

УДК 621.316.125

## О ВЫБОРЕ ХАРАКТЕРИСТИК СРАБАТЫВАНИЯ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ ЛИНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С ОДНОСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

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 настоящее время для защиты от коротких замыканий (КЗ) и дальнего резервирования (ДР) в распределительных сетях с односторонним питанием преимущественно используются токовые защиты, реагирующие на полные токи фаз. Недостатки этих защит особенно проявляются в сетях сельскохозяйственного назначения. Большинство протяженных воздушных линий 10(6) кВ в таких сетях питают по несколько трансформаторных подстанций 10(6)/0,4 кВ мощностью от 25 до 630 кВ·А, подключаемых к ответвлениям от линии через предохранители (П), главным образом типа ПКТ [1]. В ряде случаев, особенно на трансформаторах малой мощности, предохранители на ВН не устанавливаются и их защита осуществляется защитой питающей линии. На стороне 0,4 кВ вместо П возможна установка автоматических выключателей.

В соответствии с рекомендациями [1] номинальные токи плавких вставок П  $I_{н.вс}$  со стороны высшего напряжения (ВН) выбираются равными примерно двукратному номинальному току (Т)  $I_{н.вс} \approx 2I_{н.т}$ , а со стороны низшего напряжения (НН)  $I_{н.вс} \approx I_{н.т}$ . При таком выборе П на стороне НН защищают Т от перегрузок и КЗ в сети низшего напряжения. Предохранители на стороне ВН предназначены только для защиты Т от КЗ на выводах ВН и повреждений внутри Т. Время плавления плавкой вставки П  $t_{пл}$  зависит от величины тока. При токах  $(1,3-2,0)I_{н.вс}$  плавкая вставка плавится в течение  $t = 1$  ч, а при токах  $10I_{н.вс}$  этот показатель составит  $t_{пл} \approx 0,1-0,2$  с.

На питающих линиях в зависимости от конкретных условий применения токовая защита может выполняться одноступенчатой в форме максимальной токовой защиты (МТЗ) или (для более быстрой ликвидации повреждений) со ступенчатой характеристикой выдержки времени.

На рис. 1 показан фрагмент схемы распределительной сети.

В таких сетях повреждения в конце линии (точка К4) и за Т (точка К3) могут сопровождаться прохождением в начале линии соизмеримых токов,

а разница в токах КЗ в точках К1 и К2 может быть невелика. Повреждения внутри Т могут сопровождаться малыми токами, что приводит к очень медленному расплавлению плавкой вставки П1. Поэтому выполнить требования селективности и чувствительности токовой защиты питающей линии при удовлетворительной скорости действия очень трудно или даже невозможно. Для улучшения селективности нужно увеличивать выдержку времени защиты питающей линии, что приводит к увеличению объема разрушений, снижению доли успешных АПВ и возрастанию ущерба от недоотпуска электроэнергии.

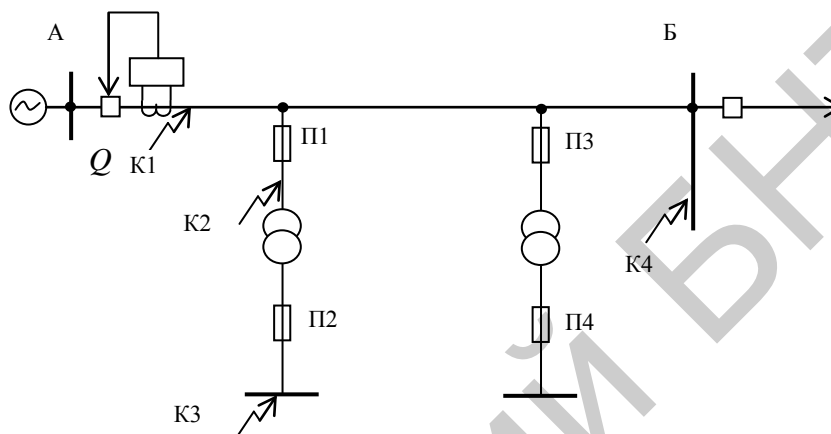


Рис. 1. Схема распределительной сети

В настоящее время для защиты линий распределительной сети используются микропроцессорные (цифровые) устройства отечественных и зарубежных фирм, реализующих, кроме функций токовой защиты, ряд дополнительных функций: многократных АПВ, частотной фильтрации входных токов, выделение симметричных составляющих, фиксации параметров режима защищаемого элемента и т. д. Токовые защиты обычно содержат две–четыре ступени, реагирующие на полные токи фаз (в некоторых реле имеются ступени, реагирующие на токи обратной последовательности) и позволяющие реализовать функции мгновенной токовой отсечки (ТО), отсечки с выдержкой времени (ТОВ) и максимальной токовой защиты (МТЗ). МТЗ может выполняться или с независимой или с обратозависимой от тока (инверсной) характеристикой времени срабатывания. Пользователю предоставляется возможность выбирать или независимую или одну из ряда инверсных характеристик. Однако вопросам выбора нужной характеристики в литературе уделяется недостаточное внимание. В [2] указывается на ряд существенных преимуществ обратозависимых времятоковых характеристик токовых защит по сравнению с независимыми. Несмотря на ряд несомненных достоинств МТЗ с инверсной характеристикой, в [3] рекомендуется применять их только в случае явного преимущества.

В соответствии со стандартами МЭК инверсные характеристики срабатывания описываются выражением

$$t = \frac{k\beta}{I_*^\alpha - 1}, \quad (1)$$

где  $I_*^\alpha = \frac{I_{КЗ}}{I_{сз}}$  – кратность тока КЗ к току срабатывания  $I_{сз}$  ступени;  $t$  – время

срабатывания ступени;  $\alpha, \beta$  – коэффициенты, определяющие крутизну характеристики;  $k$  – временный коэффициент.

Время срабатывания МТЗ с инверсной характеристикой 2 должно быть на ступень селективности  $\Delta t$  больше времени плавления плавкой вставки  $t_{пл}$  с учетом разброса времятоковой характеристики предохранителя 1 при расчетном значении тока КЗ на выводах Т (точка К2)

$$t_{сз} = t_{пл} + \Delta t. \quad (2)$$

Селективность работы предохранителя П1 на ВН Т и МТЗ питающей линии нужно обеспечить во всем возможном диапазоне токов КЗ, в том числе и при малых токах КЗ в Т1 (рис. 2). Однако это практически невозможно, так как при малых токах плавкие вставки расплавляются медленно в течение времени, намного превышающего допустимое время срабатывания защит линии. Поэтому допускается обеспечивать селективность только при токах, соответствующих двухфазному КЗ на выводах ВН каждого из Т (точка К2). В этом случае говорят о неполной селективности между защитой питающей линии и предохранителем при повреждении в Т [2].

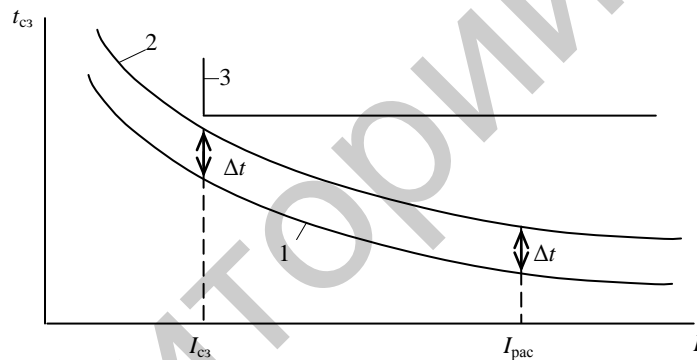


Рис. 2. Времятоковые характеристики МТЗ питающей линии (2 – инверсная; 3 – независимая) и 1 – предохранителя

Инверсная характеристика 2 защиты линии достаточно хорошо согласуется с характеристикой 1 предохранителя, что позволяет ускорить отключение КЗ в начале линии. Однако при токах, близких к току срабатывания, защита действует с большими выдержками времени, что увеличивает время отключения КЗ, особенно в зоне ДР. На время ее действия оказывают влияние величины тока нагрузки и тока срабатывания. В результате вопросы согласования характеристик требуют значительных затрат, возрастающих по мере увеличения числа отпаечных Т, изменения нагрузок систем электроснабжения из-за их развития в случае применения адаптивной токовой защиты линии, в которой  $I_{сз}$  может изменяться в зависимости от вида КЗ и режима работы сети.

В случае применения МТЗ с независимой характеристикой 3 ступень селективности  $\Delta t$  должна обеспечиваться при токе КЗ, равном току срабатывания  $I_{сз}$ . Это приводит к тому, что для получения такого же  $t_{сз}$  необхо-

димо было бы выбрать  $I_{сз}$  значительно большей, чем у защиты с инверсной характеристикой. Если это недопустимо по условиям чувствительности, то нужно значительно увеличивать  $t_{сз}$ . Таким образом, основными недостатками одноступенчатой токовой защиты с независимой характеристикой выдержки времени являются накопление выдержек времени, особенно в многоступенчатых сетях, и худшие условия согласования с характеристиками предохранителей. Однако согласование выдержек времени смежных защит значительно проще. Следует учитывать и то обстоятельство, что при использовании для защиты в сети микропроцессорных защит и однотипных выключателей ступень селективности  $\Delta t$  может быть снижена до 0,15–0,2 с [2], и таким образом значительно ослабляется эффект накопления выдержек времени в многоступенчатых сетях.

Как известно, эффективным средством ускорения отключения КЗ в сети являются быстродействующие токовые отсечки. Селективность мгновенных ТО обеспечивается выбором тока ее срабатывания  $I_{сз}$  из следующих двух условий:

$$I_{сз} \geq k_n I_{K_{\max}}^{(3)}; \quad (3)$$

$$I_{сз} \geq k_n \sum I_{н.т}. \quad (4)$$

Для обеспечения селективного действия защит по первому условию  $I_{сз}$  выбирается больше максимального тока КЗ в конце защищаемой линии в точке К4, а при наличии отпайки – и в точке К2. Коэффициент надежности для цифровых защит выбирается равным 1,1–1,15. Исходя из условия необходимой чувствительности ТО, выполняющей функцию дополнительной защиты, коэффициент чувствительности  $K_{ч}$  должен быть больше или равен 1,2 при КЗ в месте установки ТО (точка К1) в наиболее благоприятном по условию чувствительности режиме [1]. Таким образом, по этому условию ТО можно применять только на тех линиях, где отношение максимальных значений токов КЗ в начале и конце линий превышает 1,4. Как правило, ТО оказывается неэффективной для реактированных, кабельных линий, а зачастую и на линиях с отпайками, так как разница в токах КЗ в точках К1 и К2 обычно невелика.

По второму условию нужно обеспечить несрабатывание отсечки при бросках тока намагничивания (БТН) всех трансформаторов, подключаемых к линии. Величину  $k_n$  рекомендуется принимать в зависимости от времени срабатывания ТО. (При  $t_{сз} = 0,1$  с  $k_n \approx 3-4$ , а при  $t_{сз} = 0,04$  с  $k_n \approx 5$ .) Для улучшения отстройки от БТН в некоторых микропроцессорных реле имеется специальный переключатель, с помощью которого можно обеспечить удвоение уставки при включении линии.

При таком выборе параметров срабатывания селективной быстродействующей ТО ограничивается область ее использования, и единственной защитой питающей линии зачастую является МТЗ, работающая с выдержкой времени.

При селективной настройке защит питающей линии и предохранителей при КЗ на отпайке в точке К2 или внутри Т в зависимости от вида КЗ могут

перегорать один или несколько предохранителей, что связано с возможностью возникновения неполнофазного режима и опасностью массового повреждения электродвигателей нагрузки, а также необходимостью длительного времени для замены сработавших предохранителей, что приводит к снижению надежности электроснабжения потребителей.

Учитывая, что междуфазные КЗ в Т маловероятны и повреждения в силовых Т происходят значительно реже, чем на воздушных линиях, предлагается использовать неселективную ТО, отстраиваемую от КЗ за Т (независимо от наличия предохранителей на стороне ВН Т) по следующим причинам: большинство повреждений на воздушных линиях являются неустойчивыми и самоустраиваются при снятии напряжения с линии. При высоком быстродействии ТО предохранители сохраняются, так как не успевают перегорать. При успешном АПВ быстро восстанавливается электроснабжение потребителей, что приводит к увеличению надежности электроснабжения, повышается эффективность работы АПВ. При срабатывании АПВ неселективная ТО должна автоматически выводиться из работы на время, достаточное для работы селективной ступени защиты, работающей с выдержкой времени. За время работы этой ступени в случае устойчивого КЗ предохранители поврежденной отпайки будут перегорать, а питание линии восстанавливается во втором цикле АПВ.

Для предотвращения ложного срабатывания быстродействующей ТО от БТН предлагается блокировать ее действие в зависимости от содержания второй гармоники в фазных токах линии. Это позволит при расчете  $I_{с3}$  ТО исключить условие 2, расширить область применения ТО. Для целей блокировки целесообразно использовать не величину тока второй гармоники  $I_2$ , а относительное содержание этой гармоники в фазном токе  $I_2/I_{\phi}$ .

Для повышения эффективности ДР и защиты отпаечных трансформаторов (например, при отсутствии П на стороне ВН Т) в составе токовой защиты питающей линии целесообразно предусматривать дополнительную высокочувствительную ступень защиты, работающую с выдержкой времени. В качестве такой ступени возможно использование адаптивной МТЗ, ток срабатывания которой изменяется в зависимости от текущей нагрузки линии. Для предотвращения неселективных срабатываний этой ступени при КЗ в сети 0,4 кВ можно выполнять ее блокировку в зависимости от уровня третьих гармоник в фазных токах [4].

#### ВЫВОД

Возможности повышения технического совершенства токовых защит линий распределительных сетей, предоставляемые микропроцессорными устройствами защиты, в настоящее время используются не в полной мере. Значительного улучшения основных показателей технического совершенства можно достигнуть на пути разработки и исследования многоступенчатых адаптивных токовых защит, характеристики срабатывания которых изменяются в зависимости от режима работы сети, вида КЗ и ряда других факторов. В общем случае такие защиты должны контролировать не только полные токи фаз и их симметричные составляющие, но и вторую и третью гармоники в этих токах. Быстродействующие ступени защиты могут

характеризоваться неполной селективностью, которая исправляется в результате работы АПВ. Исследование и анализ поведения таких защит в переходных и установившихся режимах работы распределительных сетей целесообразно выполнять на базе комплексных математических моделей методом вычислительного эксперимента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ш а б а д, М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М. А. Шабад. – Л., 1985.
2. Ш а б а д, М. А. Выбор характеристик и уставок цифровых токовых защит серии SPACOM и RE – 500 / М. А. Шабад. – СПб., 2000.
3. Ч е р н о б р о в о в, Н. В. Релейная защита / Н. В. Чернобровов. – М.: Энергия, 1974.
4. А н д р е е в, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В. А. Андреев. – М.: Высш. шк., 1991.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 07.07.2008

УДК 621.315

### **ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ ПЕРЕТОКОВ РЕАКТИВНЫХ МОЩНОСТЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И ПУТИ ИХ ОГРАНИЧЕНИЯ**

**Инж. ПОСПЕЛОВ Е. Г.,  
засл. деят. науки и техн. РБ, докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.**

*Белорусский национальный технический университет*

Потери электроэнергии в электрических сетях СНГ возрастают. В электрических сетях РАО «ЕЭС России» за последние 10 лет увеличились потери от 8 до 13,1 % [1]. Потери в электрических сетях ГПО «Белэнерго» за 2006 г. составили 11,25 % [2], в то время как в промышленно развитых странах потери в сети составляют 4–6 % и постоянно снижаются. Основной причиной больших потерь в сетях СНГ являются перетоки реактивной мощности, включающие зарядные мощности линий. В частности, максимальная реактивная мощность в сетях РАО «ЕЭС России» составляет 165 Гвар; нагрузка в режиме минимума потребляет 60 Гвар, а оставшаяся реактивная мощность растекается по сети, увеличивая потери и создавая повышенные уровни напряжения [1].

Потери энергии на нагрев проводов наиболее точно могут быть подсчитаны, если известны графики работы линии и распределение проходящего тока вдоль линии. Тогда за время  $t$  потери на нагревание проводов можно определить по формуле