

УДК 621.316.1

М. Й. Бурбело, д. т. н., проф.;

М. В. Кузьменко;

О. О. Бірюков, к. е. н.;

О. М. Кінзерська, студ.

СИМЕТРУВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ДВОФАЗНИХ СИМЕТРУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

У випадку можливості неповного симетрування навантажень доцільно використовувати двофазні симетрувальні установки, оскільки саме вони забезпечують мінімальні економічні витрати при допустимій величині коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю. Отримано умови симетрування навантажень, які зображені через активні провідності зворотної послідовності в системах координат відносно фаз А, В та С, що забезпечують можливість істотного зменшення похибок завдяки ідентичності побудови вимірювальних каналів двофазних симетрувальних установок.

Розгляд проблеми

Якість електроенергії разом з надійністю та економічністю є однією з найважливіших вимог до систем електропостачання. Інтенсифікація виробництва зумовлює зростання потужності нелінійних, несиметричних і різко змінних навантажень промислових підприємств. Водночас зростає число і потужність однофазних електроприймачів побутових споживачів. Все це зумовлює істотне збільшення рівня несиметрії та несинусоїдності напруг в електричних мережах. Під час роботи трифазної мережі в несиметричному або несинусоїдному режимі, з одного боку, зменшується пропускна спроможність елементів мережі, збільшуються втрати активної потужності та енергії, а з іншого — відбувається додатковий нагрів електричних машин, зменшується їх надійність тощо.

Несиметричним режимом трифазної електричної мережі називають режим, з неоднаковими умовами роботи однієї або всіх фаз [1, 2]. Найчастішою причиною виникнення несиметричного режиму є нерівність струмів навантажень фаз. При цьому розрізняють два види несиметрії: систематичну та випадкову. Характерним випадком систематичної несиметрії є постійне перевантаження однієї з фаз. У цьому випадку здійснюють вирівнювання навантажень фаз шляхом їх перемикавання з перевантаженої на недовантажену фазу. Випадкова несиметрія характеризується почерговим перевантаженням то однієї, то іншої фази. У цьому випадку необхідним є застосування СУ з автоматичним їх керуванням.

СУ можуть бути трифазними з трьома ємнісними елементами, з двома ємнісними та одним індуктивним елементом або двома індуктивними та одним ємнісним елементом, а також двофазними з двома ємнісними елементами, з індуктивним та ємнісним елементами або двома індуктивними елементами. Найкращим варіантом є двофазна СУ з двома ємнісними елементами, оскільки вона є найдешевшою і забезпечує водночас компенсацію реактивної потужності.

В [3—5] сформульовано умови безітераційного симетрування навантажень. Для забезпечення повного симетрування навантажень і одночасно компенсації реактивної потужності до заданого рівня та зменшення впливу статичних характеристик вузлів навантажень на точність симетрування як інформативні параметри необхідно використовувати провідності навантажень, за якими вибирають провідності фаз СУ

$$b_{BC} = \frac{1}{3}[(b_1 - b_{вх}) - 2b_2];$$

$$b_{CA} = \frac{1}{3}[(b_1 - b_{вх}) + b_2 - \sqrt{3}g_2]; \quad (1)$$

$$b_{AB} = \frac{1}{3}[(b_1 - b_{вх}) + b_2 + \sqrt{3}g_2],$$

де $b_{вх} = g_1 \operatorname{tg} \phi_{вх}$ — задане значення вхідної реактивної провідності після симетрування, $\operatorname{tg} \phi_{вх}$ — задане значення коефіцієнта реактивної потужності після симетрування; $g_1 = \operatorname{Re}(\underline{Y}_1)$; $b_1 = -\operatorname{Im}(\underline{Y}_1)$ — активна та реактивна провідності прямої послідовності навантаження $\underline{Y}_1 = \dot{I}_1/\dot{U}_1$; $g_2 = \operatorname{Re}(\underline{Y}_2)$; $b_2 = -\operatorname{Im}(\underline{Y}_2)$ — активна та реактивна умовні провідності зворотної послідовності навантаження $\underline{Y}_2 = \dot{I}_2/\dot{U}_1$.

СУ в даному випадку повинна містити три реактивних елементи.

Якщо повне симетрування навантажень не вимагається і його досягнення є економічно не виправданим, то доцільним є використання СУ з двома реактивними елементами, які забезпечують мінімум економічних витрат. Оскільки у цьому випадку заданого значення вхідної реактивної потужності досягти не можна, то умови (1) не можуть бути використані для керування двофазними СУ.

Метою роботи є отримання алгоритмів безітераційного керування СУ з двома ємнісними елементами.

Обґрунтування результатів

Для досягнення поставленої мети пропонується в систему рівнянь (1) ввести коефіцієнт k_2 , який характеризує неповне симетрування навантажень. Тоді

$$b_{BC} = \frac{1}{3}[(b_1 - b_{вх}) - 2k_2b_2];$$

$$b_{CA} = \frac{1}{3}[(b_1 - b_{вх}) + k_2b_2 - \sqrt{3}k_2g_2]; \tag{2}$$

$$b_{AB} = \frac{1}{3}[(b_1 - b_{вх}) + k_2b_2 + \sqrt{3}k_2g_2],$$

де k_2 — задане значення коефіцієнта, що характеризує ступінь симетрування навантажень ($k_2 = 1 \dots 0$).

На рис. 1 зображено пряму, яка в системі координат $b_{вх}, k_2$ характеризує увімкнення двофазної СУ з двома ємнісними елементами. Вище прямої необхідним є увімкнення третього індуктивного елемента, а нижче — третього ємнісного елемента. Отже, зображена пряма по суті є характеристикою мінімальних витрат на симетрування навантажень.

Під час симетрування навантажень за допомогою СУ з двома реактивними елементами не вимагається досягнення заданого значення вхідної реактивної потужності, а тому умови (2) спрощуються. Прирівнявши до нуля провідність однієї з фаз СУ, ці умови можна записати в одному із виглядів

$$b_{BC} = 0; \quad b_{CA} = k_2 \left(b_2 - \frac{\sqrt{3}}{3} g_2 \right);$$

$$b_{AB} = k_2 \left(b_2 + \frac{\sqrt{3}}{3} g_2 \right), \tag{3}$$

$$b_{BC} = -k_2 \left(b_2 - \frac{\sqrt{3}}{3} g_2 \right); \quad b_{CA} = 0;$$

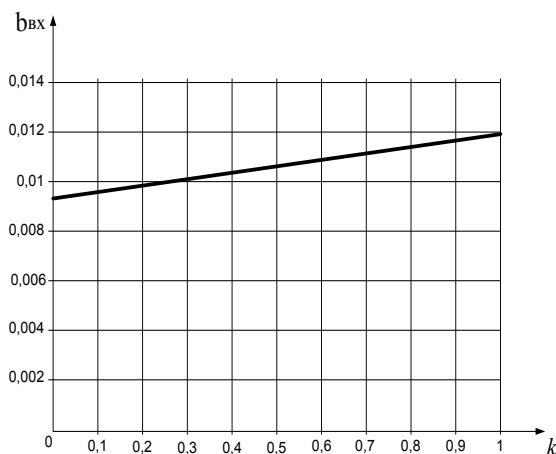


Рис. 1. Характеристика мінімальних витрат на симетрування навантажень

$$b_{AB} = \frac{2\sqrt{3}}{3} k_2 g_2, \tag{4}$$

$$b_{BC} = -k_2 \left(b_2 + \frac{\sqrt{3}}{3} g_2 \right); \quad b_{CA} = -\frac{2\sqrt{3}}{3} k_2 g_2; \quad b_{AB} = 0, \tag{5}$$

вибір яких залежить від того, в яку фазу ємнісний елемент не вмикається.

Оскільки для визначення трьох провідностей фаз СУ у формулах (3)—(5) необхідна інформація про три величини g_2 , $b_2 - \frac{\sqrt{3}}{3} g_2$ та $-\left(b_2 + \frac{\sqrt{3}}{3} g_2 \right)$, то прийняття рішення в які фази необхідно

увімкнути ємнісні елементи СУ є однозначним. За знаком цих величин або за аргументом комплексної умовної провідності зворотної послідовності $\underline{Y}_2 = g_2 - jb_2$ можна чітко визначити в які фази потрібно увімкнути ємнісні елементи. Комплексну площину \underline{Y}_2 ці величини поділяють на три сектори з кутом 120 ел. градусів. Умови використовують: (3) — якщо аргумент комплексної умовної провідності зворотної послідовності \underline{Y}_2 знаходиться в межах $-150...-30$ ел. градусів, (4) — якщо аргумент \underline{Y}_2 знаходиться в межах $-30...+90$ ел. градусів, (5) — якщо аргумент \underline{Y}_2 знаходиться в межах $+90...-150$ ел. градусів (рис. 2).

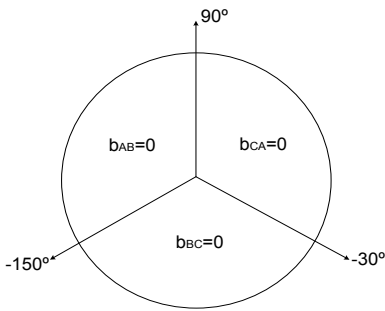


Рис. 2. Діаграма вибору умов симетрування в залежності від аргумента \underline{Y}_2

Наприклад, у разі живлення несиметричного навантаження $S_{BC} = 700$ кВА, $S_{CA} = 450$ кВА; $S_{AB} = 450$ кВА за коефіцієнта потужності фаз відповідно $\cos \varphi_{BC} = 0,8$; $\cos \varphi_{CA} = 0,75$; $\cos \varphi_{AB} = 0,75$ по лінії електропередач напругою 10 кВ, що характеризується комплексним опором $\underline{Z} = 0,428 + j0,354$ Ом, значення струмів фаз будуть $\dot{I}_A = 72,4e^{-j41,7^\circ}$ А, $\dot{I}_B = 89,5e^{-j152,5^\circ}$ А; $\dot{I}_C = 93,0e^{j74,2^\circ}$ А. Струм зворотної послідовності $\dot{I}_2 = 12,3e^{j150,2^\circ}$ А (коефіцієнт несиметрії струмів за зворотною послідовністю $K_{2I} = 14,6\%$, коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю $K_{2U} = 1,3\%$). Для повного симетрування навантажень необхідно увімкнути СУ з такими параметрами: $Q_{BC} = 251$ квар, $Q_{CA} = 257$ квар ($Q_{AB} = 0$).

Залежності (2) та (3)—(5) є лінійними відносно коефіцієнта k_2 (рис. 2), що свідчить про те, що у разі можливості зменшення ступеня симетрування необхідно пропорційно зменшити провідності (потужності) конденсаторів. Так, увімкнення СУ з параметрами $Q_{BC} = 200$ квар, $Q_{CA} = 200$ квар приводить до зменшення струму зворотної послідовності приблизно в п'ять разів: $\dot{I}_2 = 2,7e^{j153,0^\circ}$.

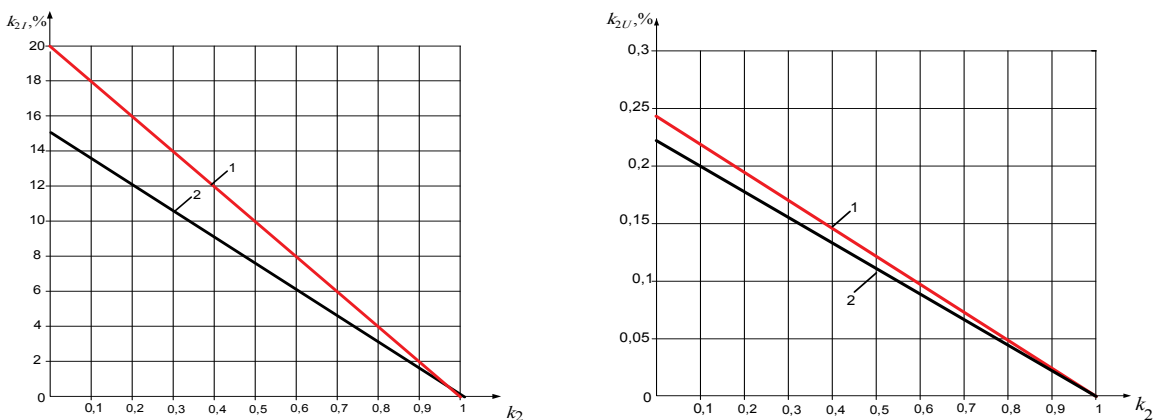


Рис. 3. Залежність коефіцієнта зворотної послідовності напруги та струму від ступеня несиметрії навантаження: 1 — використання трифазної СУ; 2 — використання двофазної СУ

Недоліком застосування умов (3)—(5) є необхідність вимірювання реактивної провідності зворотної послідовності, що вимагає використання фазозсувних перетворювачів (інтегратора або диференціатора) і призводить до істотного зростання похибок, особливо за умов несинусоїдності.

У разі використання систем координат зворотної послідовності, визначених відносно фаз A , B та C , умови симетрування навантажень для двофазної СУ (3)—(5) можна записати через активні провідності, що визначені в цих координатах, в одному із виглядів:

$$b_{BC} = 0; \quad b_{CA} = \frac{2\sqrt{3}}{3} k_2 g_{2(B)}; \quad b_{AB} = -\frac{2\sqrt{3}}{3} k_2 g_{2(C)}, \quad (6)$$

$$b_{BC} = -\frac{2\sqrt{3}}{3} k_2 g_{2(B)}; \quad b_{CA} = 0; \quad b_{AB} = \frac{2\sqrt{3}}{3} k_2 g_{2(A)}, \quad (7)$$

$$b_{BC} = \frac{2\sqrt{3}}{3} k_2 g_{2(C)}; \quad b_{CA} = -\frac{2\sqrt{3}}{3} k_2 g_{2(A)}; \quad b_{AB} = 0, \quad (8)$$

де $g_{2(A)} = g_2$, $g_{2(B)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(b_2 - \frac{\sqrt{3}}{3} g_2 \right)$, $g_{2(C)} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \left(b_2 + \frac{\sqrt{3}}{3} g_2 \right)$ — активні провідності навантаження зворотної послідовності в системах координат, визначених відносно фаз A , B та C .

Умови (6)—(8) істотно спрощують реалізацію вимірювальних каналів для СУ за умов несинусоїдності, а також забезпечують можливість зменшення похибок завдяки ідентичності побудови вимірювальних каналів. Ще однією перевагою їх застосування для СУ з двома ємнісними елементами є незалежність контурів регулювання провідності (потужності) фаз СУ.

Висновки

У випадку можливості неповного симетрування навантажень доцільно використовувати двофазні симетрувальні установки, оскільки саме вони забезпечують мінімальні економічні витрати за допустимого значення коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю.

Умови симетрування навантажень, які зображені через активні провідності зворотної послідовності в системах координат відносно фаз A , B та C , забезпечують можливість істотного зменшення похибок завдяки ідентичності побудови вимірювальних каналів двофазних симетрувальних установок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. — К.: Наукова думка, 1985. — 268 с.
2. 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.
3. Квазікомпенсаційні вимірювальні пристрої для регуляторів реактивної потужності / М. Й. Бурбело, Б. С. Рогальський, В. М. Непійвода, С. І. Вознюк // *Енергетика і електрифікація*. — 2001. — № 6. — С. 29 — 33.
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. Бурбело М. Й. Квазірівноважена вимірювальна система для компенсаційних установок симетрування трифазних навантажень / М. Й. Бурбело, О. В. Бабенко // *Енергетика і електрифікація*. — 2003. — № 9—10. — С. 52 — 54.

Рекомендовано кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Надійшла до редакції 2.07.08
Рекомендована до друку 1.10.08

Бурбело Михайло Йосипович — завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, **Кінзерська Оксана Михайлівна** — студентка Інституту електроенергетики та електромеханіки.

Вінницький національний технічний університет;

Кузьменко Марина Василівна — інженер, **Бірюков Олександр Олександрович** — директор Вінницьких високовольтних мереж.

ВАТ «АК «Вінницяобленерго»