

УДК 621.316.125

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ЗАЩИТ С ЗАВИСИМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СРАБАТЫВАНИЯ

В. В. КУРГАНОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

В последнее время при реконструкции старых и строительстве новых электро-энергетических объектов стали широко применяться цифровые реле (ЦР) защиты, которыми уже оснащены современные высоковольтные ячейки. Цифровое реле имеет набор различных видов релейной защиты, в том числе и с обратнoзависимой от тока характеристикой срабатывания. В отечественной практике ее редко используют, помятуя о недостатках зависимых защит на базе индукционных реле тока типа РТ-80, РТ-90. Однако с применением программных зависимых характеристик можно значительно увеличить быстродействие отключения близких коротких замыканий и в некоторых случаях повысить чувствительность релейной защиты.

Короткие замыкания (КЗ) на линиях, особенно вблизи источника питания, сопровождаются большими разрушениями и могут привести к потере динамической устойчивости системы в целом. Увеличение быстродействия отключения повреждений всегда является актуальной задачей, которая отражена в основных требованиях, предъявляемых к релейной защите. На линиях напряжением 6–35 кВ функцию ускорения отключений близких КЗ выполняет токовая отсечка (ТО). Однако применить ТО на линиях не удастся в следующих случаях:

– на относительно коротких кабельных линиях из-за недостаточной чувствительности ТО, когда токи КЗ в начале и в конце линии отличаются менее чем в 2 раза при обеспечении чувствительности защиты к минимальным двухфазным токам КЗ и в 1,4 раза – к максимальным трехфазным токам КЗ [2];

– на воздушных линиях, к которым вдоль трассы подключены комплектные трансформаторные подстанции (КТП), защищенные плавкими предохранителями. При КЗ в КТП обеспечить селективность ТО с предохранителем не удастся.

В перечисленных случаях, а также учитывая, что ТО имеет небольшую зону действия 20–40 %, линия защищается только одной ступенью – максимальной токовой защитой (МТЗ). Селективность МТЗ на смежных линиях обеспечивается выбором выдержек времени по ступенчатому принципу. Последующая защита имеет время срабатывания больше предыдущей защиты на ступень селективности Δt , величина которой принимается 0,5 с для защит с электромеханическими реле и 0,2–0,3 с для ЦР. Причем время $\Delta t = 0,2$ с принимается только при однотипных выключателях и реле на смежных линиях.

Основной недостаток МТЗ – увеличение выдержки времени срабатывания защиты с приближением места ее установки к источнику питания, то есть там, где отключать КЗ желательно с наименьшей выдержкой времени.

Постановка задачи

В меню ЦР имеется 3 или 4 ступени токовых защит, причем одна из них с обратнoзависимой от тока характеристикой срабатывания. Основное преимущество зави-

симой защиты – способность снижать выдержку времени срабатывания при увеличении тока КЗ.

Недостатки зависимых защит следующие:

- нестабильность выдержек времени отключения повреждений в зависимости от вида КЗ и режима работы системы;
- недопустимо большие выдержки времени при удаленных повреждениях с малыми токами КЗ (в резервной зоне действия защиты);
- сложность согласования по времени срабатывания с независимыми защитами, имеющими постоянные выдержки времени.

В силу перечисленных причин в проектной практике зависимые защиты не нашли должного распространения.

В данной работе предлагается совместить положительные свойства зависимых и независимых защит, применив их одновременно по логической схеме ИЛИ.

Ускорение отключений при близких КЗ на линиях электропередачи

В ЦР зависимые характеристики заданы следующим математическим выражением:

$$t_{c.з} = \frac{k \cdot \beta}{I_*^\alpha - 1}, \quad (1)$$

где $t_{c.з}$ – время срабатывания защиты, с; k – временной коэффициент (уставка на реле); I_* – кратность тока КЗ по отношению к току срабатывания защиты; α и β – постоянные коэффициенты, определяющие крутизну зависимой характеристики.

В соответствии с международным стандартом МЭК 225-4 постоянные коэффициенты имеют следующие значения:

$\alpha = 0,02$, $\beta = 0,14$ – нормально-инверсная (SIT);

$\alpha = 1$, $\beta = 13,5$ – очень зависимая (VIT);

$\alpha = 2$, $\beta = 80$ – чрезвычайно зависимая (EIT);

$\alpha = 2,5$, $\beta = 315$ – ультразависимая (UIT).

Пологую характеристику типа SIT иногда применяют для согласования с амперсекундной характеристикой предохранителя. Кроме того, в отечественных ЦР, например типа БМРЗ, заложена специальная пологая характеристика, которая хорошо согласуется с характеристикой индукционного реле тока типа РТ-80.

Характеристики, имеющие большую крутизну, в отечественной практике вообще не применяются.

В данной работе предлагается характеристику, имеющую наибольшую крутизну типа UIT, использовать как ускоряющий элемент к независимой максимальной токовой защите. При этом никакого аппаратного усложнения не требуется. В ЦР вводится в работу ранее не использованная, зависимая защита с тем же током срабатывания, что и независимая МТЗ.

На рис. 1 изображен фрагмент схемы электроснабжения промышленного предприятия, на котором указаны значения токов КЗ ($I_{к}$) в узловых точках и токов срабатывания ($I_{c.з}$) МТЗ на выключателях № 1–4.

В данной схеме электрической сети невозможно применить ТО, ввиду недостаточной ее чувствительности, так как $I_{к4} / I_{к3} < 1,4$ и $I_{к3} / I_{к2} < 1,4$.

Предположим, что ЦР с независимой и зависимой защитами применена только на главной понизительной подстанции (ГПП). На остальных распределительных пунктах ЦРП и РП используются электромеханические независимые защиты с временем срабатывания: $t_{cp1} = 0,5$ с; $t_{cp2} = 1,0$ с; $t_{cp3} = 1,5$ с.

При $\Delta t = 0,3$ с время срабатывания цифровой защиты 4 с независимой характеристикой срабатывания по условию согласования селективности с защитой 3 должно быть не менее $t_{c.34} = 1,8$ с. Для ускорения отключений близких КЗ дополнительно применяем зависимую защиту 4' типа УИТ с тем же током срабатывания $I_{c.34'} = 800$ А.

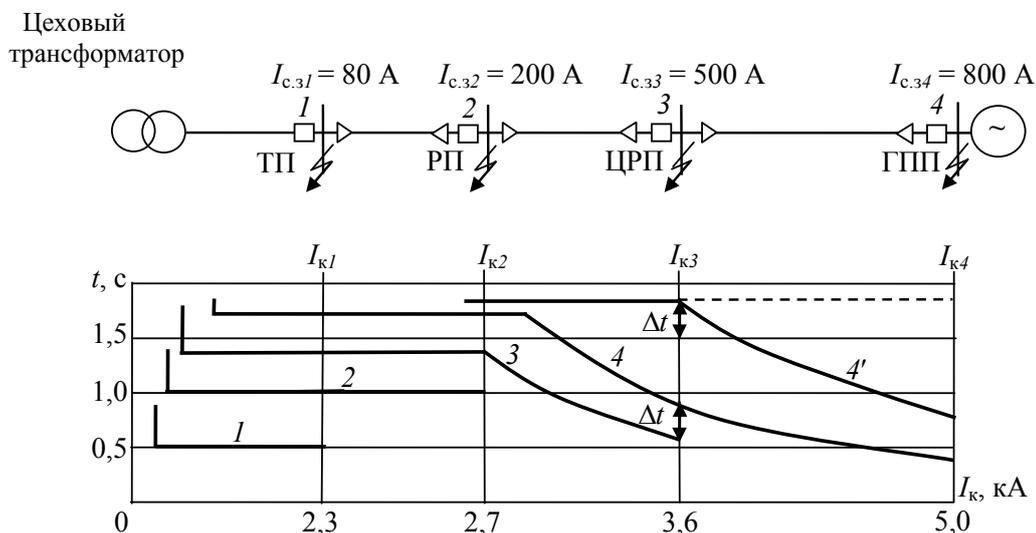


Рис. 1. Расчетная схема электроснабжения и карта селективности защит

Временной коэффициент k защиты 4' определяется из выражения (1):

$$k = t_{c.3} (I_*^{2.5} - 1) / 315. \tag{2}$$

Последующая 4 и предыдущая 3 защиты согласовываются по селективности между собой при максимальном трехфазном токе КЗ, одновременно проходящим по обеим защитам [4]. При повреждении в конце линии 4, что соответствует началу линии 3, максимальный ток КЗ равен 3,6 кА. Тогда кратность тока в реле защиты 4': $I_* = I_{к3} / I_{c.34'} = 3600 / 800 = 4,5$ и временной коэффициент по (2):

$$k_4 = 1,8 \cdot (4,5^{2.5} - 1) / 315 = 0,24.$$

Отметим, что в ЦР шаг дискретизации значения k принят равным 0,01.

При близких КЗ в начале линии 4 время срабатывания ее защиты составит:

$$t_{4'} = k_4 \cdot 315 / [(I_{к4} / I_{c.34})^{2.5} - 1] = 0,24 \cdot 315 / [(5000 / 800)^{2.5} - 1] = 0,78 \text{ с},$$

что в 2,3 раза меньше независимой защиты (1,8 с).

Вместе с тем зависимая защита при КЗ в зоне резервирования (в конце смежной линии 3) будет срабатывать с недопустимо большой выдержкой времени:

$$t_{4'} = 0,24 \cdot 315 / [(2700 / 800)^{2.5} - 1] = 3,8 \text{ с}.$$

Следовательно, компромиссным решением является применение одновременно двух защит. При КЗ на смежной резервируемой линии 3 раньше сработает независимая защита, а при КЗ в основной зоне (на своей линии 4) – зависимая защита.

Быстродействие значительно возрастет в случае применения ЦР на двух смежных линиях. Например, на схеме рис. 1 при установке ЦР на ГПП и ЦРП время сра-

батывания защиты 4 уменьшается более чем в 4,3 раза (предыдущая защита 3 во втором случае примера будет иметь в 2 раза меньше время срабатывания, чем в первом случае). Кроме того, зависимая защита 4 покрывает не только свою основную зону, но и почти полностью – зону резервирования. Зоны действия защит 3 и 4 изображены на карте селективности рис. 1.

Эффективность применения зависимых защит можно оценивать по нижеприведенному выражению, которое вытекает из выражения (1) при сравнении $t_{с.з}$ при разных кратностях I_* :

$$t_* = \frac{K^{2,5} \cdot D^{2,5} - 1}{D^{2,5} - 1}, \quad (3)$$

где $t_* = t_{\kappa} / t_{\text{н}}$ – коэффициент относительного уменьшения времени срабатывания при КЗ в начале (н) и конце (κ) защищаемого участка; $K = I_{\text{н}} / I_{\kappa}$ – отношение токов КЗ в начале и в конце линии; $D = I_{\kappa} / I_{с.з}$ – кратность тока в реле при КЗ в конце линии.

Графическое изображение зависимости $t_* = f(K)$ приведено на рис. 2.

Данная кривая построена при $D = 2,7$. Анализ показал, что при изменении D от 2 до 10 погрешность отклонения от приведенной кривой не превышает 6 %. Отсюда следует вывод: время срабатывания защиты в основном зависит от значения K и практически не зависит от кратности тока в реле D при условии, что эта кратность не ниже 1,75, что всегда выполняется, если защита удовлетворяет требованию чувствительности.

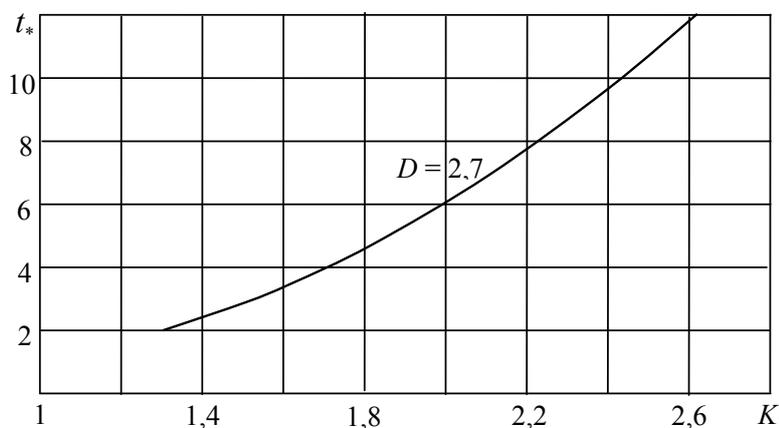


Рис. 2. Кривая зависимости $t_* = f(K)$

Зависимую защиту наиболее эффективно применять на длинных линиях, например, при $K = 2$ время срабатывания защиты снижается более чем в 6 раз (рис. 2). Приведенную кривую удобно использовать для ориентировочной оценки эффективности применения зависимых защит в сети с большим количеством последовательных линий. Например, на воздушных линиях сетевого района с отпайками на КТП.

Использование зависимой защиты на головном участке линии позволяет уменьшить выдержки времени последующих независимых защит секционного выключателя (СВ) и выключателя ввода (ВВ) ГПП, если зона действия последних не полностью охватывает отходящие линии, что допускается Правилами [1]. В этом случае время срабатывания защиты СВ (ВВ) согласовывается с временем срабатывания зависимой защиты при токе, равном току срабатывания защиты СВ или ВВ. При этом следует отметить ошибочное утверждение, что указанное выше согласование произ-

водится по кривой зависимой характеристики, построенной для максимальных токов КЗ [3]. При минимальных двухфазных токах КЗ эта характеристика пройдет выше и селективность последующей независимой защиты будет нарушена. Поэтому предлагается вышеуказанное согласование производить по кривой, построенной при минимальных двухфазных токах КЗ на данном участке линии.

Повышение чувствительности максимальных токовых защит

Согласно Правилам [1] коэффициент чувствительности МТЗ должен быть не ниже 1,5 при КЗ в основной зоне и не менее 1,2 при КЗ в зоне резервирования. Однако на сильно загруженных линиях чувствительность защиты может оказаться недостаточной. Одним из методов повышения чувствительности МТЗ предлагается дополнительно использовать зависимую защиту с меньшей уставкой по току, чем независимая.

Как известно, ток срабатывания МТЗ определяется по условию отстройки (несрабатывания) от максимальных токов нагрузки с учетом ее самозапуска [2]. При этом коэффициент самозапуска обычно находится в пределах 1,8–2,2. Независимая защита на границе уставки срабатывает с установленной выдержкой времени 1–3 с. Время срабатывания зависимой защиты при тех условиях равно бесконечности, что следует из (1) при $I_* = 1$. Согласно паспортным данным ЦР начинает работать при кратности тока в реле $I_* \geq 1,2$. При этой кратности время срабатывания защиты, имеющей временной коэффициент $k = 0,1$, составляет 54 с. За это время самозапуск электродвигателей нагрузки давно закончится, ток нагрузки спадет и пусковой орган ЦР возвратится, не набрав выдержку времени.

Таким образом, ток срабатывания зависимой защиты можно уменьшить как минимум в 1,2 раза по сравнению с независимой защитой и, следовательно, увеличить чувствительность защиты во столько же раз. Степень более глубокого уменьшения тока срабатывания определяется исходя из конкретных параметров самозапускаемой нагрузки и принятого временного коэффициента k .

Применение зависимой характеристики для защиты трансформатора

В ряде случаев токовую отсечку для защиты трансформатора невозможно применить из-за недостаточной ее чувствительности. Правилами допускается в этом случае не применять отсечку при условии, что время срабатывания МТЗ не превышает 0,5 с. Для ускорения времени срабатывания МТЗ предлагается наряду с независимой применить зависимую характеристику МТЗ трансформатора. Значения токов при КЗ до и после трансформатора различаются в 3–5 раз. Как следует из выражения (3), при такой кратности время срабатывания зависимой защиты при КЗ на выводах высокого напряжения (ВН) трансформатора уменьшается в десятки раз по сравнению с временем срабатывания при КЗ на выводах НН. Отметим, что по паспорту минимальное время срабатывания зависимой защиты ЦР при любой кратности тока составляет 0,1 с, т. е. по времени срабатывания МТЗ соизмерима с токовой отсечкой.

Рассмотрим пример применения зависимой защиты трансформатора. Дан трансформатор мощностью 2500 кВ · А напряжением 35/6 кВ. Токи КЗ до и после трансформатора соответственно равны $I_{к1} = 1200$ А и $I_{к2} = 430$ А. По условию согласования с защитой ввода 6 кВ независимая МТЗ трансформатора на стороне 35 кВ должна иметь следующие уставки: по току $I_{с.з} = 160$ А и по времени $t_{с.з} = 0,9$ с.

Для данного трансформатора ТО не удовлетворяет требованию чувствительности, так как ток срабатывания ТО и ее коэффициент чувствительности составляют:

$$I_{с.зТО} = 1,4 \cdot 430 = 602 \text{ А}; \quad k_q = 0,87 \cdot 1200 / 602 = 1,72 < 2.$$

Следовательно, для защиты трансформатора остается одна МТЗ, но ее время срабатывания больше 0,5 с. В этих случаях вынужденно применяют более сложную

дифференциальную защиту, хотя Правила рекомендуют дифференциальную защиту применять для трансформаторов мощностью более 4000 кВ · А.

Проверим предлагаемый способ ускорения МТЗ с помощью зависимой защиты. Принимаем для зависимой защиты ток срабатывания $I_{с.з} = 160$ А и минимально возможный временной коэффициент $k = 0,05$. Определим время срабатывания защиты:

$$\text{– при КЗ на выводах НН: } t_{с.з.нн} = 0,05 \cdot 315 / \left[\left(430 / 160 \right)^{2,5} - 1 \right] = 1,45 \text{ с;}$$

$$\text{– при КЗ на выводах ВН: } t_{с.з.вн} = 0,05 \cdot 315 / \left[\left(1200 / 160 \right)^{2,5} - 1 \right] = 0,1 \text{ с.}$$

Таким образом, зависимая защита по времени срабатывания заменяет собой ТО и дифференциальную защиту применять не требуется.

На трансформаторах большой мощности в обязательном порядке вместо ТО применяется дифференциальная защита. При этом МТЗ выполняет роль основной защиты при внешних КЗ и резервирует дифференциальную защиту при внутренних КЗ. Зависимую защиту в этом случае полезно применять как ускоряющий элемент при внутренних КЗ в трансформаторе, а также для уменьшения выдержек времени последующих защит питающих линий.

В приведенном примере, если защита линии 35 кВ, питающая трансформатор 2500 кВ · А, имеет независимую защиту, то ее согласование с зависимой защитой трансформатора выполняется при токе, равным току срабатывания защиты линии, точно так же, как было указано выше в примере СВ и ВВ ГПП. Если в результате расчета получится большая выдержка времени защиты линии, то ее согласование следует производить с независимой защитой трансформатора по ступенчатому принципу.

Заключение

1. Показано, что применение зависимой защиты типа УИТ совместно с независимой МТЗ позволяет значительно ускорить отключения близких КЗ на линиях без ущерба селективности. Эффективность ускорения значительно возрастает при использовании цифровых защит на смежных линиях.

2. Чувствительность зависимой защиты можно увеличить как минимум в 1,2 раза, не подвергая опасности ложного срабатывания защиты при самозапуске электродвигателей нагрузки.

3. Применение зависимой на ряду с независимой МТЗ трансформатора позволяет в десятки раз уменьшить время отключения КЗ на выводах высокого напряжения трансформатора, что особенно важно для трансформаторов, токовая отсечка которых не удовлетворяет требованию чувствительности.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд. – Москва : Энергоатомиздат, 1998.
2. Шабад, М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М. А. Шабад. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1985.
3. Шабад, М. А. Выбор характеристик и уставок цифровых защит серий SPACOM и REF-500 / М. А. Шабад. – Санкт-Петербург : ПЭИпк, 2001.
4. Курганов, В. В. Выбор характеристик и расчет уставок цифровых реле : пособие к курсовому и дипломному проектированию / В. В. Курганов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2005.

Получено 14.05.2009 г.