в тех случаях, когда они подключены непосредственно к месту КЗ.

Определяемые величины. При расчёте токов КЗ определяют следующие величины:

I'' - начальное значение периодической составляющей тока КЗ (начальное значение сверхпереходного тока КЗ);

i_y - ударный ток КЗ, необходимый для проверки электрических аппаратов, шин и изоляторов на электродинамическую устойчивость;

I_y - наибольшее действующее значение ударного тока КЗ, необходимое для проверки электрических аппаратов на устойчивость течение первого периода процесса КЗ;

$I_{0,1} - I_{0,2}$ - значение I_t для $t = 0,1 \div 0,2$ с, необходимое для проверки выключателей по отключаемому ими току;

I_∞ - действующее значение установившегося тока КЗ, по которому проверяют электрические аппараты, шины, проходные изоляторы и кабели на термическую устойчивость;

$S_{0,1} - S_{0,2}$ - мощность КЗ для времени $t = 0,1 \div 0,2$ с; определяется для проверки выключателей по предельно допустимой отключаемой мощности. Для быстродействующих выключателей это время может уменьшаться до 0,08 с.

Допущения и расчётные условия. Для облегчения вычислений токов КЗ принимают ряд допущений:

- 1) ЭДС всех источников считаются совпадающими по фазе;
- 2) ЭДС источников, значительно удаленных от места КЗ ($x_{\text{расч}} > 3$), считают неизменными;
- 3) не учитывают поперечные ёмкостные цепи КЗ (кроме воздушных линий 330 кВ и выше и кабельных линий 110 кВ и выше) и токи намагничивания трансформаторов;
- 4) активное сопротивление цепи КЗ учитывают только при соотношении $r_\Sigma \geq 0,3x_\Sigma$, где r_Σ и x_Σ - эквивалентные активные и реактивные сопротивления короткозамкнутой цепи;
- 5) в ряде случаев не учитывают влияние нагрузок (или учитывают приближенно), в частности влияние мелких асинхронных и синхронных двигателей.

В соответствии с целью определения токов КЗ устанавливают расчётные условия, которые включают в себя составление расчётной схемы, определение режима КЗ, вида КЗ, мест расположения точек КЗ и расчётного времени КЗ.

При определении режима КЗ в зависимости от цели расчёта определяют возможные максимальные и минимальные уровни токов КЗ. Так, например, проверку электротехнического оборудования на электродинамическое и термическое действие токов КЗ осуществляют по наиболее тяжелому режиму - максимальному, когда через проверяемый элемент протекает наибольший ток КЗ. Наоборот, по минимальному режиму, соответствующему наименьшему току КЗ, осуществляют расчёт и проверку работоспособности устройств релейной защиты и автоматики.

Выбор вида КЗ определяется целью расчёта токов КЗ. Для определения электродинамической стойкости аппаратов и жестких шин в качестве расчётного принимают трёхфазное КЗ; для определения термической стойкости аппаратов, проводников - трёхфазное или двухфазное КЗ в зависимости от тока. Проверку отключающей и включающей способностей аппаратов проводят по трёхфазному или по однофазному току КЗ на землю (в сетях с большими токами замыкания на землю) в зависимости от его значения.

Выбор вида КЗ в расчётах релейной защиты определяется её функциональным назначением и может быть трёх-, двух-, однофазным и двухфазным КЗ на землю.

Места расположения точек КЗ выбирают таким образом, чтобы при КЗ проверяемое электрооборудование, проводники находились в наиболее неблагоприятных условиях. Например, для выбора коммутационной аппаратуры необходимо выбирать место КЗ непосредственно на их выходных зажимах, выбор сечения кабельной линии производят по току КЗ в начале линии. Места расположения точек КЗ при расчётах релейной защиты определяют по её назначению - в начале или конце защищаемого участка.

Расчётное время КЗ. Действительное время, в течение которого происходит КЗ, определяется длительностью действия защиты и отключающей аппаратуры,

$$t = t_{\text{защ.}} + t_{\text{выкл.}} \quad (8)$$

В расчётах используют приведенное (фиктивное) время - промежуток времени, в течение которого установившийся ток КЗ выделяет то же количество тепла, которое должен выделить фактически проходящий ток КЗ за действительное время КЗ.

Приведенное время, соответствующее полному току КЗ,

$$t_n = t_{n,n} + t_{n,a} \quad (9)$$

где $t_{n,n}$ - приведённое время для периодической составляющей тока КЗ;

$t_{n,a}$ - приведённое время для аperiodической составляющей тока КЗ.

При действительном времени $t > 5$ с приведённое время для периодической составляющей тока КЗ определяют по номограммам.

При действительном времени $t \leq 5$ с $t_{n,n} = t_n = t_{n5} + (t - 5)$, где t_{n5} - значение приведённого времени для $t = 5$ с.

Определение приведённого времени для аperiodической составляющей $t_{n,a}$, а производится при $t \geq 1,5T_a$ по формуле:

$$t_{n,a} \approx 0,05(\beta'')^2, \quad (10)$$

где β'' - отношение начального сверхпереходного тока к установившемуся в месте КЗ ($\beta'' = I/I_\infty$).

При $t < 1,5T_a$ - по формуле:

$$t_{n,a} = T_a(\beta'')^2(1 - e^{-\frac{2t}{T_a}}). \quad (11)$$

При действительном времени более 1 сек. или $t > 20T_a$ приведённым временем аperiodической составляющей тока КЗ ($t_{n,a}$) можно пренебречь.

Определение расчётных параметров элементов сети

Система относительных единиц

При расчёте токов КЗ все входящие в расчёт величины можно выражать в именованных единицах (киловольт-амперах, амперах, вольтах, омах) или относительных единицах (долях и процентах принятой базисной величины). В эксплуатационной практике общепринятым является расчёт в относительных единицах. При использовании

этого способа большинство расчётных выражений имеет простую структуру, поэтому можно быстро определить вычисляемые величины.

Базисная величина – это величина выбранная произвольно и независимая от остальных.

В качестве независимых базисных величин обычно выбирают базисную мощность S_{δ} и базисное напряжение U_{δ} .

Базисная мощность – мощность, величина которой принимается равной некоторому значению (1000, 100тыс. кВА и т.д. или величину мощности питающего трансформатора), исходя из соображений сокращения вычислительной процедуры в расчётах токов КЗ.

Базисное напряжение – это среднее напряжение ступени рассматриваемой схемы электроснабжения, на которой имеет место КЗ. При расчётах не принимают во внимание действительные коэффициенты трансформации трансформаторов; они заменяются отношениями средних номинальных напряжений. При этом пересчёт относительных сопротивлений по напряжению не производится (кроме реакторов). Шкала средних номинальных напряжений: 500; 330; 154; 115; 37; 20; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525 и 0,4кВ.

Базисный ток. Его определяют по формуле:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}}. \quad (12)$$

Определение *электродвижущей силы, напряжения, тока, мощности и сопротивления* выражаемых в относительных единицах, приведённых к базисным условиям:

$$\begin{aligned} E_{*\delta} &= \frac{E}{U_{\delta, \text{ср.}}}; & U_{*\delta} &= \frac{U}{U_{\delta, \text{ср.}}}; \\ I_{*\delta} &= \frac{I}{I_{\delta}} = \frac{I \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\delta, \text{ср.}}}{S_{\delta}}; & z_{*\delta} &= \frac{z}{z_{\delta}} = \frac{z \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\delta}}{U_{\delta}}; \\ S_{*\delta} &= \frac{S}{S_{\delta}}, \end{aligned} \quad (13)$$

где z - сопротивление, Ом на фазу; I_{δ} - базисный ток, кА; $U_{\delta, \text{ср.}}$ - базисное междуфазное напряжение ступени, определённое по шкале средних номинальных напряжений, кВ; S_{δ} - базисная мощность, кВА.

Система именованных единиц

При расчете токов КЗ в именованных единицах сопротивления расчетной схемы приводят к базисному напряжению по следующим формулам:

реактивное

$$x' = x \left(\frac{U_{\delta}}{U_{\text{ном.}}} \right)^2; \quad (14)$$

активное

$$r' = r \left(\frac{U_{\delta}}{U_{\text{ном.}}} \right)^2; \quad (15)$$

полное

$$z' = \sqrt{(x')^2 + (r')^2}. \quad (16)$$

Формулы приведения параметров расчётной схемы к базисным условиям.

Элемент расчётной схемы	Исходные параметры	Относительные единицы, Ом	Именованные единицы, Ом
Энергосистема	$S_{н,с}$ - номинальная мощность системы, МВА; $x_{с*}$ - относительное реактивное сопротивление энергосистемы, Ом; S_k - мощность КЗ системы, МВА; $I_{откл.}$ - ном. ток откл. выключателя, кА.	$x_{\bar{\sigma}*} = x_{с*} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{н,с}};$ $x_{\bar{\sigma}*} = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_k};$ $x_{\bar{\sigma}*} = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{\sqrt{3} \cdot I_{откл.} \cdot U_{ср.}}$	$x = x_{с*} \cdot \frac{U_{\bar{\sigma}}^2}{S_{н,с}};$ $x = \frac{U_{\bar{\sigma}}^2}{S_k};$ $x = \frac{U_{\bar{\sigma}}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{откл.} \cdot U_{ср.}}$
Генераторы, компенсаторы, синхронные и асинхронные двигатели	$S_{н,м}$ - номинальная мощность электрической машины, МВА; x_{d*}'' - относительное сверхпереходное сопротивление генератора, Ом; $I_{пуск*}$ - кратность пускового тока двигателя, отн. ед; $E'' = U_n + I_n \cdot x_d'' \cdot \sin \varphi$ - фазная ЭДС генератора.	$x_{\bar{\sigma}*} = x_{d*}'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{н,м}};$ $x_{\bar{\sigma}*} = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{I_{пуск*} \cdot S_{н,дв.}}$ $E_{\bar{\sigma}}'' = E'' \cdot \frac{U_n}{U_{\bar{\sigma}}}$	$x = x_{d*}'' \cdot \frac{U_{\bar{\sigma}}^2}{S_{н,м}};$ $x = \frac{U_{\bar{\sigma}}^2}{I_{пуск*} \cdot S_{н,дв.}}$
Трансформаторы двухобмоточные: а) $S_{н,Т} \geq 1\text{МВА}$ б) $S_{н,Т} \leq 630\text{кВА}$	$S_{н,Т}$ - номинальная мощность трансформатора, МВА; u_{k*} - относительное напряжение КЗ трансформатора, отн. ед; $r_{Т*} = \frac{\Delta P_{м}}{S_{н,Т}}$ - относительное активное сопротивление трансформатора, Ом.	а) $x_{\bar{\sigma}*} = u_{k*} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{н,Т}}$ б) $x_{\bar{\sigma}*} = \sqrt{u_k^2 - r_T^2} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{н,Т}}$	а) $x = u_{k*} \cdot \frac{U_{\bar{\sigma}}^2}{S_{н,Т}}$ б) $x = \sqrt{u_k^2 - r_T^2} \cdot \frac{U_{\bar{\sigma}}^2}{S_{н,Т}}$
Реакторы	x_{p*} - относительное реактивное сопротивление	$x_{\bar{\sigma}*} = x_{p*} \cdot \frac{I_{\bar{\sigma}}}{I_{н,р}} \cdot \frac{U_{ср.}}{U_{\bar{\sigma}}}$	$x = x_{p*} \cdot \frac{U_{\bar{\sigma}}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{н,р} \cdot U_{ср.}}$

	реактора, Ом; $I_{н.р}$ - номинальный ток реактора, кА.		
Линии электропередач	x_0 - удельное реактивное сопротивление линии, Ом/км; $r_0 = \frac{1000}{\gamma \cdot s}$ - удельное активное сопротивление линии, Ом/км; γ - удельная проводимость, м/(Ом·мм ²); s - сечение проводника, мм ² ; l - длина линии, км.	$x_{\delta^*} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{cp.}^2};$ $r_{\delta^*} = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{cp.}^2}.$	$x = x_0 \cdot l \cdot \frac{U_{\delta}^2}{U_{cp.}^2};$ $r = r_0 \cdot l \cdot \frac{U_{\delta}^2}{U_{cp.}^2}.$

Для меди $\gamma = 53$, для алюминиевых и сталеалюминиевых проводников $\gamma = 32$, для стальных проводов $\gamma = 10$.

Трёхобмоточный трансформатор. Паспортные данные: $S_{нВ}; S_{нС}; S_{нН}$, МВА;

$U_{ВН}; U_{ВС}; U_{СН}$, кВ; $u_{кВН-СН\%}; u_{кСН-НН\%}; u_{кВН-НН\%}; \Delta P_{кВН}; \Delta P_{кВС}; \Delta P_{кСН}$ кВт.

Напряжение КЗ обмоток трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} u_{кВ} &= \frac{1}{2}(u_{кВН-СН\%} + u_{кВН-НН\%} - u_{кСН-НН\%}); \\ u_{кС} &= \frac{1}{2}(u_{кВН-СН\%} + u_{кСН-НН\%} - u_{кВН-НН\%}); \\ u_{кН} &= \frac{1}{2}(u_{кВН-НН\%} + u_{кСН-НН\%} - u_{кВН-СН\%}). \end{aligned} \right\}.$$

Индуктивные сопротивления обмоток трансформатора с приведением к базовым условиям (в именованных единицах):

$$x_B = u_{кВ} \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{нВ}}; \quad x_C = u_{кС} \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{нС}}; \quad x_H = u_{кН} \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{нН}}.$$

Находим мощность короткого замыкания для каждой обмотки:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{кВ} &= \frac{1}{2}(\Delta P_{кВ-Н} + \Delta P_{кВ-С} - \Delta P_{кС-Н}); \\ \Delta P_{кС} &= \frac{1}{2}(\Delta P_{кВ-С} + \Delta P_{кС-Н} - \Delta P_{кВ-Н}); \\ \Delta P_{кН} &= \frac{1}{2}(\Delta P_{кВ-Н} + \Delta P_{кС-Н} - \Delta P_{кВ-С}). \end{aligned} \right\}.$$

Активные сопротивления обмоток трансформатора с приведением к базовым условиям (в именованных единицах):

$$r_B = \frac{\Delta P_{кВ}}{S_{нВ}} \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{нВ}}; \quad r_C = \frac{\Delta P_{кС}}{S_{нС}} \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{нС}}; \quad r_H = \frac{\Delta P_{кН}}{S_{нН}} \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{нН}}.$$

Тоже самое, но несколько иначе. Т.к. $\Delta P_{кВН} = \Delta P_{кВС} = \Delta P_{кСН}$, то $\Delta P_{кВ} = \Delta P_{кС} = \Delta P_{кН} = 0,5\Delta P_{кВН}$, следовательно, активное сопротивление обмоток можно подсчитать следующим образом:

$$r_B = r_C = r_H = \frac{\Delta P_{кВ}}{S_{нВ}} \cdot \frac{U_6^2}{S_{нВ}} = \Delta P_{кВ} \frac{U_6^2}{S_{нВ}^2}.$$

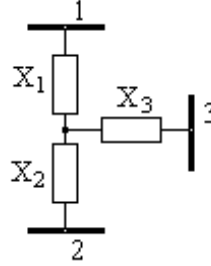


Рис. 4 Схема замещения трёхобмоточного трансформатора

Автотрансформатор. Паспортные данные: $S_{AT ном.}$, МВА; $U_{В ном.}$, $U_{С ном.}$, $U_{Н ном.}$, кВ; $u_{к ВС\%}$, $u'_{к ВН\%}$, $u'_{к СН\%}$; $\Delta P'_{к ВС}$, $\Delta P'_{к ВН}$, $\Delta P'_{к СН}$, кВт.

Т.к. параметры обмоток среднего и низкого напряжения приведены к параметрам, отнесённым к обмотке ВС, т.е. к параметрам $u_{к ВС\%}$ и $\Delta P'_{к ВС}$:

$$u_{к ВН\%} = \frac{u'_{к ВН\%}}{\alpha};$$

$$u_{к СН\%} = \frac{u'_{к СН\%}}{\alpha};$$

$$\Delta P_{к ВН} = \frac{\Delta P'_{к ВН}}{\alpha^2};$$

$$\Delta P_{к СН} = \frac{\Delta P'_{к СН}}{\alpha^2},$$

$$\text{где } \alpha = \frac{(U_{В ном.} - U_{Н ном.}) - (U_{С ном.} - U_{Н ном.})}{(U_{В ном.} - U_{Н ном.})}.$$

Напряжение короткого замыкания обмоток трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} u_{кВ\%} &= \frac{1}{2}(u_{к ВС\%} + u_{к ВН\%} - u_{к СН\%}); \\ u_{кС\%} &= \frac{1}{2}(u_{к ВС\%} + u_{к СН\%} - u_{к ВН\%}); \\ u_{кН\%} &= \frac{1}{2}(u_{к ВН\%} + u_{к СН\%} - u_{к ВС\%}). \end{aligned} \right\}.$$

Индуктивные сопротивления обмоток трансформатора:

$$x_B = \frac{u_{кВ\%}}{100}; \quad x_C = \frac{u_{кС\%}}{100}; \quad x_H = \frac{u_{кН\%}}{100}.$$

Мощность короткого замыкания для каждой обмотки, с последующим вычислением активного сопротивления обмоток трёхобмоточного трансформатора.

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{k B} &= \frac{1}{2}(\Delta P_{k BH} + \Delta P_{k BC} - \Delta P_{k CH}); \\ \Delta P_{k C} &= \frac{1}{2}(\Delta P_{k BC} + \Delta P_{k CH} - \Delta P_{k BH}); \\ \Delta P_{k H} &= \frac{1}{2}(\Delta P_{k BH} + \Delta P_{k CH} - \Delta P_{k BC}). \end{aligned} \right\}.$$

$$r_B = \frac{\Delta P_{k B}}{S_{AT \text{ ном.}}}; r_C = \frac{\Delta P_{k C}}{S_{AT \text{ ном.}}}; r_H = \frac{\Delta P_{k H}}{S_{AT \text{ ном.}}}.$$

Расчётная схема и схема замещения

Составление расчётной схемы. Расчётную схему составляют в однолинейном изображении; в неё вводят все источники, участвующие в питании места КЗ, и все элементы системы электроснабжения (трансформаторы, линии, реакторы), расположенные между ними и местом КЗ. Синхронные компенсаторы, синхронные и асинхронные двигатели учитывают как источники питания. На расчётной схеме указывают основные параметры элементов (мощности, напряжения КЗ трансформаторов, длины и сечения линий, сопротивления источников и т.д.) и намечают точки КЗ.

Составление схемы замещения. По расчётной схеме составляют схему замещения, где все её элементы заменяют сопротивлениями, приведёнными к базисным условиям. Затем преобразуют и упрощают схемы замещения в направлении от источника до точки КЗ. Упрощают схему путём замены параллельно, последовательно или смешанно включённых сопротивлений одним эквивалентным преобразованием треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду или наоборот.

При наличии нескольких источников схему замещения упрощают заменой ветвей с источниками E_1, E_2, \dots, E_n и сопротивлениями x_1, x_2, \dots, x_n эквивалентным источником с ЭДС, равной

$$E_{\text{э}} = \frac{\frac{E_1}{x_1} + \frac{E_2}{x_2} + \dots + \frac{E_n}{x_n}}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}} \quad (19)$$

и эквивалентным сопротивлением

$$x_{\text{э}} = \frac{1}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}}. \quad (20)$$

Для систем электроснабжения промышленных предприятий характерна схема питания от энергосистемы S_1 и собственной электростанции S_2 ($S_1 > S_2$). При этом их объединение допустимо, если

$$\frac{S_1 \cdot x_1}{S_2 \cdot x_2} = 0,4 \div 2,5 \quad (21)$$

где x_1, x_2 - сопротивления, приведённые к базисной мощности.

Источниками меньшей мощности пренебрегают в том случае, если выполняются одновременно два условия:

$$\frac{x_2}{x_1} \geq 20 \quad \text{и} \quad \frac{S_2}{S_1} \leq 0,05. \quad (22)$$

Если источники питания КЗ включены через общее сопротивление, то расчётные сопротивления определяют через коэффициент распределения c_N равный доле участия каждого источника в общем токе КЗ.

$$c_N = \frac{x_3}{x_n}, \quad (23)$$

где $x_3 = x_1 // x_2 // \dots // x_n$ - эквивалентное сопротивление цепи.

Пример. Для схемы содержащей две ветви, см. рис. 5, коэффициенты распределения равны

$$c_1 = \frac{x_3}{x_1}; \quad c_2 = \frac{x_3}{x_2},$$

где $x_3 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2}$, а $x_{рез.} = x_3 + x_k$.

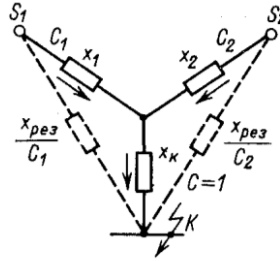


Рис. 5. Схема к расчёту токов КЗ с помощью коэффициентов распределения.

Определение трёхфазного тока КЗ в сетях выше 1кВ

В соответствии со схемой замещения, приведённой к простейшему виду, начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ:

при расчёте в относительных единицах

$$I_{n0} = I'' = \frac{E_{\Sigma}''}{x_{рез.б*}} \cdot I_0, \quad (24)$$

где $x_{рез.б*} = x_{расч.*} \cdot \frac{S_6}{S_n}$ - результирующее реактивное сопротивление упрощенной

схемы замещения; E_{Σ}'' - результирующая сверхпереходная ЭДС генератора, отн. ед.

при расчёте в именованных единицах

$$I_{n0} = I'' = \frac{E_{\Sigma}''}{\sqrt{3} \cdot x_{рез.б}}, \quad (25)$$

где E_{Σ}'' - линейное значение ЭДС генератора, кВ.

В общем случае значение величины ЭДС определяется через выражение:

для точных вычислений

$$E'' = U_n + I_n \cdot x_d'' \cdot \sin \varphi, \quad (26)$$

где $E'' = U_n + I_n \cdot x_d'' \cdot \sin \varphi$, - сверхпереходное продольное реактивное сопротивление.

для приближённых вычислений по (27) либо по справочным таблицам

$$E'' = U_n \cdot E^*. \quad (27)$$

Если мощность энергосистемы принимается бесконечно большой, т.е. $S_{эн.сист.} = \infty$, то $x_c \approx 0$, следовательно, $E_{\Sigma}'' = U_{c*} = 1 = const$. В этом случае периодическая составляющая тока КЗ не затухает, т.е.

$$I_{n0} = I'' = I_{\infty} = \frac{I_0}{x_{рез.б*}}. \quad (28)$$

Ударный ток в точке КЗ:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I'' \cdot k_y. \quad (29)$$

Наибольшее действующее значение полного трёхфазного тока КЗ для произвольного момента времени определяют из (4). Наибольшее действующее значение ударного тока за первый период от начала процесса КЗ вычисляют из (6).

Мощность трёхфазного КЗ для произвольного момента времени:

$$S_k = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I''. \quad (30)$$

Определение токов КЗ от электрических машин напряжением выше 1кВ

Учёт подпитки двигателей осуществляют при непосредственной связи их с точкой КЗ или через непротяженную кабельную линию, токопровод, линейный реактор или двухобмоточный трансформатор.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ, посылаемое к месту КЗ двигателем, определяют из выражения:

$$I_{n,\partial,0} = I''_\partial = \frac{E_*'' \cdot I_{n,\partial}}{\sqrt{(x_{\partial*}'' + x_{вн.*})^2 + r_{вн.*}^2}}. \quad (31)$$

Здесь E_*'' - приведённое значение сверхпереходной ЭДС, отн. ед., в начальный момент КЗ, которое можно принимать из справочных таблиц или определять по формуле:

$$E_*'' = \sqrt{\cos^2 \varphi_{ном.} + (\sin \varphi_{ном.} + x_{\partial*}'')^2}. \quad (31a)$$

Ударный ток КЗ от двигателя:

$$i_{y,\partial} = \sqrt{2} \cdot k_{y,\partial} \cdot I_{n,\partial,0}. \quad (32)$$

Ударный коэффициент для различных типов электродвигателей определяется по-разному. Для синхронного двигателя, с учётом внешнего сопротивления:

$$k_{y,\partial} = e^{\frac{0.01}{T_a}}. \quad (33)$$

Для асинхронного двигателя:

$$k_{y,\partial} = e^{\frac{0.01}{T_p'}} + e^{\frac{0.01}{T_a}}, \quad (34)$$

где $T_p' = T_{p,\partial}' \cdot (1 + \frac{x_{вн.цепи}}{x_d'')}$ - расчётная постоянная времени периодической составляющей тока цепи КЗ; $T_{p,\partial}'$ - расчётная постоянная времени периодической составляющей тока АД при КЗ.

Расчёт токов КЗ в электрических сетях до 1кВ

В системах электроснабжения промышленных предприятий электрические сети до 1кВ имеют наибольшую протяженность, поэтому на них приходится большая доля возникающих КЗ. В связи с этим коммутационная и защитная аппаратура, токоведущие части электроустановок и т.д. должны надёжно работать в режимах КЗ. Основные положения методики определения токов КЗ в сетях напряжением выше 1кВ справедливы и для сетей до 1кВ. Однако расчет токов КЗ в сетях до 1 кВ имеет ряд особенностей.

1) Обычно мощность понизительных трансформаторов, от которых получают питание сети низкого напряжения, значительно меньше суммарной номинальной мощности генераторов питающей электрической системы. Поэтому питающую систему в таких случаях считают источником с неизменной ЭДС с нулевым внутренним сопротивлением. Это условие соблюдается практически всегда, если установленная мощность понижающих трансформаторов, питающих место КЗ, удовлетворяет требованию

$$S_{н.т} \leq \frac{S_c}{50}. \quad (35)$$

где S_c - мощность питающей системы.

В данном случае периодическая составляющая тока КЗ является неизменной во времени.

2) При составлении схем замещения учитывают влияние активных сопротивлений короткозамкнутой цепи (трансформаторов, линий, шин, трансформаторов тока, автоматических выключателей, контактов аппаратов и т.д.). Переходные сопротивления контактов могут быть также учтены (для распределительных щитов на подстанциях 15 мОм; для первичных цеховых распределительных пунктов и на зажимах аппаратов, питаемых радиальными линиями от щитов ТП или от магистралей, 20 мОм; для вторичных цеховых распределительных пунктов и на зажимах аппаратов, питаемых от первичных распределительных пунктов, 25 мОм).

3) Во многих случаях учитывают влияние нагрева проводников токами КЗ на активное сопротивление внесением поправки. Зная ток КЗ, найденный приближённо (без учёта влияния нагрева проводников), и поперечное сечение проводника короткозамкнутой цепи, определяют повышение температуры проводника, вызванное прохождением тока КЗ, и активное сопротивление нагретого проводника. После этого уточняют расчёт повторением его при изменившихся активных сопротивлениях отдельных участков цепи КЗ. Изменившееся сопротивление находят по формуле:

$$r' \approx r \left[1 + \frac{m \cdot t}{1 + 0,004 \cdot \theta_0} \cdot \left(\frac{I_k}{s} \right)^2 \right], \quad (36)$$

где r - сопротивление проводника при начальной температуре θ_0 , °C (до КЗ), мОм; s - поперечное сечение проводника, мм²; I_k - ток КЗ из предварительного расчёта без учёта нагрева (предполагается постоянным), кА; m - коэффициент, равный для меди 22 и для алюминия 5; t - время КЗ, с.

Начальное значение периодической составляющей трёхфазного тока КЗ:

$$I_{n,0} = I_k = \frac{U_{c,n}}{\sqrt{3} \cdot z_{\Sigma}}. \quad (37)$$

Ударный ток КЗ, а также наибольшее действующее значение ударного тока за первый период от начала процесса КЗ, определяют из следующих выражений:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot k_y; \quad (38)$$

$$I_y = I_k \cdot \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}. \quad (39)$$

Влияние асинхронных двигателей на подпитку места КЗ до 1кВ

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от асинхронного двигателя, кА:

$$I_{k,d} = I_{n,d,0} = \frac{E''_{0d}}{\sqrt{(x''_d + x_{вн.})^2 + (r_d + r_{вн.})^2}}, \quad (3.40)$$

где $x_{вн.}$, $r_{вн.}$ - реактивное и активное сопротивление внешней цепи, Ом; $E''_{0d} = \sqrt{(U_{\phi} \cdot \cos \varphi - I_c \cdot r_d)^2 + (U_{\phi} \cdot \sin \varphi - I_c \cdot x''_d)^2}$ - однофазная сверхпереходная ЭДС асинхронного двигателя (АД), кВ; U_{ϕ} - фазное напряжение асинхронного двигателя (по величине равно сетевому), кВ; I_c - ток статора, кА; $r_d = r_1 + \frac{r'_2}{c_2}$ - активное сопротивление

АД, Ом; $r'_2 = \frac{M_* \cdot (P_n + \Delta P_{мех.}) \cdot c_2^2}{3 \cdot I_*^2 \cdot I_n \cdot (1 - s_n)}$ - сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора,

Ом; r_1 - активное сопротивление обмотки статора АД, Ом; $M_* = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_n}$ - кратность пускового момента; $I_* = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_n}$ - кратность пускового тока; P_n - номинальная мощность АД, кВт; $\Delta P_{\text{мех.}} = 0,01 P_n$ - механические потери в АД; $c_2 = 1,04$ - конструктивная постоянная АД; s_n - номинальное значение скольжения АД, отн. ед.; $x''_d = \sqrt{\left(\frac{U_\phi \cdot 10^3}{I_* \cdot I_n}\right)^2 - r_d^2}$ - сверхпереходное реактивное сопротивление АД по продольной оси, Ом.

$$i_{y,d} = \sqrt{2} \cdot k_{y,d} \cdot I_{k,d}, \quad (41)$$

где $k_{y,d} = e^{\frac{0.01}{T_p}} + e^{\frac{0.01}{T_{a,d}}}$ - ударный коэффициент АД; $T_p = \frac{x''_d + x_{\text{вн.}}}{\omega \cdot r_2}$ - расчётная

постоянная времени периодической составляющей тока статора, с; $T_{a,d} = \frac{x''_d + x_{\text{вн.}}}{\omega \cdot (r_1 + r_{\text{вн.}})}$ - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока статора, с.

Расчёт несимметричных видов коротких замыканий

Однофазные и двухфазные (двухфазные на землю) короткие замыкания являются несимметричными, т.к. наряду с токами прямой последовательности в электрической схеме образуются токи обратной и нулевой последовательностей. Детальный анализ таких переходных процессов затруднён тем, что необходимо учитывать как первую, так и более высокие гармоники сигнала. Токи прямой и обратной последовательностей разных частот оказываются при этом взаимосвязанными.

При решении практических задач, с целью упрощения расчётов, ведётся учёт только основных гармоник токов и напряжений. Такое допущение позволяет использовать метод симметричных составляющих в обычной форме, т.е. несимметричную систему, состоящую из трёх величин \vec{N}_a , \vec{N}_b и \vec{N}_c , можно представить в виде суммы трёх различных симметричных систем величин – прямой, обратной и нулевой последовательностей (обозначаются индексами 1, 2 и 0).

$$\left. \begin{aligned} \vec{N}_a &= \vec{N}_{a1} + \vec{N}_{a2} + \vec{N}_{a0}; \\ \vec{N}_b &= \vec{N}_{b1} + \vec{N}_{b2} + \vec{N}_{b0}; \\ \vec{N}_c &= \vec{N}_{c1} + \vec{N}_{c2} + \vec{N}_{c0}. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

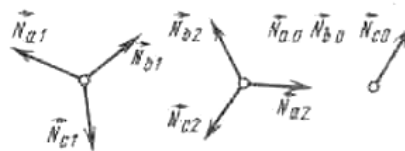


Рис. 6. Системы симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Величина определённой составляющей последовательности вектора одной фазы может быть выражена через аналогичные вектора других фаз, т.е.

$$\left. \begin{aligned} \vec{N}_{a1} &= a\vec{N}_{b1} = a^2\vec{N}_{c1}; \\ \vec{N}_{a2} &= a^2\vec{N}_{b2} = a\vec{N}_{c2}; \\ \vec{N}_{a0} &= \vec{N}_{b0} = \vec{N}_{c0} = \vec{N}_0, \end{aligned} \right\} \quad (3.43)$$

$$\text{где } a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

На основании (42) и (43) выражения для разложения определённой несимметричной системы величин на симметричные составляющие будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \vec{N}_{a1} &= \frac{1}{3}(\vec{N}_a + a\vec{N}_b + a^2\vec{N}_c); \\ \vec{N}_{a2} &= \frac{1}{3}(\vec{N}_a + a^2\vec{N}_b + a\vec{N}_c); \\ \vec{N}_0 &= \frac{1}{3}(\vec{N}_a + \vec{N}_b + \vec{N}_c). \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

Одной из основных задач данного метода является схем замещения для всех трёх последовательностей. Схема прямой последовательности является схемой, которую составляют при любом симметричном (трёхфазном) КЗ. Генераторы вводятся в схему со своими расчётными ЭДС и расчётными реактивностями (см. рис. 8а). Поскольку пути циркуляции токов обратной последовательности те же, что и токов прямой последовательности, схема обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности. Различие между ними состоит прежде всего в том, что в схеме обратной последовательности ЭДС всех генерирующих ветвей принимают равными нулю (см. рис. 8б). Для практических расчётов результирующие сопротивления прямой и обратной последовательности принимают равными по величине, т.е. $z_{1\Sigma} = z_{2\Sigma}$ (в реальности равенство выполняется только для линий электропередач, трансформаторов и реакторов, т.к. магнитосвязанные цепи таких элементов взаимно неподвижны, следовательно, от перемены порядка чередования фаз симметричной трёхфазной системы токов взаимноиндукция между фазами элемента не изменяется).

Ветви нагрузок в схему нулевой последовательности не входят. Однако трансформаторы, через которые питаются нагрузки, должны быть учтены, если допускают протекание токов нулевой последовательности.

Циркуляция токов нулевой последовательности отличается от пути прохождения токов других последовательностей, и определяется соединением обмоток участвующих в схеме трансформаторов (см. рис. 7, 8в). Ток нулевой последовательности является однофазным током, разветвлённым между тремя фазами и возвращающимся через землю и параллельные ей цепи.

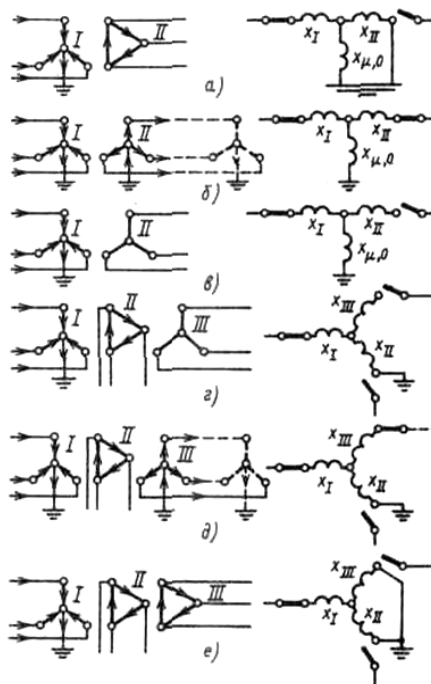


Рис. 7. Схемы замещения нулевой последовательности трансформаторов.

Схемы различных последовательностей с помощью методов преобразования исходной схемы замещения приводят к элементарному виду (рис. 8), где \dot{E}_Σ - результирующая ЭДС относительно точки КЗ; $z_{1\Sigma}$, $z_{2\Sigma}$, $z_{0\Sigma}$ - результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно места КЗ.

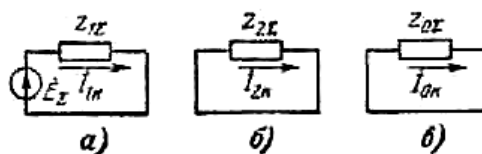


Рис. 8. Схемы замещения.

а – прямой последовательности; б – обратной последовательности;
в – нулевой последовательности

Ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ определяется как ток при коротком трехфазном замыкании в точке, удалённой от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $z_\Delta^{(n)}$ (значение величины определяется по табл. 2), которое не зависит от параметров схемы прямой последовательности и для каждого вида КЗ определяется результирующими сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей относительно рассматриваемой точки. Такой подход называется правилом эквивалентности прямой последовательности.

$$I_{kA1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{z_{1\Sigma} + z_\Delta^{(n)}}, \quad (45)$$

где $I_{kA1}^{(n)}$ - ток прямой последовательности фазы (при данном виде КЗ), которая находится в условиях, отличных от других фаз; $z_{1\Sigma}$ - результирующее сопротивление схемы прямой последовательности относительно точки КЗ.

Таблица 2.

Вид короткого замыкания	(n)	$z_{\Delta}^{(n)}$	$m^{(n)}$
Трёхфазное	(3)	0	1
Двухфазное	(2)	$z_{2\Sigma}$	$\sqrt{3}$
Однофазное	(1)	$z_{2\Sigma} + z_{0\Sigma}$	3
Двухфазное на землю	(1,1)	$z_{2\Sigma} // z_{0\Sigma}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{z_{2\Sigma} z_{0\Sigma}}{(z_{2\Sigma} + z_{0\Sigma})^2}}$

Начальное значение периодической составляющей тока любого (n) несимметричного короткого замыкания, определяют по выражению:

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_{k1}^{(n)}, \quad (46)$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент, определяемый по таблице 2.

Апериодическую составляющую тока КЗ определяют аналогично (3.3), т.е.

$$i_a^{(n)} = \sqrt{2} I_k^{(n)} e^{-\frac{t}{T_a^{(n)}}}, \quad (47)$$

где $T_a^{(n)}$ - постоянная времени цепи КЗ вида (n) (для $T_a^{(2)} = T_a^{(3)}$).

Ударный ток находят по формуле

$$i_y^{(n)} = \sqrt{2} I_k^{(n)} k_y^{(n)}, \quad (48)$$

где $k_y^{(n)}$ определяют в зависимости от вида расчётной схемы с использованием (3.3), но при вычислении $T_a^{(n)}$ учитывают добавочное сопротивление $z_{\Delta}^{(n)}$.

Ток, протекающий в землю через заземлённую нулевую точку, в 3 раза больше тока нулевой последовательности, протекающего по соответствующей ветви схемы.

Однофазные токи КЗ рассчитывают для проверки работоспособности аппаратов защиты при минимально возможных токах КЗ в сети.

Ток однофазного КЗ в сетях до 1 кВ, согласно «Правилам устройства электроустановок» (ПУЭ), определяют по приближенной формуле в килоамперах:

$$I_k' = \frac{U_{\phi, n} \cdot 10^3}{z_n + \frac{z_T^{(1)}}{3}}, \quad (42)$$

где $U_{\phi, n}$ - фазное номинальное напряжение сети, кВ; $z_n = \sqrt{r_n^2 + x_n^2}$ - полное сопротивление петли фаза - нуль, которое включает в себя сопротивление шин, шинопроводов, проводов и кабелей, аппаратов и контактов, мОм; $z_T^{(1)}$ - полное сопротивление трансформатора при однофазном КЗ, мОм.

Расчёт токов КЗ в сетях постоянного тока

При расчёте токов КЗ в сетях постоянного тока не учитывают системы сигнализации и диспетчеризации из-за их малой мощности. Ток КЗ определяют по формуле:

$$I_k = \frac{U_k}{R_k} = \frac{U_n \cdot (1 + k_n + k_{\lambda}) \cdot (1 - p) - \Delta U_{\text{эл.дуги}} - I_T \cdot R_{\gamma}}{(R_{k,c} + R_p) \cdot l_k + R_{n,n} + R_{o,n} + R_{\gamma}}, \quad (43)$$

где U_n - номинальное выпрямленное напряжение сети; $k_n = \frac{I_n \cdot N \cdot R_n}{U_n}$ - отношение

потерь напряжения в преобразовательном агрегате при его номинальной нагрузке к выпрямленному напряжению; N - количество выпрямительных агрегатов; k_{λ} - коэффициент учитывающий потери в линии переменного тока, которая питает

выпрямительные установки; p - коэффициент, учитывающий наибольшее допустимое в нормальных условиях работы снижение напряжения в питающей сети переменного тока относительно номинального значения, которое не должно превышать 5% (в относительных единицах $p = 0,05$); $\Delta U_{эл.дуги}$ - потери напряжения в месте возникновения электрической дуги; I_T - ток тяговой нагрузки; $R_{\Sigma} = R_n + R_{\lambda}$ - активное эквивалентное сопротивление, определяется как сумма внутренних сопротивлений преобразовательных агрегатов и линий переменного тока; $R_{k,c}$ - сопротивление контактной сети, Ом/км; R_p - сопротивление рельсов, Ом/км; l_k - длина линий электропередачи, км; $R_{n,n}, R_{o,n}$ - сопротивления питающего и обратного проводов, Ом.

1.4.3 Результаты и выводы: рассмотрен принцип нахождения токов короткого замыкания в симметричных трехфазных системах