

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В. В. КУРГАНОВ

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

Основной релейной защитой от токов коротких замыканий (КЗ) на линиях напряжением 6–35 кВ является максимальная токовая защита (МТЗ). Ток срабатывания МТЗ ($I_{с.з.}$) выбирается по условию отстройки от максимальных токов нагрузки с учетом самозапуска электродвигателей. Чувствительность такой защиты, как правило, бывает достаточной к КЗ как в основной зоне (в пределах защищаемой линии), так и в резервной зоне (на смежной предыдущей линии). МТЗ обладает относительной селективностью и обеспечивает надежное резервирование при отказе защиты или выключателя предыдущей линии, что делает ее незаменимой даже при использовании защит с абсолютной селективностью, например, дифференциальной. Для обеспечения селективности между предыдущей и последующей защитами применяется ступенчатый принцип, т. е. выдержка времени срабатывания последующей защиты выбирается на ступень селективности (Δt) больше времени срабатывания предыдущей МТЗ. Основным недостатком МТЗ заключается в том, что защита, расположенная ближе к источнику питания, имеет наибольшую выдержку времени срабатывания, а именно близкие КЗ сопровождаются большими токами и требуют быстрого отключения. Согласно Правилам [1, гл. 3.2.4] устройства релейной защиты должны обеспечивать наименьшее возможное время отключения КЗ в целях сохранения бесперебойной работы неповрежденной части электрической сети и ограничение области и степени повреждения элементов. Для повышения быстродействия МТЗ ее дополняют токовыми отсечками без выдержки и с выдержкой времени. Такой метод можно применить только на длинных воздушных линиях, работающих без отпаек. На кабельных или коротких воздушных линиях применить отсечки не удастся ввиду их недостаточной чувствительности. В результате на таких линиях остается только одна защита – МТЗ. С применением цифровых реле (ЦР) появилась возможность существенно уменьшить время отключения близких КЗ за счет использования защит с различными характеристиками срабатывания. МТЗ, время срабатывания которой не зависит от величины тока КЗ, называется защитой с независимой характеристикой срабатывания (DT) и, наоборот, МТЗ, у которой автоматически изменяется выдержка времени в обратно пропорциональной зависимости от тока КЗ, называется защитой с зависимой характеристикой срабатывания.

Современные ЦР оснащены как минимум 4-мя типами зависимых защит, характеристики которых соответствуют международному стандарту *IEC* (МЭК 60255-4). Бывают и другие типы зависимых защит, например, соответствующие стандарту *ANSI* (*American National Standards Institute*) или другие специальные для согласования с индукционными токовыми реле или реле прямого действия.

Времятоковые характеристики защит по международному стандарту *IEC* описываются выражением [3]:

$$t = \beta \cdot K / (I_*^\alpha - 1), \quad (1)$$

где t – время срабатывания защиты, с; $I^* = I_k / I_{c.3}$ – кратность тока КЗ (I_k) к току срабатывания защиты ($I_{c.3}$); α и β – постоянные коэффициенты, имеющие следующие значения в зависимости от типа зависимой характеристики:

нормальная инверсная типа *SIT* – $\alpha = 0,02$, $\beta = 0,14$;

очень зависимая типа *VIT* – $\alpha = 1$, $\beta = 13,5$;

чрезвычайно зависимая типа *EIT* – $\alpha = 2$, $\beta = 80$;

ультразависимая типа *UIT* – $\alpha = 2,5$, $\beta = 315$;

K – временной коэффициент – уставка, выставляемая на реле (диапазон возможного изменения коэффициента K от 0,05 до 1,0 с шагом дискретизации 0,01).

При известных для данной защиты значениях времени срабатывания ($t_{c.3}$) и тока срабатывания ($I_{c.3}$) коэффициент K определяется по выражению

$$K = t_{c.3} (I^*{}^\alpha - 1) / \beta. \quad (2)$$

Значения $t_{c.3}$ и $I_{c.3}$ определяют точку координат, через которую данная времятоковая характеристика $t = f(I_k)$ должна проходить.

Комбинированное применение характеристик различных типов на смежных линиях позволяет добиться наименьшего времени отключения близких КЗ. При этом необходимо учитывать следующие особенности зависимых защит:

1. Все зависимые характеристики при кратности тока $I^* \geq 20$ имеют независимую часть с временем срабатывания 0,1 с.

2. На границе уставки по току срабатывания зависимые защиты не действуют, поскольку по выражению (1) при кратности тока $I^* = 1$ время срабатывания равно бесконечности. Поэтому ЦР имеет порог срабатывания, при превышении которого производится пуск зависимой защиты [4]: для характеристики типа *SIT* $I^*_{\text{мин}} = 1,1$; для остальных типов $I^*_{\text{мин}} = 1,2$. При указанных кратностях и минимальном значении коэффициента $K = 0,05$ время срабатывания защит составит:

$$\text{SIT: } t = 3,7 \text{ с; } \text{VIT: } t = 3,38 \text{ с; } \text{EIT: } t = 9,1 \text{ с; } \text{UIT: } t = 15,8 \text{ с.}$$

Отметим, что применять зависимую защиту надо осторожно, предварительно проверив ее коэффициент чувствительности ($K_{\text{ч}}$) при КЗ в конце зоны дальнего резервирования. Согласно Правилам [1] необходимо иметь $K_{\text{ч}} \geq 1,2$. Однако учитывая, что большинство зависимых защит имеют порог срабатывания, равный 1,2, то с учетом необходимого запаса, по мнению автора, минимальный коэффициент чувствительности защит с зависимой характеристикой должен быть увеличен на 5–10 %, т. е.

$$K_{\text{ч.мин}} \geq 1,3. \quad (3)$$

Указанное ограничение и методы выбора наиболее оптимальных характеристик МТЗ покажем на следующем примере.

В настоящее время в существующих электрических сетях доля цифровых защит не превышает 20 %. Остальные защиты выполнены на устаревших электромеханических реле с независимыми характеристиками срабатывания. Поэтому при внедрении ЦР на головных участках сети часто приходится считаться, что защиты удаленных потребителей выполнены на старых аналоговых реле.

На рис. 1, а приведена схема электрической сети, в которой комплект защит АК₁ выполнен на электромеханических реле с независимой выдержкой времени (DT), равной $t_{c.31} = 0,5$ с, а комплекты АК₂ и АК₃ – на цифровых реле.

Значения токов срабатывания для всех комплектов МТЗ известны: $I_{c.31} = 0,1$ кА; $I_{c.32} = 0,3$ кА; $I_{c.33} = 0,7$ кА. Требуется выбрать характеристики МТЗ защит АК₂ и АК₃, при которых обеспечивается наименьшее время отключения коротких замыканий. Значения максимальных токов 3-фазного КЗ в узловых точках сети заданы: $I_{k1} = 2$ кА; $I_{k2} = 3$ кА; $I_{k3} = 5$ кА.

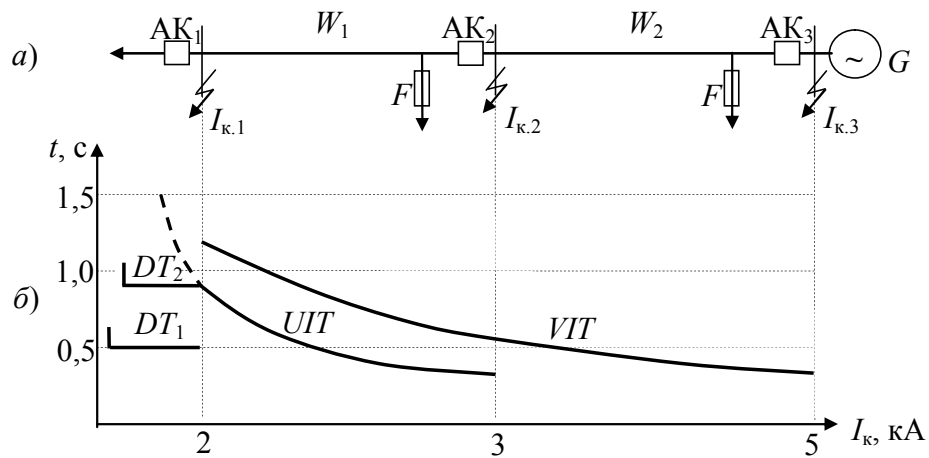


Рис. 1. Расчетная схема электроснабжения:
 а – схема электрической сети; б – карта селективности защит

Степень селективности между старой защитой АК₁ и цифровой АК₂ принимаем не менее $\Delta t \geq 0,4$ с, а между АК₂ и АК₃ – $\Delta t \geq 0,3$ с (допускается $\Delta t = 0,2$ с при однотипных ЦР и выключателях на смежных линиях).

Если на всех ЦР применить независимые характеристики типа *DT*, то выдержка времени срабатывания защиты АК₂ должна составить: $t_{c.32} = t_{c.31} + \Delta t = 0,5 + 0,4 = 0,9$ с, а защиты АК₃ – $t_{c.33} = t_{c.32} + \Delta t = 0,9 + 0,3 = 1,2$ с. Для сокращения времени отключения близких КЗ на комплектах АК₂ и АК₃ используем защиты с зависимыми характеристиками по типу *UIT*, имеющими наибольшую крутизну. Исходя из условия селективности, зависимая защита АК₂ с уставкой по току $I_{c.32} = 0,3$ кА при токе КЗ $I_{к1} = 2$ кА должна иметь время срабатывания $t_{c.32} = 0,9$ с. По формуле (2) определим устанавливаемый на ней временной коэффициент для характеристики типа *UIT*:

$$K_2 = t_{c.32} (I_{*}^{2,5} - 1) / 315 = 0,9 [(2/0,3)^{2,5} - 1] / 315 = 0,33.$$

Время срабатывания защиты АК₂ при повреждении в начале линии W_1 при токе КЗ $I_{к2} = 3$ кА, по формуле (1) составит:

$$t_{2(n)} = 315 \cdot 0,33 / [(3/0,3)^{2,5} - 1] = 0,33 \text{ с.}$$

На рис. 1, б изображена карта селективности – зависимости выдержек времени срабатывания защит от величины тока КЗ. Кривая *DT*₁ соответствует независимой защите АК₁, а кривая *UIT*₂ – зависимой защите АК₂. Продолжение кривой *UIT*₂ (пунктирная линия) указывает на то, что данная защита срабатывает при КЗ в зоне резервирования с недопустимо большой выдержкой времени. Поэтому целесообразно в данном случае для резервной зоны ввести дополнительно защиту с независимой характеристикой срабатывания (кривая *DT*₂). Таким образом, в комплекте АК₂ будут задействованы две ступени защит: одна с независимой характеристикой $t_{c.32} = 0,9$ с, а вторая с зависимой типа *UIT* и с коэффициентом $K_2 = 0,33$. Уставки по току срабатывания у обеих ступеней одинаковые, равные $I_{c.32} = 0,3$ кА. Обе ступени защит работают по логической схеме ИЛИ.

Для комплекта защит АК₃ выберем такую же зависимую характеристику типа *UIT*. При этом предварительно проверим возможность ее применения по условию чувствительности (3) при минимальном 2-фазном КЗ в конце линии W_1 :

$$K_{ч.мин} = I_{к1}^{(2)} / I_{c.33} = 0,87 \cdot 2 / 0,7 = 2,5 > 1,3.$$

Для однотипных характеристик согласование по времени срабатывания производится при максимальном токе КЗ, проходящим одновременно по обеим защитам АК₂ и АК₃. Этот ток равен $I_{к2} = 3$ кА. При этом по условию селективности время срабатывания АК₃ не должно быть меньше: $t_{c.33} \geq t_{2(n)} + \Delta t = 0,33 + 0,3 = 0,63$ с.

По формуле (2) определим коэффициент K_3 :

$$K_3 = 0,63[(3/0,7)^{2,5} - 1]/315 = 0,07.$$

Время срабатывания защиты АК₃ по выражению (1) при токе КЗ $I_{к3} = 5$ кА составит $t_{3(н)} = 0,16$ с, а при токе $I_{к1} = 2$ кА – $t_{3(к)} = 1,7$ с. Следовательно, при КЗ в конце зоны резервирования зависимая защита АК₃ срабатывает позже (1,7 с), чем если бы мы выбрали независимую защиту с $t_{с.33} = 1,2$ с. Компромиссным решением в данном случае может быть два варианта: либо применить комбинированную двухступенчатую защиту, аналогично комплекту АК₂, либо выбрать более пологую характеристику, например, типа *VIT*.

Для последнего варианта, чтобы соблюдалось условие селективности защит АК₂ и АК₃ в зоне их совместного действия, согласование по времени срабатывания следует производить при минимальном токе $I_{к1} = 2$ кА, т. е. $t_{с.33} = t_{с.32(DT)} + \Delta t = 0,9 + 0,3 = 1,2$ с. Тогда коэффициент K_3 для характеристики типа *VIT* составит:

$$K_3 = 1,2[(2/0,7) - 1]/13,5 = 0,17.$$

По формуле (1) определяем время срабатывания защиты АК₃ при токах $I_{к2} = 3$ кА и $I_{к3} = 5$ кА:

$$t_{3(с)} = 13,5 \cdot 0,17 / [(3/0,7) - 1] = 0,7 \text{ с}; \quad t_{3(н)} = 13,5 \cdot 0,17 [(5/0,7) - 1] = 0,37 \text{ с}.$$

Селективность при токе $I_{к2} = 3$ кА выполняется, так как $\Delta t = 0,7 - 0,33 = 0,37 > 0,3$ с. На карте селективности (рис. 1, б) построена характеристика типа *VIT* комплекта АК₃ (кривая *VIT*₃). Отметим, что некоторые ЦР, например типов 7SJ500, L60, SEL540 и др., имеют возможность графического (по точкам) задания пользователем необходимой характеристики срабатывания зависимой защиты, отличающейся от стандартных типов [4]. В последнем случае задают координаты необходимой времятоковой характеристики по трем точкам: при КЗ в начале и в конце защищаемой линии, а также в конце предыдущей линии. Плавность кривой в промежуточных точках обеспечивается автоматически программным путем.

Таким образом, комбинированное применение наиболее оптимальных для данной сети характеристик цифровых МТЗ позволяет значительно сократить время срабатывания защит при близких КЗ на линиях W_1 и W_2 соответственно с 0,9 до 0,33 с и с 1,2 до 0,35 с. Кроме того, зависимые защиты хорошо согласуются с времятоковыми характеристиками плавких вставок предохранителей F , защищающих комплектные трансформаторные подстанции, подключенные к воздушным линиям с помощью отпаяк (рис. 1, а). При наличии предохранителей, а также на коротких линиях по условию селективности применить токовые отсечки невозможно [2], и если бы была возможность применить отсечку, то она ускорила бы отключения КЗ только на небольшом участке не более 20–30 % длины линии. Зависимая защита позволяет ускорить отключения повреждений на всей линии в пределах не только основной, но и в резервной зонах действия, что дает возможность на линиях применить провода меньшего сечения по условию термической стойкости [3].

Заключение

1. Предложенный метод позволяет выбрать наиболее оптимальные с точки зрения быстродействия характеристики максимальных токовых защит, выполненных на цифровых (микропроцессорных) реле.

2. Комбинированное применение зависимых и независимых характеристик, а также зависимых стандартных характеристик различной крутизны на защитах смежных линий значительно ускоряет отключения коротких замыканий без ущерба селективности.

3. Эффективное согласование по времени срабатывания защит на сопряженных участках линий можно выполнить, применив цифровые реле, имеющие возможность установки не только стандартных, но и заданных по точкам необходимых характеристик срабатывания зависимых защит.

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 токовых защит серий SPACOM и RE_500 / М. А. Шабад. – Санкт-Петербург : ПЭИпк, 2001.
4. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – Москва : Энергоатомиздат, 2007.

Получено 12.10.2010 г.