



УДК 621.311.1.001.25

ТОКИ НЕБАЛАНСА ПРИ МЕЖВИТКОВОМ ЗАМЫКАНИИ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6-10/0,4 кВ.

С.К. Шерьязов¹, А.В. Пятков²

¹ Южно-Уральский государственный аграрный университет,
г. Челябинск, Россия

² Шадринские электрические сети АО «Курганэнерго», г. Шадринск, Россия

Резюме: В статье предложена методика определения тока небаланса при межвитковом замыкании в обмотках трансформатора. Рассмотрены основные составляющие тока небаланса. Приведены результаты экспериментальных исследований токов небаланса прямой и обратной последовательности в зависимости от загрузки трансформатора. По результатам теоретических и экспериментальных исследований определен ток обратной последовательности, как наиболее чувствительный параметр к витковым замыканиям.

Ключевые слова: сельские электрические сети, силовые трансформаторы, витковые замыкания в обмотках, небаланс токов прямой и обратной последовательностей, дифференциальная защита с действием на сигнал.

THE CURRENT OF UNBALANCE IN TURN-TO-TURN SHORT CIRCUIT IN THE WINDING OF TRANSFORMERS 6-10/0,4 кV

S.K. Sheryazov¹, A.V. Pyatkov²

¹ South-Ural State Agricultural University, Chelyabinsk, Russia

² Shadrinsk electric networks "Kurganenergo", Shadrinsk, Russia

Abstract: The procedure of defining the current of unbalance in turn-to-turn circuit in the winding of transformers is suggested in the article. The basic constituents of the current of unbalance are viewed. The results of experimental researches of currents of unbalance of direct and return sequence depending on the charge of transformer are given. On the results of theoretical and experimental researches the current of return sequence as the most sensitive parameter to the turn-to-turn circuit is defined.

Key words: country electric networks, power transformers, turn short circuits in winding, unbalance of the currents of direct and return sequence, differential protection with the impact on the signal.

Повреждение витковой изоляции обмоток является основной причиной отказов трансформаторов 6-10/0,4 Кв, эксплуатируемых в сельских электрических сетях [1]. При витковом замыкании возникает несимметричный режим в работе трансформатора [2]. Характерной особенностью, объединяющей различные виды витковых замыканий, является

несимметрия токов со стороны одной из обмоток трансформатора в независимости от группы соединения обмоток.

При витковых замыканиях в обмотках трансформаторов потребляемый ток изменяется незначительно и может составлять от 10 до 30 % номинального тока. Витковое замыкание может рассматриваться как ненормальный режим из-за неаварийного тока, в особенности в начальный период возникновения. В этих условиях желательно обнаружить возникшее повреждение на ранней стадии.

Существующие защиты межвитковым замыканиям в трансформаторах, особенно в начальной стадии, не чувствительны. Для выявления витковых замыканий в трансформаторах 6–10/0,4 кВ с различными группами обмоток необходима защита, реагирующая на возникающий несимметричный режим и действующая на сигнал.

Для трансформаторов 6–10/0,4 кВ, эксплуатируемых в сельских сетях единственно возможным средством выявления витковых замыканий может быть дифференциальная защита, реагирующая на возникающий небаланс токов [3]. Рациональный выбор параметра срабатывания дифференциального устройства, работающего на сигнал, возможен после проведения сравнительного анализа тока небаланса в режиме несимметрии, а именно токов прямой и обратной последовательностей, поскольку ток нулевой последовательности отсутствует в питающей линии 6 – 10 кВ.

Определение тока небаланса прямой последовательности не вызывает трудностей и может быть представлено, аналогично определению небаланса полных токов, следующей формулой:

$$I_{\text{нб.п1}} = I_{\text{нб.ε1}} + I_{\text{нб.рег.1}} + I_{\text{нб.выр.1}} + I_{\text{нб.нам.1}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{нб.ε1}}$ – ток небаланса прямой последовательности, вызываемый погрешностью датчиков тока, зависит от класса точности применяемых датчиков; $I_{\text{нб.рег.1}}$ – ток небаланса, определяемый исходя из возможного диапазона регулирования коэффициента трансформации, зависит от количества ступеней регулирования и для трансформаторов с ПБВ обычно $I_{\text{нб.рег.1}} \leq \pm 0,05$; $I_{\text{нб.выр.1}}$ – ток небаланса прямой последовательности, определяемый из-за неточности выравнивания токов в плечах защиты; $I_{\text{нб.нам1}}$ – ток небаланса, вызываемый током намагничивания трансформаторов.

Для определения тока небаланса обратной последовательности рассмотрим его составляющие более подробно. Одной из составляющих тока небаланса обратной последовательности является погрешность, вносимая датчиками тока $-I_{\text{нб.ε2}}$. Данная погрешность обусловлена разностью намагничивающих токов трансформаторов тока в плечах дифференциального устройства.

Выбор трансформаторов тока с минимальной погрешностью, работающих в схемах дифференциальных устройств, действующих на сигнал, ограничен критерием прохождения по допустимой вторичной нагрузке. При этом следует рассматривать самый неблагоприятный случай, при котором один из датчиков тока работает с предельной погрешностью. Для трансформаторов тока класса 10Р ток небаланса обратной последовательности $I_{\text{нб.ε2}}$, при максимально возможном токе перегрузки, принимаемом равным $1,8I_{\text{ном.}}$, и определяемым по формуле:

$$I_{\text{нб.ε2}} = 1,8I_{\text{ном.}} \cdot 0,033 \quad (2)$$

Следующей составляющей тока небаланса является погрешность, вносимая изменением коэффициента трансформации силового трансформатора при переключении ступени ПБВ – $I_{\text{нб.рег.}}$. Переключение ступени ПБВ выполняется одновременно для всех трех фаз трансформатора и не сопровождается изменением симметрии токов, однако при этом происходит нарушение равенства амплитуд токов обратной последовательности сторон ВН и НН, возникающих, например, при несимметричной нагрузке силового трансформатора.

Следовательно, погрешность, вносимая, при переключении ПБВ зависит от выбранной ступени.

Для определения наибольшего тока небаланса необходимо принимать крайние положения ступеней ПБВ, позволяющие максимально изменять коэффициент трансформации силового трансформатора, то есть для трансформаторов 6–10/0,4 кВ это 5% от номинального тока.

Также возникновение токов небаланса может быть обусловлено погрешностью, вносимой неточностью выравнивания токов в плечах защиты $-I_{\text{нб.выр.}}$. Данная составляющая небаланса зависит непосредственно от конструктивных особенностей элементов дифференциальной схемы (погрешности выравнивающих автотрансформаторов, погрешности органов измерения дифференциального реле) и должна определяться для каждой схемы индивидуально. При этом $I_{\text{нб.выр.}}$ может составлять не более 1 % тока загрузки трансформатора [3].

Токи намагничивания силовых трансформаторов 10/0,4 кВ определяются из опыта холостого хода при заводских испытаниях трансформаторов и, как правило, составляют 1–2% от номинального тока трансформатора. Токи намагничивания в фазах силовых трансформаторов отличаются друг от друга, следовательно являются несимметричными. В действительности величина тока средней фазы меньше тока крайних фаз на 20–35% [4].

В трехфазных трансформаторах за величину тока холостого хода принимают среднее арифметическое значение линейных токов, измеренных при номинальном напряжении [4]. Следовательно, с учетом максимальной несимметрии (при отклонении тока средней фазы на 35%) ток холостого хода может, определяться следующей формулой:

$$I_{\text{хх}} = \frac{\frac{I_{\text{ххА}}}{1,13} + \frac{I_{\text{ххВ}}}{0,74} + \frac{I_{\text{ххС}}}{1,13}}{3}. \quad (3)$$

Преобразуя данную формулу с помощью метода симметричных составляющих и принимая максимальную несимметрию постоянной, ток небаланса обратной последовательности может быть определен следующим выражением:

$$I_{\text{нб.нам2}} = 0,13 \cdot I_{\text{хх}}. \quad (4)$$

Совокупность вышеприведенных составляющих небаланса является полным током небаланса обратной последовательности $I_{\text{нб.2}\Sigma}$ и представляется следующим выражением:

$$I_{\text{нб.2}\Sigma} = I_{\text{нб.с2}} + I_{\text{нб.рег.2}} + I_{\text{нб.выр.}} + I_{\text{нб.нам2}}. \quad (5)$$

Для подтверждения изложенной методики определения токов небаланса и последующего выбора наиболее чувствительного параметра срабатывания произведено экспериментальное исследование токов небаланса прямой и обратной последовательностей трансформатора ТСЗИ-2,5/0,4/0,23 кВ при различных значениях загрузки. Данный трансформатор по своему конструктивному исполнению является подобным трансформаторам 6–10/0,4 кВ 1 и 2 габаритов, эксплуатируемым в сельских электрических сетях.

Исследуемый трансформатор подключался к сети 0,4 и 0,22 кВ через трансформаторы тока, установленные со стороны обмоток ВН и НН. Вторичные токи трансформаторов тока сторон ВН выравнивались по амплитуде с вторичными токами НН и направлялись навстречу друг другу, где взаимно компенсировались. Измерение тока небаланса прямой и обратной последовательностей осуществлялось с помощью прибора «Энергомонитор-3.3Т1» [6] в соответствии с требованием стандарта (ГОСТ 30804.4.30-2013, IEC 61000-4-30:2008). Исследования проводились при загрузке трансформатора от холостого хода до $1,8 I_{\text{ном.}}$ трансформатора.

На рис. 1 показаны значения токов небаланса прямой и обратной последовательностей относительно номинального тока трансформатора ТСЗИ-2,5. Сплошными линиями показаны экспериментальные данные, а штриховыми – расчетные.

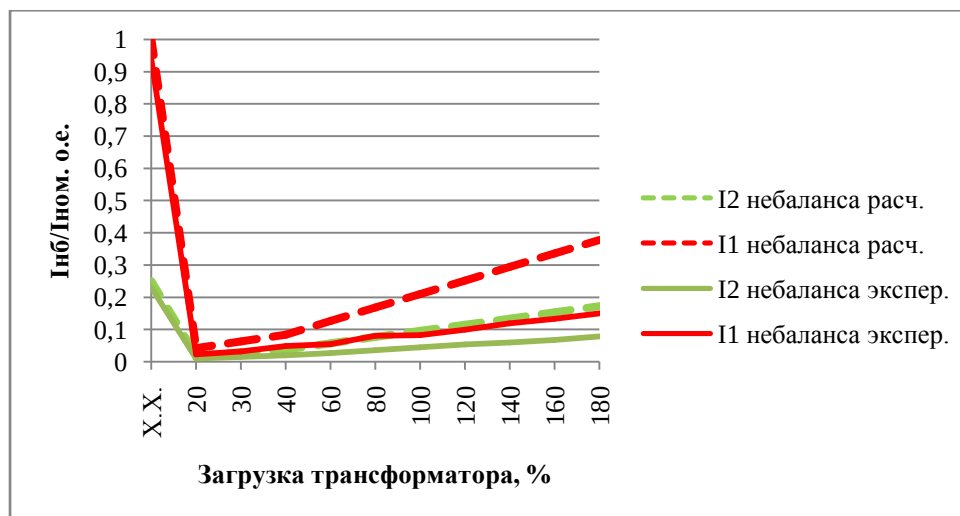


Рис. 1. Токи небаланса прямой и обратной последовательностей в различных режимах загрузки трансформатора

Анализ результатов показывает, что экспериментальные данные токов прямой и обратной последовательностей при различных режимах загрузки меньше расчетных. Это обусловлено тем, что расчетный ток небаланса всех последовательностей учитывает максимально возможные погрешности его составляющих, и для любых трансформаторов он всегда будет больше тока, определенного экспериментально. Данный факт свидетельствует о правильности предложенной методики определения токов небаланса. Также, при одинаковой нагрузке токи небаланса обратной последовательности значительно меньше токов прямой, особенно это характерно для режимов холостого хода и максимальной загрузки трансформатора, при этом токи небаланса обеих последовательностей возрастают с увеличением загрузки трансформатора.

Возникновение виткового замыкания в обмотках трансформатора сопровождается увеличением токов прямой и обратной последовательностей. Минимально возможный ток при повреждении витковой изоляции, к которому следует проверять чувствительность, будет одинаковым для защит прямой и обратной последовательностей. Выбор тока срабатывания дифференциального устройства, работающего на сигнал по одной из последовательностей, представляется следующей формулой:

$$I_{\text{ср.диф}} = K_n \cdot I_{\text{нб.п1}(2)}, \quad (6)$$

где K_n – коэффициент надежности, для дифференциальных устройств, в зависимости от исполнения которых, следует принимать от 1,1 до 1,5 [3]; $I_{\text{нб.п1}(2)}$ – ток небаланса прямой или обратной последовательности, возникающий в самом неблагоприятном режиме работы дифференциального устройства [3]. Для устройств, работающих на сигнал, $I_{\text{нб.п1}(2)}$ следует определять с учетом максимально возможного перегруза трансформатора.

На основании изложенного можно сделать вывод, что для дифференциальных устройств, работающих на сигнал, наибольшей чувствительностью будет обладать ток, имеющий наименьшую уставку срабатывания, то есть ток обратной последовательности.

Литература

1. Шерьязов С.К., Пятков А.В. Анализ видов и причин повреждений трансформаторов 6-10/0,4 кВ в сельских электрических сетях // Материалы LIII международной науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». Челябинск: ЧГАА, 2014. С. 320–325.
2. 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.
3. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1977. 560с.
4. Каганович Е.А. Испытание трансформаторов малой и средней мощности на напряжение до 35 кВ включительно. М: Энергия, 1977. 296 с.
5. Приборы для измерения электрических величин и показателей качества электрической энергии Энергомонитор-3.3. Т1: Руководство пользователя. 2014. 120 с.
6. Patrick Heavey., Clint Whitney. RMS Measuring Principles in the Application of Protective Relaying and Metering. Presented before the 30 th Annual Western Protective Relay Conference. Spokane, WA USA. 2003.
7. Abniki H., Majzoobi A., Monsef H., Dashti H., Ahmadi H., Khajavi P. Identifying Inrush Currents from Internal Faults using Symmetrical Components in Power Transformers. Proceedings of the International Symposium: Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010, 20-22 Sept. 2010.
8. Vishwanath R., Akshatha V., Shetty, Poonam. A New Approach to monitor Condition of Transformers incipient fault diagnosis based on GSM & XBEE. IJEDR- 2321-9939 Volume 3, Issue 2. 2015.
9. Шерьязов С.К., Пятков А.В. Анализ факторов, влияющих на витковые замыкания в трансформаторах напряжением 6-10/0,4 кВ. // Вестник КрасГАУ. 2014. № 7. С. 170–174.
10. Шерьязов С.К., Пятков А.В. Влияние нелинейной нагрузки на работу релейной защиты силовых трансформаторов / Материалы IX международной науч.-практ. конф. «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени». Екатеринбург, 2015.

Авторы публикации

Шерьязов Сакен Койшыбаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов» Южно-Уральского государственного аграрного университета. E-mail: sakenu@yandex.ru.

Пятков Андрей Владимирович – инженер Шадринских электрических сетей АО «Курганэнерго». E-mail: piatkov_andrei@mail.ru.

References

1. Sheryazov S.K., Pyatkov A.V. Analysis of the types and causes of damage to transformers 6-10 / 0.4 kV transformer substation in rural power grids. Materials LIII of the international scientific and engineering. Conf. "Advances in science - agricultural production." Chelyabinsk CHGAA, 2014. Page 320-325.
2. Chechushkov G.A., Hagen A.F., Turn-to-turn circuit transformers and their equivalent circuit. Automation of power systems and power industries. - Chelyabinsk: SIP, 1974. - P. 36-42.
3. Fedoseyev A.M., relay protection of electrical systems. Textbook for high schools. M.: Energia, 1977.-560 with.

4. Kaganovich E.A. Small and medium power transformers for voltage testing up to 35 kV -M: Energy, 1977- 296 p.
5. Instruments for measuring electrical quantities, and quality indicators of electric energy Energomonitor-3.3.T1. User guide. 2014. 120 p.
6. Patrick Heavey., Clint Whitney. RMS Measuring Principles in the Application of Protective Relaying and Metering. Presented before the 30 th Annual Western Protective Relay Conference. Spokane, WA USA. 2003.
7. Abniki H., Majzoobi A., Monsef H., Dashti H., Ahmadi H., Khajavi P. Identifying Inrush Currents from Internal Faults using Symmetrical Components in Power Transformers. Proceedings of the International Symposium: Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010, 20-22 Sept. 2010.
8. Vishwanath R, Akshatha V, Shetty, Poonam. A New Approach to monitor Condition of Transformers incipient fault diagnosis based on GSM & XBEE. IJEDR- 2321-9939 Volume 3, Issue 2. 2015.
9. Sheryazov S.K., Pyatkov A.V. Analysis of factors affecting the number of turns in the transformer circuit voltage of 6-10 / 0.4 kV. Bulletin 2014.KrasGAU.№ 7. Page 170-174.
10. Sheryazov S.K., Pyatkov A.V. The influence of unlinear burden on the work of relay protection of power transformer. Materials IX of the international scientific and engineering. Conf. «Domestic science in the era of change: the postulates of the past and the theory of the new time. " Ekaterinburg:2015.

Authors of the publication

Sheriazov Saken Koyshebaevich– d.t.s., professor the chair of energy supply and automatization of technological processes, South-Ural State Agricultural University. E-mail: sakenu@yandex.ru

Pyatkov Andrey Vladimirovich– engineer, Shadrinskelectrick networks “Kurganenergo”. E-mail: piatkov_andriei@mail.ru.

Поступила в редакцию

21 декабря 2016 г.