

УДК 621.315

ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА РАБОТУ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ

Докт. техн. наук, проф. РОМАНЮК Ф. А.,
кандидаты техн. наук, доценты ТИШЕЧКИН А. А., РУМЯНЦЕВ В. Ю., НОВАШ И. В.,
доц. БОБКО Н. Н., инж. ГЛИНСКИЙ Е. В.

Белорусский национальный технический университет

В переходных и установившихся режимах короткого замыкания (КЗ) трансформаторы тока (ТТ) токовых защит могут насыщаться и работать с повышенными погрешностями, величина которых зависит от многих, в ряде случаев трудноучитываемых, факторов. Наиболее сильное влияние на величину погрешности оказывают: кратность токов повреждения, наличие апериодических составляющих в первичных токах и постоянные времени их затухания, схемы соединений вторичных обмоток ТТ и реле, величина и характер нагрузки ТТ и т. д. Согласно нормативным документам нагрузка на ТТ выбирается таким образом, чтобы полная погрешность не превышала 10 % при токах установившегося режима КЗ, соответствующих характеру срабатывания.

В неустановившихся режимах работы, когда токи повреждения могут значительно превышать параметр срабатывания и в них содержатся апериодические составляющие, погрешности могут значительно возрастать и в наиболее неблагоприятных режимах в течение определенного времени достигать значений, близких к 80–100 % [1].

При анализе влияния насыщения на поведение защит целесообразно рассматривать два случая:

- насыщение обусловлено наличием апериодических составляющих в токе КЗ;
- насыщение при отсутствии апериодических составляющих, например из-за превышения допустимой нагрузки.

Следует отметить, что в трехфазных группах соединений ТТ могут наблюдаться одновременно оба случая насыщения. ТТ разных фаз в общем случае работают с разными погрешностями и оказывают взаимное влияние друг на друга.

Условия работы ТТ на кабельных и воздушных линиях различны. Например, кабельные линии характеризуются относительно малыми индуктивными и большими активными сопротивлениями. Поэтому постоянные времени затухания апериодических составляющих токов таких линий от-

носительно малы. Переходные процессы в этих линиях быстро затухают и становятся стационарными.

При наличии в первичных токах апериодических составляющих в работе ТТ можно выделить ряд стадий. В начальной стадии ТТ ненасыщен, и в трансформированных токах присутствуют апериодические составляющие, а высшие гармоники отсутствуют. Длительность этой стадии может существенно изменяться и зависит от конкретных условий работы ТТ. Насыщение может произойти на втором, третьем периоде и т. д., а в неблагоприятных условиях ТТ насыщаются уже в первый период.

При насыщении ТТ апериодическая составляющая во вторичном токе невелика и может изменять свой знак, появляются четные и нечетные гармоники. Содержание первой гармоники резко уменьшается. Из высших гармоник наиболее выражены вторая и третья гармоники. Влияние высших гармоник на интегральные характеристики несинусоидального вторичного тока может быть значительным. По мере затухания апериодических составляющих ТТ выходит из насыщения, и погрешности в трансформации первичного тока уменьшаются.

В качестве примера на рис. 1 представлен характер изменения действующих значений приведенного первичного тока КЗ с апериодической составляющей I_1 , вторичного несинусоидального тока I_2 , первой I_{21} и второй I_{22} гармоник, содержащихся во вторичном несинусоидальном токе I_2 . На рис. 1 видно, что действующие значения токов в реле и величина погрешностей изменятся в течение всего времени существования переходного процесса.

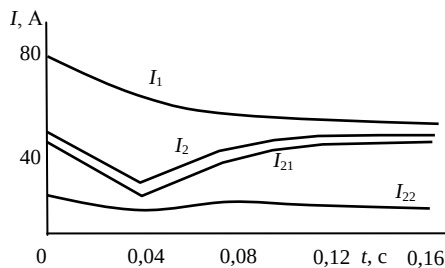


Рис. 1. Действующие значения токов переходного процесса в одном из ТТ трехфазной группы при трехфазном КЗ: I_1 — приведенный первичный ток; I_2 — вторичный ток; I_{21} — первая гармоника вторичного тока; I_{22} — вторая гармоника вторичного тока

Уменьшение вторичной нагрузки на ТТ при таком характере насыщения не является достаточно эффективным мероприятием по снижению погрешностей, так как ТТ в неблагоприятных условиях могут насыщаться даже при закороченной вторичной обмотке.

Для уменьшения влияния насыщения ТТ на работу защит предлагается использовать специальные алгоритмы восстановления сигнала [2, 3], искаженного явлением насыщения. Однако решение этой задачи требует весьма сложных вычислений в течение процесса и значительного увеличения числа отсчетов на период основной частоты. У цифровых реле ряда зарубежных фирм наряду с ТТ традиционного исполнения предусматривается возможность использования первичных измерительных преобразователей тока в виде катушки Роговского. Апериодические составляющие такими преобразователями фактически не трансформируются. Отсутствие ферромагнитного сердечника обеспечивает малую погрешность преобразования и малую отдаваемую мощность. Высокая точность измерения (до 0,1 %) позволяет выбрать степень селективности между двумя смежными защи-

тами минимальной, что делает их перспективными для цепей релейной защиты. Однако производство, а также опыт эксплуатации этих преобразователей в Республике Беларусь отсутствуют, не исследованы вопросы электромагнитной совместимости и т. д.

Если в первичных токах КЗ апериодические составляющие отсутствуют, то во вторичных токах при насыщении ТТ появляются только нечетные гармоники, а величина погрешности остается практически неизменной в течение всего времени КЗ. При таком характере насыщения уменьшение вторичной нагрузки на ТТ является достаточно эффективным мероприятием по снижению погрешностей.

В настоящее время электромеханические устройства релейной защиты энергообъектов поэтапно заменяются макропроцессорными, что позволяет обеспечить более быстрое отключение повреждений за счет снижения степени селективности до значения 0,10–0,15 с, более высокую точность обработки входной информации. Основная погрешность по току срабатывания обычно составляет 2–5 %, коэффициент возврата находится в диапазоне 0,95–0,96. Собственное время срабатывания измерительных органов ориентировочно составляет 30–50 мс. Однако эти преимущества микропроцессорных устройств защиты при существующих алгоритмах функционирования в значительной мере утрачиваются из-за необходимости согласования их характеристик с характеристиками электромеханических устройств и предохранителей, а также из-за насыщения ТТ.

Электромеханические и микропроцессорные устройства защиты имеют различные методы обработки входной информации. Электромеханические реле реагируют на квадрат действующего значения тока в реле, содержащего в общем случае апериодическую составляющую, периодическую составляющую основной частоты и высшие гармоники. В микропроцессорных измерительных органах (ИО) условием срабатывания является превышение интегральным значением тока в реле I_p уставки срабатывания: $I_p > I_{cr}$, а условием возврата $I_p < I_{cr}$. В микропроцессорных реле разных фирм в качестве интегрального значения могут использоваться среднее, действующее или амплитудное значения, которые могут вычисляться на различных интервалах времени и с различным шагом дискретизации. Кроме того, интегральные значения могут определяться различными способами [2, 3]. При неискаженных синусоидальных входных сигналах в установившихся режимах работы все способы дают примерно одинаковые результаты независимо от того, какое значение вычисляется, так как все они связаны известными коэффициентами. Однако при несинусоидальных входных токах результаты измерения могут быть различными. У многих микропроцессорных реле, использующих в качестве цифровых фильтров ортогональное разложение Фурье, из несинусоидального входного сигнала выделяется первая гармоника, так как амплитудно-частотная характеристика таких реле подобна характеристике полосового фильтра.

Для токовых ИО ряда фирм неизвестно, на какое значение они фактически реагируют, что затрудняет сравнительный анализ токовых ИО разных производителей и оценку их поведения в переходных режимах работы. Следует также отметить, что независимо от элементной базы все расчеты по выбору токов срабатывания (уставок) ведутся по действующим значениям установившегося режима, когда входные сигналы синусоидальны,

в то время как рабочим режимом, особенно для быстродействующих защит, является неустановившийся режим КЗ, который сопровождается появлением апериодических составляющих и, как правило, насыщением ТТ. Степень влияния насыщения ТТ на работу ступенчатых токовых защит, имеющих в своем составе токовые отсечки (ТО) и максимальные токовые защиты (МТЗ) и выполненных на разных принципах, различна. Это следует учитывать при согласовании характеристик смежных защит распределительной сети.

Особенно подвержены влиянию насыщения быстродействующие ступени защиты и МТЗ с обратозависимыми от тока характеристиками выдержки времени. В микропроцессорных защитах часто используются характеристики по стандарту МЭК

$$t_{с.з} = \frac{k\beta}{(I_p / I_{ср})^\alpha - 1}, \quad (1)$$

где $I_p/I_{ср}$ – кратность тока КЗ по отношению к току срабатывания защиты; α, β – коэффициенты, определяющие крутизну характеристики.

На рис. 2 показан фрагмент схемы распределительной сети, защиты смежных участков которой требуют согласования характеристик.

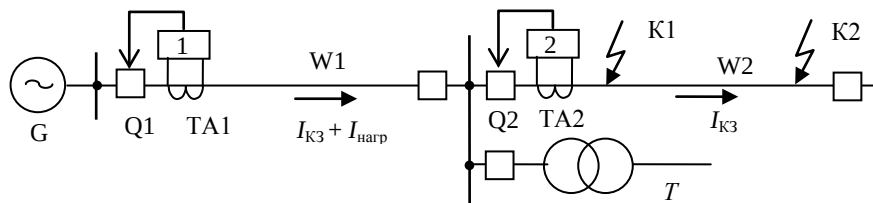


Рис. 2. Фрагмент сети, защиты которой требуют согласования характеристик

В соответствии с существующей методикой расчета, чем ближе расположена защита к источнику питания, тем больше ее ток срабатывания, коэффициенты трансформации ТТ и время срабатывания МТЗ с независимой характеристикой выдержки времени. При использовании МТЗ с обратозависимыми времятоковыми характеристиками выдержка времени защиты 1 должна превышать выдержку времени защиты 2 на ступень селективности Δt при максимальном значении тока трехфазного КЗ в точке K1 в месте установки защиты 2 (рис. 2). Это условие должно выполняться не только при токах $I_{K1\max}^{(3)}$, но и при всех меньших токах КЗ. При одном и том же значении тока КЗ, протекающего по первичным обмоткам трансформаторов тока TA1 и TA2, условия их насыщения различны, в первую очередь по причине различной кратности тока КЗ (по отношению к первичному номинальному току ТТ), так как с увеличением указанной кратности повышается вероятность насыщения ТТ. При насыщении TA2 ток в реле I_p уменьшается по сравнению с расчетным значением, что приводит к увеличению времени срабатывания защиты 2. Для предотвращения неселективных действий необходимо увеличивать ступень селективности Δt , что приводит к более медленной ликвидации повреждений в распределительной сети. При глубоком насыщении TA2 ток в реле может оказаться меньше тока возврата $I_b = k_b I_{ср}$, что также может явиться причиной неселектив-

ного действия МТЗ как с независимой, так и с обратнoзависимой времятоковой характеристикой.

На поведение ТО мгновенного действия, выполненных на электромеханической элементной базе, большое влияние могут оказывать апериодические составляющие в токах КЗ. Степень этого влияния увеличивается с уменьшением времени срабатывания ТО. Под действием апериодических составляющих зона действия ТО увеличивается по сравнению с расчетными значениями, что может явиться причиной неселективных действий защиты. При насыщении ТТ в зависимости от характера их насыщения защищаемые токовой отсечкой зоны могут сокращаться или может увеличиваться время их действия. Электромеханические ТО оказываются также более чувствительными к броскам тока намагничивания при включениях силовых трансформаторов или при восстановлении напряжения после отключения внешних КЗ. У микропроцессорных устройств защиты зона действия ТО более стабильна, так как устраняется влияние апериодических составляющих и высших гармоник. Они оказываются также менее чувствительными к броскам тока намагничивания.

ВЫВОД

Микропроцессорные устройства являются высокоточными и имеют более стабильные характеристики по сравнению с их электромеханическими аналогами. Погрешности измерительных ТТ традиционного исполнения могут значительно превышать погрешности микропроцессорных устройств защиты, что является причиной снижения эффективности их использования. Насыщение ТТ как в установившихся, так и в переходных режимах работы может приводить к более медленной ликвидации повреждений и неселективным действиям защиты. Учет насыщения ТТ, соединенных в определенную трехфазную группу, представляет значительные трудности. Наиболее полный учет насыщения может быть выполнен на основе комплексных математических моделей распределительной сети и устройств защиты методом вычислительного эксперимента. Такую оценку поведения устройств защиты целесообразно выполнять как на этапе разработки новых устройств с более совершенными алгоритмами функционирования, так и в условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. С о п ь я н и к, В. Х. Расчет и анализ переходных и установившихся процессов в трансформаторах тока и токовых цепях устройств релейной защиты / В. Х. Сопьяник. – Минск: БГУ, 2000. – 143 с.
2. Ш м у р ь е в, В. Я. Цифровые реле защиты / В. Я. Шмурьев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 1999. – 56 с.
3. К а л ь г и н, К. К. Моделирование аналоговых и цифровых реле тока с учетом насыщения трансформатора тока / К. К. Калягин, М. Г. Марков, А. М. Чухин // Труды ИГЭУ. – Вып. 5: Повышение эффективности работы энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 2002.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 09.09.2009