УДК 621.316.7

М. И. Бурбело, д. т. н., проф.; С. Н. Мельничук; В. А. Кошкалда
РАСЧЕТ РЕЖИМА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПРИ
НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

В статье обоснован новый метод расчета режима распределительной сети при несимметричной нагрузке, в основу которого положено использование ортогональной системы координат.

Ключевые слова: несимметричная нагрузка, ортогональная система координат, метод симметричных составляющих.

Введение

С развитием промышленности расширяется круг электрических потребителей, отрицательно влияющих на несимметрию напряжения. Особенно это характерно для сетей, которые обеспечивают питание мощных несимметричных потребителей, например, тяговых железнодорожных сетей с двухфазной нагрузкой, дуговых сталеплавильных печей и других, которые являются причиной возникновения несимметрии напряжения. Существенной является несимметрия напряжений в распределительных сетях 0,38 кВ. Причиной несимметрии являются также неполнофазные режимы, возникающие при обрыве проводов, незамыкании контактов выключателя. Несимметрия напряжения вызывает уменьшение надежности и эффективности работы электрооборудования электроприемников [1].

Для анализа несимметричных режимов используют метод симметричных составляющих или метод фазных координат [2, 3]. В любой точке электрической сети напряжения и токи характеризуются фазными значениями, соответственно:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}.$$

В системе симметричных координат эти же напряжения и токи будут

$$\mathbf{U}_s = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_s = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_0 \end{bmatrix}.$$

Переход от симметричных составляющих к фазным координатам осуществляется с использованием матрицы Фортескью по формулам

$$U = sU_s, \quad I = sI_s.$$

Обратный переход от фазных координат к симметричным составляющим осуществляется с использованием обратной матрицы Фортескью

$$U_s = s^{-1}U, \quad I_s = s^{-1}I.$$

Матрицы перехода

$$s = [s_1 \quad s_2 \quad s_0] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}; \quad s^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Напряжение в любой точке радиальной сети при несимметричной нагрузке можно рассчитать по формуле

$$U_s = E_s - \underline{Z}_s J_s, \quad (1)$$

или

$$U = E - s \cdot \underline{Z}_s \cdot J_s, \quad (2)$$

где $\underline{E}_s = \begin{bmatrix} \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 \\ \underline{E}_0 \end{bmatrix}$, $\underline{E} = \begin{bmatrix} \underline{E}_A \\ \underline{E}_B \\ \underline{E}_C \end{bmatrix}$, $\underline{Z}_s = \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 & & \\ & \underline{Z}_2 & \\ & & \underline{Z}_0 \end{bmatrix}$ – векторы симметричных составляющих и

фазных ЭДС источника и матрица симметричных составляющих сопротивлений ЛЭП.

Для анализа несимметричных режимов можно использовать и метод фазных координат:

$$U = E - \underline{Z} \cdot J. \quad (3)$$

При этом матрицу фазных сопротивлений ЛЭП определяют по формуле [4]

$$Z = sZ_s s^{-1}. \quad (4)$$

Например, матрице

$$\underline{Z}_s = \begin{bmatrix} 0,1 + j0,2 & & \\ & 0,1 + j0,2 & \\ & & 3(0,1 + j0,2) \end{bmatrix}$$

соответствует матрица

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} 0,167 + j0,333 & 0,067 + j0,133 & 0,067 + j0,133 \\ 0,067 + j0,133 & 0,167 + j0,333 & 0,067 + j0,133 \\ 0,067 + j0,133 & 0,067 + j0,133 & 0,167 + j0,333 \end{bmatrix}.$$

Вследствие взаимозависимости величин, представленных в фазных координатах, в этом случае существенно усложняются расчеты несимметричных режимов.

Цель работы

Цель работы состоит в обосновании метода расчета режима распределительной сети при несимметричной нагрузке, в основу которого положено использование ортогональной системы координат.

Обоснование результатов

Новый подход к анализу несимметричных режимов основан на использовании переменных, представленных в $\alpha\beta 0$ -координатах. В любой точке электрической сети напряжения и токи характеризуются ортогональными составляющими, соответственно:

$$U_p = \begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \\ \dot{U}'_0 \end{bmatrix}, \quad I_p = \begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \\ \dot{I}'_0 \end{bmatrix}.$$

Переход от ортогональных составляющих к фазным координатам осуществляется с использованием матрицы p :

$$U = pU_p, \quad I = pI_p. \quad (5)$$

Переход от фазных координат к симметричным составляющим осуществляется с использованием обратной матрицы p^{-1} по формулам

$$U_p = p^{-1}U, \quad I_p = p^{-1}I, \quad (6)$$

где

$$p = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & 0 & \sqrt{\frac{1}{3}} \\ -\sqrt{\frac{1}{6}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{3}} \\ -\sqrt{\frac{1}{6}} & -\sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{3}} \end{bmatrix}; \quad p^{-1} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & -\sqrt{\frac{1}{6}} & -\sqrt{\frac{1}{6}} \\ 0 & \sqrt{\frac{1}{2}} & -\sqrt{\frac{1}{2}} \\ \sqrt{\frac{1}{3}} & \sqrt{\frac{1}{3}} & \sqrt{\frac{1}{3}} \end{bmatrix} = p^m. \quad (7)$$

Ортогональные составляющие напряжения в любой точке радиальной сети можно рассчитать по формуле

$$U_p = E_p - \underline{Z}_p \cdot J_p, \quad (8)$$

а фазные величины

$$U = E - p \cdot \underline{Z}_p \cdot J_p, \quad (9)$$

причем матрицу ортогональных сопротивлений определяют по формуле

$$\underline{Z}_p = p^m \underline{Z}_p. \quad (10)$$

Например, матрице

$$\underline{Z}_s = \begin{bmatrix} 0,1 + j0,2 & & \\ & 0,1 + j0,3 & \\ & & 0,2 + j0,6 \end{bmatrix}$$

соответствует матрица

$$\underline{Z}_p = \begin{bmatrix} 0,1 + j0,25 & 0,05 & 0 \\ -0,05 & 0,1 + j0,25 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 + j0,6 \end{bmatrix}.$$

В случае, если $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$, то

$$\underline{Z}_p = p^m \underline{Z}_p = \underline{Z}_s. \quad (11)$$

В таком случае использование ортогональных составляющих по сложности соответствует методу симметричных составляющих, при этом сохраняются все преимущества метода фазных координат.

Несимметричную нагрузку задают векторами комплексных мощностей фаз при их соединении в «звезду» или «треугольник», соответственно:

$$\underline{S}_Y = \begin{bmatrix} \underline{S}_A \\ \underline{S}_B \\ \underline{S}_C \end{bmatrix}, \quad \underline{S}_\Delta = \begin{bmatrix} \underline{S}_{AB} \\ \underline{S}_{BC} \\ \underline{S}_{CA} \end{bmatrix}$$

или диагональными матрицами

$$\underline{S}_{Y0} = \begin{bmatrix} \underline{S}_A & & \\ & \underline{S}_B & \\ & & \underline{S}_C \end{bmatrix}, \quad \underline{S}_{\Delta 0} = \begin{bmatrix} \underline{S}_{AB} & & \\ & \underline{S}_{BC} & \\ & & \underline{S}_{CA} \end{bmatrix}.$$

В случае соединения фаз в «звезду», вектор токов нагрузки [4]

$$J = \frac{\sqrt{3}}{U_n} \hat{\underline{S}}_{Y0} s_1. \quad (12)$$

В данном случае направление задающего тока выбрано по направлению нагрузки от узла. Для того чтобы токи всех фаз были ориентированы относительно вектора $\hat{U}_A$, выражение вектора тока умножено на вектор s_1 справа.

В системе симметричных составляющих

$$J_s = \frac{\sqrt{3}}{U_n} s^{-1} \hat{\underline{S}}_{Y0} s_1. \quad (13)$$

В случае соединения фаз нагрузки в «треугольник», вектор токов в линиях формируют с учетом фазовых сдвигов напряжений на фазах нагрузки

$$J = \frac{e^{j30^\circ}}{U_n} \begin{bmatrix} \hat{S}_{AB} - a\hat{S}_{CA} \\ a^2\hat{S}_{BC} - \hat{S}_{AB} \\ a\hat{S}_{CA} - a^2\hat{S}_{BC} \end{bmatrix},$$

а поэтому вектор фазных токов [4]

$$J = \frac{e^{j30^\circ}}{U_n} m \hat{\underline{S}}_{\Delta 0} s_1, \quad (14)$$

где $m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица перехода от фазных токов (мощностей) нагрузки,

включенных в «треугольник», к линейным. Вектор симметричных составляющих токов можно записать в таком виде

$$J_s = \frac{e^{j30^\circ}}{U_n} s^{-1} m \hat{\underline{S}}_{\Delta 0} s_1. \quad (15)$$

При включении в трехфазную сеть несимметричной нагрузки, соединенной в "звезду", вектор симметричных составляющих тока

$$J_s = \frac{\sqrt{3}}{U_n} s^{-1} \hat{\underline{S}}_{Y0} s_1 = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U_n} \begin{bmatrix} \hat{S}_A + \hat{S}_B + \hat{S}_C \\ \hat{S}_A + a\hat{S}_B + a^2\hat{S}_C \\ \hat{S}_A + a^2\hat{S}_B + a\hat{S}_C \end{bmatrix}. \quad (16)$$

При включении в трехфазную сеть несимметричной нагрузки, соединенной в "треугольник", вектор симметричных составляющих тока

$$J_s = \frac{e^{j30^\circ}}{U_n} s^{-1} m \hat{\underline{S}}_{\Delta 0} s_1 = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U_n} \begin{bmatrix} \hat{S}_{AB} + \hat{S}_{BC} + \hat{S}_{CA} \\ e^{j60^\circ} \hat{S}_{AB} - \hat{S}_{BC} + e^{-j60^\circ} \hat{S}_{CA} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Учитывая, что произведение матриц

$$p^m \cdot s = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} & \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 \\ -j\sqrt{\frac{3}{2}} & j\sqrt{\frac{3}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

вектор ортогональных составляющих тока при включении в трехфазную сеть несимметричной нагрузки, соединенного в "звезду":

$$J_p = \frac{\sqrt{3}}{U_n} p^m \hat{s}_{Y0} s_I = \frac{I}{U_n} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{I}{2}} (2\hat{s}_A + e^{j60^\circ} \hat{s}_B + e^{-j60^\circ} \hat{s}_C) \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot e^{-j90^\circ} (e^{-j30^\circ} \hat{s}_B + e^{j30^\circ} \hat{s}_C) \\ (\hat{s}_A + e^{-j120^\circ} \hat{s}_B + e^{j120^\circ} \hat{s}_C) \end{bmatrix}. \quad (19)$$

При включении в трехфазную сеть несимметричной нагрузки, соединенной в "треугольник", вектор ортогональных составляющих тока

$$J_p = \frac{e^{j30^\circ}}{U_n} p^m m \hat{s}_{\Delta 0} s_I = \frac{I}{U_n} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} (e^{j30^\circ} \hat{s}_{AB} + e^{-j30^\circ} \hat{s}_{CA}) \\ \sqrt{\frac{I}{2}} \cdot e^{-j90^\circ} (e^{-j60^\circ} \hat{s}_{AB} + 2\hat{s}_{BC} + e^{j60^\circ} \hat{s}_{CA}) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Таким образом, задающие токи несимметричной нагрузки одинаково просто представить в системе ортогональных и симметричных координат, что является важной предпосылкой для анализа переходных и квазиустановившихся режимов электрических сетей при наличии узлов нагрузок с мощными синхронными и асинхронными машинами.

Выводы

Таким образом, предложен метод расчета режима распределительной сети несимметричной нагрузки, в основу которого положено использование ортогональной системы координат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. – К.: Наукова думка, 1992. – 240 с.
2. Перхач В. С. Розрахунок струмів короткого замикання та неповнофазних режимів електроенергетичних систем у фазних координатах методом контурних струмів / В. С. Перхач, М. С. Сегеда, Ю. О. Варецкий // Технічна електродинаміка. – 1993. – № 4. – С. 67 – 68.
3. Веприк Ю. Н. Методы моделирования режимов работы электрических систем с несимметрией и тенденции их развития / Ю. Н. Веприк // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2010. – № 1. – С. 48 – 61.
4. Солдаткина Л. А. Электрические сети и системы / Л. А. Солдаткина. – М.: Энергия, 1978. – 216 с.

Бурбело Михаил Иосифович – д. н. н., профессор кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента.

Мельничук Сергей Николаевич – аспирант кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента.

Кошкарда Виталий Александрович – аспирант кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента.

Винницкий национальный технический университет.