

УДК 621.316.7:621.317.73

О. В. Бабенко, канд. техн. наук; С. А. Мусійчук, студ.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ СИМЕТРУВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЗА НЕСИМЕТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Розроблено математичну модель процесу регулювання симетрувального трансформатора із схемою з'єднання обмоток «трикутник–зигзаг», що передбачає можливість отримання інформаційних параметрів на стороні низької напруги трансформатора і враховує вплив несиметричного навантаження.

### Стан проблеми і постановка завдання

Несиметрія напруги згідно з ГОСТ 13109-97 є одним з важливих показників якості електроенергії. В [1–2] досліджувались, як засоби симетрування напруг симетрувальні трансформатори зі схемою з'єднання обмоток «трикутник–зигзаг». Перевагою використання таких трансформаторів є відсутність напруги нульової послідовності в результаті здійснення пофазового регулювання і, відповідно, відхилень фазних напруг.

Системою рівнянь, за якою визначаються напруги прямої  $\dot{U}_1$  та зворотної  $\dot{U}_2$  послідовності на вторинній обмотці симетрувального трансформатора, є

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} e^{j60^\circ} \underline{K}_1 & \underline{K}_3 \\ \underline{K}_2 & e^{-j60^\circ} \underline{K}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1V} \\ \dot{U}_{2V} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $\underline{K}_1 = -\frac{1}{3}(k_A + k_B + k_C)$ ;  $\underline{K}_2 = -\frac{1}{3}(k_A + ak_B + a^2k_C)$ ;  $\underline{K}_3 = -\frac{1}{3}(k_A + a^2k_B + ak_C)$  – комплексні коефіцієнти передавання трансформатора, тут  $k_A, k_B, k_C$  – коефіцієнти трансформації, що враховують половину витків вторинної обмотки;  $\dot{U}_{1V} = \dot{U}_{1B} - \dot{I}_{1Л} \frac{Z_K}{3}$ ;  $\dot{U}_{2V} = \dot{U}_{2B} - \dot{I}_{2Л} \frac{Z_K}{3}$ ;  $\dot{U}_{1B}, \dot{U}_{2B}$  – напруги прямої та зворотної послідовності первинної обмотки трансформатора;  $\dot{I}_{1Л}, \dot{I}_{2Л}$  – комплексні лінійні струми прямої та зворотної послідовностей на стороні високої напруги симетрувального трансформатора;  $Z_K$  – опір короткого замикання трансформатора, що враховує половину витків вторинної обмотки і еквівалентний опору короткого замикання трансформатора із з'єднанням обмоток за схемою «трикутник/зірка з нульовим проводом».

З (1) випливає, що умовою симетрування напруги є

$$-3 \cdot \underline{K}_2 \cdot \dot{U}_{1V} - 3 \cdot e^{-j60^\circ} \underline{K}_1 \cdot \dot{U}_{2V} = 0. \quad (2)$$

Величини  $\dot{U}_{1V}$  та  $\dot{U}_{2V}$  є інформативними параметрами сторони високої напруги трансформатора, безпосереднє вимірювання яких є складним, оскільки вимагає використання вимірювальних трансформаторів напруги.

Метою роботи є розроблення математичної моделі керування симетрувальним трансформатором зі схемою з'єднання обмоток «трикутник–зигзаг» з інформативними параметрами, що можуть бути отримані на стороні низької напруги трансформатора. До того ж, для підвищення точності симетрування, необхідно забезпечити врахуванням впливу струму несиметричного навантаження.

### Обґрунтування результатів

Відповідно до (1), параметри  $\dot{U}_{1V}$  та  $\dot{U}_{2V}$  пропонується отримати з системи рівнянь

$$\begin{cases} -3e^{j60^\circ} \underline{K}'_1 \cdot \dot{U}'_{1V} - 3\underline{K}'_3 \cdot \dot{U}'_{2V} = \dot{U}'_{1H}; \\ -3\underline{K}'_2 \cdot \dot{U}'_{1V} - 3e^{-j60^\circ} \underline{K}'_1 \cdot \dot{U}'_{2V} = \dot{U}'_{2H}, \end{cases} \quad (3)$$

для чого необхідно визначити напруги прямої та зворотної послідовностей (відповідно  $\dot{U}'_{1H}$  та  $\dot{U}'_{2H}$ ) на стороні низької напруги трансформатора. В системі рівнянь (3)  $\underline{K}'_1$ ,  $\underline{K}'_2$ ,  $\underline{K}'_3$  – комплексні коефіцієнти передавання трансформатора на момент регулювання.

Після здійснення нескладних перетворень система (3) набуде вигляду

$$\begin{cases} U'_{1V}a - U''_{1V}b + U'_{2V}c - U''_{2V}d = U'_{1H}; \\ U'_{1V}b + U''_{1V}a + U'_{2V}d + U''_{2V}c = U''_{1H}; \\ U'_{1V}c + U''_{1V}d + U'_{2V}a + U''_{2V}b = U'_{2H}; \\ -U'_{1V}d + U''_{1V}c + U'_{2V}b + U''_{2V}a = U''_{2H}, \end{cases} \quad (4)$$

де  $U'_{1V}$ ,  $U'_{2V}$  – дійсні складові параметрів  $\dot{U}'_{1V}$  та  $\dot{U}'_{2V}$ ;  $U''_{1V}$ ,  $U''_{2V}$  – уявні складові відповідних параметрів;  $a = \frac{3}{2} + \frac{1}{2}\Delta k'_A + \frac{1}{2}\Delta k'_B + \frac{1}{2}\Delta k'_C$ ;  $b = \frac{3\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}\Delta k'_A + \frac{\sqrt{3}}{2}\Delta k'_B + \frac{\sqrt{3}}{2}\Delta k'_C$ ;

$c = \Delta k'_A - \frac{1}{2}\Delta k'_B - \frac{1}{2}\Delta k'_C$ ;  $d = -\frac{\sqrt{3}}{2}\Delta k'_B + \frac{\sqrt{3}}{2}\Delta k'_C$ , де  $\Delta k'_A$ ,  $\Delta k'_B$ ,  $\Delta k'_C$  – прирости коефіцієнтів трансформації на момент регулювання, які, разом з дійсними ( $U'_{1H}$ ;  $U'_{2H}$ ) та уявними ( $U''_{1H}$ ;  $U''_{2H}$ ) складовими напруг, відповідно, прямої та зворотної послідовностей, є інформативними параметрами сторони низької напруги симетрувального трансформатора.

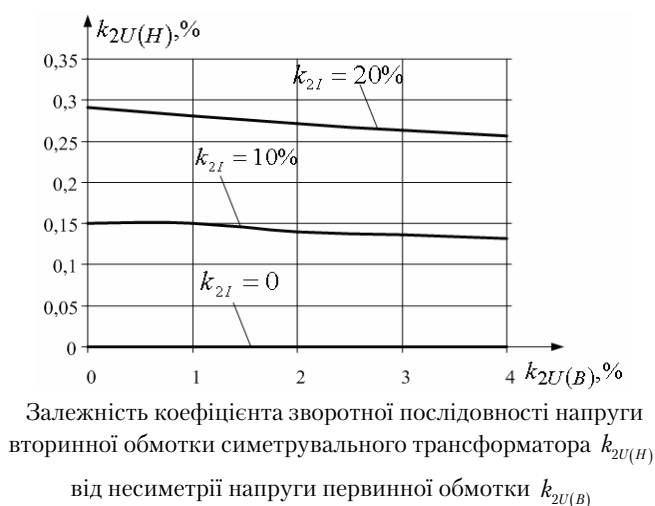
Знайдені з рівнянь (4) параметри  $U'_{1V}$ ,  $U'_{2V}$ ,  $U''_{1V}$ ,  $U''_{2V}$  використовуються в системі рівнянь (5), отриманої з (2). Результатом розв'язання цієї системи є  $\Delta k_A$ ,  $\Delta k_B$ ,  $\Delta k_C$  – прирости коефіцієнтів трансформації, які необхідно забезпечити для забезпечення трифазного регулювання симетрувального трансформатора із схемою з'єднання обмоток «трикутник–зигзаг». Інформативні параметри сторони низької напруги трансформатора – складові напруг прямої та зворотної послідовності нескладно можуть бути отримані після вимірювання фазних напруг з подальшим їх цифровим перетворенням.

Для врахування несиметрії навантажень немає необхідності вимірювати струми прямої та зворотної послідовностей на сторонах високої чи низької напруги симетрувального трансформатора. Струми прямої та зворотної послідовності первинної обмотки трансформатора містяться у виразах для визначення параметрів  $\dot{U}'_{1V}$  та  $\dot{U}'_{2V}$ . Таким чином, вимірюючи напруги прямої та зворотної послідовності на стороні низької напруги симетрувального трансформатора, отримуємо інформацію, необхідну для реалізації симетрування напруг в мережі споживача.

$$\begin{cases} \Delta k_A \left( U'_{1V} + \frac{1}{2}U'_{2V} + \frac{\sqrt{3}}{2}U''_{2V} \right) + \Delta k_B \left( -\frac{1}{2}U'_{1V} - \frac{\sqrt{3}}{2}U''_{1V} + \frac{1}{2}U'_{2V} + \frac{\sqrt{3}}{2}U''_{2V} \right) + \\ + \Delta k_C \left( -\frac{1}{2}U'_{1V} + \frac{\sqrt{3}}{2}U''_{1V} + \frac{1}{2}U'_{2V} + \frac{\sqrt{3}}{2}U''_{2V} \right) = -\frac{3}{2}U'_{2V} - \frac{3\sqrt{3}}{2}U''_{2V}; \\ \Delta k_A \left( U''_{1V} - \frac{\sqrt{3}}{2}U'_{2V} + \frac{1}{2}U''_{2V} \right) + \Delta k_B \left( \frac{\sqrt{3}}{2}U'_{1V} - \frac{1}{2}U''_{1V} - \frac{\sqrt{3}}{2}U'_{2V} + \frac{1}{2}U''_{2V} \right) + \\ + \Delta k_C \left( -\frac{\sqrt{3}}{2}U'_{1V} - \frac{1}{2}U''_{1V} - \frac{\sqrt{3}}{2}U'_{2V} + \frac{1}{2}U''_{2V} \right) = \frac{3\sqrt{3}}{2}U'_{2V} - \frac{3}{2}U''_{2V}; \\ \Delta k_A + \Delta k_B + \Delta k_C = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Розв'язання системи (5) забезпечує отримання параметрів регулювання напруги, однак допускається, що струми навантаження після симетрування не зміняться. На рисунку показані результати моделювання симетрування напруги з використанням вищеподаної моделі і за різної несиметрії навантаження, що характеризується коефіцієнтом зворотної послідовності струму  $k_{2U} = (I_2/I_1)100\%$ , де  $I_1$  та  $I_2$  — діючі значення струмів, відповідно, прямої та зворотної послідовності струму.

З рисунку випливає, що знайдені інформативні параметри, забезпечують ефективне симетрування напруги за значної несиметрії струму навантаження



Залежність коефіцієнта зворотної послідовності напруги вторинної обмотки симетрувального трансформатора  $k_{2U(H)}$  від несиметрії напруги первинної обмотки  $k_{2U(B)}$

### Висновки

Розроблено математичну модель процесу регулювання симетрувального трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «трикутник–зигзаг», яка, на відміну від попередніх, передбачає необхідність вимірювання значень інформативних параметрів — дійсних та уявних складових напруг прямої та зворотної послідовності на стороні низької напруги. Це, по-перше, зручніше з точки зору практичної реалізації, оскільки не потребує використання вимірювальних трансформаторів напруги; по-друге, дозволяє враховувати несиметрію струму навантаження без вимірювання струмів. Урахування струму навантаження за умови здійснення вимірювання параметрів режиму на стороні високої напруги симетрувального трансформатора можливе лише за використання вимірювальних трансформаторів струму.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Застосування багатоцільової оптимізації для симетрування та зменшення відхилень напруг в електричних мережах / [М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький, О. В. Бабенко, О. В. Салій] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 6. — С. 76—79.
2. Математична модель процесу регулювання симетрувального трансформатора [Електронний ресурс] / [М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький, О. В. Бабенко, О. В. Салій] // Наукові праці ВНТУ. — 2009. — № 1. — 4 с. — Режим доступу : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/>.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Стаття надійшла до редакції 10.10.11  
Рекомендована до друку 24.11.11

**Бабенко Олексій Вікторович** — доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту;

**Муційчук Сергій Анатолійович** — студент Інституту електроенергетики та електромеханіки.

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця