

Научная статья

УДК 621.316.925.2:621.314.224

doi:10.17213/0136-3360-2023-4-128-135

Об определении требований к трансформаторам тока для релейной защиты в переходных режимах короткого замыкания

Андрей Александрович Дегтярёв¹✉, Станислав Лукьянович Кужеков^{1, 2},
Николай Анатольевич Дони³, Алексей Александрович Шурупов³

¹Общество с ограниченной ответственностью научно-производственная фирма «Квазар», г. Новочеркасск, Россия, ✉aad_new@mail.ru

²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

³Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В электроэнергетической системе России широко применяются трансформаторы тока (ТТ) класса Р для устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) без немагнитного зазора в магнитопроводе. Производителям устройств РЗА предписано определять требования по минимально необходимому времени достоверного измерения значений тока ТТ $t_{рз}$, при котором обеспечивается правильная работа устройств РЗА. ООО НПФ «Квазар» и ООО НПП «ЭКРА» разработаны требования к указанному времени для устройств РЗА, производимых ООО НПП «ЭКРА». Проанализированы требования к ТТ, предъявляемые производителями устройств РЗА при наличии в токе короткого замыкания (КЗ) апериодической составляющей. Использованы материалы стандартов МЭК и отечественных стандартов, а также требования ведущих зарубежных производителей устройств РЗА (*Siemens, GE, ABB*). Использована теория процессов в ТТ до первого момента насыщения при наличии в токе апериодической составляющей. Проведены испытания терминалов релейной защиты с помощью программно-аппаратного комплекса реального времени. Приведены значения $t_{рз}$ для первых ступеней дистанционных защит линий и дифференциальных защит шин производства ООО НПП «ЭКРА». Показана связь требований к ТТ, предъявляемых ведущими производителями устройств РЗА. Путём сопоставления указанных выше материалов подтверждено соответствие требований к ТТ, предъявляемых ООО НПП «ЭКРА», требованиям стандартов МЭК и ведущих производителей устройств РЗА.

Ключевые слова: короткое замыкание, переходный процесс, трансформатор тока, требования к трансформатору тока, минимально необходимое время достоверного измерения тока, детектор насыщения

Для цитирования: Об определении требований к трансформаторам тока для релейной защиты в переходных режимах короткого замыкания / А.А. Дегтярёв, С.Л. Кужеков, Н.А. Дони, А.А. Шурупов // Изв. вузов. Электромеханика. 2023. Т. 66. № 4. С. 128-135. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2023-4-128-135>.

Original article

On determining the requirements for current transformers for relay protection in transient short circuit conditions

Andrey A. Degtyarev¹✉, Stanislav L. Kuzhekov^{1, 2}, Nikolay A. Doni³, Aleksey A. Shurupov³

¹NPF Kvazar, Novochoerkassk, Russian Federation, ✉aad_new@mail.ru

²Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Russian Federation

³EKRA Research and Production Enterprise Ltd, Cheboksary, Russian Federation

Abstract. In the Russian electric power system, class P current transformers (CTs) are widely used for relay protection and automation devices (RPA) without a non-magnetic gap in the magnetic core. Manufacturers of relay protection and

automation devices are to determine the requirements for the minimum time needed for the reliable measurement of CT current values $t_{рз}$, which ensures the correct operation of relay protection and automation devices. LLC Research and Production Company Kvazar and LLC R&D enterprise EKRA have developed requirements for the specified time of relay protection and automation devices manufactured by LLC R&D enterprise EKRA. The article analyzes the requirements for the CTs imposed by manufacturers of relay protection and automation devices in the presence of an aperiodic component in the short circuit current (SC). Materials from IEC and domestic standards were used, as well as the requirements of leading foreign manufacturers of relay protection devices (Siemens, GE, ABB). The theory of processes in CTs up to the first moment of saturation in the presence of an aperiodic component in the current is used. Relay protection terminals were tested using a real-time hardware and software system. The values of $t_{рз}$ for the first stages of distance protection of lines and differential protection of busbars produced by LLC R&D enterprise EKRA are given. The relationship between the requirements for CTs imposed by leading manufacturers of relay protection and automation devices is shown. By comparing the above materials, we confirmed the compliance of the CT requirements imposed by R&D enterprise EKRA LLC with the requirements of IEC standards and the leading manufacturers of relay protection and automation devices.

Keywords: short circuit, transient process, current transformer, requirements for a current transformer, minimum required time for reliable current measurement, saturation detector

For citation: Degtyarev A.A., Kuzhekov S.L., Doni N.A., Shurupov A.A. On determining the requirements for current transformers for relay protection in transient short circuit conditions. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*. 2023; 66(4):128-135. (In Russ.). <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2023-4-128-135>.

Введение

В электроэнергетической системе (ЭЭС) России нашли широкое применение ТТ класса Р для релейной защиты без немагнитного зазора в магнитопроводе. В связи с имевшими место нарушениями в работе ЭЭС России по причине насыщения магнитопроводов указанных в течение 2020-2021 гг., в соответствии с письмом Заместителя министра энергетики¹, выполнены расчёты времени до насыщения $t_{нас}$ ТТ класса Р при КЗ с наличием в токе аperiodической составляющей [1]. На основании расчетов предусмотрены разработка нормативно-технической документации Российской Федерации для обеспечения совместимости технических характеристик ТТ и подключенных к ним устройств РЗА. На стадии проектных решений предписано определить требования к техническим характеристикам устройств РЗА в части минимально необходимого времени достоверного измерения значений тока ТТ, при котором обеспечивается правильная работа функций РЗА в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ². Указанное время в соответствии с ГОСТ Р 70358-2022 получило сокращённое обозначение $t_{рз}$, причём производители устройств РЗА должны декларировать его значения для производимых ими устройств.

Методы расчёта времени до насыщения ТТ класса Р стандартизованы и приведены в ГОСТ Р

58669-2019, однако в Руководящих документах отсутствуют разъяснение понятия $t_{рз}$, сведения о методике его определения, связи данного параметра с характеристиками функционирования устройств РЗА, а также рекомендации по определению $t_{рз}$ для устройств РЗА различного назначения.

Зарубежные производители устройств РЗА, исходя из технических характеристик своих устройств, разработали требования к ТТ, при которых обеспечивается правильное функционирование указанных устройств в переходных режимах. В Техническом докладе IEC 61869-100:2017 также уделено внимание требованиям к ТТ в переходных режимах КЗ с наличием в токе аperiodической составляющей.

В соответствии с указаниями¹ ООО НПФ «Квazar» и ООО НПП «ЭКРА» разработали характеристики $t_{рз}$ для устройств РЗА, производимых ООО НПП «ЭКРА».

Цель настоящей работы – анализ требований к ТТ при наличии в токе КЗ аperiodической составляющей.

Требования к ТТ в соответствии с Техническим докладом МЭК 61869 – 100

В Техническом докладе IEC 61869-100:2017 разработчикам современных устройств РЗА рекомендуется двухэтапный подход к определению требований к ТТ: сначала должны использоваться аналитические формулы, а затем проводятся испытания терминалов защиты с помощью имитационных моделей ТТ в наиболее тяжёлых режимах КЗ для данного вида защиты.

По результатам аналитических расчетов и лабораторных испытаний формируются требования к ТТ в виде, например, набора значений ко-

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

² Правила технологического функционирования электроэнергетических систем. Утверждены Постановлением правительства Российской Федерации от 13 августа 2018 г. №937.

эфициента размерности переходного процесса K_{id} для характерных режимов КЗ:

$$K_{id} = K_{if}(t_{al})k_{над},$$

где $K_{if}(t)$ – коэффициент переходного процесса; t_{al} – значения времени достижения предела точности ТТ; $k_{над}$ – коэффициент надежности, значение которого задается производителем.

При этом в качестве итогового принимается значение K_{id} , полученное по результатам испытаний, даже если оно существенно отличается от расчетного значения K_{if} .

Требования к ТТ зарубежных производителей

В указанных требованиях нормируются значения следующих критериев для защит, реагирующих на интегральные параметры тока ТТ:

– коэффициента переходного режима $K_{п.р}(t)$ (K_{if} , K_{id}), учитывающего постоянную времени затухания апериодической составляющей первичного тока ТТ T_p и постоянную времени вторичного контура ТТ T_s (последняя для ТТ с немагнитным зазором);

– номинальной предельной кратности первичного тока (*Siemens*) или ЭДС вторичной обмотки ТТ (U_{al} или U_k) в переходном режиме (*GE*, *ABB*, *Alstom*), которая не должна превышать значение напряжения насыщения $U_{нас}$.

Требования к ТТ ООО НПФ «Квазар» - ООО НПП «ЭКРА»

Основные понятия, относящиеся к временным интервалам функционирования устройства защиты: минимально необходимое время достоверного измерения значения тока ТТ $t_{рз}$; время принятия решения функцией защиты о нахождении КЗ в зоне или вне зоны действия $t_{рп}$; время срабатывания устройства РЗ подробно рассмотрены в [2, 3]. При проверке и выборе ТТ используется первое из рассмотренных выше понятий, т.е. минимально необходимое время достоверного измерения тока.

На основании испытаний терминалов РЗА производства ООО НПП «ЭКРА» с помощью программно-аппаратного комплекса моделирования энергосистем в режиме реального времени был сделан вывод, что в случае КЗ в зоне действия под термином $t_{рз}$ следует понимать наименьшее значение времени до насыщения ТТ, при котором функция защиты принимает решение о срабатывании в течение времени, не превышающего заявленного производителем значения времени срабатывания функции защиты (без учёта времени срабатывания выходных промежуточных реле), а в случае КЗ вне зоны дейст-

вия блокирующий орган (БО) защиты гарантированно обеспечивает её несрабатывание.

Если в составе защиты БО отсутствует, то значение $t_{рз}$ определяется временем отключения повреждённого объекта защитой элемента, в зоне действия которого происходит КЗ [4].

Испытания проведены при КЗ в зоне и вне зоны действия в различных расчётных точках и режимах КЗ, зависящих от характеристик защищаемых объектов и функций защиты. Анализ результатов показал, что перечень факторов, влияющих на значение $t_{рз}$, в значительной степени зависит от вида устройств РЗА и для многих из них может быть ограничен следующим набором: режим и вид КЗ, кратность тока КЗ, параметры защищаемого объекта и срабатывания защиты.

Результаты работы по определению значений минимально необходимого времени достоверного измерения значений тока ТТ отражены в соответствующих методических указаниях ООО НПП «ЭКРА»³ и распространяются на ТТ для устройств основных защит и быстродействующих ступеней резервных защит основного оборудования электрических сетей и подстанций высокого и сверхвысокого напряжения.

Ниже, в качестве примера, кратко рассмотрены требования некоторых ведущих производителей устройств РЗА к ТТ.

Первые ступени дистанционных защит линий электропередачи

Все рассматриваемые дистанционные защиты (ДЗ) линий электропередачи (далее линий) реагируют на интегральные параметры основной гармоники периодической составляющей подво-димых токов [5, 6].

В материалах компании *Siemens* [5] подробно изложены требования к ТТ для первых ступеней ДЗ линий, основанные на расчёте значения номинальной предельной кратности ТТ $K_{ном}$. Устройства защиты компании разработаны с учётом возможности насыщения ТТ. В частности, при близких КЗ допускается некоторое насыщение сердечников ТТ, что учтено специальным коэффициентом a , зависящим от постоянной времени затухания апериодической составляющей первичного тока ТТ T_p и типа реле ДЗ. Указанный параметр, по существу, является расчётным значением коэффициента переходного режима $K_{п.р}(t)$ при близких КЗ в зоне действия.

³ ООО НПП «ЭКРА». Шкафы РЗА серий ШЭ2607, ШЭ2710, ЦЭТ. Методические указания по проверке и выбору трансформаторов тока. ЭКРА.650323.085 Д. Чебоксары 2023 (третья редакция)

В требованиях к ТТ для ДЗ используются следующие понятия [5]:

- коэффициент переходного режима $K_{tr}(t)$;
- минимально необходимое время измерений, включая время запаса;
- допустимая предельная кратность первичного тока ТТ $K_{доп}$;
- требуемая номинальная кратность первичного тока ТТ $K_{ном}$.

Выражения для вычисления $K_{tr}(t)$, $K_{доп}$, $K_{ном}$ приведены в [5].

В требованиях компании GE⁴ к ТТ, в отличие от подхода компании Siemens, в расчётах для устройства ДЗ линий ALPS D60 используются постоянные значения $K_{tr}(t)$: 3 – КЗ в начале линии; 10 – КЗ в конце зоны действия первой ступени. Для линий сверхвысокого напряжения значение $K_{tr}(t)$ может быть снижено до 5.

В основу требований к ТТ компанией GE положено напряжение в точке перегиба вольт-амперной характеристики U_k , вычисляемое по выражению

$$U_k = K_{п.р}(t) I_k R_{2\Sigma\text{факт}},$$

где I_k – расчётные значения тока КЗ; $R_{2\Sigma\text{факт}}$ – фактическое сопротивление в цепи вторичной обмотки ТТ.

При этом количество величин, необходимых для проверки или выбора ТТ, сократилось. Это произошло за счёт априорного задания (без расчёта) двух значений $K_{tr}(t)$. Однако в материалах компании отсутствует обоснование допустимости использования при всех возможных в эксплуатации параметров линий и ЭЭС постоянных значений $K_{tr}(t)$.

Компания ABB в требованиях к ТТ⁵ руководствуется положениями стандарта IEC 60044-6. При этом, в частности, рекомендуется производить проверку ТТ при КЗ в конце первой ступени ДЗ по выражению

$$E_{2ном} \geq E_{2факт} = \frac{I_{к.макс1ступ}}{I_{1ном}} I_{2ном} k (R_2 + R_{нагр.факт}),$$

где $E_{2ном}$, $E_{2факт}$ – ЭДС вторичной обмотки номинальная и фактическая, соответственно; $I_{к.макс1ступ}$ – максимальный ток КЗ в конце зоны действия первой ступени ДЗ; k – коэффициент, зависящий от постоянной времени затухания

апериодической составляющей тока КЗ в конце зоны действия первой ступени дистанционной защиты T_p . Принимается равным: $k=4$ при $T_p \leq 30$ мс, $k=6$ при $T_p > 30$ мс.

Коэффициент k – синоним термина $K_{tr}(t)$. По существу, методика расчёта совпадает с методикой компании GE.

Требования к ТТ ООО НПП «ЭКРА» для первых ступеней междуфазной ДЗ приведены на рис. 1. и в табл. 1

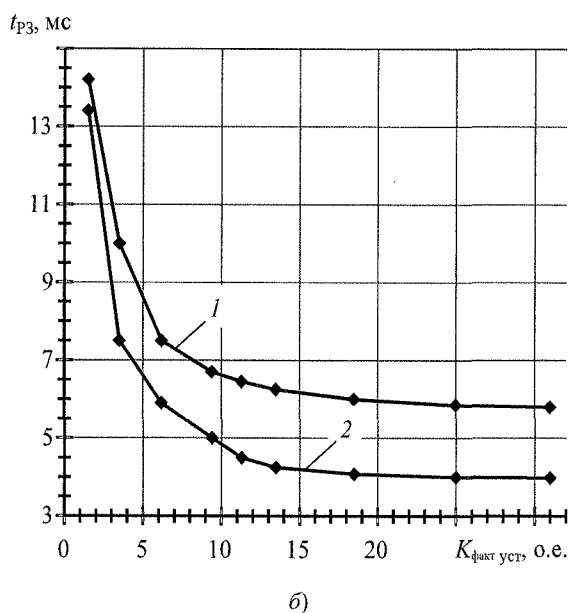
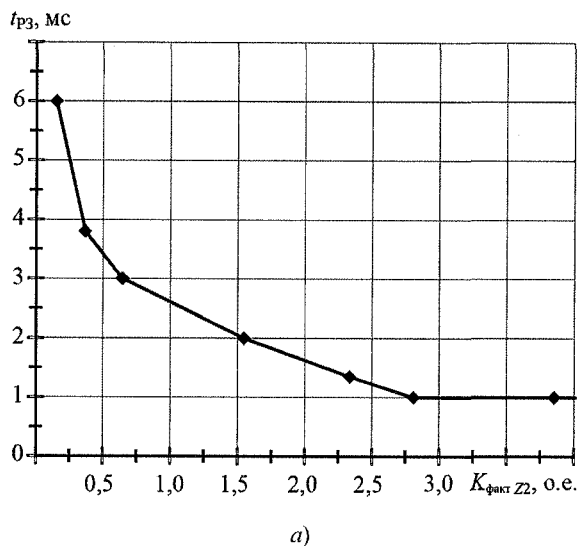


Рис. 1. Значения t_{p3} : а – для первой ступени ДЗ от междуфазных КЗ в режиме близкого трехфазного повреждения в зоне действия; б – для органа БСТО в режиме близкого повреждения «за спиной» защиты; 1 – однофазное КЗ; 2 – трёхфазное КЗ.

Fig. 1. t_{p3} values of: а – for the first stage of the differential protection from phase-to-phase short circuits in the mode of a close three-phase fault in the coverage area; б – for the BSTO organ in the close damage mode “behind” the protection 1 – one phase SC; 2 – three phase SC

⁴Jorge Cardenas. CT Requirements for GE Multilin Relays. GE Grid Automation. 2016.

⁵Рекомендации по выбору уставок устройства REL670 ver.1.2 для организации комплекта ступенчатых защит линии напряжением 110 кВ и выше. Методическое пособие АБСТ. 650031.00. Разработал В. Степанов. Редакция 3. Ноябрь 2015.

Таблица 1
Table 1Требования к ТТ для первой ступени ДЗ от междуфазных КЗ
CT requirements for the first stage of differential protection against phase-to-phase short circuits

Режим КЗ	Место установки ТТ	Проверка ДЗ от междуфазных КЗ по $t_{рз}$	Особые требования
Близкое «за спиной»	в цепях выключателей	не выполняется	Ввести в работу орган «Блокировки при внешних КЗ» и выполнить для него проверку ТТ по $t_{рз}$ (рис. 1, б) в режимах трёхфазного и однофазного КЗ
	в линии		—
Трёхфазное в зоне действия в месте установки защиты	в цепях выключателей или линии	рис. 1, а	—
Трёхфазное на расстоянии 90 % от зоны действия	в цепях выключателей или линии	8 мс для длинных линий; 15 мс для коротких линий с $T_{р.экв} < 50$ мс; 28 мс для коротких линий с $T_{р.экв} > 50$ мс	—

Примечание. У длинных линий нет зависимости от T_p , так как $T_{р.экв} < 50$ мс

Пояснения к рис. 1:

$$K_{\text{факт.З2}} = \frac{Z_{\text{уст.Ист}}}{Z_{\text{ЭС.СК}}},$$

где $Z_{\text{ЭС.СК}}$ – модуль полного эквивалентного сопротивления энергосистемы относительно конца ВЛ, на котором установлена защита («своего» конца);

$$Z_{\text{уст.Ист}} = \sqrt{\left(\frac{X_{\text{уст.Ист}}}{\text{tg}\varphi_{\text{Л}}}\right)^2 + X_{\text{уст.Ист}}^2} - \text{модуль}$$

полного сопротивления, характеризующий параметры срабатывания первой ступени ДЗ соответствующей петли КЗ. Данный параметр прямо пропорционален длине защищаемого участка линии:

$$K_{\text{факт.уст}} = \frac{I_{\text{п.КЗ}}}{I_{\text{уст.БСТО}}},$$

где $I_{\text{п.КЗ}}$ – действующее значение периодической составляющие фазного тока выключателя; $I_{\text{уст.БСТО}}$ – значение параметра срабатывания пускового органа (ПО) тока устройства «Блокировки при внешних КЗ».

Дифференциальные защиты шин и ошиновок (ДЗШ, ДЗО), как правило, имеют быстродействующий и медленнодействующий органы. Ниже, по причине высокой ответственности защиты шин по условиям динамической устойчивости ЭЭС, рассмотрены требования к быстродействующим органам, имеющим блокировку при внешних КЗ.

Сведения о требованиях к ТТ указанных органов представлены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2Требования к ТТ для ДЗШ
CT requirements for the busbar differential protection

Производитель	Параметры	Требования при КЗ в зоне действия	Требования при КЗ вне зоны действия
Siemens ⁶ [7]	$t_{\text{нас}}$, мс	3	3
	$K_{\text{л}}(t)$, о. е.	0,5	0,5
GE ^{4,7}	$t_{\text{нас}}$, мс	10	-
	$K_{\text{л}}(t)$, о. е.	3	8 (5)
ABB ^{8,9}	$t_{\text{нас}}$, мс	-	-
	$K_{\text{л}}(t)$, о. е.	0,5	0,5

⁶Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.70.136-2012. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА серии SIPROTEC (Siemens AG) дифференциальной токовой защиты шин 110-750 кВ. Дата введения: 13.12.2012.

⁷Устройство дифференциальной защиты шин В90. Руководство по эксплуатации терминала серии UR. В90 версия: 5.7x. Номер руководства: 1601-0200-U1 (GEK-113302). Copyright © 2010 GE Multilin. GE Multilin 215 Anderson Avenue, Markham, Ontario Canada L6E 1B3.

⁸ABB REB 670*1. Интеллектуальное электронное устройство дифференциальной защиты шин. Идентификационный номер: 1MRK 505 172-BEN. Дата издания: Март 2006.

⁹Перевод из документа «Instrument Transformer. Application Guide. 1HSM 9543 40-00 en, ed. 4, 2015, ABB AB Sweden».

Требования к ТТ для ДЗШ ООО НПФ «ЭКРА»

По результатам испытаний для функции ДЗШ (ДЗО) определены значения минимально необходимого времени достоверного измерения значенной тока ТТ в режиме КЗ в зоне действия (рис. 2).

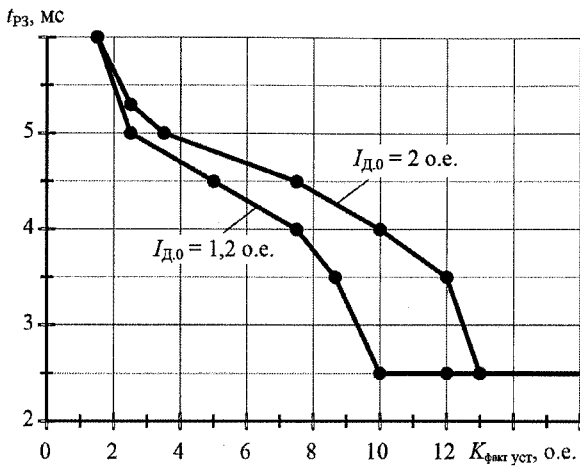


Рис. 2. Требования к ТТ для функции дифференциальной защиты шин и ошинок в режиме КЗ в зоне действия
Fig. 2. CT requirements for the differential protection function of buses and busbars in a short-circuit mode in the coverage area)

Пояснение к рис. 2:

$$K_{\text{факт.уст}} = \frac{I_{\text{Д}}^*}{I_{\text{Д0}}},$$

где $I_{\text{Д}}^* = \frac{I_{\text{Д}}}{I_{\text{Б}}}$ – значение периодической составляющей дифференциального тока $I_{\text{Д}}$, приведенное к базисному току $I_{\text{Б}}$ ДЗШ (ДЗО). При этом кривая $t_{\text{рз}}$ соответствует варианту, когда остальные параметры характеристики срабатывания (ток начала торможения $I_{\text{Т0}}$ и коэффициент торможения k_{T}) принимают наихудшие из допустимого для них диапазона значения.

По результатам испытаний в режиме КЗ вне зоны действия установлено, что независимо от значения $K_{\text{факт.уст}}$ блокировка при внешних КЗ гарантированно исключает неселективное действие ДЗШ (ДЗО) при значении $t_{\text{рз}}$, равном 2,5 мс. Указанное справедливо во всём диапазоне постоянной времени затухания апериодической составляющей в первичном токе КЗ.

Анализ требований к ТТ для быстродействующих устройств РЗ зарубежных производителей и ООО НПФ «Квазар» – ООО НПФ «ЭКРА»

Рассмотрение требований к ТТ зарубежных производителей показало их органическую близость по существу задачи обеспечения правильного функционирования быстродействующих

устройств РЗА, получающих информацию о токе от ТТ класса Р (без немагнитного зазора в магнитопроводе) в переходных режимах КЗ в зоне и вне зоны действия при наличии в токе апериодической составляющей.

Отмечена идентичность требований к ТТ для устройств РЗА, использующих блокировку при внешних КЗ [7 – 9].

Следует отметить использование ООО НПФ «ЭКРА» устройства блокировки при сквозных токах через ошиновку [10], блокирующего при КЗ вне зоны действия неселективное срабатывание защит объектов, подключённых к ЭЭС на сумму токов ТТ, установленных в цепях выключателей. Указанное устройство реагирует на интегральный параметр – фазовый сдвиг между векторами первой гармоники вторичных токов ТТ, установленных в цепях выключателей.

На первый взгляд, имеется значительная разница в требованиях к ТТ для устройств РЗА, реагирующих на интегральные параметры подводимых токов. Предложенные ООО НПФ «Квазар» и ООО НПФ «ЭКРА» требования исходят из равенства времени $t_{\text{рз}}$ и времени до насыщения ТТ $t_{\text{нас}}$ в режиме КЗ, причём последнее однозначно определяется значением $K_{\text{п.р}}(t)$. В требованиях зарубежных производителей используются понятия напряжения на вторичной обмотке ТТ U_{al} или U_{k}^{10} , номинальной предельной кратности $K_{\text{ном}}$ и параметра переходного режима $K_{\text{п.р}}(t)$ или коэффициента запаса $K_{\text{р}}(t)$.

Время до насыщения ТТ определяется равенством двух параметров:

– параметра переходного режима $K_{\text{п.р}}(t)$ (ГОСТ Р 283 – 2018);

– параметра режима работы ТТ A (ГОСТ Р 58669 – 2019).

Так как в момент равенства указанных параметров выполняется условие

$$A(1 - K_{\text{р}}) \geq K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}}),$$

то, учитывая, что

$$E_{2\text{ном}} \approx U_{\text{ALF}} \approx U_{\text{al}},$$

$$A \approx \frac{U_{\text{al}}}{K_{\text{факт}} I_{2\text{ном}} z_{2\Sigma\text{факт}}},$$

можно получить выражение для U_{al} :

$$U_{\text{al}} \approx \frac{K_{\text{п.р}}(t)}{1 - K_{\text{р}}} K_{\text{факт}} I_{2\text{ном}} z_{2\Sigma\text{факт}}.$$

¹⁰ Отношение U_{al} к U_{k} приблизительно равно 1,25 [7].

Выражение для вычисления номинальной предельной кратности тока ТТ:

$$I_{1.\text{ном}} K_{\text{ном}} z_{2\Sigma\text{ном}} \geq \frac{K_{\text{п.р}}(t_{\text{рз}})}{1 - K_r} I_{\text{кз}} z_{2\Sigma\text{факт}}.$$

Таким образом, между выражениями, предложенными различными производителями устройств РЗА, имеется органическая связь.

Выражения для устройств, реагирующих на интегральные параметры тока, целесообразно дополнить требованием о невозврате ПО защиты в интервале насыщенного состояния магнитопровода ТТ до принятия защитой решения о действии на отключение:

$$t_{\text{реш}} - t_{\text{ПО}} > t_{\text{БП}},$$

где $t_{\text{ПО}}$ – время срабатывания ПО функции защиты; $t_{\text{БП}}$ – интервал насыщенного состояния магнитопровода ТТ.

Требования к ТТ для защит с блокировкой при внешних КЗ (детектор насыщения) достаточно близки.

Заключение

Разработанные зарубежными производителями требования опираются на общую базу – теорию работы ТТ до первого момента насыщения в переходном процессе при наличии в токе аperiodической составляющей с учётом результатов испытаний. По этой причине, как отмечено в IEC 61869-100:2017, использование аналитических выражений является предварительным этапом при проверках и выборе ТТ по времени до насыщения. Поэтому окончательный вывод по требованиям к ТТ можно сделать только по данным, полученным путем испытаний реальных устройств РЗА.

Испытания позволяют учесть суммарное влияние всех алгоритмических и аппаратных решений, использованных производителем в своём устройстве.

Указанные положения следует учитывать при определении значений $t_{\text{рз}}$ для устройств РЗА в переходных режимах КЗ с наличием в токах аperiodической составляющей.

Список источников

1. Анализ результатов исследований времени до насыщения магнитопроводов трансформаторов тока электроэнергетических объектов / А.А. Яблоков, А.В. Панащатенко, Н.А. Родин, А.С. Лифшиц // Релейная защита и автоматизация. 2023. № 2. С. 68 – 79.
2. Минимально необходимое время достоверного измерения тока устройствами релейной защиты в переходных процессах коротких замыканий / А.А. Дегтярев, С.Л. Кужиков, Н.А. Дони, А.А. Шурупов // Электрические станции. 2023. № 4. С. 48 – 57.
3. О стандартизации требований к трансформаторам тока и быстродействующим устройствам релейной защиты в переходных режимах коротких замыканий / С.Л. Кужиков, А.А. Дегтярев, Н.А. Дони, А.А. Шурупов // ЭнергоЭксперт. 2022. № 4. С. 8 – 16.
4. Проверка соответствия трансформаторов тока условиям функционирования устройств релейной защиты в аварийных режимах / С.Л. Кужиков, А.А. Дегтярев, Н.А. Дони, А.А. Шурупов // Электрические станции. № 7. 2022. С. 50 – 59.
5. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и область применения; пер. с англ.; под ред. А.Ф. Дьякова М.: Энергоиздат, 2005. 322 с.
6. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
7. Циглер Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения; пер. с англ.; под ред. Дьякова А.Ф. М.: Знак. 2008. 216 с.
8. Линт М.Г., Фурашов В.С. Двухканальная время-импульсная дифференциальная защита шин. Электротехника. 1990. № 2. С. 8 – 13.
9. Соловьев В.А., Колобродов Е.Н., Рыбин Д.С. Особенности работы дифференциальной защиты при подключении к трансформаторам тока различных классов точности. Электрические станции. № 9. 2023. С. 26 – 34.
10. Дони Н.А. Возможность неселективного действия быстродействующих дистанционных защит при внешних повреждениях с большими токами КЗ. Релейщик, 2015, № 04 (24). С. 30 – 33.

References

1. Yablokov A.A., Panashchatenko A.V., Rodin N.A., Lifshits A.S. Analysis of the results of studies of the time until saturation of the magnetic circuits of current transformers of electric power facilities. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. 2023;(2):68 – 79. (In Russ.)
2. Degtyarev A.A., Kuzhikov S.L., Doni N.A., Shurupov A.A. Minimum required time for reliable current measurement by relay protection devices during short circuit transients. *Elektricheskie stantsii*. 2023;(4):48 – 57. (In Russ.)

3. Kuzhekov S.L., Degtyarev A.A., Doni N.A., Shurupov A.A. On standardization of requirements for current transformers and high-speed relay protection devices in transient short circuit conditions. *EnergoEkspert*.2022;(4):8 – 16.(In Russ.)
4. Kuzhekov S.L., Degtyarev A.A., Doni N.A., Shurupov A.A. Checking the compliance of current transformers with the operating conditions of relay protection devices in emergency modes. *Elektricheskije stantsii*. 2022;(7):50 – 59.(In Russ.)
5. Ziegler G. *Digital remote protection: principles and applications*. Moscow: Energoizdat. 2005. 322 p.(In Russ.)
6. Shneerson E.M. *Digital relay protection*.Moscow: Energoatomizdat.2007. 549 p.(In Russ.)
7. Ziegler G. *Digital differential protection. Principles and scope*. Translation from English/Ed. Dyakova A.F. Moscow: Energoizdat. 2008. 216 p.
8. Lint M.G., Furashov V.S. Two-channel time-pulse differential bus protection. *Elektrotehnika*. 1990;(2):8 – 13.(In Russ.)
9. Solov'ev V.A., Kolobrodov E.N., Rybin D.S. Features of differential protection when connected to current transformers of various accuracy classes. *Elektricheskije stantsii*. 2023;(9):26 – 34.(In Russ.)
10. Doni N.A. Possibility of non-selective action of high-speed distance protection in case of external faults with high short-circuit currents. *Releishchik*. 2015;(4):30 – 33.(In Russ.)

Информация об авторах:

А.А. Дегтярёв – канд. техн. наук, ведущий инженер ООО НПФ «Квазар», aad_new@mail.ru

С.Л. Кузечков – д-р техн. наук, профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, главный инженер ООО НПФ «Квазар», kuzhekov@mail.ru

Н.А. Дони – канд. техн. наук, директор по науке, заведующий отделом систем РЗА ООО НПП «ЭКРА», doni_na@ekra.ru

А.А. Шурупов – канд. техн. наук, заведующий отделом разработки подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА», shurupov_aa@ekra.ru

Information about the authors:

A.A. Degtyarev – Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer NPF Kvazar, aad_new@mail.ru

S.L. Kuzhekov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Chief Engineer NPF Kvazar, kuzhekov@mail.ru

N.A. Doni – Cand. Sci. (Eng.), Director for Science, Head of the Relay Protection Systems Department of EKRA Research and Production Enterprise Ltd, doni_na@ekra.ru

A.A. Shurupov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Substation Equipment Development Department of EKRA Research and Production Enterprise Ltd, shurupov_aa@ekra.ru

Статья поступила в редакцию / the article was submitted 10.10.2023;

одобрена после рецензирования / approved after reviewing 08.11.2023;

принята к публикации / accepted for publication 10.11.2023.