

Методика розрахунку реактивного компенсатора лінійного несиметричного навантаження трифазної трипровідної мережі

Хвіст А. М.

e-mail annhzakr22@gmail.com

Факультет електроніки fel.kpi.ua

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

Анотація—В статті сформульована методика розрахунку параметрів реактивного компенсатора лінійного несиметричного навантаження трифазної трипровідної мережі, що дозволяє збільшити коефіцієнт потужності несиметричного навантаження до одиничного значення. Показано, що в результаті застосування реактивного компенсатора потужність втрат в лінії передачі може бути зменшена до двох разів. У результаті виконаної роботи встановлено:

1) Збільшення коефіцієнта потужності трифазної системи до максимального одиничного значення веде до виграшу за потужністю втрат.

2) Втрати на проводах несиметричної системи в 2 рази більші за втрати симетричної системи, а коефіцієнт потужності несиметричної системи в $\sqrt{2}$ менший за коефіцієнт симетричної.

Бібл. 3, рис. 8.

Ключові слова— реактивний компенсатор; коефіцієнт потужності; трифазна трипровідна мережа.

I. ВСТУП

У сучасних умовах актуальним є забезпечення якості електричної енергії для промислових підприємств і мереж з потужним навантаженням. Несиметричне навантаження трифазних трипровідних систем живлення призводить до погіршення якості електроенергії, що проявляється у появі струмів зворотної послідовності та пульсації миттєвої потужності, які спричиняють 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. Разом з тим в явному вигляді відсутня методика розрахунку параметрів реактивного компенсатора та не оцінений ефект від його застосування.

Метою даної роботи є розроблення методики розрахунку реактивного компенсатора для лінійного несиметричного навантаження трифазної трипровідної мережі.

II. ВИВЕДЕННЯ ОСНОВНОГО СПІВВІДНОШЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ РЕАКТИВНОГО КОМПЕНСАТОРА

Синусоїдний процес трифазної трипровідної мережі в перерізі А, В, С (рис.1) повністю задається трикоординатними векторами миттєвих значень фазних напруг та лінійних струмів [1].

$$\mathbf{u}(t) = \begin{pmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{pmatrix} = \sqrt{2} \begin{pmatrix} U_A \cos(\omega t + \varphi_A) \\ U_B \cos(\omega t + \varphi_B) \\ U_C \cos(\omega t + \varphi_C) \end{pmatrix} = \frac{\bar{\mathbf{u}} e^{j\omega t} + \bar{\mathbf{u}}^* e^{-j\omega t}}{\sqrt{2}};$$

$$\mathbf{i}(t) = \begin{pmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{pmatrix} = \sqrt{2} \begin{pmatrix} I_A \cos(\omega t + \psi_A) \\ I_B \cos(\omega t + \psi_B) \\ I_C \cos(\omega t + \psi_C) \end{pmatrix} = \frac{\bar{\mathbf{i}} e^{j\omega t} + \bar{\mathbf{i}}^* e^{-j\omega t}}{\sqrt{2}},$$

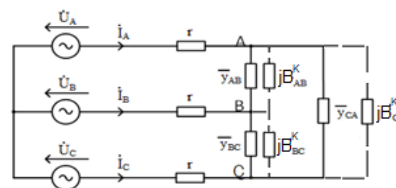


Рис. 1 Комплексна схема заміщення трифазної трипровідної мережі з лінійним навантаженням

де $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – циклічна частота; * – знак комплексного спряження; $U_A, U_B, U_C; I_A, I_B, I_C$ – діючі значення, $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C; \psi_A, \psi_B, \psi_C$ – відповідні початкові фази гармонічно змінюваних фазних напруг та лінійних струмів фаз A, B, C , яким відповідають тривимірні комплексні вектори діючих значень

$$\bar{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} U_A e^{j\varphi_A} \\ U_B e^{j\varphi_B} \\ U_C e^{j\varphi_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix}; \bar{\mathbf{i}} = \begin{bmatrix} I_A e^{j\psi_A} \\ I_B e^{j\psi_B} \\ I_C e^{j\psi_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}.$$

Повна потужність такого трифазного кола розраховується за формулою Бухгольца [1]

$$S = \sqrt{(\bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{u}}^*)(\bar{\mathbf{i}}^T \bar{\mathbf{i}}^*)},$$

де T -знак транспонування, причому має місце наступне її квадратичне розкладання

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2,$$

де $P = \text{Re}(\bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{i}}^*)$ – активна потужність;

$Q = \text{Im}(\bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{i}}^*)$ – реактивна потужність; $D = \sqrt{\bar{\mathbf{d}}^T \bar{\mathbf{d}}^*}$ – потужність небалансу; $\bar{\mathbf{d}}^T = \bar{\mathbf{i}} \times \bar{\mathbf{u}}$ – векторна комплексна потужність, зумовлена комплексною непропорційністю координат векторів $\bar{\mathbf{u}}$ та $\bar{\mathbf{i}}$.

У синусоїдному режимі додаткові втрати потужності на опорах г лінійних проводів трифазної системи обумовлені не тільки реактивною потужністю, а й потужністю небалансу, що визначається векторною комплексною потужністю.

Коефіцієнт потужності при цьому дорівнює

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}. \quad (1)$$

В роботі [2] показано, що потужність втрат пропорційна квадрату повної потужності, а їх мінімально можлива величина пропорційна квадрату активної потужності. Збільшення коефіцієнта потужності трифазної системи до максимального одиничного значення веде до виграшу за потужністю втрат, що характеризується коефіцієнтом

$$w = \frac{S^2}{P^2} = \lambda^{-2}. \quad (2)$$

Для симетричних напруг синусоїдного джерела

$$\bar{\mathbf{u}} = U \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{a} \\ \tilde{a}^2 \end{bmatrix}, \tilde{a} = e^{j2\pi/3}, \tilde{a}^2 = e^{-j2\pi/3}$$

та лінійного навантаження, що задається комплексними провідностями

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{AB} &= G_{AB} + jB_{AB}; \\ \bar{Y}_{BC} &= G_{BC} + jB_{BC}; \\ \bar{Y}_{CA} &= G_{CA} + jB_{CA} \end{aligned}$$

коефіцієнт потужності визначається співвідношенням (3) [2]

$$\lambda = \frac{\text{Re}(\bar{y}_0)}{\sqrt{y_-^2 + y_0^2}}, \quad (3)$$

де $\bar{y}_- = \bar{Y}_{AB} + \tilde{a}\bar{Y}_{BC} + \tilde{a}^2\bar{Y}_{CA}; \bar{y}_0 = \bar{Y}_{AB} + \bar{Y}_{BC} + \bar{Y}_{CA}$.

Умовами досягнення одиничного значення коефіцієнта потужності за формулою (2) є наступні рівності

$$\text{Im}(\bar{y}_0) = 0; \bar{y}_- = 0,$$

з яких випливають вирази для реактивних провідностей фаз навантаження

$$\begin{aligned} B_{AB} &= (G_{CA} - G_{BC}) / \sqrt{3}; \\ B_{BC} &= (G_{AB} - G_{CA}) / \sqrt{3}; \\ B_{CA} &= (G_{BC} - G_{AB}) / \sqrt{3}, \end{aligned} \quad (4)$$

що повністю еквівалентні представленим в [3].

Якщо параметри навантаження не відповідають представленим в (3), вводять реактивний компенсатор, що складається з елементів показаних пунктиром на рис.1, провідності яких розраховують за формулами

$$\begin{aligned} B_{AB}^K &= -B_{AB} + (G_{CA} - G_{BC}) / \sqrt{3}; \\ B_{BC}^K &= -B_{BC} + (G_{AB} - G_{CA}) / \sqrt{3}; \\ B_{CA}^K &= -B_{CA} + (G_{BC} - G_{AB}) / \sqrt{3}. \end{aligned} \quad (5)$$

III. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ РЕАКТИВНОГО КОМПЕНСАТОРА ЛІНІЙНОГО НЕСИМЕТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ ТРИПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ

Проілюструємо її на прикладі схеми з несиметричним одноплечевим активним навантаженням (рис.2).

Представляємо лінійне навантаження комплексними провідностями:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{AB} &= G_{AB} + jB_{AB} = G; \\ \bar{Y}_{BC} &= G_{BC} + jB_{BC} = 0; \\ \bar{Y}_{CA} &= G_{CA} + jB_{CA} = 0. \end{aligned}$$

Звідси визначаємо:

$$\begin{aligned} G_{AB} &= G; G_{BC} = G_{CA} = 0; \\ B_{AB} &= B_{BC} = B_{CA} = 0. \end{aligned}$$

За формулою (5) розраховуємо реактивні провідності компенсатора.

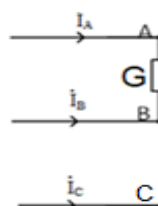


Рис.2 Схема несиметричного навантаження

$$B_{AB}^K = -B_{AB} + (G_{CA} - G_{BC}) / \sqrt{3} = 0;$$

$$B_{BC}^K = -B_{BC} + (G_{AB} - G_{CA}) / \sqrt{3} = \frac{G}{\sqrt{3}};$$

$$B_{CA}^K = -B_{CA} + (G_{BC} - G_{AB}) / \sqrt{3} = -\frac{G}{\sqrt{3}}.$$

Розраховуємо параметри реактивних елементів компенсатора.

Для додатних значень реактивних провідностей з п.1.2 визначають ємності конденсаторів

$$C_K = \frac{B_{K+}}{2\pi f}.$$

Для від'ємних значень провідностей з п.1.2 визначаємо індуктивності котушок

$$L_K = \frac{1}{2\pi f B_{K-}}.$$

Задаємо $G = 1 \text{ См}$, $f = 50 \text{ Гц}$ та визначаємо

$$C_K = \frac{B_{BC}^K}{2\pi f} = \frac{G}{2\sqrt{3}\pi f} = 1837,7 (\text{мкФ}),$$

$$L_K = \frac{1}{2\pi f B_{CA}^K} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi f G} = 54,4 (\text{мГн}).$$

Розраховуємо комплексні провідності

$$\bar{y}_- = \bar{y}_{AB} + a\bar{y}_{BC} + a^2\bar{y}_{CA} = G;$$

$$\bar{y}_0 = \bar{y}_{AB} + \bar{y}_{BC} + \bar{y}_{CA} = G;$$

Коефіцієнт потужності навантаження без компенсатора за формулою (2)

$$\lambda = \frac{\text{Re}(\bar{y}_0)}{\sqrt{y_-^2 + y_0^2}} = \frac{G}{\sqrt{G^2 + G^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Визначаємо коефіцієнт виграшу за потужністю втрат

$$w = \frac{S^2}{P^2} = \lambda^{-2} = 2.$$

Будуємо схему (рис.3) несиметричного навантаження з реактивним компенсатором, яка відповідає відомій схемі симетризатора-компенсатора Штейнметца [3]

Розраховуємо лінійні струни схеми без компенсатора та будуємо векторну діаграму (рис.4)

$$I_A = -I_B = I_{AB} = \sqrt{3}UGe^{j30^\circ}.$$

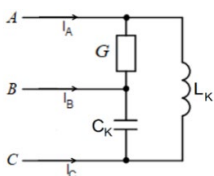


Рис.3 Симетризатор — компенсатор Штейнметца

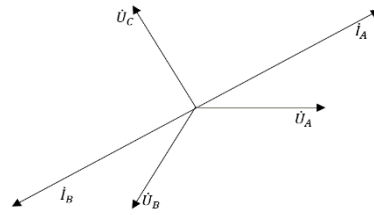


Рис.4 Векторна діаграма несиметричної системи

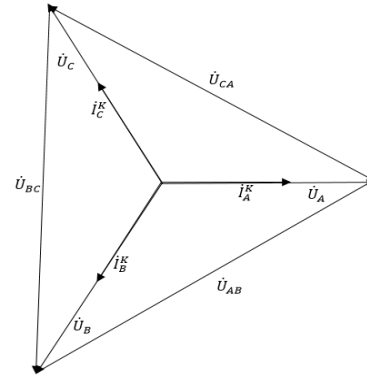


Рис.5 Векторна діаграма симетричної системи

Розраховуємо струми схеми з компенсатором та будуємо векторну діаграму (рис.5)

$$I_A^K = U_{AB} G - U_{CA} \left(-\frac{jG}{\sqrt{3}}\right) = UG;$$

$$I_B^K = U_{BC} \frac{jG}{\sqrt{3}} - U_{AB} G = UG\tilde{a};$$

$$I_C^K = U_{CA} \left(-\frac{jG}{\sqrt{3}}\right) - U_{BC} \frac{jG}{\sqrt{3}} = UG\tilde{a}^2;$$

Перевіряємо значення коефіцієнта виграшу за потужністю втрат

$$w = \frac{P_{nc}}{P_c} = \frac{I_A^2 + I_B^2}{(I_A^K)^2 + (I_B^K)^2 + (I_C^K)^2} = \frac{(UG)^2 \left(\frac{9}{2} + \frac{3}{2}\right)}{3(UG)^2} = 2.$$

Синтезуємо реактивний компенсатор схеми з несиметричним двоплечевим активним навантаженням (рис.6)

З опису комплексних провідностей встановлюємо, що

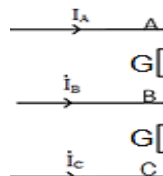


Рис.6 Схема несиметричного двоплечевого навантаження



$$G_{AB} = G; G_{BC} = G; G_{CA} = 0;$$

$$B_{AB} = B_{BC} = B_{CA} = 0.$$

За формулою (5) розраховуємо реактивні провідності компенсатора

$$B_{AB}^K = -B_{AB} + (G_{CA} - G_{BC}) / \sqrt{3} = -\frac{G}{\sqrt{3}};$$

$$B_{BC}^K = -B_{BC} + (G_{AB} - G_{CA}) / \sqrt{3} = \frac{G}{\sqrt{3}};$$

$$B_{CA}^K = -B_{CA} + (G_{BC} - G_{AB}) / \sqrt{3} = 0.$$

Оскільки отримані значення збігаються з попереднім прикладом, то для $G = 1 \text{ См}$, $f = 50 \text{ Гц}$

$$C_K = 1837,7 (\text{мкФ});$$

$$L_K = 54,4 (\text{мГн}).$$

Розраховуємо комплексні провідності

$$\bar{y}_- = G + \dot{a}G = G \left(\frac{1}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2} \right);$$

$$\bar{y}_0 = \bar{y}_{AB} + \bar{y}_{BC} + \bar{y}_{CA} = 2G.$$

Визначаємо коефіцієнт потужності навантаження без компенсатора за формулою (2).

$$\lambda = \frac{2G}{\sqrt{4G^2 + G^2}} = \frac{2}{\sqrt{5}}.$$

Визначаємо коефіцієнт виграшу за потужністю втрат

$$w = \frac{S^2}{P^2} = \lambda^{-2} = \frac{5}{4}.$$

Будуємо схему несиметричного навантаженням реактивним компенсатором (рис.7).

Розраховуємо лінійні струми схеми без компенсатора та будуємо векторну діаграму (рис.8).

$$\dot{I}_A = \dot{U}_{AB} G = \sqrt{3} U G e^{j30^\circ};$$

$$\dot{I}_B = 3UG\tilde{a};$$

$$\dot{I}_C = -\dot{U}_{BC} G = j\sqrt{3}UG$$

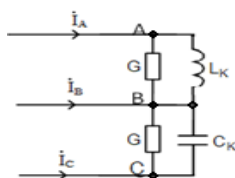


Рис.7 Схема несиметричного навантаження з компенсатором

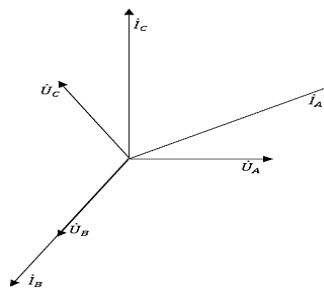


Рис.8 Векторна діаграма несиметричної системи

Розраховуємо лінійні струми схеми з компенсатором

$$\dot{I}_A^K = \dot{U}_{AB} \left(G - \frac{jG}{\sqrt{3}} \right) = 2UG;$$

$$\dot{I}_C^K = -\dot{U}_{BC} \left(G + \frac{jG}{\sqrt{3}} \right) = 2UG\tilde{a};$$

$$\dot{I}_B^K = -\dot{I}_A^K - \dot{I}_C^K = 2UG\tilde{a}.$$

Векторна діаграма струмів відповідає рис.5.

Перевіряємо значення коефіцієнта виграшу за потужністю втрат

$$w = \frac{P_{HC}}{P_c} = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A^K)^2 + (I_B^K)^2 + (I_C^K)^2} =$$

$$= \frac{(UG)^2(3+9+3)}{(UG)^2(4+4+4)} = \frac{5}{4}.$$

ВИСНОВКИ

1) Сформульована методика розрахунку параметрів реактивного компенсатора лінійного несиметричного навантаження трифазної трипровідної мережі, що дозволяє збільшити коефіцієнт потужності несиметричного навантаження до одиничного значення.

2) Показано, що в результаті застосування реактивного компенсатора потужність втрат в лінії передачі може бути зменшена до двох разів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Sirotn Yu.A., "Energeticheskie rezhimy trehfaznoy trehprovodnoy tsepi [Power modes of a three-phase three-wire network]," *Energetika: nadiynist ta energoefektivnist*, Kharkiv, 2013, p.128-141.
- [2] M. Yu. Artemenko., R. Yu. Kostyuk, "Koeffitsient potuzhnosti ta koeffitsient korisnoini diyi trifaznih sistem zhivlennya pri liniynomu nesimetrichnomu navantazheni [Power factor and efficiency factor of three-phase power systems with linear asymmetric load]," Kyiv, 2015, p.17 – 23.
- [3] Zbigniew Hanzelka, "Power Quality.Mitigation of voltage unbalance. Guide for electrical design engineers", 2007, p. 8 – 11.

Надійшла до редакції 10 квітня 2019 р.

Методика расчета реактивного компенсатора линейной несимметричной нагрузки трехфазной трехпроводной сети

Хвист А. Н.

e-mail annhzakr22@gmail.com

Факультет электроники fel.kpi.ua

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Аннотация—В статье сформулирована методика расчета параметров реактивного компенсатора линейной несимметричной нагрузки трехфазной трехпроводной сети, что позволяет увеличить коэффициент мощности несимметричной нагрузки до единичного значения. Показано, что в результате применения реактивного компенсатора мощность потерь в линии передачи может быть уменьшена до двух раз. В результате проделанной работы установлено:

1) Увеличение коэффициента мощности трехфазной системы до максимального единичного значения ведет к выигрышу по мощности потерь.

2) Потери на проводах несимметричной системы в 2 раза больше потери симметричной системы, а коэффициент мощности несимметричной системы в $\sqrt{2}$ меньше коэффициент симметричной.

Библ. 3, рис. 8.

Ключевые слова — реактивный компенсатор; коэффициент мощности; трехфазная трехпроводная сеть.



Methodology for Calculating the Parameters of a Reactive Compensator of a Linear Asymmetric Load of a Three-Phase Three-Wire Network

A. M. Khvist

e-mail annhzakr22@gmail.com

Faculty of electronics fel.kpi.ua

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" kpi.ua
Kyiv, Ukraine

Abstract—The article describes the method of calculating the parameters of a reactive compensator of a linear asymmetric load of a three-phase three-wire network, which allows to increase the power factor of an asymmetric load to a unit value. It is shown that as a result of the use of a reactive compensator, the power loss in the transmission line can be reduced to two times. In this paper the main equation for the calculation of the parameters of the reactive compensator is derived. The reactive compensator of the circuit with asymmetrical two-arm active load is synthesized. The method is illustrated by an example of a scheme with asymmetric single-cell active load. As known, the unbalanced load of three-phase three-wire power systems leads to a deterioration in the quality of electricity, which manifests itself in the emergence of reciprocal currents and pulsations of instantaneous power, which cause additional losses on the active supports of the transmission line and asymmetry of supply voltages in the nodes of the overall connection of loads. In order to balance the asymmetric stationary linear load, passive filters on reactive elements are effectively used, the calculation of which is based on two approaches: the removal of the pulsating component of instantaneous power and the compensation of the inactive components of the input currents. Among various possible methods, the inductive-capacitive systems are of particular importance. When the limit values of unbalance factor, specified in standards are exceeded, the use of symmetrization systems is required. A symmetrizer should not cause significant active power losses during operation; it implies that the symmetrization process shall be carried out by means of reactive elements (LC) or using active methods (power electronic systems). The purpose of a compensator is to measure adequate electric quantities of the load and generate in the compensator such currents, that the resultant load: compensator-compensated load, as seen from the supply network, was symmetrical, and the fundamental harmonic reactive current drawn from the network did not exceed the value permitted in the supply conditions. In the work vector diagrams of currents and voltages are constructed, power loss is calculated.

As a result of the work done, it was established:

- 1) Increasing the power factor of the three-phase system to the maximum unit value leads to a gain in power loss.
- 2) Losses in the wires unbalanced system in 2 times more loss symmetric system, and power factor for unbalanced system in less than a coefficient symmetrical.

Ref. 3, fig. 8.

Keywords — reactive compensator; power factor; three-phase three-wire network.

