

Анализ и проверка соответствия характеристик трансформаторов тока класса Р условиям функционирования первых ступеней дистанционных защит линий электропередачи при переходных процессах

- Дегтярев А. А.¹, канд. техн. наук, ООО НПФ “Квазар”, Новочеркасск
- Кужиков С. Л., доктор техн. наук, ООО НПФ “Квазар”, Новочеркасск
- Дони Н. А., канд. техн. наук, ООО НПФ “ЭКРА”, Чебоксары
- Шурупов А. А., канд. техн. наук, ООО НПФ “ЭКРА”, Чебоксары
- Федотов А. Ю., ООО НПФ “ЭКРА”, Чебоксары

Приведены результаты исследования влияния насыщения трансформаторов тока (ТТ) класса Р в переходных режимах на работу реле сопротивления и органа направления мощности первых ступеней дистанционных защит от междуфазных и однофазных коротких замыканий (КЗ) производства ООО НПФ “ЭКРА”. Рассмотрены схемы подключения ТТ к реле сопротивления и расчётные условия при проверке соответствия характеристик ТТ условиям функционирования указанных защит. Установлено, что расчётным режимом для проверки ТТ является удалённое КЗ в зоне действия. Предложена методика проверки соответствия характеристик ТТ условиям функционирования первых ступеней дистанционных защит при наличии в токах КЗ апериодической составляющей.

Ключевые слова: линия электропередачи, междуфазное и однофазное короткое замыкание, трансформатор тока, переходный процесс, апериодическая составляющая, насыщение, дистанционная защита, реле сопротивления, орган направления мощности, первая ступень.

В связи с имевшими место нарушениями в работе электроэнергетических систем (ЭЭС) по причине насыщения магнитопроводов ТТ класса Р руководящими документами [1 – 3] предписано обеспечить правильное функционирование устройств релейной защиты при наличии в токах КЗ апериодической составляющей. Поэтому для ответственных объектов электроэнергетики рекомендовано выполнить расчёты времени до насыщения ТТ при КЗ. На основании расчётов должно быть проверено соответствие характеристик ТТ класса Р условиям функционирования устройств релейной защиты (УРЗ) в переходных режимах. Если ТТ должен трансформировать ток без насыщения до момента срабатывания УРЗ, то указанную проверку можно выполнять в соответствии с неравенством:

$$t_{\text{нас}} \geq t_{\text{ср.УРЗ}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{нас}}$ – время до насыщения ТТ в режиме КЗ; $t_{\text{ср.УРЗ}}$ – минимально необходимое время достоверного измерения значений тока ТТ, при котором обеспечивается правильная работа УРЗ в переходных режимах.

¹ Дегтярев Андрей Александрович: aad_new@mail.ru

Однако необходимо отметить, что проверка условия (1) на практике приводит к следующим результатам:

для параметра $t_{\text{нас}}$ разработаны методики расчёта, а значение $t_{\text{ср.УРЗ}}$ не является расчётной величиной и зависит от многих факторов: алгоритма и уставок УРЗ, конфигурации защищаемой сети, параметров и способа подключения ТТ, вида и условий КЗ и др.;

в случаях указанной неопределённости производители УРЗ в качестве $t_{\text{ср.УРЗ}}$ рекомендуют использовать максимальное время срабатывания конкретного типа защиты;

чаще всего расчётная величина $t_{\text{нас}}$ получается существенно меньше рекомендованного $t_{\text{ср.УРЗ}}$.

Вместе с тем исследования, проведённые ООО НПФ “Квазар” совместно с ООО НПФ “ЭКРА”, показали, что во многих случаях устройства защиты правильно функционируют при невыполнении условия (1). В частности, дистанционные защиты линий электропередачи (ВЛ), произведённые ООО НПФ “ЭКРА”, правильно функционируют при максимальных токах КЗ и насыщении ТТ в режимах близких КЗ в зоне и вне зоны действия.

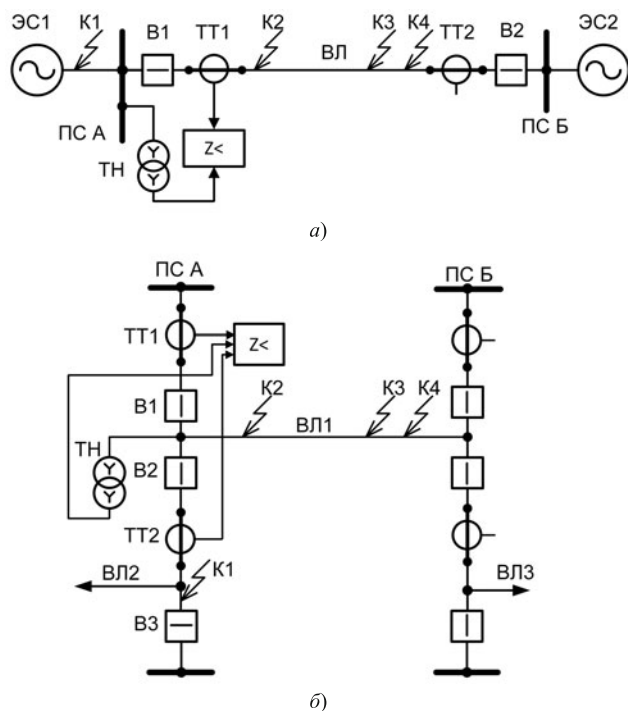


Рис. 1. Варианты подключения УРЗ:

а – ТТ установлены в цепи линии; *б* – ТТ установлены в цепях выключателей *B1* и *B2*; *K1* – *K4* – характерные точки КЗ; *ВЛ* – линия электропередачи; *ТН* – трансформатор напряжения

На основании изложенного можно сделать вывод, что выполнение неравенства (1) является достаточным, но не необходимым условием правильного функционирования УРЗ в переходных режимах с наличием в токах КЗ апериодической составляющей.

Целью проводимых исследований были:

анализ поведения первых ступеней дистанционных защит (ДЗ) линий высокого (ВН) и сверхвысокого (СВН) напряжения, производимых ООО НПП “ЭКРА”, при наличии в токах КЗ апериодической составляющей и остаточных индукций в магнитопроводах ТТ класса Р;

выявление расчётного режима для ДЗ линий, в котором необходимо проводить проверку и выбор ТТ при наличии в токах КЗ апериодической составляющей;

разработка методики проверки соответствия характеристик ТТ класса Р условиям функционирования указанных УРЗ в расчётном режиме.

Исходными данными для выполнения работы были технические данные ТТ и УРЗ, расчётные условия объектов защиты, а также применяемые производителем принципы обеспечения правильной работы микропроцессорных устройств дистанционных защит линий при наличии в токах КЗ апериодической составляющей.

В число расчётных условий объектов защиты при проверке и выборе ТТ для ДЗ линий высокого и сверхвысокого напряжения входили значения первичных и вторичных токов ТТ при КЗ в харак-

терных точках, показанных в соответствии с [4] на рис. 1:

близкое КЗ “за спиной” (точки *K1*). Наибольший сквозной ток, протекающий по *ТТ1* и *ТТ2*, имеет место при отключённом выключателе *B3* (ремонтный режим выключателя). Насыщение магнитопроводов ТТ может привести к неселективному срабатыванию защиты;

близкое КЗ в зоне действия (в месте установки защиты) – точка *K2*. Насыщение магнитопроводов ТТ может вызвать замедление в срабатывании первой ступени защиты на время, в первом приближении превышающее значение постоянной времени первичной сети T_p , и отключение повреждения с выдержкой времени действием второй ступени защиты;

удалённое КЗ на расстоянии 80% от начала зоны действия – точка *K3*. При насыщении магнитопроводов ТТ может произойти замедление в срабатывании защиты на время, в первом приближении превышающее значение постоянной времени первичной сети T_p , и отключение повреждения с выдержкой времени действием второй ступени защиты;

удалённое КЗ вне зоны действия (110% от зоны действия) – точка *K4*.

В качестве расчётных видов КЗ в международной практике приняты трёхфазное и однофазное в максимальном режиме работы ЭЭС. Однако проведённые исследования показали, что режим двухфазного КЗ для первой ступени ДЗ от междуфазных КЗ при насыщении ТТ в обеих повреждённых фазах более тяжёлый, чем режим трёхфазного КЗ.

Условия работы ТТ быстродействующих защит в переходных режимах существенным образом утяжеляются при учёте остаточной магнитной индукции в сердечнике и АПВ (автоматическое повторное включение) повреждённого оборудования. В национальном стандарте России по расчёту времени до насыщения ТТ [5] в качестве расчётного условия принято совпадение максимальной апериодической составляющей в токе КЗ и предельного значения остаточной магнитной индукции (0,86 от индукции насыщения) неблагоприятного знака (совпадающего с направлением перемагничивания током КЗ).

На основе анализа технической документации ведущих зарубежных производителей УРЗ по указанному поводу получено следующее.

1. В общем случае начальное значение апериодической составляющей ниже максимального. По данным компании Siemens начальное значение указанной составляющей меньше 70% максимального [6]. По данным компании АВВ, начальное значение указанной составляющей в 95% случаев находится в пределах от 77% до нуля, а 100%-ное содержание апериодической составляющей (момент возникновения КЗ при прохождении напряжения приблизительно через ноль) бывает очень

редко (существует низкая вероятность при ударах молнии) [7]. По данным компании GE, апериодическая составляющая имеется только в 60% и менее случаев КЗ, так как КЗ чаще всего возникает при максимальном напряжении (когда апериодическая составляющая практически отсутствует) [8].

2. В стандарте МЭК по ДЗ линий [4] значение коэффициента остаточной индукции K_r принято равным 0,75.

В требованиях к ТТ компании АВВ отмечено, что в ТТ класса Р остаточный магнитный поток может составлять до 70 – 80% потока насыщения [7].

Согласно канадскому исследованию, большие значения остаточной индукции в 60 – 79% были выявлены только в 27% ТТ из 141 [6].

3. Совпадение предельных значений апериодической составляющей и остаточной индукции компанией Siemens обычно не рассматривается на практике. Учёт возможности совпадения производится компанией только для СВН при учёте АПВ, где рекомендуется использовать ТТ с немагнитным зазором.

В материалах компании АВВ предлагается учитывать небольшую вероятность совпадения максимального начального значения апериодической составляющей тока КЗ с максимальным остаточным магнитным потоком в том же направлении, что и магнитный поток, создаваемый током повреждения.

Приведённые сведения целесообразно учесть при проверках ТТ класса Р для первых ступеней ДЗ, являющейся резервной по отношению к основным защитам линий. Например, можно использовать принятое в стандарте МЭК [4] значение коэффициента остаточной магнитной индукции $K_r = B_r / B_{\text{нас}} = 0,75$, где B_r – остаточная магнитная индукция; $B_{\text{нас}}$ – магнитная индукция насыщения.

Могут быть два места установки ТТ:

в цепи защищаемой линии (рис. 1, а);

в цепях выключателей (рис. 1, б). При этом ТТ, установленные в цепях выключателей, включают по схеме на сумму вторичных токов.

Возможны три варианта подключения ТТ к терминалу защиты:

каждый ТТ (как одиночный ТТ) подключён к терминалу индивидуальными фазными и нулевыми проводниками. При этом отсутствует взаимное влияние ТТ разных фаз и групп на их вторичные токи;

ТТ соединены в звезду, имеют общий нулевой проводник и подключены к УРЗ тремя фазными и одним нулевым проводником. При этом имеет место взаимное влияние ТТ разных фаз на их вторичные токи;

две трёхфазные группы ТТ установлены в цепях выключателей и соединены в звезды. К терминалу подводятся физические суммы вторичных

фазных токов. Наблюдается взаимное влияние ТТ разных фаз и групп на их вторичные токи.

В соответствии с результатами испытаний защит линий, выполненных АО “ВНИИР” [9], последний вариант не может быть рекомендован к использованию в схемах комплектов ступенчатых защит линий.

Приведём краткие сведения о первых ступенях дистанционных защит линий на примере алгоритмов, реализованных в шкафах ШЭ2607 021 и ШЭ2710 521 [10, 11]. Спротивления и перетоки мощности в режиме КЗ рассчитываются с применением действующего значения первой гармоники токов и напряжений.

В алгоритме функционирования первой ступени ДЗ от междуфазных КЗ используются разности фазных токов и соответствующие разности фазных напряжений. Вычисление реактивных и активных сопротивлений каждой петли КЗ производится на основе решения дифференциального уравнения высоковольтной линии. В алгоритме функционирования первой ступени ДЗ от КЗ на землю используются фазные токи с компенсацией тока нулевой последовательности и соответствующие им фазные напряжения.

Для обеспечения направленности каждой ступени ДЗ применяются органы направления мощности (ОНМ). Область действия ОНМ ограничивается отрезками прямых, исходящими из начала координат и расположенными во втором и четвёртом квадрантах комплексной плоскости.

Поляризирующей величиной в алгоритме функционирования ОНМ первой ступени ДЗ от междуфазных КЗ является сумма напряжения прямой последовательности и части напряжения “памяти” прямой последовательности в месте установки защиты, а рабочей величиной – разность фазных токов.

В алгоритме функционирования ОНМ первой ступени ДЗ от КЗ на землю в качестве поляризирующей величины используется напряжение прямой последовательности в месте установки защиты, а в качестве рабочей величины – фазный ток с компенсацией тока нулевой последовательности.

Метод исследования. Так как работники проектных и эксплуатационных организаций, как правило, не имеют возможности моделирования переходных процессов в группах ТТ и проведения испытаний УРЗ в реальном масштабе времени с помощью симуляторов, то при отсутствии иных данных в методиках проверки и выбора ТТ можно применять универсальные характеристики ТТ с прямоугольной характеристикой намагничивания (ПХН), с помощью которых могут быть получены:

относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока ТТ в переходном режиме;

угловая погрешность ТТ по первой гармонике в переходном режиме.

Указанные характеристики являются функциями времени и позволяют оценить динамику поведения микропроцессорных устройств защиты в переходных режимах, в первую очередь возможность срабатывания и задержку в срабатывании защиты. Полученные результаты имеют некоторый расчётный запас.

Возможность использования универсальных характеристик объясняется следующим. Переходный режим ТТ, нагрузка на который выбрана по условию 10%-ной погрешности, можно разбить на два этапа. На первом этапе ($0 \dots t_{\text{нас}}^1$), где $t_{\text{нас}}^1$ – первый момент насыщения ТТ в переходном процессе, ТТ идеально трансформирует ток. После первого момента насыщения $t_{\text{нас}}^1$ начинается второй этап, который заканчивается моментом, когда сердечник выходит из насыщения. Для расчёта процессов в ТТ достаточно определить первый момент насыщения, а затем по моментам перехода первичного тока через нуль установить последующие моменты насыщения, которые не зависят от значения сопротивления нагрузки и кратности токов, а определяются только предшествующими моментами переходов первичного тока через нуль.

По вычисленным моментам насыщения $t_{\text{нас}}^n$ и моментам выхода из насыщения, совпадающим с моментами перехода первичного тока через нулевое значение t_0^n , могут быть вычислены параметры вторичного тока, в частности, угловая погрешность по первой гармонике тока δ_1 и действующее значение первой гармоники $I_{2.1}$.

Характеристики для первых гармоник сигналов тока и напряжений получены с помощью классического дискретного преобразования Фурье с полным окном, равным 20 мс.

Относительное действующее значение первой гармоники вторичного тока одиночного ТТ определяется с помощью следующего выражения:

$$I_{2.1*} = \frac{I_{2.1}}{I_1'} \quad (2)$$

где $I_{2.1}$ – действующие значения первой гармоники вторичного тока; I_1' – действующее значение периодической составляющей приведённого первичного тока.

Угловая погрешность по первой гармонике δ_1 вторичного тока одиночного ТТ определяется с помощью следующего выражения:

$$\delta_1 = \arg\left(\frac{\bar{I}_{2.1}}{\bar{I}_1'}\right) \quad (3)$$

где $\bar{I}_{2.1}$ – комплексное значение первой гармоники вторичного тока; \bar{I}_1' – комплексное значение периодической составляющей приведённого первичного тока.

Характеристики ТТ с ПХН, соответствующие выражениям (2) и (3), справедливы для анализа работы УРЗ, реагирующих на фазные токи (ДЗ от КЗ на землю). Для анализа поведения первых ступеней ДЗ линий от междуфазных КЗ при насыщении ТТ целесообразно использовать характеристики относительного действующего значения и угловой погрешности первой гармоники разностного тока. Например, для петли $A - B$ указанные характеристики определяются с помощью следующих выражений:

$$I_{2.1.AB*} = \frac{|\bar{I}_{2A.1} - \bar{I}_{2B.1}|}{|\bar{I}_{1A}' - \bar{I}_{1B}'|} \quad (4)$$

$$\delta_{1.AB} = \arg\left(\frac{\bar{I}_{2A.1} - \bar{I}_{2B.1}}{\bar{I}_{1A}' - \bar{I}_{1B}'}\right) \quad (5)$$

где $\bar{I}_{2A.1}$, $\bar{I}_{2B.1}$ – комплексы первых гармоник вторичных токов фаз A и B трёхфазной группы ТТ с ПХН, соединённой в звезду; \bar{I}_{1A}' , \bar{I}_{1B}' – комплексы периодических составляющих приведённых первичных токов фаз A и B .

В настоящее время в электрических сетях РФ напряжением 110 – 750 кВ вариант подключения трёхфазной группы ТТ к УРЗ, когда каждый из фазных ТТ подсоединён к УРЗ индивидуальными фазными и нулевыми проводниками, не применяется. Практически всегда вторичные цепи трёхфазной группы ТТ соединены в звезду и имеют общий нулевой проводник. По указанной причине проведён анализ влияния нулевого проводника на характеристики относительного действующего значения и угловой погрешности первой гармоники вторичного тока.

В результате проведённых исследований получено, что:

наибольшие погрешности по первой гармонике вторичного тока одиночного ТТ с ПХН наблюдаются при максимальном относительном содержании апериодической составляющей в токе КЗ;

в переходных режимах однофазных КЗ при исключении из рассмотрения режима с насыщением ТТ в неповреждённой фазе допустимо не учитывать соединение трёхфазной группы в звезду (общий нулевой проводник);

для анализа поведения первых ступеней ДЗ от КЗ на землю в переходных режимах однофазных КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ, целесообразно применять характеристики, приведённые в [12];

при изменении значения начальной фазы ϑ периодической составляющей первичного тока в момент возникновения трёхфазного КЗ в диапазоне от 0 до 180° относительное действующее значение и угловая погрешность первой гармоники тока I_{AB} повторяются для токов I_{BC} и I_{CA} со сдвигом на -120° и $+120^\circ$ соответственно;

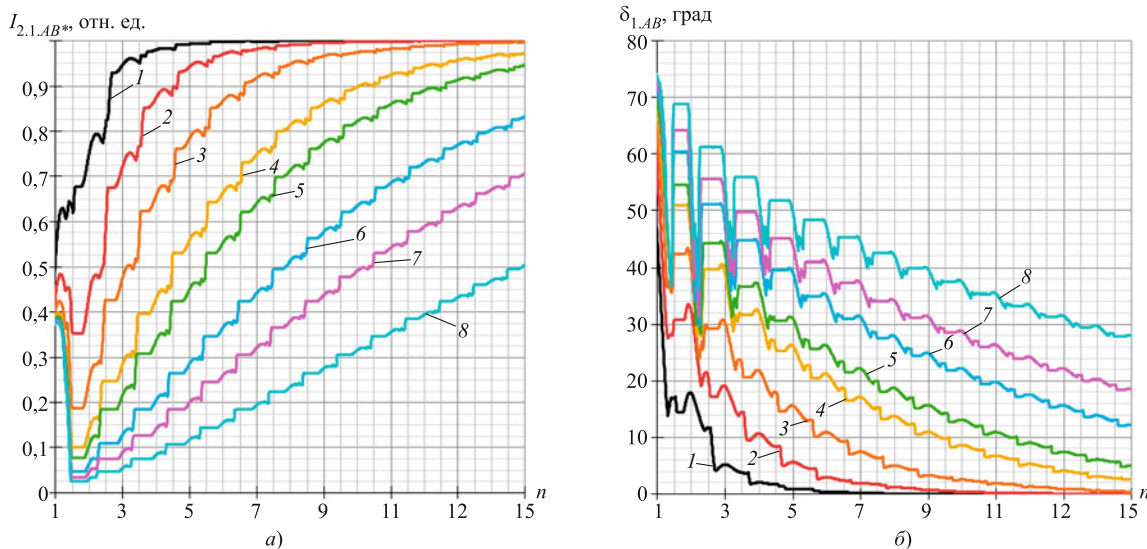


Рис. 2. Характеристики первой гармоники вторичного разностного тока ТТ с ПХН, соединённых по схеме звезды, в режиме трёхфазного КЗ при начальной фазе периодической составляющей первичного тока 144° :

a – относительное действующее значение; *б* – угловая погрешность; 1 – $T_p = 0,015$ с; 2 – $T_p = 0,03$ с; 3 – $T_p = 0,05$ с; 4 – $T_p = 0,08$ с; 5 – $T_p = 0,1$ с; 6 – $T_p = 0,15$ с; 7 – $T_p = 0,2$ с; 8 – $T_p = 0,3$ с

для анализа поведения первых ступеней ДЗ линий от междуфазных КЗ допустимо в режиме трёхфазного КЗ рассматривать разностный ток только одной из трёх петель “фаза – фаза”; в режиме двухфазного КЗ – разностный ток только петли, состоящей из повреждённых фаз;

для анализа поведения первых ступеней ДЗ линий от междуфазных КЗ при насыщении ТТ в режиме трёхфазного КЗ целесообразно использовать характеристики относительного действующего значения и угловой погрешности первой гармоники разностного вторичного тока модели трёхфазной группы ТТ с ПХН, соединённой в звезду (рис. 2);

для анализа поведения первых ступеней ДЗ линий от междуфазных КЗ в режиме двухфазного КЗ в наиболее тяжёлых условиях, когда одновременно насыщаются ТТ в обеих повреждённых фазах, целесообразно применять характеристики, приведённые в [12].

Аргументом характеристик, представленных на рис. 2, являются дискретные значения номера периода n после возникновения короткого замыкания.

Анализ поведения первых ступеней ДЗ линий ВН и СВН. В качестве объектов исследования выбраны:

линия напряжением 220 кВ – место установки ТТ соответствует рис. 1, *a*;

линия напряжением 500 кВ – место установки ТТ соответствует рис. 1, *б*.

Все параметры указанных объектов исследования приведены в приложениях В1 и В2 [1]. Параметры срабатывания первых ступеней ДЗ, установленных в шкафах ШЭ2607 021 и ШЭ2710 521,

рассчитаны по соответствующим методикам производителя.

Анализ поведения первых ступеней ДЗ линий проводился по траекториям движения вектора сопротивления реле сопротивления (РС) и вектора перетока мощности ОНМ, соответствующих для междуфазных повреждений петле тока КЗ “ $A - B$ ”, для однофазного КЗ – повреждённой фазе. Указанные траектории получены с помощью универсальных характеристик ТТ с ПХН (рис. 2 и [12]) для переходных режимов, а также значений векторов периодических составляющих токов и напряжений в режиме КЗ по следующим выражениям:

для ДЗ от междуфазных КЗ

$$\bar{z}_{AB.PC.n} = \frac{\bar{U}_A - \bar{U}_B}{I_{2.1.AB*.n} e^{j\delta_{1.AB.n}} (\bar{I}_A - \bar{I}_B)}; \quad (6)$$

$$\bar{S}_{AB.OH.n} = \bar{U}_{пол.АВ} \overline{[I_{2.1.AB*.n} e^{j\delta_{1.AB.n}} (\bar{I}_A - \bar{I}_B)]}; \quad (7)$$

для ДЗ от КЗ на землю

$$\bar{z}_{A.PC.n} = \frac{\bar{U}_A}{\bar{I}_A I_{2.1*.n} e^{j\delta_{1.n}} + \frac{\bar{Z}_0 - \bar{Z}_1}{\bar{Z}_1} \bar{I}_{0.n}}; \quad (8)$$

$$\bar{S}_{A.OH.n} = \bar{U}_{1A} \overline{\left(\bar{I}_A I_{2.1*.n} e^{j\delta_{1.n}} + \frac{\bar{Z}_0 - \bar{Z}_1}{\bar{Z}_1} \bar{I}_{0.n} \right)}; \quad (9)$$

где n – номер периода замера; черта в формулах (7) и (9) – знак комплексного сопряжения результата выражения в скобках; $\bar{S}_{AB.OH.n}$ – вектор перетока мощности в месте установки терминала в режиме КЗ для петли $A - B$; $\bar{z}_{AB.PC.n}$ – вектор сопротивления РС петли $A - B$ для ДЗ от междуфазных

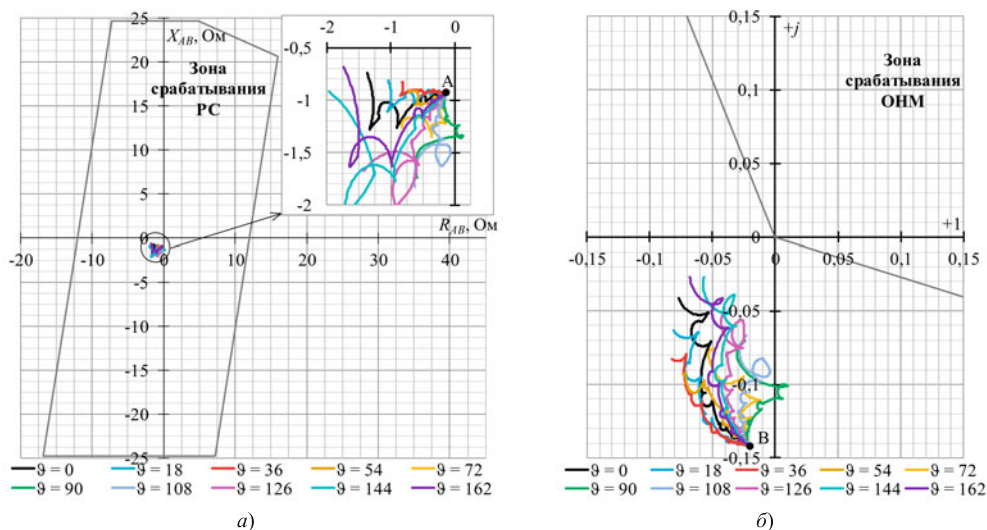


Рис. 3. Траектории движения векторов сопротивления РС (а) и вектора перетока мощности ОНМ (б), соответствующие петле А – В, в переходном режиме близкого трёхфазного КЗ “за спиной” при разных значениях начальной фазы периодической составляющей первичного тока:

режим при КЗ в точке К1 рис. 1, а

КЗ; $\vec{U}_A, \vec{U}_B, \vec{U}_C$ – векторы периодических составляющих напряжений фаз А, В и С в режиме КЗ; $\vec{I}_A, \vec{I}_B, \vec{I}_C$ – векторы периодических составляющих токов фаз А, В и С в режиме КЗ; $\vec{U}_{пол. AB} = (\vec{U}_{1A} - \vec{U}_{1B}) + 0,125(\vec{U}_{1A.п} - \vec{U}_{1B.п})$ – напряжение прямой последовательности поляризации петли А – В; $\vec{U}_{1A.п}, \vec{U}_{1B.п}$ – напряжения прямой последовательности “памяти” фаз А и В; $\vec{U}_{1A}, \vec{U}_{1B}$ – напряжения прямой последовательности фаз А и В; $\vec{S}_{A.ОНМ}$ – вектор перетока мощности в месте установки терминала в режиме КЗ для повреждённой фазы А; $\vec{z}_{A.РС.п}$ – вектор сопротивления РС повреждённой фазы А для ДЗ от КЗ на землю; \vec{Z}_0, \vec{Z}_1 – удельное сопротивление защищаемой линии по прямой и нулевой последовательности соответственно; $\vec{I}_{0.л} = (\vec{I}_A I_{2.1*..n} e^{j\delta_{1.л}} + \vec{I}_B + \vec{I}_C) / 3$ – вектор тока нулевой последовательности.

Для режима двухфазного КЗ в выражениях (6) и (7) выполняется замена характеристик $I_{2.1.AB*}, \delta_{1.AB}$ (рис. 2) на соответствующие $I'_{2.1*..n}, \delta_1$ из [12].

В качестве примеров работы ДЗ на рис. 3 – 6 показаны траектории движения векторов сопротивления РС ДЗ линии и перетока мощности для соответствующего ОНМ.

Цветом на рис. 3 – 6 выделены траектории векторов сопротивления, соответствующие разным значениям начальной фазы ϑ периодической составляющей первичного тока в момент возникновения КЗ в диапазоне 0, 18, ..., 180°.

Траектории движения вектора сопротивления РС и вектора перетока мощности ОНМ, приведённые на рис. 3 – 6, после затухания апериодической составляющей тока КЗ сходятся соответственно в точки А и В.

В случае близкого трёхфазного КЗ вне зоны действия (рис. 3) траектории движения вектора сопротивления РС располагаются внутри ненаправленной характеристики срабатывания, а траектории движения вектора перетока мощности ОНМ находятся вне его зоны работы. Таким образом, ДЗ от междуфазных КЗ излишне не срабатывает.

На рис. 4 видно, что насыщение ТТ в переходном режиме близкого трёхфазного КЗ не приводит к недопустимым искажениям замера РС петли А – В и смещению вектора перетока мощности ОНМ, т.е. задержка в срабатывании при близком КЗ в зоне отсутствует.

При удалённом КЗ в зоне действия (рис. 5) траектории движения вектора сопротивления РС при всех значениях угла θ достаточно далеко выходят из зоны срабатывания. При этом траектории движения вектора перетока мощности ОНМ проходят таким образом, что не оказывают негативного влияния на работу защиты. Анализ показал, что в условиях испытаний, приведённых в [1], замедление в срабатывании первой ступени дистанционной защиты от междуфазных КЗ в режиме удалённого трёхфазного КЗ составляет примерно два с половиной периода (около 50 мс). Причём траектория с наибольшим замедлением соответствует значению угла ϑ , равному 144°.

В качестве примера неправильной работы ДЗ линий от КЗ на землю в переходном режиме КЗ на рис. 6 приведены траектории вектора сопротивления РС и вектора перетока мощности ОНМ для ДЗ от КЗ на землю. Указанные траектории соответствуют переходному режиму близкого однофазного КЗ “за спиной” в точке К1 схемы рис. 1, б с насыщением магнитопровода ТТ2 (установленного в цепи выключателя) при максимальном относи-

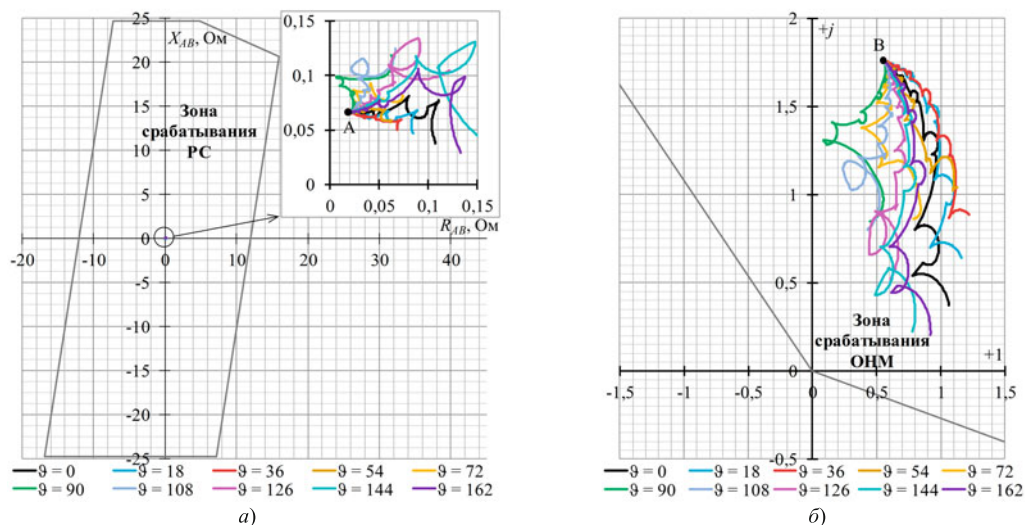


Рис. 4. Траектории движения векторов сопротивления РС (а) и вектора перетока мощности ОНМ (б), соответствующие петле А – В, в переходном режиме близкого трёхфазного КЗ в зоне действия при разных значениях начальной фазы периодической составляющей первичного тока:

режим при КЗ в точке К2 рис. 1, а

тельном содержании аperiodической составляющей в токе КЗ. На траекторию движения вектора перетока мощности ОНМ в переходном режиме КЗ (рис. 6, б) с интервалом по времени, равным 10 мс, нанесены красные метки. Пять из указанных меток находятся в зоне срабатывания ОНМ, а вектор сопротивления РС (рис. 6, а) находится в зоне срабатывания постоянно. Таким образом, в течение первых 50 мс с момента возникновения однофазного повреждения ДЗ от КЗ на землю без принятия специальных мер будет находиться в сработавшем состоянии.

Траектории, аналогичные изображённым на рис. 3 – 6, были получены для всех характерных точек, указанных на рис. 1, в режимах трёхфазно-

го, двухфазного и однофазного КЗ для обоих видов ДЗ линий ВН и СВН.

Результаты анализа поведения первых ступеней ДЗ линий при наличии в токах КЗ аperiodической составляющей для наглядности сведены в табл. 1.

Поведение защиты в случае близких КЗ вне зоны действия (точки К1 на рис. 1) зависит от места установки ТТ: в цепях выключателей или в цепи защищаемой линии.

Производителями УРЗ разработаны усовершенствованные алгоритмы функционирования защит, учитывающие насыщение сердечников ТТ, не имеющих немагнитного зазора. Ряд компаний использует специальный “детектор насыщения” и

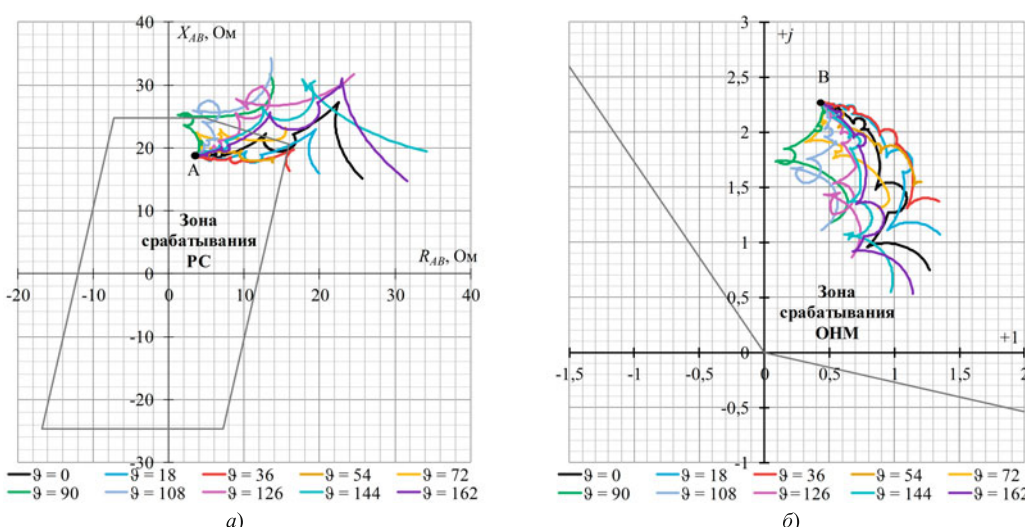


Рис. 5. Траектории движения векторов сопротивления РС (а) и вектора перетока мощности ОНМ (б), соответствующие петле А – В, в переходном режиме удалённого (80% зоны действия первой ступени) трёхфазного КЗ при разных значениях начальной фазы периодической составляющей первичного тока:

режим при КЗ в точке К3 рис. 1, а

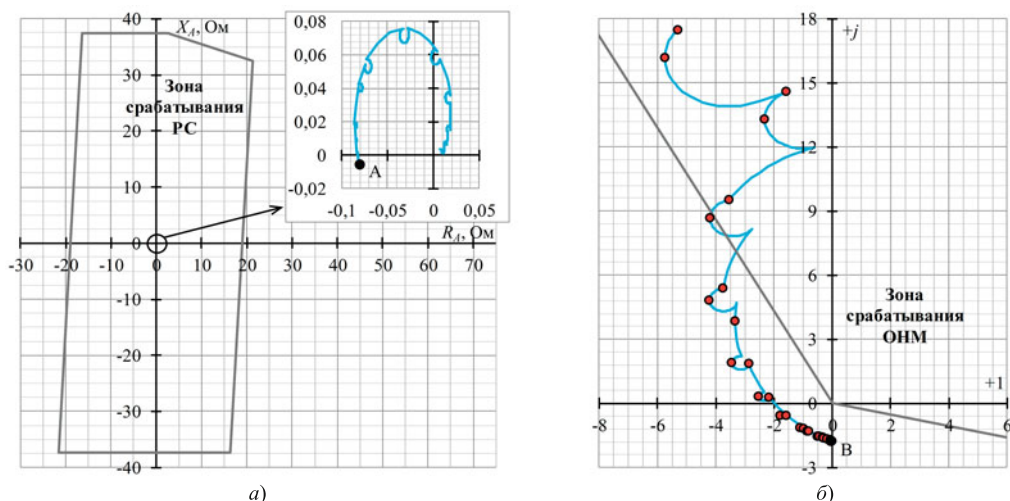


Рис. 6. Траектории движения векторов сопротивления РС (а) и вектора перетока мощности ОНМ (б) для фазы А в переходном режиме близкого однофазного КЗ “за спиной” при максимальном относительном содержании аperiodической составляющей:

режим при КЗ в точке К1 рис. 1, б

осуществляет контроль насыщения ТТ, используемый для блокирования действия защиты при внешних КЗ, а также для усиления процентного торможения (адаптивного торможения) дифференциальных защит.

Однако блокировка при насыщении ТТ, основанная на формировании модуля суммы токов ТТ и суммы модулей этих токов с последующим контролем отставания появления модуля суммы токов ТТ от суммы модулей токов (“детектор насыщения”), не может быть использована для комплекта ступенчатых защит линий по следующим причинам.

Если ТТ установлены в цепи защищаемой линии, то нет возможности для формирования указанных модулей токов. Если ТТ установлены в цепи выключателей, то при КЗ “за спиной” защиты по одной из групп ТТ проходит сквозной ток, а по другой – сумма сквозного тока и тока защищаемого присоединения, поступающего с противоположного конца линии. В результате модуль геометрической суммы токов ТТ равен току присоединения (току с противоположного конца линии) и появляется одновременно с появлением суммы

модулей токов ТТ. Вследствие этого “детектор насыщения” может неверно распознать КЗ “за спиной” защиты как КЗ в зоне действия.

Таким образом, принцип действия “детектора насыщения” может быть применён в защитах линии только в случае, если в УРЗ имеются все токи, подходящие к узлу, например, два тока выключателей и ток линии. Но реально такое решение увеличивает стоимость подстанции и практически не применяется.

Дистанционная защита линий сверхвысокого напряжения производства ООО НПП “ЭКРА” имеет блокировку при насыщении ТТ, установленных в цепях выключателей [10, 11, 13], которая реагирует на направление векторов первых гармоник вторичных токов ТТ. Время надёжного распознавания внешнего КЗ указанной блокировкой – не более одного периода основной гармоники тока. Следует отметить, что на функционирование указанной блокировки насыщение ТТ практически не влияет. Таким образом, при наличии этой блокировки не требуется проверка пригодности ТТ для ДЗ при близких КЗ вне зоны действия (“за спиной” защиты).

Таблица 1

Результаты анализа поведения первых ступеней ДЗ

Вид ДЗ	ТТ в цепи линии (рис. 1, а)						ТТ в цепях выключателей (рис. 1, б)					
	Точка К1		Точка К2		Точка К3		Точка К1		Точка К2		Точка К3	
	$K^{(3)}, K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(3)}, K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(3)}, K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(3)}, K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(3)}, K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(3)}, K^{(2)}$	$K^{(1)}$
ДЗ от междуфазных КЗ	–	–	+	+	3	–	БО	БО	+	+	3	–
ДЗ от КЗ на землю	ОР	–	ОР	+	ОР	3	БО	БО	ОР	+	ОР	3

Примечание. Плюс – срабатывает; тире – не срабатывает; 3 – замедление в срабатывании; ОР – работает орган, распознающий КЗ с землей; БО – работает блокирующий орган по направлению токов; $K^{(1)}, K^{(2)}, K^{(3)}$ – однофазное, двухфазное, трёхфазное КЗ.

Если ТТ установлены в цепи защищаемой линии, то правильную работу первых ступеней защиты обеспечивает ОНМ, входящий в состав ДЗ. Исключением является режим трёхфазного КЗ “за спиной” защиты, если уровень напряжения поляризации ОНМ ДЗ от КЗ на землю недостаточен для его устойчивой работы. В указанном режиме правильное несрабатывание ДЗ от КЗ на землю в защитах ООО НПП “ЭКРА” обеспечивается за счёт использования быстродействующего реле тока нулевой последовательности с торможением от одного из фазных токов и реле напряжения нулевой последовательности. Пара указанных реле фактически составляет орган, распознающий КЗ с землёй.

Таким образом, нет необходимости в проверке пригодности ТТ для ДЗ в режиме КЗ “за спиной”.

Анализ поведения первых ступеней ДЗ в режиме близкого КЗ в зоне действия (точка К2 на рис. 1) показал, что РС и ОНМ функционируют правильно. Это относится к ДЗ, подключённой к ТТ как в цепях выключателей, так и в цепи защищаемой линии. По этой причине нет необходимости в проверке пригодности ТТ для ДЗ в этом режиме.

В режиме удалённого КЗ в зоне действия первой ступени ДЗ (точка К3 на рис. 1) насыщение магнитопроводов ТТ, установленных как в цепи защищаемой линии, так и в цепях выключателей, приводит к задержке в её срабатывании. Данное положение объясняется тем, что при насыщении ТТ его вторичный ток уменьшается и, следовательно, замеры сопротивления оказываются вне характеристики срабатывания РС. В режиме двухфазного КЗ возможна более существенная задержка в срабатывании защиты, чем в режиме трёхфазного КЗ. При этом ОНМ функционирует правильно.

Аналогично предыдущему режиму, при удалённом КЗ вне зоны действия первой ступени ДЗ (точка К4 на рис. 1) насыщение магнитопроводов ТТ независимо от варианта их установки приводит лишь к дополнительному удалению замеров сопротивления от зоны срабатывания РС (укорочение зоны действия первой ступени ДЗ). При данных условиях неселективное срабатывание первой ступени ДЗ при КЗ на шинах подстанции противоположного конца линии только за счёт насыщения ТТ исключено. Таким образом, в этом режиме также не требуется проверка ТТ.

В результате при проверке и выборе ТТ для ДЗ должен быть рассмотрен только один режим: КЗ на расстоянии, равном 80% зоны действия первой ступени защиты.

Возможны два варианта поведения ДЗ в указанном режиме:

выполняется условие (1) срабатывания защиты до насыщения ТТ;

условие (1) не выполняется.

При удалённых КЗ в зоне действия и подключении защиты к ТТ, установленных как в цепи защищаемой линии, так и в цепях выключателей, условие (1) в переходном режиме часто не выполняется, особенно при наличии в магнитопроводе ТТ значительной остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака. В этом случае ДЗ имеет задержку в срабатывании. Предельно допустимые значения времени отключения КЗ $t_{\text{пред. доп. откл}}$ для ответственных объектов ограничены условием динамической устойчивости ЭЭС [14] и приведены в табл. 2.

С учётом изложенного допустимая задержка в срабатывании проверяемой защиты $\Delta t_{\text{з. пров}}$ при удалённом КЗ в защищаемой зоне определяется по выражению:

$$\Delta t_{\text{з. пров}} \leq t_{\text{пред. доп. откл}} - t_{\text{ср. пров}} - t_{\text{откл. выкл}}, \quad (10)$$

где $t_{\text{откл. выкл}}$ – полное время отключения выключателя с приводом; $t_{\text{ср. пров}}$ – время срабатывания проверяемой защиты.

Исследования показали, что в переходных режимах, связанных с насыщением ТТ, поведение ОНМ для обоих вариантов подключения ТТ к ДЗ практически не оказывает влияния на замедление в срабатывании защиты. Решающее значение имеет поведение РС. По этой причине при проверке и выборе ТТ по условиям переходных режимов необходимо выполнить расчёт времени замедления в срабатывании РС. Данный расчёт удобно выполнить с использованием характеристик для ДЗ от междуфазных КЗ, приведённых на рис. 2, а для ДЗ от КЗ на землю – в [12].

С целью проверки этих выводов разработана программа-методика испытаний быстродействующих ступеней ДЗ линий напряжением 110 – 220 и 330 – 750 кВ в переходных режимах при наличии в токах КЗ апериодической составляющей. В соответствии с указанной методикой с использованием программно-аппаратного комплекса RTDS проведены испытания следующих УРЗ производства ООО НПП “ЭКРА”:

комплект резервных защит ВЛ напряжением 110 – 220 кВ, реализованный в шкафу ШЭ2607 021;

Т а б л и ц а 2

Расчётные продолжительности КЗ

Номинальное напряжение, кВ	Время отключения КЗ, с
110	0,18
220	0,16
330	0,14
500	0,12
750	0,10
1150	0,08

комплект резервных защит ВЛ напряжением 330 – 750 кВ, реализованный в шкафу ШЭ2710 521.

Результаты испытаний полностью подтверждают выводы, сделанные ранее на основе математического анализа поведения первых ступеней ДЗ линий в рассмотренных режимах КЗ.

Проверка соответствия характеристик ТТ класса Р условиям функционирования первых ступеней ДЗ от междуфазных и однофазных КЗ линий высокого и сверхвысокого напряжения при наличии в токах апериодической составляющей производится только для режима КЗ на расстоянии, равном 80% зоны действия первой ступени защиты в следующей последовательности:

1) вначале проверяется возможность срабатывания ДЗ до насыщения ТТ по выражению (1). Время до насыщения ТТ определяется в соответствии с национальным стандартом России по определению времени до насыщения ТТ [5] или по [15];

2) если условие (1) выполняется, то ТТ пригоден для использования в схеме ДЗ. На этом проверка успешно заканчивается;

3) если условие (1) не выполняется, то переходят к проверке допустимости замедления в срабатывании ДЗ при насыщении ТТ;

4) по значению времени до насыщения ТТ $t_{\text{нас}}$ определяют номер n_1 периода, следующего за периодом, на котором было насыщение;

5) для всех периодов переходного процесса, начиная с n_1 , в течение которых защита должна срабатывать при КЗ в зоне действия по условию устойчивости ЭЭС (табл. 2), определяют относительные действующие значения $I_{2,1*k}$ и угловые погрешности $\delta_{1,k}$ первой гармоники:

вторичного разностного тока петли А – В для ДЗ от междуфазных КЗ в режиме трёхфазного КЗ по рис. 2;

вторичного тока одиночного ТТ для ДЗ от междуфазных КЗ в режиме двухфазного КЗ и для ДЗ от КЗ на землю в режиме однофазного повреждения по рис. 3, приведённому в [12], где индекс k соответствует номеру периода;

6) вычисляют значения вектора сопротивления на всех периодах переходного процесса, следующих за n_1 :

по выражению (6) для ДЗ от междуфазных КЗ;
по выражению (8) для ДЗ от КЗ на землю;

7) используя параметры срабатывания первой ступени ДЗ, строят на комплексной плоскости характеристику срабатывания защиты;

8) определяют номер периода n_2 , на котором вектор сопротивления входит в зону срабатывания;

9) по разности номеров периодов n_1 и n_2 вычисляют задержку в срабатывании первой ступени ДЗ

$$\Delta t_{\text{з.пров}} = 0,02[(n_2 - n_1) + 1]; \quad (11)$$

10) проверяют условие допустимой задержки в срабатывании защиты при КЗ в защищаемой зоне по выражению (10). При положительном результате сравнения проверка считается успешно завершённой;

11) если условие (10) не выполняется или не удастся определить n_2 , так как вектор сопротивления не входит в зону срабатывания, то следует максимально снизить нагрузку на ТТ (например, путём увеличения сечения жил контрольных кабелей) и повторно выполнить расчёт времени до насыщения. Следует учитывать, что нагрузка на ТТ влияет только на продолжительность времени до первого момента насыщения. После первого момента насыщения в переходном процессе погрешности ТТ не зависят от его нагрузки. Поэтому значения сопротивления, вычисленные по выражениям (6) и (8), также не зависят от нагрузки на ТТ;

12) если вычисленное повторно время до насыщения превысит паспортное значение времени срабатывания защиты (25 мс), то ТТ пригоден для использования в схеме ДЗ ответственных объектов ЭЭС. Проверка закончена с положительным результатом. Иначе – ТТ не пригоден для использования в схеме ДЗ указанных объектов и проверка закончена с отрицательным результатом.

Однако необходимо учитывать следующее обстоятельство. При КЗ на линии насыщение ТТ приводит к укорочению зоны действия первой ступени ДЗ, в которой последняя срабатывает с допустимым замедлением. В особо ответственных случаях, когда по условиям устойчивости (в соответствии с табл. 2) недопустимо значительное увеличение времени действия первой ступени резервной защиты, рекомендуется использовать телеускорение второй ступени ДЗ при срабатывании РС первой ступени противоположного конца линии, для которого место КЗ ближе к началу зоны действия. При этом следует учитывать время передачи сигналов ускорения.

В таком случае необходимо проверять замедление РС при насыщении ТТ в режиме КЗ на расстоянии 0,5 от длины защищаемой линии.

Выводы

1. Проверка соответствия характеристик трансформаторов тока класса Р условиям функционирования первых ступеней дистанционных защит от междуфазных и однофазных КЗ производства ООО НПП “ЭКРА” может проводиться только в расчётной точке, установленной стандартом МЭК [4], соответствующей 80% защищаемой зоны.

2. Проверка первых ступеней дистанционных защит от междуфазных КЗ при наличии в токах апериодической составляющей дополнительно к режиму трёхфазного КЗ в максимальном режиме

работы ЭЭС должна проводиться по режиму двухфазного КЗ.

3. Предложена методика проверки соответствия характеристик ТТ класса Р условиям функционирования первых ступеней ДЗ производства ООО НПП “ЭКРА” от междуфазных и однофазных КЗ линий высокого и сверхвысокого напряжения в переходных режимах при наличии в токах апериодической составляющей.

4. Обоснованность теоретических положений и методики проверки подтверждена путём моделирования и испытаний терминалов защиты с помощью программно-аппаратного комплекса RTDS.

Список литературы

1. *Технические требования к устройствам РЗА* [Электронный ресурс]: стандарт организации ПАО “ФСК ЕЭС” СТО 56947007-29.120.241-2017. – (<https://www.fsk-ees.ru>).
2. *Правила технологического функционирования электроэнергетических систем* [Электронный ресурс]: утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 13 августа 2018 г. № 937. – (<https://sudact.ru>).
3. *Об утверждении требований к оснащению линий электропередачи и оборудования объектов электроэнергетики классом напряжения 110 кВ и выше устройствами и комплексами релейной защиты и автоматики, а также к принципам функционирования устройств и комплексов релейной защиты и автоматики* [Электронный ресурс]: приказ министра энергетики Российской Федерации А. В. Новака от 13.02.2019 г. № 101. – (<http://publication.pravo.gov.ru>).
4. *Измерительные реле и оборудование релейной защиты. Часть 121: Функциональные требования к дистанционной защите* [Электронный ресурс]: стандарт МЭК 60255-121:2014. – (<https://ieeexplore.ieee.org>).
5. *Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях* [Электронный ресурс]: ГОСТ Р 58669-2019. – Введ. 2020-01-01. – (<http://docs.cntd.ru>).
6. *Циглер, Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения* / Г. Циглер, перевод с англ.; под ред. А. Ф. Дьякова. – М.: Знак, 2008. – 216 с.
7. *ABB Automation Products AB* [Электронный ресурс]: руководство по применению REL 521*2.3. Терминал дистанционной защиты линии. – (<https://new.abb.com>).
8. *Multilin Power Management Lentrionics* [Электронный ресурс]: требования к трансформаторам тока для реле L90 (R2). – (<https://www.gegridsolutions.com>).
9. *Воробьев, В. С. Исследование функционирования применяемых в Российской Федерации устройств РЗ в переходных режимах, связанных с насыщением трансформаторов тока* [Текст] / В. С. Воробьев, В. В. Москаленко, А. И. Расщепляев, Г. С. Нудельман, А. А. Наволочный, О. А. Онисова, С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярев // РУМ. – 2018. – № 5 (58). – С. 44 – 56.
10. *Шкаф дистанционной и токовой защиты линии ШЭ2607 021 (версия 021 400) (для первичной схемы подстанции с одним выключателем). Руководство по эксплуатации* [Электронный ресурс]: ЭКРА.656453.902 РЭ. – (<https://ekra.ru>).
11. *Шкаф защиты линии и ОАПВ типа ШЭ2710 521 (версии 521 305, 521 365). Руководство по эксплуатации* [Электронный ресурс]: ЭКРА.656453.044 РЭ. – (<https://ekra.ru>).
12. *Кужеков, С. Л. Обеспечение правильного функционирования дистанционной защиты линии электропередачи в условиях насыщения трансформаторов тока* [Текст] / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярев, В. С. Воробьев, В. В. Москаленко // Электрические станции. – 2017. – № 6. – С. 46 – 53.
13. *Дони, Н. А. Возможность неселективного действия быстродействующих дистанционных защит при внешних повреждениях с большими токами КЗ* [Текст] / Н. А. Дони // Релейщик. – 2015. – № 04 (24). – С. 30 – 33.
14. *Методические указания по устойчивости энергосистем* [Электронный ресурс]: утверждены приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 277. – (<https://www.so-ups.ru>).
15. *Кужеков, С. Л. Определение времени до насыщения трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий* [Текст] / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярев, В. С. Воробьев, В. В. Москаленко // Электрические станции. – 2017. – № 1. – С. 42 – 47.