



Сопротивления обмоток при параллельной работе трансформаторов



Николай ГРИГОРЬЕВ

Nickolay D. GRIGORIEV

Публикуемый дискуссионный материал выражает несогласие с существующей точкой зрения на то, что уравнильный ток, протекающий по первичным и вторичным обмоткам трехфазных понижающих трансформаторов 12 и 11 групп, когда они работают параллельно, ограничивается по величине суммой сопротивлений короткого замыкания. Оценочная инерция не учитывает, в частности, известное всем обстоятельство: в одной и той же трехфазной цепи имеются соединения элементов в звезду и треугольник. Как раз с учетом этого автор доказывает, что использование его формул взамен прежних снижает погрешности в расчетах проектируемых трансформаторов.

Ключевые слова: транспортная энергосеть, трехфазный понижающий трансформатор, обмотки, закон Ома, уравнильный ток, сопротивление, короткое замыкание, напряжение, расчетные и измеряемые величины, новые формулы.

Григорьев Николай Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, метрология и электроэнергетика» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

При параллельной работе двух трехфазных понижающих трансформаторов со схемами и группами соединения их обмоток Y/Y-12 и Y/D-11 (рис. 1) между векторами вторичных линейных напряжений \underline{U}_2 получается сдвиг по фазе в 30° . Поэтому в каждом контуре, образуемом двумя фазными обмотками обоих трансформаторов, действует результирующее напряжение $U_p = 0,518U_2$, создающее уравнильные токи в режиме холостого хода.

Считается [1–4 и др.], что уравнильный ток I_y , протекающий по первичным и вторичным обмоткам трехфазных понижающих трансформаторов 12 и 11 групп, включенных на параллельную работу, ограничивается по величине суммой их сопротивлений короткого замыкания Z_{K1} и Z_{K2} , то есть по закону Ома:

$$I_y = 0,518U_2 / (Z_{K1} + Z_{K2}), \quad (1)$$

или для трансформаторов одинаковой мощности, подставив

$$Z_k = 0,01u_k\% U_2 / I_n,$$

в относительных единицах:

$$I_y / I_n = 51,8 / (u_{k1}\% + u_{k2}\%). \quad (2)$$

В (1) и (2) $u_{k1}\%$ и $u_{k2}\%$ – относительные значения (в процентах) напряжений короткого замыкания трансформаторов 12

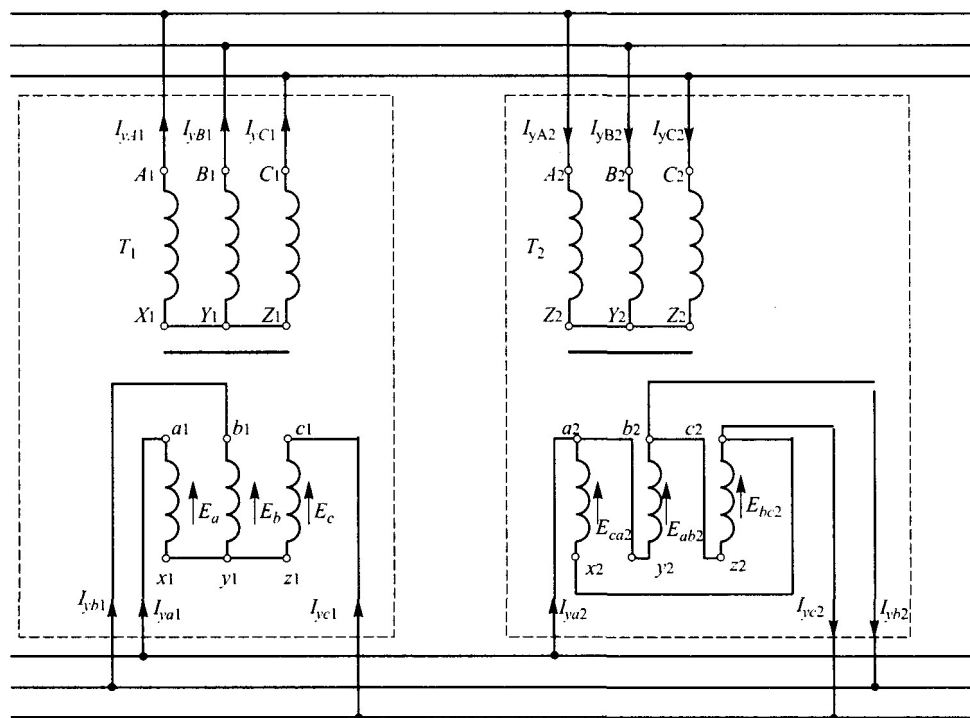


Рис. 1. Схема параллельной работы трехфазных понижающих трансформаторов с 12 и 11 группами соединения обмоток.

и 11 групп; I_n – номинальный ток трансформаторов одинаковой мощности.

При выводе формулы (1) не было учтено то обстоятельство, что в одной и той же трехфазной электрической цепи имеются соединения элементов в звезду и треугольник. Обычно в курсе теоретических основ электротехники [5] при вычислениях в таких электрических цепях в симметричном режиме с использованием закона Ома в случае определения линейного тока по известным значениям линейного напряжения и фазного сопротивления вводится коэффициент $3^{0,5} = 1,73$ (при соединении в звезду – в знаменателе, а при соединении в треугольник – в числителе). Расчет таких трехфазных электрических цепей выполняют путем их эквивалентных преобразований к одной схеме включения элементов, оставляя только соединение в звезду или только в треугольник. Поэтому достоверность формул (1) и (2) вызвала сомнение.

По формуле (2) было подсчитано относительное значение уравнивающего тока в режиме холостого хода при параллель-

ной работе двух понижающих трехфазных трансформаторов ТС-2,5/0,5 со схемами и группами соединения обмоток Y/Y-12 и Y/D-11 с относительными значениями напряжений короткого замыкания 3,67 и 3,85%:

$$I_y/I_n = 51,8 / (3,67 + 3,85) = 6,89.$$

Измеренное относительное значение уравнивающего тока оказалось равно 8,46, что в 1,23 раза больше подсчитанного по формуле (2).

Так как при преобразовании треугольника одинаковых сопротивлений обмоток в эквивалентную трехлучевую звезду значения сопротивлений в три раза меньше [5], то при параллельном включении трехфазных понижающих трансформаторов сопротивление уравниющему току в режиме холостого хода уменьшается. Об этом была написана статья, но она в журнале не была напечатана из-за отрицательной рецензии, в которой утверждалось, что сопротивления короткого замыкания трехфазных трансформаторов с 12 и 11 группами соединения обмоток одинаковы.





Таблица 1

Напряжение, ток и сопротивление короткого замыкания трансформаторов 12 и 11 групп при питании со стороны обмоток высшего напряжения

Группа соединения трансформаторов	$U_k, В$	$I_k, А$	$Z_k, Ом$	δ_U	δ_I	δ_Z	$\Delta Z_k, Ом$
12	13	0,73	17,9	$\pm 5,45$	$\pm 0,69$	$\pm 6,14$	$\pm 1,1$
11	24	1,26	19	$\pm 5,26$	$\pm 0,79$	$\pm 6,05$	$\pm 1,1$

Таблица 2

Напряжение, ток и сопротивление короткого замыкания трансформаторов 12 и 11 групп при питании со стороны обмоток, соединенных в треугольник и звезду

Группа соединения трансформаторов	$U_k, В$	$I_k, А$	$Z_k, Ом$
12	5,5	0,73	7,6
11	5,7	1,26	5,7

Этот вывод рецензентом был получен без проведения измерений на основании анализа схем опытов короткого замыкания трехфазных понижающих трансформаторов с 12 и 11 группами соединения обмоток при их питании со стороны обмоток высшего напряжения (рис. 2). Действительно, как следует из анализа рис. 2, при замыкании d накоротко вторичных обмоток трансформаторов их схемы соединения оказываются равнозначными. Следовательно, сопротивления обмоток должны быть равны. Это предположение было проверено экспериментально при включении обмоток трех однофазных трансформаторов ОСМ-0,16–220/127 в трехфазную сеть по схемам Y/Y-12 и Y/D-11. Значения напряжения U_k и тока I_k короткого замыкания (измерения про-

водились вольтметром с классом точности 1,0, имеющим предел измерений $U_{\text{п}} = 30 В$, и амперметром с классом точности 0,5, имеющим пределы измерений $I_{\text{п}} = 1$ и $I_{\text{п}} = 2 А$), а также вычисленная по закону Ома величина сопротивления короткого замыкания Z_k трансформаторов 12 и 11 групп при питании со стороны обмоток высшего напряжения приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что значение сопротивления короткого замыкания по схеме соединения обмоток трансформаторов Y/D-11 на 100 $(19-17,9) / 17,9 = 6\%$ больше, чем по схеме Y/Y-12. При этом приведены предельные значения относительных d (в процентах) и абсолютных D погрешностей измерения [6]: напряжения – $d_U = \pm K_U \times U_{\text{п}} / U_k$, тока – $d_I =$

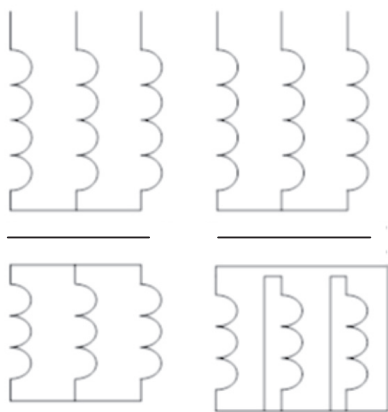


Рис. 2. Схемы опытов короткого замыкания трехфазных понижающих трансформаторов 12 и 11 групп при их питании со стороны обмоток высшего напряжения.

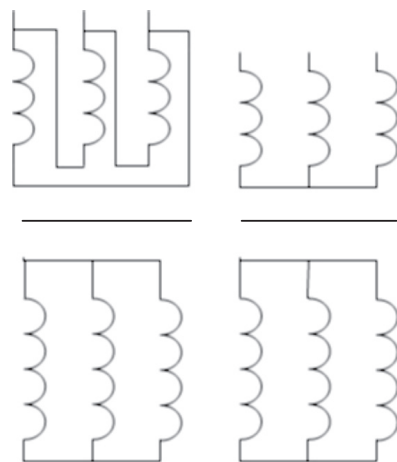


Рис. 3. Схемы опытов короткого замыкания трехфазных понижающих трансформаторов 12 и 11 групп при питании со стороны обмоток, соединенных в треугольник и звезду.

$\pm K_1 \times I_{\text{п}} / I_k$ и вычисления сопротивления короткого замыкания: $d_z = \pm (d_U + d_I)$; $DZ = \pm 0,01 d_z \times Z_k$.

Таким образом, с учетом пределов измерения вольтметра и амперметра, а также измеренных значений напряжений и токов короткого замыкания расхождение в 6% находится в допустимых пределах погрешностей измерения и вычисления сопротивления короткого замыкания. Кроме того, интервалы возможных значений сопротивлений короткого замыкания трансформаторов 12 и 11 групп ($16,8 \leq Z_k \leq 19 \text{ Ом}$, $17,9 \leq Z_k \leq 20,1 \text{ Ом}$) при питании со стороны высшего напряжения перекрываются.

Однако разность напряжений из-за сдвига по фазе вторичных электродви-

твления короткого замыкания Z_k , приведены в таблице 2.

Экспериментальными измерениями было подтверждено, что сопротивление короткого замыкания группы трех указанных однофазных трансформаторов, включенных в трехфазную сеть со стороны обмоток, соединенных в треугольник и звезду по схеме Y/D-11, в 1,33 раза меньше, чем по схеме Y/Y-12, то есть они различны. Это отличие в несколько раз больше максимально возможной погрешности косвенного измерения сопротивления короткого замыкания.

Следовательно, сопротивление обмоток трехфазного понижающего трансформатора 11 группы уравнительному току в режиме холостого хода при его включе-

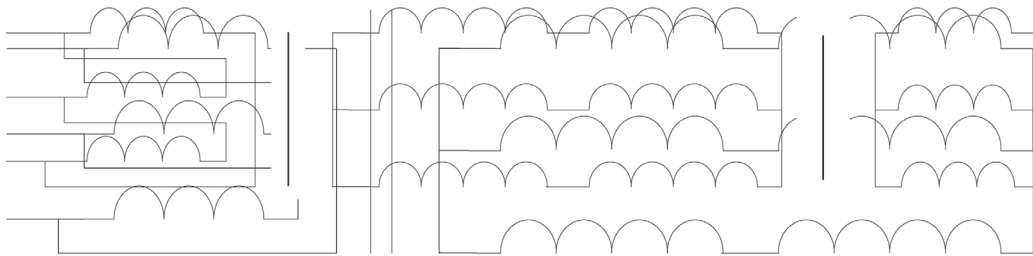


Рис. 4. Схема опыта короткого замыкания для определения сопротивления обмоток трехфазных понижающих трансформаторов 11 и 12 групп уравнительному току при параллельной работе.

жущих сил на 30° , вызывающая уравнивательные токи, возникает в обмотках низшего напряжения. Поэтому значения сопротивлений короткого замыкания трехфазных понижающих трансформаторов со схемами соединения Y/D-11 и Y/Y-12 необходимо определять при их питании со стороны обмоток низшего напряжения при замкнутых накоротко выводах обмоток высшего напряжения. Как следует из рис. 3, схемы опытов короткого замыкания трехфазных понижающих трансформаторов указанных групп при питании их со стороны обмоток низшего напряжения различны: в первом случае напряжение питания подается в обмотки, соединенные в треугольник, а во втором – в звезду. Значения напряжения U_k и тока I_k короткого замыкания, а также вычисленная по закону Ома величина сопро-

тивления короткого замыкания трансформатором 12 группы меньше, чем предполагается в [1–4 и др.]. На рис. 4 приведена рекомендуемая схема опыта короткого замыкания для определения сопротивления обмоток в заданных условиях. Пониженное напряжение питания (напряжение короткого замыкания) подается на выводы вторичных обмоток трансформатора с группой 11. У трансформатора с группой 12 замыкаются накоротко выводы обмоток низшего напряжения. Выводы обмоток высшего напряжения обоих трансформаторов пофазно соединяются между собой. У двух трехфазных трансформаторов ТС-2,5/0,5 со схемами и группами соединения их обмоток Y/Y-12 и Y/D-11, имеющими напряжения короткого замыкания 3,67 и 3,85%, сопротивление уравнительному току в режиме холостого хода было в 1,2





раза меньше по сравнению с суммарным значением сопротивлений короткого замыкания обоих трансформаторов.

Величину уравнильного тока при параллельной работе понижающих трехфазных трансформаторов 12 и 11 групп можно определить упрощенно без проведения опыта короткого замыкания по схеме, показанной на рис. 4. Это достижимо, если взяты в расчет относительные значения (в процентах) напряжений короткого замыкания, приводимые в паспортных данных. Сопротивление вторичной обмотки $Z_{к22}$, соединенной в треугольник, и приведенное к числу витков вторичной обмотки значение сопротивления первичной обмотки $Z\phi_{к21}$ примерно равны [1–4 и др.], причем равны половине сопротивления короткого замыкания второго понижающего трехфазного трансформатора:

$$Z\phi_{к21} = Z_{к22} = 0,5.$$

Сопротивление эквивалентного луча вторичной обмотки [5]:

$$Z_{к22\Delta} = 0,5 Z_{к2}/3 = 0,167 Z_{к2}.$$

Следовательно, полное сопротивление трехфазного понижающего трансформатора с группой 11 уравнильному току при параллельной работе

$$Z\phi_{к21} + Z_{к22\Delta} = 0,667 Z_{к2}.$$

Модуль уравнильного тока в режиме холостого хода при включении на параллельную работу двух трехфазных понижающих трансформаторов со схемами и группами соединения обмоток Y/Y-12 и Y/D-11

$$I_y = 0,518 U_2 / (Z_{к1} + 0,667 Z_{к2}), \quad (3)$$

а для трансформаторов одинаковой номинальной мощности его относительное значение

$$I_y / I_n = 51,8 / (u_{к1}\% + 0,667 u_{к2}\%). \quad (4)$$

По формуле (4) для трансформаторов ТС-2,5/0,5 имеем: $I_y / I_n = 51,8 / (3,67 + 0,667 \times 3,85) = 8,3$, что в 1,2 раза больше, чем по формуле (2).

Отличие расчетного по предлагаемой формуле (4) и измеренного относительного значения уравнильного тока при параллельной работе двух понижающих трехфазных трансформаторов ТС-2,5/0,5 со схемами и группами соединения обмоток Y/Y-12 и Y/D-11 составило: $100 \times (8,46 - 8,3) / 8,3 = 1,93\%$, что находится в допустимых пределах погрешностей измерений и округлений.

ВЫВОДЫ

1. Известные формулы по определению уравнильных токов в режиме холостого хода при параллельной работе двух понижающих трехфазных трансформаторов со схемами и группами соединения обмоток Y/Y-12 и Y/D-11 с точки зрения теоретических основ электротехники некорректны. При выводе формул не было учтено то обстоятельство, что электрическая схема включения трансформаторов содержит трехфазную электрическую цепь с соединением элементов в звезду и треугольник.

2. Вслед за параметрами вторичных обмоток трехфазного понижающего трансформатора, соединенных в треугольник, для соединения в звезду получены формулы определения уравнильного тока в режиме холостого хода при параллельной работе двух трехфазных понижающих трансформаторов со схемами и группами обмоток Y/Y-12 и Y/D-11. Их отличие от известных формул в том, что фиксируемые ими сопротивление или относительное значение (в процентах) напряжения короткого замыкания уменьшаются на одну треть. В знаменатели формул при определении уравнильного тока с учетом принятых условий подставляется сумма сопротивления или относительного значения (в процентах) напряжения короткого замыкания трехфазного понижающего трансформатора со схемой и группой соединения их обмоток Y/Y-12 и две трети сопротивления или относительного значения (в процентах) напряжения короткого замыкания трехфазного понижающего трансформатора со схемой и группой Y/D-11.

3. Достоверность полученных формул подтвердилась измерениями уравнильного тока в режиме холостого хода при параллельной работе двух трехфазных понижающих трансформаторов ТС-2,5/0,5 со схемами и группами соединения их обмоток Y/Y-12 и Y/D-11. Расхождение расчетного и измеренного значений токов составила 1,93%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек А. И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 832 с.

2. Бускин Д. Е., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины и микромашины. — М.: Высшая школа, 1990. — 528 с.
3. Волынский В. А., Зейн Е. Н., Шатерников В. Е. Электротехника. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 528 с.
4. Алексенко Г. В. Параллельная работа трансформаторов и автотрансформаторов. — М. — Л.: Энергия, 1967. — 608 с.
5. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.
6. Шуйский А. С., Мельничук В. М., Кучер С. А. Измерения в электротехнических устройствах железнодорожного транспорта. — М.: Транспорт, 1989. — 383 с.

1. Vol'dek A. I. Elektricheskie mashiny. — L.: Energiya, 1974. — 832 s.
2. Buskin D. E., Zorohovich A. E., Hvostov V. S. Elektricheskie mashiny i mikromashiny. — M.: Vysshaya shkola, 1990. — 528 s.
3. Volynskiy V. A., Zeyn E. N., Shaternikov V. E. Elektrotehnika. — M.: Energoatomizdat, 1987. — 528 s.
4. Aleksenko G. V. Parallelnaya rabota transformatorov i avtotransformatorov. — M. — L.: Energiya, 1967. — 608 s.
5. Zeveke G. V., Ionkin P. A., Netushil A. V., Strahov S. V. Osnovy teorii tsepey. — M.: Energoatomizdat, 1989. — 528 s.
6. Shuyskiy A. S., Mel'nichuk V. M., Kucher S. A. Izmereniya v elektrotehnicheskikh ustroystvakh zheleznodorozhnogo transporta. — M.: Transport, 1989. — 383 s.

RESISTANCE OF WINDING DURING PARALLEL OPERATION OF TRANSFORMERS

Grigoriev, Nickolay D. — Ph.D. (Tech), associate professor at the department of electrical engineering, metrology and electrical power engineering of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

The debatable article expresses disagreement with existing opinion that compensating current (also known as balancing, cross, equalizing, phasing, restoring, circulating current — ed.note) which flows through primary and secondary winding of three-phase step-down parallel operated transformers of groups 12 and 11 (Y/Y-12, Y/D-11), is value-restricted by the sum of short-circuit resistances. In particular the inertia of customary approach of assessment doesn't allow taking into account the well-known factor of coexistence within the same three-phase circuit of star (Y, can also be called T — ed.note) and triangle-shaped (Δ or D — ed.note) connections. Taking into consideration exactly this factor the author substantiates that the formulae, suggested by him to replace previously used equations, might reduce inaccuracy of computation during engineering of new transformers. Following the computation of parameters of secondary D-shaped winding of three-phase step-down transformer, the author, in order to realize computations for Y-connections, has elaborated

formulae of determination of balancing current for blank cycle of two parallel operated three-phase step-down transformers with diagrams and groups of windings Y/Y-12 и Y/ Δ -11. Their difference from known formulae consists in the fact that resistance or relative value (in %) of a short-circuit current are reduced by a third. Denominator of formulae, used to determine balancing current, in view of assumed conditions, includes substitutional value of the sum of resistance or of relative values (in %) of short-circuit current of three-phase step-down transformer with Y/Y-12 winding connections or diagrams and 2/3 of the value of resistance or relative value (in %) of short-circuit current of three-phase step-down transformer with Y/ Δ -11 winding connections or diagrams. The reliability of suggested formulae is confirmed by measurements of balancing current under blank cycle mode of two parallel operated three-phase step-down transformers TS-2,5/0,5 with Y/Y-12 и Y/ Δ -11 winding diagrams and connections. Difference between calculated value and measured value of current was of 1,93%.

Key words: transport power network, three-phase step-down transformer, winding, Ohm law, compensating current, resistance, impedance, short-circuit, calculated and measured values, new formulae.

REFERENCES

1. Voldek A.I. Electrical machines [Elektricheskie mashiny]. Leningrad, Energiya publ., 1974, 832 p.
2. Buskin D.E., Zorohovich A.E., Hvostov V.S. Electrical machines and micro machines [Elektricheskie mashiny i mikromashiny]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1990, 528 p.
3. Volynskiy V.A., Zeyn E.N., Shaternikov V.E. Electrical engineering [Elektrotehnika]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1987. — 528 s.
4. Aleksenko G.V. Parallel operation of transformers and autotransformers [Parallelnaya rabota transformatorov

- i avtotransformatorov]. Moscow, Leningrad, Energiya publ., 1967, 608 p.
5. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strahov S.V. Circuit theory fundamentals [Osnovy teorii tsepey]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1989, 528 p.
6. Shuyskiy A.S., Mel'nichuk V.M., Kucher S.A. Measurements in electrical devices of railways [Izmereniya v elektrotehnicheskikh ustroystvakh zheleznodorozhnogo transporta]. Moscow, Transport publ., 1989, 383 p.

Координаты автора (contact information): Григорьев Н. Д. (Grigoriev N. D.) — +7-495-6842119.

Статья поступила в редакцию / article received 11.01.2013
Принята к публикации / article accepted 14.03.2013

