

О способах уменьшения влияния погрешностей трансформаторов тока в переходных режимах на работу релейной защиты электроэнергетических систем

С.Л. КУЖЕКОВ

**Южно-Российский государственный технический университет,
(Новочеркасский политехнический институт),
Россия, kuzhekov@mail.ru**

**Г.С. НУДЕЛЬМАН
ОАО «ВНИИР»**

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Трансформатор тока, переходный режим, погрешность, дифференциальная защита, обеспечение правильной работы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения правильной работы электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) в переходных режимах неоднократно обсуждалась на сессиях CIGRE, национальных конференциях, а также в печати. Однако до настоящего времени не выработана единая позиция о предпочтительных способах отстройки устройств релейной защиты от погрешностей ТТ в переходных режимах.

Опасность переходных режимов работы ТТ с апериодическими составляющими в первичных токах заключается в том, что при этом погрешности ТТ оказываются существенно выше, чем в установившемся режиме. Первый момент насыщения ТТ, нагрузка на который выбрана по условию 10%-ной погрешности в установившемся режиме, может возникнуть практически через 2–3 мс после начала короткого замыкания (КЗ). Для предотвращения насыщения ТТ в переходных режимах потребуется увеличение примерно в 100 раз сечений жил контрольных кабелей, что нереально по многим причинам.

Погрешности ТТ оказывают наибольшее влияние на работу продольных дифференциальных защит (ДЗ) ввиду возникновения опасности их неселективного срабатывания при КЗ вне зоны действия. В других устройствах защиты указанные погрешности приводят обычно к замедлению в срабатывании (увеличению времени срабатывания на $(1-1,5) T_a$, где T_a – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ).

В течение более полувека в России и странах СНГ для целей ДЗ широко применяются электро-механические реле серий РНТ–560 и ДЗТ–10, разработанные проф. А.Д. Дроздовым [1]. Нашли также применение статические реле серии ДЗТ – 20. В последнее десятилетие практически все новые устройства ДЗ реализуются с помощью микропроцессорной элементной базы, обеспечивающей новые возможности, в том числе и по обеспечению правильной работы ДЗ в переходных режимах.

В докладе приводится сравнительный анализ направлений и методов обеспечения правильной работы микропроцессорных продольных дифференциальных защит в переходных режимах КЗ вне зоны действия, сопровождающихся насыщением магнитопроводов ТТ.

2. АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ И МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРАВИЛЬНОЙ РАБОТЫ ДЗ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ КЗ

Известны следующие направления обеспечения правильной работы ДЗ в переходных режимах при КЗ вне зоны действия:

- разработка и внедрение новых типов ТТ (ТРХ, ТРУ, ТРЗ);
- совершенствование характеристик существующих защит (в частности, выбор коэффициентов торможения продольных дифференциальных защит, имеющих характеристику торможения в виде ломаной линии, с учетом погрешностей ТТ в переходных режимах);
- разработка защит, учитывающих особенности трансформации ТТ в переходных режимах (наличие участков достаточно точной трансформации и закономерностей их появления);
- компенсация погрешностей насыщенных ТТ.

Основой для сопоставительного анализа рассматриваемых технических направлений являются результаты теории работы ТТ в переходных и установившихся режимах. Указанному вопросу примерно с 1960 по 1980 г. было посвящено большое количество работ ведущих релейщиков Советского Союза (И.М. Сирота и его ученики, включая Б.С. Стогния (ИЭД АН УССР); А.Д. Дроздов и его ученики (НПИ); В.Е. Казанский и К.С. Дмитриев (МЭИ), Л.В. Багинский и его ученики (НЭТИ), В.И. Новаш и его ученики (БПИ) и др.). Большое внимание этому вопросу уделяла комиссия при ГКНТ СССР по релейной защите и автоматике во главе с А. М. Федосеевым. В 1967 г. были опубликованы универсальные характеристики ТТ с прямоугольной характеристикой намагничивания (ПХН) в установившемся режиме КЗ [2], положенные в основу расчета нагрузок на ТТ. Были также установлены закономерности трансформации вторичного тока ТТ в переходном режиме [3], удобные для использования в алгоритмах функционирования быстродействующих дифференциальных защит. Ниже приведены результаты сопоставительного анализа технических решений, относящихся к указанным выше направлениям.

Разработка и внедрение новых типов ТТ

Это направление, несмотря на его радикальность, требует разработки и освоения в производстве специальных ТТ (в том числе, имеющих коэффициенты трансформации в десять и более раз выше, чем у измерительных ТТ). Исключение насыщения ТТ может быть достигнуто также путем размагничивания магнитопровода, особого построения ТТ (например, трансформация полуволн тока), введения немагнитного зазора, применения магнитопровода с частичным зазором и др. Имеется также класс измерительных преобразователей тока, например, оптикоэлектронных или основанных на принципе пояса Роговского, свободных от свойства насыщения в переходных режимах. Это фактически новое направление работ, не получившее до настоящего времени развития в нашей стране. Следует также отметить, что при широком внедрении новых типов преобразователей тока возникнет необходимость замены большого количества ТТ, установленных на действующих электростанциях и подстанциях, что представляет собой серьезную технико-экономическую задачу. По указанной причине в настоящее время реалистичным является обеспечение правильной работы ДЗ с ТТ, серийно выпускаемыми промышленностью, т.е. должно развиваться и другое направление работ – разработка ДЗ, практически нечувствительных к погрешностям ТТ в переходных режимах.

Совершенствование характеристик существующих защит

Второе направление (оптимизация параметров тормозной характеристики ДЗ) связано с некоторым снижением быстродействия и чувствительности устройств ДЗ при КЗ в зоне действия и не дает возможности дальнейшего их совершенствования в части повышения эффективности функционирования. Предложения по применению дополнительных элементов в дифференциальной цепи, использование признака КЗ вне зоны действия и дифференциально-фазного принципа достаточно подробно были исследованы в [4], где показано, что такие меры, в частности, добавочные резисторы и дроссели в цепях дифференциальных токов не всегда обеспечивают полноценную отстройку от повышенных погрешностей ТТ в переходном режиме и могут приводить к перенапряжениям во вторичных цепях ТТ при КЗ в зоне действия. Полупроводниковые ключи в коммутируемых реле подвержены влиянию электромагнитных помех и критичны к производным тока и напряжения. Общим недостатком указанных мер является их применимость только в схемах защит шин с ТТ, имеющими одинаковые номинальные токи и коэффициенты трансформации. Использование факта опережения токами в плечах ДЗ дифференциального тока затруднительно в защите трансформаторов и автотрансформаторов, имеющих РПН (из-за наличия тока небаланса $I''_{нб}$). Дифференциально-

фазная защита и фазовое торможение имеют недостатком подверженность влиянию токов нагрузки при несимметричных КЗ в зоне действия.

Таким образом, меры, отмеченные во втором направлении технического совершенствования ДЗ, не обладают универсальностью и не во всех случаях обеспечивают необходимую эффективность функционирования указанных защит.

Разработка защит, учитывающих особенности трансформации ТТ в переходных режимах

Можно считать, что первой ДЗ, работающей на участках достаточно точной трансформации (УДТТ) ТТ, была дифференциально-фазная защита сборных шин, разработанная компанией ВВС (Швейцария) [5]. В указанной защите передние фронты прямоугольных сигналов, использовавшихся для сравнения фаз токов, формировались на УДТТ, а длительности импульсов увеличивались на 3 мс с целью исключения неправильной работы защиты при насыщении ТТ. Очевидно, увеличение длительности импульсов на относительно небольшую величину не всегда достаточно при насыщении ТТ, особенно в переходных режимах со значительной апериодической составляющей в первичном токе. Были также предложения формировать задний фронт импульса по последующему моменту выхода ТТ из насыщения, однако недостатком такого технического решения была возможность ложного срабатывания защиты после отключения КЗ вне зоны действия при замедленном возврате пускового органа.

Применение микропроцессорной техники позволяет в полной мере использовать в ДЗ информацию об УДТТ. При этом существуют две задачи, которые необходимо решить:

1. Разработка критерия(ев) выявления работы ТТ на УДТТ.
2. Обеспечение быстрого и достоверного выделения сигналов, используемых в ДЗ, например, первой и высших гармоник токов в плечах защиты.

Вторая задача в настоящее время относительно легко решается путем использования быстродействующих сигнальных процессоров, поэтому анализу подлежат способы решения первой задачи.

Алгоритмы ДЗ, обеспечивающие работу защиты на УДТТ ТТ, можно подразделить на алгоритмы с использованием и без использования характеристики намагничивания ТТ. Так как остаточная (начальная) индукция в магнитопроводе ТТ обычно не известна, развитие получили алгоритмы без использования характеристики намагничивания ТТ. По данным литературных источников известны следующие варианты обнаружения УДТТ по выборкам замеров значений вторичного тока ТТ:

- последовательно выбранные величины сравниваются, а заданная разность между ними используется для указания на то, что насыщение ТТ произошло [6];
- определяется стационарный участок вторичного тока ТТ по двум признакам: среднее значение тока на заданном временном интервале (периоде) стремится к нулю; расхождение между максимальным и минимальным (имеющими разный знак) значениями тока на указанном периоде стремится к нулю [7];
- выделение УДТТ ТТ производится с помощью частотно-амплитудного критерия [8];
- на основании предложенного в [9] подхода, заключающегося в использовании процедур информационного анализа процессов – сегментации (выделяются участки однородности сигналов) и селекции (распознается тип процесса), обнаруживаются УДТТ при заданных формах первичного тока ТТ [10].

В ДЗ шин с торможением Micom P740 (AREVA) используются три алгоритма, связанные с насыщением ТТ. Первый из них фактически основан на первом из вышеуказанных вариантов. Второй алгоритм рассчитывает магнитный поток в магнитопроводе посредством интегрирования вторичного тока ТТ. Следует отметить неточность в оценке насыщения ТТ по второму критерию из-за неучета остаточной индукции в магнитопроводе. Третий алгоритм фактически предназначен для выявления момента выхода ТТ из насыщения, однако формулировка его, к сожалению, не отличается достаточной четкостью, что затрудняет его понимание.

Очевидно, что первый вариант, предложенный в [6], должен предполагать знание амплитуды вторичного тока ТТ, которую необходимо прогнозировать по какому-то алгоритму, не указанному в источнике. При этом значение амплитуды тока на периоде, предшествующем моменту возникновения КЗ, не является достаточной информацией о возможности насыщения ТТ.

Второй вариант [7] не может быть использован для расчета параметров вторичного тока ТТ в переходном режиме, в котором стационарность отсутствует.

Третий [8] и четвертый [9,10] варианты при применении в ДЗ фактически совпадают друг с другом. Отличие их заключается в том, что в третьем варианте сформулирован критерий нахождения рабочей точки на УДТТ, а четвертый представляет собой обобщение третьего варианта (без формулировки критерия нахождения рабочей точки на УДТТ) не только на переходный режим работы ТТ, но и на другие режимы работы защищаемого объекта.

Таким образом, для практического использования в ДЗ удобны как третий, так и четвертый варианты обеспечения работы ДЗ на УДТТ. Вместе с тем при реализации ДЗ, работающих на УДТТ, следует учитывать возможность отсутствия указанных участков, например, у ТТ, встроенных в аппараты, при относительно слабом насыщении магнитопровода (режим поглощения апериодической составляющей первичного тока). В таких режимах может оказаться недостаточной информация, полученная на УДТТ и вследствие этого может возникнуть необходимость принятия дополнительных мер, например, процентного торможения.

Компенсация погрешностей насыщенных ТТ

Сущность метода компенсации погрешностей ТТ (восстановления первичного тока ТТ) при насыщении магнитопровода в простейшем случае (при заданных параметрах вторичной цепи и заданном наклоне характеристики намагничивания в ее насыщенной части) заключается в вычислении по выборкам вторичного тока дискретных значений намагничивающего тока и приведенного ко вторичной цепи ТТ первичного тока.

Возможность компенсации погрешностей можно пояснить рассмотрением работы ТТ с аппроксимацией спрямленной в насыщенной части характеристики намагничивания (СХН), схема замещения которого приведена рис. 1б.

Выражение для мгновенного значения вторичного тока ТТ с СХН при синусоидальном первичном токе и активном характере вторичной цепи в промежутке, когда ТТ насыщен (зона I на фазовой плоскости рис. 1б), имеет вид:

$$i_2 = \frac{\omega L_{0s}}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_{0s}^2}} I'_{m1} \sin\left(\omega t + \arctg \frac{1}{\omega T_2}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t-t^n}{T_2}\right),$$

аналогично для намагничивающего тока

$$i_0 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_{0s}^2}} I'_{m1} \sin(\omega t - \arctg \omega T_2) + A_2 \exp\left(-\frac{t-t^n}{T_2}\right),$$

где R_2 и L_{0s} – активное сопротивление вторичной цепи и индуктивность намагничивающей ветви ТТ в насыщенной части характеристики, соответственно; T_2 – постоянная времени вторичного контура насыщенного ТТ; A_2 – амплитуда экспоненциальной составляющей тока, возникающей вследствие насыщения магнитопровода.

Таким образом по известному вторичному току ТТ с СХН, вычислив амплитуду и фазу периодической составляющей этого тока, зная R_2 и L_{0s} , можно найти амплитуду и фазу намагничивающего и – путем геометрического суммирования указанных токов – приведенного первичного токов. При этом апериодические составляющие во вторичном и намагничивающем токах, очевидно, можно не учитывать, так как они при суммировании (формировании приведенного первичного тока) взаимно компенсируются.

Аналогичным образом можно показать возможность компенсации погрешностей ТТ с СХН в переходном режиме КЗ.

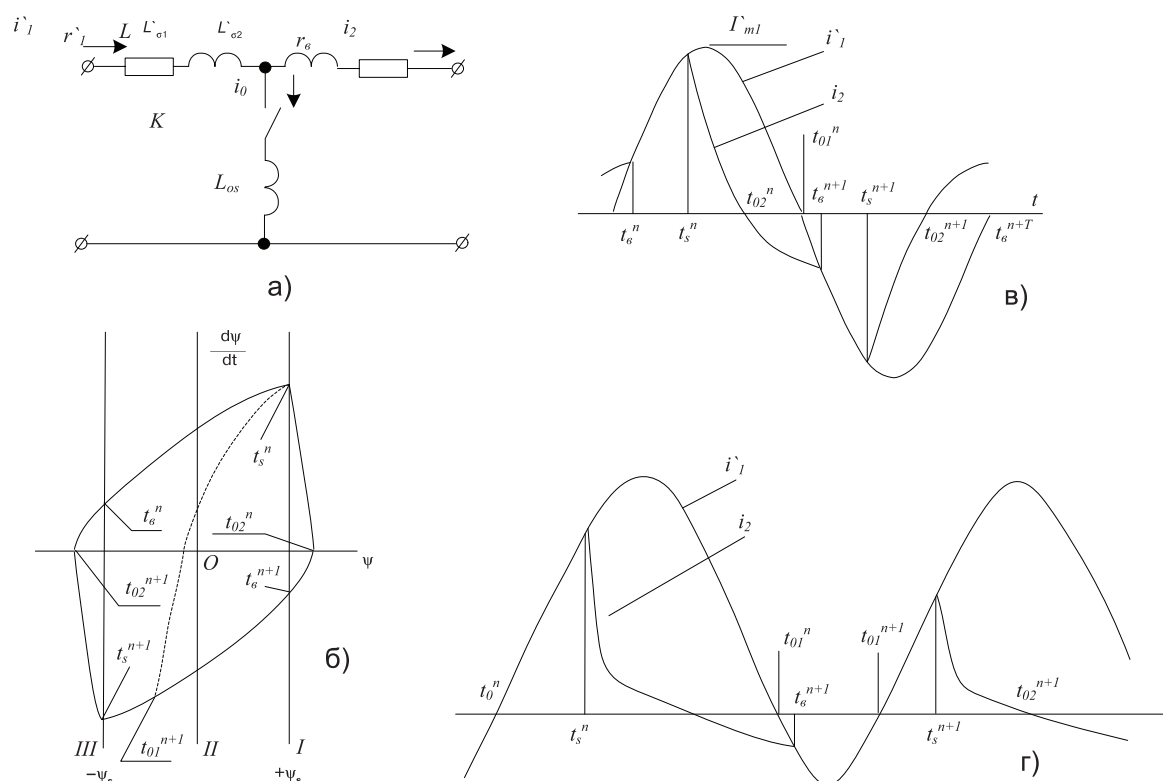


Рис. 1: Схема замещения ТТ с СХН (а), фазовые траектории изображающей точки процесса в ТТ в установившемся (сплошная линия) и переходном (пунктир) режимах (б), кривые токов ТТ с СХН при синусоидальном первичном токе (в) и в переходном режиме (г)

Основными трудностями при выполнении компенсации погрешностей ТТ в режиме насыщения магнитопровода являются:

- случайный характер значения остаточной (начальной) магнитной индукции в ТТ, что затрудняет определение момента достижения потокосцеплением вторичной обмотки ТТ потокосцепления насыщения Ψ_s ;
- при характеристике намагничивания ТТ, близкой к идеальной прямоугольной кривой (ПХН), компенсация погрешностей практически невозможна, так как вторичный ток ТТ в режиме насыщения близок к нулю и погрешность вычисления намагничивающего тока чрезмерно высока.

Имеется ряд предложений по преодолению первой трудности, однако наиболее удобно (при реализации ДЗ с помощью микропроцессорной техники) в первый момент насыщения ТТ, определенный, например, с помощью амплитудно-частотного критерия, приравнять текущее значение потокосцепления вторичной обмотки в его математической модели потокосцеплению насыщения с учетом знака указанного текущего значения.

Возможность достаточно точной для целей ДЗ компенсации погрешностей ТТ определяется по критерию применимости СХН, сформулированному в [11]: $\Theta \leq 20$, где $\Theta = \frac{z_2}{x_{0s}}$, а z_2 и x_{0s} представляют собой полное сопротивление вторичной цепи и индуктивное сопротивление намагничивающей ветви ТТ в насыщенной части характеристики, соответственно. Следует отметить также, что аппроксимация характеристики намагничивания с помощью СХН обеспечивает достаточную точность восстановления сигнала в переходном режиме при значении параметра режима ТТ $A_z \leq 3$, где $A_z = \Psi_s / \Psi_m$. В свою очередь, Ψ_s , Ψ_m – потокосцепление насыщения и амплитуда потокосцепления вторичной обмотки ТТ, которая имела бы место при отсутствии насыщения, соответственно.

Сопоставляя третий и четвертый варианты обеспечения правильной работы ДЗ при насыщении магнитопроводов ТТ, легко увидеть, что третий вариант базируется на аппроксимации характеристики намагничивания ТТ идеальной прямоугольной кривой (ПХН), а описанный в данной работе простейший способ компенсации погрешностей ТТ основан на использовании СХН — аппроксимации кривой намагничивания. Очевидно, что компенсацию погрешностей ТТ можно осуществлять с помощью использования и более сложных видов аппроксимации их характеристик намагничивания.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ показал, что наиболее эффективными направлениями обеспечения правильной работы ДЗ в переходных режимах при насыщении ТТ являются: *разработка защит, учитывающих особенности трансформации ТТ в переходных режимах* (наличие участков достаточно точной трансформации (УДТТ) и закономерностей их появления) и *компенсация погрешностей насыщенных ТТ*.

Производители микропроцессорных устройств релейной защиты уделяют большое внимание проблеме обеспечения правильной работы ДЗ объектов электроэнергетики, в особенности, сборных шин, в условиях насыщения ТТ, что подтверждается наличием алгоритмов, базирующихся на использовании УДТТ и реализующих правильную работу защит с быстродействием порядка полупериода промышленной частоты в условиях, когда продолжительность указанных участков составляет 2–3 мс.

Реализация методов компенсации погрешностей насыщенных ТТ до настоящего времени не получила практического развития, хотя такой путь во многих случаях не уступает по возможностям отмеченному выше направлению разработки защит, учитывающих особенности трансформации ТТ. Компенсация погрешностей ТТ дополнительно может обеспечить устойчивую работу ДЗ на участках насыщенного состояния ТТ, если последние удовлетворяют критерию применимости СХН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дроздов А.Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. — М.-Л.: Энергия, 1965. — 210 с.
- [2] Метод расчета токовой и угловой погрешности трансформаторов тока при глубоком насыщении сердечника / К.С. Дмитриев, В.Е. Казанский, Е.П. Королев, Э.М. Либерзон. — Электричество, 1967, № 12, с. 39–43.
- [3] Дроздов А.Д., Кужеков С.Л. Исследование формы вторичного тока защитных трансформаторов тока в переходных и установившихся режимах. — Электричество, 1971, № 4, с. 27–32.
- [4] Кужеков С.Л., Синельников В.Я. Защита шин электростанций и подстанций. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 184 с.
- [5] Haeg H., Forster M. Elektronischer Sammelschienenschutz. — Brown Boveri Mitteilungen, Bd. 53, Nr 4/5, 1965, s. 326–339.
- [6] Evans F.J., Wells G. Use of Sampling to Detect Transient Saturation in Protective Current Transformers. — IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. im-19, no 3, august 1970, s. 144–147.
- [7] Мыльников В.А. Исследование и разработка методов повышения точности определения места короткого замыкания на высоковольтных линиях 110–220 кВ // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Иваново, 2002, 22 с.
- [8] Кужеков С.Л., Сербиновский Б.Б. Выделение основной гармоники сигнала трансформатора тока в режиме насыщения. — СПб.: ОЭЭП РАН, 2003, 39 с.
- [9] Лямец Ю.Я., Зиновьев Д.В., Романов Ю.В. Мониторинг процессов в электрической системе. Ч. 1. Преобразование, селекция и фильтрация. — Электричество, 2006, № 10, с. 2–10.
- [10] Зиновьев Д.В. Развитие теории информационного анализа процессов в электрических системах и ее приложение к релейной защите // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Чебоксары, 2009, 23 с.
- [11] Кужеков С.Л. О методах расчета переходных и установившихся процессов в трансформаторах тока. — Электричество, 1975, № 7, с. 74–77.