

М. Й. Бурбело¹
 Ю. П. Войтюк¹
 Ю. В. Лобода¹

УМОВИ СИМЕТРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ СТАТКОМ

¹Вінницький національний технічний університет

Отримано умови симетрування навантажень за допомогою СТАТКОМ з використанням комплексних струму та провідності зворотної послідовності навантаження. Досліджено помилки симетрування за різних статичних характеристик навантажень за напругою в разі керування за збуренням.

Ключові слова: симетрування навантажень, умови керування за збуренням, статичні характеристики вузлів навантажень за напругою.

Вступ

Симетрування швидкозмінних навантажень вузлів розподільних електричних мереж виконують статичними тиристорними компенсаторами (СТК) [1—4]. Однак швидкодія таких пристроїв в багатьох випадках є недостатньою. З розвитком електронної техніки появились досконаліші повністю керовані статичні синхронні компенсатори СТАТКОМ, основною перевагою яких у порівнянні з СТК є значно кращі динамічні характеристики. Статичні синхронні компенсатори СТАТКОМ, які були розроблені для підвищення стійкості електроенергетичних систем, збільшення пропускної здатності системоутворювальних ліній електропередачі [5, 6], в останні роки знаходять застосування в розподільних мережах зі швидкозмінними несиметричними навантаженнями [7—10].

СТК і СТАТКОМ схожі за своїми функціональними можливостями компенсації реактивної потужності, але основні принципи роботи їх істотно відрізняються. СТАТКОМ можна розглядати як паралельно приєднане до вузла електричної мережі кероване напругою трифазне джерело струму, тоді як СТК є паралельно приєднаною регульованою трифазною реактивною провідністю.

Для симетрування навантажень за зворотною послідовністю з одночасною компенсацією реактивної потужності вектор провідностей фаз СТК формується у вигляді [1—4]

$$\begin{aligned} b_{BC} &= \frac{1}{\sqrt{3}U_1} [(i''_1 - i''_{\text{вх}}) - 2i''_2]; \\ b_{CA} &= \frac{1}{\sqrt{3}U_1} [(i''_1 - i''_{\text{вх}}) + i''_2 - \sqrt{3}i'_2]; \\ b_{AB} &= \frac{1}{\sqrt{3}U_1} [(i''_1 - i''_{\text{вх}}) + i''_2 + \sqrt{3}i'_2], \end{aligned} \quad (1)$$

де U_1 — діюче значення напруги прямої послідовності; $i''_1, i''_{\text{вх}}$ — уявний складник струму прямої послідовності навантаження та його задане вхідне значення ($i''_{\text{вх}} = i'_1 \text{tg} \phi_{\text{вх}}$); i'_2, i''_2 — дійсний та уявний складники струму зворотної послідовності; $\text{tg} \phi_{\text{вх}}$ — задане значення коефіцієнта реактивної потужності.

Для формування вектора провідностей фаз СТК можуть бути використані провідності прямої та зворотної послідовностей навантаження:

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

$$b_{CA} = \frac{1}{3}[(b_1 - b_{\text{вх}}) + b_2 - \sqrt{3}g_2]; \quad (2)$$

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

де $b_{\text{вх}} = g_1 \operatorname{tg} \phi_{\text{вх}}$ — задане значення вхідної реактивної провідності 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 $\underline{Y}_2 = \dot{I}_2 / \dot{U}_1$; тут \dot{I}_1 , \dot{I}_2 — комплексні струми прямої та зворотної послідовностей; \dot{U}_1 — комплексна напруга прямої послідовності.

Для підвищення точності симетрування замість $\underline{Y}_2 = \dot{I}_2 / \dot{U}_1$ використовують комплексну провідність $\underline{Y}_{21} = g_{21} - jb_{21}$, яка є елементом матриці, що характеризує зв'язок між струмами і напругами прямої та зворотної послідовностей у вузлі приєднання несиметричного навантаження

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

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.

Помилки симетрування визначаються алгоритмом керування і статичними характеристиками вузлів навантажень. За лінійних статичних характеристик кращим є використання струму, а за квадратичних — провідності зворотної послідовності \underline{Y}_{21} [11, 12].

Мета роботи полягає в отриманні умов симетрування навантажень за допомогою СТАТКОМ та дослідженні помилок симетрування за різних статичних характеристик вузлів навантажень.

Обґрунтування результатів

Умови симетрування струмів отримують з критеріїв повної або часткової компенсації реактивної складової струму прямої послідовності \dot{I}_1 та обох складових струмів зворотної \dot{I}_2 та нульової \dot{I}_0 послідовностей навантаження. Комплексні струми фаз компенсатора можуть бути визначені за формулою

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -jk \operatorname{Im} \dot{I}_1 \\ -\dot{I}_2 \\ -\dot{I}_0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де \dot{I}_a , \dot{I}_b , \dot{I}_c — комплексні струми фаз компенсатора, для зручності інтерпретації результатів орієнтовані відносно відповідних фазних напруг. Матриця перетворення з метою орієнтації комплексних фазних струмів відносно напруг отримана з використанням матриці Фортеस्क'ю, другий рядок якої помножено на a , а третій — на a^2 ; $a = e^{j120^\circ}$ — фазовий оператор; k — ступінь компенсації реактивної потужності.

В табл. 1 наведено результати розрахунку несиметричного режиму за наявності навантажень на двох фазах BC і CA і відсутності навантаження на фазі AB , а також значення компенсаційних струмів фаз, які повинні бути сформовані СТАТКОМ для симетрування навантажень за $k = 1$ та $k = 0$.

Таблиця 1

Струми навантаження і компенсаційні струми СТАТКОМ

Струми фаз	Струми навантаження, А	Розрахункові струми СТАТКОМ ($k = 1$), А	Розрахункові струми СТАТКОМ ($k = 0$), А
Струм фази А	10,5 - j63,3	34,4 + j63,3	34,4 + j4,9
Струм фази В	58,0 - j26,1	-13,0 + j26,1	-13,0 - j32,3
Струм фази С	66,4 - j85,8	-21,4 + j85,8	-21,4 + j27,4

З наведеної таблиці випливає відносно простий алгоритм керування СТАТКОМ. Суть керування полягає в роздільному пофазному вирівнюванні активної та реактивної складових струму навантаження. За $k = 1$ СТАТКОМ пофазно повністю компенсує реактивні складові струмів з одночасним вирівнюванням активних складових струмів навантаження. За $k = 0$ активні та реактивні складові струмів вирівнюються шляхом перерозподілення їх між фазами. В наведеному випадку СТАТКОМ споживає активну потужність з фази A і віддає в фази B та C . За $k = 0$ реактивна потужність споживається фазою B і віддається в фази A та C .

СТАТКОМ приєднують до мережі через реактори та силові трансформатори. При цьому можуть використовуватися трансформатори з різними схемами з'єднань обмоток, наприклад Y_0/Y або Y_0/Δ .

Алгоритми симетрування навантажень за зворотною послідовністю можна отримати з умов повної або часткової компенсації реактивної складової струму прямої послідовності \dot{I}_1 та обох складових струму зворотної послідовності \dot{I}_2 навантаження (за рівності нулю струму нульової послідовності компенсатора). У разі застосування трансформатора $Y_0/Y-12$ для дійсної та уявної складових фазних струмів вторинної обмотки, які приведенні до первинної обмотки, з (4) отримаємо:

$$\begin{aligned} I'_a &= -\operatorname{Re} \dot{I}_2; \quad I''_a = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 - \operatorname{Im} \dot{I}_2; \\ I'_b &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2; \quad I''_b = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 + \frac{1}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2; \\ I'_c &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2; \quad I''_c = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 + \frac{1}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2, \end{aligned} \quad (5)$$

де k — ступінь компенсації реактивної потужності.

Із застосуванням трансформатора $Y_0/\Delta-11$ дійсна та уявна складові фазних струмів вторинної обмотки, які приведені до первинної обмотки, будуть визначатись таким чином:

$$\begin{aligned} I'_a &= -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2; \quad I''_a = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 - \frac{1}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2; \\ I'_b &= \operatorname{Re} \dot{I}_2; \quad I''_b = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 + \operatorname{Im} \dot{I}_2; \\ I'_c &= -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2; \quad I''_c = -k \operatorname{Im} \dot{I}_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re} \dot{I}_2 - \frac{1}{2} \operatorname{Im} \dot{I}_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Вирази для компенсаційних струмів СТАТКОМ можна отримати також з виразів (1), (2). У разі застосування трансформатора $Y_0/Y-12$ для дійсної та уявної складових фазних струмів вторинної обмотки отримаємо:

$$\begin{aligned} I'_a &= \frac{\sqrt{3}U_1}{2}(b_{CA} - b_{AB}); \quad I''_a = \frac{3U_1}{2}(b_{CA} + b_{AB}); \\ I'_b &= \frac{\sqrt{3}U_1}{2}(b_{AB} - b_{BC}); \quad I''_a = \frac{3U_1}{2}(b_{AB} + b_{BC}); \\ I'_c &= \frac{\sqrt{3}U_1}{2}(b_{BC} - b_{CA}); \quad I''_c = \frac{3U_1}{2}(b_{BC} + b_{CA}). \end{aligned} \quad (7)$$

У разі застосування трансформатора $Y_0/\Delta-11$ дійсна та уявна складові фазних струмів вторинної обмотки визначатимуться як:

$$\begin{aligned} I'_a &= \frac{\sqrt{3}U_1}{2}(b_{CA} - b_{BC}); \quad I''_a = \frac{3U_1}{2} \left(b_{AB} + \frac{b_{AB} + b_{BC} + b_{CA}}{3} \right); \\ I'_b &= \frac{\sqrt{3}U_1}{2}(b_{AB} - b_{CA}); \quad I''_b = \frac{3U_1}{2} \left(b_{BC} + \frac{b_{AB} + b_{BC} + b_{CA}}{3} \right); \end{aligned} \quad (8)$$

$$I'_c = \frac{\sqrt{3}U_1}{2}(b_{BC} - b_{AB}); I''_c = \frac{3U_1}{2}\left(b_{CA} + \frac{b_{AB} + b_{BC} + b_{CA}}{3}\right).$$

В табл. 2, 3 і 4 наведено результати розрахунку несиметричного режиму за наявності навантажень на двох фазах BC і CA і відсутності навантаження на фазі CA , а також значення компенсаційних струмів фаз, які повинні бути сформовані СТАТКОМ на вторинних обмотках трансформаторів $Y_0/Y-12$ та $Y_0/\Delta-11$ для симетрування навантажень і повної компенсації реактивної потужності, які розраховані відповідно за струмом \dot{I}_2 і провідностями \underline{Y}_2 та \underline{Y}_{21} .

Таблиця 2

Струми навантаження і компенсаційні струми СТАТКОМ, що розраховані за \dot{I}_2

Фаза	Струми фаз несиметричного навантаження, А	Струми фаз СТАТКОМ з трансформатором $Y_0/Y-12$, А	Струми фаз СТАТКОМ з трансформатором $Y_0/\Delta-11$, А
A (a)	10,5 - j63,3	34,4 + j63,3	21,4 + j31,0
B (b)	58,0 - j26,1	-13,0 + j26,1	-34,4 + j53,5
C (c)	66,4 - j85,8	-21,4 + j85,8	13,0 + j90,7

Таблиця 3

Струми навантаження і компенсаційні струми СТАТКОМ, що розраховані за \underline{Y}_2

Фаза	Струми фаз несиметричного навантаження, А	Струми фаз СТАТКОМ з трансформатором $Y_0/Y-12$, А	Струми фаз СТАТКОМ з трансформатором $Y_0/\Delta-11$, А
A (a)	10,5 - j63,3	34,5 + j63,3	21,2 + j31,2
B (b)	58,0 - j26,1	-13,3 + j26,7	-34,5 + j54,3
C (c)	66,4 - j85,8	-21,2 + j86,5	13,3 + j91,0

Таблиця 4

Струми навантаження і компенсаційні струми СТАТКОМ, що розраховані за \underline{Y}_{21}

Фаза	Струми фаз несиметричного навантаження, А	Струми фаз СТАТКОМ з трансформатором $Y_0/Y-12$, А	Струми фаз СТАТКОМ з трансформатором $Y_0/\Delta-11$, А
A (a)	10,5 - j63,3	37,2 + j62,2	22,5 + j27,7
B (b)	58,0 - j26,1	-14,7 + j23,2	-37,2 + j53,1
C (c)	66,4 - j85,8	-22,5 + j87,6	14,7 + j92,1

Необхідно відмітити, що для трансформатора $Y_0/Y-12$ наведені в таблицях значення струму первинної та приведенного струму вторинної обмоток однакові. Для трансформатора $Y_0/\Delta-11$ в таблицях наведено значення приведенного вторинного струму, а значення струму, що споживається первинною обмоткою з мережі, дорівнює первинному струму трансформатора $Y_0/Y-12$.

З наведених таблиць випливає, що значення струмів фаз, що розраховані за різними умовами симетрування, в цілому зберігаючи характер, відрізняються. Це приводить до різної точності симетрування навантажень з використанням керування за збуренням. Причому точність симетрування залежить від характеру статичних характеристик вузлів навантажень. Для споживачів, які характеризуються лінійними статичними характеристиками $P(U)$, $Q(U)$, кращими є алгоритми з використанням \dot{I}_2 та \underline{Y}_2 , за яких коефіцієнт зворотної послідовності струму, відповідно, становить $K_{2I} \approx 0$ та $K_{2I} \approx 0,8\%$. Однак за квадратичних характеристик $P(U)$, $Q(U)$ застосування цих умов приводить до істотних помилок $K_{2I} \approx 9\%$ для наведеного прикладу з початковою несиметрією $K_{2I} \approx 47\%$ і відносним опором мережі 0,02 (визначається як відношення повних потужностей

навантаження і короткого замикання). Алгоритм з використанням Y_{21} забезпечує помилку $K_{2I} \approx 6\%$ та $K_{2J} \approx 4\%$, відповідно, за лінійних та квадратичних статичних характеристик навантаження $P(U)$, $Q(U)$.

У разі часткової компенсації реактивної потужності помилки симетрування, зумовлені впливом статичних характеристик навантажень, зменшуються. Наприклад, якщо задати $b_{вх} = 0,5b_1$, то застосування алгоритму з використанням Y_{21} за лінійних та квадратичних статичних характеристик навантаження $P(U)$, $Q(U)$ з керуванням за збуренням забезпечує помилку, відповідно, $K_{2I} \approx 2\%$ та $K_{2J} \approx 1,5\%$.

Висновки

Отримано умови керування СТАТКОМ з використанням комплексного струму та комплексних провідностей зворотної послідовності навантаження. Для керування СТАТКОМ можна використати різні умови керування за збуренням. Вибір тієї чи іншої умови залежить від статичних характеристик вузлів навантажень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шидловский, А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях [Текст] / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. — К. : Наукова думка, 1985. — 268 с.
2. Kundur, R. Power System Stability and Control / Kundur, R. — New York etc., McGraw-Hill, 1994. — 1176 p.
3. Варецький, Ю. О. Компенсація несиметрії статичними компенсаторами в мережах живлення змінних навантажень / Ю. О. Варецький // Технічна електродинаміка. — 1998. — № 2. — С. 66—70.
4. Николаев, А. А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи: автореф. дис. канд. техн. наук. / А. А. Николаев. — Магнитогорск, 2009. — 20 с. — Режим доступа : <http://tekhnosfera.com/view/10225/a/#?page=17>.
5. Кочкин, В. И. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий / В. И. Кочкин, О. П. Нечаев. — М. : изд-во НЦ ЭНАС, 2002. — 248 с.
6. Hingorani, N. G. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems / Hingorani N. G., Gyugyi L. — IEEE Press book, 2000. — 432 p.
7. Лоскутов А. Б. Модель многоуровневого каскадного инвертора для компенсации реактивной мощности и мощности искажений в сетях с выпрямительной нагрузкой / А. Б. Лоскутов, Б. Ю. Алтунин, И. А. Карнавский // PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE. — 2011. — 2 (16). — С. 32—38.
8. Алтунин Б. Ю. Имитационная модель системы управления СТАТКОМ для симметрирования сетевых токов / Б. Ю. Алтунин, И. А. Карнавский, А. А. Кралин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. — 2012. — № 4 (97). — С. 232—236.
9. Кузьмин С. В. Принцип построения и математическое моделирование статического компенсатора реактивной мощности в тяговой сети переменного тока / С. В. Кузьмин // Известия ПГУПС. — 2011. — № 3. — С. 70—77.
10. Singh B. Design and control of a DSTATCOM for power quality improvement using cross correlation function approach / Bhim Singh, Sabha Raj Arya // International Journal of Engineering, Science and Technology. — 2012. — Vol. 4, No. 1. — P. 74—86.
11. Бурбело М. Й. Аналіз умов симетрування навантажень з використанням компенсаційних симетрувальних установок [Текст] / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко // Енергетика та електрифікація. — 2009. — № 5. — С. 3—6.
12. Бурбело М. Й. Оптимальне за швидкодією керування компенсаційними симетрувальними пристроями / М. Й. Бурбело, Ю. П. Войтюк // Гірнична електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. Дніпропетровськ НГУ. — 2012. — Вип. 88. — С. 3—5.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 2.02.2016

Бурбело Михайло Йосипович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Войтюк Юрій Петрович — завідувач лабораторіями кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту;

Лобода Юрій Васильович — асистент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

M. Yo. Burbelo¹
Yu. P. Voitiuk¹
Yu. V. Loboda¹

Terms of Balancing Electrical Loads Distribution Network Using STATCOM

¹Vinnytsia National Technical University

The article received load balancing terms provided by means of a STATCOM using complex conduction current and negative sequence load balancing errors and investigated for various static characteristics load voltage in case of management for the disturbance.

Keywords: balancing loads, driving conditions in disturbance, static characteristics load voltage nodes.

Burbelo Mykhailo Yo. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Voitiuk Yurii P. — Head of the Laboratories of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management;

Loboda Yurii V. — Assistant of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management

М. И. Бурбело¹
Ю. П. Войтюк¹
Ю. В. Лобода¹

Условия симметрирования электрических нагрузок распределительных сетей с помощью СТАТКОМ

¹Винницкий национальный технический университет

Получены условия симметрирования нагрузок с помощью СТАТКОМ с использованием комплексных тока и проводимости обратной последовательности нагрузки и исследованы ошибки симметрирования при различных статических характеристиках нагрузок по напряжению в случае управления по возмущению.

Ключевые слова: симметрирование нагрузок, условия управления по возмущению, статические характеристики узлов нагрузки по напряжению.

Бурбело Михаил Иосифович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Войтюк Юрий Петрович — заведующий лабораториями кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента;

Лобода Юрий Васильевич — ассистент кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента