

ВВЕДЕНИЕ

В городских и сельских сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками применяются трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда — звезда с нулем», обладающие большим сопротивлением нулевой последовательности, примерно в 10 раз превышающим сопротивление прямой последовательности. Поэтому при несимметричной нагрузке фаз в этих трансформаторах возникает значительное напряжение нулевой последовательности, вызывающее несимметрию напряжений во вторичных обмотках трансформатора. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности трансформаторов во многих случаях превышает допустимое ГОСТом [12] значение.

Сотрудниками Института технических систем сервиса и энергетики Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (СПбГАУ) проведены в городе Кировске Ленинградской области в 2004–2005 гг. исследования показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками. Для измерения ПКЭ на шинах низкого напряжения трансформаторных подстанций 6/0,4 кВ использовались приборы «Энергомонитор 3.3». Измерения проводились непрерывно в течение недели, в разные периоды года на четырнадцати подстанциях с трансформаторами различной номинальной мощности [23] и схемой соединения обмоток Y/Y_n .

Результаты измерений показали, что токи в отдельных фазах фидеров существенно отличаются по величине и изменяются в течение суток, т. е. режимы работы сетей являются несимметричными. Коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательности составляют 20–25%. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности в часы вечернего максимума нагрузок достигает 7,3%, что значительно превышает допустимое значение. Аналогичные показатели несимметрии напряжений получены авторами при измерении ПКЭ в 2007 г. на трансформаторных подстанциях ОАО «Кубаньэнерго» [21].

При величине коэффициентов несимметрии токов обратной и нулевой последовательности в сети, равной 0,25–0,30 потери мощности и электрической энергии в линиях и трансформаторах возрастают на 30–50% по сравнению с симметричным режимом работы [43]. Технологические потери электроэнергии в сельских сетях за последнее десятилетие выросли почти в 3 раза и достигают 30% [6]. Причиной этого является возрастание в сетях 0,38 кВ доли однофазной нагрузки по сравнению с трехфазной симметричной нагрузкой. Этому способствовало, в частности, применение в коттеджном строительстве мощных (до 50 кВт и выше) однофазных стабилизаторов напряжения.

Суммарные относительные потери электроэнергии в электрических сетях России в 2–2,5 раза выше, чем например, в сетях Японии и Германии и более чем в 1,5 раза выше, чем в других промышленно развитых странах [9]. Ориентировочно предельные относительные технологические потери электроэнергии в сетях 0,38 кВ должны быть не более 10–14% по отношению к отпуску электроэнергии в сеть [9]. В указе президента Российской Федерации от 4 июня 2008 г. № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» отмечается: «В целях снижения энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации, обеспечения рационального и экологически ответственного использования энергии и энергетических ресурсов энергоемкость российской экономики к 2020 г. должна быть снижена на 40% по сравнению с 2007 г.». В соответствии с этим указом до 2020 г. предстоит снизить потери электроэнергии в электрических сетях России на 40% по сравнению с 2007 г., повысить эффективность передачи и распределения электроэнергии до уровня промышленно развитых стран.

В условиях, когда в сетях ЕЭС России количество современных компенсирующих устройств исчисляются единицами, фильтрокомпенсирующие, фильтросимметрирующие, фазосдвигающие устройства практически отсутствуют, комплексной программы их разработки и внедрения в сетях всех классов напряжения не существует — трудно рассчитывать на коренное изменение ситуации в деле повышения энергетической эффективности российской электроэнергетики [14].

Максимальная несимметрия токов в трехфазной четырехпроводной сети 0,38 кВ возникает при однофазной нагрузке. Коэффициенты обратной и нулевой последовательностей токов в этом случае равны 100%. Потери мощности и электрической энергии в сети с трансформатором Y/Y_n при однофазной нагрузке достигают 30% от энергии, передаваемой в сеть. При двухфазной нагрузке в трехфазной сети несимметрия токов уменьшается, коэффициенты обратной и нулевой последовательностей токов снижаются до 50–60%, потери мощности в сети с тем же трансформатором уменьшаются до 16%. Наиболее благоприятный режим работы сети — при трехфазной симметричной нагрузке; в этом случае коэффициенты обратной и нулевой последовательности равны нулю, потери мощности в сети от несимметрии токов равны нулю, а потери мощности от токов прямой последовательности минимальны и составляют примерно 14%. Таким образом, существенного снижения потерь электроэнергии в сетях 0,38 кВ можно добиться за счет уменьшения несимметрии токов в этих сетях.

Потери мощности от несимметрии токов в силовых трансформаторах с различными схемами соединения обмоток зависят от сопротивления нулевой последовательности трансформаторов [4, 36, 42, 61, 93, 98, 99]. В сетях 0,38 кВ применяются трансформаторы со схемами соединения обмоток Y/Y_n , $Y/Y_n CY$, Y/Z_n , отличающиеся по величине сопротивления нулевой последовательности. Поэтому потери мощности в них от несимметрии токов существенно отличаются.

Теоретические исследования потерь мощности от несимметрии токов в сети 0,38 кВ с различными схемами соединения обмоток трансформаторов, проведенные профессором СПбГАУ Ф. Д. Косоуховым, позволили ему сделать вывод о том, что замена трансформатора с большим сопротивлением нулевой последовательности трансформатором с малым сопротивлением приводит к увеличению потерь мощности от несимметрии токов в линии 0,38 кВ [32, 40, 41]. Экспериментальные исследования потерь мощности в сети 0,38 кВ, выполненные на физической модели сети, подтвердили вывод Ф. Д. Косоухова. Действительно в некоторых режимах работы сети 0,38 кВ замена трансформатора Y/Y_n с большим сопротивлением Z_0 на

трансформатор Y/Z_n с малым сопротивлением Z_0 приводит к увеличению потерь мощности от несимметрии токов в линии 0,38 кВ. Однако, это увеличение потерь мощности в линии не превышает 5%, тогда как потери в трансформаторе Y/Z_n уменьшаются по сравнению с трансформатором Y/Y_n в 9 раз. Такая замена трансформаторов позволяет одновременно с уменьшением потерь мощности от несимметрии токов снизить коэффициент нулевой последовательности напряжений в несколько раз [27, 29, 30], повысив таким образом, качество электрической энергии [1, 25, 31, 38, 97].

Снижения потерь и повышения качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ можно добиться не только заменой трансформаторов с малым сопротивлением нулевой последовательности, но также путем применения различных симметрирующих устройств [10, 49, 54, 68, 70, 76, 83, 96, 103], а также путем симметрирования однофазных нагрузок, мощность которых превышает 10% номинальной мощности питающего трансформатора [3, 26, 53, 56, 74, 75, 78, 95].

Прежде чем принять решение о способе снижения несимметрии токов в сети, следует произвести расчет несимметричного режима для заданной нагрузки или по статистическим характеристикам несимметрии нагрузок [33]. Расчет несимметричных режимов электрических сетей производят различными методами [4, 35, 37, 44, 45, 47, 48, 60, 101]. Однако, наиболее точные результаты дает метод симметричных составляющих, который чаще других и применяют.

ПРОБЛЕМА НЕСИММЕТРИИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,38 КВ И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

1.1. МЕТОД РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ОТ НЕСИММЕТРИИ ТОКОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,38 КВ

1.1.1. Критерий потерь мощности от несимметрии токов

Потери мощности от несимметрии токов ΔP_{ϵ} в трансформаторах и линиях трехфазных электрических сетей 0,38 кВ обусловлены токами обратной I_2 и нулевой I_0 последовательностей [19]:

$$\Delta P_{\epsilon} = \Delta P_2 + \Delta P_0 = 3I_2^2 R_2 + 3I_0^2 R_0, \quad (1.1)$$

где ΔP_2 , ΔP_0 — потери мощности обратной и нулевой последовательностей; R_2 , R_0 — активные сопротивления трансформатора (линии) обратной и нулевой последовательностей.

Потери мощности в трансформаторе (линии) при несимметричной нагрузке характеризуются коэффициентом потерь мощности от несимметрии токов [40]:

$$K_{\epsilon} = \frac{\Delta P_{\epsilon}}{\Delta P_1}, \quad (1.2)$$

ΔP_1 — потери мощности от токов прямой I_1 последовательности;

$$\Delta P_1 = 3I_1^2 R_1, \quad (1.3)$$

где R_1 — активное сопротивление трансформатора (линии) прямой последовательности.

Подставляя в (1.2) выражения (1.1), (1.3), получим

$$K_{\epsilon} = \frac{3I_2^2 R_2}{3I_1^2 R_1} + \frac{3I_0^2 R_0}{3I_1^2 R_1} = K_{2i}^2 \frac{R_2}{R_1} + K_{0i}^2 \frac{R_0}{R_1}. \quad (1.4)$$

Учитывая, что для трансформаторов (линии) $R_2 = R_1$, выражение (1.4) запишется в следующем виде:

$$K_{\epsilon} = K_{2i}^2 + K_{0i}^2 \frac{R_0}{R_1}, \quad (1.5)$$

где K_{2i} , K_{0i} — коэффициенты обратной и нулевой последовательностей, определяемые согласно ГОСТу Р54149-2010 [12] по соотношениям:

$$K_{2i} = \frac{I_2}{I_1}; \quad K_{0i} = \frac{I_0}{I_1}. \quad (1.6)$$

Как видно из выражения (1.5), критерий потерь мощности от несимметрии токов K_ϵ зависит от квадратов коэффициентов несимметрии токов и соотношения активных сопротивлений нулевой R_0 и прямой R_1 последовательностей. Определив по формуле (1.5) коэффициент K_ϵ , а по формуле (1.3) потери от токов прямой последовательности ΔP_1 , можно определить потери мощности от несимметрии токов в трансформаторе (линии):

$$\Delta P_\epsilon = K_\epsilon \Delta P_1. \quad (1.7)$$

Чтобы определить критерий (коэффициент) потерь мощности от несимметрии токов K_ϵ надо рассчитать коэффициенты обратной K_{2i} и нулевой K_{0i} последовательностей токов [45].

Таким образом, коэффициент K_ϵ является комплексным показателем несимметрии токов трансформатора или линии электропередачи, или целого участка электрической сети, сопротивление нулевой и прямой последовательностей которого учтены в формуле (1.5). Коэффициент потерь мощности от несимметрии токов служит главным критерием при расчете потерь мощности и электрической энергии в четырехпроводных сетях 0,38 кВ.

Формула (1.5) справедлива для силовых трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Y_n , $Y/Y_n CУ$, Y/Z_n и других. Она также применима для линий с изолированными проводами марки СИП с нулевым проводом.

В некоторых научных изданиях в качестве критерия потерь мощности от несимметрии токов в трехфазных четырехпроводных сетях 0,38 кВ принят коэффициент, учитывающий потери мощности от токов прямой, обратной и нулевой последовательностей [32, 40, 41, 43, 70, 69],

$$K_P = K_{ns} = \frac{\Delta P_{ns}}{\Delta P_1}, \quad (1.8)$$

где

$$\Delta P_{ns} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_0 = 3I_1^2 R_1 + 3I_2^2 R_2 + 3I_0^2 R_0. \quad (1.9)$$

После подстановки (1.9) в (1.8), получим

$$K_{ns} = 1 + K_{2i}^2 + K_{0i}^2 \frac{R_0}{R_1}. \quad (1.10)$$

При отсутствии несимметрии токов в трехфазной сети коэффициенты обратной K_{2i} и нулевой K_{0i} последовательностей токов равны нулю, равен нулю и коэффициент потерь мощности от несимметрии токов K_ϵ . Общий коэффициент потерь мощности K_{ns} в этом случае не равен нулю, поэтому K_{ns} не может являться критерием потерь мощности от несимметрии токов. Он может служить обобщенным коэффициентом несимметрии токов трансформатора (линии).

1.1.2. Анализ методов расчета коэффициентов обратной и нулевой последовательности токов

Как видно из выражения (1.5), коэффициент потерь мощности от несимметрии токов для трансформатора или линии зависит от коэффициентов обратной K_{2i} и нулевой K_{0i} последовательностей токов соответствующих элементов сети. Поэтому для расчета коэффициента потерь мощности от несимметрии токов пригодны те методы, в которых рассчитываются симметричные составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательностей, т. е. расчеты, основанные на методе симметричных составляющих.

Большинство методов расчета показателей несимметрии токов и напряжений в электрических сетях 0,38 кВ разработано в докторской диссертации Ф. Д. Косоухова [42] и опубликовано в монографии [43] и научных статьях [27–41]. Однако, эти работы выполнены без учета в электрической сети симметрирующих устройств. Дальнейшее развитие методов расчета показателей несимметрии в сетях 0,38 кВ получило в докторской диссертации И. В. Наумова [70]. Им разработан метод расчета показателей несимметрии токов и напряжений в сети 0,38 кВ с распределенной нагрузкой и симметрирующим устройством [69]. Заслуживают внимание также работы Н. М. Попова и В. А. Солдатова по расчету несимметричных режимов сетей 0,38 кВ в фазных координатах [81], кандидатская диссертация С. А. Кулагина [61] и его статья [60], а также монография П. В. Коваленко [24].

Кафедрой электроэнергетики и электрооборудования разработаны метод [47] и программа для ЭВМ «Потери энергии» по расчету потерь мощности, электрической энергии и показателей несимметрии напряжений и токов в сетях 0,38 кВ с распределенной несимметричной нагрузкой [86]. Программа «Потери энергии» включает следующие этапы:

- расчет потерь мощности в каждой линии и в трансформаторе при симметричной нагрузке;
- расчет потерь мощности, обусловленных несимметрией токов на каждом участке линий и в трансформаторе;
- расчет потерь электроэнергии при несимметричной системе токов в каждой линии, отходящей от данного трансформатора, и в трансформаторе.

Отличительной особенностью программы «Потери энергии» является комплексный ее характер: одновременно с расчетом потерь электроэнергии в узле сети 0,38 кВ рассчитываются показатели несимметрии напряжений и токов, во всех линиях, отходящих от данного трансформатора.

Применение программы «Потери энергии» особенно целесообразно на стадии проектирования электрических сетей с коммунально-бытовой нагрузкой с использованием метода статистической несимметрии нагрузок.

1.1.3. Метод расчета показателей несимметрии токов в трехфазной четырехпроводной сети

Схема замещения трехфазной четырехпроводной сети представлена на рисунке 1.1.

Для выполнения расчета коэффициентов обратной K_{2i} и нулевой K_{0i} последовательностей используются следующие исходные данные:

1) несимметричная система напряжений источника питания, которая задана в комплексной форме: $\underline{U}_{\text{Аи}}$, $\underline{U}_{\text{Ви}}$, $\underline{U}_{\text{Си}}$;

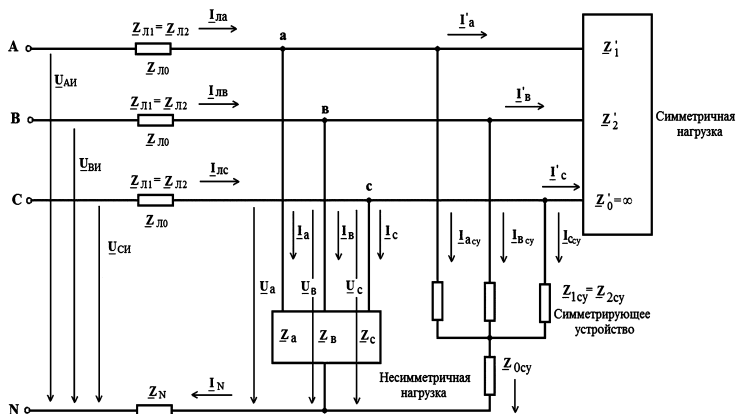


Рис. 1.1

Трехфазная схема замещения участка электрической сети 0,38 кВ с трехфазными симметричной и несимметричной нагрузками с симметрирующим устройством

2) полные комплексные сопротивления линии прямой, обратной, нулевой последовательностей $\underline{Z}_{Л1}$, $\underline{Z}_{Л2}$, $\underline{Z}_{Л0}$;

3) полные комплексные сопротивления симметричной нагрузки прямой, обратной последовательностей \underline{Z}'_1 , \underline{Z}'_2 и симметрирующего устройства прямой, обратной и нулевой последовательностей \underline{Z}_{1cy} , \underline{Z}_{2cy} , \underline{Z}_{0cy} ;

4) полные комплексные сопротивления несимметричной нагрузки, распределенные по фазам \underline{Z}_a , \underline{Z}_b , \underline{Z}_c .

Считаем, что все элементы сети и электроприемники обладают линейными параметрами.

Разложив систему напряжений источника питания на симметричные составляющие $\underline{U}_{И1}$, $\underline{U}_{И2}$, $\underline{U}_{И0}$, определим комплексные коэффициенты обратной $\underline{K}_{2УИ}$ и нулевой $\underline{K}_{0УИ}$ последовательностей системы напряжений источника:

$$\underline{K}_{2УИ} = \frac{\underline{U}_{И2}}{\underline{U}_{И1}}; \quad \underline{K}_{0УИ} = \frac{\underline{U}_{И0}}{\underline{U}_{И1}}. \quad (1.11)$$

Заменив в схеме замещения несимметричную нагрузку (\underline{Z}_a , \underline{Z}_b , \underline{Z}_c) источником с несимметричной системой напряжения (\underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c) и разложив ее на симметричные составляющие (\underline{U}_1 , \underline{U}_2 , \underline{U}_0), получим симметричную цепь

с двумя несимметричными источниками напряжений, в которой разноименные симметричные составляющие токов и напряжений не зависят друг от друга [19]. Это позволяет составить для основной фазы А трехфазной цепи три независимые схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 1.2).

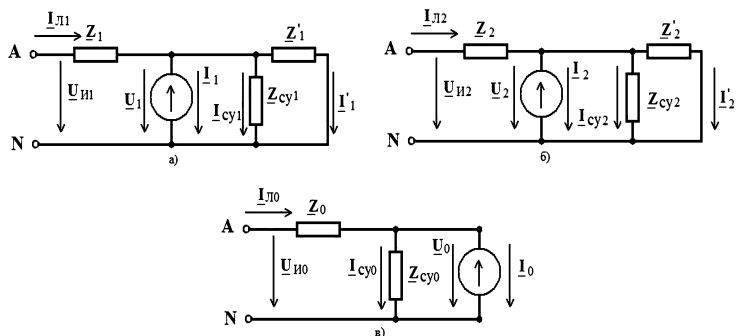


Рис. 1.2

Схемы прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей для основной фазы

Преобразуем эти схемы не затрагивая источников с напряжениями \underline{U}_1 , \underline{U}_2 , \underline{U}_0 , заменив параллельные ветви эквивалентными источниками питания с напряжениями $\underline{U}_{\Sigma 1}$, $\underline{U}_{\Sigma 2}$, $\underline{U}_{\Sigma 0}$ и сопротивлениями $\underline{Z}_{\Sigma 1}$, $\underline{Z}_{\Sigma 2}$, $\underline{Z}_{\Sigma 0}$:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{\Sigma 1} &= \frac{\underline{U}_{11} \underline{Z}_{P1}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{P1}}; & \underline{Z}_{\Sigma 1} &= \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_{P1}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{P1}}; \\ \underline{Z}_{P1} &= \frac{\underline{Z}'_1 \underline{Z}_{CY1}}{\underline{Z}'_1 + \underline{Z}_{CY1}}; \\ \underline{U}_{\Sigma 2} &= \frac{\underline{U}_{12} \underline{Z}_{P2}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{P2}}; & \underline{Z}_{\Sigma 2} &= \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_{P2}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{P2}}; \\ \underline{Z}_{P2} &= \frac{\underline{Z}'_2 \underline{Z}_{CY2}}{\underline{Z}'_2 + \underline{Z}_{CY2}}; \\ \underline{U}_{\Sigma 0} &= \frac{\underline{U}_{10} \underline{Z}_{CY0}}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_{CY0}}; & \underline{Z}_{\Sigma 0} &= \frac{\underline{Z}_0 \underline{Z}_{CY0}}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_{CY0}} \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

где \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_0 — сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательностей линии 0,38 кВ, соответственно.

В результате этого преобразования получены расчетные схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 1.3).

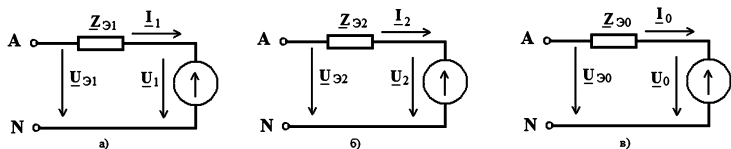


Рис. 1.3

Эквивалентные схемы прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Составим основные уравнения симметричных составляющих напряжений и токов несимметричной нагрузки для схем (рис. 1.3):

$$\begin{aligned} Z_{Э1}I_1 + \underline{U}_1 &= \underline{U}_{Э1}; \\ Z_{Э2}I_2 + \underline{U}_2 &= \underline{U}_{Э2}; \\ Z_{Э0}I_0 + \underline{U}_0 &= \underline{U}_{Э0}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Дополнительные уравнения для трехфазной несимметричной нагрузки:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{Z}_a I_a; \\ \underline{U}_b &= \underline{Z}_b I_b; \\ \underline{U}_c &= \underline{Z}_c I_c. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Напряжения и токи в уравнениях (1.14) выразим через симметричные составляющие:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= \underline{Z}_a (I_1 + I_2 + I_0); \\ \underline{a}^2 \underline{U}_1 + \underline{a} \underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= \underline{Z}_b (\underline{a}^2 I_1 + \underline{a} I_2 + I_0); \\ \underline{a} \underline{U}_1 + \underline{a}^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= \underline{Z}_c (\underline{a} I_1 + \underline{a}^2 I_2 + I_0), \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

где $\underline{Z}_a = Z_a e^{j\varphi_a}$, $\underline{Z}_b = Z_b e^{j\varphi_b}$, $\underline{Z}_c = Z_c e^{j\varphi_c}$ — комплексные сопротивления несимметричной нагрузки.

В уравнениях (1.13) выразим $\underline{U}_{Э1}$, $\underline{U}_{Э2}$, $\underline{U}_{Э0}$ через $\underline{U}_{И1}$, используя выражения (1.11) и (1.6):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{Э1}I_1 + \underline{U}_1 &= \underline{q}_1 \underline{U}_{И1}; \\ \underline{Z}_{Э2}I_2 + \underline{U}_2 &= \underline{q}_2 \underline{U}_{И2}; \\ \underline{Z}_{Э0}I_0 + \underline{U}_0 &= \underline{q}_0 \underline{U}_{И0}, \end{aligned} \quad (1.16)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \underline{q}_1 &= \frac{\underline{Z}_{p1}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{p1}}; \\ \underline{q}_2 &= \underline{q}_{Z_2} \underline{K}_{2UI}; \\ \underline{q}_{Z_2} &= \frac{\underline{Z}_{p2}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{p2}}; \\ \underline{q}_0 &= \underline{q}_{Z_0} \underline{K}_{0UI}; \\ \underline{q}_{Z_0} &= \frac{\underline{Z}_{CY0}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{CY0}}. \end{aligned} \right\}$$

Определив из уравнений (1.16) \underline{U}_1 , \underline{U}_2 , \underline{U}_0 и подставив их в уравнения (1.15), после преобразований получим:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1(\underline{Z}_{\partial 1} + \underline{Z}_a) + \underline{I}_2(\underline{Z}_{\partial 2} + \underline{Z}_a) + \underline{I}_0(\underline{Z}_{\partial 0} + \underline{Z}_a) &= \\ &= \underline{U}_{И1}(\underline{q}_1 + \underline{q}_2 + \underline{q}_0); \\ \underline{a}^2 \underline{I}_1(\underline{Z}_{\partial 1} + \underline{Z}_b) + \underline{a} \underline{I}_2(\underline{Z}_{\partial 2} + \underline{Z}_b) + \underline{I}_0(\underline{Z}_{\partial 0} + \underline{Z}_b) &= \\ &= \underline{U}_{И1}(\underline{a}^2 \underline{q}_1 + \underline{a} \underline{q}_2 + \underline{q}_0); \\ \underline{a} \underline{I}_1(\underline{Z}_{\partial 1} + \underline{Z}_c) + \underline{a}^2 \underline{I}_2(\underline{Z}_{\partial 2} + \underline{Z}_c) + \underline{I}_0(\underline{Z}_{\partial 0} + \underline{Z}_c) &= \\ &= \underline{U}_{И1}(\underline{a} \underline{q}_1 + \underline{a}^2 \underline{q}_2 + \underline{q}_0). \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

В результате решения системы уравнений (1.17) получаем следующие выражения для симметричных составляющих системы токов трехфазной несимметричной нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{\Omega}(\underline{q}_1 \underline{Z}_{\lambda 1}^2 + \underline{q}_2 \underline{Z}_D^2 + \underline{q}_0 \underline{Z}_F^2); \\ \underline{I}_2 &= \underline{\Omega}(\underline{q}_1 \underline{Z}_G^2 + \underline{q}_2 \underline{Z}_{\lambda 2}^2 + \underline{q}_0 \underline{Z}_T^2); \\ \underline{I}_0 &= \underline{\Omega}(\underline{q}_1 \underline{Z}_M^2 + \underline{q}_2 \underline{Z}_N^2 + \underline{q}_0 \underline{Z}_{\lambda 0}^2), \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

где

$$\left. \begin{aligned}
\underline{\Omega} &= \frac{\underline{U}_{H1}(\underline{a} - \underline{a}^2)}{\underline{\Delta}}; \\
\underline{\Delta} &= (\underline{a} - \underline{a}^2)(\underline{Z}_{\Omega 1}^3 + \underline{Z}_{\Theta 1}\underline{Z}_{\lambda 1}^2); \\
\underline{Z}_{\Omega 1}^3 &= 3\underline{Z}_a\underline{Z}_b\underline{Z}_c + \underline{Z}_{V_0}^2(\underline{Z}_{\Theta 2} + \underline{Z}_{\Theta 0}) + \underline{Z}_{H0}\underline{Z}_{\Theta 2}\underline{Z}_{\Theta 0}; \\
\underline{Z}_{\lambda 1}^2 &= 3\underline{Z}_{\Theta 2}\underline{Z}_{\Theta 0} + \underline{Z}_{V_0}^2 + \underline{Z}_{H0}(\underline{Z}_{\Theta 2} + \underline{Z}_{\Theta 0}); \\
\underline{Z}_{V_0}^2 &= \underline{Z}_a\underline{Z}_b + \underline{Z}_b\underline{Z}_c + \underline{Z}_c\underline{Z}_a; \\
\underline{Z}_{H0} &= \underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c; \quad \underline{Z}_{D2}^2 = \underline{Z}_{V_1}^2 - \underline{Z}_{H2}\underline{Z}_{\Theta 0}; \\
\underline{Z}_F^2 &= \underline{Z}_{V_2}^2 - \underline{Z}_{H1}\underline{Z}_{\Theta 2}; \\
\underline{Z}_{V_1}^2 &= \underline{a}\underline{Z}_a\underline{Z}_b + \underline{Z}_b\underline{Z}_c + \underline{a}^2\underline{Z}_c\underline{Z}_a; \\
\underline{Z}_{H2} &= \underline{Z}_a + \underline{a}^2\underline{Z}_b + \underline{a}\underline{Z}_c; \\
\underline{Z}_{V_2}^2 &= \underline{a}^2\underline{Z}_a\underline{Z}_b + \underline{Z}_b\underline{Z}_c + \underline{a}\underline{Z}_c\underline{Z}_a; \\
\underline{Z}_{H1} &= \underline{Z}_a + \underline{a}\underline{Z}_b + \underline{a}^2\underline{Z}_c; \\
\underline{Z}_G^2 &= \underline{Z}_{V_2}^2 - \underline{Z}_{H1}\underline{Z}_{\Theta 0}; \quad \underline{Z}_M^2 = \underline{Z}_{V_1}^2 - \underline{Z}_{H2}\underline{Z}_{\Theta 2}; \\
\underline{Z}_{\lambda 2}^2 &= 3\underline{Z}_{\Theta 1}\underline{Z}_{\Theta 0} + \underline{Z}_{V_0}^2 + \underline{Z}_{H0}(\underline{Z}_{\Theta 1} + \underline{Z}_{\Theta 0}); \\
\underline{Z}_{\lambda 0}^2 &= 3\underline{Z}_{\Theta 1}\underline{Z}_{\Theta 2} + \underline{Z}_{V_0}^2 + \underline{Z}_{H0}(\underline{Z}_{\Theta 1} + \underline{Z}_{\Theta 2}); \\
\underline{Z}_T^2 &= \underline{Z}_{V_1}^2 - \underline{Z}_{H2}\underline{Z}_{\Theta 1}; \quad \underline{Z}_N^2 = \underline{Z}_{V_2}^2 - \underline{Z}_{H1}\underline{Z}_{\Theta 1}.
\end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

Подставив выражения (1.18) в уравнение (1.16), определим симметричные составляющие напряжений на зажимах нагрузки:

$$\left. \begin{aligned}
U_1 &= \underline{\Omega} \left[q_1 \underline{Z}_{\Omega 1}^3 - \underline{Z}_{\Theta 1} (\underline{q}_2 \underline{Z}_D^2 + \underline{q}_0 \underline{Z}_F^2) \right]; \\
U_2 &= \underline{\Omega} \left[q_2 \underline{Z}_{\Omega 2}^3 - \underline{Z}_{\Theta 2} (\underline{q}_1 \underline{Z}_G^2 + \underline{q}_0 \underline{Z}_T^2) \right]; \\
U_0 &= \underline{\Omega} \left[\underline{q}_0 \underline{Z}_{\Omega 0}^3 - \underline{Z}_{\Theta 0} (\underline{q}_1 \underline{Z}_M^2 + \underline{q}_2 \underline{Z}_N^2) \right],
\end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

где

$$\left. \begin{aligned}
\underline{Z}_{\Omega 2}^3 &= 3\underline{Z}_a\underline{Z}_b\underline{Z}_c + \underline{Z}_{V_0}^2 (\underline{Z}_{\Theta 1} + \underline{Z}_{\Theta 0}) + \underline{Z}_{H0}\underline{Z}_{\Theta 1}\underline{Z}_{\Theta 0}; \\
\underline{Z}_{\Omega 0}^3 &= 3\underline{Z}_a\underline{Z}_b\underline{Z}_c + \underline{Z}_{V_0}^2 (\underline{Z}_{\Theta 1} + \underline{Z}_{\Theta 2}) + \underline{Z}_{H0}\underline{Z}_{\Theta 1}\underline{Z}_{\Theta 2}.
\end{aligned} \right\}$$

Симметричные составляющие токов в линии определим с учетом выражений (1.18)–(1.20):

$$\left. \begin{aligned}
\underline{I}_{Л1} &= \underline{I}_1 + \underline{I}'_1 + \underline{I}_{CY1} = \frac{\underline{\Omega}}{\underline{Z}_{P1}} \times \\
&\times \left[(\underline{Z}_{P1} - \underline{I}_{Э1}) (\underline{q}_2 \underline{Z}_D^2 + \underline{q}_0 \underline{Z}_F^2) + \underline{q}_1 (\underline{Z}_{P1} \underline{Z}_{\lambda 1}^2 + \underline{Z}_{\Omega 1}^3) \right]; \\
\underline{I}_{Л2} &= \underline{I}_2 + \underline{I}'_2 + \underline{I}_{CY2} = \frac{\underline{\Omega}}{\underline{Z}_{P2}} \times \\
&\times \left[(\underline{Z}_{P2} - \underline{I}_{Э2}) (\underline{q}_1 \underline{Z}_G^2 + \underline{q}_0 \underline{Z}_T^2) + \underline{q}_2 (\underline{Z}_{P2} \underline{Z}_{\lambda 2}^2 + \underline{Z}_{\Omega 2}^3) \right]; \\
\underline{I}_{Л0} &= \underline{I}_0 + \underline{I}_{CY0} = \frac{\underline{\Omega}}{\underline{Z}_{CY0}} \times \\
&\times \left[(\underline{Z}_{CY0} - \underline{I}_{Э0}) (\underline{q}_1 \underline{Z}_M^2 + \underline{q}_2 \underline{Z}_N^2) + \underline{q}_0 (\underline{Z}_{CY0} \underline{Z}_{\lambda 0}^2 + \underline{Z}_{\Omega 0}^3) \right].
\end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

На основании выражений (1.18), (1.20) и (1.21) определяются коэффициенты обратной и нулевой последовательностей токов в линии при несимметричной системе напряжений источника питания:

$$\begin{aligned}
\underline{K}_{2i} &= \frac{\underline{I}_{Л2}}{\underline{I}_{Л1}} = \\
&= \frac{\underline{Z}_{P1} \left[(\underline{Z}_{P2} - \underline{Z}_{Э2}) (\underline{q}_1 \underline{Z}_G^2 + \underline{q}_0 \underline{Z}_T^2) + \underline{q}_2 (\underline{Z}_{P2} \underline{Z}_{\lambda 2}^2 + \underline{Z}_{\Omega 2}^3) \right]}{\underline{Z}_{P2} \left[(\underline{Z}_{P1} - \underline{Z}_{Э1}) (\underline{q}_2 \underline{Z}_D^2 + \underline{q}_0 \underline{Z}_F^2) + \underline{q}_1 (\underline{Z}_{P1} \underline{Z}_{\lambda 1}^2 + \underline{Z}_{\Omega 1}^3) \right]}, \quad (1.22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\underline{K}_{0i} &= \frac{\underline{I}_{Л0}}{\underline{I}_{Л1}} = \\
&= \frac{\underline{Z}_{P1} \left[(\underline{Z}_{CY0} - \underline{Z}_{Э0}) (\underline{q}_1 \underline{Z}_M^2 + \underline{q}_2 \underline{Z}_N^2) + \underline{q}_0 (\underline{Z}_{CY0} \underline{Z}_{\lambda 0}^2 + \underline{Z}_{\Omega 0}^3) \right]}{\underline{Z}_{CY0} \left[(\underline{Z}_{P1} - \underline{Z}_{Э1}) (\underline{q}_2 \underline{Z}_D^2 + \underline{q}_0 \underline{Z}_F^2) + \underline{q}_1 (\underline{Z}_{P1} \underline{Z}_{\lambda 1}^2 + \underline{Z}_{\Omega 1}^3) \right]}. \quad (1.23)
\end{aligned}$$

Выражения (1.22), (1.23) справедливы не только в том случае, когда источником с несимметричной системой напряжений является трансформатор потребительской ТП, но и любой другой пункт питания электрической сети. При этом следует иметь в виду, что сопротивления \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_0 в выражениях (1.12) будут определяться в виде суммы комплексных сопротивлений участка сети от источника с несимметричной системой напряжений до узла нагрузки.

Из выражений (1.22)–(1.23) видно, что показатели несимметрии токов зависят от параметров несимметричной и симметричной нагрузок, от параметров сети и ШСУ, а также от коэффициентов обратной и нулевой последовательностей напряжения источника питания.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru