

АНАЛІЗ УМОВ СИМЕТРУВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЕНСАЦІЙНИХ СИМЕТРУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

Розгляд проблеми

В несиметричних режимах трифазні електричні системи характеризуються комплексними повною та пульсуючою потужностями [1–3]:

$$\underline{S} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_0 = 3 \left(\dot{U}_1^* I_1 + \dot{U}_2^* I_2 + \dot{U}_0^* I_0 \right);$$

$$\underline{N} = \underline{N}_1 + \underline{N}_2 + \underline{N}_0 = 3(\dot{U}_2 I_1 + \dot{U}_1 I_2 + \dot{U}_0 I_0),$$

де $\dot{U}_2, \dot{U}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ – комплексні напруги та струми, відповідно, прямої, зворотної та нульової послідовностей; $\dot{I}_1^*, \dot{I}_2^*, \dot{I}_0^*$ – комплексні спряжені струми відповідних послідовностей.

Комплексна повна потужність \underline{S} відображає споживання електричної енергії, а комплексна пульсуюча потужність \underline{N} інтегрально характеризує несиметрію та незрівноваженість трифазної системи.

У зрівноважених системах, коли відсутні напруга та струм нульової послідовності, комплексні повна та пульсуюча потужності будуть такими:

$$\underline{S} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 = 3 \left(\dot{U}_1^* I_1 + \dot{U}_2^* I_2 \right) = 1,5 \left(\dot{U}_\alpha^* I_\alpha + \dot{U}_\beta^* I_\beta \right);$$

$$\underline{N} = \underline{N}_1 + \underline{N}_2 = 3(\dot{U}_2 I_1 + \dot{U}_1 I_2) = 1,5(\dot{U}_\alpha I_\alpha + \dot{U}_\beta I_\beta),$$

де $\dot{U}_\alpha, \dot{U}_\beta$ і $\dot{I}_\alpha, \dot{I}_\beta$ – ортогональні складові трифазної напруги і струму в системі координат α, β :

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix}.$$

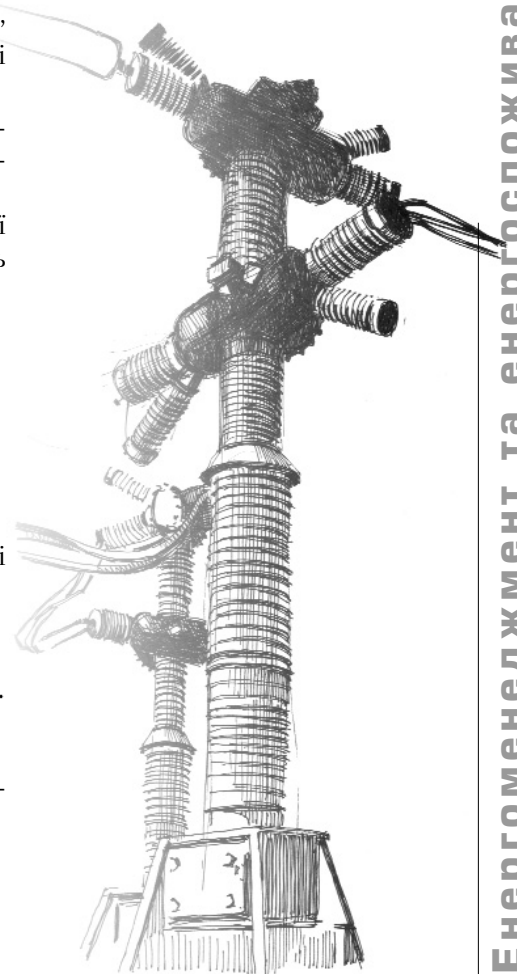
Пульсуючі потужності $\underline{N}_1, \underline{N}_2$ теж можна визначити через ортогональні складові трифазної напруги і струму в системі координат α, β :

$$\underline{N}_1 = 3\dot{U}_2 \dot{I}_1 = 0,75(\dot{U}_\alpha - j\dot{U}_\beta)(\dot{I}_\alpha + j\dot{I}_\beta);$$

$$\underline{N}_2 = 3\dot{U}_1 \dot{I}_2 = 0,75(\dot{U}_\alpha + j\dot{U}_\beta)(\dot{I}_\alpha - j\dot{I}_\beta).$$

М.Й. Бурбело, доктор техн. наук,
М.В. Кузьменко, аспірант

Вінницький національний технічний університет



Енергоменеджмент та енергоспоживання

Як інформативний параметр в компенсаційних симетрувальних установках (СУ) можна використовувати пульсуючу потужність \underline{N} . Однак при цьому процес симетрування навантажень має ітераційний характер.

Значно кращим є формування вектора керування на основі пульсуючої потужності зворотної послідовності \underline{N}_2 у такому вигляді:

$$b_{BC} = \frac{2 \operatorname{Im} \underline{N}_2}{3U^2}; b_{CA} = \frac{-\operatorname{Im} \underline{N}_2 - \sqrt{3} \operatorname{Re} \underline{N}_2}{3U^2}; b_{AB} = \frac{-\operatorname{Im} \underline{N}_2 + \sqrt{3} \operatorname{Re} \underline{N}_2}{3U^2}, \quad (1)$$

де b_{BC}, b_{CA}, b_{AB} – провідності секцій конденсаторних батарей, що забезпечують симетрування навантажень; U – діюче значення лінійної напруги мережі.

Недоліком застосування пульсуючої потужності зворотної послідовності \underline{N}_2 є складність вимірювання її складових $\operatorname{Re} \underline{N}_2, \operatorname{Im} \underline{N}_2$. Побудова вимірювальних каналів значно спрощується, якщо замість \underline{N}_2 використати потужність $\underline{S}_2^* = 3U_1^* \dot{I}_2$, яка є спряженою до комплексної умовної потужності зворотної послідовності: $\underline{S}'_2 = 3\dot{U}_1 \dot{I}_2$ [4].

Алгоритм (1) формування вектора провідностей секцій конденсаторних батарей при цьому зберігається. Його можна також подати через провідності зворотної послідовності навантаження:

$$b_{BC} = \frac{-2b_2}{3}; b_{CA} = \frac{b_2 - \sqrt{3}g_2}{3}; b_{AB} = \frac{b_2 + \sqrt{3}g_2}{3}, \quad (2)$$

де $g_2 = \operatorname{Re} \left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right)$, $b_2 = -\operatorname{Im} \left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right)$ – умовні провідності зворотної послідовності несиметричного навантаження.

Однак, як показують розрахунки, використання потужностей \underline{N}_2 і \underline{S}_2^* не забезпечує повного симетрування навантажень. Крім того, на точність симетрування впливають статичні характеристики навантаження (залежності активної та реактивної потужностей від напруги у вузлі електричної мережі).

Мета роботи

Метою цієї роботи є отримання умов керування компенсаційними СУ, які дозволять більш точно симетрувати навантаження за різних статичних характеристик активної та реактивної потужностей навантаження від напруги.

Обґрунтування результатів

Для досягнення поставленої мети пропонується в умови (1), (2) ввести коефіцієнт k_2 , який характеризує ступінь симетрування навантажень, а умовні провідності зворотної послідовності несиметричного навантаження замінити провідностями зворотної послідовності. Тоді умови (2) набудуть вигляду

$$b_{BC} = \frac{k_2(-2b_{21})}{3}; b_{CA} = \frac{k_2(b_{21} - \sqrt{3}g_{21})}{3}; b_{AB} = \frac{k_2(b_{21} + \sqrt{3}g_{21})}{3}, \quad (3)$$

де k_2 – коефіцієнт, що враховує статичні характеристики вузла навантаження ($k_2=1...1,1...$); g_{21}, b_{21} – активна та реактивна провідності зворотної послідовності несиметричного навантаження.

У разі симетрування навантажень за допомогою СУ з двома ємнісними елементами, прирівнявши до нуля провідність однієї з фаз, умови (3) можна записати в одному із виглядів [5]:

$$b_{BC} = 0; b_{CA} = k_2 \left(b_{21} - \frac{\sqrt{3}}{3} g_{21} \right); b_{AB} = k_2 \left(b_{21} + \frac{\sqrt{3}}{3} g_{21} \right), \quad (4)$$

$$b_{BC} = -k_2 \left(b_{21} - \frac{\sqrt{3}}{3} g_{21} \right); b_{CA} = 0; b_{AB} = \frac{2\sqrt{3}}{3} k_2 g_{21}, \quad (5)$$

$$b_{BC} = -k_2 \left(b_{21} + \frac{\sqrt{3}}{3} g_{21} \right); b_{CA} = -\frac{2\sqrt{3}}{3} k_2 g_{21}; b_{AB} = 0, \quad (6)$$

вибір яких залежить від того, в яку фазу конденсатори не вмикаються.

Обґрунтування базується на таких положеннях. Як відомо, зв'язок між струмами і напругами прямої та

зворотної послідовностей у вузлі приєднання несиметричного навантаження описується за допомогою виразу

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix},$$

де \underline{Y}_{11} , \underline{Y}_{12} , \underline{Y}_{21} , \underline{Y}_{22} – комплексні провідності навантаження, які зв'язують напруги і струми прямої та зворотної послідовностей.

У випадку симетричного джерела живлення критерій забезпечення повного симетрування навантаження має вигляд $\underline{Y}_{21}=0$. У цьому випадку $U_2 = 0$, $I_2 = 0$.

Отже, за симетричного джерела напруги інформативним параметром для СУ є комплексна провідність $\underline{Y}_{21} = g_{21} - jb_{21}$ або комплексна спряжена потужність $\underline{S}_{21} = 3U_1^2 \underline{Y}_{21}$ зворотної послідовності навантаження. Перевагою застосування цих величин є те, що комплексні провідність і спряжену потужність зворотної послідовності можна достатньо точно визначити через ортогональні складові трифазних напруги і струму в системі координат α, β за формулами

$$\underline{Y}_{21} \approx 0,5 \left(\frac{\dot{I}_\alpha}{\dot{U}_\alpha} - \frac{\dot{I}_\beta}{\dot{U}_\beta} \right); \quad \underline{S}_{21} \approx 1,5U_1^2 \left(\frac{\dot{I}_\alpha}{\dot{U}_\alpha} - \frac{\dot{I}_\beta}{\dot{U}_\beta} \right).$$

Проаналізуємо вплив статичних характеристик навантажень на помилки симетрування у разі, якщо вони характеризуються степеневими залежностями

$$S_{BC}(k_P, k_Q) = P_{BC} \left(\frac{U_{BC}}{U_{ном}} \right)^{k_P} + jQ_{BC} \left(\frac{U_{BC}}{U_{ном}} \right)^{k_Q};$$

$$S_{CA}(k_P, k_Q) = P_{CA} \left(\frac{U_{CA}}{U_{ном}} \right)^{k_P} + jQ_{CA} \left(\frac{U_{CA}}{U_{ном}} \right)^{k_Q};$$

$$S_{AB}(k_P, k_Q) = P_{AB} \left(\frac{U_{AB}}{U_{ном}} \right)^{k_P} + jQ_{AB} \left(\frac{U_{AB}}{U_{ном}} \right)^{k_Q},$$

де P_{BC} , Q_{BC} , P_{CA} , Q_{CA} , P_{AB} , Q_{AB} – відповідні активні та реактивні міжфазні потужності навантажень BC , CA , AB ; U_{BC} , U_{CA} , U_{AB} – фактичне значення міжфазних напруг BC , CA , AB у вузлі навантажень; $U_{ном}$ – номінальне значення напруги мережі; k_P , k_Q – характеристичні коефіцієнти, що визначають залежності потужностей навантаження від напруги (приймаємо діапазон їх зміни в таких межах: $k_P=0...2$, $k_Q=0...4$).

На рис. 1 зображено залежності коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю при $k_2=1$ у разі використання як інформативного параметра комплексної спряженої потужності зворотної послідовності \underline{S}_{21} (рис. 1, а) та комплексної спряженої умовної потужності зворотної послідовності \underline{S}_2 (рис. 1, б) за різних статичних характеристик навантаження. Залежності побудовано в функції характеристичних коефіцієнтів k_P , k_Q (цифрою 0 на графіках позначено залежності для $k_P=0$; 1 – для $k_P=1$; 2 – для $k_P=2$).

Таким чином, використання в ролі інформативного параметра комплексної спряженої потужності зворотної послідовності \underline{S}_{21} забезпечує повне симетрування навантажень за квадратичних статичних характеристик навантаження. Це пояснюється тим, що конденсаторні батареї СУ самі мають квадратичні статичні характеристики. Якщо статичні характеристики навантажень відрізняються від квадратичних, то виникають помилки симетрування. У разі використання в ролі інформативного параметра потужності \underline{S}_2 помилки симетрування зростають.

На рис. 2 зображено залежності коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю у разі використання в ролі інформативного параметра комплексної спряженої потужності зворотної послідовності \underline{S}_{21} при $k_2=1,05$ (рис. 2, а) та при $k_2=1,1$ (рис. 2, б).

Отже, у разі використання як інформативного параметра потужності \underline{S}_{21} збільшення k_2 забезпечує повне симетрування навантажень за лінійних статичних характеристик навантаження (при $k_2=1,05$) та при незал-

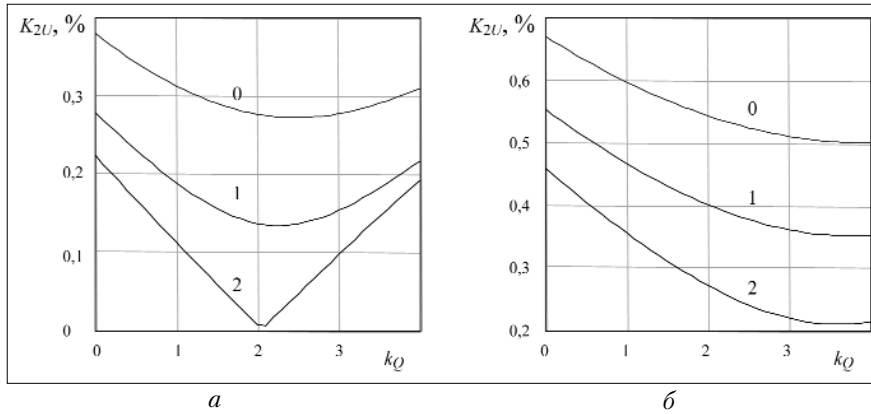


Рис. 1. Залежності коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю при $k_2=1$ у разі використання як інформативних параметрів потужностей \underline{S}_{21} та \underline{S}_2

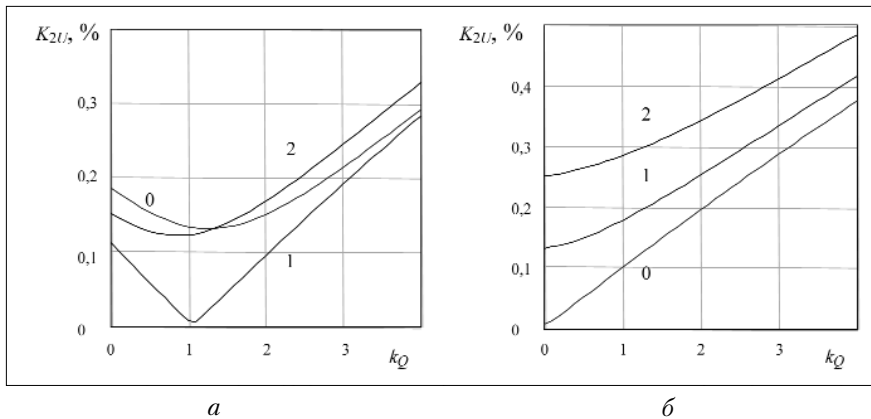


Рис. 2. Залежності коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю у разі використання як інформативного параметра потужності \underline{S}_{21} при $k_2=1,05$ і $k_2=1,1$

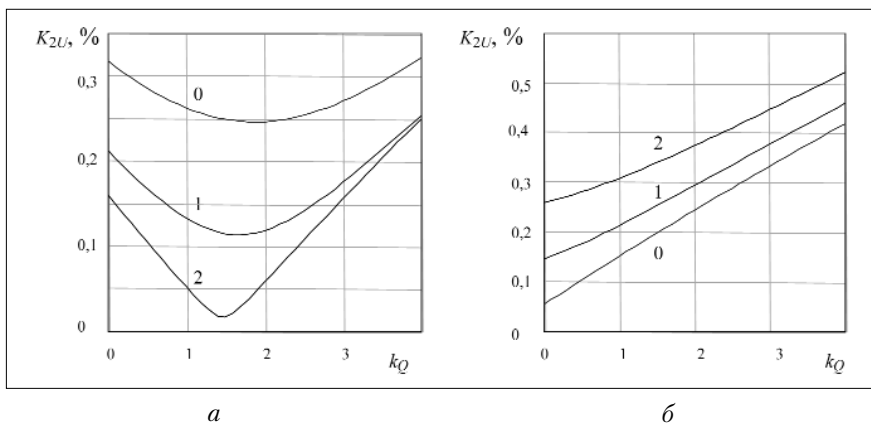


Рис. 3. Залежності коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю у разі використання як інформативного параметра потужності \underline{S}_2 при $k_2=1,05$ і $k_2=1,1$

ежності потужностей навантаження від напруги (при $k_2=1,1$).

На рис. 3 зображено залежності коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю у разі

використання як інформативного параметра комплексної спряженої умовної потужності зворотної послідовності \underline{S}_2 при $k_2=1,1$ (рис. 3, а) та при $k_2=1,2$ (рис. 3, б),

з яких впливає можливість зменшення помилок симетрування навантажень і у цьому випадку.

Недоліком застосування потужності \underline{S}_2 як інформативного параметра є широкий діапазон регулювання коефіцієнта k_2 , що може привести до збільшення помилок симетрування.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано умови симетрування навантажень, які представлені через потужності або провідності зворотної послідовності, що забезпечують можливість істотного зменшення помилок симетрування завдяки більш повному врахуванню статичних характеристик вузлів навантажень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мельников Н. А. Реактивная мощность в электрических сетях. – М.: Энергия, 1975. – 128 с.

2. Милях А. Н. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях / А. Н. Милях, А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка, 1973. – 219 с.

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

4. Бурбело М. Й. Вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, О. В. Бабенко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2002. – №2. – С. 92–95.

5. Симетрування навантажень вузлів електричних мереж з використанням двофазних симетрувальних установок / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, О. О. Бірюков, О. М. Кінзерська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №5. – С. 35–38.