

УДК 621.316.7:621.317.7

М. Й. Бурбело, д. т. н., проф.; А. М. Волоцький; О. В. Бабенко, к. т. н.; О. В. Салій

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ СИМЕТРУВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Синтезовано математичну модель управління симетрувальним трансформатором із схемою з'єднання обмоток «трикутник – зигзаг» при повздовжній несиметрії, що дозволяє досягти високої точності симетрування напруги й враховує вплив загальнопромислового навантаження.

Ключові слова: симетрувальний трансформатор, "трикутник – зигзаг", точність симетрування, струм навантаження, коефіцієнт передавання, трифазове регулювання, коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю.

Стан проблеми і постановка завдання

Однією з важливих характеристик якості електроенергії є несиметрія напруг. У [1 – 3] досліджувались симетрувальні трансформатори із схемою з'єднання обмоток "трикутник – зірка" як засоби симетрування напруг. Математичні моделі, запропоновані в цих роботах, дозволили виявити низку переваг використання симетрувального трансформатора для підвищення якості напруги в системах електропостачання порівняно з іншими типами симетрувальних установок. Однак недоліком використання симетрувального трансформатора із схемою з'єднання обмоток "трикутник – зірка" є поява напруги нульової послідовності в результаті здійснення пофазового регулювання і, відповідно, відхилень напруг, що знижують ефективність симетрування. Більш ефективним, на нашу думку, є використання симетрувальних трансформаторів із схемою з'єднання обмоток «трикутник – зигзаг» (рис. 1), в яких зазначених недоліків немає.

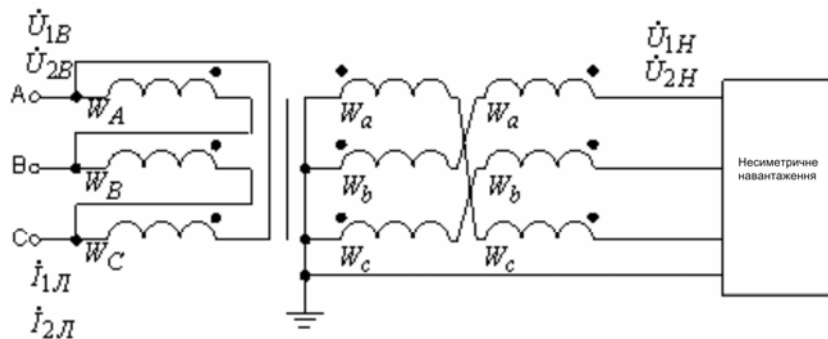


Рис. 1. Схема з'єднання обмоток симетрувального трансформатора

Спрощену умову симетрування напруг з використанням симетрувального трансформатора із схемою з'єднання обмоток «трикутник – зигзаг» обґрунтовано в [4]:

$$\left(\dot{U}_{1B} - \dot{I}_{1L} \frac{Z_K}{3} \right) \cdot \underline{K}_2 + \left(\dot{U}_{2B} - \dot{I}_{2L} \frac{Z_K}{3} \right) \cdot \underline{K}_1 e^{-j60^\circ} = 0, \quad (1)$$

де $\underline{K}_1 = -\frac{1}{3}(k_A + k_B + k_C)$; $\underline{K}_2 = -\frac{1}{3}(k_A + ak_B + a^2k_C)$ – комплексні коефіцієнти передавання симетрувального трансформатора, k_A , k_B , k_C – фазні коефіцієнти передавання трансформатора, що враховують половину витків вторинної обмотки, з'єднаної в „зигзаг”; \dot{U}_{1B} , \dot{U}_{2B} – комплексні лінійні напруги прямої та зворотної послідовностей первинної обмотки трансформатора; \dot{I}_{1L} , \dot{I}_{2L} – комплексні лінійні струми прямої та зворотної послідовностей на стороні високої напруги симетрувального трансформатора; Z_K – опір

Наукові праці ВНТУ, 2009, № 1 1

короткого замикання трансформатора.

У [4] були отримані також умови трифазового регулювання симетрувальним трансформатором:

$$\begin{cases} (1 + \Delta k_A)a + (1 + \Delta k_B)b + (1 + \Delta k_C)c = 0; \\ (1 + \Delta k_A)d + (1 + \Delta k_B)f + (1 + \Delta k_C)g = 0; \\ \Delta k_A + \Delta k_B + \Delta k_C = \Delta k / 3, \end{cases} \quad (2)$$

де $\Delta k_A, \Delta k_B, \Delta k_C$ – прирости коефіцієнтів передавання для забезпечення трифазового регулювання; Δk – приріст середнього значення коефіцієнта передавання, що забезпечує зменшення відхилень напруг;

$$\begin{aligned} a &= u'_1 + \frac{1}{2}u'_2 + \frac{\sqrt{3}}{2}u''_2; & b &= -\frac{1}{2}u'_1 - \frac{\sqrt{3}}{2}u''_1 + \frac{1}{2}u'_2 + \frac{\sqrt{3}}{2}u''_2; & c &= -\frac{1}{2}u'_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}u''_1 + \frac{1}{2}u'_2 + \frac{\sqrt{3}}{2}u''_2; \\ d &= u''_1 + \frac{1}{2}u''_2 - \frac{\sqrt{3}}{2}u'_2; & f &= -\frac{1}{2}u''_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}u'_1 + \frac{1}{2}u''_2 - \frac{\sqrt{3}}{2}u'_2; & g &= -\frac{1}{2}u''_1 - \frac{\sqrt{3}}{2}u'_1 + \frac{1}{2}u''_2 - \frac{\sqrt{3}}{2}u'_2; \\ u'_1 + ju''_1 &= \dot{U}_{1B} - \dot{I}_{1Л} \frac{\underline{Z}_K}{3}, & u'_2 + ju''_2 &= \dot{U}_{2B} - \dot{I}_{2Л} \frac{\underline{Z}_K}{3} \end{aligned}$$

– значення вимірюваних величин.

Трифазове регулювання, що здійснюється відповідно до (2), задовольняє такі критерії

$$\dot{U}_{2H} \rightarrow \min; \Delta U_{\max(H)} \rightarrow \min,$$

де \dot{U}_{2H} – напруга зворотної послідовності на низькій стороні трансформатора; $\Delta U_{\max(H)}$ – максимальне відхилення фазної напруги на вторинній обмотці.

Умова (1) отримана для спрощеної схеми заміщення трансформатора, в якій знехтувано вплив коефіцієнтів трансформації фаз на значення струмів первинної обмотки.

У статті вирішується завдання синтезу уточнених математичних моделей керування симетрувальним трансформатором із схемою з'єднання обмоток «трикутник – зигзаг», що забезпечується врахуванням впливу струму несиметричного навантаження. Особливу цікавість викликає також оцінювання помилок симетрування в разі використання умов (1) та (2).

Обґрунтування результатів

З аналізу виразу для напруги вторинної обмотки трансформатора із схемою з'єднання "трикутник – зірка" (на прикладі напруги фази А) з урахуванням кола намагнічування [5] отримано:

$$\frac{\dot{U}_a}{k} = \dot{E}_{AB} - k\dot{I}_a(r_2 + jx_2), \quad (3)$$

де \dot{U}_a – комплексна фазна напруга вторинної обмотки трансформатора; $k = W_a/W_A$ – коефіцієнт трансформації; $\dot{E}_{AB} = m \cdot \dot{U}_{AB}$ – комплексна ЕРС первинної обмотки (тут $m \approx 1$); \dot{I}_a – комплексний фазний струм вторинної обмотки; r_2, x_2 – приведені активний і реактивний опори вторинної обмотки.

На основі виразів для трансформатора із схемою з'єднання "трикутник – зірка", використавши принцип суперпозиції, можна отримати вирази для фазних напруг трансформатора із схемою з'єднання обмоток "трикутник – зигзаг":

$$\dot{U}_A = \left(mk_A \dot{U}_{AB} - \frac{1}{2} k_A^2 \underline{Z}_K \dot{I}_a \right) - \left(mk_B \dot{U}_{BC} - \frac{1}{2} k_B^2 \underline{Z}_K \dot{I}_b \right);$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_B &= \left(mk_B \dot{U}_{BC} - \frac{1}{2} k_B^2 \underline{Z}_K \dot{I}_b \right) - \left(mk_C \dot{U}_{CA} - \frac{1}{2} k_C^2 \underline{Z}_K \dot{I}_c \right); \\ \dot{U}_C &= \left(mk_C \dot{U}_{CA} - \frac{1}{2} k_C^2 \underline{Z}_K \dot{I}_c \right) - \left(mk_A \dot{U}_{AB} - \frac{1}{2} k_A^2 \underline{Z}_K \dot{I}_a \right).\end{aligned}$$

Після виконання математичних перетворень умова симетрування напруг за допомогою симетрувального трансформатора із схемою з'єднання "трикутник – зигзаг" з урахуванням впливу струму навантаження (впливу коефіцієнтів трансформації фаз на значення струмів первинної обмотки) буде:

$$m\dot{U}_{1B} \underline{K}_2 + m\dot{U}_{2B} \underline{K}_1 e^{-j60^\circ} + \frac{1}{6 \cdot \sqrt{3}} \underline{Z}_K \left[k_A I_{AB} e^{-j30^\circ} + k_B I_{BC} e^{-j150^\circ} + k_C I_{CA} e^{j90^\circ} \right] = 0. \quad (4)$$

Аналіз (4) дозволив отримати умови трифазового регулювання симетрувального трансформатора:

$$\left\{ \begin{aligned} (1 + \Delta k_A)(-h' + k' + l') + (1 + \Delta k_B) \left(\frac{1}{2} h' + \frac{\sqrt{3}}{2} h'' + k' + n' \right) + (1 + \Delta k_C) \left(\frac{1}{2} h' + \frac{\sqrt{3}}{2} h'' + k' + p' \right) &= 0; \\ (1 + \Delta k_A)(-h'' + k'' + l'') + (1 + \Delta k_B) \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} h' + \frac{1}{2} h'' + k'' + n'' \right) + (1 + \Delta k_C) \left(\frac{\sqrt{3}}{2} h' + \frac{1}{2} h'' + k'' + p'' \right) &= 0; \\ \Delta k_A + \Delta k_B + \Delta k_C &= \Delta k, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

де $h' = \operatorname{Re}(m\dot{U}_{1B})$; $h'' = \operatorname{Im}(m\dot{U}_{1B})$; $k' = \operatorname{Re}(m\dot{U}_{2B} e^{j120^\circ})$; $k'' = \operatorname{Im}(m\dot{U}_{2B} e^{j120^\circ})$;

$$l' = \operatorname{Re} \left(\frac{\sqrt{3}}{6} \underline{Z}_K I_{AB} e^{j30^\circ} \right); \quad l'' = \operatorname{Im} \left(\frac{\sqrt{3}}{6} \underline{Z}_K I_{AB} e^{j30^\circ} \right);$$

$$n' = \operatorname{Re} \left(\frac{\sqrt{3}}{6} \underline{Z}_K I_{BC} e^{-j150^\circ} \right); \quad n'' = \operatorname{Im} \left(\frac{\sqrt{3}}{6} \underline{Z}_K I_{BC} e^{-j150^\circ} \right);$$

$$p' = \operatorname{Re} \left(\frac{\sqrt{3}}{6} \underline{Z}_K I_{CA} e^{j90^\circ} \right); \quad p'' = \operatorname{Im} \left(\frac{\sqrt{3}}{6} \underline{Z}_K I_{CA} e^{j90^\circ} \right).$$

На рис. 2 подано графіки залежностей коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю k_{2U} за використання трифазового регулювання симетрувального трансформатора із схемою з'єднання обмоток "трикутник – зигзаг". Крива 1 характеризує залежність коефіцієнта k_{2U} , який встановиться після симетрування за умовами (5) при струмі навантаження, що змінюється від нуля до номінального. Криві 2 і 3 показують залежності k_{2U} , які встановляться після симетрування відповідно до умов (2) при струмі навантаження, який дорівнює відповідно 50% і 100% від номінального значення.

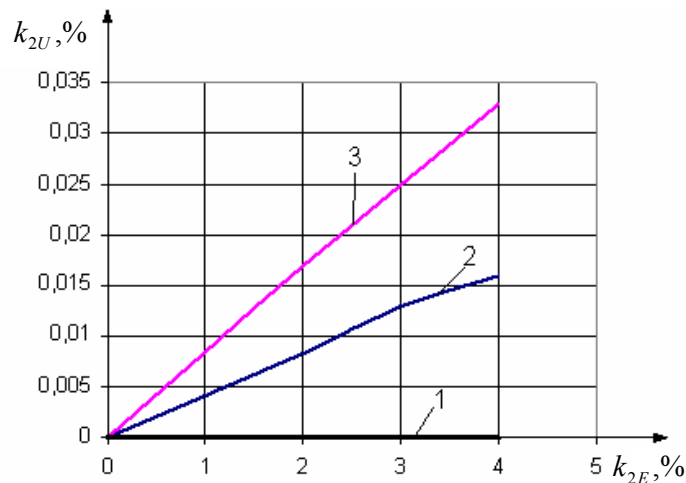


Рис. 2. Залежності коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю при різних умовах симетрування

Із графіків випливає, що використання умов, які враховують вплив струму навантаження, забезпечує більш точне симетрування напруг. За використання умов симетрування (2) неточність симетрування зростає із збільшенням струму навантаження. Разом з тим використання умов симетрування (2) призводить до незначного збільшення помилок симетрування, а тому умови (2) (як більш прості) рекомендуються для практичної реалізації.

Висновки

Синтезовано математичну модель управління симетрувальним трансформатором із схемою з'єднання обмоток «трикутник – зигзаг» при повздовжній несиметрії, що дозволяє досягти високої точності симетрування напруги й враховує вплив загальнопромислового навантаження. Математичне моделювання показує, що врахування несиметричного навантаження мало впливає на точність симетрування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бурбело М. Й., Бабенко О. В. Формування математичних моделей вимірювальних систем установок симетрування // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 6. – С. 242 – 251.
2. Бурбело М. Й., Терешкевич Л. Б., Бабенко О. В. Аналіз алгоритмів керування симетрувальним трансформатором // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – 2005. – Вип. 37. – С. 13 – 18.
3. Бурбело М. Й., Бабенко О. В. Оптимізація вимірювальних систем установок симетрування напруги // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: 1 Міжнародна науково-технічна конференція, Луцьк, 26 – 28 червня 2006 р. – Луцьк, 2006. – С. 5 – 8.
4. Застосування багатоцільової оптимізації для симетрування та зменшення відхилень напруг в електричних мережах / Бурбело М. Й., Волоцький А. М., Бабенко О. В., Салій О. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 6. – С. 76 – 79.
6. Вольдек А. И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.

Бурбело Михайло Йосипович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Волоцький Анатолій Михайлович – асистент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Бабенко Олексій Вікторович – старший викладач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Салій Олександр Володимирович – магістрант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.