

УДК 621.311.1.001.25

ШЕРЬЯЗОВ САКЕН КОЙШЫБАЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,¹

E-mail: sakenu@yandex.ru

ПЯТКОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, инженер²

E-mail: piatkov_andriei@mail.ru

¹ Южно-Уральский государственный аграрный университет, ул. Красная, 38, Челябинск, 454080, Российская Федерация

² «Челябэнерго», филиал ОАО МРСК-Урала, ул. 3-Интернационала, 114, Челябинск, 454091, Российская Федерация

ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ТОКОВ ПРИ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ В ОБМОТКАХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Дефекты межвитковой изоляции в силовых трансформаторах 6-10/0,4 кВ, эксплуатируемых в сельских электрических сетях, являются основным видом повреждений, приводящим к отказам. Витковые замыкания сопровождаются незначительным увеличением токов со стороны питающей обмотки трансформатора. Целью исследований является разработка методики определения токов, возникающих при витковых замыканиях в обмотках трансформатора. Предложена методика определения тока виткового замыкания, на основании которой представлены векторные диаграммы токов при замыкании в обмотках трансформатора. Для подтверждения данных, полученных в результате расчета, произведено экспериментальное исследование векторных диаграмм при витковых замыканиях в обмотках трансформатора ТСЗИ-2,5 кВ·А. В качестве средства измерения при проведении экспериментального исследования применялся прибор «Энергомонитор-3.3-T1». Представлены результаты экспериментальных исследований токов в предаварийном режиме и при возникновении витковых замыканий в обмотках. На основании анализа расчетных и экспериментальных данных определена актуальность предлагаемой методики и предложена дифференциальная токовая защита, основанная на измерении симметричных составляющих, как оптимальный метод выявления витковых замыканий в процессе эксплуатации трансформатора.

Ключевые слова: сельские электрические сети, силовые трансформаторы, витковые замыкания в обмотках, токи прямой и обратной последовательностей, векторные диаграммы.

Введение. Повреждение витковой изоляции обмоток является основной причиной отказов трансформаторов 6-10/0,4 кВ, эксплуатируемых в сельских электрических сетях [1]. Замыкание витков в одной из обмоток трансформатора представляется как появление дополнительной короткозамкнутой обмотки (ВЗ), а само замыкание – как однофазное на выводах этой обмотки [2, 3]. Выявление витковых замыканий в процессе эксплуатации трансформатора возможно по косвенным признакам. При этом наиболее перспективным методом представляется метод измерений аналоговых величин токов частоты 50 Гц (первой гармоники), а также их симметричных составляющих. Для выбора измеряемой величины необходимо рассмотреть изменение и распределение токов первой гармоники при витковых замыканиях, наглядно демонстрируемое векторными диаграммами, построенными с помощью метода симметричных составляющих [4].

Цель исследований – разработка методики определения токов, возникающих при витковых замы-

каниях в обмотках трансформаторов 6-10/0,4 кВ, экспериментальное подтверждение актуальности предлагаемой методики.

Материалы и методы. Витковое замыкание в аналогии с однофазным коротким замыканием (КЗ) является несимметричным повреждением и сопровождается возникновением равных между собой токов прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте повреждения [5]:

$$I_{a1 в.з.} = I_{a2 в.з.} = I_{a0 в.з.} \quad (1)$$

Со стороны обмотки ВН, соединенной звездой, токи прямой и обратной последовательностей из короткозамкнутой обмотки трансформируются без изменений, однако составляющие нулевой последовательности не могут протекать по обмотке без нейтрального вывода и, следовательно, не будут трансформироваться в обмотку ВН [5]:

$$I_{A1} = I_{A2} = -I'_{a1} = -I'_{a2} = -I'_{0n} \quad (2)$$

Полный ток в поврежденной фазе, например, в фазе А, со стороны питающей обмотки, соединенной в звезду, будет определяться по формуле:

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} = -(I_{a1} + I_{a2}). \quad (3)$$

Исходя из этого определение тока прямой или обратной последовательностей со стороны питающей обмотки представляется следующей формулой:

$$I_{A(1)2} = \frac{U_A}{Z_{K1} + Z_{K2} + Z_{0П}}, \quad (4)$$

где U_A – напряжение поврежденной фазы со стороны питающей обмотки ВН; Z_{K1} – сопротивление короткого замыкания прямой последовательности обмоток ВН-ВЗ; Z_{K2} – сопротивление короткого замыкания обратной последовательности обмоток

ВН-ВЗ; $Z_{0П}$ – сопротивление нулевой последовательности обмотки ВЗ.

Результаты и обсуждение. По предложенной методике был произведен расчет токов при замыкании 2% витков в фазе А, обмотки ВН трансформатора ТСЗИ-2,5 кВ·А 0,4/0,23 кВ (У/У_н). Данный трансформатор по своему конструктивному исполнению является подобным трансформаторам 6-10/0,4 кВ 1 и 2 габаритов эксплуатируемых в сельских электрических сетях.

На основании данных, полученных расчетным путем, была построена векторная диаграмма токов, отражающая их распределение в предаварийном и аварийном режиме. При построении векторной диаграммы принималось допущение того, что трансформатор нагружен в номинальном режиме – активной нагрузкой. Векторная диаграмма, полученная расчетным путем, представлена на рисунке 1.

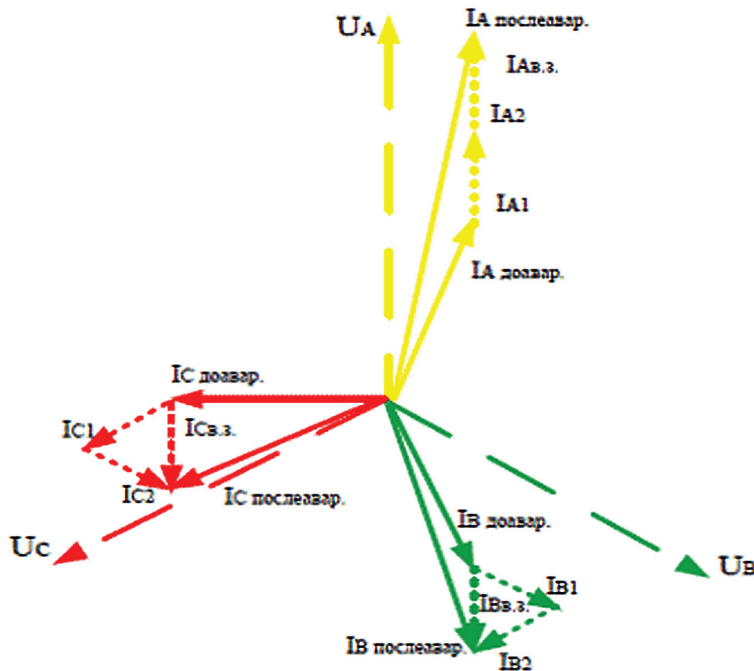


Рис. 1. Векторная диаграмма токов в обмотке ВН, соединенной по схеме У, построенная по расчетным данным

На рисунке 1 штриховой линией показан ток, возникающий при витковом замыкании ($I_{\text{в.з.}}$), сплошными линиями, ток доаварийного режима ($I_{\text{доавар.}}$) и ток аварийного режима ($I_{\text{авар.}}$).

Согласно векторной диаграмме при витковом замыкании со стороны питаемой обмотки ВН, соединенной по схеме «У», ожидается изменение токов во всех трех фазах трансформатора. При этом в поврежденной фазе увеличение тока будет в два раза больше, чем в двух других, а полный ток, возникающий при витковом замыкании 2% витков, составит около 25% номинального тока.

Для подтверждения данных, полученных по результатам расчетов, произведено экспериментальное исследование векторных диаграмм при вит-

ковых замыканиях в обмотках трансформатора ТСЗИ-2,5 кВ·А 0,4/0,23 кВ (У/У_н). Для моделирования витковых замыканий в обмотках ВН и НН трансформатора были специально подготовлены выводы, позволяющие замыкать витки друг с другом, тем самым имитируя витковое замыкание.

В качестве средства измерения применялся прибор «Энергомонитор-3.3.Т1», позволяющий производить измерения амплитуд токов и напряжений, а также фазовых углов между фазными напряжениями и фазовых углов между напряжениями и токами [6].

Схемы подключения прибора «Энергомонитор-3.3.Т1» для снятия векторных диаграмм со стороны обмотки ВН представлены на рисунке 2.

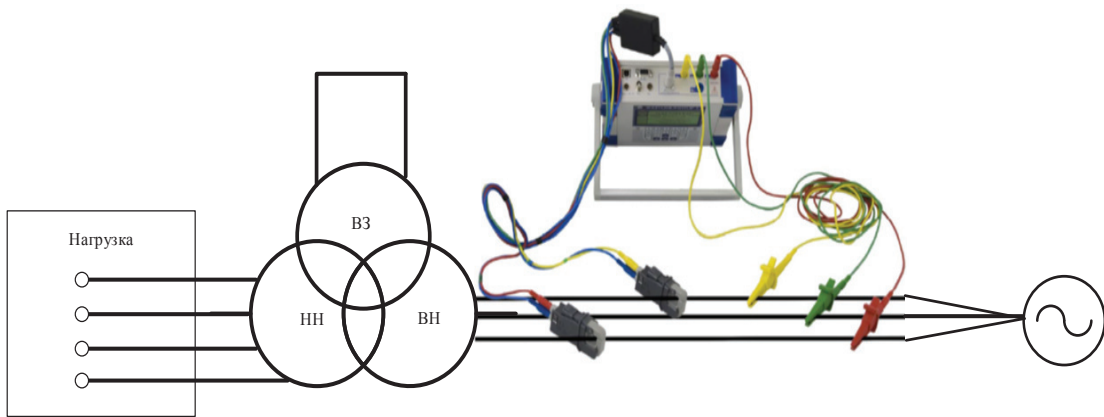


Рис. 2. Схема подключения прибора «Энергомонитор-3.3.Т1» для снятия векторных диаграмм со стороны обмотки ВН силового трансформатора

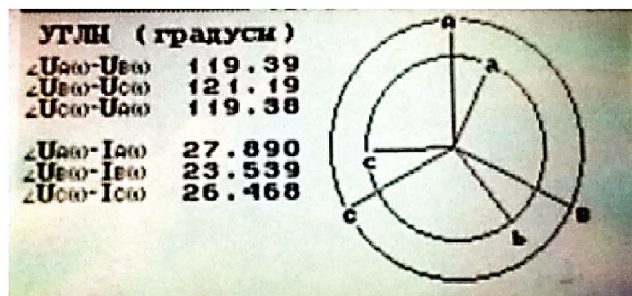
Экспериментальное исследование векторных диаграмм силового трансформатора производилось в два этапа.

На первом этапе силовой трансформатор подключался к сети 0,38 кВ и загружался до номинальной мощности, при этом с помощью цифровой фотокамеры с дисплея устройства «Энергомонитор-3.3.Т1» производилась фиксация векторных диаграмм. Данный режим работы трансформатора рассматривался как предаварийный.

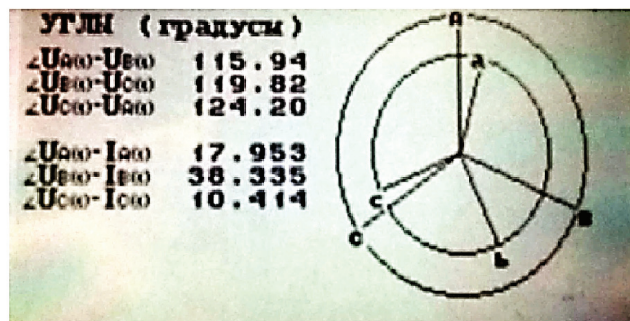
На втором этапе при номинальной нагрузке производилось моделирование витковых замыканий в обмотках ВН и НН, при этом также производи-

лась фото фиксация векторных диаграмм. Режим с витковым замыканием рассматривался как аварийный. При проведении двух этапов эксперимента нагрузка носила активный характер. Векторные диаграммы при витковом замыкании в фазе А обмотки ВН, полученные экспериментальным путем, представлены на рисунке 3 а, б.

На векторных диаграммах, снятых с дисплея устройства «Энергомонитор-3.3Т1» (рис. 3 а, б), в левой части дисплея отображаются цифровые значения углов, град.; в правой части – векторная диаграмма, на которой длинные векторы соответствуют напряжению, а короткие – току.



а



б

Рис. 3. Векторные диаграммы токов в обмотке ВН трансформатора: а – в предаварийном режиме»; б – при витковом замыкании в фазе А обмотки ВН

Анализ векторных диаграмм, полученных экспериментальным путем (рис. 3), показывает, что витковое замыкание в обмотке ВН сопровождается изменением токов во всех трех фазах обмотки ВН, при этом токи со стороны обмотки НН не изменяются. Векторные диаграммы, полученные экспериментально, являются аналогичными диаграмме, построенной по расчетным данным.

Также прибором «Энергомонитор-3.3.Т1» регистрировалось изменение токов прямой и обратной последовательностей. Данные измерений симметричных составляющих токов, а также данные, полученные расчетным путем, представлены в таблице.

Таблица

Токи прямой и обратной последовательностей при витковых замыканиях в фазе А, обмотки ВН трансформатора

Метод определения	Доаварийный режим		Аварийный режим	
	I_1, A	I_2, A	I_1, A	I_2, A
Экспериментальный	3,82	0,08	4,29	0,55
Расчетный	3,82	0,00	4,27	0,45

Анализ данных, представленных в таблице, показывает актуальность предложенной методики расчета токов, возникающих при витковых замыканиях. Незначительное отличие экспериментальных данных от полученных расчетным путем может быть следствием несимметрии магнитопровода, а также может быть обусловлено погрешностью прибора измерения.

Экспериментальные исследования витковых замыканий в других фазах обмотки ВН трансформатора и во всех фазах обмотки НН также показали существенное сходство с данными, полученными расчетным путем.

Выводы

1. Анализ данных, произведенных расчетным и экспериментальным путем, показывает актуальность предложенной методики определения токов, возникающих при витковых замыканиях, с помощью метода симметричных составляющих.

2. Витковые замыкания в обмотках трансформаторов со схемой соединений У/У_н, вне зависимости от локализации повреждения в одной из обмоток, сопровождаются увеличением токов прямой и обратной последовательностей со стороны питающей обмотки ВН, при этом токи со стороны обмотки НН не изменяются.

3. Токи, возникающие при витковых замыканиях, существенно меньше номинальных токов трансформатора, что создает значительные трудности для выбора устройств, чувствительных к витковым замыканиям в обмотках трансформатора.

4. Сопровождающееся с витковым замыканием увеличение токов только со стороны питаемой обмотки позволяет рассматривать в качестве устройства, реагирующего на данный вид повреждения, токовую дифференциальную защиту, позволяющую выполнять настройку срабатывания меньше номинального тока трансформатора.

5. Одним из перспективных методов выявления витковых замыканий в обмотках трансформатора представляется метод измерений дифференциальных токов симметричных составляющих.

Библиографический список

1. Шерязов С.К., Пятков А.В. Анализ видов и причин повреждений трансформаторов 6-10/0,4 кВ в сельских электрических сетях: Материалы ЛШ Международной науч. – техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». Челябинск: ЧГАА, 2014. С. 320-325.
2. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 240 с.
3. Чечушков Г.А., Гаген А.Ф. Витковые замыкания в трансформаторах и их схемы замещения. Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий. Челябинск: ЧПИ, 1974. С. 36-42.
4. Вольдек А.И. Электрические машины. М.: Энергия, 1974. 840 с.
5. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л.: Энергия, 1970. 432 с.
6. Приборы для измерения электрических величин и показателей качества электрической энергии Энергомонитор-3.3.Т.1: Руководство пользователя. 2012. 120 с.

Статья поступила 10.01.2017 г.

VECTOR DIAGRAMS OF CURRENTS AT INTERTURN FAULTS IN WINDINGS OF POWER TRANSFORMERS

SAKEN K. SHERIAZOV, DSc (Eng), Professor¹

E-mail: sakenu@yandex.ru

ANDREY V. PYATKOV, engineer²

E-mail: piatkov_andriei@mail.ru

¹ South-Ural State Agricultural University. Department of Energy Supply and Automation of Technological Processes. Krasnaya str., 38, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

² “Chelyabenergo”, branch of OAO MRSK-Ural, 3 International str., 114, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

The author claims that defects of interturn insulation in power transformers 6-10/0.4 kV operating in rural power networks are the main type of damage leading to failures. Coiled-circuit currents are accompanied by a slight current increase in the transformer supply winding. The research purpose is to develop methods for detecting currents arising from interturn short circuits in the transformer windings. The paper proposes a method of determining the current interturn fault serving as a basis for presenting a vector diagram of currents in case of transformer winding faults. To confirm the data obtained as a result of calculations, the authors have made an experimental study of vector diagrams at interturn faults in the TSZI-2,5 kV·A transformer windings. The “Energomonitor-3.3.T1” device has been used as a measuring instrument in the pilot study. The paper presents the results of experimental current studies in a pre-emergency mode, and in case of interturn faults in windings. Basing on the analysis of theoretical and experimental data, the authors have determined the relevance of the proposed methodology and suggested a differential current protection based, in particular, on the measurement of symmetrical components, as the best method for detecting interturn faults in the transformer operation.

Key words: rural power grids, power transformers, interturn short circuits in windings, positive and negative sequence currents, vector diagrams.

References

1. Sher'yazov S.K., Pyatkov A.V. Analiz vidov i prichin povrezhdeniy transformatorov 6-10/0,4 kV v sel'skikh elektricheskikh setyakh [Analysis of types and causes of damage to 6-10 / 0.4 kV transformers in rural power grids] // Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauch. – tekhn. konf. “Dostizheniya nauki – agropromyshlennomu proizvodstvu”. Chelyabinsk: CHGAA, 2014. Pp. 320-325.

2. Zasyupkin A.S. Releynaya zashchita transformatorov [Transformer relay protection]. M.: Energoatomizdat, 1989. 240 p.

3. Chechushkov G.A., Gagen A.F. Vitkovyye zamykaniya v transformatorakh i ikh skhemy zameshcheniya. Avtomatizatsiya energosistem i energoustanovok promyshlennykh predpriyatiy [Interturn

faults in transformers and their replacement schemes. Automation of power systems and power plants of industrial enterprises]. Chelyabinsk: CHPI, 1974. Pp. 36-42.

4. Vol'dek A.I. Elektricheskiye mashiny [Electric installations]. M.: Energiya, 1974. 840 p.

5. Vasyutinskiy S.B. Voprosy teorii i rascheta transformatorov [On the theory and calculation of transformers]. L.: Energiya, 1970. 432 p.

6. Pribory dlya izmereniya elektricheskikh velichin i pokazateley kachestva elektricheskoy energii Energomonitor-3.3.T.1: Rukovodstvo pol'zovatelya [Instruments for measuring electrical values and electrical energy quality indicators. Energomonitor-3.3.Vol.1: User's manual]. 2012. 120 p.

Received on January 10, 2017