

УДК 621.316.925

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ЛИНИЯХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ В ОБЪЕМЕ ФУНКЦИЙ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ

Докт. техн. наук, проф. РОМАНИЮК Ф. А.,  
канд. техн. наук, доц. ТИШЕЧКИН А. А., инж. БУЛОЙЧИК Е. В.

*Белорусский национальный технический университет*

Основной недостаток существующих микропроцессорных токовых защит линий распределительных сетей 6–35 кВ заключается в сравнительно короткой зоне мгновенного отключения первой ступени и недостаточной чувствительности третьей ступени во многих случаях несимметричных коротких замыканий (КЗ). Это является следствием того, что токи срабатывания указанных ступеней выбираются по наиболее тяжелым условиям симметричных режимов.

При этом ток срабатывания первой ступени – токовой отсечки без выдержки времени (ТО) определяется по условию отстройки от максимального значения тока трехфазного КЗ  $I_{\text{кз max}}^{(3)}$  при повреждении в конце защищаемой линии

$$I_{\text{отс}}^I = k_{\text{отс}}^I I_{\text{кз max}}^{(3)}, \quad (1)$$

где  $k_{\text{отс}}^I$  – коэффициент отстройки.

Ток срабатывания третьей ступени – максимальной токовой защиты (МТЗ) рассчитывается по условию отстройки от токов максимальных нагрузочных режимов  $I_{\text{н max}}$  с учетом самозапуска электродвигательной нагрузки

$$I_{\text{отс}}^{\text{III}} = \frac{k_{\text{отс}}^{\text{III}} k_{\text{сз}} I_{\text{н max}}}{k_{\text{в}}}, \quad (2)$$

где  $k_{\text{в}}$  – коэффициент возврата;  $k_{\text{сз}}$  – то же самозапуска электродвигательной нагрузки.

Отмеченный недостаток существующих микропроцессорных токовых защит может быть устранен путем выявления режимов двухфазных КЗ и изменением при этом соответствующим образом токов срабатывания ступеней защиты.

Для режимов двухфазных КЗ токи срабатывания первой и третьей ступеней защиты могут быть уменьшены.

Ток срабатывания ТО можно отстроить от максимального значения тока двухфазного КЗ  $I_{кз\max}^{(2)}$  при повреждении в конце защищаемой линии

$$I_{сз}^I = k_{отс}^I I_{кз\max}^{(2)}. \quad (3)$$

При этом ток срабатывания МТЗ отстраивается от максимальных нагрузочных токов несимметричного режима работы линии  $I_{н,нес}$  без учета самозапуска электродвигательной нагрузки

$$I_{сз}^{III} = \frac{k_{отс}^{III} I_{н,нес}}{k_B}. \quad (4)$$

Благодаря уменьшению токов срабатывания ступеней расширяется зона мгновенного отключения ТО и повышается чувствительность МТЗ при несимметричных КЗ.

Выявление режимов двухфазных КЗ может осуществляться на основе контроля:

- появления в токах фаз составляющих обратной последовательности;
- относительной несимметрии токов фаз.

Реализация первого способа предполагает использование фильтров тока обратной последовательности, которые содержат частотно-зависимые элементы. Выходной сигнал этих фильтров может значительно варьироваться при эксплуатационных отклонениях частоты в энергосистеме, изменениях величин и состава высших гармоник во входных токах из-за нелинейных характеристик нагрузки, при коммутации силовых трансформаторов, вследствие насыщения трансформаторов тока и т. п. Все эти трудно учитываемые факторы отрицательно сказываются на чувствительности определения режимов двухфазных КЗ.

Сущность способа выявления указанных КЗ на основе контроля относительной несимметрии токов фаз заключается в следующем. Определяют действующие значения токов фаз линии, из которых выделяют наибольшее  $I_{\max}$  и наименьшее  $I_{\min}$  значения. По ним вычисляют относительную несимметрию

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}. \quad (5)$$

Для реализации этого способа не требуются частотно-зависимые элементы, что обеспечивает исключение влияния на его чувствительность изменений частоты и высших гармоник.

Анализ (5) показывает, что при двухфазном КЗ  $\Delta I \rightarrow 1$ , а при трехфазном –  $\Delta I \rightarrow 0$ . В результате выполненных в [1] исследований установлено, что если  $\Delta I > 0,6$ , то КЗ является двухфазным, в противном случае – трехфазным. Для режимов двухфазных КЗ в (5)  $I_{\max}$  является наибольшим током поврежденных фаз, а  $I_{\min}$  – током нагрузки  $I_n$ . С учетом этого получим

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_n}{I_{\max}} > 0,6. \quad (6)$$

Разрешив (6), будем иметь  $I_{\max}/I_{\text{н}} > 2,5$ . Это позволяет сделать вывод о том, что рассматриваемый способ обеспечивает выявление режимов двухфазных КЗ, когда токи повреждения не менее чем в 2,5 раза превосходят токи нагрузочных режимов. Вследствие этого удаленные двухфазные КЗ с токами повреждения, соизмеримыми с токами нагрузки, могут быть не выявлены.

Повышение чувствительности выявления удаленных двухфазных КЗ может быть достигнуто при учете следующих обстоятельств.

При двухфазных КЗ на контролируемой линии в неповрежденной фазе протекает только ток нагрузки  $I_{\text{н}}$ , а в поврежденных фазах ток нагрузки накладывается на ток КЗ  $I_{\text{кз}}$ , увеличивая полный ток одной фазы и уменьшая ток другой [2]. Токи нагрузки в поврежденных фазах в два раза меньше по величине и противоположны по знаку току нагрузки в неповрежденной фазе.

В режиме двухфазного КЗ на контролируемой линии наименьший из токов трех ее фаз представляет собой ток нагрузки в неповрежденной фазе  $I_{\text{н}}$ , а наибольший из указанных токов равен векторной сумме тока КЗ  $I_{\text{кз}}$  и тока нагрузки в поврежденной фазе. При этом разность наибольшего  $I_{\max}$  и наименьшего  $I_{\min}$  значений токов фаз контролируемой линии

$$I_{\max} - I_{\min} = |I_{\text{кз}} + 0,5I_{\text{н}}| - |I_{\text{н}}| \quad (7)$$

имеет достаточную величину, свидетельствующую о двухфазном КЗ на этой линии.

В случае возникновения такого же повреждения на одной из параллельных линий во всех фазах контролируемой линии протекают только токи нагрузки, зависящие от режима несимметрии. При этом разность наибольшего  $I_{\max}$  и наименьшего  $I_{\min}$  значений токов фаз контролируемой линии для наиболее неблагоприятного случая не превышает половины тока нагрузки

$$(I_{\max} - I_{\min}) \leq 0,5I_{\text{н}} \quad (8)$$

и уменьшается по мере удаления от источника питания точки повреждения на параллельной линии. Исходя из этого можно предположить, что несимметричный режим на контролируемой линии будет иметь место при

$$\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{н}}} > 0,5. \quad (9)$$

Если учесть, что при двухфазном КЗ  $I_{\text{н}} = I_{\min}$ , то на контролируемой линии они имеют место при

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\min}} > 0,5. \quad (10)$$

Анализ (10) позволяет сделать вывод, что выявление режимов двухфазных КЗ в этом случае обеспечивается при  $I_{\max}/I_{\text{н}} > 1,5$ .

При этом (10) по сравнению с (5) имеет в 1,67 раза более высокую чувствительность к двухфазным КЗ.

Определение вида КЗ в объеме функций микропроцессорных токовых защит предполагает выполнение необходимых расчетов на основе информации о токах в месте установки защиты, используемой и в алгоритме ее функционирования.

Для анализа и оценки работоспособности (10) использовалась компьютерная программа, в основу которой положена математическая модель распределительной сети 10–35 кВ [3]. Программа позволяет воспроизводить двух- и трехфазные КЗ как металлические, так и через переходное сопротивление на контролируемой линии и на смежных участках, а также на параллельной линии. Получаемые на выходе модели распределительной сети вторичные токи используются в качестве исходной информации для моделирования функций определения вида повреждения. Указанные токи предварительно обрабатываются аналоговыми и цифровыми элементами измерительного тракта, математическая модель которого включает модели входных преобразователей тока, аналоговых частотных фильтров, аналого-цифрового преобразователя и цифровых фильтров. По полученным на выходе модели токам в режиме КЗ в соответствии с (10) рассчитывается  $\Delta I$ .

В качестве оценочных параметров эффективности (10) приняты численные значения  $\Delta I$  и время определения вида КЗ в режимах повреждений с учетом различных влияющих факторов.

Время определения вида КЗ представляет собой отрезок времени от момента возникновения повреждения до момента достижения  $\Delta I$  значения 0,5 с погрешностью, не превышающей  $\pm 5\%$ .

Методом вычислительного эксперимента получены зависимости  $\Delta I(t)$  для различных видов КЗ на линии 10–35 кВ с односторонним питанием. Если  $l_* \leq 1$ , то местом КЗ является контролируемая или параллельная линия, а при  $l_* > 1$  – смежная линия.

На рис. 1 представлены зависимости  $\Delta I(t)$  при работе линии в режиме максимальной нагрузки с последующим возникновением двухфазных металлических КЗ в различных точках.

Анализ представленных зависимостей показывает, что с помощью (10) возможно четкое выявление режимов двухфазных металлических КЗ как на контролируемой, так и на смежной линии. При этом время определения повреждения на контролируемой линии зависит от его места возникновения и находится в диапазоне 0,005–0,012 с. Указанное время при таких же КЗ на смежной линии не превышает 0,025 с.

В ходе исследований определено, что в установившихся режимах трехфазных металлических КЗ как на контролируемой, так и на смежной линии относительная несимметрия  $\Delta I$  равна 0. При указанных повреждениях на головном участке контролируемой линии ( $l_* \leq 0,35$ ) в переходных режимах значения  $\Delta I$  превышают 0,5 и трехфазные КЗ кратковременно будут восприниматься как двухфазные. Время существования данной ситуации при КЗ в точке  $l_* = 0$  не превышает трех периодов промышленной частоты, уменьшаясь по мере удаления места повреждения от источника питания. При трехфазных металлических КЗ на участках, когда  $l_* > 0,35$ , значения  $\Delta I$  в переходных режимах не превышают 0,5.

Следует отметить, что кратковременная фиксация в переходных режимах трехфазных КЗ на головном участке контролируемой линии как двухфазных не будет приводить ни к ложным, ни к излишним срабатываниям токовой защиты.

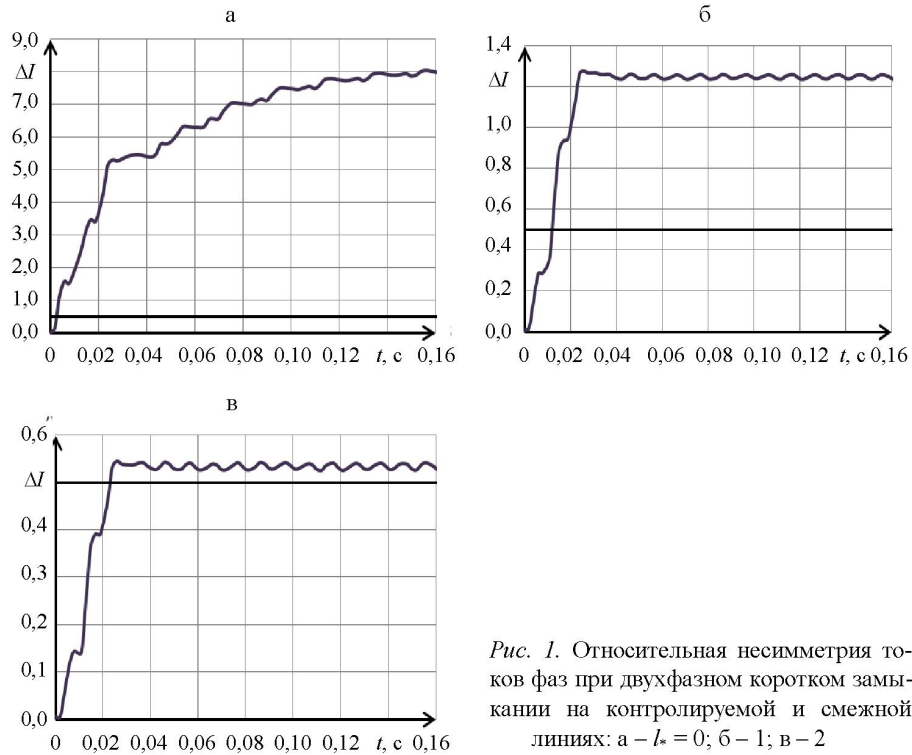


Рис. 1. Относительная несимметрия токов фаз при двухфазном коротком замыкании на контролируемой и смежной линиях: а –  $l_* = 0$ ; б – 1; в – 2

Методом вычислительного эксперимента исследовано влияние переходных сопротивлений в месте повреждения на достоверность определения вида КЗ. На рис. 2 представлены зависимости относительной несимметрии токов  $\Delta I$  от сопротивления дуги  $R_d$  отнесенного к сопротивлению линии  $Z_l$  при двухфазных КЗ на контролируемой линии. Их анализ показывает, что повреждения в начале линии ( $l_* = 0$ ) при  $R_d/Z_l \leq 8$  и в конце ( $l_* = 1$ ) при  $R_d/Z_l \leq 2,5$  фиксируются как двухфазные КЗ, а  $\Delta I$  при этом превышает значение 0,5. При двухфазных КЗ на контролируемой линии в различных точках с  $0 < l_* < 1$  и изменении  $R_d/Z_l$  от 2,5 до 8  $\Delta I$  имеет значение больше 0,5.

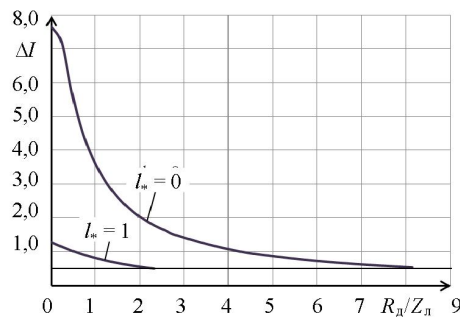


Рис. 2. Зависимость относительной несимметрии токов в фазах контролируемой линии от сопротивления дуги отнесенного к сопротивлению линии при двухфазном коротком замыкании

Следует отметить, что трехфазные КЗ на головном участке при  $0,5 < R_d/Z_{\Sigma} < 2,5$  могут восприниматься как двухфазные из-за влияния переходного сопротивления. Однако это не будет приводить к негативным последствиям в действиях токовой защиты.

В результате выполненных исследований установлено, что при изменении характера нагрузки контролируемой линии в широких пределах диапазон изменения  $\Delta I$  при различных повреждениях не превышает 0,08.

Несимметричные КЗ как металлические, так и через переходное сопротивление на параллельной линии сопровождаются появлением различной степени несимметрии по всей распределительной сети. Однако при этом, как показали результаты вычислительного эксперимента, относительная несимметрия токов фаз  $\Delta I$  контролируемой линии не превышает граничного значения 0,5.

## ВЫВОДЫ

1. Расширение зоны мгновенного отключения первой ступени и повышение чувствительности третьей ступени токовых защит линий при несимметричных КЗ могут быть обеспечены путем оперативного выявления этих режимов и изменения соответствующим образом токов срабатывания указанных ступеней.

2. Предложенный способ обеспечивает выявление удаленных двухфазных КЗ при токах повреждения, превосходящих токи нагрузочных режимов не менее чем в 1,5 раза.

3. Работоспособность метода определения вида повреждения на линиях распределительных сетей и возможность его использования в микропроцессорных токовых защитах подтверждена результатами вычислительного эксперимента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. К о в а л е в с к и й, А. В. Выбор численного значения критерия для определения вида короткого замыкания в адаптивной микропроцессорной токовой защите линий / А. В. Ковалевский // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2007. – № 5. – С. 37–41.

2. Ф е д о с е е в, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: учеб. пособие для вузов / А. М. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.

3. Р о м а н ю к, Ф. А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф. А. Романюк, В. И. Новаш. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. – 174 с.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 13.05.2011