УДК 621.316.7

М. Й. Бурбело, д. т. н., проф.; С. М. Мельничук; В. О. Кошкалда

РОЗРАХУНОК РЕЖИМУ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ЗА НЕСИМЕТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

У статті обґрунтовано новий метод розрахунку режиму розподільної мережі за несиметричного навантаження, в основу якого покладено використання ортогональної системи координат.

Ключові слова: *несиметричне навантаження, ортогональна система координат, метод симетричних складників.*

Вступ

Із розвитком промисловості розширюється коло електричних споживачів, які негативно впливають на несиметрію напруг. Особливо це характерно для мереж, що забезпечують живлення потужних несиметричних споживачів, наприклад, тягових залізничних мереж із двофазним навантаженням, дугових сталеплавильних печей та інших, які є причиною виникнення несиметрії напруги. Істотною є несиметрія напруг у розподільних мережах 0,38 кВ. Причиною несиметрії є також неповнофазні режими, які виникають під час обриву проводів, незамикання контактів вимикача. Несиметрія напруги викликає зменшення надійності та ефективності роботи електрообладнання та електроприймачів [1].

Для аналізу несиметричних режимів використовують метод симетричних складників або метод фазних координат [2, 3]. У будь-якій точці електричної мережі напруги і струми характеризуються фазними значеннями, відповідно:

$$U=\begin{bmatrix}\dot U_A\\ \dot U_B\\ \dot U_C\end{bmatrix},\ I=\begin{bmatrix}\dot I_A\\ \dot I_B\\ \dot I_C\end{bmatrix}.$$

У системі симетричних координат ці ж напруги і струми будуть

$$U_s=\begin{bmatrix}\dot U_1\\ \dot U_2\\ \dot U_0\end{bmatrix},\ I_s=\begin{bmatrix}\dot I_1\\ \dot I_2\\ \dot I_0\end{bmatrix}.$$

Перехід від симетричних складових до фазних координат здійснюється з використанням матриці Фортеск'ю за формулами

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

Зворотний перехід від фазних координат до симетричних складників здійснюється з використанням оберненої матриці Фортеск'ю

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

Матриці переходу

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

Напругу в будь-якій точці радіальної мережі за несиметричного навантаження можна розрахувати за формулою

$$U_s = E_s - \underline{Z}_s J_s, \tag{1}$$

або

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

де $\underline{E}_s = \begin{bmatrix} \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 \\ \underline{E}_0 \end{bmatrix}$, $\underline{E} = \begin{bmatrix} \underline{E}_A \\ \underline{E}_B \\ \underline{E}_C \end{bmatrix}$, $\underline{Z}_s = \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 & & \\ & \underline{Z}_2 & \\ & & \underline{Z}_0 \end{bmatrix}$ – вектори симетричних складників та фазних ЕРС джерела та матриця симетричних складників опорів ЛЕП.

Для аналізу несиметричних режимів можна використовувати й метод фазних координат:

$$U = E - \underline{Z} \cdot J \tag{3}$$

При цьому матрицю фазних опорів ЛЕП визначають за формулою [4]

$$Z = sZ_s s^{-1}. \tag{4}$$

Наприклад, матриці

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

відповідає матриця

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

Унаслідок взаємозалежності величин, поданих у фазних координатах, у цьому випадку істотно ускладнюються розрахунки несиметричних режимів.

Мета роботи

Мета роботи полягає в обґрунтуванні методу розрахунку режиму розподільної мережі за несиметричного навантаження, в основу якого покладено використання ортогональної системи координат.

Обґрунтування результатів

Новий підхід до аналізу несиметричних режимів ґрунтується на використанні змінних, представлених в $\alpha\beta 0$-координатах. У будь-якій точці електричної мережі напруги і струми характеризуються ортогональними складниками, відповідно:

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

Перехід від ортогональних складників до фазних координат здійснюється з використанням матриці p:

$$U = pU_p,\quad I = pI_p. \tag{5}$$

Перехід від фазних координат до ортогональних складників здійснюється з використанням оберненої матриці p^{-1} за формулами

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

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

Ортогональні складники напруги в будь-якій точці радіальної мережі можна розрахувати за формулою

$$U_p = E_p - \underline{Z}_p \cdot J_p, \tag{8}$$

а фазні величини

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

причому матрицю ортогональних опорів визначають за формулою

$$Z_p = p^m Z p. \tag{10}$$

Наприклад, матриці

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

відповідає матриця

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

У разі, якщо $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$, то

$$Z_p = p^m Z p = Z_s. \tag{11}$$

У такому випадку використання ортогональних складників за складністю відповідає методу симетричних складників, при цьому зберігаються всі переваги методу фазних координат.

Несиметричне навантаження задають векторами комплексних потужностей фаз, у разі їх з’єднання в “зірку” або “трикутник”, відповідно:

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

або діагональними матрицями

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

У разі з’єднання фаз у “зірку”, вектор струмів навантаження [4]

$$J = \frac{\sqrt{3}}{U_н} \underline{\hat{S}}_{Yд} s_1 . \qquad (12)$$

У цьому випадку напрямок задавального струму вибрано за напрямком навантаження від вузла. Для того щоб струми всіх фаз були зорієнтовані відносно вектора $\dot{U}_A$, вираз вектора струму домножено на вектор s_1 справа.

У системі симетричних складників

$$J_s = \frac{\sqrt{3}}{U_н} s^{-1} \underline{\hat{S}}_{Yд} s_1 . \qquad (13)$$

У разі з'єднання фаз навантаження у "трикутник", вектор струмів у лініях формують з урахуванням фазових зсувів напруг на фазах навантаження

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

а тому вектор фазних струмів [4]

$$J = \frac{e^{j30^\circ}}{U_н} m \underline{\hat{S}}_{\Delta д} s_1 , \qquad (14)$$

де $m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$ – матриця переходу від фазних струмів (потужностей) навантаження, увімкненого у трикутник, до лінійних. Вектор симетричних складників струмів можна записати в такому вигляді

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

При ввімкненні у трифазну мережу несиметричного навантаження, з'єднаного в „зірку", вектор симетричних складників струму

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

При ввімкненні у трифазну мережу несиметричного навантаження, з'єднаного в „трикутник", вектор симетричних складників струму

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

Ураховуючи, що добуток матриць

$$p^m \cdot s = \begin{bmatrix} \sqrt{\dfrac{3}{2}} & \sqrt{\dfrac{3}{2}} & 0 \\ -j\sqrt{\dfrac{3}{2}} & j\sqrt{\dfrac{3}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix}, \tag{18}$$

вектор ортогональних складників струму при ввімкненні в трифазну мережу несиметричного навантаження, з’єднаного в „зірку”:

$$J_p = \frac{\sqrt{3}}{U_н} p^m \hat{\underline{S}}_{Yд} s_1 = \frac{1}{U_н} \begin{bmatrix} \sqrt{\dfrac{1}{2}}\left(2\hat{\underline{S}}_A + e^{j60^\circ}\hat{\underline{S}}_B + e^{-j60^\circ}\hat{\underline{S}}_C\right) \\ \sqrt{\dfrac{3}{2}} \cdot e^{-j90^\circ}\left(e^{-j30^\circ}\hat{\underline{S}}_B + e^{j30^\circ}\hat{\underline{S}}_C\right) \\ \left(\hat{\underline{S}}_A + e^{-j120^\circ}\hat{\underline{S}}_B + e^{j120^\circ}\hat{\underline{S}}_C\right) \end{bmatrix}. \tag{19}$$

При ввімкненні у трифазну мережу несиметричного навантаження, з’єднаного в „трикутник”, вектор ортогональних складників струму

$$J_p = \frac{e^{j30^\circ}}{U_н} p^m m \hat{\underline{S}}_{\Delta д} s_1 = \frac{1}{U_н} \begin{bmatrix} \sqrt{\dfrac{3}{2}}\left(e^{j30^\circ}\hat{\underline{S}}_{AB} + e^{-j30^\circ}\hat{\underline{S}}_{CA}\right) \\ \sqrt{\dfrac{1}{2}} \cdot e^{-j90^\circ}\left(e^{-j60^\circ}\hat{\underline{S}}_{AB} + 2\hat{\underline{S}}_{BC} + e^{j60^\circ}\hat{\underline{S}}_{CA}\right) \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{20}$$

Отже, задавальні струми несиметричного навантаження однаково просто представити в системі ортогональних і симетричних координат, що є важливою передумовою для аналізу перехідних та квазіусталених режимів електричних мереж за наявності вузлів навантажень із потужними синхронними та асинхронними машинами.

Висновки

Отже, запропоновано метод розрахунку режиму розподільної мережі за несиметричного навантаження, в основу якого покладено використання ортогональної системи координат.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. Варецький // 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 Михайло Йосипович – д. т. н., професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Мельничук Сергій Миколайович – аспірант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Кошкалда Віталій Олександрович – аспірант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.