

## Исследование несимметричных режимов работы трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения и мощности

Алтунин Б. Ю., доктор техн. наук, Кралин А. А., канд. техн. наук, Карнавский И. А., инж.

**Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева**

Рассмотрены вопросы расчета несимметричных режимов работы опытного трехфазного трансформатора ТСЗН-400/10 со схемой соединения обмоток  $Y/Y_0$ . Расчеты выполнены на базе метода симметричных составляющих и комплексных схем замещения трансформатора в программе Mathcad.

**Ключевые слова:** трехфазный трансформатор, несимметричные режимы, метод симметричных составляющих, схемы замещения.

Возможность автоматического регулирования напряжения в узлах нагрузки распределительных сетей 6 – 10 кВ ограничена из-за использования в трансформаторах механических устройств переключения без возбуждения (ПБВ), применяемых только для сезонных переключений ответвлений сетевой обмотки без автоматизации процессов. Эффективность этих устройств низка, так как на ресурс их работы негативно влияет механический износ контактов. Поэтому целесообразно использовать тиристорные устройства переключения ответвлений сетевой обмотки трансформатора под нагрузкой с ограничением коммутационных токов [1]. В данных устройствах осуществляется дискретное пофаз-

ное регулирование выходного напряжения трансформатора при сравнительно простой реализации автоматизации процессов.

Отличительная особенность пофазного регулирования — несимметричные режимы работы трансформатора, которые обусловлены несимметричностью межфазных первичных напряжений, а также различным числом витков первичных обмоток. Следствием этого является несимметрия вторичных напряжений, что определяет качество энергии у потребителя по коэффициентам несимметрии для нулевой и обратной последовательностей. Наиболее тяжелые несимметричные режимы возникают при КЗ во вторичной цепи трансформатора, вызывая при этом перегрузки ти-

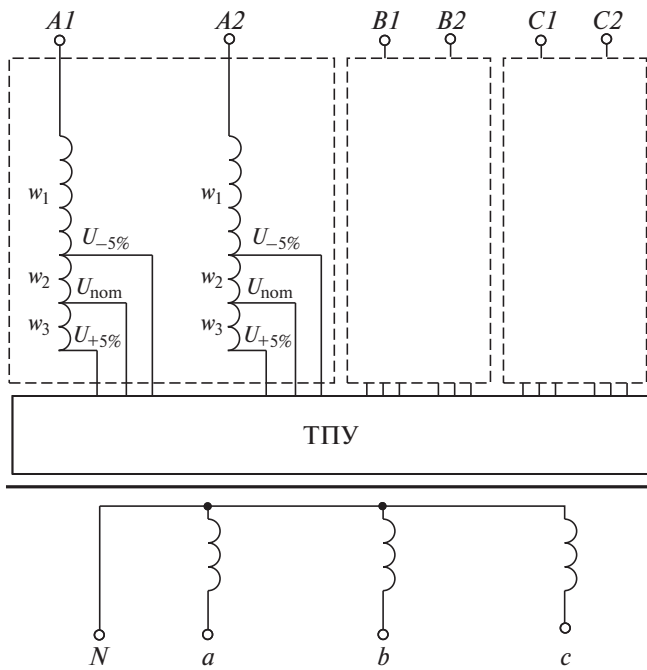


Рис. 1

ристорных ключей и обмоток по току, а также по напряжениям вследствие повышений фазных напряжений на первичной стороне трансформатора.

В ходе выполнения научной работы проведено исследование несимметричных электромагнитных процессов в трехфазном многообмоточном трансформаторе ТСЗН-400/10 с тиристорным переключающим устройством (рис. 1), входящим в состав разработанного трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения и мощности с ключами однонаправленного тока (ТТРНМ ОТ) [1, 2]. Ниже приведена характеристика опытного трансформатора:

Номинальное напряжение, кВ . . . . .	10/0,4
Схема и группа соединения . . . . .	Y/Y <sub>n</sub> -0
Ток холостого хода, % . . . . .	0,8
Напряжение КЗ, % . . . . .	5,5
Потери холостого хода, Вт . . . . .	900
Потери короткого замыкания, Вт . . . . .	5200

Каждая фаза трансформатора, имеющего схему соединения обмоток Y/Y<sub>0</sub>, разделена на две полуобмотки с регулировочными отводами ± 5 % от номинального значения.

Идеально симметричной нагрузки, при которой желательно эксплуатировать трансформаторы, в электрических системах практически не бывает. Имеющиеся те или иные отклонения от симметрии возрастают с увеличением мощности однофазных потребителей, питающихся от трехфазных сетей. Особенно они велики в аварийных несимметричных

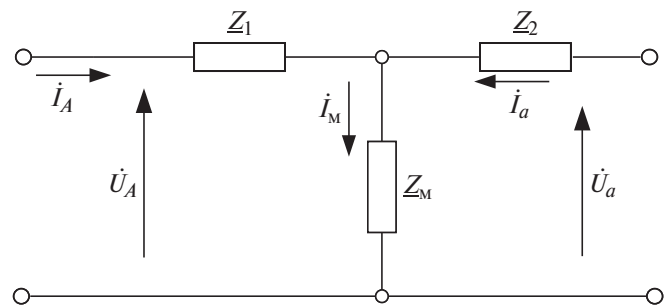


Рис. 2

режимах, например, при двух- и однофазных КЗ, при отключении одной из фаз линии передачи и т. п. Для оценки допустимых в эксплуатации отклонений от симметрии нужно располагать математическим описанием процессов в трансформаторе при несимметричной нагрузке. Несимметричные явления в трансформаторах обусловлены несимметрией как подведенных напряжений, так и нагрузки, что приводит к несимметрии напряжений у потребителей, отрицательно влияющей на их работу. Напряжение у однофазных потребителей при несимметрии может оказаться либо повышенным, либо пониженным. И в том, и в другом случае возникает несимметрия вторичных напряжений трансформатора, а это негативно отражается на качестве электроснабжения потребителей. Что касается самого ТТРНМ ОТ, несимметричная работа может быть опасна для него из-за перегрузки отдельных обмоток, тиристорных ключей, а также чрезмерных повышений фазных напряжений и насыщения магнитопровода трансформатора.

Как известно, несимметричные режимы анализируются методом симметричных составляющих, согласно которому трехфазная несимметричная система напряжений разлагается на системы напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей [3]. Основным достоинством данного метода является возможность использования схем замещения приведенного трансформатора для токов различных последовательностей и проведения расчетов с помощью аналитических формул. Для токов прямой и обратной последовательностей применяется обычная T-образная схема замещения трансформатора (рис. 2), а для токов нулевой последовательности — схема замещения на рис. 3.

Сопроотивления  $Z_1$  и  $Z_2$  определяются полями рассеяния, сопротивление  $Z_{M0}$  — основным магнитным потоком (для трехстержневого трансформатора составляет приблизительно

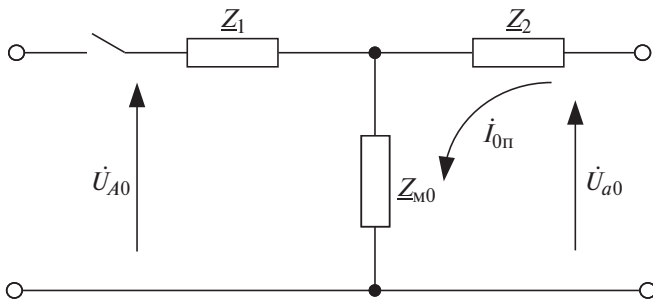


Рис. 3

10Zk) [4]. Ток нулевой последовательности протекает только во вторичной обмотке и является чисто намагничивающим [5]. В схеме замещения это учитывается введением разрыва в первичный контур.

Возможность рассчитать несимметричные режимы работы трансформаторного оборудования при широком изменении параметров нагрузки при симметричном и несимметричном приложенном напряжении позволяет перейти к ГОСТ на нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения, где несимметрия напряжений характеризуется следующими показателями:

коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности

$$K_{2U} = U_{2(1)}/U_{1(1)}, \quad (1)$$

где  $U_{2(1)}$  и  $U_{1(1)}$  — действующие значения напряжения обратной и прямой последовательностей основной частоты трехфазной системы напряжений, В;

коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности

$$K_{0U} = U_{0(1)}/U_{ном.ф}, \quad (2)$$

где  $U_{0(1)}$  — действующее значение напряжения нулевой последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений, В;  $U_{ном.ф}$  — номинальное значение фазного напряжения.

Нормально и предельно допустимые значения коэффициентов  $K_{2U}$  и  $K_{0U}$  равны 2,0 и 4,0 % соответственно.

Режимы несимметричной работы опытного трансформатора ТСЗН-400/10 в широком диапазоне изменения нагрузок иллюстрирует трехмерный график (см. рис. 4) зависимости коэффициента несимметрии по нулевой последовательности от сопротивлений фаз нагрузки. Данный график построен при неизменном номинальном сопротивлении в фазе

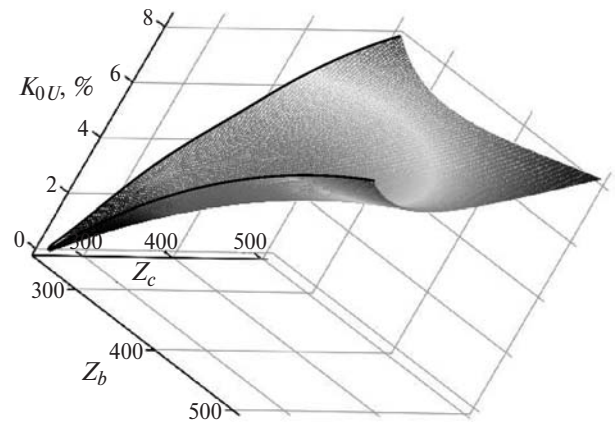


Рис. 4

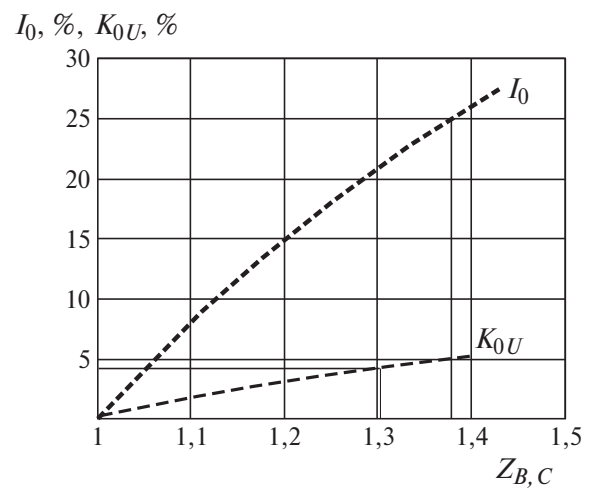


Рис. 5

А ( $Z_A = Z_{ном}$ ), изменяющихся сопротивлений в фазах В и С (от  $Z_{ном}$  до  $2Z_n$ ), что соответствует 50 %-ной нагрузке.

Из рис. 4 следует, что коэффициент несимметрии нулевой последовательности  $K_{0U}$ , %, значительно возрастает при симметричном увеличении сопротивлений в фазах В и С. Максимальным значениям  $K_{0U}$ , %, соответствуют границы графика, показанные на рис. 5.

В условиях эксплуатации трансформаторов со схемой  $Y/Y_0$  при наличии токов нулевой последовательности нарушение равенства фазных напряжений вызывает увеличение магнитного потока и перенасыщение того стержня, в обмотках которого ЭДС основного поля и ЭДС нулевой последовательности наиболее близки одна к другой. Во избежание значительного неравенства фазных напряжений необходимо ограничивать нагрузку нулевого провода, не допуская значений выше 25 % номинального тока обмотки. На рис. 5 показаны кривые зависимости коэф-

Значение параметра трансформатора									
$U_{AB}$ , кВ	$U_{BC}$ , кВ	$U_{CA}$ , кВ	$U_a$ , В	$U_b$ , В	$U_c$ , В	$I_a$ , А	$I_b$ , А	$I_c$ , А	$K_{2U}$ , %
10	10	9	212	234	212	530	585	530	6,915
10	9	9	220	220	196	550	550	491	6,918
11	10	10	243	243	219	607	607	548	6,25
11	11	10	235	257	235	588	643	588	6,257
11	10	9	229	249	204	572	624	510	11,34

коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности  $K_{0U}$ , %, и тока через нулевой провод  $I_0$ , %, при симметричном изменении нагрузки  $Z_{B,C}$  в фазах  $B$  и  $C$  от номинальной до 75 %  $I_{НОМ}$ , при этом нагрузка в фазе  $A$  — номинальная.

Расчетные рабочие параметры трансформатора ТСЗН 400/10 при несимметричном питающем напряжении приведены в таблице.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. По результатам расчетов в программе Mathcad установлено, что предельно допустимый коэффициент  $K_{0U} = 4$  % при нагрузках в фазах  $B$  и  $C$ , составляющих 82 % от номинальной, при этом нагрузка в фазе  $A$  — номинальная.

2. Ток, протекающий через нулевой провод, достигает значения 25 % от номинального фазного тока при нагрузках в фазах  $B$  и  $C$ , составляющих 78 % от номинальной, при этом нагрузка в фазе  $A$  — номинальная.

3. В случае несимметрии приложенных линейных первичных напряжений, составляющей  $\pm 10$  % от номинального значения, коэффициент несимметрии по обратной последовательности  $K_{2U}$  превышает предельно допустимое значение 4 % и в некоторых режимах достигает 11,34 %.

4. В аварийных режимах работы токи, протекающие через тиристорные ключи, зна-

чительно превышают номинальные токи обмоток. Так, при КЗ в фазе  $A$  ток первичной обмотки поврежденной фазы составляет  $3,9I_{НОМ}$ , а токи в фазах  $B$  и  $C$  — соответственно  $1,36I_{НОМ}$  и  $2,7I_{НОМ}$ . При КЗ в фазах  $A$  и  $B$  токи через тиристоры составят: в фазе  $A$  —  $16,67I_{НОМ}$ , в фазе  $B$  —  $15,5I_{НОМ}$ , в фазе  $C$  —  $1,67I_{НОМ}$ . При симметричном трехфазном КЗ токи во всех фазах, определяемые напряжением КЗ, составят  $18,2I_{НОМ}$ .

#### Список литературы

1. **Тиристорный** регулятор напряжения трансформаторов 6 – 10 кВ / А. Б. Лоскутов, А. А. Чивенков, А. В. Нажимов и др. — Промышленная энергетика, 2010, № 8.
2. **Снижение** токовых коммутационных перегрузок в трансформаторно-тиристорных регуляторах переменного напряжения / А. Б. Лоскутов, А. А. Чивенков, А. В. Нажимов, М. С. Солдатова. — Промышленная энергетика, 2010, № 9.
3. **Васютинский С. Б.** Вопросы теории и расчета трансформаторов. — Л.: Энергия, 1970.
4. **Иванов-Смоленский А. В.** Электрические машины. Т. 1: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство МЭИ, 2004.
5. **Мартынов В. А.** Расчет неполнофазных режимов работы трехфазных трансформаторов. — Электричество, 2003, № 9 и 10.

akralin@yandex.ru