ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ РЕАКТИВНОГО КОМПЕНСАТОРА ТРИФАЗНОЇ ТРИПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ

Артеменко М. Ю., д.т.н, професор
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
м. Київ, Україна

Несиметричне навантаження трифазних трипровідних систем живлення призводить до погіршення якості електроенергії, що проявляється у появі струмів зворотної послідовності та пульсації миттєвої потужності, які спричинюють додаткові втрати на активних опорах лінії електропередачі та несиметрію напруг живлення у вузлах загального підключення навантажень. Для врівноважування несиметричного стаціонарного лінійного навантаження ефективно застосовуються пасивні фільтри на реактивних елементах, розрахунок яких базується на двох підходах: усунення пульсуючої складової миттєвої потужності [1] та компенсація неактивних складових вхідних струмів [2, 3]. В [3] продемонстрована можливість формування активного струму трифазної системи живлення застосуванням реактивного компенсатора для конкретного виду несиметрії трифазного джерела. Отримаємо формули прямого розрахунку параметрів реактивного компенсатора для генерації неактивного струму Фрізе при довільній комбінації параметрів лінійного навантаження та несиметричного синусоїдного джерела та проілюструємо методику їх застосування.

Нехай лінійне стаціонарне навантаження характеризується комплексними провідностями

$$\bar{y}_{AB} = g_{AB} + jb^L_{AB};\bar{y}_{BC} = g_{BC} + jb^L_{BC};\bar{y}_{CA} = g_{CA} + jb^L_{CA}.$$

В [3] було показано, що закон Ома для вхідних векторів струму та напруги описується виразом в симетричних координатах

$$\tilde{\mathbf{i}} = \tilde{\mathbf{Y}}\tilde{\mathbf{u}} = \left(\begin{Vmatrix} g_+ & \dot{g} \\ \tilde{g} & g_+ \end{Vmatrix} + j \begin{Vmatrix} b^L_+ & \dot{b}_L \\ \tilde{b}_L & b^L_+ \end{Vmatrix} \right) \times \begin{Vmatrix} U_+ \\ \dot{U}_- \end{Vmatrix}, \tag{1}$$

де $g_+ + jb^L_+ = \bar{y}_{AB} + \bar{y}_{BC} + \bar{y}_{CA}; \dot{g} = -(\dot{a}g_{AB} + g_{BC} + \tilde{a}g_{CA}); \dot{b}_L = -(\dot{a}b^L_{AB} + b^L_{BC} + \tilde{a}b^L_{CA}).$

Подібні параметри реактивного компенсатора $b^R_+ = b^R_{AB} + b^R_{BC} + b^R_{CA};$ $\dot{b}_R = -(\dot{a}b^R_{AB} + b^R_{BC} + \tilde{a}b^R_{CA})$ для реалізації вектора струмів компенсації $\tilde{\mathbf{i}}_C = \begin{Vmatrix} I^C_+ & I^C_+ \end{Vmatrix}^\wedge$ визначаються матрично-векторним рівнянням [3]:

$$\begin{Vmatrix} b^R_+ \\ \dot{b}_R \end{Vmatrix} = \frac{j}{U^2_+ - U^2_-} \begin{Vmatrix} U_+ & -\dot{U}_- \\ -\tilde{U}_- & U_+ \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} \dot{I}^C_+ \\ -\tilde{I}^C_- \end{Vmatrix}. \tag{2}$$

Покажемо, що для вектора струмів компенсації у вигляді неактивного струму Фрізе

$$\tilde{\mathbf{i}}_C = \tilde{\mathbf{Y}}\tilde{\mathbf{u}} - \frac{P}{U_+^2 + U_-^2}\tilde{\mathbf{u}} \qquad (3)$$

параметр b_+^R завжди буде дійсним числом. Для цього знайдемо вираз для активної потужності навантаження

$$P = \mathrm{Re}(\tilde{\mathbf{i}}^\wedge \tilde{\mathbf{u}}^*) = \mathrm{Re}(\tilde{\mathbf{u}}^\wedge \tilde{\mathbf{Y}}^\wedge \tilde{\mathbf{u}}^*) = (g_+ + \Delta g)(U_+^2 + U_-^2),$$

де $\Delta g = 2U_+ \mathrm{Re}(\dot{g}\dot{U}_-)/(U_+^2 + U_-^2) = 2\,\mathrm{Re}(\dot{\delta}_-\dot{g})/(1+\delta_-^2)$, $\dot{\delta}_- = \dot{U}_-/U_+ = \delta_- e^{j\phi_-}$ — комплексний параметр несиметрії трифазного джерела та підставимо цей вираз у формулу (3) і далі в (2). Після перетворень матимемо

$$\begin{Vmatrix} b_+^R \\ \dot{b}_R \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} b_+^L \\ \dot{b}_L \end{Vmatrix} = \frac{j}{U_+^2 - U_-^2} \begin{Vmatrix} U_+ & -\dot{U}_- \\ -\tilde{U}_- & U_+ \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} U_+ & -\dot{U}_- \\ \tilde{U}_- & U_+ \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} -\Delta g \\ \dot{g} \end{Vmatrix} = \frac{1}{1-\delta_-^2} \begin{Vmatrix} -2\,\mathrm{Im}(\dot{\delta}_-\dot{g}) \\ j\left[2\tilde{\delta}_-\Delta g - (1+\delta_-^2)\dot{g}\right] \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} b_+ \\ \dot{b} \end{Vmatrix} \cdot \qquad (4)$$

Перші координати векторів з формули (4) є дійсними числами, що і доводить можливість реалізації реактивного компенсатора неактивного струму Фрізе при довільному сполученні параметрів лінійного навантаження та несиметричного джерела. Реактивні провідності компенсатора визначаються із системи рівнянь (4) у вигляді

$$b_{AB}^R = \frac{b_+ - 2\,\mathrm{Re}(\tilde{a}\dot{b})}{3} - b_{AB}^L; b_{BC}^R = \frac{b_+ - 2\,\mathrm{Re}(\dot{b})}{3} - b_{BC}^L; b_{CA}^R = \frac{b_+ - 2\,\mathrm{Re}(\dot{a}\dot{b})}{3} - b_{CA}^L. \qquad (5)$$

Розглянемо приклад параметричного синтезу реактивного компенсатора трипровідної системи з параметром несиметрії джерела $\dot{\delta}_- = 0.2j$ та лінійним навантаженням, що визначається комплексними провідностями

$$\overline{Y}_{AB} = G/(4+j3) = (0.16 - j0.12)G; \overline{Y}_{BC} = 0; \overline{Y}_{BC} = G/(1-j) = (0.5 + j0.5)G,$$

Визначаємо параметри матриці комплексних провідностей

$$g_+ = g_{AB} + g_{BC} + g_{CA} = (0.16 + 0.5)G = 0.66G; b_+^L = b_{AB}^L + b_{BC}^L + b_{CA}^L = (-0.12 + 0.5)G = 0.38G;$$

$$\dot{g} = -\left(\dot{a}g_{AB} + g_{BC} + \tilde{a}g_{CA}\right) = \left(0.33 + 0.294j\right)G; \dot{b}_L = -\left(\dot{a}b_{AB}^L + b_{BC}^L + \tilde{a}b_{CA}^L\right) = \left(0.19 + 0.537j\right)G.$$

Значення матриці комплексних провідностей відповідно до (1):

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \begin{Vmatrix} g_+ & \dot{g} \\ \tilde{g} & g_+ \end{Vmatrix} + j\begin{Vmatrix} b_+^L & \dot{b}_L \\ \tilde{b}_L & b_+^L \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 0.66 + 0.38j & -0.207 + 0.484j \\ 0.867 - 0.104j & 0.66 + 0.38j \end{Vmatrix} G.$$

Вектор струму навантаження

$$\tilde{\mathbf{i}} = \tilde{\mathbf{Y}}\tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{Y}}\begin{Vmatrix} 1 \\ 0.2j \end{Vmatrix} U_+ = \begin{Vmatrix} 0.563 + 0.339j \\ 0.791 + j0.028 \end{Vmatrix} U_+ G.$$

Визначаємо параметр $\Delta g = 2\,\mathrm{Re}(\dot{\delta}_-\dot{g})/(1+\delta_-^2) = -0.113G$ і знаходимо вектор активного струму Фрізе:

$$\tilde{\mathbf{i}}_A = \left(g_+ + \Delta g\right)\tilde{\mathbf{u}} = \begin{Vmatrix} 0.547 \\ 0.109j \end{Vmatrix} U_+ G.$$

Далі за (4) визначаємо параметри реактивного компенсатора:

$$\left\|\begin{matrix} b_+^R \\ \dot{b}_R \end{matrix}\right\| = \frac{1}{1-\delta_-^2}\left\|\begin{matrix} -2\operatorname{Im}\left(\dot{\delta}_-\dot{g}\right) \\ j\left[2\tilde{\delta}_-\Delta g-\left(1+\delta_-^2\right)\dot{g}\right] \end{matrix}\right\| - \left\|\begin{matrix} b_+^L \\ \dot{b}_L \end{matrix}\right\| = \left\|\begin{matrix} -0.137 \\ 0.272-0.358j \end{matrix}\right\| G - \left\|\begin{matrix} b_+^L \\ \dot{b}_L \end{matrix}\right\| = \left\|\begin{matrix} -0.517 \\ 0.082-0.895j \end{matrix}\right\| G$$

і формуємо матрицю провідностей з елементами реактивної компенсації:

$$\tilde{\mathbf{Y}}_R = \tilde{\mathbf{Y}} + j\left\|\begin{matrix} b_+^R & \dot{b}_R \\ \tilde{b}_R & b_+^R \end{matrix}\right\| = \left\|\begin{matrix} 0.66-0.137j & 0.688+0.566j \\ -0.028-0.022j & -0.66-0.137j \end{matrix}\right\| G.$$

Множення цієї матриці на вектор вхідної напруги дає вектор вхідного струму за наявності реактивного компенсатора

$$\tilde{\mathbf{i}}_{SR} = \tilde{\mathbf{Y}}_R\tilde{\mathbf{u}} = \left\|\begin{matrix} 0.547 \\ 0.109 \end{matrix}\right\| U_+G,$$

який повністю збігається з раніше визначеним вектором активного струму Фрізе $\tilde{\mathbf{i}}_A$, що свідчить про коректність розрахунку параметрів компенсатора. Реактивні провідності компенсатора розраховуються за (5):

$$b_{AB}^R = 0.371G; b_{BC}^R = -0.227G; b_{CA}^R = -0.662G.$$

Їм відповідають такі параметри реактивних елементів для G=1 См і $\omega = 100\pi$ рад/с: C_{AB}=1.18 мФ; L_{BC}=14.02 мГн; L_{CA}=4.81 мГн.

Перелік посилань

1. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. — Киев: Наукова думка, 1985. — 268 с.

2. Czarnecki L. Unbalanced Power in Four-Wire Systems and Its Reactive Compensation /L. Czarnecki, P. Haley // IEEE Trans. on Power Delivery. — 2015. — Vol.30. — No.1. — P. 53 — 63.

3. Sirotin Iu. A. Fryze’s compensator and Fortescue transformation // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). — 2011. — No.1. — P. 101 — 106.

Анотація

Доведена можливість компенсації неактивного струму Фрізе реактивними елементами при довільній комбінації параметрів лінійного навантаження та несиметричного синусоїдного джерела. Отримані формули для параметричного синтезу реактивного компенсатора трифазної трипровідної системи живлення.

Ключові слова: реактивний компенсатор, трифазна система живлення.

Аннотация

Доказана возможность компенсации неактивного тока Фризе реактивными элетами при произвольной комбинации параметров линейной нагрузки и несимметричного синусоидального источника. Получены формулы для параметрического синтеза реактивного компенсатора трехфазной трипроводной системы питания.

Ключевые слова: реактивный компенсатор, трехфазная система питания.

Abstract

The possibility of inactive Fryse’s current compensation by reactive elements for an arbitrary combination of linear load parameters and asymmetric sinusoidal source is proved. Formulas for the parametric synthesis of a reactive compensator of a three-phase three-wire power supply system are obtained.

Keywords: reactive compensator, three-phase three -wire power system.