УДК 621.3.024

Измерение сопротивлений обмоток трансформаторов

Николай ГРИГОРЬЕВ

Nickolai D.GRIGORIEV

Григорьев Николай Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика транспорта» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Приводится теоретическое обоснование и описывается метод раздельного измерения полных, активных и реактивных сопротивлений обмоток трансформаторов. Измеряются линейные токи и напряжения, а также мощности в опыте короткого замыкания трехфазного двухобмоточного трансформатора или группы из трех одинаковых двухобмоточных однофазных трансформаторов. По значениям мощности трех фаз, средних линейных значений напряжения и тока опыта короткого замыкания вычисляются сопротивления короткого замыкания при схемах соединения питающей обмотки в треугольник и звезду. В 1,5 раза увеличенные их разности и есть полное, активное и реактивное сопротивления, параметры которых любой обмотки многообмоточных трехфазных и однофазных трансформаторов могут быть определены аналогично, превращая их в питающие.

Ключевые слова: одно- и трехфазный, двух- и многообмоточный трансформаторы, питающая обмотка, полное, активное и реактивное сопротивления, соединение в треугольник и звезду.

В настоящее время полные, активные и реактивные сопротивления первичных и вторичных обмоток трансформаторов раздельно не измеряются [1–4 и др.]. Принимается, что эти сопротивления, приведенные к одинаковому числу витков, примерно равны между собой и равны половине сопротивления опыта короткого замыкания трансформатора. Для более точного определения значения уравнительного тока при параллельной работе понижающих трехфазных трансформаторов 12 и 11 групп соединения обмоток необходимо иметь значения полных сопротивлений их первичных и вторичных обмоток [5].

Предлагается измерение параметров трехфазных двухобмоточных трансформаторов в опыте короткого замыкания производить обычными измерительными приборами вначале при схеме соединения первичной обмотки в треугольник (рис. 1), а затем – в звезду (рис. 2).

На рис. 1 и 2 вторичные обмотки 5 и 7 трехфазного двухобмоточного трансформатора, соединенные в звезду, замкнуты накоротко. В провода, первичные питающие обмотки, которые соединены в треугольник (рис. 1) и звезду (рис. 2), включены три одинаковых амперметра PA 1, два одинаковых

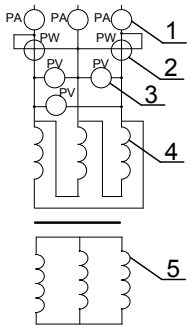

Рис. 1. Схема опыта короткого замыкания трехфазного двухобмоточного трансформатора при питании со стороны обмотки, соединенной в треугольник: 1 – амперметры PA; 2 – ваттметры PW; 3 – вольтметры PV; 4 – обмотка трехфазного трансформатора со стороны питания, соединенная в треугольник; 5 – замкнутая накоротко обмотка трехфазного трансформатора, соединенная в звезду.

Pic. 1. The diagram of short-circuit experiment of three-phase two-winding transformer from the point of delta- connected winding: 1-ammemeters RA, 2-wattmeters PW; 3 – voltmeters PV; 4 – the winding of the three-phase transformer from the supply side, delta-connected; 5 – short-circuited winding of the three-phase transformer, which is wye- connected.

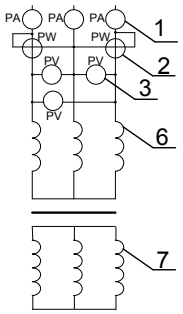

Рис. 2. Схема опыта короткого замыкания трехфазного двухобмоточного трансформатора при питании со стороны первичной обмотки, соединенной в звезду: 1 – амперметры PA; 2 – ваттметры PW; 3 – вольтметры PV; 6 – обмотка трехфазного трансформатора со стороны питания, соединенная в звезду; 7 – замкнутая накоротко обмотка трехфазного трансформатора, соединенная в звезду.

Pic.2. The diagram of short- circuit experiment of the three-phase two-winding transformer with supply from the primary winding, which is wye- connected: 1 – ammeters RA; 2 – wattmeters PW; 3 – voltmeters PV; 6 – the winding of the three-phase transformer from the supply side, which is wye-connected; 7 – short-circuited winding of the three-phase transformer, which is wye- connected.

ваттметра PW 2 и три одинаковых вольтметра PV 3.

Раздельное измерение полных, активных и реактивных сопротивлений первичной и вторичной обмоток трехфазного двухобмоточного трансформатора производится следующим образом. При опыте короткого замыкания вторичные обмотки 5 и 7, соединенные в звезду (рис.1 и 2), замыкаются накоротко, а к первичным обмоткам 4 и 6 подводится пониженное линейное напряжение $U_к$, при котором первичный линейный ток $I_к$ равен номинальному значению $I_н$. Для трехфазного двухобмоточного трансформатора по алгебраической сумме показаний двух ваттметров PW 2 определяется мощность короткого замыкания трех фаз $P_к$, а по показаниям трех вольтметров PV 3 и амперметра PA 1 вычисляют средние значения линейного напряжения $U_к$ и линейного тока $I_к$.

При соединении первичной питающей обмотки 4 трехфазного двухобмоточного трансформатора треугольником (рис. 1) фазные параметры короткого замыкания:

– полное сопротивление короткого замыкания

$$z_{кт} = \sqrt{3}Uк/Iк;$$

– активное сопротивление короткого замыкания

$r_{кт} = P_к/I_к^2$;

– реактивное сопротивление короткого замыкания

$$x_{кт} = \sqrt{(z_{кт}^2 - r_{кт}^2)}.$$

При соединении первичной питающей обмотки 6 в звезду (рис. 2) фазные параметры короткого замыкания:

– полное сопротивление короткого замыкания

$$z_{кз} = Uк/(\sqrt{3}Iк);$$

– активное сопротивление короткого замыкания

$r_{кз} = P_к/(3I_к^2)$;

– реактивное сопротивление короткого замыкания

$$x_{кз} = \sqrt{(z_{кз}^2 - r_{кз}^2)}.$$

При эквивалентном преобразовании трех одинаковых сопротивлений, включенных в треугольник, в трехлучевую звезду их значения уменьшаются в 3 раза [6]. Поэтому сопротивления трехфазного двухобмоточного трансформатора в опытах короткого замыкания различны на величину уменьшения в те же 3 раза полных, активных и реактивных сопротивлений первичной обмотки при ее соединении в треугольник $Z_{кт\,1}$, $r_{кт\,1}$, $x_{кт\,1}$ по сравнению с соединением в звезду $Z_{кз1}$, $r_{кз1}$, $x_{кз1}$, а приведенные к числу витков первичной обмотки значения этих же сопротивлений вторичной обмотки $Z_{кт\,2}$, $r_{кт\,2}$, $x_{кт\,2}$ и $Z_{кз2}$, $r_{кз2}$,

$x_{кз2}$ остаются постоянными. Поскольку полное, активное и реактивное сопротивления короткого замыкания трехфазного двухобмоточного трансформатора равны сумме соответствующих сопротивлений: $Z_{кт} = Z_{кт\,1} + Z_{кт\,2}$, $Z_{кз} = Z_{кз1} + Z_{кз2}$, $r_{кт} = r_{кт\,1} + r_{кт\,2}$, $r_{кз} = r_{кз1} + r_{кз2}$, $x_{кт} = x_{кт\,1} + x_{кт\,2}$, $x_{кз} = x_{кз1} + x_{кз2}$, то полное, активное и реактивное сопротивления короткого замыкания, полученные на основании опыта короткого замыкания трехфазного двухобмоточного трансформатора при схеме соединения первичной обмотки в треугольник, меньше на 2/3 значений фазных сопротивлений первичной обмотки $Z_{кп}$, $r_{кп}$, $x_{кп}$ по сравнению с соответствующими параметрами, полученными при схеме соединения первичной обмотки в звезду: $Z_{кз} - Z_{кт} = 2Z_{кп}/3$; $r_{кз} - r_{кт} = 2\,r_{кп}/3$; $x_{кз} - x_{кт} = 2\,x_{кп}/3$.

Окончательно имеем, что полное, активное и реактивное фазные сопротивления короткого замыкания первичной обмотки в полтора раза больше разности соответствующих параметров, выявленных на основании измерений в опытах короткого замыкания трехфазного двухобмоточного трансформатора при соединении первичной обмотки в звезду, а затем в треугольник: $Z_{кп} = 1{,}5\,(Z_{кз} - Z_{кт})$; $r_{кп} = 1{,}5\,(r_{кз} - r_{кт})$; $x_{кп} = 1{,}5\,(x_{кз} - x_{кт})$.

Параметры полного, активного и реактивного сопротивлений короткого замыкания первичной обмотки трех одинаковых однофазных двухобмоточных трансформаторов могут быть определены по аналогии экспериментально при их соединении в трехфазную группу. Параметры тех же сопротивлений короткого замыкания вторичной обмотки двухобмоточного трехфазного трансформатора и любой обмотки многообмоточных трехфазных и однофазных трансформаторов находятся точно так же, превращая ее в первичную.

ВЫВОДЫ

Проведенное экспериментальное исследование демонстрирует определенные закономерности при раздельном измерении полных, активных и реактивных сопротивлений обмоток трансформаторов. Измерялись линейные токи и напряжения, а также мощности в опыте короткого замыкания трехфазного двухобмоточного трансформатора или группы из трех одинаковых двухобмоточных однофазных трансформаторов при схемах соединения их первичных обмоток сначала в треугольник, а потом в звезду. По значениям мощности трех фаз, средних линейных значений напряжения и тока опыта короткого замыкания вычислены сопротивления короткого замыкания при схемах соединения питающей обмотки в те же треугольник и в звезду. В 1,5 раза увеличенные их разности, полученные для схем соединения первичной обмотки в звезду и в треугольник, и есть полное, активное и реактивное сопротивления питающей обмотки трехфазного трансформатора или группы из трех одинаковых однофазных трансформаторов. Параметры подобных сопротивлений любой обмотки многообмоточных трехфазных и однофазных трансформаторов могут быть определены аналогично, превращая их в питающие.

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. Григорьев Н. Д. Сопротивления обмоток трансформаторов при параллельной работе //Мир транспорта. – 2013. – № 4. – С. 58–63.
6. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

MEASUREMENT OF TRANSFORMER WINDINGS RESISTANCE

Grigoriev, Nickolai, D. *– Ph.D. (Tech.), associate professor of the department of transport power engineering of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.*

ABSTRACT

The article contains a theoretical rationale and describes the method of separate measurements of total, active and reactive resistance of transformer windings. Linear currents and voltages are measured, as well as power in the short-circuit experiment of a three-phase two-winding transformer or group of three identical two-winding single-phase transformers. From the values of the three phase power, average linear voltage and current values of short circuit resistance are calculated in delta and wye connection