

УДК 621.316.13

Л. Б. Терешкевич, канд. техн. наук, доц.;

Т. М. Червінська, асп.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ БАТАРЕЙ СТАТИЧНИХ КОНДЕНСАТОРІВ НА РОБОТУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НЕСИМЕТРИЧНОЮ НАПРУГОЮ

Проведено аналіз впливу батареї статичних конденсаторів, під'єднаної до вузла навантаження із несиметричною системою напруг, на показники несиметрії та на втрати активної потужності в електричних мережах. Встановлені технічні параметри, що визначають ступінь впливу, та числові значення характеристик можливих впливів.

Постановка задачі

Використання керованих батарей статичних конденсаторів (БСК) симетричного виконання (з однаковими ємностями фаз) для компенсації реактивних навантажень є одним із високоефективних засобів, які дозволяють зменшити втрати активної потужності та знизити плату постачальнику за спожиту електроенергію [1].

Для поліпшення кінцевого результату керування та підвищення ефективності використання БСК доцільно передбачати принципову схему секцій, яка надає можливість їх ввімкнення як на лінійну (за схемою трикутника), так і на фазну (за схемою зірки з нулем) напругу [2]. Такі секції БСК мають більшу кількість комбінацій їх ввімкнення, що дозволяє із дискретного ряду потужностей точніше підібрати необхідне значення.

В практиці експлуатації БСК поширеним випадком є їх робота в умовах несиметрії трифазної системи напруг. Несиметричні режими розподільних мереж впливають на роботу під'єднаних до них БСК [3], але вплив БСК за таких умов на режим електричної мережі вивчено не достатньо, що не дозволяє правильно оцінювати всі ефекти при реалізації керувальних впливів.

Мета роботи — підвищити ефективність компенсації реактивної потужності шляхом дослідження впливів БСК симетричного виконання, ввімкненої на несиметричну напругу, на параметри режиму роботи електричної мережі.

Вплив БСК на параметри несиметрії напруги

Увімкнення БСК, що мають однакові фазні (схема з'єднань — зірка з нулем) або міжфазні (схема з'єднань трикутником) ємності, до мережі із несиметрією напруги приводить до того, що відповідні потужності набувають різних значень. Додавки напруги, які створюються в результаті ввімкнення, будуть різні як по фазним, так і по міжфазним напругам. Їх можна охарактеризувати як несиметричні і аналізувати, застосувавши метод симетричних складових. Можливі впливи на несиметрію режиму будуть охоплені розглядом добавок напруги зворотної і нульової послідовностей.

Під добавкою напруги зворотної послідовності — $\Delta \dot{U}_2$ будемо розуміти: $\Delta \dot{U}_2 = \dot{U}_{2\text{після}} - \dot{U}_{2\text{до}}$, а добавка напруги нульової послідовності — $\Delta \dot{U}_0 = \dot{U}_{0\text{після}} - \dot{U}_{0\text{до}}$, де $\dot{U}_{2\text{після}}$, $\dot{U}_{0\text{після}}$ — вектори напруг зворотної і нульової послідовності після ввімкнення БСК у вузлі їх під'єднання до мережі; $\dot{U}_{2\text{до}}$, $\dot{U}_{0\text{до}}$ — те саме, до ввімкнення.

Один з поширених випадків, коли електроприймачі споживача в переважній більшості симетричного виконання, а несиметрія напруги зумовлена еквівалентними ЕРС зворотної — \dot{E}_2 та нульової — \dot{E}_0 послідовностей, що знаходяться зі сторони енергопостачальної організації. Схеми заміщення для струмів зворотної та нульової послідовностей, що відповідають такому випадку, наведені на рис. 1а та 1б відповідно, де $\underline{z}_2^{(1)} = r_2^{(1)} + jx_2^{(1)}$ та $\underline{z}_0^{(1)} = r_0^{(1)} + jx_0^{(1)}$ — еквівалентний опір струмам зворотної та нульової послідовностей зовнішніх мереж (рис. 2); $\underline{z}_2^{(2)} = r_2^{(2)} + jx_2^{(2)}$ та

$\underline{z}_0^{(2)} = r_0^{(2)} + jx_0^{(2)}$ — те саме, розподільних мереж споживача та асинхронного електроприводу. Вузол А — вузол під'єднання БСК, що досліджується.

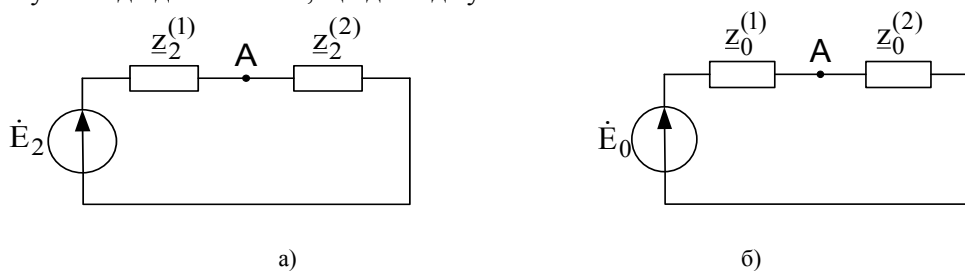


Рис. 1. Схема заміщення: а) для струмів зворотної послідовності; б) для струмів нульової послідовності

Елемент мережі	Варіант схеми		
	1	2	3
W1	Повітряна ЛЕП 10 кВ А50; L=15 км	Повітряна ЛЕП 10 кВ А25; L=15 км	Повітряна ЛЕП 10 кВ А25; L=15 км
T	ТМ 1000/10	ТМ 160/10	ТМ 160/10
W2	-	-	Кабельна ЛЕП 0,4 кВ ААБ 4x150; L=0,12 км
C	Потужність, кВт змінний параметр		
W3	Кабельна ЛЕП 0,4 кВ ААБ 4x150; L=0,1 км	Кабельна ЛЕП 0,4 кВ ААБ 4x10; L=0,1 км	Кабельна ЛЕП 0,4 кВ ААБ 4x10; L=0,1 км

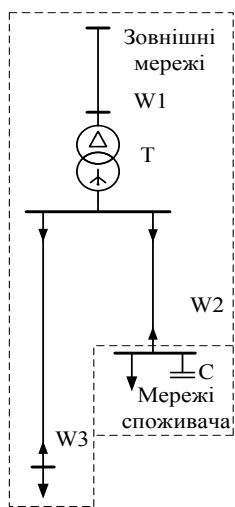


Рис. 2. Варіанти схем зовнішньої мережі

Для симетричних систем зворотної і нульової послідовностей опори $\underline{z}_2^{(1)}$; $\underline{z}_2^{(2)}$; $\underline{z}_0^{(1)}$; $\underline{z}_0^{(2)}$ залишаються активно-індуктивними, а струм ємності має відносно відповідного вектора напруги зсув $\pi/2$ рад (як і для систем прямої послідовності). Тому, за аналогією, як для прямої послідовності правомірними є аналітичні співвідношення

$$\Delta \dot{U}_2 = \dot{I}_2^{\text{БСК}} \left(x_2^{(1)} - j\Gamma_2^{(1)} \right); \tag{1}$$

$$\Delta \dot{U}_0 = \dot{I}_0^{\text{БСК}} \left(x_0^{(1)} - j\Gamma_0^{(1)} \right), \tag{2}$$

де $\dot{I}_2^{\text{БСК}}$; $\dot{I}_0^{\text{БСК}}$ — вектори струмів зворотної та нульової послідовностей, що створюються БСК.

Із (1) та (2) можна отримати:

$$\Delta \dot{U}_2 = \frac{1}{3} \frac{\dot{U}_2}{U_{\text{нф}}^2} \underline{z}_2^{(1)} \Delta Q_{\text{н}}; \tag{3}$$

$$\Delta \dot{U}_0 = \frac{1}{3} \frac{\dot{U}_0}{U_{\text{нф}}^2} \underline{z}_0^{(1)} \Delta Q_{\text{н}}, \tag{4}$$

де \dot{U}_2 , \dot{U}_0 — вектори напруги зворотної та нульової послідовностей у вузлі А до ввімкнення БСК відповідно; $\Delta Q_{\text{н}}$ — номінальна потужність БСК, що відповідає симетричній напрузі номінального значення, виходячи з того що БСК під'єднано до міжфазної напруги (при дослідженні впливу БСК, з'єднаної за схемою трикутника) або до фазної напруги (якщо досліджується БСК, ввімкне-

на за схемою зірки з нулем); $U_{\text{нф}}$ — номінальна фазна напруга мережі в місці під'єднання БСК.

Розглянемо як зміняться величини коефіцієнтів несиметрії напруги по зворотній — k_{2U} після та нульовій — k_{0U} після послідовності після ввімкнення БСК симетричного виконання в залежності від вихідних величин цих коефіцієнтів — $k_{2U \text{ до}}, k_{0U \text{ до}}$ для других схем зовнішніх мереж підприємства, рис. 2.

Результати виконаних розрахунків подані графічними залежностями, рис. 3 та 4.

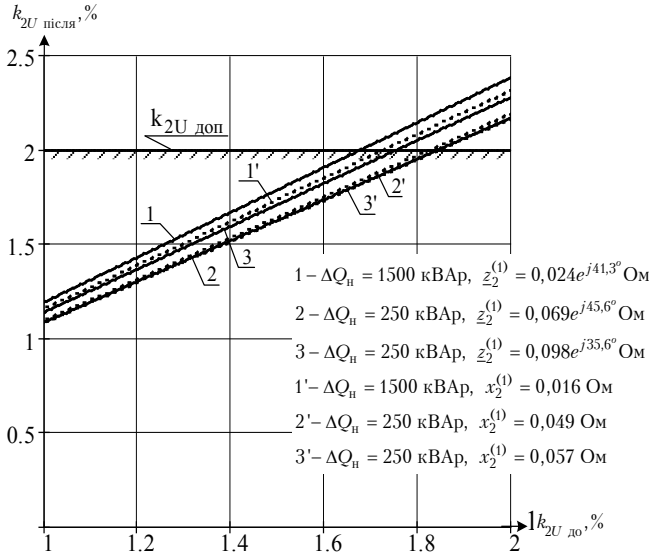


Рис. 3. Залежність величини коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності після ввімкнення БСК симетричного виконання в залежності від його вихідної величини: 1; 1' — результати, отримані для схеми 1 (рис. 2); 2; 2' — те саме, схеми 2 (рис. 2); 3; 3' — те саме, схеми 3 (рис. 2)

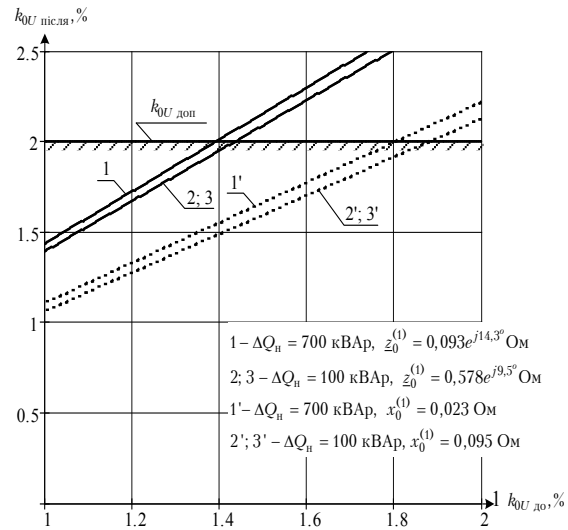


Рис. 4. Залежність величини коефіцієнта несиметрії напруги по нульовій послідовності після ввімкнення БСК симетричного виконання в залежності від його вихідної величини: 1; 1' — результати, отримані для схеми 1 (рис. 2); 2; 2' — те саме, схеми 2 (рис. 2); 3; 3' — те саме, схеми 3 (рис. 2)

На рис. 3, 4 суцільними лініями показані залежності, отримані з урахуванням повздовжньої та поперечної складових вектора добавки напруги, пунктирними — нехтуючи поперечною складовою. Криві 1', 2', 3' займають різні положення (розміщені і вище, і нижче) відносно кривих 1, 2, 3. Така особливість зумовлена співвідношенням значень активного і реактивного опорів зовнішньої мережі:

- а) якщо $\frac{r_2^{(1)}}{x_2^{(1)}} < 1$ або $\frac{r_0^{(1)}}{x_0^{(1)}} < 1$, то відбувається додаткове зростання рівня несиметрії напруги за рахунок поперечної складової;
- б) якщо $\frac{r_2^{(1)}}{x_2^{(1)}} > 1$ або $\frac{r_0^{(1)}}{x_0^{(1)}} > 1$, має місце її додаткове зниження;
- в) коли $\frac{r_2^{(1)}}{x_2^{(1)}} \approx 1$ криві 2 і 2' майже співпадають (див. рис. 3).

Аналізуючи графіки зображені на рис. 3, 4, слід відмітити, що:

— ввімкнення секцій БСК симетричного виконання в умовах несиметрії напруги призводить до зростання k_{2U} та k_{0U} і за певних умов (вихідне значення $k_{2U \text{ до}}, k_{0U \text{ до}}$, потужність БСК, опір зовнішньої мережі) k_{2U} та k_{0U} можуть набувати недопустимих за ГОСТ 13109-97 значень — $k_{2U \text{ доп}}, k_{0U \text{ доп}}$;

— значення k_{0U} після в деяких випадках збільшується швидше порівняно із k_{2U} після (опір струмам нульової послідовності ЛЕП 0,4 кВ як мінімум в 4 рази перевищує опір струмам зворотньої послідовності [4, 5]);

— повздовжньою складовою вектора \dot{U}_2 можна нехтувати, оскільки це має несуттєвий вплив на кінцеві результати, а для $\Delta\dot{U}_0$ її необхідно враховувати.

Вплив БСК на рівні втрат активної потужності

Можна визначити дві складові впливу БСК на втрати активної потужності. Перша вказує на те, що несиметрія напруги збільшує загальну потужність БСК (сумарну по всіх фазах). Степінь компенсації реактивної потужності збільшується, втрати активної потужності на передачу реактивних навантажень — зменшуються. Друга є наслідком збільшення степеня несиметрії режиму і пов'язаних з цим збільшенням додаткових втрат активної потужності, що зумовлені струмами зворотної та нульової послідовностей. В роботі наводяться результати дослідження саме другої складової.

Виділимо втрати активної потужності в зовнішніх мережах (в опорах $\underline{z}_2^{(1)}; \underline{z}_0^{(1)}$) — $\Delta P'_2; \Delta P'_0$; в розподільних мережах споживача і в асинхронному електроприводі (в опорах $\underline{z}_2^{(2)}; \underline{z}_0^{(2)}$) — $\Delta P''_2; \Delta P''_0$.

Втрати активної потужності, зумовлені струмами зворотної послідовності:

$$\Delta P'_2 = 3 \frac{(E_2 - U_2)^2}{z_2^{(1)}} r_2^{(1)}; \tag{5}$$

$$\Delta P''_2 = 3 \frac{U_2^2}{z_2^{(2)}} r_2^{(2)}. \tag{6}$$

Втрати активної потужності, зумовлені струмами нульової послідовності

$$\Delta P'_0 = 12 \frac{(E_0 - U_0)^2}{z_0^{(1)}} r_0^{(1)}, \tag{7}$$

а втрати $\Delta P''_0$ для випадку радіальної розподільчої мережі

$$\Delta P''_0 = \sum_{i=1}^n \left(12 \frac{U_0^2}{z_{0i}^2} r_{li} + 3 \frac{U_0^2}{z_{0i}^2} r_{di} \right), \tag{8}$$

де z_{0i} — повний опір струмам нульової послідовності i -го приєднання; r_{li} — активний опір на фазу лінії i -го приєднання; r_{di} — активний опір струмам нульової послідовності асинхронного двигуна, що під'єднаний до i -го приєднання.

Кількісну оцінку впливу, який здійснюється при ввімкненні БСК, на значення всіх складових втрат активної потужності, проілюструємо результатами числового прикладу.

Приклад. В схемі рис. 2 (варіант схеми 1), до вузла під'єднаний виробничий цех, де встановлені компресорні установки з асинхронним електроприводом 75—200 кВт. Розрахувати втрати активної потужності до та після ввімкнення БСК, якщо $k_{2U \text{ до}} = 2\%$ і $k_{0U \text{ до}} = 1,5\%$.

Результати розрахунків наведені в таблиці.

Результати розрахунків складових втрат активної потужності

Параметри	До ввімкнення БСК	Після ввімкнення БСК
Вхідна реактивна потужність, кВАр	560	0
$k_{2U}, \%$	2	2,14
$k_{0U}, \%$	1,5	2,03
Втрати активної потужності, кВт:		
— від передачі реактивних навантажень	39,1	0
— від зворотної послідовності в зовнішній мережі	1,54	1,32
— від зворотної послідовності в розподільних мережах та в асинхронному електроприводі	0,75	0,86
— від нульової послідовності в зовнішній мережі	7,4	5,34
— від нульової послідовності в розподільних мережах та в асинхронному електроприводі	4,14	7,57

Продовження табл.

Параметри	До ввімкнення БСК	Після ввімкнення БСК
— сумарні втрати, зумовлені несиметрією режиму, в зовнішній мережі, кВт	8,94	6,66
— сумарні втрати, зумовлені несиметрією режиму, в розподільних мережах та в асинхронному електроприводі, кВт	4,89	8,43
Разом активні втрати, зумовлені несиметрією режиму, кВт	13,83	15,09

Таким чином, при ввімкненні БСК симетричного виконання втрати активної потужності, зумовлені несиметрією режиму, в зовнішній мережі, рис. 2, зменшуються, а в розподільних мережах навпаки — збільшуються.

Як видно із таблиці, величина зміни втрат активної потужності від несиметрії напруги порівняно із величиною зменшення втрат активної потужності від передачі реактивної є незначною (3,2 %).

Висновки

1. Увімкнення секцій БСК симетричного виконання у вузлі з несиметричною напругою призводить до збільшення коефіцієнтів несиметрії напруги по зворотній та нульовій послідовності, які за певних умов можуть набувати недопустимих значень.

2. До основних факторів, що визначають зміну рівня несиметрії, відносяться її вихідне значення, потужність секцій БСК, опір зовнішньої мережі.

3. Увімкнення БСК симетричного виконання в цілому збільшує втрати активної потужності, зумовлені несиметрією режиму (в зовнішніх мережах вони зменшуються, а в мережах споживача — навпаки збільшуються). Зростання додаткових втрат від несиметрії режиму для конкретного прикладу становить невеликий відсоток порівняно зі зменшенням активних втрат від передачі реактивних навантажень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю. С. Железко. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 172 с.
2. Лебедин А. А. Повышение эффективности конденсаторных установок / А. А. Лебедин, Н. И. Джус // Промышленная энергетика. — 1996. — № 1. — С. 34—35.
3. Владимиров Ю. В. Учет фактора влияния несимметрии нагрузки на потери в электрических сетях от перетоков реактивных мощностей / Ю. В. Владимиров, Т. В. Крамская // Энергетика та електрифікація. — 2007. — № 1. — С. 63—67.
4. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С. А. Ульянов. — М. : Энергия, 1970. — 520 с.
5. Шидловский А. К. Анализ и принципы построения пофазно-управляемых устройств коррекции режимов трехфазных сетей с нулевым проводом. Ч. 1. Устройства для симметрирования и компенсации реактивной мощности / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, В. А. Новский. — К. : Институт электродинамики АН УССР, 1982. — 56 с. : ил. 12, табл. 2. — (Препринт / ИЭД АН УССР; 282) — Библиогр. : 20 назв.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Надійшла до редакції 24.04.09
Рекомендована до друку 9.06.09

Терешкевич Леонід Борисович — доцент, **Червінська Тетяна Миколаївна** — аспірантка.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет