ВРІВНОВАЖУВАННЯ НЕСИМЕТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ ЧОТИРИПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ

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

Несиметричне навантаження трифазних кіл призводить до погіршення якості електроенергії, яке проявляється в появі струмів оберненої та нульової послідовностей, пульсації миттєвої потужності, додаткових втратах, несиметрії напруг живлення [2–4]. Для врівноважування несиметричного лінійного стаціонарного навантаження ефективно застосовуються пасивні фільтри на реактивних елементах, розрахунок яких базується на двох підходах: компенсація неактивних складових вхідних струмів [3, 4] та усунення пульсуючої складової миттєвої потужності [2]. При несиметричних напругах перший підхід переважає другий за величиною коефіцієнта потужності, однак методика його застосування досконало розроблена лише для трипровідних систем живлення [3]. В даній роботі представлено нову методику розрахунку параметрів реактивного трифазного чотирипровідного компенсатора, при якій параметри елементів, з’єднані трикутником, розраховуються незалежно від елементів компенсатора, з’єднаних зіркою.

Розглянемо чотирипровідну систему живлення (рис.1), що складається з трифазного джерела напруги синусоїдної форми, лінійного несиметричного навантаження $\overline{y}_A, \overline{y}_B, \overline{y}_C$ та пасивного фільтра-компенсатора з параметрами реактивних провідностей $b_A, b_B, b_C, b_{AB}, b_{BC}, b_{CA}$. Знайдемо умови врівноваженості такого навантаження, тобто умови, яким мають задовольняти параметри реактивних провідностей для споживання від трифазного джерела активного струму за Fryze [1].

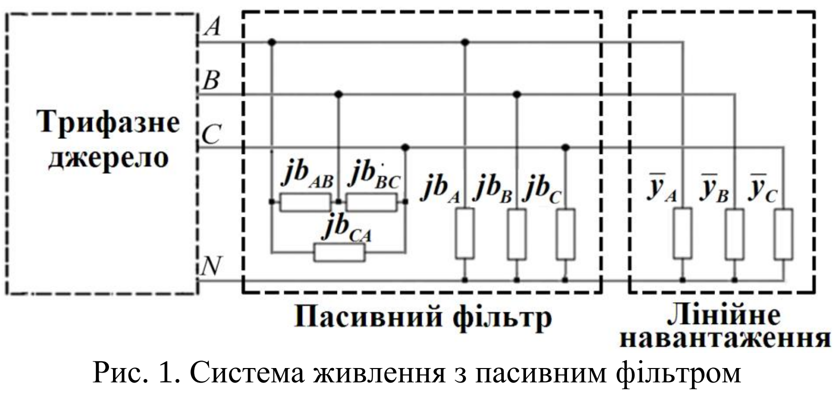

Рис. 1. Система живлення з пасивним фільтром

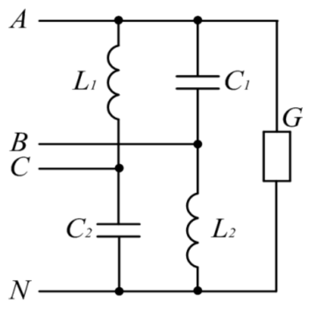

Рис. 2. Компенсатор однофазного навантаження

Вектор комплексних лінійних струмів, споживаних від симетричного трифазного джерела з діючим значенням фазної напруги *U*, має вигляд:

$$\bar{\mathbf{i}} = \begin{Vmatrix} \dot{U}_A(\bar{y}_A + jb_A) \\ \dot{U}_B(\bar{y}_B + jb_B) \\ \dot{U}_C(\bar{y}_C + jb_C) \end{Vmatrix} + j \begin{Vmatrix} \dot{U}_{AB}b_{AB} - \dot{U}_{CA}b_{CA} \\ \dot{U}_{BC}b_{BC} - \dot{U}_{AB}b_{AB} \\ \dot{U}_{CA}b_{CA} - \dot{U}_{BC}b_{BC} \end{Vmatrix} = U\left(\begin{Vmatrix} \bar{y}_A + jb_A \\ (\bar{y}_B + jb_B)\tilde{a} \\ (\bar{y}_C + jb_C)\dot{a} \end{Vmatrix} + \sqrt{3} \begin{Vmatrix} \dot{a}b_{AB} - \tilde{a}b_{CA} \\ b_{BC} - \dot{a}b_{AB} \\ b_{CA}\tilde{a} - b_{BC} \end{Vmatrix} \right) . \quad (1)$$

де $\dot{a} = e^{j2\pi/3}; \tilde{a} = e^{-j2\pi/3}$.

Комплексний вектор активного струму навантаження

$$\bar{\mathbf{i}}_P = \frac{P}{\bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{u}}^*}\bar{\mathbf{u}} = \frac{\mathrm{Re}(\bar{y}_A U_A^2 + \bar{y}_B U_B^2 + \bar{y}_C U_C^2)}{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}\bar{\mathbf{u}} = U\,\frac{\mathrm{Re}(\bar{y}_A + \bar{y}_B + \bar{y}_C)}{3} \begin{Vmatrix} 1 & \tilde{a} & \dot{a} \end{Vmatrix}^T, \quad (2)$$

де $^T, ^*$ – знаки транспонування та комплексного спряження відповідно.

Знайдемо комплексні вектори симетричних складових струмів (1) і (2), помноживши їх на модифіковану обернену матрицю Fortesque $\mathbf{F}^{-1} = \mathbf{F}^*$ [3]:

$$\underline{\mathbf{i}} = \mathbf{F}^{-1}\bar{\mathbf{i}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{Vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \tilde{a} \\ 1 & \tilde{a} & \dot{a} \end{Vmatrix} \bar{\mathbf{i}} = U \begin{Vmatrix} \bar{y}_+ + j\dot{b}_+ \\ \bar{y}_0 + jb_0 + \sqrt{3}(\dot{a} - \tilde{a})b_{20} \\ \bar{y}_- + j\dot{b}_- + \sqrt{3}(\dot{a} - 1)\dot{b}_{2-} \end{Vmatrix}; \underline{\mathbf{i}}_P = \mathbf{F}^{-1}\bar{\mathbf{i}}_P = U \begin{Vmatrix} 0 \\ \mathrm{Re}(\bar{y}_0) \\ 0 \end{Vmatrix};$$

$$\begin{Vmatrix} \bar{y}_0 & \bar{y}_+ & \bar{y}_- \end{Vmatrix}^T = \mathbf{F} \begin{Vmatrix} \bar{y}_A & \bar{y}_B & \bar{y}_C \end{Vmatrix}^T; \begin{Vmatrix} b_0 & \dot{b}_+ & \dot{b}_- \end{Vmatrix}^T = \mathbf{F} \begin{Vmatrix} b_A & b_B & b_C \end{Vmatrix}^T;$$

$$b_{20} = (b_{AB} + b_{BC} + b_{CA}) / \sqrt{3}; \dot{b}_{2-} = (b_{AB} + \dot{a}b_{BC} + \tilde{a}b_{CA}) / \sqrt{3}.$$

Прирівнюючи елементи векторів останнього виразу, отримаємо умови компенсації неактивних складових струмів трифазного джерела:

$$\begin{cases} \bar{y}_+ + j\dot{b}_+ = 0; \\ \mathrm{Im}(\bar{y}_0) + b_0 = 0; \\ \bar{y}_- + j\dot{b}_- + \sqrt{3}(\dot{a} - 1)\dot{b}_{2-} = 0; \\ b_{20} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

З першого рівняння (3) випливає, що $\dot{b}_+ = j\bar{y}_+; \dot{b}_- = (\dot{b}_+)^* = -j\tilde{y}_+$, а параметри елементів компенсатора, з'єднаних зіркою, :

$$\begin{Vmatrix} b_A \\ b_B \\ b_C \end{Vmatrix} = \mathbf{F} \begin{Vmatrix} -\mathrm{Im}(\bar{y}_0) \\ j\bar{y}_+ \\ -j\tilde{y}_+ \end{Vmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{Vmatrix} -\mathrm{Im}(\bar{y}_0) - 2\,\mathrm{Im}(\bar{y}_+) \\ -\mathrm{Im}(\bar{y}_0) - \sqrt{3}\,\mathrm{Re}(\bar{y}_+) + \mathrm{Im}(\bar{y}_+) \\ -\mathrm{Im}(\bar{y}_0) + \sqrt{3}\,\mathrm{Re}(\bar{y}_+) + \mathrm{Im}(\bar{y}_+) \end{Vmatrix}.$$

Отримані вирази повністю збігаються з результатами роботи [4]. З третього рівняння (3) знайдемо $\dot{b}_{2-} = 2e^{j30^\circ}[\mathrm{Re}(\bar{y}_A) + \dot{a}\,\mathrm{Re}(\bar{y}_B) + \tilde{a}\,\mathrm{Re}(\bar{y}_C)] / 3\sqrt{3}$; $\dot{b}_{2+} = (\dot{b}_{2-})^* = \tilde{b}_{2-}$ та визначимо реактивні провідності частини компенсатора, з'єднаного трикутником:

$$\begin{Vmatrix} b_{AB} \\ b_{BC} \\ b_{CA} \end{Vmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{Vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \tilde{a} \\ 1 & \tilde{a} & \dot{a} \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} 0 \\ \tilde{b}_{2-} \\ \dot{b}_{2-} \end{Vmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{Vmatrix} \dot{b}_{2-} + \tilde{b}_{2-} \\ \tilde{a}\dot{b}_{2-} + \dot{a}\tilde{b}_{2-} \\ \dot{a}\dot{b}_{2-} + \tilde{a}\tilde{b}_{2-} \end{Vmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{Vmatrix} \mathrm{Re}(\dot{b}_{2-}) \\ \mathrm{Re}(\tilde{a}\dot{b}_{2-}) \\ \mathrm{Re}(\dot{a}\dot{b}_{2-}) \end{Vmatrix}. \quad (4)$$

Формула (4) дозволяє, на відміну від [4], розраховувати параметри компенсатора, з'єднаного трикутником, незалежно від розрахунку елементів компенсатора, з'єднаного зіркою. Наприклад, для компенсації несиметричного навантаження $\overline{y}_A = G; \overline{y}_B = \overline{y}_C = 0$ за формулами (4), (3)

$$\begin{Vmatrix} b_{AB} \\ b_{BC} \\ b_{CA} \end{Vmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{Vmatrix} \mathrm{Re}(\overline{b}_{2-}) \\ \mathrm{Re}(\tilde{a}\overline{b}_{2-}) \\ \mathrm{Re}(\dot{a}\overline{b}_{2-}) \end{Vmatrix} = \frac{2G}{3\sqrt{3}} \begin{Vmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{Vmatrix}; \begin{Vmatrix} b_{A} \\ b_{B} \\ b_{C} \end{Vmatrix} = \frac{G}{\sqrt{3}} \begin{Vmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{Vmatrix}.$$

Схема компенсатора (рис. 2, де $b_{L1} = b_{C1} = 2G/3\sqrt{3}; b_{L2} = b_{C2} = G/\sqrt{3}$) є аналогом схеми Штейнметца [3] симетризації однофазного навантаження в трифазній чотирипровідноій системі живлення.

Перелік посилань

1. Fryze S. Active, reactive and apparent power in circuits with non-sinusoidal voltage and current / Fryze S. // Przegląd Elektrotechniczny. — 1931. — № 7 – 8. — P. 193 – 203.

2. Милях А. Н. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях. / Милях А. Н., Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. — К.: Наукова думка, 1973. — 218 с.

3. Сиротин Ю. А. Схема симметризации Штейнметца как частный случай компенсатора Фризе / Сиротин Ю. А. // Электрика. — 2011. — № 1. — С. 16 – 21.

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

Анотація

Запропоновано нову методику розрахунку параметрів реактивного трифазного чотирипровідного компенсатора, при якій параметри елементів, з’єднані трикутником, розраховуються незалежно від елементів компенсатора, з’єднаних зіркою.

Ключові слова: реактивний компенсатор, трифазна система живлення.

Аннотация

Предложена новая методика расчета параметров реактивного трехфазного четырехпроводного компенсатора, при которой параметры элементов, соединенные треугольником, рассчитываются независимо от элементов, соединенных звездой.

Ключевые слова: реактивный компенсатор, трехфазная система питания.

Abstract

New method for determination of reactive compensator elements parameters with a delta connection has been proposed that allows to calculate them regardless of the compensator elements calculation with a star connection.

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