УДК 621.311.017

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ПРИ МНОГОКРАТНОЙ НЕСИММЕТРИИ

В.С. Сафарян, Л.В. Сафарян

ЗАО "Научно-исследовательский институт энергетики"

В трехфазной сети, нагруженной смешанно: трехфазными и однофазными электроприемниками, в общем случае нагрузки фаз могут существенно отличаться друг от друга, что приводит к несимметричным режимам. Расчет установившегося режима и потерь мощности в распределительных сетях при многократных несимметриях требует применения метода фазных координат или метода симметричных составляющих и моделирования сети четырехлинейной или трехлинейной схемой замещения. Применение метода фазных координат сопряжено с трудностями, так как в несимметричных режимах невозможно устранить электромагнитные связи. Метод симметричных составляющих требует составления схем прямой, обратной и нулевой последовательностей и их совместного рассмотрения. Приводится обобщенная математическая модель расчета установившегося режима распределительной сети при многократной несимметрии с применением метода симметричных составляющих.

Ключевые слова: распределительная сеть, установившийся режим, многократная несимметрия, метод фазных координат, метод симметричных составляющих, четырехлинейная схема замещения.

Введение. Расчеты установившихся режимов (УР) электрических сетей, имея большое самостоятельное значение, являются основой для всех технико-экономических задач в энергетике.

Точность расчета потерь активной мощности в сети зависит от точности моделирования пассивной и активной информации, а также от используемого метода расчета системы уравнений УР сети.

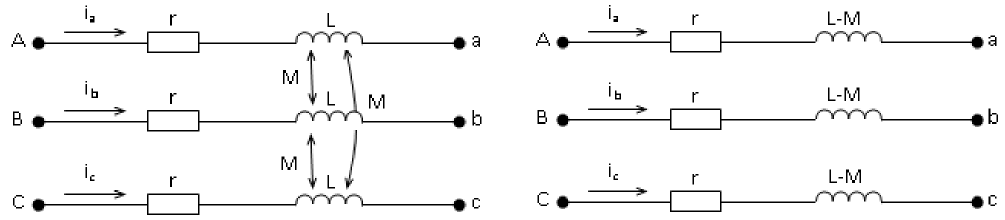
Известно, что при задании исходной активной информации в виде активной (P) и реактивной (Q) мощностей, или в виде активной мощности и модуля напряжений (U) расчеты УР сводятся к решению системы нелинейных уравнений, которое можно осуществить лишь итеративными методами [1].

В трехфазной сети, нагруженной смешанно: трехфазными и однофазными электроприемниками, в общем случае нагрузки фаз могут существенно отличаться друг от друга, что приводит к несимметричным режимам.

Как правило, расчеты УР трехфазных сетей осуществляются по однолинейной схеме замещения, что является оправданным для симметричных режимов. Для учета несимметричности и коррекции режимных параметров используются коэффициенты неравномерности [2], которые приближенно учитывают переменность во времени графика нагрузки и несимметричность нагрузки по фазам. При наличии информации о нагрузках по отдельным фазам фактор несимметричности работы трехфазной сети можно учесть точно, используя при расчете УР распределительной сети методы фазных координат [3, 4] или симметричных составляющих [5-8], моделируя трехфазную сеть четырехпроводной (четырехлинейной) схемой замещения.

При расчете УР методом фазных координат трехфазная сеть моделируется четырехлинейной (при наличии нулевого провода) или трехлинейной схемой замещения. При наличии неустранимых взаимных магнитных связей между индуктивными элементами математическая модель УР методом фазных координат получается громоздкой и трудно поддается формализации [4].

Условие эквивалентного устранения магнитной связи. Рассмотрим трехфазную линию электропередачи (ЛЭП) с активным сопротивлением r, индуктивностью L и взаимной индуктивностью между проводами M (рис. 1).



а) б)

Рис. 1. Эквивалентное устранение магнитной связи между проводами трехфазной линии электропередачи: а - трехфазная линия с магнитной связью; б - трехфазная линия после устранения магнитной связи

Для ЛЭП, представленной на рис. 1а, напряжение на участке A-a определяется в виде

$$u_{Aa} = ri_a + L\frac{di_a}{dt} + M\frac{d}{dt}\left(i_b + i_c\right). \qquad (1)$$

С учетом условия

$$i_a + i_b + i_c = 0 \qquad (2)$$

выражение (1) примет вид

$$u_{Aa} = ri_a + \left(L - M\right)\frac{di_a}{dt}, \qquad (3)$$

которому соответствует ЛЭП, изображенная на рис. 1б.

Таким образом, условиями устранения магнитной связи между проводами ЛЭП являются соотношение (2) и симметричность взаимной индуктивности:

$$M_{ab} = M_{ac} = M_{bc} = M. \quad (4)$$

Даже при выполнении условия (4) и отсутствии нулевого провода в распределительных сетях при несимметричных режимах условие (2) не имеет места из-за наличия поперечных емкостей в схеме замещения ЛЭП.

Применение метода симметричных составляющих позволяет в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей устранить магнитные связи между проводами трехфазной ЛЭП, однако так как схемы последовательностей должны рассматриваться совместно, расчет УР методом симметричных составляющих при многократной несимметрии сопряжен с определенными трудностями. Если учесть также, что расчет УР несимметричных трехфазных схем при многократной несимметрии не формализован, то разработка математической модели УР трехфазных схем распределительных сетей при многократной несимметрии является актуальной.

Целью работы является разработка математической модели УР распределительных сетей при многократной несимметрии с использованием метода симметричных составляющих.

Формализация задачи расчета установившихся режимов распределительных сетей при многократной несимметрии. Сначала рассматривается формализация метода для простейших схем с одним и двумя несимметричными участками, затем приводится обобщенная математическая модель для сети с n несимметричными участками.

1. Рассмотрим простейший случай формализации метода симметричных составляющих на примере схемы замещения трехфазной электрической сети [5, 6], представленной на рис. 2.

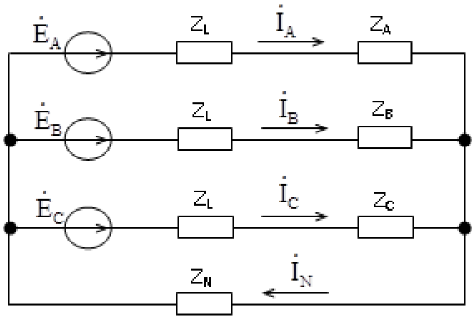


Рис. 2. Четырехпроводная схема замещения трехфазной сети: $\dot{E}_A$, $\dot{E}_B$, $\dot{E}_C$ *- трехфазная система ЭДС,* Z_L *- сопротивление линии,* Z_N *- сопротивление нейтрального провода,* Z_A, Z_B, Z_C *- сопротивления нагрузок*

Составим схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей, полагая систему ЭДС и нагрузки несимметричными (рис. 3).

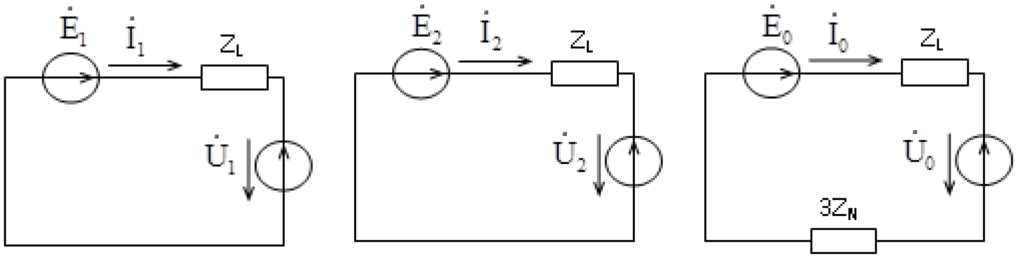


Рис. 3. Схемы прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей симметричных составляющих: $\dot{E}_1$, $\dot{E}_2$, $\dot{E}_0$ *- симметричные составляющие трехфазной системы фазных ЭДС;* $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$, $\dot{I}_0$ *- симметричные составляющие трехфазной системы токов* $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$*;* $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$, $\dot{U}_0$ *- симметричные составляющие трехфазной системы напряжений нагрузок* $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$

Учет поперечных емкостей в схемах последовательностей симметричных составляющих производится корректировкой соответствующих ЭДС в схемах последовательностей, так как поперечные емкости в исходной схеме (рис. 2) включены параллельно системе ЭДС $\dot{E}_A$, $\dot{E}_B$, $\dot{E}_C$ и системе нагрузок.

Уравнение состояния сети для схемы последовательностей примет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/(Z_L + 3Z_N) & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_L & 0 \\ 0 & 0 & 1/Z_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_0 - \dot{U}_0 \\ \dot{E}_1 - \dot{U}_1 \\ \dot{E}_2 - \dot{U}_2 \end{bmatrix},$$

или в краткой форме записи:

$$\dot{I} = Y(\dot{E} - \dot{U}). \tag{5}$$

Составим дополнительные уравнения:

$$\begin{cases} \dot{U}_A = Z_A \dot{I}_A, \\ \dot{U}_B = Z_B \dot{I}_B, \\ \dot{U}_C = Z_C \dot{I}_C \end{cases}$$

или же

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & 0 & 0 \\ 0 & Z_B & 0 \\ 0 & 0 & Z_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Представим (6) в краткой форме записи:

$$T\dot{U} = Z_d T\dot{I}, \qquad (7)$$

$$\text{где } T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix},\; Z_d = \begin{bmatrix} Z_A & 0 & 0 \\ 0 & Z_B & 0 \\ 0 & 0 & Z_C \end{bmatrix},\; T^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}.$$

Решая (7) относительно вектора $\dot{U}$, получим

$$\dot{U} = T^{-1} Z_d T\dot{I} = Z\dot{I}, \qquad (8)$$

$$\text{где } Z = \begin{bmatrix} Z_0 & Z_2 & Z_1 \\ Z_1 & Z_0 & Z_2 \\ Z_2 & Z_1 & Z_0 \end{bmatrix},\; \begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} Z_A \\ Z_B \\ Z_C \end{bmatrix}.$$

Решение задачи сводится к совместному решению системы уравнений (5) и (8):

$$\begin{cases} \dot{I} = Y\left(\dot{E} - \dot{U}\right), \\ \dot{U} = Z\dot{I}. \end{cases} \qquad (9)$$

Решая систему (9) относительно вектора $\dot{U}$, получим

$$\dot{U} = \left(E_3 + ZY\right)^{-1} \cdot ZY\dot{E}, \qquad (10)$$

где E_3 - единичная мартица порядка 3.

2. Рассмотрим трехфазную цепь с двумя системами несимметричных нагрузок (рис. 4).

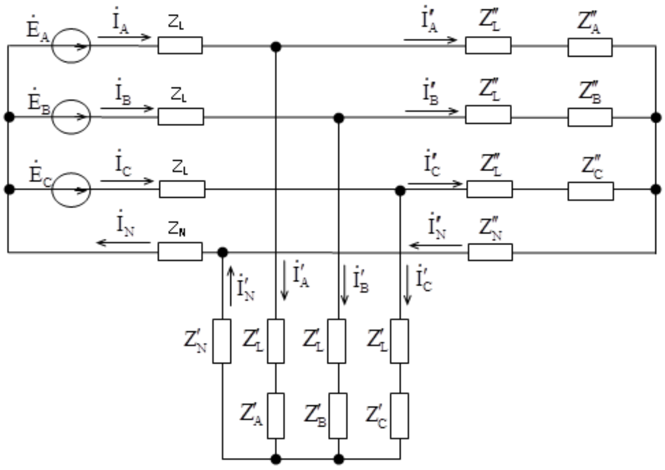


Рис. 4. Трехфазная цепь с двумя трехфазными $\left(Z'_A, Z'_B, Z'_C \;\; и \;\; Z''_A, Z''_B, Z''_C\right)$ *несимметричными нагрузками*

Составим схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей для трехфазной несимметричной схемы (рис. 5).

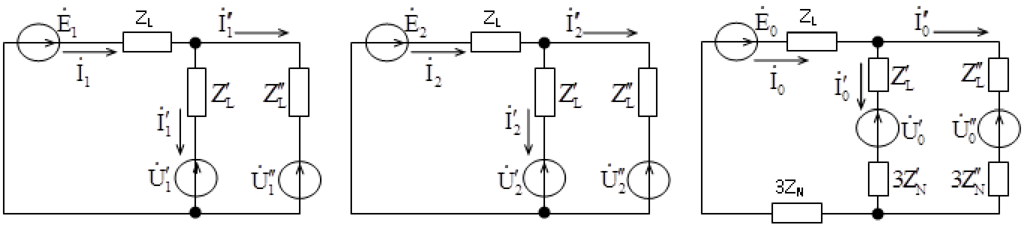


Рис. 5. Схемы прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Составим уравнения состояний для схемы последовательностей:

$$\begin{cases} Y_0\left(\dot{E}_0-\dot{U}_0\right)=\dot{I}_0, \\ Y_1\left(\dot{E}_1-\dot{U}_1\right)=\dot{I}_1, \\ Y_2\left(\dot{E}_2-\dot{U}_2\right)=\dot{I}_2, \end{cases} \tag{11}$$

где Y_0, Y_1, Y_2 - квадратные матрицы контурных проводимостей для схем последовательностей симметричных составляющих. Порядок матриц Y_0, Y_1, Y_2 определяется числом несимметричных участков сети.

Систему уравнений (11) можно представить в квазидиагональной форме:

$$\begin{bmatrix} Y_0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{E}_0-\dot{U}_0 \\ \dot{E}_1-\dot{U}_1 \\ \dot{E}_2-\dot{U}_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}. \tag{12}$$

Составим дополнительные уравнения:

$$\begin{cases} \dot{U}'_A=Z'_A\dot{I}'_A, \\ \dot{U}'_B=Z'_B\dot{I}'_B, \\ \dot{U}'_C=Z'_C\dot{I}'_C, \end{cases} \qquad \begin{cases} \dot{U}''_A=Z''_A\dot{I}''_A, \\ \dot{U}''_B=Z''_B\dot{I}''_B, \\ \dot{U}''_C=Z''_C\dot{I}''_C \end{cases}$$

или же

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{U}'_0 \\ \dot{U}'_1 \\ \dot{U}'_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} Z'_A & 0 & 0 \\ 0 & Z'_B & 0 \\ 0 & 0 & Z'_C \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{I}'_0 \\ \dot{I}'_1 \\ \dot{I}'_2 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}''_0\\\dot{U}''_1\\\dot{U}''_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z''_A&0&0\\0&Z''_B&0\\0&0&Z''_C\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}''_0\\\dot{I}''_1\\\dot{I}''_2\end{bmatrix}.$$

Объединяя вышеприведенные выражения, получим

$$\begin{bmatrix}1&1&1&0&0&0\\1&a^2&a&0&0&0\\1&a&a^2&0&0&0\\0&0&0&1&1&1\\0&0&0&1&a^2&a\\0&0&0&1&a&a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}'_0\\\dot{U}'_1\\\dot{U}'_2\\\dot{U}''_0\\\dot{U}''_1\\\dot{U}''_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z'_A&0&0&0&0&0\\0&Z'_B&0&0&0&0\\0&0&Z'_C&0&0&0\\0&0&0&Z''_A&0&0\\0&0&0&0&Z''_B&0\\0&0&0&0&0&Z''_C\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&1&1&0&0&0\\1&a^2&a&0&0&0\\1&a&a^2&0&0&0\\0&0&0&1&1&1\\0&0&0&1&a^2&a\\0&0&0&1&a&a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}'_0\\\dot{I}'_1\\\dot{I}'_2\\\dot{I}''_0\\\dot{I}''_1\\\dot{I}''_2\end{bmatrix},$$

или же

$$\begin{bmatrix}\dot{U}'_0\\\dot{U}'_1\\\dot{U}'_2\\\dot{U}''_0\\\dot{U}''_1\\\dot{U}''_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z'_0&Z'_2&Z'_1&0&0&0\\Z'_1&Z'_0&Z'_2&0&0&0\\Z'_2&Z'_1&Z'_0&0&0&0\\0&0&0&Z''_0&Z''_2&Z''_1\\0&0&0&Z''_1&Z''_0&Z''_2\\0&0&0&Z''_2&Z''_1&Z''_0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}'_0\\\dot{I}'_1\\\dot{I}'_2\\\dot{I}''_0\\\dot{I}''_1\\\dot{I}''_2\end{bmatrix},\quad\begin{bmatrix}\dot{U}'\\\dot{U}''\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z'&0\\0&Z''\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}'\\\dot{I}''\end{bmatrix},\tag{13}$$

$$\begin{bmatrix}Y_0&Y_0&0&0&0&0\\Y_0&Y_0&0&0&0&0\\0&0&Y_1&Y_1&0&0\\0&0&Y_1&Y_1&0&0\\0&0&0&0&Y_2&Y_2\\0&0&0&0&Y_2&Y_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{E}_0-\dot{U}'_0\\\dot{E}_0-\dot{U}''_0\\\dot{E}_1-\dot{U}'_1\\\dot{E}_1-\dot{U}''_1\\\dot{E}_2-\dot{U}'_2\\\dot{E}_2-\dot{U}''_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{I}'_0\\\dot{I}''_0\\\dot{I}'_1\\\dot{I}''_1\\\dot{I}'_2\\\dot{I}''_2\end{bmatrix}.\tag{14}$$

Векторы токов выражений (13) и (14) связаны соотношением

$$\begin{bmatrix}\dot{I}'_0\\\dot{I}''_0\\\dot{I}'_1\\\dot{I}''_1\\\dot{I}'_2\\\dot{I}''_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0\\0&0&0&1&0&0\\0&1&0&0&0&0\\0&0&0&0&1&0\\0&0&1&0&0&0\\0&0&0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}'_0\\\dot{I}'_1\\\dot{I}'_2\\\dot{I}''_0\\\dot{I}''_1\\\dot{I}''_2\end{bmatrix},\quad D^{-1}=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0\\0&0&1&0&0&0\\0&0&0&0&1&0\\0&1&0&0&0&0\\0&0&0&1&0&0\\0&0&0&0&0&1\end{bmatrix},\quad D^{-1}=D^t.$$

3. Для распределительной сети с n несимметричными нагрузками имеем:

- уравнения состояния последовательностей:

$$\begin{array}{cc} & \begin{matrix}1, & 2, & \cdots, & n\end{matrix} \\ \begin{matrix}1\\2\\\vdots\\n\end{matrix} & \begin{bmatrix} & & \\ & Y_0 & \\ & & \\ & & \end{bmatrix}\end{array} \begin{bmatrix}\dot{E}_0-\dot{U}_0^{(1)}\\ \dot{E}_0-\dot{U}_0^{(2)}\\ \vdots\\ \dot{E}_0-\dot{U}_0^{(n)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{I}_0^{(1)}\\ \dot{I}_0^{(2)}\\ \vdots\\ \dot{I}_0^{(n)}\end{bmatrix},$$

$$\begin{array}{cc} & \begin{matrix}1, & 2, & \cdots, & n\end{matrix} \\ \begin{matrix}1\\2\\\vdots\\n\end{matrix} & \begin{bmatrix} & & \\ & Y_1 & \\ & & \\ & & \end{bmatrix}\end{array} \begin{bmatrix}\dot{E}_1-\dot{U}_1^{(1)}\\ \dot{E}_1-\dot{U}_1^{(2)}\\ \vdots\\ \dot{E}_1-\dot{U}_1^{(n)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{I}_1^{(1)}\\ \dot{I}_1^{(2)}\\ \vdots\\ \dot{I}_1^{(n)}\end{bmatrix},$$

$$\begin{array}{cc} & \begin{matrix}1, & 2, & \cdots, & n\end{matrix} \\ \begin{matrix}1\\2\\\vdots\\n\end{matrix} & \begin{bmatrix} & & \\ & Y_2 & \\ & & \\ & & \end{bmatrix}\end{array} \begin{bmatrix}\dot{E}_2-\dot{U}_2^{(1)}\\ \dot{E}_2-\dot{U}_2^{(2)}\\ \vdots\\ \dot{E}_2-\dot{U}_2^{(n)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{I}_2^{(1)}\\ \dot{I}_2^{(2)}\\ \vdots\\ \dot{I}_2^{(n)}\end{bmatrix};$$

- дополнительные уравнения:

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_0^{(1)}\\ \dot{U}_1^{(1)}\\ \dot{U}_2^{(1)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_0^{(1)} & Z_2^{(1)} & Z_1^{(1)}\\ Z_1^{(1)} & Z_0^{(1)} & Z_2^{(1)}\\ Z_2^{(1)} & Z_1^{(1)} & Z_0^{(1)}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_0^{(1)}\\ \dot{I}_1^{(1)}\\ \dot{I}_2^{(1)}\end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_0^{(2)}\\ \dot{U}_1^{(2)}\\ \dot{U}_2^{(2)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_0^{(2)} & Z_2^{(2)} & Z_1^{(2)}\\ Z_1^{(2)} & Z_0^{(2)} & Z_2^{(2)}\\ Z_2^{(2)} & Z_1^{(2)} & Z_0^{(2)}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_0^{(2)}\\ \dot{I}_1^{(2)}\\ \dot{I}_2^{(2)}\end{bmatrix},$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots,$$

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_0^{(n)}\\ \dot{U}_1^{(n)}\\ \dot{U}_2^{(n)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_0^{(n)} & Z_2^{(n)} & Z_1^{(n)}\\ Z_1^{(n)} & Z_0^{(n)} & Z_2^{(n)}\\ Z_2^{(n)} & Z_1^{(n)} & Z_0^{(n)}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_0^{(n)}\\ \dot{I}_1^{(n)}\\ \dot{I}_2^{(n)}\end{bmatrix},$$

где нижние индексы обозначают номер симметричной составляющей, а верхние индексы в скобках – номер нагрузки.

Уравнения состояния последовательностей состоят из трех матричных уравнений порядка n, а дополнительные уравнения – из n матричных уравнений порядка 3.

Представим матричные уравнения в краткой форме записи:

- уравнения состояния последовательностей:

$$\mathrm{Y}\left(\dot{\mathrm{E}} - \dot{\mathrm{U}}\right) = \dot{\mathrm{I}}\,, \tag{15}$$

где Y - блочная матрица с тремя блоками размерностями $n \times n$;

- дополнительные уравнения:

$$\dot{\mathrm{U}} = \mathrm{Z}\dot{\mathrm{I}}\,, \tag{16}$$

где Z - блочная матрица с n блоками порядка 3.

Объединяя систему уравнений (15), (16) и учитывая, что компоненты векторов $\dot{\mathrm{U}}$, $\dot{\mathrm{I}}$ в системах (15) и (16) имеют разные чередования, получим

$$\begin{cases} \mathrm{Y}\left(\dot{\mathrm{E}} - \dot{\mathrm{U}}\right) = \dot{\mathrm{I}}, \\ \dot{\mathrm{U}} = \mathrm{D}\mathrm{Z}\mathrm{D}^{-1}\dot{\mathrm{I}}. \end{cases} \tag{17}$$

Совместным решением (17) определяем векторы токов и напряжений для последовательностей симметричных составляющих.

Для нагрузок заданными являются активные и реактивные мощности, поэтому система уравнений (17) решается итерационным методом, уточняя в каждом шаге итерации активные и реактивные сопротивления нагрузок и матрицу Z.

Выводы

1. Применение метода фазных координат для расчета установившихся режимов несимметричных трехфазных цепей сопряжено с трудностями, так как неустранимые магнитные связи четырехпроводной линии усложняют формирование и реализацию математической модели.
2. Метод симметричных составляющих для расчета установившихся режимов несимметричных трехфазных цепей требует совместного рассмотрения схем прямой, обратной и нулевой последовательностей с системой дополнительных уравнений, а отсутствие единого подхода формализации метода препятствует его широкому применению.
3. Разработана математическая модель расчета установившихся режимов распределительной сети с учетом многократной несимметрии.

Литература

1. **Идельчик В.И.** Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 289 с.
2. **Аракелян А.М., Егиазарян Л.В., Сафарян В.С.** Учет неравномерности графика нагрузки в расчете потерь электроэнергии // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1999. - Т. LII, № 2. - С. 178 - 181.
3. **Солдатов В.А., Попов Н.М.** Моделирование сложных видов несимметрии в распределительных сетях 10 кВ методом фазных координат // Электротехника. - 2003. - № 10. - С. 35 - 39.
4. **Якимчук Н.Н.** Применение метода фазных координат для анализа несимметричных режимов электроэнергетических систем: Дис. ... канд. техн. наук. - Киров, 2000.
5. **Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В.** Основы теории цепей. - М.: Энергоатом, 1989. - 475 с.
6. **Атабеков Г.И.** Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. - М.: Энергия, 1978. - 592 с.
7. **Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чеурин В.Л.** Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. В 3-х т. Том 1. - 4-е изд. - СПб.: Питер, 2006. - 463 с.
8. **Шахбазян С.А.** Способ расчета несимметричных режимов в трехфазных сетях методом наложения // Вестник ГИУА (Политехник). Сер. "Электротехника, энергетика". - 2013. - № 2. - С. 77 - 83.

Поступила в редакцию 15.09.2015.
Принята к опубликованию 16.12.2015.

ԲԱՇԽԻՉ ՑԱՆՑԵՐԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ԲԱԶՄԱԿԻ ՈՉ ՍԻՄԵՏՐԻԿՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Վ.Ս. Սաֆարյան, Լ.Վ. Սաֆարյան

Եռաֆազ շղթայում, որը բեռնավորված է և՛ եռաֆազ, և՛ միաֆազ էլեկտրաընդունիչներով, ընդհանուր դեպքում ֆազերի բեռնվածքները կարող են էականորեն տարբերվել, ինչն էլ հանգեցնում է ոչ սիմետրիկ ռեժիմների: Բաշխիչ ցանցերում բազմակի ոչ սիմետրիկությամբ կայունացված ռեժիմի և հզորության կորստի հաշվարկների իրագործման համար կիրառվում են ֆազային կոորդինատների կամ սիմետրիկ բաղադրիչների մեթոդները, և ցանցը մոդելավորվում է քառագիծ կամ եռագիծ փոխարինման սխեմայով: Ֆազային կոորդինատների մեթոդի կիրառումը կապված է դժվարությունների հետ, քանի որ ոչ սիմետրիկ ռեժիմներում հնարավոր չէ կապազերծել էլեկտրամագնիսական կապերը: Սիմետրիկ բաղադրիչների մեթոդի կիրառման դեպքում պահանջվում են ուղիղ, հակադարձ և զրոյական հաջորդականությամբ սխեմաների կազմումը և դրանց համատեղ դիտարկումը: Ներկայացվում է բաշխիչ ցանցի կայունացված ռեժիմի հաշվարկի ընդհանրացված մաթեմատիկական մոդելը բազմակի ոչ սիմետրիկության դեպքում՝ սիմետրիկ բաղադրիչների մեթոդի կիրառմամբ:

Առանցքային բառեր. բաշխիչ ցանց, կայունացված ռեժիմ, բազմակի ոչ սիմետրիկություն, ֆազային կոորդինատների մեթոդ, սիմետրիկ բաղադրիչների մեթոդ, քառագիծ փոխարինման սխեմա:

CALCULATION OF THE ESTABLISHED REGIMES OF DISTRIBUTIVE NETWORKS WITH MULTIPLE NON-SYMMETRIES

V.S. Safaryan, L.V. Safaryan

In a three-phased circuit loaded by both three-phase and single-phase electrical receivers, in the general case the loadings of phases may significantly differ which leads to non-symmetric regimes. For carrying out calculations of the multiple non-symmetry steady state regime and the capacity loss in distributive networks, methods of phase coordinates or symmetric components are implemented, and the network is modeled by three-linear and four-linear equivalent circuit. The method of phase coordinates is connected with difficulties, as it is impossible to remove electromagnetic connections in case of non-symmetric regimes. In case of implementation of symmetric components, the creation of forward, reverse and zero sequence and their joint observation is required. A generalized mathematical model for calculating the steady state regime of distributive network is given for multiple non-symmetry case, using the method of symmetric components.

Keywords: distributive network, steady state regime, multiple non-symmetry, method of phase coordinates, method of symmetric components, four-linear equivalent circuit.