

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316.925.2:621.314.224

DOI:10.17213/0136-3360-2020-6-72-82

О ПРОБЛЕМЕ ВЫБОРА И ЗАМЕНЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ДЛЯ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

С.Л. Кужеков¹, А.А. Дегтярёв², Н.А. Дони³, А.А. Шурупов³

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

² Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственная фирма «Квазар», Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Михайловская, 164-а.

³ Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «ЭКРА», Россия, 428020, Чувашская Республика, г. Чебоксары, пр. И.Я. Яковлева, д. 3.

В связи со случаями неправильной работы быстродействующих устройств релейной защиты (УРЗ) при коротких замыканиях вне зоны их действия актуален вопрос замены трансформаторов тока (ТТ) класса Р на более совершенные преобразователи тока. Показано, что принятие решения о замене существующих ТТ класса Р на ТТ с немагнитным зазором должно производиться с учётом вероятности насыщения магнитопроводов последних, обусловленной апериодической составляющей первичного тока ТТ, а также увеличения их габаритов по сравнению с существующими ТТ класса Р. Вопрос об использовании оптико-электронных преобразователей тока на высоком и среднем напряжениях должен решаться после постановки последних в серийное производство с учётом затруднения их интеграции с УРЗ, реализованных с помощью электромеханической базы. Применение алгоритмов, повышающих устойчивость функционирования быстродействующих УРЗ при насыщении ТТ, учёт в расчётах их уставок характеристик ТТ с прямоугольной характеристикой намагничивания в переходных режимах и допустимого замедления защит по условию динамической устойчивости электроэнергетических систем, а также отказ от использования групп соединения ТТ (на физическую сумму токов ТТ в цепях выключателей, в треугольник и звезду) во многих случаях позволяют обеспечить правильное функционирование быстродействующих УРЗ без замены существующих ТТ класса Р.

Ключевые слова: короткое замыкание, переходный процесс, трансформатор тока, класс Р, насыщение, немагнитный зазор, алгоритм, устойчивость, функционирование.

Для цитирования: О проблеме выбора и замены трансформаторов тока для устройств релейной защиты / С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярёв, Н.А. Дони, А.А. Шурупов // Изв. вузов. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 6. С. 72-82. DOI:10.17213/0136-3360-2020-6-72-82.

Введение

В электроэнергетической системе Российской Федерации нашли широкое применение трансформаторы тока (ТТ), относящиеся к классу Р. Магнитопроводы таких ТТ изготовлены из электротехнической стали без немагнитного зазора, благодаря чему они не имеют ограничения по уровню остаточной магнитной индукции. Основной недостаток ТТ заключается в существенном повышении погрешностей трансформации в переходных режимах по причине насыщения магнитопровода.

Насыщение магнитопроводов ТТ класса Р в переходных режимах коротких замыканий (КЗ) может приводить к замедлениям в срабатывании основных защит и быстродействующих ступеней резервных защит при КЗ в зоне действия, а также к неправильным срабатываниям указанных устройств релейной защиты на электростанциях (ЭС) и подстанциях (ПС) при КЗ вне зоны действия.

В связи с имевшими место случаями неправильной работы быстродействующих УРЗ при КЗ вне зоны их действия предписано определять требования к техническим характери-

кам УРЗ в части минимально необходимого времени измерения значений тока ТТ, при котором обеспечивается правильная работа релейной защиты в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ¹. С этой целью для ответственных объектов электроэнергетики должны быть выполнены расчёты времени до насыщения ТТ при КЗ. По результатам расчётов выполняется проверка соответствия характеристик ТТ класса *P* условиям функционирования УРЗ в переходных режимах. По существу, указанная проверка должна выполняться путем сравнения времени до насыщения ТТ в режиме КЗ $t_{\text{нас}}$ с минимально необходимым временем достоверного измерения значений тока ТТ $t_{\text{расп}}$ (индекс означает распознавание режима КЗ в зоне или вне зоны действия), за которое защита в переходных режимах принимает решение о срабатывании или несрабатывании. Если значение $t_{\text{расп}}$ не превышает $t_{\text{нас}}$, т.е.

$$t_{\text{нас}} > t_{\text{расп}}, \quad (1)$$

то характеристики ТТ соответствуют условиям функционирования УРЗ в переходных режимах.

Время до насыщения ТТ может быть определено в соответствии с ГОСТ Р 58669-2019 и во многих случаях составляет несколько миллисекунд. Однако значение $t_{\text{расп}}$ является неопределённой величиной и зависит от многих факторов: схемы защищаемой сети, алгоритма функционирования и уставок УРЗ, вида и уровня тока КЗ, относительного содержания апериодической составляющей в первичных токах ТТ, параметров ТТ, схем соединения их вторичных обмоток, нагрузки на ТТ, а также значения остаточной магнитной индукции в сердечниках последних. По указанной причине на практике значение $t_{\text{нас}}$ часто сравнивают с гарантированным временем срабатывания защиты $t_{\text{с.з}}$. Несоответствие значений $t_{\text{с.з}}$ и $t_{\text{нас}}$ является причиной, по которой рассматривается вопрос о замене ТТ класса *P* на более совершенные преобразователи тока.

Зарубежные производители УРЗ допускают работу быстродействующих защит при определённой степени насыщения магнитопроводов ТТ класса *P*. Указанная степень определяется ими путём испытания терминалов защит на моделях – имитаторах режимов КЗ. Результаты испытаний представляются в виде значений коэффициентов размерности ТТ, а также в виде допустимых значений времени до насыщения для каждого вида защит. Это позволяет в ряде случаев избежать замены ТТ класса *P* на другие преобразователи тока.

Так как замена ТТ в действующих электроустановках электроэнергетической системы (ЭЭС) России связана с большими затратами труда, средств и времени, то необходима разработка экономического критерия целесообразности такой замены. Указанный критерий должен учитывать:

– с одной стороны, затраты, связанные с заменой ТТ;

– с другой стороны, риск от нарушения нормального функционирования объектов ЭЭС и систем электроснабжения, обусловленного неправильными действиями и замедлениями в срабатывании быстродействующих УРЗ при насыщении ТТ в переходных режимах. При этом должны учитываться вероятности переходных режимов, вызывающих неправильное функционирование быстродействующих УРЗ.

Цель настоящей работы – анализ факторов, подлежащих учёту при принятии решения о применении вместо ТТ класса *P* других преобразователей тока.

Учёт возможного характера переходных процессов

В научно-технической отечественной и зарубежной литературе неоднократно рассматривался вопрос о вероятности глубокого насыщения ТТ класса *P* при переходных процессах. Утяжеляющими факторами при этом являются: кратность периодической составляющей тока КЗ, начальное значение апериодической составляющей тока КЗ; значение остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака (совпадающей с направлением перемагничивания, вызванным апериодической составляющей тока в ТТ); значение эквивалентной постоянной времени затухания апериодической составляющей и сопротивление ветви вторичного тока ТТ.

Специалисты компании *Siemens* [1] считают, что в общем случае процентное содержание апериодической составляющей меньше 70 % амплитуды периодической составляющей тока КЗ. Исследования показали, что 95 % повреждений в сети возникает при начальной фазе напряжения между 40 и 90 град, т.е. когда апериодическая составляющая тока КЗ мала. Для ТТ с замкнутым магнитопроводом остаточная индукция может составлять порядка 80 % (коэффициент остаточной индукции, равный отношению последней к индукции насыщения, $K_r = 0,8$).

По результатам канадского исследования значения остаточной индукции в 60 – 79% от индукции насыщения были выявлены в 27 % ТТ из 131.

¹ Письмо Заместителя министра энергетики от 02.04.2019 за № ЧА-3440/10. «О мерах по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты».

Случай, при котором совпадают максимальная апериодическая составляющая и максимальная остаточная индукция неблагоприятного знака, на практике достаточно редок. Поэтому такие условия обычно не рассматриваются на практике. Однако насыщение ТТ возможно не только при максимальном относительном содержании апериодической составляющей в токе КЗ.

Одной из характеристик ТТ класса P в переходных режимах является коэффициент переходного режима $K_{п.р}(t)$, представляющий собой функцию, характеризующую изменение во времени отношения мгновенного значения потокосцепления при наличии в первичном токе апериодических составляющих $\Psi_{п.р}$ к амплитудному значению потокосцепления Ψ_m , которое имело бы место при токе КЗ, не содержащем апериодических составляющих:

$$K_{п.р}(t) = \frac{\Psi_{п.р}}{\Psi_m}.$$

Другой характеристикой ТТ в переходных режимах является параметр режима работы A , определяемый в соответствии с ГОСТ Р 58669-2019 как

$$A = \frac{\Psi_{sat}}{\Psi_m},$$

где Ψ_{sat} – потокосцепление насыщения.

На рис. 1 изображены полученные авторами графики зависимости $K_{п.р}(t)$ от времени t и начальной фазы периодической составляющей θ тока КЗ для ТТ класса P при активном сопротивлении ветви вторичного тока и постоянной времени апериодической составляющей первичного тока ТТ, равной 50 мс. Видно, что при значении параметра режима работы ТТ A , равном двум, минимальное время до насыщения ТТ равно 7 мс и соответствует начальной фазе периодической составляющей 60 град, а при наличии максимальной апериодической составляющей $\theta = 0$ и прочих равных условиях время до насыщения ТТ равно 8,5 мс.

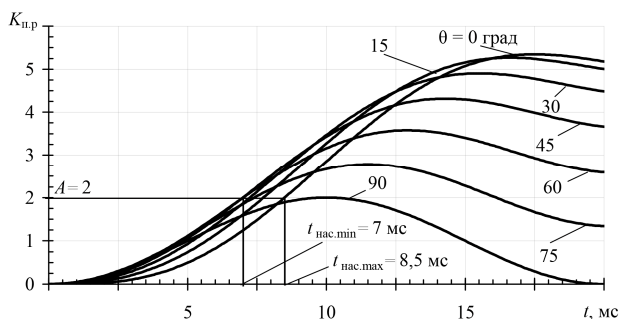


Рис. 1. Графики зависимости $K_{п.р}$ от t и начальной фазы периодической составляющей

Таким образом, время до насыщения ТТ зависит от начальной фазы периодической составляющей θ тока КЗ и достигает минимальных значений, не превышающих 16 мс, при начальных фазах $\theta > 0$. Минимальным значениям времени до насыщения, превышающим 16 мс, соответствует максимальное относительное содержание апериодической составляющей в токе КЗ, т.е. $\theta = 0$.

Приведённые результаты позволяют сделать вывод, что насыщение ТТ может иметь место в достаточно широком диапазоне начальных фаз θ , а не только при максимальном относительном содержании апериодической составляющей.

Специалисты компании *GE* считают, что остаточная намагниченность может составлять до 80 % значения уровня насыщения².

Специалисты компании *ABB* учитывают остаточную намагниченность только в случаях повреждений, критичных для надежности несрабатывания, например, при близких и удалённых внешних КЗ³. При проверке надежности срабатывания вероятность возникновения дополнительной выдержки времени мала, и риск отказа срабатывания практически отсутствует, поэтому в этих случаях остаточная намагниченность не учитывается.

Авторы статьи считают, что существуют три случая, при которых появляются апериодические составляющие в первичных токах ТТ:

- внезапное КЗ в цепях объекта защиты;
- неуспешное автоматическое повторное включение (АПВ) поврежденного элемента, а также ручное включение на КЗ, существующее в цепи;
- несинхронное включение генератора.

В первом случае причиной КЗ могут быть попадание посторонних предметов, сближение токоведущих частей и др., а также удары молнии. Если скорость движения элементов, вызывающих КЗ, ниже скорости изменения периодической составляющей тока, то вероятность возникновения значительных апериодических составляющих мала.

При ударах молнии, неуспешном АПВ поврежденного элемента, ручном включении на КЗ, существующем в цепи, а также при несинхронном включении генератора следует считаться с возможностью возникновения апериодической составляющей.

В этих случаях включение осуществляется в произвольную фазу напряжения выключате-

² GE Multilin. Power Managment Lentrionics. Требования к трансформаторам тока для реле *GE* (R2).

³ IHSM 9543 40-00en IT Application Guide Ed4.

лем, скорость движения контактов которого выше скорости изменения принужденной периодической составляющей тока.

Пусть напряжение в сети изменяется по закону

$$u = U_m \sin(\omega t + \alpha),$$

где α – фаза включения.

В пределах полупериода (из-за симметричности процесса допустимо рассмотреть полупериод) значения α равновероятны, поэтому плотность распределения вероятности

$$f(\alpha) = \frac{1}{\pi}, \text{ 1/рад.}$$

Значительные аperiodические составляющие $I_{a.0} \geq \frac{\sqrt{3}}{2} I_{nm}$ имеют место в диапазоне

$$-\frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6},$$

где I_{nm} – амплитуда периодической составляющей.

Вероятность возникновения указанных составляющих

$$p_{\text{ап}} = p\left(-\frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6}\right) = \int_{-\pi/6}^{\pi/6} f(\alpha) d\alpha = \frac{1}{3}. \quad (2)$$

Следует учитывать, что вероятность неуспешного АПВ на воздушных линиях невелика и составляет порядка 20 – 30 % [2], а вероятность несинхронного включения генераторов значительно ниже. Тогда результирующая вероятность появления значительной аperiodической составляющей в первичном токе КЗ может быть снижена более чем в два раза по сравнению с вычисленной по выражению (2) и ориентировочно принята равной

$$p_{\Sigma, \text{ап}} = 0,5 p_{\text{ап}} = 0,165. \quad (3)$$

Многолетние статистические данные ОРГРЭС свидетельствуют о незначительном числе случаев неправильной работы УРЗ по причине насыщения сердечников ТТ в переходных режимах. Результаты работы, выполненной во ВНИИЭ [3], базировавшиеся на большом статистическом материале по реальным КЗ в сетях 330 – 750 кВ, показали, что начальное значение аperiodической составляющей, превышающее 0,8 от амплитуды периодической составляющей, встречается не более, чем в 5 % случаев КЗ.

Исследования [4] показали, что плотность распределения фазы включения выключателей может существенно отличаться от равномерной.

При этом вероятность получения больших начальных значений аperiodической составляющей снижается до значения 0,1 и менее. Однако эти данные справедливы для относительно медленнодействующих, а не современных элегазовых выключателей.

В [5] отмечено, что при КЗ на линиях вблизи крупных ЭС вероятность насыщения ТТ и уровень токов КЗ выше, чем дает статистический анализ. В этом случае погрешности ТТ значительно выше, чем при КЗ, удаленных от шин электростанций. По указанной причине при статистическом анализе КЗ, возникающие вблизи крупных ЭС или на их элементах, было рекомендовано выделять в отдельную группу.

Особую актуальность данная проблема принимает при учёте наличия остаточной магнитной индукции в сердечниках ТТ. Значение остаточной магнитной индукции на момент начала КЗ следует рассматривать как случайную величину, предельное относительное значение которой по данным измерений, проведенных представителями различных организаций на отдельных присоединениях ОРУ-500 Ростовской АЭС, следующее:

$$K_r = \frac{B_r}{B_{\text{sat}}} = 0,86, \quad (4)$$

где B_r – предельная остаточная магнитная индукция; B_{sat} – амплитуда магнитной индукции насыщения.

В стандарте МЭК⁴ по дистанционной защите рекомендуется принимать

$$B_r = 0,75 B_{\text{sat}}.$$

Результаты отечественных исследований [6, 7] не подтверждают рекомендованное ГОСТ Р 58669-2019 значение остаточной индукции по выражению (4). В частности, для холоднокатаной стали марки Э310 предельное значение B_r рекомендовано принимать равным 1,2 Тл. Там же отмечено, что фактические значения B_r , имеющие место в эксплуатации, в сердечниках, выполненных из холоднокатаных сталей, составляют в среднем 16% от предельных значений. Это обстоятельство, обусловленное эффектом размагничивания магнитопровода при длительном протекании нагрузочного тока, уменьшает вероятность наличия большой остаточной индукции при внезапном КЗ, возникающем в нормальном (продолжительном) режиме. Наличие

⁴ Стандарт МЭК 60255-121:2014. Измерительные реле и оборудование релейной защиты – Часть 121: Функциональные требования к дистанционной защите.

значительной остаточной индукции, близкой к предельному значению, следует учитывать во втором КЗ в цикле АПВ.

Вероятность глубокого насыщения ТТ можно оценить с помощью приближённого выражения, в котором вероятность совпадения направления перемещения сердечника аperiodической составляющей и знака остаточной магнитной индукции принята равной 0,5:

$$p_{г.н} = 0,5 p_{\Sigma,а} p_r = 0,5 \cdot 0,165 \cdot 0,27 \approx 0,022, \quad (5)$$

где значение $p_{\Sigma,ап}$ по выражению (3) принято равным 0,165, а значение p_r принято равным 0,27 в соответствии с результатами канадского исследования [1]. При этом значение остаточной магнитной индукции в соответствии со стандартом МЭК 60255-121:2014 в выражении (5) целесообразно принять равным не 0,86, а 0,75 от индукции насыщения.

Приведённые сведения позволяют сделать вывод, что вероятность глубокого насыщения ТТ низка, что следует учитывать при разработке указанного выше экономического критерия целесообразности замены ТТ класса P на иные преобразователи тока.

Анализ неправильных действий УРЗ при насыщении ТТ

В распределительном устройстве напряжением 500 кВ имел место случай неселективных действий дистанционных защит от однофазных КЗ при трёхфазном металлическом КЗ. Однако следует отметить, что при правильном выборе уставки органа защиты линии, распознающего однофазные КЗ, неправильного срабатывания в условиях насыщения ТТ могло не быть. Указанный орган требует задания уставки по напряжению нулевой последовательности U_0^5 . При близком однофазном КЗ напряжение U_0 на вторичной стороне трансформатора напряжения составляет десятки вольт, а уставка была выбрана настолько малой, что для срабатывания органа хватило имеющегося напряжения небаланса. В результате были введены в работу реле сопротивления от однофазного КЗ. В условиях неодинакового насыщения ТТ в цепях двух выключателей линии при использовании, в соответствии с проектом, физической суммы токов выключателей эти реле определили КЗ «за спиной» как внутреннее [8]. Таким образом, налицо две ошибки:

– неправильный выбор уставки органа, распознающего КЗ на землю;

– использование физического суммирования вторичных токов ТТ в цепях выключателей.

Возникновение последствий неправильных действий дифференциальных защит ошинок сторон низшего напряжения автотрансформаторов на ПС напряжением 500/220/10 кВ может быть объяснено следующими причинами:

– коэффициенты трансформации ТТ ошинок отличаются в шесть раз, причём на стороне нагрузки использовались маломощные ТТ, а вторичные обмотки ТТ на стороне питания соединены в треугольник. Это явилось причиной высокого уровня тока небаланса защиты;

– при срабатывании дифференциальной защиты ошинок не был введён запрет автоматического ввода резерва (АВР) секционного выключателя комплектного распределительного устройства (КРУ) собственных нужд подстанции;

– при внешнем КЗ в ячейках КРУ должна была сработать дуговая защита и предотвратить включение второго автотрансформатора ПС на КЗ. Однако эта защита по неясным причинам отказала в срабатывании.

Значительные токи небаланса могут вызывать также неправильные срабатывания чувствительных органов дифференциальных защит с торможением ошинок стороны низшего напряжения (НН) автотрансформаторов (АТ), уставки которых выбраны в соответствии со стандартом⁶. Указанное явление отмечалось в эксплуатации.

Необходимость учета насыщения магнитопроводов ТТ с немагнитным зазором при наличии в первичном токе аperiodической составляющей

Следует отметить, что ТТ с немагнитным зазором в сердечнике классов TPY , TPZ и PR не всегда соответствуют условию (1), так как наличие немагнитного зазора практически устраняет только остаточную магнитную индукцию, но ТТ могут насыщаться за счет аperiodической составляющей первичного тока ТТ. Условию (1) соответствуют только оптико-электронные ТТ (ОЭТТ), не имеющие ферромагнитных сердечников.

Выражения для определения времени достижения максимальных погрешностей и макси-

⁵ Шкаф защиты линии и ОАПВ типа ШЭ2710 521 (версии 521_305, 521_365). Руководство по эксплуатации. ЭКРА. 656453.044.

⁶ Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.70.99-2011. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства ООО НПФ «ЭКРА». Дата введения: 13.09.2011. ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.

мального значения коэффициента переходного режима, приведённые в стандартах^{7,8}, справедливы только для ТТ с линейными характеристиками, т.е. не имеющих ферромагнитных сердечников (воздушных ТТ). Магнитопроводы воздушных ТТ не насыщаются, значения времени достижения максимальных погрешностей t_{\max} и максимальные значения коэффициента переходного режима $K_{п.р.\max}$ определяются только постоянными времени затухания апериодических составляющих первичного T_p и вторичного T_s токов ТТ и не зависят от значения тока, проходящего через ТТ.

У реальных ТТ с немагнитным зазором характеристики намагничивания могут считаться линейными только до значения магнитной индукции, при которой погрешности ТТ превышают нормированное значение. Насыщение сердечника ТТ с немагнитным зазором может произойти раньше, чем вычисленное значение t_{\max} .

Фактическое значение $t_{\text{нас}}$ для ТТ с немагнитным зазором может оказаться ниже не только времени достижения максимальных погрешностей ТТ t_{\max} , но и значения времени распознавания устройством защиты режима КЗ в зоне и вне зоны действия $t_{\text{расп}}$.

В стандарте МЭК⁷ в качестве характеристик ТТ с немагнитным зазором используются термины:

– коэффициент номинального симметричного тока КЗ K_{ssc} , равный отношению номинального действующего значения периодической составляющей тока КЗ I_{psc} к первичному номинальному току ТТ $I_{1.\text{ном}}$:

$$K_{ssc} = \frac{I_{psc}}{I_{1.\text{ном}}};$$

– номинальное значение коэффициента размерности ТТ $K_{t.d}$, представляющее собой значение $K_{п.р}(t)$ при номинальной постоянной времени затухания апериодической составляющей в первичном токе и заданном значении времени до насыщения $t_{\text{нас}}$:

$$K_{t.d} = K_{п.р}(t_{\text{нас}}).$$

В качестве примера на рис. 2 показано, что у ТТ класса TPZ с коэффициентом номинального

симметричного тока КЗ $K_{ssc} = 5$ и коэффициентом размерности ТТ $K_{t.d} = 4$ время до насыщения равно 14 мс, а время достижения максимальных погрешностей $t_{\max} = 38$ мс.

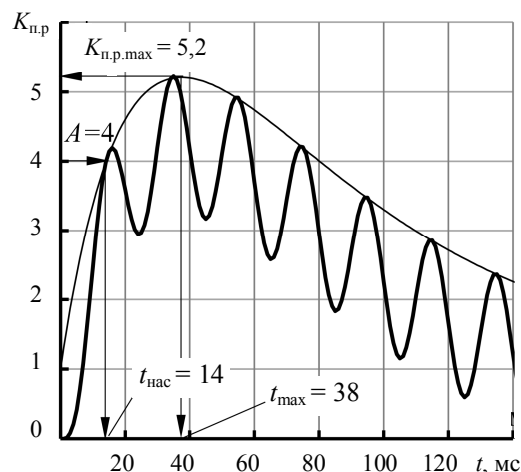


Рис. 2. Кривая коэффициента переходного режима для расчетного ТТ класса TPZ , соответствующая номинальным значениям постоянных времени $T_{p.\text{ном}} = 25$ мс и $T_{s.\text{ном}} = 61$ мс

Таким образом, при проверке и выборе ТТ с немагнитным зазором, как и ТТ класса P без немагнитного зазора, следует учитывать возможность насыщения магнитопровода, которое может привести к замедлению в срабатывании быстродействующей защиты при КЗ в зоне действия или её неселективному срабатыванию при КЗ вне зоны действия.

Следует отметить, что замена ТТ на приёмном конце ошиновки стороны НН АТ подстанции Тамань на ТТ с немагнитным зазором класса PR с теми же габаритами магнитопровода не исключит неселективного срабатывания защиты, не использующей алгоритм «детектор насыщения» или алгоритм сравнения направлений первых гармоник вторичных токов ТТ в плечах защиты. Это объясняется тем обстоятельством, что время до насыщения этого ТТ при КЗ вне зоны действия, как показал расчёт, может составить 6 мс.

Требуемые сечения магнитопроводов ТТ классов P и PR

Известно, что для увеличения времени до насыщения магнитопровода ТТ класса $5P$ ($10P$) в переходных режимах может потребоваться значительное увеличение сечения магнитопровода. Так как у ТТ с немагнитным зазором остаточная магнитная индукция не превышает 10 %, то существует мнение, что требуемое сечение их магнитопроводов невелико, и такие ТТ могут быть

⁷ Стандарт МЭК 61869-2. Издание 1.0 2012-09. Международный стандарт. Измерительные трансформаторы. Часть 2: Дополнительные требования для трансформаторов тока. Редакция 1.0 2012 – 09.

⁸ Предварительный национальный стандарт ПНСТ 283-2018 ГОСТ Р «Трансформаторы измерительные. Часть 2: Требования к трансформаторам тока».

установлены, например, на место действующих встроенных трансформаторов тока класса P . Однако на самом деле введение немагнитного зазора практически устраняет только остаточную магнитную индукцию, но не устраняет существенным образом влияние апериодической составляющей первичного тока на насыщение магнитопровода ТТ.

Требуемое сечение магнитопроводов ТТ классов P и PR при симметричном первичном токе $s_{\text{сим.треб}}$ и активном характере сопротивления ветви вторичного тока можно вычислить по выражению

$$s_{\text{сим.треб}} = \frac{K_{\text{ном}} I_{2.\text{ном}} (R_2 + R_{\text{н.ном}})}{222 B_{\text{ALF}} w_2}, \quad (6)$$

где $K_{\text{ном}}$ – номинальная предельная кратность тока ТТ; B_{ALF} – амплитуда магнитной индукции при допустимой погрешности ТТ; w_2 – число витков вторичной обмотки ТТ; $I_{2.\text{ном}}$ – номинальный вторичный ток ТТ; $R_{\text{н.ном}}$ – номинальное активное сопротивление нагрузки, подключаемой к вторичным выводам ТТ; R_2 – активное сопротивление вторичной обмотки ТТ.

Пусть кратность первичного тока ТТ и сопротивление ветви вторичного тока соответствуют выражению (6), но в первичном токе содержится максимальная апериодическая составляющая, и в магнитопроводе имеется остаточная магнитная индукция. Тогда условие отсутствия насыщения магнитопровода принимает вид

$$K_{\text{id}} K_{\text{REM}} K_{\text{ном}} I_{2.\text{ном}} (R_2 + R_{\text{н.ном}}) < 222 B_{\text{ALF}} s_{\text{перех.треб}} w_2, \quad (7)$$

где K_{id} – коэффициент размерности ТТ, определяемый по требуемому значению времени распознавания защитой режима КЗ в зоне или вне зоны действия; $K_{\text{REM}} = \frac{1}{1 - K_r}$ – коэффициент,

учитывающий наличие остаточной магнитной индукции в магнитопроводе ТТ. Для ТТ класса P в соответствии с ГОСТ Р 58669-2019 он приблизительно равен семи, а для ТТ класса PR – 1,11; $s_{\text{перех.треб}}$ – требуемое сечение магнитопровода по условию переходного режима.

Последнее для ТТ класса PR определяется по выражению, полученному путём преобразования формулы (7):

$$s_{PR} \geq 1,11 \frac{K_{\text{ном}} I_{2.\text{ном}} (R_2 + R_{\text{н.ном}})}{222 B_{\text{ALF}} w_2} K_{\text{id.PR}}. \quad (8)$$

Для ТТ класса P аналогично

$$s_P \geq 7 \frac{K_{\text{ном}} I_{2.\text{ном}} (R_2 + R_{\text{н.ном}})}{222 B_{\text{ALF}} w_2} K_{\text{id.P}}. \quad (9)$$

Анализ показал, что $K_{\text{id.P}} \approx K_{\text{id.PR}}$.

Из выражений (8) и (9) следует:

- при одинаковых кратностях первичного тока и сопротивлениях ветвей вторичного тока (с учётом предельного по ГОСТ Р 58669-2019 и стандарту ПНСТ 283-2018 значения остаточной магнитной индукции в магнитопроводе ТТ класса P) требуемое по условию ненасыщения ТТ при наличии в первичном токе апериодической составляющей сечение магнитопровода ТТ класса P должно быть 6,3 раза больше, чем у ТТ класса PR ;

- требуемое сечение магнитопровода ТТ класса PR по условию не насыщения при наличии в первичном токе апериодической составляющей должно быть значительно больше, чем выбранное для работы при симметричном токе. Например, без учёта АПВ при времени распознавания защитой режима КЗ равно 25 мс и постоянной времени затухания апериодической составляющей первичного тока ТТ, равной 100 мс, $K_{\text{id.PR}} \approx 8$. Это означает, что сечение магнитопровода ТТ класса PR по условию ненасыщения в переходном режиме с учётом остаточной магнитной индукции 10 % должно быть увеличено в 8,8 раз по сравнению с ТТ этого же класса, выбранного без учёта влияния апериодической составляющей;

- размещение ТТ класса PR , предназначенного для работы в переходном режиме, в габаритах ТТ класса P , выбранного для работы при симметричном токе, с тем же произведением предельной кратности первичного тока и сопротивления нагрузки, невозможно. У ТТ класса PR должно быть уменьшено произведение предельной кратности первичного тока и номинального сопротивления ветви вторичного тока пропорционально произведению $K_{\text{REM.PR}} K_{\text{id.PR}}$.

Таким образом, ТТ с немагнитным зазором имеют два существенных недостатка:

- возможность насыщения в переходных режимах, обусловленного наличием апериодической составляющей в токе КЗ;

- увеличенные габариты магнитопроводов, затрудняющие размещение этих ТТ во вводах выключателей, силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

Допустимые значения времени распознавания защитой КЗ в зоне и вне зоны действия

Анализ показал, что время распознавания режима КЗ в зоне действия с учетом задержки

при насыщении ТТ $t_{з.расп}$ определяется по выражению:

$$t_{з.расп} \leq t_{пред.доп.откл} - t_{откл.выкл} - t_{внутр.рел} - t_{пром.рел},$$

где $t_{пред.доп.откл}$ – предельно допустимое значение времени отключения КЗ по условию динамической устойчивости ЭЭС; $t_{откл.выкл}$ – полное время отключения выключателя с приводом; $t_{внутр.рел}$ – время срабатывания внутреннего реле терминала защиты (составляет порядка 10 мс); $t_{пром.рел}$ – время срабатывания промежуточного реле шкафа защиты (составляет порядка 10 мс).

При КЗ вне зоны действия в общем случае время до насыщения должно соответствовать времени отключения КЗ защитой элемента системы, на котором произошло КЗ. При этом, как правило, требования при внешних КЗ оказываются более жесткими, чем при КЗ в зоне действия. С целью смягчения требований к ТТ при КЗ вне зоны действия время до насыщения целесообразно сравнивать с временем распознавания внешнего КЗ специальными органами защиты (детектор насыщения, органы направления мощности или токов и др.).

Необходимые условия правильного функционирования УРЗ в переходных режимах КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ

Исследования показали, что выполнение требования соответствия времени срабатывания защиты времени до насыщения ТТ является *достаточным, но не необходимым* условием правильного функционирования быстродействующих устройств релейной защиты в переходных режимах КЗ, сопровождающихся насыщением магнитопроводов ТТ класса P . Поскольку на практике для всех условий повреждения невозможно избежать насыщения не только ТТ класса P , но и ТТ с немагнитным зазором (кроме ОЭТТ), то зарубежные производители считают, что быстродействующие устройства защиты могут правильно функционировать в условиях определенной степени насыщения электромагнитных ТТ. В соответствии с этим установлены требования к ТТ для основных защит и быстродействующих ступеней резервных защит оборудования высокого и сверхвысокого напряжения в переходных режимах при наличии в токе КЗ апериодической составляющей. В их основу положены полученные на основе экспериментальных исследований с помощью моделей КЗ в зоне и вне зоны действия значения коэффициента размерности ТТ $K_{ид}$. Эксперименты проводились

при разных значениях постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, нагрузки ТТ, тока повреждения, типа повреждения и др. Технические требования к ТТ определялись либо по времени срабатывания при КЗ в зоне действия, либо по устойчивости несрабатывания при КЗ вне зоны действия. Выявлялись наибольшие требуемые значения коэффициента размерности ТТ $K_{ид}$.

На значение $K_{ид}$ влияют следующие факторы:

- алгоритмы функционирования, обеспечивающие повышенную устойчивость функционирования быстродействующих УРЗ при насыщении ТТ;

- значение ЭДС вторичной обмотки ТТ E_{ALF} при первичном токе, не содержащем апериодической составляющей, с номинальной предельной кратностью $K_{ном}$, при номинальном сопротивлении ветви вторичного тока.

Исследования, проведенные ООО НПФ «Квазар» совместно с ООО НПП «ЭКРА», показали, что благодаря использованию специальных алгоритмов во многих случаях устройства защиты правильно функционируют при насыщении ТТ в переходных режимах КЗ. В частности, производимые ООО НПП «ЭКРА» дистанционные защиты линий электропередачи от междуфазных КЗ благодаря наличию органа направления мощности правильно функционируют при близких КЗ в зоне действия и удаленных КЗ вне зоны действия. Если защищаемая линия подключена на сумму токов, протекающих по двум выключателям, то правильная работа защиты при близких КЗ вне зоны действия обеспечивается с помощью органа сравнения направления первых гармоник вторичных токов ТТ в цепях указанных выключателей [8]. Некоторое замедление в срабатывании защиты может иметь место при удаленном КЗ в зоне действия (в конце зоны первой ступени защиты). Однако по условию динамической устойчивости ЭЭС во многих случаях такое замедление является допустимым. Правильное функционирование защиты от КЗ, связанных с землей, обеспечивается с помощью органа, распознающего указанный вид КЗ по напряжению нулевой последовательности.

В устройствах дифференциальных защит сборных шин и ошинок зарубежных и отечественных производителей успешно используется специальный алгоритм – «детектор насыщения», обеспечивающий распознавание режимов КЗ в зоне и вне зоны действия за время, не превышающее 5 мс. В частности, в дифференциальной защите ошинок стороны низшего напряжения автотрансформаторов также могут успешно функционировать алгоритмы «детектор насыще-

ния» или сравнения направлений векторов первых гармоник вторичных токов ТТ в плечах защиты. Кроме того, в этих условиях может эффективно действовать перекрёстная блокировка чувствительных органов защиты по высшим гармоникам тока.

ТТ класса *P* имеют характеристику намагничивания, близкую к прямоугольной (ПХН). Даже в условиях глубокого насыщения ТТ с ПХН имеют остаточную трансформацию, благодаря чему вектор первой гармоники вторичного тока ТТ не пересекает границу зоны действия или недействия защиты. Это объясняет принципиальную возможность распознавания КЗ в зоне и вне зоны действия путём сравнения направлений векторов первых гармоник вторичных токов ТТ. Указанный принцип успешно используется в защитах производства компаний *GE*⁹, *Siemens*¹⁰ и в дистанционных защитах производства ООО НПП «ЭКРА» [8] для распознавания КЗ в зоне и вне зоны действия.

Следует отметить также, значения вторичного тока ТТ с ПХН по мере затухания апериодической составляющей первичного тока возрастают, благодаря чему в ряде случаев замедление в срабатывании защит, вызванное насыщением ТТ при КЗ в зоне действия, оказывается в допустимых пределах по условию динамической устойчивости ЭЭС.

Надёжность функционирования быстродействующих УРЗ повышается при переходе от соединения ТТ в треугольник, звезду, а также на физическую сумму токов ТТ в цепях выключателей к программному суммированию вторичных токов одиночных ТТ. При этом также исключается неселективное срабатывание защит при несимметричных КЗ вне зоны действия по причине насыщения ТТ, включённых в неповреждённые фазы.

ООО НПП «ЭКРА» с использованием материалов исследований ООО НПФ «Квazar» разработаны Методические указания по проверке и выбору ТТ класса *P*, используемых в схемах основных защит и быстродействующих ступеней резервных защит при наличии в токах КЗ апериодической составляющей с примерами расчёта¹¹.

Методики рекомендуют вначале производить расчёт времени до насыщения ТТ в соответствии с ГОСТ Р 58669-2019. Затем вычисленные значения времени до насыщения ТТ сопоставляются с характеристиками основных защит и быстродействующих ступеней резервных защит с учётом алгоритмических решений, обеспечивающих правильную работу указанных устройств при насыщении ТТ. Если результат сопоставления положительный, то ТТ удовлетворяет условиям функционирования защиты в переходном режиме. При отрицательном результате сопоставления производится дополнительная проверка ТТ с учётом остаточной трансформации вторичного тока насыщенными ТТ и предельно допустимого времени отключения КЗ в зоне и вне зоны действия защиты по условию динамической устойчивости ЭЭС.

Вышеизложенное относится к УРЗ, реализованным с помощью микропроцессорной базы. Однако по ориентировочным оценкам доля устройств, выполненных на электромеханической базе, составляет до 70 % от общего числа УРЗ. По этой причине имеются предложения об одновременной замене ТТ и электромеханических защит, так как у последних отсутствует возможность использования новых алгоритмов, повышающих устойчивость функционирования при насыщении ТТ, дополнительных блокировок и выбора уставок с учётом насыщения ТТ. Данное обстоятельство также следует учитывать при решении проблемы замены ТТ класса *P* на более совершенные преобразователи тока. В первую очередь это относится к ОЭТТ и иным цифровым преобразователям тока.

Очевидно, что применение ОЭТТ на сверхвысоком напряжении (330 кВ и выше) не имеет альтернативы. Однако, учитывая наличие УРЗ, выполненных на электромеханической базе, их использование на более низких напряжениях требует обоснования. Это относится также к иным цифровым преобразователям тока.

ВЫВОДЫ

1. Необходимость замены ТТ класса *P* следует обосновывать путём сравнения расходов на замену ТТ в действующих электроустановках и вероятного риска, обусловленного нарушением правильного функционирования быстродействующих УРЗ вследствие насыщения магнитопроводов ТТ при наличии в токе КЗ апериодической составляющей и совпадающего по направлению перемещения с последней вероятно-

⁹ Устройство управления и защиты трансформатора Т60. Руководство по эксплуатации терминалов серии UR Т60. Версия: 4.9х.

¹⁰ SIPROTEC. Дифференциальная защита 7UT6. Версия 4.0. Руководство по эксплуатации 7UT613, 7UT633, 7UT635.

¹¹ Шкафы РЗА серий ШЭ2607, ШЭ2710. Методические указания по проверке и выбору трансформаторов тока. ЭКРА. 650323.085 Д (первая редакция). Чебоксары 2020. Редакция от 08.05.2020 г.

го значения остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ.

2. Принимать решения о замене существующих ТТ класса P на ТТ с немагнитным зазором следует с учётом вероятности насыщения магнитопроводов последних, обусловленной апериодической составляющей первичного тока ТТ, а также увеличения габаритов по сравнению с существующими ТТ класса P .

3. Вопрос об использовании ОЭТТ должен решаться после постановки последних в серийное производство с учётом затруднения интеграции последних с УРЗ, реализованных с помощью электромеханической базы.

4. Применение алгоритмов, повышающих устойчивость функционирования быстродействующих УРЗ при насыщении ТТ, учёт в расчётах их уставок характеристик ТТ с ПХН в переходных режимах и допустимого замедления защит по условию динамической устойчивости ЭЭС, а также отказ от использования групп соединения ТТ (на физическую сумму токов, в треугольник и звезду) во многих случаях позволяет обеспечить правильное функционирование быстродействующих УРЗ без замены существующих ТТ класса P .

5. Следует учитывать, что неправильные действия быстродействующих УРЗ могут вызываться не только насыщением магнитопроводов ТТ класса P в переходных режимах, но и ошиб-

ками проектирования, монтажа, наладки и эксплуатации.

6. При принятии решения о замене ТТ, к выходам которых подключены электромеханические защиты, целесообразно рассмотреть вариант одновременной замены указанных защит на микропроцессорные УРЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Циглер Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения; перевод с англ. / под ред. А.Ф. Дьякова. М.: Знак, 2008. 216 с.
2. Беркович М.А., Семёнов В.А. Основы автоматизации энергосистем. М.: Энергия, 1968.
3. Алексеев В.Г. Аперидические составляющие токов короткого замыкания в сетях сверхвысокого напряжения // Электричество. 1987. № 9. С. 51 – 54.
4. Шперлинг Б.–Р.Т. Характеристики включения выключателей и их влияние на параметры распределения перенапряжений при включении ненагруженной линии // Изв. НИИ постоянного тока. 1968. № 14. С. 146 – 155.
5. Стогний Б.С. Теория высоковольтных измерительных преобразователей переменного тока и напряжения. Киев: Наук. думка, 1984. 272 с.
6. Баев А.В. Остаточная индукция в трансформаторах тока релейной защиты // Электричество. 1971. № 7. С. 4 – 9.
7. Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Кибель В.М. и др. Трансформаторы тока/ Л.: Энергоатомиздат, 1989.
8. Дони Н.А. Возможность неселективного действия быстродействующих дистанционных защит при внешних повреждениях с большими токами КЗ // Релейщик. 2015. № 4. С. 30 – 33.

Кужеков Станислав Лукьянович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, гл. инженер Общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственная фирма «Квазар». E-mail: kuzhekov@mail.ru

Дегтярев Андрей Александрович – канд. техн. наук, ведущий инженер Общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственная фирма «Квазар». E-mail: aad_new@mail.ru

Дони Николай Анатольевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., директор по науке, зав. отделом систем РЗА Общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «ЭКРА». E-mail: doni_na@ekra.ru

Шурупов Алексей Александрович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом разработки подстанционного оборудования Общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «ЭКРА». E-mail: shurupov_aa@ekra.ru

Поступила в редакцию

9 сентября 2020 г.

*Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika
(Russian Electromechanics)
2020, vol. 63, no. 6, pp. 72-82*

ON THE PROBLEM OF SELECTING AND REPLACING CURRENT TRANSFORMERS FOR RELAY PROTECTION DEVICES

S.L. Kuzhekov, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). 132, Prosvescheniya Str., Novocheerkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation.

A.A. Degtyarev, NPF Kvazar. 164 A, Mikhailovskaya Str., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation.

N.A. Doni, EKRA Research and Production Ltd. 3, I. Ya. Yakovlev ave., Cheboksary, 428020, Russian Federation.

A.A. Shurupov, EKRA Research and Production Ltd. 3, I. Ya. Yakovlev ave., Cheboksary, 428020, Russian Federation.

In connection with cases of incorrect operation of high-speed relay protection devices (RPD) in case of short circuits outside their range, the issue of replacing current transformers (CT) of class P with more advanced current converters is relevant. The article shows that the decision to replace existing class P CTs with CTs with a non-magnetic gap should be made taking into account the probability of saturation of the magnetic cores of the latter in a transient short-circuit mode, as well as an increase in their dimensions compared to class P CTs. The issue of using optoelectronic current converters should be resolved after the latter are put into mass production, taking into account the difficulty of integrating the latter with the RPDs implemented using an Electromechanical base. In many cases, the correct functioning of high-speed RPDs without replacing existing CTs of class P can provide the following measures: the use of algorithms that increase the stability of the operation of high-speed RPDs when the CT is saturated; taking into account in the calculations of the settings the rectangular characteristic of the CT magnetization in transient modes and the permissible deceleration of protections under the condition of the dynamic stability of electric power systems; refusal to use CT connection groups (physical sum of currents, delta and star).

Key words: short circuit, transient, current transformer, class P, saturation, non-magnetic gap, algorithm, stability, operation.

For citation: Kuzhekov S.L., Degtyarev A.A., Doni N.A., Shurupov A.A. [On the Problem of Selecting and Replacing Current Transformers for Relay Protection Devices]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*, 2020, vol. 63, no. 6, pp. 72-82. (In Russ.) DOI:10.17213/0136-3360-2020-6-72-82.

REFERENCES

1. Tsigler G. *Tsifrovaya differentsial'naya zashchita. Printsipy i oblast' primeneniya* [Digital differential protection. Principles and scope]. Moscow: Znack, 2008, 216 p.
2. Berkovich M.A., Semenov V.A. *Osnovy avtomatiki energosistem* [Fundamentals of automation of power systems]. Moscow: Energiya, 1968.
3. Alekseev V.G. Aperiodicheskie sostavlyayushchie tokov korotkogo zamykaniya v setyakh sverkhvysokogo napryazheniya [Aperiodic components of short-circuit currents in ultrahigh Voltage networks]. *Elektrichestvo*, 1987, no. 9, pp. 51 – 54. (In Russ.)
4. Spherling B. – R. T. Kharakteristiki vklyucheniya vyklyuchatelei i ikh vliyaniye na parametry raspredeleniya perenapryazhenii pri vklyuchanii nenagruzhennoi linii [Characteristics of switching on switches and their influence on the parameters of overvoltage distribution when switching on an unloaded line]. *Izvestiya NII postoyannogo toka*, 1968, no. 14, pp. 146 – 155. (In Russ.)
5. Stognii B. S. *Teoriya vysokovol'tnykh izmeritel'nykh preobrazovatelei peremennogo toka i napryazheniya* [Theory of high-voltage measuring converters of alternating current and voltage]. Kiev: Nauk. dumka, 1984, 272 p.
6. Baev A.V. Ostatochnaya induktsiya v transformatorakh toka releinoi zashchity [Residual induction in current transformers of relay protection]. *Elektrichestvo*, 1971, no. 7, pp. 4 – 9. (In Russ.)
7. Afanas'ev V.V., Adon'ev N.M., Kibel' V.M. at el. *Transformatory toka* [Current transformers]. Leningrad: Energoatomizdat, 1989.
8. Doni N.A. Vozmozhnost' neselektivnogo deistviya bystrodeistvuyushchikh distantsionnykh zashchit pri vneshnikh povrezhdeniyakh s bol'shimi tokami KZ [Possibility of non-selective action of high-speed distance protection in case of external damage with high short-circuit currents]. *Releishchik*, 2015, no. 4, pp. 30 - 33. (In Russ.)

Information about the authors:

Stanislav L. Kuzhekov, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: kuzhekov@mail.ru

Andrey A. Degtyarev, Candidate of Technical Sciences, Lead Engineer. E-mail: aad_new@mail.ru

Nikolay A. Doni, Candidate of Technical Sciences, Scientific Director. E-mail: doni_na@ekra.ru

Aleksey A. Shurupov, Candidate of Technical Sciences, Department Head. E-mail: shurupov_aa@ekra.ru

Received September 9, 2020