

УДК 621.316.7:621.317.7

М. И. Бурбело, д. т. н., проф.; А. М. Волоцкий; А. В. Бабенко, к. т. н.; А. В. Салий**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ
СИММЕТРИРУЮЩИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ**

Синтезирована математическая модель управления симметрирующим трансформатором со схемой соединения обмоток «треугольник – зигзаг» при продольной несимметрии, позволяющая достичь высокой точности симметрирования напряжения и учитывающая влияние общепромышленной нагрузки.

Ключевые слова: симметрирующий трансформатор, "треугольник – зигзаг", точность симметрирования, ток нагрузки, коэффициент передачи, трёхфазное регулирование, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности.

Состояние проблемы и постановка задачи

Одной из важных характеристик качества электроэнергии является продольная несимметрия напряжений. В [1 – 3] исследовались симметрирующие трансформаторы со схемой соединения обмоток "треугольник – звезда". как средства симметрирования напряжений. Математические модели, предложенные в этих работах, позволили получить ряд преимуществ при использовании симметрирующего трансформатора для повышения качества напряжения в системах электроснабжения по сравнению с другими типами симметрирующих установок. Однако недостатком использования симметрирующего трансформатора со схемой соединения обмоток "треугольник – звезда" является возникновение напряжения нулевой последовательности в результате осуществления пофазового регулирования и, соответственно, отклонений напряжений, что снижает эффективность симметрирования. Более эффективным, на наш взгляд, представляется использование симметрирующих трансформаторов со схемой соединения обмоток «треугольник – зигзаг» (рис. 1), которые лишены указанных недостатков.

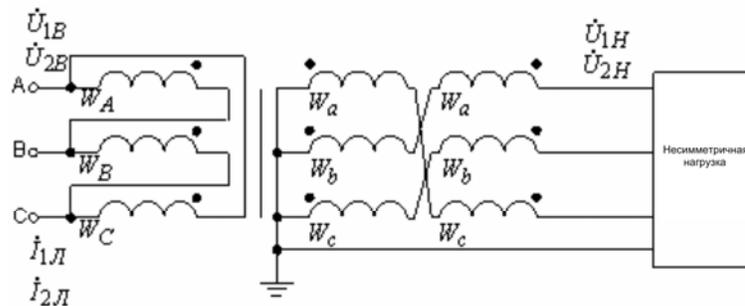


Рис. 1. Схема соединения обмоток симметрирующего трансформатора

Упрощенное условие симметрирования напряжений с использованием симметрирующего трансформатора со схемой соединения обмоток «треугольник – зигзаг» обосновано в [4]:

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

где $\underline{K}_1 = -\frac{1}{3}(k_A + k_B + k_C)$; $\underline{K}_2 = -\frac{1}{3}(k_A + ak_B + a^2k_C)$ – комплексные коэффициенты передачи симметрирующего трансформатора, k_A, k_B, k_C – фазные коэффициенты передачи трансформатора, которые учитывают половину витков вторичной обмотки, соединенной в „зигзаг”; $\dot{U}_{1B}, \dot{U}_{2B}$ – комплексные линейные напряжения прямой и обратной

последовательностей первичной обмотки трансформатора; $\dot{I}_{1Л}, \dot{I}_{2Л}$ – комплексные линейные токи прямой и обратной последовательностей на стороне высокого напряжения симметрирующего трансформатора; \underline{Z}_K – сопротивление короткого замыкания трансформатора.

В [4] были получены также условия трехфазного регулирования симметрирующим трансформатором:

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

где $\Delta k_A, \Delta k_B, \Delta k_C$ – приросты коэффициентов передачи для обеспечения трехфазного регулирования; Δk – прирост среднего значения коэффициента передачи, обеспечивающий уменьшение отклонений напряжений;

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

– значение измеренных величин.

Трехфазное регулирование, которое осуществляется соответственно (2), удовлетворяет такие критерии:

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

где \dot{U}_{2H} – напряжение обратной последовательности на низкой стороне трансформатора; $\Delta U_{\max(H)}$ – максимальное отклонение фазного напряжения на вторичной обмотке.

Условие (1) получено для упрощенной схемы замещения трансформатора, в которой пренебрегается влияние коэффициентов трансформации фаз на значение токов первичной обмотки.

В статье решается задача синтеза уточнённых математических моделей управления симметрирующим трансформатором со схемой соединения обмоток «треугольник – зигзаг», что обеспечивается учетом влияния тока несимметричной нагрузки. Особый интерес вызывает также оценивание ошибок симметрирования в случае использования условий (1) и (2).

Обоснование результатов

Из анализа выражения для напряжения вторичной обмотки трансформатора со схемой соединения "треугольник – звезда" (на примере напряжения фазы А) с учетом цепи намагничивания [5] имеем:

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

где \dot{U}_a – комплексное фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора; $k = W_a / W_A$ – коэффициент трансформации; $\dot{E}_{AB} = m \cdot \dot{U}_{AB}$ – комплексная ЭДС первичной обмотки (здесь $m \approx 1$); \dot{I}_a – комплексный фазный ток вторичной обмотки; r_2, x_2 – приведенные активное и реактивное сопротивления вторичной обмотки.

На основе выражений для трансформатора со схемой соединения "треугольник – звезда",

использовав принцип суперпозиции, можно получить выражения для фазных напряжений трансформатора со схемой соединения обмоток "треугольник – зигзаг"

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

После выполнения математических преобразований условие симметрирования напряжений с помощью симметрирующего трансформатора со схемой соединения "треугольник – зигзаг" с учетом влияния тока нагрузки (влияния коэффициентов трансформации фаз на значение токов первичной обмотки) будет:

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

Анализ (4) позволил получить условия трехфазного регулирования симметрирующего трансформатора:

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

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

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

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

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

На рис. 2 представлены графики зависимостей коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности k_{2U} при использовании трехфазного регулирования симметрирующего трансформатора со схемой соединения обмоток "треугольник – зигзаг". Кривая 1 характеризует зависимость коэффициента k_{2U} , который установится после симметрирования согласно условию (5) при токе нагрузки, который изменяется от нуля до номинального. Кривые 2 и 3 показывают зависимости k_{2U} , которые установятся после симметрирования согласно условиям (2) при токе нагрузки, который равен соответственно 50% и 100% от номинального значения.

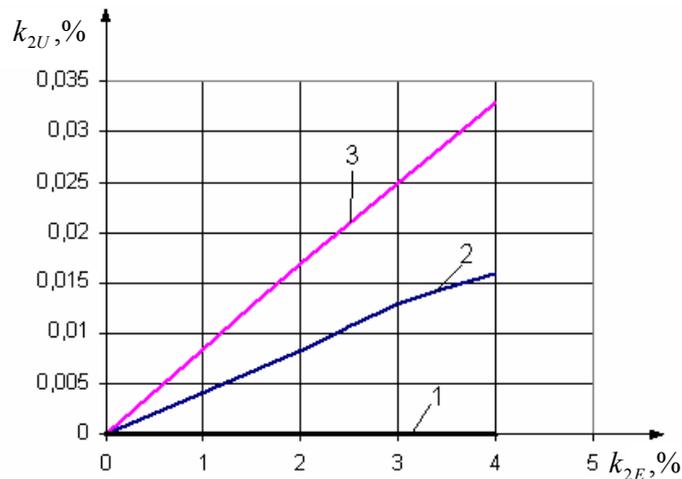


Рис. 2. Зависимости коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности при разных условиях симметрирования

Из графиков вытекает, что использование условий, которые учитывают влияние тока нагрузки, обеспечивает более точное симметрирование напряжений. При использовании условий симметрирования (2) неточность симметрирования возрастает с увеличением тока нагрузки. Вместе с тем использование условий симметрирования (2) приводит к незначительному увеличению ошибок симметрирования, а поэтому условие (2) (как более простое рекомендуется для практической реализации).

Выводы

Синтезирована математическая модель управления симметрирующим трансформатором со схемой соединения обмоток «треугольник – зигзаг» при продольной несимметрии напряжения, позволяющая достичь высокой точности симметрирования напряжения и учитывающая влияние общепромышленной нагрузки. Математическое моделирование показывает, что учёт несимметричной нагрузки незначительно влияет на точность симметрирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 Михаил Иосифович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента.

Волоцький Анатолій Михайлович – ассистент кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента.

Бабенко Алексей Викторович – старший преподаватель кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента.

Салий Александр Владимирович – магистрант кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента.
Винницкий национальный технический университет.