



PS2 – Poster-03



Влияние погрешности ТТ на устройства защиты – исследования и анализ

Р. ХАНТ¹, Х. КАРДЕНАС²
GE Digital Energy Multilin
США¹, Испания²
jorge.cardenas@ge.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Трансформаторы тока, насыщение ТТ апериодической составляющей тока.

1 ВВЕДЕНИЕ

Трансформаторы тока (ТТ) – это основной элемент связи между энергосистемой и практически всеми измерительными устройствами такими, как устройства защиты. ТТ снижает первичный ток до номинального вторичного уровня для использования устройствами защиты, счетчиками и другими устройствами мониторинга. Одной из практических проблем релейного персонала является текущая способность ТТ воспроизводить первичный ток.

ТТ работают достаточно хорошо в большинстве рабочих ситуаций, точно воспроизводя первичный ток во вторичный с небольшими искажениями или ошибками. С37.110, Руководство IEEE по применению ТТ, используемых для релейной защиты [1] допускает, что ТТ ANSI класс-С, подключенный к стандартной нагрузке, должен иметь погрешность не более 10% при 20-ти кратном напряжении. На практике современные ТТ класса-С имеют погрешность 1-2% и поддерживают такой уровень погрешности в течение всего срока службы. Однако бывают ситуации, в которых ТТ ожидаемо не будут работать хорошо, и могут негативно влиять на работу системы защиты. Инженер по релейной защите должен принимать во внимание такие случаи, при проектировании систем защиты, а поставщики устройств защиты должны учитывать такие случаи при проектировании устройств. Данная статья описывает, как погрешности ТТ влияют на работу релейной защиты, предлагая вниманию три примера работы защиты. Однако, коренная причина неправильной работы защиты при насыщении ТТ различна в каждом случае и, поэтому проект системы защиты, предотвращающий нежелательную работу устройств защиты, различный для каждого примера.

2 ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ТТ

Чтобы понять принцип работы ТТ в условиях повреждения, необходимо рассмотреть основные принципы работы трансформатора. Трансформатор состоит из двух обмоток, связанных магнитным потоком в насыщаемом стальном сердечнике. Прикладываемое к одной из обмоток изменяемое во времени напряжение, возбуждает магнитный поток в сердечнике и наводит напряжение во второй обмотке. Трансформатор использует ток возбуждения для поддержания магнитного потока в сердечнике. Так как переменное напряжение меняется во времени, магнитный поток, ток возбуждения и ток и напряжение, наводимые во вторичной обмотке, также меняются во времени. [2]

Трансформатор тока – это просто трансформатор, предназначенный для выполнения специальной задачи по преобразованию первичного тока во вторичные (низкого уровня) токи с целью использования этих токов в измерениях. Эквивалентная модель, приведенная на рис.1, используется для анализа и идентична для любого другого трансформатора.

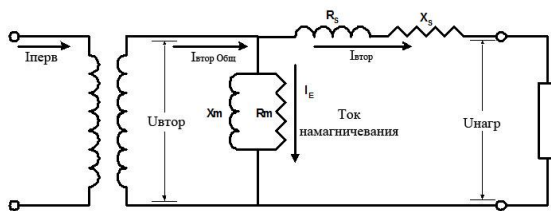


Рис. 1: Эквивалентная цепь ТТ

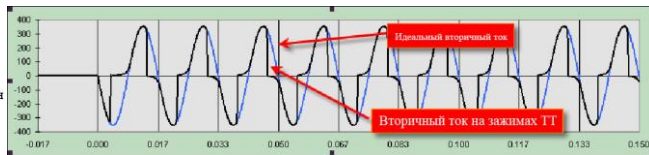


Рис. 2: Измеренный вторичный ток ТТ при насыщении

Проблемой инженеров по релейной защите является фактический ток на зажимах вторичной обмотки ТТ. Этот ток ***Ивтор*** – это разность суммарного вторичного тока, преобразованного ТТ ***Ивтор общ*** и тока, необходимого для питания ветви намагничивания I_F .

2.1 Насыщение ТТ

КЗ, возникающее в первичных цепях, оказывает существенное влияние на работу ТТ. Увеличение первичного тока приводит к увеличению вторичного тока. Увеличение вторичного тока приводит к большему падению напряжения на сопротивлении обмотки ТТ и подключенной к ТТ нагрузке и в результате к увеличенному напряжению возбуждения. Это увеличенное напряжение возбуждения создает больший магнитный поток. Характеристика потока все еще синусоидальная, но может быть достаточной для того, чтобы вызвать насыщение сердечника трансформатора. Результирующий ток возбуждения, необходимый для питания магнитного потока, имеет очень большую амплитуду и может достигать амплитуды первичного тока КЗ. Учитывая то, что $I_{\text{втор}} = I_{\text{втор общ}} - I_{\text{е}}$, ток во вторичной обмотке значительно уменьшается из-за большого тока возбуждения. Сердечник входит и выходит из насыщения в соответствии с изменением напряжения в течение периода промышленной частоты. В результате, вторичный ток ТТ соответствует номинальному, когда сердечник ненасыщен, и уменьшен, когда сердечник в насыщении, как изображено на Рисунке 2.

Как было описано, напряжение возбуждения наводит магнитный поток в сердечнике ТТ, магнитный поток подпитывается током возбуждения. Производители ТТ предоставляют вторичную характеристику возбуждения, чтобы соотнести напряжение возбуждения с током возбуждения для заданной модели ТТ. Данная характеристика используется для оценки работы ТТ для устройств защиты. Данная характеристика, например, может быть использована для определения напряжения возбуждения, при котором ТТ будет в насыщении.

Напряжение насыщения U_x – это симметричное напряжение на вторичной обмотке трансформатора, для которого пиковая индукция превышает магнитную индукцию насыщения. Оно находится графически путем обнаружения пересечения прямой части кривой возбуждения на логарифмических осях. [1] Когда напряжение возбуждения трансформатора превышает этот уровень, сердечник трансформатора насыщается. Напряжение насыщения важно для определения поведения ТТ во время КЗ.

2.2 Аперриодическая составляющая

В сильно индуктивных сетях энергосистемы, кривая тока должна быть около максимального значения, когда кривая напряжения около нуля. Поэтому, при возникновении КЗ с мгновенным значением напряжения около нуля, ток в момент замыкания должен быть максимальным. Чтобы подпитывать этот максимальный ток, создается ток противоположного направления, апериодическая составляющая тока. После обеспечения этого требования начального тока, апериодическая составляющая тока больше не требуется и затухает, в соответствии с коэффициентом X/R энергосистемы. На практике это приводит к тому, что при коротком замыкании, первичный ток и, следовательно, вторичный ток, может быть ассиметричным по отношению к оси тока. Этот ассиметричный ток отражается в пиковом токе,

который будет виден для конкретного повреждения и известен, как апериодическая составляющая тока замыкания. [5]

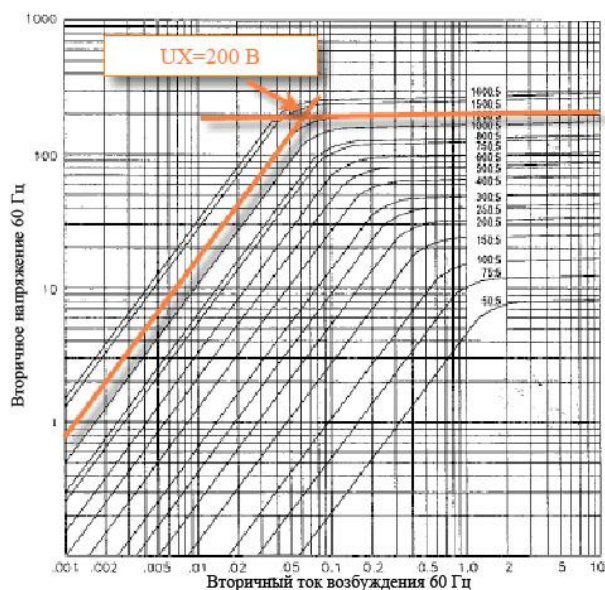


Рис. 3: Напряжение насыщения ТТ, определяемое из вторичной характеристики возбуждения

Апериодическая составляющая является проблемой для трансформаторов, так как, как правило, создает большой магнитный поток в сердечнике, который прибавляется к магнитному потоку от переменного напряжения. Таким образом, суммарный магнитный поток в ТТ зависит от площади участка под кривой. Поэтому чем больше константа времени системы, тем больше вероятность того, что трансформатор насытится.

2.3 Остаточный магнитный поток

Магнитный поток в сердечнике ТТ – это функция напряжения возбуждения и магнитных свойств сердечника. Когда возбуждение снимается с ТТ, некоторые из магнитных доменов сердечника сохраняют степень ориентации относительно магнитного поля, которое было приложено к сердечнику. Это явление известно под названием остаточный магнитный поток. Когда возбуждение снимается во время повреждения с большой амплитудой, этот остаточный поток может быть довольно большим. Остаточный магнитный поток сдвигает нормальный рабочий магнитный поток ТТ, и потребуется больше или меньше тока возбуждения. При последовательно возникающих повреждениях, этот остаточный поток может привести к еще более глубокому насыщению сердечника или удерживать сердечник от более глубокого насыщения.

2.4 Некоторые основные отношения ТТ

Из эквивалентной цепи ТТ (Рис. 1), а также коэффициента насыщения и времени насыщения просто получить некоторые основные формулы взаимосвязи ТТ с коэффициентом X/R , подключенной нагрузкой и током повреждения. Напряжение $U_{\text{втор}}$ (вторичное напряжение возбуждения) определяется из падения напряжения во вторичной цепи ТТ:

$$U_{\text{втор}} = I_{\text{втор}} \times (R_{\text{втор}} + Z_n)$$

где: $R_{\text{втор}}$ = сопротивление вторичной обмотки ТТ

Z_n = полная нагрузка (включая провода) подключенная к вторичной обмотке ТТ.

Для ТТ класса-С по ANSI, сопротивление утечки Z_s незначительно и может не приниматься в расчет.

Магнитный поток в сердечнике может приблизиться к $1+X/R$ во время полностью апериодического замыкания 0. Поэтому второе отношение (подразумевая резистивную нагрузку) такое, что ТТ не будет насыщаться, если

$$U_X > I_{\text{втор}} \times Z_{\text{втор}} \times \left(1 + \frac{X}{R}\right)$$

где U_X – это напряжение насыщения ТТ.

Основываясь на этом последнем уравнении, легко увидеть, что увеличенные токи замыкания, увеличение подключенной нагрузки и увеличение коэффициента X/R требует большего напряжения насыщения, чтобы предотвратить насыщение ТТ. На практике, иногда возможно полностью предотвратить насыщение ТТ при всех видах повреждения. Лучшими методами уменьшению вероятности насыщения ТТ является использование ТТ с лучшим классом точности (увеличение напряжения насыщения), с большим коэффициентом трансформации (уменьшение вторичного тока) и ограничение подключенной нагрузки.

При выборе ТТ для заданного применения, имеется два общих метода выбора подходящего класса точности и коэффициента трансформации в связи с возможным насыщением. Один метод – просто оценить максимальный ток симметричного КЗ:

$$U_X > 2 \times I_{\text{втор}} \times Z_{\text{втор}}$$

или, если напряжение насыщения ТТ превышает, двойное падение напряжения при максимальном токе симметричного КЗ, ТТ определен правильно. Другой метод использует максимальный ток несимметричного замыкания:

$$U_X > \sqrt{1 + 2e^{-2\pi t / \frac{X}{R}}} \times I_{\text{втор}} \times Z_{\text{втор}}$$

Если напряжение насыщения больше, чем падение напряжения при максимальном токе несимметричного КЗ, ТТ выбран верно. Однако, это только общие рекомендации. ТТ, выбранный только по одному из этих методов, будет насыщаться при некоторых повреждениях, в зависимости от амплитуды тока КЗ, величины апериодической составляющей и остаточного магнитного потока в ТТ. Инженер по релейной защите не может считать, что устройства защиты, выбранные таким способом, будут работать верно при всех видах КЗ. В данной статье изучаются текущие события, где ТТ, выбранные этим методом, имеют значительную погрешность измерений.

3 РАЗНОЕ НАСЫЩЕНИЕ ТТ

ТТ с одинаковым классом точности, коэффициентом трансформации и подключенной нагрузкой не будут работать полностью одинаково во время КЗ из-за различий в материалах и производстве. Очевидно, что параллельное включение двух ТТ, которые могут насыщаться по-разному при одном и том же повреждении, несет в определенный риск неверной работы устройств защиты. Традиционные методы защиты для схем с двумя выключателями, используют параллельное подключение ТТ для защиты линии. Сумма двух токов равна току, протекающему по линии. Во время сквозного замыкания на шинах, с идеальными ТТ, сумма двух токов все еще равна току, протекающему по линии. Однако если ТТ насытятся при этом КЗ, и насытятся по-разному, устройство защиты будет измерять ток отличный от тока линии.

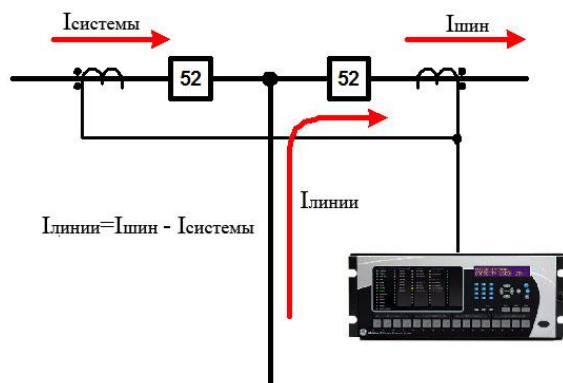


Рис. 4: Токи сквозного замыкания на шинах повторное включение

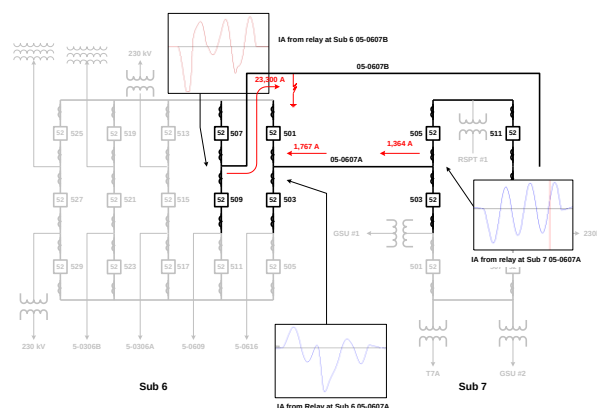


Рис. 5: Дифференциальная защита линии:

В данном примере используется дифференциальная защита линии, применяемая в полуторной схеме. Замыкание на шинах с большой амплитудой тока, являющееся внешним для устройства дифференциальной защиты, привело к неодинаковой работе ТТ и нежелательной работе устройства защиты.

3.1 Короткое замыкание

Линии 05-0607А и 05-0607В – это параллельные линии 138 кВ между Подстанциями 6 и 7. Оба конца линии используют схемы с несколькими выключателями и защищены дифференциальной защитой. Выходы ТТ от каждого выключателя параллельно подключены на один вход дифференциальной защиты линии. Устойчивое КЗ и повторное включение помогут проиллюстрировать проблему с неодинаковым насыщением ТТ.

3.2 Начальное повреждение

Первоначальным повреждением было замыкание фазы А на землю на линии 05-0607В. Примерно 27 000 А потекло к месту замыкания со стороны Подстанции 6, и примерно 1 260 А со стороны Подстанции 7. Дифференциальная защита линии 05-0607В на ПС 6 и 7 отработала правильно на отключение КЗ. Осциллограммы, снятые устройствами защиты, показали практически полное отсутствие апериодической составляющей при первоначальном повреждении. В результате, ТТ не насытились. Защита на линии 05-0607А не работала и не записывала осциллограмм.

3.3 Повторное включение

Дифференциальная защита линии на ПС 6 повторно включила выключатели 507 и 509 с выдержкой примерно 0.5 с. Это включило линию 05-0607В на устойчивое замыкание фазы А на землю. В этот момент устройства защиты обеих линий сработали на отключение замыкания.

Согласно данным устройств защиты обеих линий со стороны ПС 6 по линии 05-0607В к месту замыкания течет ток 23 300 А. Со стороны ПС 7 по линии 05-0607А – 1 364 А, а со стороны ПС 6 по линии 05-0607А – 1 767 А.

3.4 Работа защиты линии 05-0607А на ПС 6

Осциллограмма с устройства защиты линии 05-0607А на ПС 6 показала условия, которые вызвали срабатывание защиты. Произошло сквозное внешнее замыкание на линии 05-0607А. На то, что это сквозное КЗ указывает то, что местный и удаленный токи линии увеличатся, будут примерно одинаковой амплитуды и будут в противофазе друг с другом. Осциллограммы, снятые устройствами защиты показали другое явление. В начале повреждения амплитуда местного и удаленного токов увеличилась, как и ожидалось, и токи были в противофазе. Через период амплитуда местного тока уменьшилась, но более важно то, что фаза тока поменялась практически на 180°. В течение этого периода замыкания, разница фаз между местным и удаленным токами была только около 90°. В результате уменьшения угла между токами дифференциальный ток увеличился до уровня достаточного для срабатывания защиты.

3.5 Работа ТТ во время замыкания

Глядя на форму кривой тока, становится очевидно, что ТТ на ПС 6 работали не так, как ожидалось, и были в насыщении. Устройство защиты на линии 05-0607А измерило ток замыкания равный 1 767 А, что является суммой токов протекающих через ТТ на выключателях 501 и 503. Используя инструмент анализа насыщения [3] с типовой характеристикой возбуждения вторичной обмотки ТТ, при коэффициенте X/R системы равным 30 и максимальной магнитной индукцией в ТТ ток 1 767 А не вызовет насыщение ТТ. Это указывает, что повреждение было на шинах относительно линии 05-0607А с током замыкания, протекающим через выключатели 501 и 503, которые установлены на ПС 6 в конце линии, как это показано на Рисунке 6.

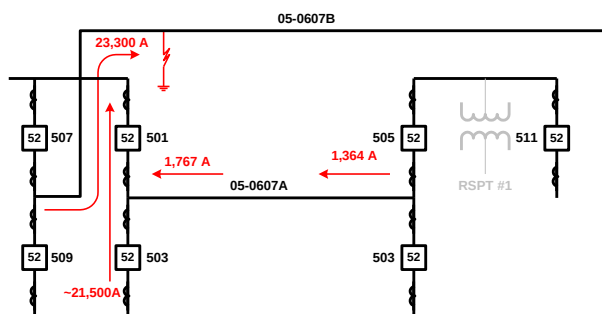


Рис. 6: Вероятные токи замыкания

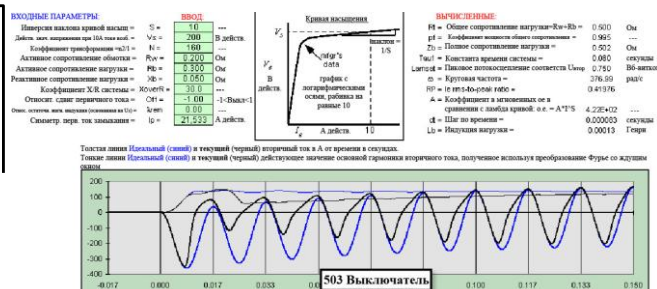


Рис. 7: Смоделированная работа ТТ на выключателе 503

Чтобы проверить это предположение по причинам работы ТТ, необходимо смоделировать ТТ и его работу. Анализ подразумевает ситуацию, схожую с вышеприведенным рисунком, где основная часть тока замыкания протекает через выключатель 503, и этот ток плюс ток с линии 05-0607А, протекает через выключатели 501 и 507. При анализе используется инструмент анализа насыщения ТТ IEEE PSRC, типовая характеристика возбуждения вторичной обмотки ТТ, коэффициент X/R системы принимается равным 30 и полностью апериодического замыкания без остаточного магнитного потока. Используя предполагаемые уровни тока, основанные на вышеприведенных рисунках, все ТТ насыщаются из-за амплитуды тока и апериодической составляющей, как показано на рис. 7 и 8.

Так как считается, что ТТ работают одинаково, единственной разницей в анализе будет амплитуда тока замыкания.

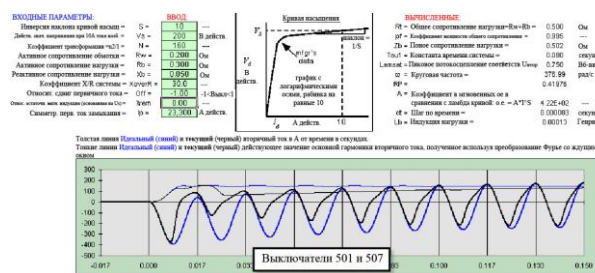


Рис. 8: Смоделированная работа ТТ выключателей 501 и 507

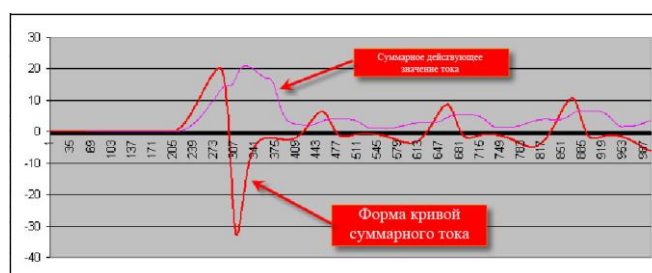


Рис. 9: Ток устройства защиты, основанный на модели работы ТТ

Ток, который измеряет дифференциальная защита линии, суммируется из отдельных токов от выключателей 501 и 503 и может выглядеть, как ток, показанный на рис. 9.

Эта форма кривой сходна с той, которая записана устройством защиты ПС 6, с существенным различием текущей работы ТТ от идентичных типовых ТТ этой модели.

3.6 Работа дифференциальной защиты при насыщении ТТ

Дифференциальная защита линии, используемая в этом приложении, спроектирована так, чтобы сохранять надежность работы даже при внешних КЗ с сильным насыщением ТТ. Устройство делает это, используя адаптивную дифференциальную характеристику торможения.

Ток торможения в устройстве, может быть вычислен несколькими способами, наиболее распространенный способ – это суммирование измеренных амплитуд тока или максимум из

измеренных амплитуд тока. Устройство срабатывает на отключение, когда
$$\frac{I_{\text{дифф}}}{\text{Наклон} \times I_{\text{торм}}} > 1.$$

Ток торможения в данном устройстве определяется, основываясь на максимальном токе, измеренном устройством, уставке дифференциального элемента характеристики, погрешности измерения в сигнале тока и вероятности насыщения ТТ. Дифференциальный элемент срабатывает всякий раз, когда дифференциальный ток превышает ток торможения, адаптивный ток торможения пытается увеличить максимальное торможение, когда увеличивается неточность измерения, как при замыканиях с большой амплитудой. Однако торможение

основывается на измеренном входном токе устройства, который является суммой двух параллельных цепей. Во время работы дифференциальный ток в этом устройстве был равен 2 194 А. Устройство не было настроено на запись тока торможения, но ток торможения может быть от 1 536 А (0.70 наклона $\times$ 2 194 А) до примерно 2 000 А со значительной погрешностью измерения. Поэтому устройство сработало, когда дифференциальный ток был больше, чем ток торможения.

3.7 Возможные варианты предотвращения будущей работы

Очевидно, что дифференциальная защита не должна работать при внешних замыканиях, даже когда ТТ находятся в насыщении. Проблема в том, что ток замыкания, видимый ТТ, значительно больше, чем ток замыкания, видимый алгоритмом устройства. Имеется три варианта, стоящих исследования, чтобы улучшить работу устройства: модернизация ТТ, изменение уставок устройства и пересмотр применения устройства.

Модернизация ТТ до ТТ с большим классом точности и большим коэффициентом трансформации необходима для улучшения работы ТТ во время замыканий с большой амплитудой тока. В данном примере, ТТ уже имеют класс точности С800 с коэффициентом трансформации 800:5. Использование большего коэффициента трансформации уменьшит вероятность насыщения ТТ, но ТТ все еще будут насыщаться при токе замыкания 23 300 А с ТТ 1200:5. ТТ 2000:5 может не обеспечить желаемой чувствительности для обнаружения замыкания.

Изменение уставок устройства защиты для уменьшения чувствительности может предотвратить излишнюю работу, но может привести к несрабатыванию при внутреннем КЗ с большим сопротивлением замыкания. Однако устройство защиты в данном примере был уже настроен на максимальный наклон, поэтому изменения невозможны.

Пересмотр применения устройства может быть лучшим выбором в данном конкретном случае. Дифференциальная защита линии была выбрана для этого случая, так как защищаемые линии – это короткие кабельные линии. При выборе не рассматривался случай неодинакового насыщения ТТ. Очевидно, что дифференциальная защита с параллельно подключенными ТТ – это неправильный выбор. Необходимо рассмотреть два варианта: устройство направленной токовой защиты с телеуправлением и дифференциальная защита линии с несколькими входами.

Направленная токовая защита может быть ненадежна в данном случае. Неодинаковая работа ТТ параллельно подключенных ТТ может повлиять на измерение направленности.

Микропроцессорная дифференциальная защита способна измерять отдельно ток каждого выключателя. Дифференциальный ток все равно будет равен сумме измеренных токов. Однако ток торможения значительно увеличивается. В данном примере, дифференциальный ток остается равным 2 194 А. При параллельных ТТ торможение основывается на этом значении. Так как устройство измеряет два тока отдельно, торможение основывается на токе 23 000 А, поэтому такое устройство не будет срабатывать. Фактически этот метод позволяет задавать более чувствительные уставки и сохранить надежность работы, как представлено на дифференциальной характеристике на рис. 10.

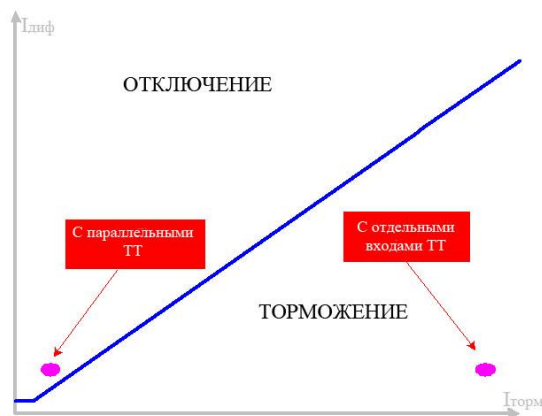


Рис. 10: Сравнение дифференциальных элементов

4. НАСЫЩЕНИЕ ТТ МАЛЫМ ТОКОМ (ПОСТОЯННЫМ)

Традиционно считается, что причиной насыщения ТТ является замыкания с большим током. Однако, как было описано выше, ТТ может насыщаться малыми токами из-за апериодической составляющей в токе замыкания. Это явление особенно явно около генераторов, так как генераторы обычно имеют очень большую постоянную времени. Коэффициент X/R около генераторов обычно равен 20-25, но иногда бывают до 50. В результате, дифференциальная защита статора генератора будет склонна к срабатыванию при внешних замыканиях или во время подачи питания на расположенный рядом трансформатор, такой как повышающий трансформатор. ТТ могут насыщаться из-за апериодической составляющей и вероятно насытятся в разной степени, приводя к неверному дифференциальному току.

В этом случае генератор защищен с помощью двух микропроцессорных защит генератора. Дифференциальная защита статора для одного из этого устройства (Устройства В) срабатывает при внешнем междуфазном замыкании ВС, длящемся в течение 40 периодов. Дифференциальная защита статора другого устройства не сработала для этого же повреждения. Осциллограмма замыкания, полученная из Устройства В, показывает, что ТТ на выводах и в нейтрали измеряют немного разные амплитуды и фазы токов. Разница в токах была достаточной, чтобы вызвать работу фазного дифференциального элемента. На рис. 10 показан ток фазы В во время замыкания, а также вычисленное действующее значение. Ток, измеренный в нейтрали генератора ТТ, был повернут на 180° , чтобы было проще сравнивать амплитуду и сдвиг фаз. Форма кривой на фазе С демонстрирует такое же явление.

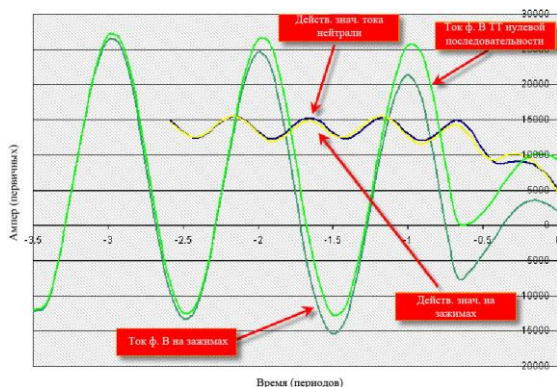


Рис. 11: Форма тока в фазе В

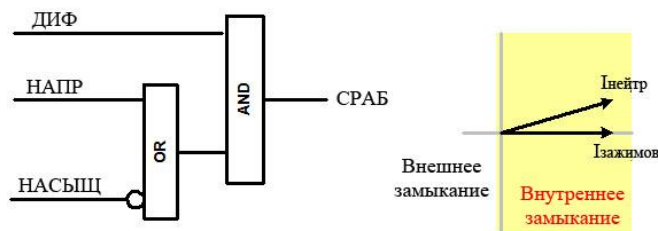


Рис. 12: Улучшенная логика дифференциальной защиты и контроль направления

Токи в фазах В и С показывают разницу в работе ТТ на выводах и в нейтрали. Эта разница видна, как в амплитуде, так и в фазе. Даже этой небольшой разницы может быть достаточно, чтобы вызвать неверную работу фазной дифференциальной защиты.

4.1 Векторный анализ

Изображение этих токов на векторной диаграмме позволяет лучше увидеть различия. В идеале токи ТТ на зажимах и в нейтрали должны быть повернуты на 180° относительно друг друга. Векторный анализ показывает ошибку в 12° на фазе В и 13° на фазе С. Кроме того погрешность по амплитуде на фазе В равна около 500 А, а на фазе С — около 460 А. Минимальный ток пуска дифференциальной защиты равен 400 А, таким образом это вопрос уровня тока торможения, чтобы различать срабатывание и торможение.

4.2 Вычисление работы дифференциального элемента фазы В устройства

Форма сигнала и вектора ясно показывают, что имеет место неодинаковая работа ТТ. Возможно использовать эти данные, чтобы математически проанализировать работу фазного дифференциального элемента Устройства В. Устройство использует типовую дифференциальную характеристику с двойным наклоном.

График на рис. 10 изображает рабочий и тормозной ток по отношению к дифференциальной характеристике. Этот график ясно демонстрирует, что токи фаз В и С

значительно входят в зону срабатывания этой характеристики из-за неодинаковой работы двух наборов ТТ.

Более точный анализ сделан путем математического моделирования уравнения характеристики срабатывания устройства. Это уравнение показывает, что логический выход дифференциального уравнения был выполнен для обеих фаз В и С с момента замыкания на примерно 6 периодов или примерно на время потери инерции генератором после того, как он был отключен.

4.3 Рекомендации

Это сложная проблема для инженеров релейной защиты – принять меры, чтобы предотвратить излишнюю работу. Руководство по применению трансформаторов тока 0 дает некоторые рекомендации по ТТ, включая ТТ предназначенные для 150% от максимальной нагрузки генератора, использование наибольшего из возможных классов точности с полностью распределенной обмоткой и одинаковая подключенная нагрузка. Даже следуя этим рекомендациям, апериодическое насыщение, вероятно, будет возникать при некоторых повреждениях, например, таких, как это внешнее замыкание в течение 40 периодов. Поэтому имеются практические ограничения, которые могут выполнять инженеры релейной защиты.

Микропроцессорные устройства могут быть спроектированы так, чтобы обнаруживать эту неодинаковую работу ТТ, особенно для дифференциальной защиты статора генератора. Было реализовано множество методов. Использование выдержки времени неподходящий метод, так как значительно снижает скорость отключения при внутреннем КЗ. Устройство, используемое в данном примере, включает алгоритм обнаружения насыщения ТТ и предотвращения отключения при внешних КЗ с насыщением ТТ из-за большой амплитуды тока замыкания. Недавно алгоритм был улучшен, чтобы правильно работать при таких событиях, как возникновение насыщения ТТ при малых токах КЗ.

Улучшенный алгоритм состоит из традиционной низкоомной дифференциальной характеристики с двумя наклонами, элемента контроля направления и алгоритма обнаружения насыщения. При обычных событиях дифференциальная характеристика определяет отключение или торможение. При обнаружении насыщения ТТ, элемент контроля направления разрешает или блокирует отключение.

Элемент направления следит только за направлением токов выводов и нейтрали по отношению друг к другу. Вероятное насыщение ТТ может декларироваться при насыщении с малым и большим током.

5 ВЫВОД

Работа ТТ влияет на проект устройств защиты, системы защиты и на уставки устройств защиты. Насыщение ТТ может быть трудно предсказать и это иногда ведет к нежелательной работе устройств защиты. Два примера, приведенных в данной статье, показывают различные события, при которых происходит насыщение ТТ, что вызывает срабатывание устройств защиты. Это распространено, когда говоря о насыщении ТТ, говорят об одном ТТ, и что причиной насыщения ТТ являются большие токи замыкания. Примеры, приведенные в этой статье, описывают другие причины насыщения.

Первый пример описывает насыщение ТТ из-за токов замыкания с большой амплитудой. Однако, два ТТ, подключенные параллельно, могут насыщаться неодинаково при некоторых замыканиях. Второй пример, описывает насыщение ТТ из-за апериодической составляющей тока замыкания. Это приводит к неодинаковому насыщению ТТ, используемых в дифференциальной схеме.

При выборе ТТ главным правилом является использование наибольший из возможных класс точности, наибольший из возможных коэффициент трансформации и подключение как можно меньшей нагрузки. Имеются очевидные практические ограничения по размеру, стоимости и соответствию стандартам. Однако сравнение напряжения насыщения ТТ с напряжением на нагрузке вторичной обмотки ТТ при максимальном токе замыкания не является единственным шагом инженера по релейной защите, чтобы правильно выбрать ТТ и спроектировать схему защиты.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] “IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes”, IEEE Std. C37.110-1996, The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., New York, NY, 1996.
- [2] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, Jr., S. D. Umans, “Electric Machinery, 4th edition”, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, 1983, pp. 4-24.
- [3] “IEEE PSRC CT Saturation Calculator”, IEEE Power Engineering Society Protective Relaying Subcommittee, www.pes-psrc.org.
- [4] B. Kasztenny, D. Finney, “Generator Protection and CT Saturation”, Presented at the Texas A&M Protective Relay Conference, April 5, 2005.
- [5] J. L. Blackburn, “Protective Relaying Principles and Applications”, 2nd edition, Marcel Dekker, Inc., New York, NY, 1998.