

УДК 621.316.7

М. Й. Бурбело, д. т. н., проф.; О. В. Бабенко; О. М. Музика, М. В. Никитенко
СИМЕТРУВАННЯ СТРУМІВ І НАПРУГ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ
МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЕНСАЦІЙНИХ УСТАНОВОК ЗА
УМОВИ НЕСИМЕТРИЧНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ

Розглянуто симетрування струмів і напруг вузлів електричних мереж, запропоновано критерій симетрування за умови несиметричного джерела живлення та закон керування, що йому відповідає.

Ключові слова: симетрування, несиметрія джерела.

Суть проблеми

Забезпечення якості електроенергії на достатньому рівні – одне з головних завдань електроенергетики України. Серед показників якості важливе місце посідає рівень несиметрії напруг електричних мереж. Несиметрія напруг негативно впливає на роботу споживачів, оскільки призводить до зниження надійності й економічності роботи електроприймачів (асинхронних двигунів, систем освітлення, конденсаторних установок, пристроїв автоматики та ін.), до збільшення втрат потужності в лініях електропередач і трансформаторах та зменшення їх пропускної здатності [1].

Для симетрування навантажень за симетричного джерела напруги використовують критерій:

$$\underline{Y}_{21} = 0, \quad (1)$$

де $\underline{Y}_{21} = -(\underline{Y}_{BC} + a\underline{Y}_{CA} + a^2\underline{Y}_{AB})$ – комплексна провідність зворотної послідовності навантаження; \underline{Y}_{BC} , \underline{Y}_{CA} , \underline{Y}_{AB} – комплексні провідності фаз навантаження; $a = e^{j120^\circ}$ – оператор повороту трифазної системи. У цьому випадку напруга та струм зворотної послідовності у вузлі навантаження будуть рівні нулю ($U_2 = 0$, $I_2 = 0$).

За несиметричного джерела електрорушійної сили (ЕРС) у разі застосування критерію (1) відбувається неповне симетрування і залишкові напруга та струм зворотної послідовності у вузлі приєднання навантаження відповідно будуть:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E}_2}{1 + \underline{Y}_{22}\underline{Z}}; \quad \dot{I}_2 = \dot{U}_2\underline{Y}_{22},$$

де \dot{E}_2 – ЕРС зворотної послідовності джерела; \underline{Z} – комплексний опір лінії електропередач; $\underline{Y}_{22} = k_{21}(\underline{Y}_{BC} + \underline{Y}_{CA} + \underline{Y}_{AB})$ – комплексна провідність зворотної послідовності навантаження; k_{21} – коефіцієнт, що характеризує співвідношення провідності зворотної та прямої послідовностей.

В [2] отримано критерій симетрування напруги з використанням компенсаційних симетрувальних установок (СУ) за несиметричного джерела живлення:

$$\underline{Y}_{21} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} \left(\underline{Y}_{11} + \frac{1}{\underline{Z}} \right),$$

де \dot{E}_1 – ЕРС прямої послідовності джерела; $\underline{Y}_{11} = \underline{Y}_{BC} + \underline{Y}_{CA} + \underline{Y}_{AB}$ – комплексна провідність прямої послідовності навантаження.

Недоліком використання цього критерію є виникнення значних додаткових втрат активної потужності в лінії електропередач, що зумовлені збільшенням струму зворотної послідовності в результаті симетрування напруги.

Метою цієї роботи є аналіз можливості застосування критеріїв симетрування для

керування компенсаційними симетрувальними установками за несиметричного джерела живлення.

Обґрунтування результатів

Зменшення втрат в лініях після симетрування напруги з використанням компенсаційних СУ можливе, якщо використати критерій:

$$\underline{Y}_{21} = k \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} \left(\underline{Y}_{11} + \frac{1}{\underline{Z}} \right), \quad (2)$$

де k – дійсний коефіцієнт, значення якого задається в залежності від наявного рівня несиметрії напруг до регулювання і допустимого рівня несиметрії напруг після регулювання. Коефіцієнт k визначається з дотриманням умови:

$$k = 1 - \frac{\dot{U}_{2\text{доп}}}{\dot{E}_2}, \quad (3)$$

де $\dot{U}_{2\text{доп}}$ – допустиме значення напруги зворотної послідовності у вузлі електричної мережі.

Після підстановки (2) у вирази для напруги та струму зворотної послідовності у вузлі приєднання несиметричного навантаження [3]:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E}_2 [1 + \underline{Y}_{11} \underline{Z}] - \dot{E}_1 \underline{Y}_{21} \underline{Z}}{[1 + \underline{Y}_{22} \underline{Z}] [1 + \underline{Y}_{11} \underline{Z}] - \underline{Z}^2 \underline{Y}_{21} \underline{Y}_{12}};$$

$$\dot{i}_2 = \frac{\dot{E}_1 \underline{Y}_{21} + \dot{E}_2 \underline{Y}_{22} + \dot{E}_2 \underline{Z} (\underline{Y}_{22} \underline{Y}_{11} - \underline{Y}_{12} \underline{Y}_{21})}{[1 + \underline{Y}_{22} \underline{Z}] [1 + \underline{Y}_{11} \underline{Z}] - \underline{Z}^2 \underline{Y}_{21} \underline{Y}_{12}},$$

де \underline{Y}_{21} , \underline{Y}_{12} , \underline{Y}_{22} – провідності несиметричного навантаження, можна отримати формули для визначення напруги та струму зворотної послідовності, що виникають в результаті симетрування за критерієм (2), у вигляді:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E}_2 (1 - k)}{1 + \underline{Y}_{22} \underline{Z} - \underline{Y}_{12} \underline{Z}}; \quad \dot{i}_2 = k \frac{\dot{E}_2}{\underline{Z}} + \dot{U}_2 \underline{Y}_{22}.$$

Струм зворотної послідовності викликає додаткові втрати потужності в лініях електропередач, що зумовлені несиметрією навантаження.

Під час регулювання необхідно задати коефіцієнт k , для вибору якого з урахуванням (3) пропонується застосувати такий алгоритм:

$$k = \begin{cases} 0 & \text{для } k_{2E} < 2\%; \\ 1 - \frac{U_{2\text{доп}}}{E_2} & \text{для } k_{2E} \geq 2\%, \end{cases}$$

де k_{2E} – коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності джерела живлення. За коефіцієнта зворотної послідовності напруги джерела живлення $k_{2E} \leq 4\%$ і необхідності забезпечення допустимого значення напруги зворотної послідовності у вузлі навантаження (2% від напруги прямої послідовності), коефіцієнт k необхідно прийняти рівним 0,5.

Закон керування компенсаційною СУ, що відповідає критерію (1), має вигляд [1]:

$$b_{BC} = \frac{1}{3} [b_{11} - b_{\text{ex}} - 2b_{21}];$$

$$b_{CA} = \frac{1}{3} [b_{11} - b_{ex} + b_{21} + \sqrt{3}g_{21}]; \quad (4)$$

$$b_{AB} = \frac{1}{3} [b_{11} - b_{ex} + b_{21} - \sqrt{3}g_{21}].$$

Закон керування компенсаційною СУ, що відповідає критерію (2), має такий вигляд [4]:

$$b_{BC} = \frac{1}{3} [(b_{11} - b_{ex})(1 - 2k \cdot k'_{2E}) - 2b_{21} + 2k \cdot k'_{2E}(b_{11} + b_l) + 2k \cdot k''_{2E}(g_{11} + g_l)];$$

$$b_{CA} = \frac{1}{3} [(b_{11} - b_{ex})(1 + k \cdot k'_{2E} - \sqrt{3}k \cdot k''_{2E}) + b_{21} + \sqrt{3}g_{21} - k(k'_{2E} - \sqrt{3}k''_{2E})(b_{11} + b_l) - k(k''_{2E} + \sqrt{3}k'_{2E})(g_{11} + g_l)]; \quad (5)$$

$$b_{AB} = \frac{1}{3} [(b_{11} - b_{ex})(1 + k \cdot k'_{2E} + \sqrt{3}k \cdot k''_{2E}) + b_{21} - \sqrt{3}g_{21} - k(k'_{2E} + \sqrt{3}k''_{2E})(b_{11} + b_l) - k(k''_{2E} - \sqrt{3}k'_{2E})(g_{11} + g_l)],$$

де $k'_{2E} = \text{Re}\left(\frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1}\right)$, $k''_{2E} = \text{Im}\left(\frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1}\right)$ – відповідно дійсна й уявна складові коефіцієнта несиметрії

напруги по зворотній послідовності джерела; $g_l = \text{Re}(\underline{Z}^{-1})$, $b_l = \text{Im}(\underline{Z}^{-1})$ – відповідно дійсна й уявна складові повної провідності лінії електропередач.

На рис. 1 показано результати проведеного моделювання симетрування навантаження з використанням законів (4) та (5), в яких як інформативні параметри замість \underline{Y}_{11} , \underline{Y}_{21} використано дійсні та уявні складові провідностей $\underline{Y}_1 = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1}$ та $\underline{Y}_2 = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}$, відповідно g_1 , b_1 та g_2 , b_2 , що значно спрощує процес вимірювання і не приводить до суттєвого збільшення помилок симетрування.

Моделювання проводилось за несиметричного навантаження фаз: $S_{AB} = 100$ кВА, $S_{BC} = 1100$ кВА, $S_{CA} = 1100$ кВА; коефіцієнт потужності навантаження $\cos\varphi = 0,8$; напруга мережі живлення 10 кВ; лінія електропередач має довжину 1 км і характеризується комплексним опором $\underline{Z} = 0.428 + j0.354$ Ом.

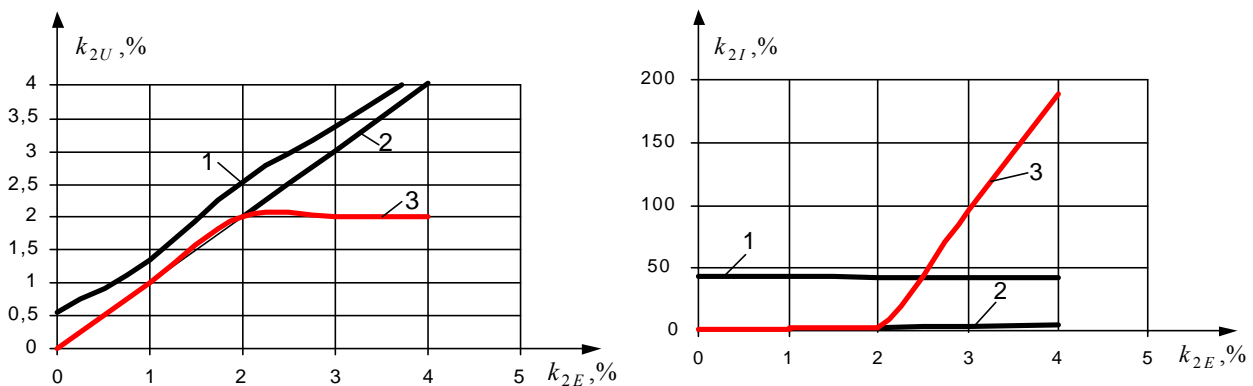


Рис. 1. Залежності коефіцієнта зворотної послідовності напруги та струму від коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності

Зображені на рис. 2 залежності характеризують такі режими: 1 – нерегульований режим; 2 – режим симетрування з використанням закону (4); 3 – режим симетрування з використанням закону (5).

Характер залежностей 1 і 2 (рис. 1а) дозволяє стверджувати, що відсутність регулювання і використання закону керування (4) призводить до недопустимих значень коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності. Залежність 3 (рис. 1б) свідчить, що за використання закону керування (5) втрати активної потужності в лінії електропередач різко зростають при збільшенні несиметрії напруги джерела.

Для більшої ілюстративності проаналізуємо залежності вартості додаткових втрат електричної енергії в лінії електропередач (рис. 2), що зумовлені несиметрією струмів. Розглянуто випадок, коли несиметрія струмів спостерігається протягом трьох тисяч годин на рік, що відповідає двозмінній роботі підприємства, а вартість електроенергії становить 0,3 грн/кВт·год (залежності вартості річних втрат побудовані для наведеного вище прикладу).

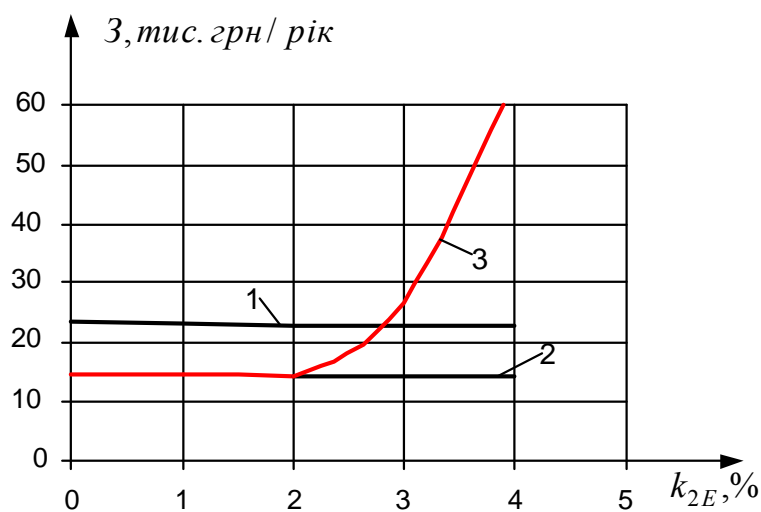


Рис. 2. Залежності вартості річних втрат активної енергії в лінії електропередач від коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності

Як видно з рис. 2, за несиметричного джерела, коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності якого не перевищує допустимого значення, для симетрування навантаження доцільно використовувати закон керування (4), оскільки він простіший за реалізацією порівняно із законом (5). За несиметрії напруги джерела, що перевищує 2%, коли можливим є використання лише закону симетрування (5), вартість втрат активної потужності зростає і значно перевищує вартість втрат за нерегульованого режиму та за режиму симетрування з використанням закону (4). Однак ці режими за несиметрії напруги, що перевищує допустиму ГОСТом 13109-97 норму (2%), призводять до значних збитків за рахунок зменшення надійності електроприймачів, зокрема електроприводів, які можуть істотно перевищувати збитки від втрат потужності. Тому в такому випадку використання закону керування (5) може бути економічно вигідним.

Висновки

За несиметричного джерела, значення коефіцієнта зворотної послідовності напруги якого перевищує допустиму ГОСТ 13109-97 норму (2%), найефективніше для симетрування напруги за допомогою компенсаційної симетрувальної установки використати критерій, що враховує несиметрію напруги джерела живлення. Його використання дозволяє забезпечити

істотне зменшення несиметрії навантажень за несиметричного джерела живлення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Бурбело М. Й., Бабенко О. В. Формування математичних моделей вимірювальних систем установок симетрування // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 6. – С. 242 – 251.
3. Кузнецов В. Г. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с несимметричными нагрузками // Электричество. – 1983. – № 2. – С. 64 – 67.
4. Бабенко О. В. Квазірівноважені вимірювальні канали для установок симетрування навантажень вузлів електричних мереж: Автореф. дис. ... кандидата техн. наук / ВНТУ. – Вінниця, 2007. – 20 с.

Бурбело Михайло Йосипович – завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту;

Бабенко Олексій Вікторович – асистент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту;

Музика Оксана Миколаївна – студент інституту електроенергетики та електромеханіки;

Никитенко Максим Васильович – студент інституту електроенергетики та електромеханіки.

Вінницький національний технічний університет.