

3. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами. Инженерные методы анализа и синтеза / Б. Н. Петров [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
4. Востриков, А. С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А. С. Востриков, Г. А. Французова. – М.: Высш. шк., 2004 – 365 с.
5. Анхимюк, В. Л. Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михеев. – Минск: ДизайнПРО, 2002. – 343 с.
6. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2004. – 527 с.
7. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2006. – 527 с.
8. Ковчин, С. А. Теория электропривода: учеб. для вузов / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.
9. Naslin, P. Polinomes normaux et critere algebrigue d'amortissement (1) / P. Naslin. – Automatisation, 1963. – Т. VIII, № 6. – P. 215–223.
10. Вержбицкий, В. М. Численные методы (линейная алгебра и нелинейные уравнения): учеб. пособие для вузов / В. М. Вержбицкий. – 2-е изд., испр. – М.: ООО «Издательский Дом «ОНИКС 21 век»», 2005. – 432 с.

Представлена кафедрой электропривода  
и автоматизации промышленных установок  
и технологических комплексов

Поступила 30.03.2007

УДК 621.316.925

## **ВЫБОР ЧИСЛЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИДА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В АДАПТИВНОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЕ ЛИНИЙ**

**Инж. КОВАЛЕВСКИЙ А. В.**

*Белорусский национальный технический университет*

В настоящее время в связи с повышением мировых цен на энергоносители в Республике Беларусь остро стоит проблема энергетической безопасности. За счет совершенствования релейной защиты можно добиться повышения надежности работы энергосистемы. Несвоевременное отключение повреждений и ненормальных режимов работы электрической сети, распределяющей энергию между ее производителем и потребителем, может привести к серьезным финансовым потерям, экологическим проблемам и неблагоприятным социальным последствиям. Предотвращению таких ситуаций служат релейная защита и автоматика. Иметь на предприятиях белорусской энергосистемы современные, надежные и быстродействующие устройства релейной защиты и автоматики означает своевременно локализовать быстроразвивающиеся аварийные режимы и не создавать условий для простоя промышленных предприятий, не тратить огромные финансовые средства и трудовые ресурсы на восстановление поврежденных участков энергосистемы, оборудование потребителей.

Для защиты линий электропередачи напряжением 6–35 кВ от междуфазных коротких замыканий (КЗ) используются ступенчатые токовые защиты, которые в общем случае содержат три ступени: первая ступень – токовая отсечка (ТО), обычно выполняемая без выдержки времени; вторая ступень – токовая отсечка с выдержкой времени (ТОВ), третья ступень – максимальная токовая защита (МТЗ). В зависимости от конкретных условий применения может использоваться одна, две или все три ступени защиты. Измерительными органами (ИО) всех ступеней являются органы максимального тока, включенные на полные токи фаз защищаемого объекта [1].

Одним из требований, предъявляемых к релейной защите, является ее чувствительность. Однако, рассчитывая уставки для токовых защит линий, инженерам-расчетчикам не всегда удается добиться нужного коэффициента чувствительности  $k_{\text{ч}}$ , который определяется как отношение минимального тока КЗ (обычно двухфазного), протекающего через ИО защиты, к току срабатывания ИО. Токи срабатывания ИО всех ступеней выбираются по наиболее тяжелым условиям симметричного режима [2]. Ток срабатывания ИО ТО выбирается по условию отстройки от максимального значения тока трехфазного КЗ  $I_{\text{КЗmax}}^{(3)}$  в конце защищаемого участка по известному выражению

$$I'_{\text{ср1}} = \frac{k_{\text{отс}} k_{\text{сх}}}{n_{\text{ТТ}}} I_{\text{КЗmax}}^{(3)} \quad (1)$$

Ток срабатывания МТЗ выбирается по условию отстройки от максимальных нагрузочных токов  $I_{\text{н.мах}}$  с учетом перегрузок и самозапуска электродвигательной нагрузки по формуле

$$I_{\text{ср1}}^{\text{III}} = \frac{k_{\text{отс}} k_{\text{сх}} k_{\text{сз}}}{k_{\text{В}} n_{\text{ТТ}}} I_{\text{н.мах}}^{(3)} \quad (2)$$

где  $k_{\text{отс}}$ ,  $k_{\text{сх}}$ ,  $k_{\text{В}}$ ,  $n_{\text{ТТ}}$  – соответственно коэффициенты отстройки, схемы, возврата и трансформации измерительных трансформаторов тока;  $k_{\text{сз}}$  – коэффициент самозапуска электродвигательной нагрузки. Его величина определяется характером нагрузки и ориентировочно может достигать значений 2,5.

Поскольку эти режимы являются симметричными и рассчитанные для них токи превышают токи несимметричных замыканий, по которым оценивается  $k_{\text{ч}}$ , на практике иногда приходится ограничивать область применения токовых защит. Повысить чувствительность к несимметричным КЗ можно, применив адаптивный принцип построения токовой защиты от междуфазных коротких замыканий [3]. Алгоритм функционирования такой микропроцессорной защиты основан на определении режима симметричного и несимметричного КЗ с использованием формулы

$$\Delta I = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}}} \quad (3)$$

При такой реализации защиты можно контролировать момент наступления режима несимметричного повреждения и соответствующим образом автоматически уменьшать токи срабатывания ИО ступенчатой защиты.

В нормальном режиме, перегрузках, самозапуске электродвигателей и при симметричных КЗ значение  $\Delta I$  невелико и токи срабатывания ИО ступеней защиты определяются по формулам (1), (2) согласно условию отстройки от соответствующего симметричного режима. В момент наступления режима несимметричного повреждения  $I_{\text{ср}}$  ИО ступеней защиты автоматически уменьшаются. Ток срабатывания ИО ТО отстраивается от максимального значения тока несимметричного (как правило, двухфазного) КЗ в конце защищаемой линии, что приводит к уменьшению тока срабатывания ИО этой ступени:

$$I_{\text{ср}2}^I = \frac{k_{\text{отс}} k_{\text{сх}}}{n_{\text{ТТ}}} I_{\text{КЗmax}}^{(2)} \quad (4)$$

Ток срабатывания МТЗ отстраивается от максимальных нагрузочных токов  $I_{\text{нес}}$  при возникновении несимметричного режима работы в сети без учета самозапуска электродвигательной нагрузки, который является симметричным режимом и сопровождается протеканием практически одинаковых токов во всех фазах защищаемого объекта:

$$I_{\text{ср}2}^{\text{III}} = \frac{k_{\text{отс}} k_{\text{сх}}}{k_{\text{B}} n_{\text{ТТ}}} I_{\text{нес}} \quad (5)$$

Ток  $I_{\text{ср}}$  уменьшается ориентировочно в 2,5–4 раза, что приводит к значительному повышению чувствительности третьей ступени к несимметричным КЗ.

При такой реализации алгоритма функционирования микропроцессорной токовой защиты (МПТЗ) трудность заключается в определении численного значения  $\Delta I$ , которое должно сравниваться с заданным заранее значением. При симметричном КЗ имеем  $\Delta I \rightarrow 0$ , при несимметричном –  $\Delta I \rightarrow 1$ . Для определения величины  $\Delta I$ , обеспечивающей надежность определения несимметричного режима, использована математическая модель электрической сети (рис. 1).

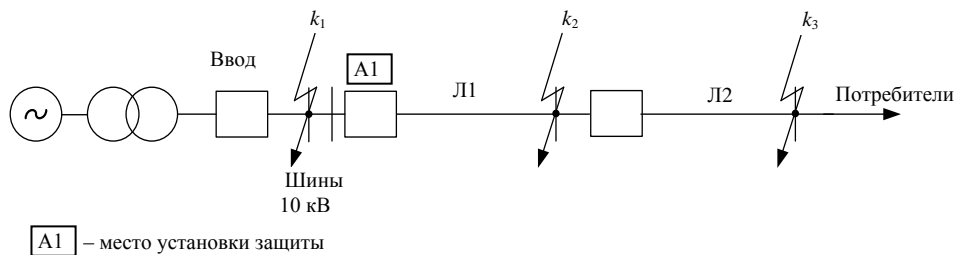


Рис. 1. Схема электрической сети

В результате вычислительного эксперимента получены (рис. 2) зависимости  $\Delta I(t)$  для различных видов КЗ (трех- и двухфазных) в трех разных точках электрической сети ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ).

Анализ полученных результатов показывает, что  $\Delta I$  не превышает значений 0,49 (точка  $k_1$  – трехфазное короткое замыкание  $ABC$ ) при симметричных замыканиях, а при несимметричных замыканиях минимальное значение равно 0,73 в установившемся режиме (точка  $k_3$  – двухфазное короткое замыкание  $BC$ ). То есть, реализуя в микропроцессорной защите описанный выше принцип адаптивности, можно задать значение  $\Delta I$ , равное 0,72–0,75, и при превышении данного порога изменять уставки, добиваясь тем самым повышения чувствительности.

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 (1) и (2). В случае, когда в сети преобладает электродвигательная нагрузка, можно составить схему замещения, соответствующую особенностям местной электроустановки, и произвести расчет несимметричных режимов для конкретных местных условий, определив таким образом по (4), (5) уставки для второй группы, которые будут обрабатываться адаптивной МПТЗ при несимметричных КЗ.

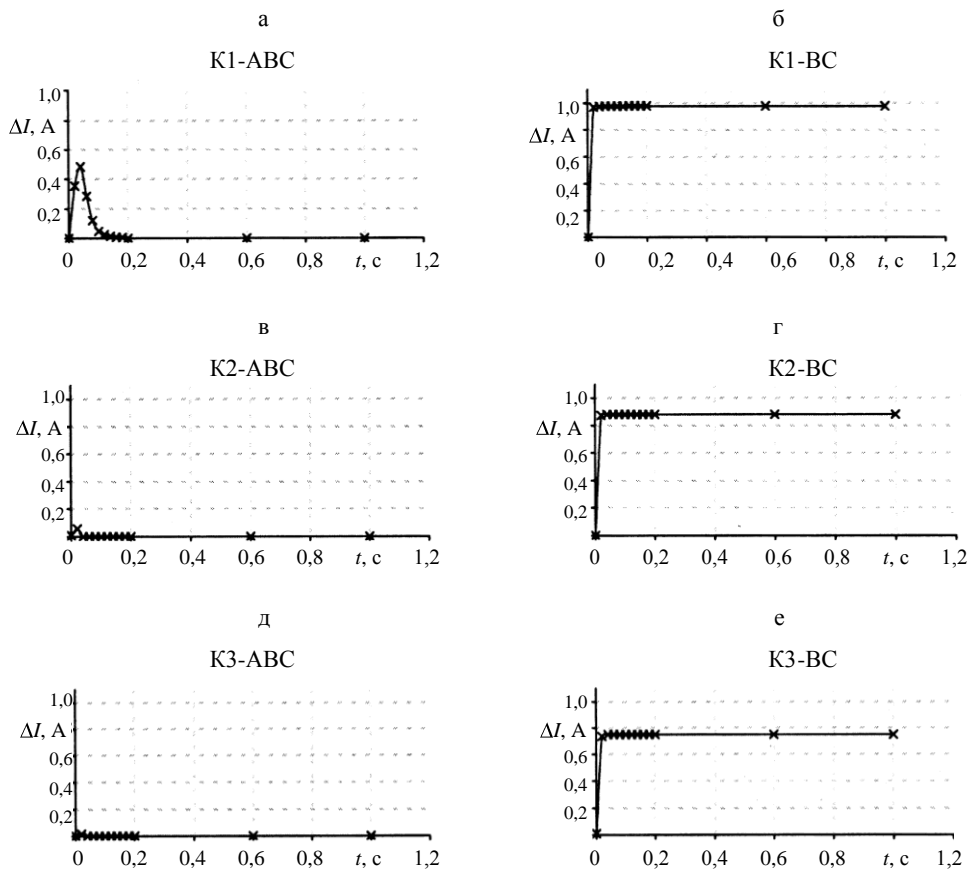


Рис. 2. Зависимость  $\Delta I(t)$ : а – трехфазное КЗ в точке  $k_1$ ; б – двухфазное КЗ в точке  $k_1$ ; в – трехфазное КЗ в точке  $k_2$ ; г – двухфазное КЗ в точке  $k_2$ ; д – трехфазное КЗ в точке  $k_3$ ; е – двухфазное КЗ в точке  $k_3$

Второй подход может быть следующим: в алгоритме функционирования вводится коэффициент  $k$ . Его значение принимается равным единице в том случае, если для сети, в которой устанавливается защита, принцип адаптивности не применяется. Значение, отличное от единицы, вводится для пересчета уставок в случаях, когда используется принцип адаптивности для улучшения чувствительности. Так, для несимметричного повреждения значение тока срабатывания МПТЗ будет приниматься

$$I_{\text{ср2}}^{\text{III}} = k I_{\text{ср1}}^{\text{III}}, \quad (6)$$

где  $I_{\text{ср1}}^{\text{III}}$  – ток срабатывания защиты, рассчитанный по (2).

Приведенный на рис. 3 график был получен в результате вычислительного эксперимента, учитывающего второй подход при реализации алгоритма функционирования защиты. Коэффициент  $k$  (6) в этом случае был принят равным 0,87. Такое значение  $k$  в данном случае определяется тем, что на практике при расчетах токов короткого замыкания ток двухфазного КЗ в определенной точке схемы замещения электрической сети принимается равным 0,87 тока трехфазного КЗ в той же точке. В общем случае коэффициент  $k$  может быть различным для каждой из ступеней защиты и определяется по следующим формулам:

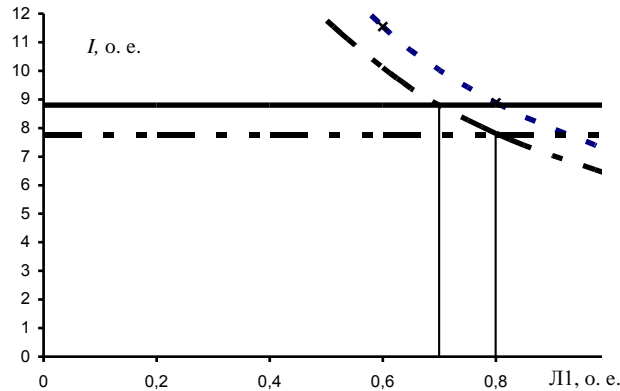


Рис. 3. Зависимость вторичного тока КЗ от длины линии Л1: ----- – ток трехфазного КЗ; - - - - - ток двухфазного КЗ; ———— – токи срабатывания первой ступени МПТЗ при всех видах КЗ и адаптивной МПТЗ при симметричном КЗ; - - - - - ток срабатывания первой ступени адаптивной МПТЗ при двухфазном КЗ

$$k^{\text{I}} = \frac{I_{\text{ср2}}^{\text{I}}}{I_{\text{ср1}}^{\text{I}}}; \quad (7)$$

$$k^{\text{III}} = \frac{I_{\text{ср2}}^{\text{III}}}{I_{\text{ср1}}^{\text{III}}}. \quad (8)$$

Из графика на рис. 3 видно, что при трехфазном КЗ на линии Л1 (рис. 1) токи срабатывания МПТЗ и адаптивной МПТЗ одинаковы и равны  $I_{\text{ср1}}^{\text{I}}$ . При

двухфазном КЗ ток срабатывания МПТЗ остается прежним, а ток срабатывания адаптивной МПТЗ уменьшается и составляет  $I_{\text{ср}2}^I = 0,87I_{\text{ср}1}^I$ . Благодаря этому максимальная токовая защита линии становится более чувствительной и зона ее действия в данном случае увеличивается приблизительно на 17 %. Изменением коэффициента  $k$  в (7) можно добиться и большего увеличения чувствительности адаптивной МПТЗ.

### ВЫВОД

Рассмотренный принцип определения вида КЗ можно использовать в адаптивных микропроцессорных защитах для улучшения чувствительности релейной защиты. Это позволит снять ограничения по применению токовых защит в распределительных сетях, в которых преобладает электродвигательная нагрузка. В некоторых случаях такой принцип позволит осуществить дальнейшее резервирование фидеров защитами, установленными на вводах 10 кВ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чернобровов, Н. В. Релейная защита / Н. В. Чернобровов. – М.: Энергия, 1974. – 680 с.
2. Федосеев, А. М. Релейная защита электрических систем / А. М. Федосеев. – М.: Энергия, 1976. – 560 с.
3. Романюк, Ф. А. Принципы выполнения адаптивной микропроцессорной токовой защиты от междуфазных коротких замыканий / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, А. В. Ковалевский // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 2. – С. 11–14.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 6.06.2007