

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФАЗНЫХ ТОКОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 0,38 КВ ПРИ НЕССИМЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ, НАВОДИМЫХ ПОТОКАМИ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА

Н.Е.Шевчик, канд.техн.наук, доцент, Е.В. Михайлова, аспирантка (БГАТУ)

Аннотация

Разработана методика расчета фазных токов в электрической сети 0,38 кВ с глухозаземленной нейтралью при несимметричной нагрузке с учетом электродвижущих сил, наводимых потоками нулевой последовательности трансформатора.

The methodology of calculations of phase currents in an electrical circuit 0,38 kv with dead-earthed neutral of asymmetric load is given in the article. Electromotive forces brought by flows of zero sequence of a transformer are taking into consideration.

Введение

Сельскохозяйственные электропотребители характеризуются малой плотностью нагрузок и большим удельным весом однофазных токоприемников. В свою очередь, случайное включение однофазных нагрузок приводит к несимметричным режимам и отрицательно влияет на качество напряжения и потери электроэнергии в низковольтных электрических сетях – 0,38 кВ. Ранее проведенные исследования трансформаторов с различными схемами соединения обмоток выявили количественные зависимости показателей качества напряжения и потерь электроэнергии в трансформаторе от тока в нулевом проводе [1]. При проведении указанных исследований задавались нагрузками в виде фазных токов, и поэтому сеть при ее питании от трансформаторов с различными схемами соединения обмоток была загружена одинаково.

На самом же деле при несимметричной нагрузке в трансформаторе, кроме основного магнитного потока, имеются неуравновешенные потоки нулевой последовательности, которые будут наводить свои электродвижущие силы (ЭДС) в обмотках. Указанные ЭДС, наведенные во вторичной обмотке, приложены к линии электропередач и вызывают в ней свои токи, которые, суммируясь с токами нагрузки, будут влиять на потери электроэнергии в электрической сети. Так как имеются трансформаторы с компенсацией потоков нулевой последовательности, то можно предположить, что в сети с такими трансформаторами потери электроэнергии будут меньше.

Для проверки указанного предположения разработана методика расчета фазных токов в электрической сети 0,38 кВ с глухозаземленной нейтралью при несимметричной нагрузке с учетом электродвижущих

сил, наводимых потоками нулевой последовательности трансформатора.

Основная часть

Предположим, что напряжения, подаваемые на первичную обмотку трансформатора, симметричны, поэтому фазные напряжения вторичной стороны трансформатора без нагрузки $U_a = U_b = U_c$ будут равны по модулю, и их векторы смещены в пространстве на 120° относительно друг друга.

$$\begin{aligned}\bar{U}_a &= U_a \\ \bar{U}_b &= U_b \cdot e^{-j120} \\ \bar{U}_c &= U_c \cdot e^{-j240}\end{aligned}\quad (1)$$

При несимметричной нагрузке сопротивления электроприемников по фазам будут не одинаковы $\bar{Z}_a \neq \bar{Z}_b \neq \bar{Z}_c$. При подаче на них симметричных напряжений появятся токи: $\bar{I}_a^*, \bar{I}_b^*, \bar{I}_c^*$, которые согласно закону Ома, будут равны:

$$\bar{I}_a^* = \frac{\bar{U}_a}{\bar{Z}_a}; \bar{I}_b^* = \frac{\bar{U}_b}{\bar{Z}_b}; \bar{I}_c^* = \frac{\bar{U}_c}{\bar{Z}_c}\quad (2)$$

Так как сопротивления электроприемников по фазам не одинаковы $\bar{Z}_a \neq \bar{Z}_b \neq \bar{Z}_c$, фазные токи также не равны друг другу $\bar{I}_a^* \neq \bar{I}_b^* \neq \bar{I}_c^*$. Для дальнейшего анализа, с помощью метода симметричных составляющих, они разлагаются на системы токов прямой, обратной и нулевой ($\bar{I}_{a0}, \bar{I}_{b0}, \bar{I}_{c0}$) последовательностей [2].

Фазные векторы токов прямой последовательности равны по величине и сдвигаются по фазе на 120^0 в направлении движения часовой стрелки. Токи прямой последовательности выполняют полезную нагрузку и протекают как по первичной, так и по вторичной обмоткам. Магнитный поток прямой последовательности, созданный вторичной обмоткой, направлен встречно аналогичному потоку первичной обмотки. Поэтому в трансформаторе магнитный поток прямой последовательности практически не зависит от нагрузки и постоянен.

Фазные векторы токов обратной последовательности также равны по величине, но сдвигаются по фазе на 120^0 в направлении, обратном движению часовой стрелки. Токи обратной последовательности появляются только при несимметричной нагрузке, но также протекают по обеим обмоткам, тем самым уравновешивая магнитный поток обратной последовательности.

Фазные векторы токов нулевой последовательности равны по величине и совпадают по направлению. В трансформаторе со схемой соединения обмоток Y/Ун токи нулевой последовательности протекают только по вторичной обмотке. В первичной обмотке их нет, потому что нет нулевого провода. Поэтому магнитный поток нулевой последовательности, созданный вторичной обмоткой, не уравновешивается магнитным потоком первичной обмотки, и может быть достаточно большим.

Токи нулевой последовательности определяются по формуле:

$$\bar{I}_{a0} = \bar{I}_{b0} = \bar{I}_{c0} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a^* + \bar{I}_b^* + \bar{I}_c^*) = \bar{I}_0 \quad (3)$$

Созданные ими магнитные потоки индуцируют во вторичных обмотках трансформатора электродвижущие силы нулевой последовательности

E_{a0}, E_{b0}, E_{c0} по формуле:

$$E_{a0} = E_{b0} = E_{c0} = 4,44 f \Phi_0 W = E_0, \quad (4)$$

где f – частота тока, Гц;

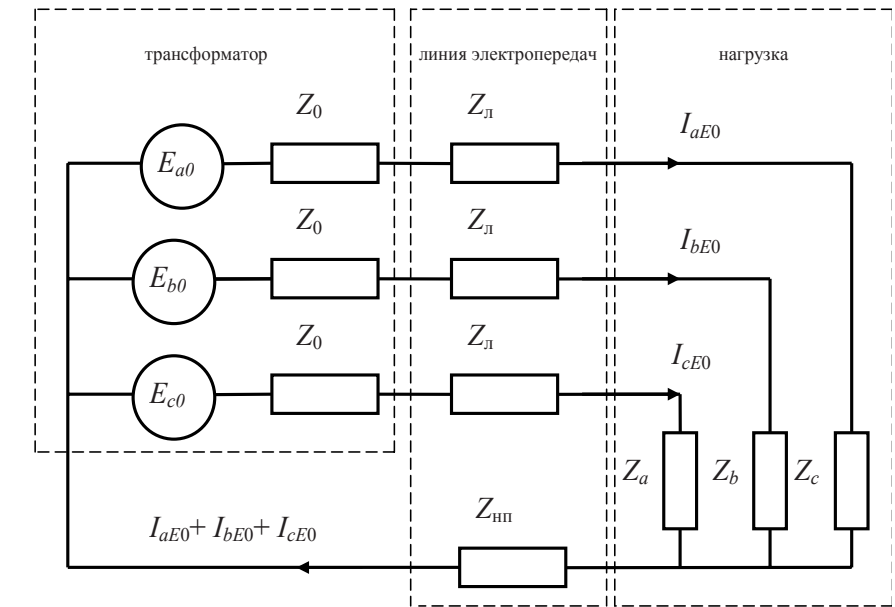
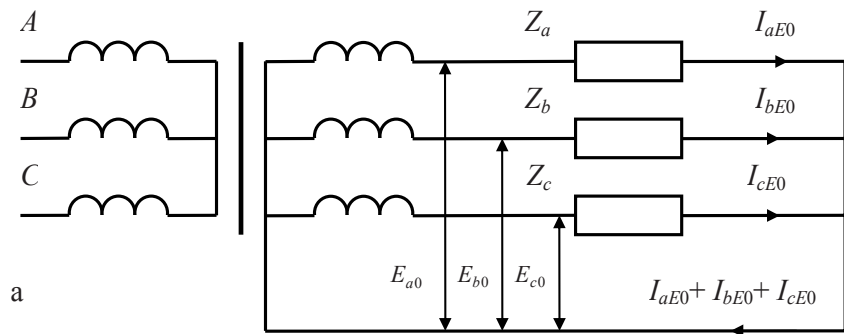


Рис. 1. Схемы расчета токов в электрической сети, вызванных ЭДС от потоков нулевой последовательности трансформатора:
а – электрическая; б - замещения

Φ_0 – магнитный поток нулевой последовательности в стержне трансформатора, Вб;

W – число витков вторичной обмотки трансформатора.

По формуле (4) можно определить только модули векторов фазных электродвижущих сил нулевой последовательности, к тому же определение магнитного потока нулевой последовательности Φ_0 для расчета затруднительно, поэтому векторы фазных электродвижущих сил нулевой последовательности определяются по формулам:

$$\bar{E}_0 = \bar{I}_0 \cdot \bar{Z}_0, \quad (5)$$

где \bar{Z}_0 – сопротивление нулевой последовательности трансформатора.

Так как векторы фазных токов нулевой последовательности равны, равны будут и векторы фазных электродвижущих сил нулевой последовательности. Эти электродвижущие силы приложены к линии электропередач, и вызовут в ней токи (рис. 1):

$$\bar{I}_{aE0}, \bar{I}_{bE0}, \bar{I}_{cE0}.$$

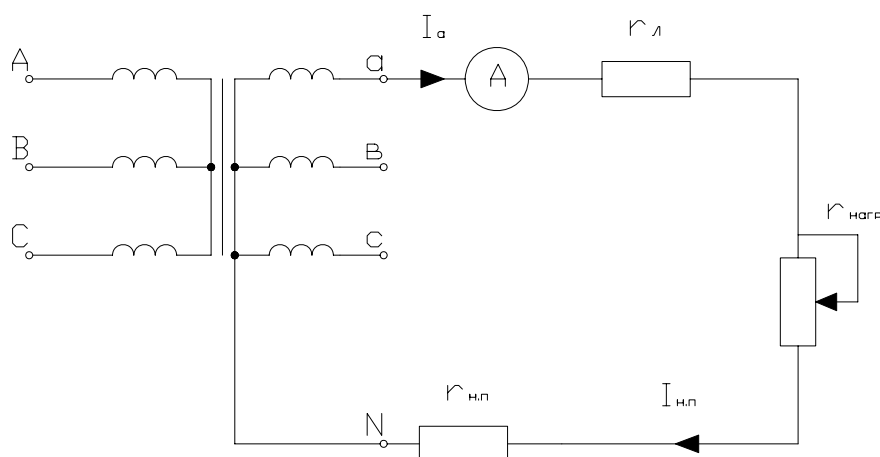


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

$$I_{aE_0}^- = \frac{\bar{E}_0}{(\bar{Z}_0 + \bar{Z}_a + \bar{Z}_л + \bar{Z}_{нп})};$$

$$I_{bE_0}^- = \frac{\bar{E}_0}{(\bar{Z}_0 + \bar{Z}_b + \bar{Z}_л + \bar{Z}_{нп})};$$

$$I_{cE_0}^- = \frac{\bar{E}_0}{(\bar{Z}_0 + \bar{Z}_c + \bar{Z}_л + \bar{Z}_{нп})},$$

где $\bar{Z}_л$ – сопротивление фазного провода линии электропередачи, Ом;

$\bar{Z}_{нп}$ – сопротивление нулевого провода линии электропередачи, Ом.

Эти токи будут суммироваться с фазными токами, определенными по формулам (2), и окончательные токи в линии электропередач будут равны:

$$I_a = I_a^* + I_{aE_0}^-;$$

$$I_b = I_b^* + I_{bE_0}^-;$$

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные данные фазных токов

Сопротивление нагрузки R, Ом	Токи, А		Погрешность	
	расчетный	экспериментальный	абсолютная, А	относительная, %
11,3	11,42	11,2	0,22	1,9
17	7,23	7,3	0,07	1,0
34	3,74	3,7	0,04	1,1
68	1,84	1,8	0,04	2,2

$$\bar{I}_c = \bar{I}_c^* + I_{cE_0}^-;$$

$$\bar{I}_{нп} = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c,$$

где $\bar{I}_{нп}$ – ток в нулевом проводе, А.

Проверка методики расчета была проведена в лабораторных условиях с помощью трансформатора со схемой соединения обмоток У/Ун мощностью 2,5 кВ.А. Комплексные сопротивления короткого замыкания Z_k и нулевой последовательности Z_0 трансформатора

определены экспериментально и равны:

$$Z_k = 0,75 + j0,45 \text{ Ом};$$

$$Z_0 = 7,57 + j3,83 \text{ Ом}.$$

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Токи нагрузки задавались ползунковыми реостатами, сопротивления линии электропередач имитировались активными сопротивлениями.

Из табл. 1 видно, что максимальная относительная погрешность несовпадения расчетных токов от экспериментальных не превышает 2,2.

Это доказывает правильность высказанного предположения и целесообразность использования трансформаторов с компенсацией потоковой нулевой последовательности для снижения потерь в низковольтной линии электропередач.

Заключение

При расчете фазных токов в линии 0,38 кВ с глухозаземленной нейтралью и несимметричной нагрузке необходимо учитывать электродвижущие силы, наводимые потоками нулевой последовательности в трансформаторе.

ЛИТЕРАТУРА

- Сердешнов, А.П. Влияние схем соединений обмоток трансформаторов на несимметрию напряжений / А.П. Сердешнов, Г.И. Янукович, Н.Е. Шевчик // Известия высших учебных заведений. Энергетика, 1984, № 5.
- Основы теории цепей : учеб. пособ. для вузов / Г.В. Зевеке [и др.]; под общ. ред. Г.В. Зевеке. – 5-е изд. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.