



Столыпинский
вестник

Научная статья

Original article

УДК 62

**АНАЛИЗ НЕДОСТАТКОВ РЕЛЕ СЕРИИ РНТ-560 И ДЗТ-11,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ
ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА**

**ANALYSIS OF THE DISADVANTAGES OF THE RNT-560 AND DZT-11
SERIES RELAYS USED TO IMPLEMENT DIFFERENTIAL PROTECTION OF
THE TRANSFORMER**

Пашковская Екатерина Евгеньевна, магистрант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г Москва, Красноказарменная ул., 14

Груздов Андрей Геннадьевич, магистрант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г Москва, Красноказарменная ул., 14

Сивеев Тихон Максимович, студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г Москва, Красноказарменная ул., 14

Котов Андрей Сергеевич, студент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г Москва, Красноказарменная ул., 14

Pashkovskaya Ekaterina Evgenievna, Master's student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

Gruzdev Andrey Gennadievich, Master's student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

Tikhon Maximovich Siveev, student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

Kotov Andrey Sergeevich, student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI", Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14

Аннотация: В данном исследовании произведен обзор особенностей трансформаторов, влияющих на выбор тока срабатывания дифференциальной защиты трансформатора, используемых для реализации данного вида защиты реле, а также проанализированы недостатки реле серии РНТ-560 и реле ДЗТ-11.

Abstract: This study provides an overview of the features of transformers affecting the choice of the transformer differential protection response current used to implement this type of relay protection is made, as well as the disadvantages of the RNT-560 series relays and the DZT-11 relay are analyzed.

Ключевые слова: релейная защита, дифференциальная защита, ток небаланса, бросок тока намагничивания, реле серии РНТ-560, ДЗТ-11.

Keywords: relay protection, differential protection, unbalance current, magnetization current surge, relay series RNT-560, DZT-11.

Дифференциальная защита обладает высокой чувствительностью и является быстродействующей защитой, отдельные дифференциальные защиты на микроэлектронной и микропроцессорной базе при больших токах короткого замыкания фиксируют внутреннее повреждение в пределах 15 – 20 мс, а ток

срабатывания защиты может составлять 0,1 – 0,3 номинального тока электроустановки.

Раннее выявление повреждения благодаря высокой чувствительности и малому времени срабатывания дифференциальных реле позволяет уменьшить размеры повреждения и время восстановления объекта [1].

Однако дифференциальная защита силовых трансформаторов ещё далека от технического совершенства и не всегда способна надёжно функционировать; принцип работы дифференциальной защиты, факторы, влияющие на выбор ее параметров, и недостатки некоторых реле, используемых для ее исполнения, будут рассмотрены в данной работе.

Дифференциальная защита — это основная быстродействующая защита трансформаторов (автотрансформаторов) от всех видов КЗ в обмотках и на выводах, включая витковые замыкания в обмотках.

В соответствии с ПУЭ [2] дифференциальная токовая защита устанавливается на одиночно работающих трансформаторах мощностью $\geq 6,3$ МВА, на параллельно работающих трансформаторах мощностью ≥ 4 МВА, а также на трансформаторах мощностью ≥ 1 МВА. В последнем случае, если не применима токовая защита: токовая отсечка не обеспечивает достаточной чувствительности, а МТЗ имеет выдержку времени более одной секунды.

Принцип действия продольной дифференциальной защиты основан на сравнении вторичных фазных токов с разных сторон защищаемого трансформатора. Для выполнения защиты со всех сторон трансформатора устанавливаются трансформаторы тока ТА, вторичные обмотки которых соединяются таким образом, чтобы ток в цепях дифференциально включенных реле тока проходил только в случае повреждения в защищаемой зоне и принципиально был равен нулю во всех остальных режимах. Зона действия защиты охватывает трансформатор и выводы его обмоток и ограничена местом установки ТА. При внутренних повреждениях ток в реле определяется суммой вторичных токов, направленных к месту повреждения, и пропорционален

вторичному току КЗ. Защита по принципу действия обладает абсолютной селективностью и выполняется без выдержки времени.

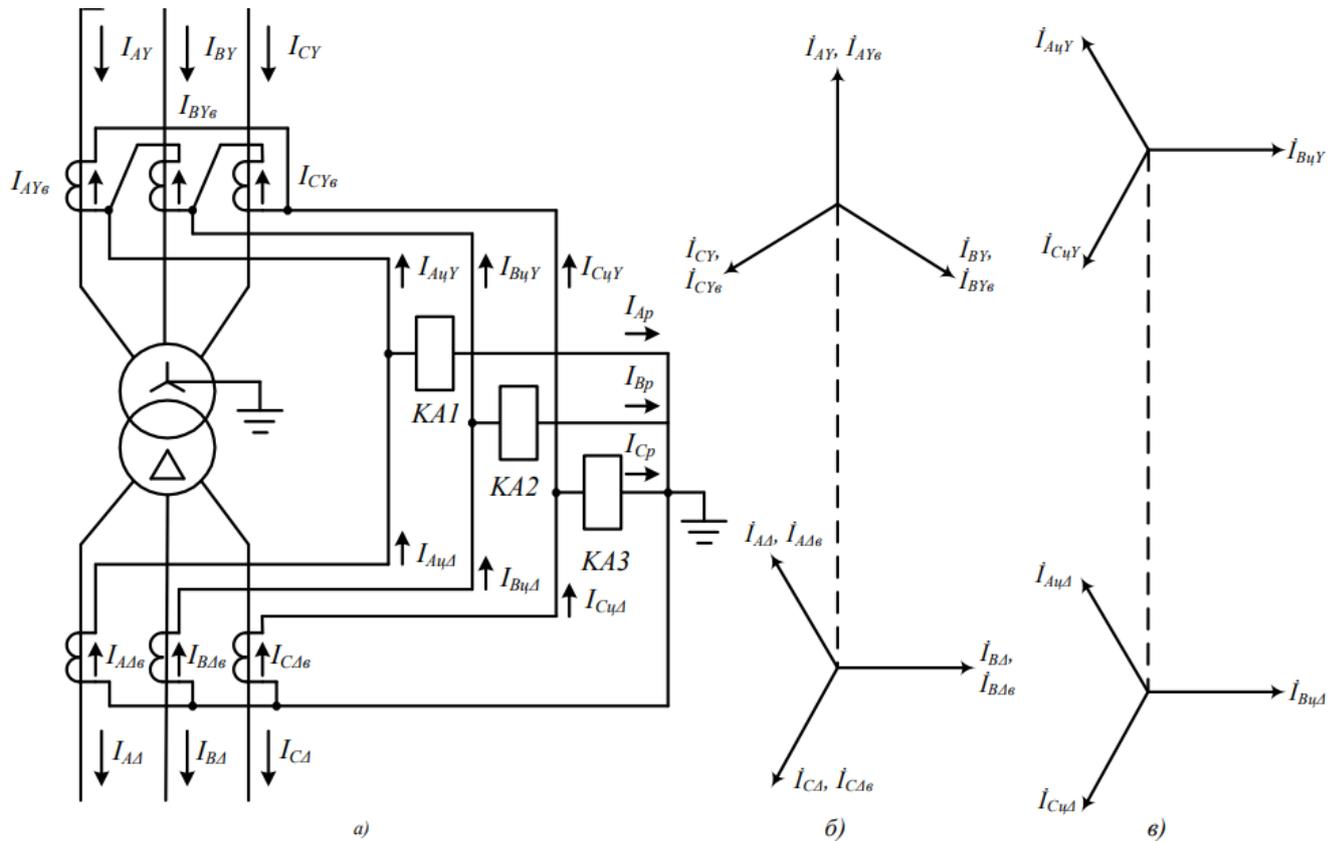


Рисунок 1. Дифференциальная защита трансформатора

При выполнении дифференциальной защиты необходимо учитывать некоторые особенности трансформаторов. Данные особенности будут рассмотрены далее на примере понижающих двухобмоточных трансформаторов:

- Различные соединения обмоток трансформатора

В большинстве случаев обмотки силовых трансформаторов имеют разные группы соединений. Тогда даже при равенстве модулей вторичных сравниваемых токов в реле будет протекать ток небаланса из-за наличия фазового сдвига (рисунок 1).

Представлена схема подключения цепей дифференциальной защиты трансформатора с соединением обмоток Y0/Δ-11 и приведены векторные диаграммы первичных (I_Y, I_Δ) токов трансформатора, вторичных токов ТА ($I_{YB}, I_{\Delta B}$) и токов в плечах защиты (токов циркуляции $I_{цY}, I_{ц\Delta}$). В нормальном (симметричном) режиме между первичными токами двух групп

трансформаторов тока ТА существует сдвиг по фазе: фазный ток со стороны треугольника \dot{I}_Δ опережает фазный ток со стороны звезды \dot{I}_Y на 30° . Такой же сдвиг имеет место и для вторичных токов ТА. Поэтому при непосредственном сравнении вторичных токов фаз в реле проходил бы ток небаланса $\dot{I}_{нб} = \dot{I}_{\DeltaВ} - \dot{I}_{YВ} = 2I_B \sin 15^\circ$ (при равных по модулю значениях). Его значение зависит от первичного тока и при внешних КЗ может быть большим [3].

Соединением вторичных обмоток одной из групп ТА в треугольник данный ток небаланса убирается (см. векторную диаграмму на рисунке 1). Ток в реле, определяемый разностью токов в цепях циркуляции $\dot{I}_p = \dot{I}_{ц\Delta} - \dot{I}_{цY}$, при равных по модулю их значениях равен нулю.

Соединение ТА в разные группы позволяет привести векторные диаграммы токов в плечах защиты к одинаковому виду и в случае несимметричных КЗ. При микропроцессорной реализации устранение рассмотренной составляющей тока небаланса может быть обеспечено соответствующим алгоритмом работы без соединения трансформаторов тока в треугольник.

- Ток намагничивания трансформатора

Приведенные к одному уровню напряжения первичные токи трансформатора с разных сторон отличаются вследствие наличия тока намагничивания, что приводит к появлению тока небаланса $I_{нб.нам}$ в цепях защиты. При нормальной работе трансформатора значения токов намагничивания обычно не превосходят $(0,01-0,02)I_{ном.Т}$ и при выполнении защиты с ними можно не считаться. При подключении трансформатора к источнику питания или после отключения внешних КЗ, сопровождавшихся значительным снижением остаточного напряжения, ток намагничивания может резко возрастать. Возникающий в таких случаях бросок тока намагничивания (БНТ) может достигать значения $(6-8)I_{ном.Т}$ и затухать в течение 1-2 с [4].

Для простоты рассматривается включение под напряжение однофазного трансформатора. Наибольшее значение БНТ имеет в том случае, когда синусоида подаваемого на трансформатор напряжения U проходит через нуль.

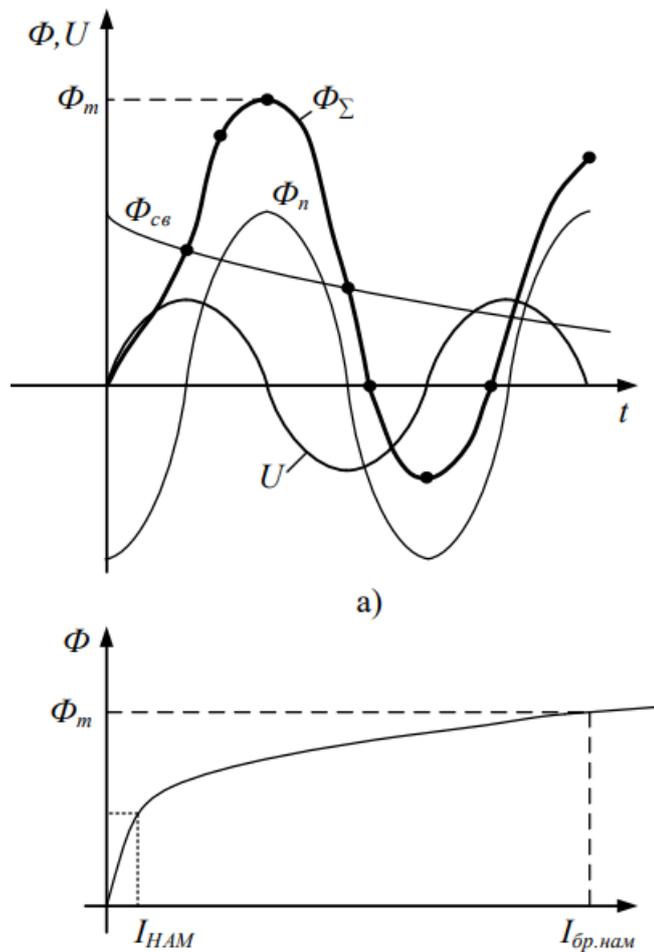


Рисунок 2. Бросок тока намагничивания

Периодическая составляющая установившегося магнитного потока в стали трансформатора $\Phi_{уст} = \Phi_{н}$ должна иметь максимальное значение (и отстает от напряжения на 90°). Так как результирующий поток Φ_{Σ} не может измениться скачком, то возникает свободная аperiodическая составляющая $\Phi_{св} = \Phi_{ап}$. В результате через 0,5 периода промышленной частоты суммарный магнитный поток $\Phi_{\Sigma} = \Phi_{св} + \Phi_{уст}$ будет примерно в два раза превышать максимальное установившееся значение. С учетом остаточного намагничивания превышение может быть еще большим. При этом сталь трансформатора насыщается, и имеет место резкое увеличение (бросок) тока намагничивания (БНТ) [3].

Он может содержать помимо слагающей основной частоты большую аperiodическую составляющую, а также значительный процент высших гармоник (прежде всего второй).

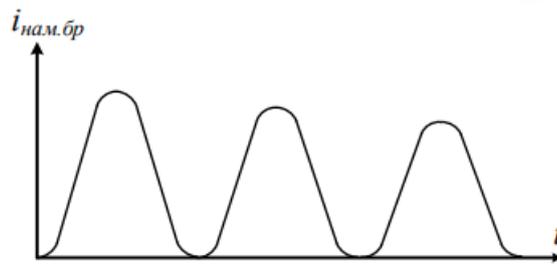


Рисунок 3. Кривая тока намагничивания

БНТ появляются только в обмотке со стороны питания, действуют на защиту как токи внутреннего КЗ и могут приводить к ее ложному срабатыванию в отсутствие повреждений в трансформаторе, поэтому при выполнении защиты необходимо от них отстраиваться.

- **Различие токов в плечах защиты**

Для обеспечения равенства токов $I_{цД}$ и $I_{цУ}$ в плечах защиты отношение коэффициентов трансформации ТА разных сторон трансформатора должно иметь значение, определяемое коэффициентом трансформации η_T и коэффициентом схемы ТА, соединенных в треугольник $K_{ID}/K_{IU} = \eta_T/\sqrt{3}$, где $\eta_T \approx U_{Yном}/U_{\Deltaном}$ [3].

Расчет токов в плечах защиты выполняется в следующей последовательности:

- определяются первичные токи на сторонах трансформатора, соответствующие его номинальной мощности;
- определяются первичные номинальные токи трансформаторов тока;
- определяются номинальные коэффициенты трансформации ТА;
- определяются токи в цепях циркуляции (плечах защиты) в номинальном режиме.

Поскольку трансформаторы тока имеют стандартные значения коэффициентов трансформации (первичных номинальных токов), то точное выполнение требуемого соотношения между K_{IU} и K_{ID} , как правило, невозможно. Поэтому значения токов в цепях циркуляции всегда различаются, обуславливая появление соответствующей составляющей тока небаланса.

- Регулирование коэффициента трансформации трансформатора под нагрузкой

При регулировании коэффициента трансформации соотношение между первичными, а, следовательно, и вторичными токами трансформаторов тока изменяется, что приводит к нарушению равенства токов в цепях циркуляции и появлению соответствующей составляющей тока небаланса. Изменение коэффициента трансформации характеризуется величиной $\Delta U_{\text{рег}}$ и может достигать значений $|\Delta U_{\text{рег}}| \leq (0,15 - 0,2)$.

- Разнотипность трансформаторов тока

Трансформаторы тока, устанавливаемые со сторон разных напряжений, имеют различное конструктивное исполнение, неодинаковые характеристики и нагрузки, различные погрешности, это также приводит к появлению составляющих тока небаланса [3].

Таким образом, были рассмотрены причины появления токов небаланса и броска намагничивающего тока при включении и отключении трансформатора от сети, и обоснована необходимость отстройки от них при выполнении дифференциальной защиты, то есть их учета при выборе тока срабатывания релейной защиты.

Ток срабатывания принимают наибольшим из этих двух значений, полученных путем расчета. В большинстве случаев при расчете ток срабатывания защиты, отстроенный от БНТ, значительно превышает ток, отстроенный от токов небаланса.

Дифференциальные токовые защиты трансформаторов выполняются с использованием:

- дифференциальной токовой отсечки, РТ-40;
- дифференциальная токовая защита с промежуточными быстро насыщающимися трансформаторами тока, реле серии РНТ- 560;
- защита с реле, имеющими торможение, ДЗТ-11;
- защита с реле ДЗТ-21;
- защита с полупроводниковыми реле (например РСТ-15, RET316);

- микропроцессорные защиты (шкафы защит ШЭ1110, ШЭ1112...).

Отстройка защиты от БНТ достигается в основном тремя путями: загрузлением защиты по току срабатывания; включением реле через промежуточные быстро насыщающиеся трансформаторы тока (НТТ); выявлением различия между формой кривой тока КЗ и формой кривой тока намагничивания. Если согласно расчету отстроиться необходимо от токов небаланса, а коэффициент чувствительности получается недостаточным, то используют специальные реле с торможением, например типа ДЗТ. Наибольшие возможности для обеспечения требуемого коэффициента чувствительности имеет дифференциальная защита ДЗТ-21 [5].

Далее будут рассмотрены недостатки некоторых вариантов исполнения дифференциальных защит.

Зачастую для реализации дифференциальной защиты используют быстро насыщающиеся трансформаторы тока, делается это для отстройки от апериодических БТН и переходного тока небаланса. Такие защиты имеют существенные задержки в срабатывании при внутренних КЗ, сопровождающихся апериодической слагающей, близкой к максимальной. В данном режиме ток короткого замыкания в начале переходного процесса по характеру близок к однополярному, а НТТ не способны быстро и корректно трансформировать ток такого характера. Таким образом, время срабатывания данных защит может значительно увеличиваться. К тому же диф. защита с НТТ не позволяет отстроиться от периодической составляющей БНТ, это делается посредством выбора уставки и снижением тока небаланса.

Кроме того, надежность срабатывания дифференциальной защиты при использовании быстро насыщающихся ТТ может быть значительно снижена, если уставка ИО задана некорректно, к тому же коэффициент чувствительности данной защиты должен быть повышен. Дело в том, что превышение тока срабатывания защиты и последующее его увеличение приведет к насыщению сердечника НТТ, а, следовательно, и к прекращению роста вторичного тока.

Таким образом, при пятикратном превышении тока срабатывания защиты вторичный ток будет превышать свое нормальное значение только на 35% [6].

В трансформаторах с регулировкой под нагрузкой (РПН) токи небаланса в установившемся режиме имеют значительную величину. В таком случае реле дифференциальной защиты, включенные через НТТ, имеют низкую чувствительность к внутренним КЗ трансформатора.

Для повышения коэффициента чувствительности используются реле с торможением типа ДЗТ, что обеспечивает отстройку от больших установившихся значений токов небаланса внешних КЗ. В соответствии со сказанным выше ток срабатывания защиты автоматически увеличивается при увеличении тормозного тока. К недостаткам защит с использованием торможения можно отнести низкую чувствительность к межвитковым замыканиям.

Все рассмотренные выше защиты имеют токи срабатывания $I_{с.з.} \geq (1,3 - 1,5)I_{ном.Т}$, превышающие номинальный ток трансформатора. Однако для защиты мощных трансформаторов требуется иметь ток срабатывания $I_{с.з.}$ меньше номинального тока ТР. В случае недостаточной чувствительности вышеупомянутых защиты используются более чувствительные дифференциальные защиты: защита с торможением на времяимпульсном принципе или микропроцессорные дифференциальные защиты трансформатора.

Таким образом, в данной работе был произведен анализ вариантов реализации дифференциальной защиты трансформатора и были рассмотрены недостатки исполнения данной защиты на базе реле серии РНТ-560 и реле ДЗТ-11.

Литература:

1. Александров А.М. Дифференциальные защиты трансформаторов: Учебное пособие. – СПб.: ПЭИПК, 2011. – 223 с.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ), изд-во «Форт», 2009 г.

3. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992.– 528 с.: ил.
4. Басс Э.И. Дорогунцев В.Г. Релейная защита электроэнергетических систем. Учебное пособие. Под ред. А.Ф. Дьякова. Москва: Издательство МЭИ, 2002.
5. Дифференциальная токовая защита трансформаторов URL: <https://studfile.net/preview/5762448/page:26/> (дата обращения: 11.11.22)
6. Лопатин В.Г., Лопатина Н.П. Токовые дифференциальные реле серий РНТ-560 И ДЗТ-10: Учебное пособие.- Севастополь: СНУЯЭиП, 2020, 88 с.

Literature:

1. Alexandrov A.M. Differential protection of transformers: Textbook. – St. Petersburg: PEIPK, 2011. – 223 p.
2. Rules of electrical installations (PUE), publishing house "Fort", 2009
3. Fedoseev A.M., Fedoseev M.A. Relay protection of electric power systems: Studies. for universities. – 2nd ed., reprint. and additional – М.: Energoatomizdat, 1992.– 528 p.: ill.
4. Bass E.I. Doroguntsev V.G. Relay protection of electric power systems. Study guide. Edited by A.F. Dyakov. Moscow: Publishing House of MEI, 2002.
5. Differential current protection of transformers URL: [https://studfile.net/preview/5762448/page:26 /](https://studfile.net/preview/5762448/page:26/) (date of request: 11.11.22)
6. Lopatin V.G., Lopatina N.P. Current differential relays of the RNT-560 And DZT-10 series: Textbook.- Sevastopol: SNUEIP, 2020, 88 p.

© Пашковская Е.Е., Груздов А.Г., Сивеев Т.М., Котов А.С. Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», номер 9/2022.

Для цитирования: Пашковская Е.Е., Груздов А.Г., Сивеев Т.М., Котов А.С. АНАЛИЗ НЕДОСТАТКОВ РЕЛЕ СЕРИИ РНТ-560 И ДЗТ-11, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА // Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», номер 9/2022.