

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВА ТОКОВЫХ И ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

*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*

Схемы распределительных сетей характеризуются большим разнообразием в зависимости от назначения, конструктивного выполнения, нагрузок и т. п. Для защиты от коротких замыканий (КЗ) и дальнего резервирования (ДР) в распределительных сетях с односторонним питанием преимущественно используются токовые защиты, а в сетях с двусторонним питанием – токовые направленные защиты.

По принципу действия токовая защита реагирует на увеличение тока сверх ее уставки (тока срабатывания) вне зависимости от причины, вызвавшей увеличение тока. Увеличение тока может произойти не только при КЗ, но и при подключении дополнительной нагрузки, а также при самозапуске электродвигателей, при восстановлении напряжения после отключения внешних КЗ, действии устройств АПВ, АВР. Для наиболее быстрой ликвидации повреждений используются защиты со ступенчатой характеристикой выдержки времени или защиты с обратно зависимыми характеристиками времени срабатывания. Параметры срабатывания (токи срабатывания, выдержки времени) таких защит рассчитываются заранее, исходя из наиболее тяжелых режимов работы оборудования, и остаются неизменными при изменении режимов работы распределительной сети.

При определении тока срабатывания максимальных токовых защит (МТЗ) учитывают увеличение тока в защищаемой линии вследствие самозапуска электродвигателей нагрузки при восстановлении напряжения после отклю-

чения КЗ. Это увеличение тока учитывается с помощью коэффициента самозапуска, численное значение которого при расчетах может достигать значений 2,5–3,0 и более. Точное определение этого коэффициента затруднено, так как его значение зависит от многих факторов: состава нагрузки, пусковых характеристик, степени загрузки электродвигателей, длительности и степени снижения напряжения и т. д. В результате создаются большие расчетные запасы. Однако такие тяжелые расчетные режимы и схемы могут существовать непродолжительное время, и их учет приводит к неоправданному замедлению и загромождению устройств РЗ при реальной схеме и режимах, которые могут быть намного легче и продолжительнее, чем наихудшие расчетные. Такое исполнение защиты приводит к снижению основных показателей их технического совершенства: зависимости длин защищаемых зон от режимов работы питающих систем и вида КЗ, недостаточной чувствительности и защитоспособности отдельных ступеней и т. д. В конечном счете это ограничивает область использования токовых защит и приводит к необходимости установки более сложных защит.

Улучшить основные показатели технического совершенства токовых защит, расширить область их использования, повысить эффективность ДР возможно путем разработки адаптивных токовых защит, автоматически изменяющих свои характеристики в зависимости от вида КЗ, изменения режимов работы распределительной сети и ряда других влияющих фак-

торов. Кроме того, такие защиты должны быть не чувствительными к эксплуатационным изменениям частоты в энергосистеме, отличать симметричные КЗ от несимметричных.

Принцип выполнения адаптивной микропроцессорной токовой защиты (МПТЗ) линий с односторонним питанием реализован в устройстве [2].

При помощи макси- и миниселектора, блока выявления несимметрии токов фаз и порогового элемента можно повысить чувствительность защиты к несимметричным КЗ за счет выделения максимального  $I_{\max}$  и наименьшего  $I_{\min}$  значений из токов фаз защищаемого объекта и определения значения несимметрии  $\Delta I$  токов фаз по выражению

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}. \quad (1)$$

При такой реализации защиты можно контролировать момент наступления режима несимметричного повреждения и соответствующим образом автоматически уменьшать токи срабатывания  $I_{\text{ср}}$  измерительного органа ступенчатой защиты.

Для нахождения величины  $\Delta I$ , обеспечивающей надежность определения несимметричного режима, были использованы математическая модель электрической сети и соответствующая компьютерная программа.

В результате вычислительного эксперимента получены зависимости  $\Delta I(t)$  для различных видов КЗ.

Учитывая отсутствие руководящих указаний, методик по расчету уставок для несимметричных режимов и связанные с этим сложности, алгоритм функционирования МПТЗ в общем случае может содержать две группы уставок. Первая группа учитывается защитой при трехфазных КЗ. В случае, когда проблемы с чувствительностью для конкретной сети отсутствуют и коэффициент чувствительности удовлетворяет предъявляемым требованиям, во вторую группу уставок можно ввести значения, аналогичные значениям в первой группе, т. е. рассчитанные по общепринятой методике. Если же в сети преобладает электродвигательная нагрузка, то можно составить схему замещения, соответствующую особенностям местной

электроустановки, и произвести расчет несимметричных режимов для конкретных местных условий, определив уставки для второй группы, которые будут обрабатываться адаптивной МПТЗ при несимметричных КЗ.

В распределительных сетях с двусторонним питанием применяются токовые направленные защиты, реагирующие не только на увеличение тока в защищаемом элементе. Для обеспечения селективности следует учитывать и направление мощности КЗ. Эти защиты имеют все недостатки токовых защит и дополнительно мертвую зону при близких трехфазных КЗ. Для существенного повышения показателей технического совершенства этих защит предлагается комбинированное использование методов определения мест повреждений (ОМП) и традиционных методов выполнения защиты.

На сегодняшний день устройства токовой направленной защиты от междуфазных коротких замыканий выполняются обычно с независимой характеристикой выдержки времени и содержат измерительные органы тока, включаемые на полные токи фаз защищаемого объекта, и направления мощности, включаемые на полные токи фаз и междуфазные напряжения обычно по так называемой 90-градусной схеме.

Для ускорения отключения КЗ в общем случае применяются три ступени: первая ступень – токовая отсечка без выдержки времени (ТО); вторая ступень – токовая отсечка с относительно небольшой выдержкой времени (ТОВ); третья ступень – максимальная токовая направленная защита (МТЗ) со значительной выдержкой времени.

В таких устройствах междуфазные КЗ в начале линии отключаются ТО без выдержки времени. ТО рекомендуется к применению, если она защищает не менее 18–20 % длины линии. Остальная часть линии защищается ТОВ. Третья ступень является резервной к первым двум. КЗ по всей длине линии отключаются этой ступенью с большими выдержками времени, особенно на головных участках сети. Такие защиты имеют значительное число ИОТ и ограниченную защитоспособность, главным образом первой ступени (ТО).

Защитоспособность определяется длиной линии, защищаемой каждой ступенью. Длина линии, защищаемая ТО, определяется графиче-

ски по кривым спада тока КЗ по длине линии  $I_{КЗ} = f(l)$ , построенным для максимального и минимального режимов работы, и току срабатывания защиты. Предлагаемый способ реализации принципа адаптивности микропроцессорной токовой направленной защиты линии предлагает введение в схему защиты блока определения расстояния до точки короткого замыкания и порогового элемента. Это позволяет повысить защитоспособность при сохранении высокого быстродействия.

Блок определения расстояния до точки короткого замыкания определяет расстояние до точки КЗ по следующей формуле:

$$l_{КЗ} = \frac{u}{r_{уд}i + L_{уд}i'}, \quad (2)$$

где  $u$ ,  $i$ ,  $i'$  – соответственно междуфазное напряжение контура КЗ, разность фазных токов этого контура и первая производная этого тока;  $r_{уд}$ ,  $L_{уд}$  – удельные активное сопротивление и индуктивность защищаемой линии.

В пороговом элементе производится сравнение  $l_{КЗ}$  с длиной линии  $l_{л}$ . Если КЗ находится в пределах защищаемой линии  $l_{КЗ} < l_{л}$ , то его можно отключить без выдержки времени. Если повреждение расположено за пределами защищаемой линии  $l_{КЗ} > l_{л}$ , то его следует отключать с выдержкой времени третьей ступени (МТЗ), выбранной по условию согласования выдержек времени защит сети.

Расстояние до точки КЗ может быть определено достаточно точно за счет исключения влияния изменений сопротивления питающих систем, силовых трансформаторов и таким образом КЗ на значительной части длины линии (приблизительно 70–90 %  $l_{л}$  в зависимости от точности определения  $l_{КЗ}$ ) могут быть отключены без выдержки времени.

Из-за погрешностей в определении  $l_{КЗ}$  для обеспечения селективной работы устройства в пороговом элементе сравнение  $l_{КЗ}$  нужно производить не с фактической длиной линии  $l_{л}$ , а с увеличенной длиной  $kl_{л}$ . Величина этого коэффициента зависит от точности определения  $l_{КЗ}$  и может быть снижена путем учета всех или части влияющих факторов. Такими факторами являются: погрешности измерительных

трансформаторов, погрешности расчета, наличие переходных сопротивлений в месте повреждения, точность задания удельных параметров линии  $r_{уд}$ ,  $L_{уд}$  и т. д.

При необходимости расчет  $l_{КЗ}$  может выполняться не по формуле (2), а по более сложным формулам, позволяющим повысить точность расчета.

Предложенный принцип выполнения токовой направленной защиты линии благодаря введению принципа адаптивности позволяет уменьшить число измерительных органов тока, повысить защитоспособность и увеличить быстродействие.

Цифровые направленные защиты без принятия соответствующих мер могут неправильно работать при отклонении частоты от номинального значения и иметь мертвую зону по напряжению. Это определяется особенностями поведения органа направления мощности (ОНМ). Первый недостаток обычно проявляется в случае отклонения частоты от номинального значения, когда ОНМ находится на пределе срабатывания. Вследствие этого при относительно близких повреждениях могут возникать, хотя бы кратковременно, неправильные срабатывания цифрового ОНМ. Второй недостаток четко проявляется при возникновении близких симметричных коротких замыканий и не позволяет в полной мере использовать преимущества направленных защит.

Отмеченные недостатки в цифровых ОНМ устраняются сравнительно просто. При использовании для выполнения ОНМ ортогональных составляющих (ОС) тока и напряжения для устранения первого недостатка необходимо формировать их таким образом, чтобы угол между ОС был равен  $\pi/2$  независимо от изменений частоты.

Наиболее простым методом устранения мертвой зоны по напряжению является организация работы ОНМ «по памяти». Такая организация при снижении напряжения ниже установленного уровня может быть выполнена путем запоминания:

- отсчетов ОС напряжения с проверкой условия срабатывания ОНМ при изменяющемся токе;

- состояния ОНМ в целом.

В первом случае при отклонении частоты от номинального значения ОНМ периодически изменяет свое состояние. Введение соответствующей коррекции хоть и улучшает работу органа, но не устраняет полностью этого явления.

Второй способ не имеет отмеченного недостатка. При его использовании после восстановления напряжения ОНМ выходит из режима работы «по памяти» и возобновляется проверка его состояния.

При практической реализации адаптивных защит требуется полный учет переходных процессов при изменении режимов работы распределительных сетей. Наиболее полно исследование адаптивных токовых и токовых направленных защит в различных предаварийных, аварийных и послеаварийных режимах работы распределительной сети можно выполнить методом вычислительного эксперимента на ЭВМ. С этой целью были разработаны математические модели и соответствующие компьютерные программы, включающие математические модели как самой защиты, так и защищаемого объекта. Математические модели защищаемого объекта включают математическое описание линии, источников питания, измерительных трансформаторов, а также смежных элементов сети, оказывающих заметное количественное и качественное влияние на характер протекающих переходных процессов.

Для значительного уменьшения трудозатрат, более полного учета влияния конфигурации сети на результаты исследований в ряде случаев целесообразно использовать компьютерные системы динамического моделирования (СМД) Simulink-MatLab. Однако для повышения точности и достоверности получаемых результатов

целесообразна разработка новых библиотечных модулей для СМД Simulink-MatLab на основе уточненных математических моделей.

## ВЫВОД

Предложенный принцип выполнения адаптивной микропроцессорной токовой защиты линий с односторонним питанием позволяет повысить чувствительность защиты к несимметричным коротким замыканиям. Для линий с двусторонним питанием комбинированное использование методов определения мест повреждений и традиционных методов выполнения токовых направленных защит со ступенчатой характеристикой выдержки времени позволяет уменьшить число измерительных органов тока, повысить защитоспособность и увеличить быстродействие.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Романок, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романок // Минск: УП «Технопринт», 2001.
2. Устройство для адаптивной токовой защиты от междуфазных коротких замыканий: пат. 511 Респ. Беларусь / Ф. А. Романок, А. А. Тишечкин, Н. Н. Бобко, Е. В. Глинский. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений 23.12.2002.
3. Устройство токовой направленной защиты от междуфазных коротких замыканий: пат. 11267 Респ. Беларусь / Ф. А. Романок, А. А. Тишечкин, О. А. Гурьянчик. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений 05.08.2008.
4. Применение компьютерных систем динамического моделирования для оценки поведения защит линий электропередачи / Ф. А. Романок [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 5. – С. 5–14.

Поступила 24.04.2009