

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕСИММЕТРИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 0,38 Кв С СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

В статье произведен расчет параметров симметрирующего устройства для любого вида несимметрии в зависимости от заданных параметров нагрузки и показателей несимметрии с целью дальнейшего выбора симметрирующего устройства в действующей сети 0,38 кВ.

Ключевые слова: несимметрия токов и напряжений, показатели качества электрической энергии, симметрирующее устройство, коэффициенты несимметрии.

I.V. Naumov, A.V. Prutkina

THE CHOICE OF THE SYMMETRIZING DEVICE PARAMETERS DEPENDING ON THE VARYING ASSYMMETRY INDICES IN THE DISTRIBUTION NETWORK OF 0,38 kW WITH THE CONCENTRATED LOAD

The calculation of symmetrizing device parameters for any asymmetry kind depending on the set parameters of loading and asymmetry indices with the purpose of the further choice of the symmetrizing device in the operating network 0,38 kW is made in the article.

Key words: asymmetry of current and voltage, power quality parameters, symmetrizing device, asymmetry coefficients.

Введение. Несимметрия токов в действующих сетях 0,38 кВ складывается из двух составляющих – случайной и неслучайной несимметрии токов. Перегрузка одних и недогрузка других фаз из-за неравномерного распределения однофазных электроприемников по фазам, а также из-за ввода новых электроприемников без учета их симметричного распределения по фазам, определяет систематическую (неслучайную) несимметрию токов. Кроме этого, существует вероятностная (случайная) несимметрия токов, обусловленная случайными включениями и отключениями отдельных однофазных электроприемников. Таким образом, нарушения правил симметричного подключения электроприемников вызывают значительные отклонения качества электроэнергии по несимметрии токов и напряжений. Однако даже при пофазно-равномерном подключении возникает несимметричный режим работы электрических сетей 0,38 кВ, обусловленный случайными причинами.

Несимметрия токов вызывает появление тока в нулевом проводе, а вместе с тем и напряжения смещения нейтральной точки системы фазных напряжений. В результате напряжения фазы на зажимах электроприемников становятся несимметричными. Несимметрия напряжений, как следствие несимметрии токов, оказывает отрицательное влияние на электрооборудование. В частности, это ухудшает работу конденсаторных установок, оказывает отрицательное воздействие на работу защиты установок, приводит к существенным ошибкам при учёте электроэнергии, ухудшает работу электрических двигателей. Несимметрия токов является также причиной появления добавочных потерь мощности, что является одной из причин теплового повреждения изоляции. Кроме того, несимметрия токов обуславливает магнитное влияние линий 0,38 кВ на проходящие вблизи линии связи. Среди основных последствий появления несимметрии токов можно также назвать снижение надежности системы электроснабжения.

Наиболее эффективным средством снижения несимметрии токов является применение симметрирующего устройства с минимальным сопротивлением нулевой последовательности. Существующие методы определения симметричных составляющих основаны на законах параметров изменяющейся нагрузки и заранее заданных параметров симметрирующего устройства.

Цель исследований. Определение параметров симметрирующего устройства для любого вида несимметрии в зависимости от заданных параметров нагрузки и показателей несимметрии.

Результаты исследований и их обсуждение. Основываясь на методе симметричных составляющих, система уравнений для токов будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} I_A = I_1 + I_2 + I_0; \\ I_B = \underline{a}^2 \cdot I_1 + \underline{a} \cdot I_2 + I_0; \\ I_C = \underline{a} \cdot I_1 + \underline{a}^2 \cdot I_2 + I_0, \end{cases} \quad (1)$$

где I_A, I_B, I_C – токи соответственно фаз А, В, С; I_1, I_2, I_0 – токи соответственно прямой, обратной и нулевой последовательности; \underline{a} – оператор поворота или фазный множитель ($\underline{a} = e^{j2\pi/3} = e^{-j4\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$).

Аналогичные соотношения можно получить для симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей напряжений:

$$\begin{cases} U_A = U_1 + U_2 + U_0; \\ U_B = \underline{a}^2 \cdot U_1 + \underline{a} \cdot U_2 + U_0; \\ U_C = \underline{a} \cdot U_1 + \underline{a}^2 \cdot U_2 + U_0. \end{cases} \quad (2)$$

Рассмотрим случай, когда узел нагрузки состоит из трёхфазных симметричных электроприёмников, включенных на междуфазное напряжение, образующих трёхфазную симметричную нагрузку, и однофазных электроприёмников, включенных на фазное напряжение и образующих трёхфазную несимметричную нагрузку. Предположим, что симметрирующее устройство включено непосредственно в узле нагрузки. Схема электроснабжения такого узла представлена на рис. 1.

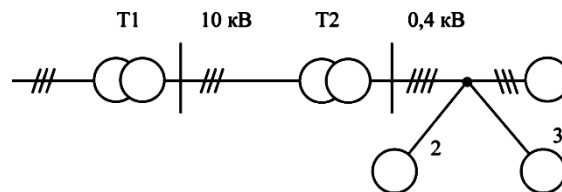


Рис. 1. Схема участка электрической сети с нагрузками и симметрирующим устройством: 1 – S_s – полная мощность трехфазной симметричной нагрузки; 2 – S_{cy} – полная мощность симметрирующего устройства; 3 – S_n – полная мощность трехфазной несимметричной нагрузки

Изобразим схему замещения для данной трёхфазной сети (рис. 2).

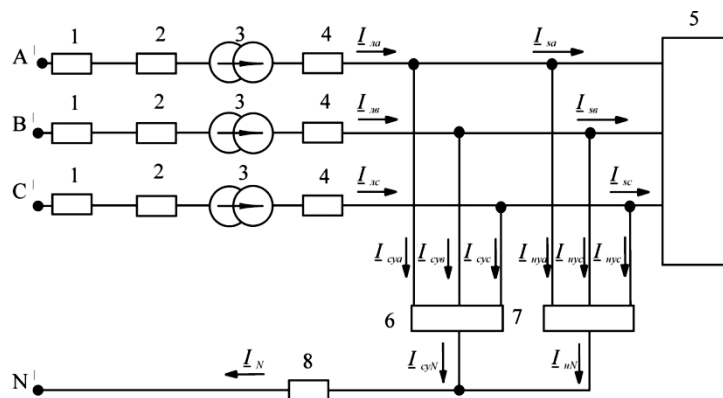


Рис. 2. Схема замещения участка электрической сети с нагрузками и симметрирующим устройством: 1 – $Z_{лв1}$; 2 – $Z_{Т1} = Z_{Т2}; Z_{Т0}$; 3 – \underline{n} ; 4 – $Z_{лн1} = Z_{лн2}; Z_{лн0}$; 5 – $Z_{S1}; Z_{S2}; Z_{S0} = \infty$; 6 – $Z_{cy1} = Z_{cy2}; Z_{cy0}$; 7 – $Z_{н1} = Z_{н2}; Z_{н0}$; 8 – Z_N

Приняв фазу А за основную и заменив трёхфазную несимметричную нагрузку тремя источниками неизвестных напряжений $U_{нa}, U_{нb}, U_{нc}$, разложим эти напряжения на симметричные составляющие напряжений прямой $U_{н1}$, обратной $U_{н2}$ и нулевой $U_{н0}$ последовательностей. В результате получим симметричную трёхфазную сеть, схема которой изображена на рис. 3.

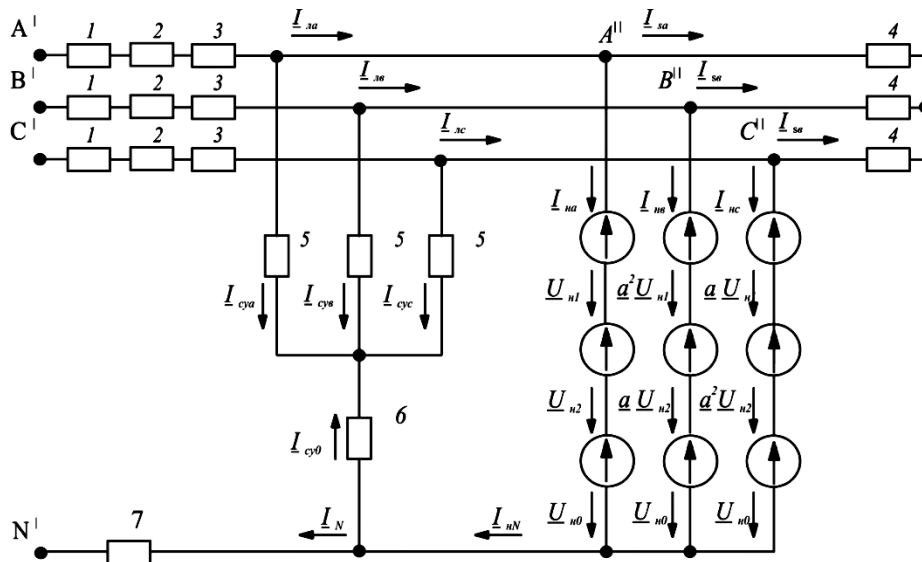


Рис. 3. Схема замещения участка электрической сети с трехфазным несимметричным источником напряжения и приведенными параметрами к сети напряжению 0,38 кВ:

$$1 - \underline{Z}'_{лв1} = \underline{Z}'_{лв2}; 2 - \underline{Z}'_{Т1} = \underline{Z}'_{Т2}, \underline{Z}'_{Т0}; 3 - \underline{Z}_{лн1} = \underline{Z}_{лн2}, \underline{Z}_{лн0}; 4 - \underline{Z}_{с1}, \underline{Z}_{с2}; 5 - \underline{Z}_{сy1} = \underline{Z}_{сy2}; 6 - \underline{Z}_{сy0}; 7 - \underline{Z}_N$$

Проводимости симметрирующего устройства фаз А, В и С определяются следующими выражениями:

$$\underline{Y}_{сyA} = \frac{\underline{I}_{сyA}}{\underline{U}_{нA}}; \underline{Y}_{сyB} = \frac{\underline{I}_{сyB}}{\underline{U}_{нB}}; \underline{Y}_{сyC} = \frac{\underline{I}_{сyC}}{\underline{U}_{нC}}, \quad (3)$$

где $\underline{I}_{сyA,B,C}$ – ток в фазах А, В и С соответственно симметрирующего устройства, А; $\underline{U}_{нA,B,C}$ – напряжение фаз А, В и С соответственно.

Токи в фазах симметрирующего устройства можно представить с помощью симметричных составляющих:

$$\begin{cases} \underline{I}_{сyA} = \underline{I}_{сy1} + \underline{I}_{сy2} + \underline{I}_{сy0}; \\ \underline{I}_{сyB} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{сy1} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{сy2} + \underline{I}_{сy0}; \\ \underline{I}_{сyC} = \underline{a} \cdot \underline{I}_{сy1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{сy2} + \underline{I}_{сy0}, \end{cases} \quad (4)$$

где токи $\underline{I}_{сy1}, \underline{I}_{сy2}, \underline{I}_{сy0}$ – это токи прямой, обратной и нулевой последовательностей и вычисляются они из следующих выражений:

$$\begin{cases} \underline{I}_{сy1} = \underline{U}_{сy1} \cdot \underline{Y}_{сy1}; \\ \underline{I}_{сy2} = \underline{U}_{сy2} \cdot \underline{Y}_{сy2}; \\ \underline{I}_{сy0} = \underline{U}_{сy0} \cdot \underline{Y}_{сy0}. \end{cases} \quad (5)$$

По исходной схеме $\underline{U}_{сyA} = \underline{U}_{нA}, \underline{U}_{сyB} = \underline{U}_{нB}, \underline{U}_{сyC} = \underline{U}_{нC}$, поэтому симметричные составляющие этих напряжений также должны быть равны соответственно.

Таким образом, подставляя выражение (5) в формулы (4) и учитывая равенства напряжений, получим:

$$\begin{cases} \underline{I}_{сyA} = \underline{U}_{н1} \cdot \underline{Y}_{сy1} + \underline{U}_{н2} \cdot \underline{Y}_{сy2} + \underline{U}_{н0} \cdot \underline{Y}_{сy0}; \\ \underline{I}_{сyB} = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{н1} \cdot \underline{Y}_{сy1} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{н2} \cdot \underline{Y}_{сy2} + \underline{U}_{н0} \cdot \underline{Y}_{сy0}; \\ \underline{I}_{сyC} = \underline{a} \cdot \underline{U}_{н1} \cdot \underline{Y}_{сy1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{н2} \cdot \underline{Y}_{сy2} + \underline{U}_{н0} \cdot \underline{Y}_{сy0}. \end{cases} \quad (6)$$

Полученные выражения (6) подставляем в формулу (3):

$$\begin{cases} \underline{Y}_{cyA} = \frac{\underline{U}_{H1} \cdot \underline{Y}_{cy1} + \underline{U}_{H2} \cdot \underline{Y}_{cy2} + \underline{U}_{H0} \cdot \underline{Y}_{cy0}}{\underline{U}_{H1} + \underline{U}_{H2} + \underline{U}_{H0}}; \\ \underline{Y}_{cyB} = \frac{a^2 \cdot \underline{U}_{H1} \cdot \underline{Y}_{cy1} + a \cdot \underline{U}_{H2} \cdot \underline{Y}_{cy2} + \underline{U}_{H0} \cdot \underline{Y}_{cy0}}{a^2 \cdot \underline{U}_{H1} + a \cdot \underline{U}_{H2} + \underline{U}_{H0}}; \\ \underline{Y}_{cyC} = \frac{a \cdot \underline{U}_{H1} \cdot \underline{Y}_{cy1} + a^2 \cdot \underline{U}_{H2} \cdot \underline{Y}_{cy2} + \underline{U}_{H0} \cdot \underline{Y}_{cy0}}{a \cdot \underline{U}_{H1} + a^2 \cdot \underline{U}_{H2} + \underline{U}_{H0}}. \end{cases} \quad (7)$$

В выражении (7) неизвестными для нас величинами при заданных исходных данных, а именно напряжении и сопротивлениях всех элементов схемы, остаются сопротивления симметрирующего устройства. Для этого произведем дальнейшие преобразования, представленные на рис. 4.

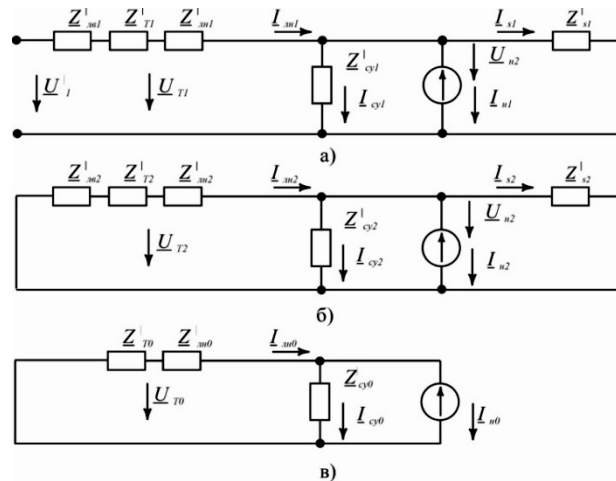


Рис. 4. Схемы прямой (а), обратной (б) и нулевой последовательностей (в) для основной фазы трехфазной симметричной цепи с симметрирующим устройством

В схеме прямой последовательности заменим активную и две пассивные параллельные ветви одной эквивалентной ветвью с источником напряжения $U_{\varepsilon 1}$ и проводимостью $Y_{\varepsilon 1}$:

$$\underline{U}_{\varepsilon 1} = \frac{\underline{Y}_1 \cdot \underline{U}'_1}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_{p1}}; \quad \underline{Y}_{\varepsilon 1} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_{p1}. \quad (8)$$

В выражении (3):

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1}; \quad \underline{Z}_1 = \underline{Z}'_{лв1} + \underline{Z}'_{T1} + \underline{Z}_{лн1},$$

где $\underline{Y}_{p1} = \underline{Y}_{cy1} + \underline{Y}_{\varepsilon 1}$ – суммарная комплексная проводимость прямой последовательности симметрирующего устройства и трёхфазной симметричной нагрузки.

В схеме обратной последовательности (рис. 4, б) заменим три пассивные параллельные ветви одной эквивалентной ветвью с проводимостью

$$\underline{Y}_{\varepsilon 2} = \underline{Y}_2 + \underline{Y}_{p2}. \quad (9)$$

В выражении (9):

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2}, \quad (10)$$

где $\underline{Z}_2 = \underline{Z}'_{лв2} + \underline{Z}'_{Т2} + \underline{Z}_{лн2}$; $\underline{Y}_{p2} = \underline{Y}_{cy2} + \underline{Y}_{s2}$ – суммарная комплексная проводимость обратной последовательности симметрирующего устройства и трёхфазной симметричной нагрузки.

В схеме нулевой последовательности (рис. 4, в) заменим две пассивные параллельные ветви одной эквивалентной ветвью с проводимостью

$$\underline{Y}_{\varepsilon 0} = \underline{Y}_{cy0} + \underline{Y}_0. \quad (11)$$

В выражении (11):

$$\underline{Y}_0 = \frac{1}{\underline{Z}_0}, \quad (12)$$

где $\underline{Z}_0 = \underline{Z}'_{Т0} + \underline{Z}_{лн0}$.

После проведённых преобразований схем (рис. 4) получим одноконтурные расчётные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, изображённые на рис. 5.

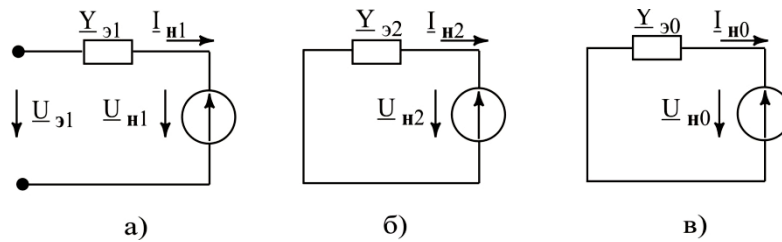


Рис. 5. Эквивалентные схемы прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Для схем прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 5) составим по второму закону Кирхгофа следующие уравнения:

$$\frac{I_{н1}}{\underline{Y}_{\varepsilon 1}} + \underline{U}_{н1} = \underline{U}_{\varepsilon 1}; \quad \frac{I_{н2}}{\underline{Y}_{\varepsilon 2}} + \underline{U}_{н2} = 0; \quad \frac{I_{н0}}{\underline{Y}_{\varepsilon 0}} + \underline{U}_{н0} = 0. \quad (13)$$

С учетом исходной схемы и параметров трехфазной цепи:

$$\begin{cases} \underline{U}_A = \frac{1}{\underline{Y}_A} (I_{н1} + I_{н2} + I_{н0}); \\ \underline{U}_B = \frac{1}{\underline{Y}_B} (a^2 \cdot I_{н1} + a \cdot I_{н2} + I_{н0}); \\ \underline{U}_C = \frac{1}{\underline{Y}_C} (a \cdot I_{н1} + a^2 \cdot I_{н2} + I_{н0}). \end{cases} \quad (14)$$

Подставив уравнения (13) в систему (14), получим:

$$\begin{cases} \frac{1}{\underline{Y}_A} ((\underline{U}_{\varepsilon 1} - \underline{U}_{н1}) \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 1} - \underline{U}_{н2} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 2} - \underline{U}_{н0} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 0}) = \underline{U}_A \\ \frac{1}{\underline{Y}_B} (a^2 \cdot (\underline{U}_{\varepsilon 1} - \underline{U}_{н1}) \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 1} - a \cdot \underline{U}_{н2} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 2} - \underline{U}_{н0} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 0}) = \underline{U}_B \\ \frac{1}{\underline{Y}_C} (a \cdot (\underline{U}_{\varepsilon 1} - \underline{U}_{н1}) \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 1} - a^2 \cdot \underline{U}_{н2} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 2} - \underline{U}_{н0} \cdot \underline{Y}_{\varepsilon 0}) = \underline{U}_C. \end{cases} \quad (15)$$

Таким образом, после некоторых преобразований, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{(U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1})}{Y_A} \cdot Y_{\text{э}1} - \frac{U_{\text{н}2}}{Y_A} \cdot Y_{\text{э}2} - \frac{U_{\text{н}0}}{Y_A} \cdot Y_{\text{э}0} = U_A \\ \frac{a^2 \cdot (U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1})}{Y_B} \cdot Y_{\text{э}1} - \frac{a \cdot U_{\text{н}2}}{Y_B} \cdot Y_{\text{э}2} - \frac{U_{\text{н}0}}{Y_B} \cdot Y_{\text{э}0} = U_B \\ \frac{a \cdot (U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1})}{Y_C} \cdot Y_{\text{э}1} - \frac{a^2 \cdot U_{\text{н}2}}{Y_C} \cdot Y_{\text{э}2} - \frac{U_{\text{н}0}}{Y_C} \cdot Y_{\text{э}0} = U_C. \end{cases} \quad (16)$$

Систему уравнений (16) решим методом Крамера. Данный метод основывается на последовательном вычислении $(n+1)$ определителей матрицы, имеющей размерность $(n \times n)$.

Главный определитель системы уравнений:

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} \frac{(U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1})}{Y_A} & -\frac{U_{\text{н}2}}{Y_A} & -\frac{U_{\text{н}0}}{Y_A} \\ \frac{a^2 \cdot (U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1})}{Y_B} & -\frac{a \cdot U_{\text{н}2}}{Y_B} & -\frac{U_{\text{н}0}}{Y_B} \\ \frac{a \cdot (U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1})}{Y_C} & -\frac{a^2 \cdot U_{\text{н}2}}{Y_C} & -\frac{U_{\text{н}0}}{Y_C} \end{vmatrix} \\ &= \frac{3 \cdot a \cdot (U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1}) \cdot U_{\text{н}2} \cdot U_{\text{н}0} - 3 \cdot a^2 \cdot (U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1}) \cdot U_{\text{н}2} \cdot U_{\text{н}0}}{Y_A \cdot Y_B \cdot Y_C} \\ &= \frac{3 \cdot (U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1}) \cdot U_{\text{н}2} \cdot U_{\text{н}0}}{Y_A \cdot Y_B \cdot Y_C} \cdot (a - a^2). \end{aligned}$$

Далее найдем дополнительные определители системы $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$.

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \begin{vmatrix} U_A & -\frac{U_{\text{н}2}}{Y_A} & -\frac{U_{\text{н}0}}{Y_A} \\ U_B & -\frac{a \cdot U_{\text{н}2}}{Y_B} & -\frac{U_{\text{н}0}}{Y_B} \\ U_C & -\frac{a^2 \cdot U_{\text{н}2}}{Y_C} & -\frac{U_{\text{н}0}}{Y_C} \end{vmatrix} \\ &= \frac{U_{\text{н}2} \cdot U_{\text{н}0}}{Y_A \cdot Y_B \cdot Y_C} \cdot (U_A \cdot Y_A \cdot (a - a^2) + U_B \cdot Y_B \cdot (a^2 - 1) + U_C \cdot Y_C \cdot (1 - a)) - \\ &= \frac{U_{\text{н}2} \cdot U_{\text{н}0}}{Y_A \cdot Y_B \cdot Y_C} \cdot (U_A \cdot Y_A + a \cdot U_B \cdot Y_B + a^2 \cdot U_C \cdot Y_C) \cdot (a - a^2). \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} \frac{(U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1})}{Y_A} & U_A & -\frac{U_{\text{н}0}}{Y_A} \\ \frac{a^2 \cdot (U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1})}{Y_B} & U_B & -\frac{U_{\text{н}0}}{Y_B} \\ \frac{a \cdot (U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1})}{Y_C} & U_C & -\frac{U_{\text{н}0}}{Y_C} \end{vmatrix} \\ &= \frac{(U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1}) \cdot U_{\text{н}0}}{Y_A \cdot Y_B \cdot Y_C} \cdot (U_A \cdot Y_A \cdot (a^2 - a) + U_B \cdot Y_B \cdot (a - 1) + U_C \cdot Y_C \cdot (1 - a^2)) \\ &= \frac{(U_{\text{э}1} - U_{\text{н}1}) \cdot U_{\text{н}0}}{Y_A \cdot Y_B \cdot Y_C} \cdot (-U_A \cdot Y_A - a^2 \cdot U_B \cdot Y_B - a \cdot U_C \cdot Y_C) \cdot (a - a^2) \end{aligned}$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} \frac{(U_{\text{э1}} - U_{\text{н1}})}{Y_A} & -\frac{U_{\text{н2}}}{Y_A} & U_A \\ \frac{a^2 \cdot (U_{\text{э1}} - U_{\text{н1}})}{Y_B} & -\frac{a \cdot U_{\text{н2}}}{Y_B} & U_B \\ \frac{a \cdot (U_{\text{э1}} - U_{\text{н1}})}{Y_C} & -\frac{a^2 \cdot U_{\text{н2}}}{Y_C} & U_C \end{vmatrix}$$

$$= \frac{(U_{\text{э1}} - U_{\text{н1}}) \cdot U_{\text{н2}} \cdot (-a \cdot U_C \cdot Y_C - a \cdot U_B \cdot Y_B - a \cdot U_A \cdot Y_A + a^2 \cdot U_A \cdot Y_A + a^2 \cdot U_B \cdot Y_B + a^2 \cdot U_C \cdot Y_C)}{Y_A \cdot Y_B \cdot Y_C}$$

$$= \frac{(U_{\text{э1}} - U_{\text{н1}}) \cdot U_{\text{н2}}}{Y_A \cdot Y_B \cdot Y_C} \cdot (-U_A \cdot Y_A - U_B \cdot Y_B - U_C \cdot Y_C) \cdot (a - a^2).$$

Далее определяем эквивалентные проводимости прямой, обратной и нулевой последовательностей из системы (16) через найденные определители.

$$\begin{aligned} Y_{\text{э1}} &= \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{U_A \cdot Y_A + a \cdot U_B \cdot Y_B + a^2 \cdot U_C \cdot Y_C}{3 \cdot (U_{\text{э1}} - U_{\text{н1}})}; \\ Y_{\text{э2}} &= \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{(-U_A \cdot Y_A - a^2 \cdot U_B \cdot Y_B - a \cdot U_C \cdot Y_C)}{3 \cdot U_{\text{н2}}}; \\ Y_{\text{э0}} &= \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{(-U_A \cdot Y_A - U_B \cdot Y_B - U_C \cdot Y_C)}{3 \cdot U_{\text{н0}}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Таким образом, получив формулы для нахождения эквивалентных проводимостей прямой, обратной и нулевой последовательностей, с помощью формул (8)–(12) можно найти требуемые проводимости симметрирующего устройства по формуле. Проводимости симметрирующего устройства прямой, обратной и нулевой последовательностей можно найти по следующей формуле:

$$\begin{cases} Y_{\text{су1}} = Y_{\text{э1}} - Y_1 - Y_{\text{с1}} \\ Y_{\text{су2}} = Y_{\text{э2}} - Y_2 - Y_{\text{с2}} \\ Y_{\text{су0}} = Y_{\text{э0}} - Y_0 \end{cases} \quad (18)$$

Благодаря полученной системе уравнений (18), можно определить параметры симметрирующего устройства в зависимости уровня несимметрии токов и напряжений исследуемой сети.

Так как мы исследуем вполне реальную систему, напряжения и токи прямой, обратной и нулевой последовательностей можно найти через коэффициенты несимметрии напряжений и токов соответственно для каждой последовательности. Поэтому с помощью формул (19)–(24) можно определить недостающие величины [2, 3].

- Напряжение прямой последовательности:

$$U_{\text{н1}} = \frac{U_a}{1 + K_{2\text{ун}} + K_{0\text{ун}}}. \quad (19)$$

- Напряжение обратной последовательности:

$$U_{\text{н2}} = U_{\text{н1}} \cdot K_{2\text{ун}}. \quad (20)$$

- Напряжение нулевой последовательности:

$$U_{\text{н0}} = U_{\text{н1}} \cdot K_{0\text{ун}}. \quad (21)$$

- Ток прямой последовательности:

$$I_{H1} = \frac{I_a}{1 + K_{2iH} + K_{0iH}} \quad (22)$$

- Ток обратной последовательности:

$$I_{H2} = I_{H1} \cdot K_{2iH} \quad (22)$$

- Ток нулевой последовательности:

$$I_{H0} = I_{H1} \cdot K_{0iH} \quad (24)$$

В формулах (19)–(24) $K_{2uH}, K_{0uH}, K_{2iH}, K_{0iH}$ – коэффициенты несимметрии напряжений и токов соответственно индексам u и i по обратной и нулевой последовательностям [3]. Пример расчета параметров симметрирующего устройства в распределительной сети 0,38 кВ. Для приведенного выше метода расчета параметров симметрирующего устройства, выполним расчет на примере схемы на рис. 1. Расчет был произведен при следующих исходных данных. Проведенные расчеты потерь мощности и показателей несимметрии токов и напряжений в сети 0,38 кВ без симметрирующего устройства показали, что при среднем значении статистической несимметрии напряжений на зажимах электроприемников, составляющей 7,3 %, несимметрия вторичных напряжений трансформатора распределительной подстанции 35/10 кВ не превышает 2 %. Поэтому в расчетах показателей несимметрии токов и напряжений и потерь мощности в качестве условно симметричного источника питания можно принимать распределительную подстанцию 35/10 кВ.

Длина ВЛ 10 кВ взята по нормам надёжности электроснабжения, равная 16,7 км. Комплексное сопротивление прямой (обратной) последовательности этой линии, выполненной проводом марки АС-35, приведено к напряжению 0,4 кВ:

$$Z_{ЛВ1} = Z_{ЛВ2} = 0,0243 + j0,01 = 0,0263 \cdot e^{j22,45^\circ} \text{ Ом.}$$

Питание нагрузки осуществляется от потребительской подстанции ТП 10/0,4 кВ с трансформатором со схемой соединения обмоток “звезда-звезда с нулём” мощностью $S_{НОМ} = 40$ кВА. Сопротивление прямой (обратной) последовательности трансформатора:

$$Z_{Т1} = Z_{Т2} = 0,09 + j0,156 = 0,18 \cdot e^{j60,02^\circ} \text{ Ом.}$$

Комплексное сопротивление нулевой последовательности трансформатора:

$$Z_{Т0} = 1,133 + j1,73 = 2,068 \cdot e^{j56,78^\circ} \text{ Ом.}$$

Длина ВЛ 0,38 кВ составляет 0,5 км; линия выполнена проводом марки 4А-50. Сечение фазных и нулевого проводов приняты одинаковыми. Комплексные сопротивления прямой (обратной) последовательностей линии 0,38 кВ равны:

$$\begin{aligned} Z_{ЛН1} = Z_{ЛН2} &= 0,315 + j0,148 = 0,348 \cdot e^{j25,24^\circ} \text{ Ом;} \\ Z_{ЛН0} &= 1,26 + j0,47 = 1,345 \cdot e^{j20,46^\circ} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Узел нагрузки в конце ВЛ 0,38 кВ содержит трёхфазные симметричные электроприёмники – асинхронные электродвигатели общей мощностью S_S с $\cos\varphi = 0,8$ и однофазные электроприёмники мощностью S_H с $\cos\varphi = 0,9$, неравномерно распределённые по трём фазам.

Методика применима для различных соотношений мощностей S_S и S_H при номинальной мощности трансформатора, т.е. соблюдено следующее условие:

$$p_S + p_H = \text{const},$$

$$\text{где } p_H = p_a + p_b + p_c = \frac{S_a}{S_{НОМ}} + \frac{S_b}{S_{НОМ}} + \frac{S_c}{S_{НОМ}}.$$

Полные мощности и комплексы проводимостей отдельных фаз трёхфазных симметричной и несимметричной нагрузок определены на основании статистических характеристик несимметрии токов в сельской сети по аналитическим выражениям в соответствии с [1, 2].

Относительные значения мощностей симметричной и несимметричной нагрузок изменяются в соответствии с таблицей.

Относительные значения мощностей трёхфазных симметричной и несимметричной нагрузок

P_a	P_b	P_c	P_s
0,0177	0,00425	0,003	0,225

Углы сдвига фаз трёхфазных симметричной и несимметричной нагрузок приняты в соответствии со среднестатистическими данными несимметрии токов в сетях и соответственно равны [1]:

$$\varphi_s = 36,87^\circ; \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = 25,84^\circ.$$

Основываясь на расчетах [1,2], значения коэффициентов несимметрии примем следующие:

$$\begin{aligned} \underline{K}_{2ун} &= 0,00237 \cdot e^{j217,9745^\circ} = -0,0019 - j0,0015; \\ \underline{K}_{0ун} &= 0,03329 \cdot e^{j254,5942^\circ} = -0,0088 - j0,0321; \\ \underline{K}_{2ил} &= 0,03065 \cdot e^{j27,3581^\circ} = 0,0272 + j0,0141; \\ \underline{K}_{0ил} &= 0,05192 \cdot e^{j20,8342^\circ} = 0,0485 + j0,0185. \end{aligned}$$

Расчет начнем с нахождения напряжений фаз А, В и С через их составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей, найденные в свою очередь через имеющиеся коэффициенты несимметрии.

$$\begin{aligned} \underline{U}_{н1} &= \frac{\underline{U}_a}{1 + \underline{K}_{2ун} + \underline{K}_{0ун}} = 222,2447 \cdot e^{j1,945^\circ} = 222,1166 + j7,543; \\ \underline{U}_{н2} &= \underline{U}_{н1} \cdot \underline{K}_{2ун} = 0,5267 \cdot e^{j219,92^\circ} = -0,4039 - j0,3379; \\ \underline{U}_{н0} &= \underline{U}_{н1} \cdot \underline{K}_{0ун} = 7,3985 \cdot e^{j256,539^\circ} = -1,7223 - j7,1953. \end{aligned}$$

Таким образом, фазные напряжения будут равны:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{н1} + \underline{U}_{н2} + \underline{U}_{н0} = 219,9904 + j0,0098 = 219,9904 \cdot e^{j0,0026^\circ} \text{ В}; \\ \underline{U}_B &= \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{н1} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{н2} + \underline{U}_{н0} = -105,7535 - j203,5063 = 229,4336 \cdot e^{-j117,4593^\circ} \text{ В}; \\ \underline{U}_C &= \underline{a} \cdot \underline{U}_{н1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{н2} + \underline{U}_{н0} = -119,4038 + j181,9107 = 217,5977 \cdot e^{j123,2804^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

Далее рассчитаем комплексные проводимости трехфазных несимметричной нагрузки:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_a &= \frac{S_{ном} \cdot p_a}{U_{ф.ном}^2 \cdot e^{j\varphi_a}} = \frac{40000 \cdot 0,0177}{220^2 \cdot e^{j25,84^\circ}} = 0,0146 \cdot e^{-j25,84^\circ} \text{ См}; \\ \underline{Y}_b &= \frac{S_{ном} \cdot p_b}{U_{ф.ном}^2 \cdot e^{j\varphi_b}} = \frac{40000 \cdot 0,00425}{220^2 \cdot e^{j25,84^\circ}} = 0,0035 \cdot e^{-j25,84^\circ} \text{ См}; \\ \underline{Y}_c &= \frac{S_{ном} \cdot p_c}{U_{ф.ном}^2 \cdot e^{j\varphi_c}} = \frac{40000 \cdot 0,003}{220^2 \cdot e^{j25,84^\circ}} = 0,0025 \cdot e^{-j25,84^\circ} \text{ См}; \\ \underline{Y}_{s1} = \underline{Y}_{s2} &= \frac{S_{ном} \cdot p_s}{U_{л.ном}^2 \cdot e^{j\varphi_s}} = \frac{40000 \cdot 0,225}{380^2 \cdot e^{j36,87^\circ}} = 0,0623 \cdot e^{-j36,87^\circ} = 0,0498 - j0,0374 \text{ См}; \\ \underline{Y}_{s1} = \underline{Y}_{s2} &= \frac{\underline{U}_A \cdot \underline{Y}_a + \underline{a} \cdot \underline{U}_B \cdot \underline{Y}_b + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_C \cdot \underline{Y}_c}{3 \cdot (\underline{U}_{s1} - \underline{U}_{н1})} = 0,0875 \cdot e^{j150,8342^\circ} = -0,0764 + j0,0426 \text{ См}; \end{aligned}$$

$$\underline{Y}_{\varepsilon 0} = \frac{(-\underline{U}_A \cdot \underline{Y}_A - \underline{U}_B \cdot \underline{Y}_B - \underline{U}_C \cdot \underline{Y}_C)}{3 \cdot \underline{U}_{H0}} = 0,1152 \cdot e^{j148,3617^\circ} = -0,0981 + j0,0604 \text{ См.}$$

Проводимость прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{\underline{Z}'_{\text{ЛВ1}} + \underline{Z}'_{\text{Т1}} + \underline{Z}_{\text{ЛН1}}} = 1,8801 \cdot e^{-j36,1826^\circ} = 1,5175 - j1,1099 \text{ См;}$$

$$\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2;$$

$$\underline{Y}_0 = \frac{1}{\underline{Z}_0} = \frac{1}{\underline{Z}'_{\text{Т0}} + \underline{Z}_{\text{ЛН0}}} = 0,3076 \cdot e^{-j42,5938^\circ} = 0,2264 - j0,2082 \text{ См.}$$

$$\underline{Y}_{\text{cy1}} = \underline{Y}_{\text{cy2}} = \underline{Y}_{\varepsilon 1} - \underline{Y}_1 - \underline{Y}_{\text{S1}} = -1,6437 + j1,1899 = 2,0292 \cdot e^{j144,0986^\circ} \text{ См;}$$

$$\underline{Y}_{\text{cy0}} = \underline{Y}_{\varepsilon 0} - \underline{Y}_0 = -0,3245 + j0,2686 = 0,4212 \cdot e^{j140,3843^\circ} \text{ См.}$$

Заключение. Получив экспериментальным путем данные по несимметрии токов и напряжений на заданном участке действующей сети 0,38 кВ, с помощью формулы (18), можно определить необходимость применения симметрирующего устройства, а также его параметры для каждого конкретного участка этой сети.

Литература

1. Наумов И.В. Способы и технические средства снижения несимметрии токов и потерь электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ: дис. ... канд. техн. наук. – Л.: ЛСХИ, 1989. – 277 с.
2. Подъячих С.В. Нормализация качества электрической энергии в сельских сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке для снижения энергетических потерь: дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск: ИрГСХА, 2003. – 235 с.
3. ГОСТ Р 54149-2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.

