

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЛИНИЯХ РАДИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ С ОДНОСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

Докт. техн. наук, проф. РОМАНЮК Ф. А.,
канд. техн. наук, доц. ТИШЕЧКИН А. А., асп. БУЛОЙЧИК Е. В.

Белорусский национальный технический университет

Наличие достоверной информации о месте короткого замыкания (КЗ) в сети может быть выгодно использовано для повышения технического совершенства защит линий. Если установлено, что КЗ находится на защищаемой линии, то при выполнении других условий ее отключение следует производить без выдержки времени. Когда КЗ расположено за пределами указанной линии, то она при необходимости должна отключаться с выдержкой времени. Реализация этого принципа представляется наиболее эффективной в микропроцессорных токовых защитах линий 6–35 кВ.

Определение места короткого замыкания (ОМКЗ) может быть выполнено на основе сравнения расстояния от места установки защиты до точки повреждения $l_{кз}$ с длиной защищаемой линии $l_{л}$ [1]. Если $l_{кз} \leq l_{л}$, то КЗ находится в пределах линии, в противном случае оно расположено за ее пределами.

Следует отметить, что для достоверного установления места КЗ с учетом имеющихся по различным причинам погрешностей $l_{кз}$ необходимо сравнивать не с фактической длиной линии $l_{л}$, а с ее скорректированным значением $K_k l_{л}$. Корректирующий коэффициент K_k зависит от уровня и знака погрешности определения $l_{кз}$ и может быть больше или меньше единицы.

Для получения достоверной информации о месте повреждения $l_{кз}$ необходимо вычислять с учетом вида КЗ. Так, при трехфазных КЗ вычисления следует производить для всех петель повреждения l_{AB} , l_{BC} , l_{CA} , а расстояние до места КЗ можно определить по одному из следующих выражений:

$$l_{кз} = \min \begin{cases} l_{AB}; \\ l_{BC}; \\ l_{CA}; \end{cases}$$

$$l_{кз} = \frac{1}{3}(l_{AB} + l_{BC} + l_{CA}); \quad (1)$$

$$l_{кз} = \frac{1}{2}(l_{1\min} + l_{2\min}),$$

где $l_{1\min}$, $l_{2\min}$ – два наименьших значения из трех l_{AB} , l_{BC} , l_{CA} .

При двухфазных КЗ $l_{кз}$ необходимо рассчитывать путем проведения операций с токами и напряжениями поврежденных фаз. Режимы двухфазных КЗ могут быть зафиксированы по относительной несимметрии токов [2]

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\min}} > 0,5, \quad (2)$$

где I_{\max} , I_{\min} – соответственно наибольший и наименьший из фазных токов.

При невыполнении условия (2) КЗ является трехфазным.

Для определения l_{AB} , l_{BC} , l_{CA} целесообразно использовать дистанционный принцип измерения составляющих комплексного сопротивления поврежденной петли [3]. С целью снижения влияния переходного сопротивления в месте повреждения на расчетную удаленность для соответствующей петли l_{ij} искомое расстояние необходимо вычислять по значению реактивной составляющей X_{ij} входного сопротивления

$$l_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_{уд}}, \quad (3)$$

где $X_{уд}$ – удельное реактивное сопротивление.

При неоднородной линии, когда задана информация по длине участков и удельному реактивному сопротивлению каждого из них, расстояние до места КЗ в петле можно определить при известном общем значении X_{ij} .

К алгоритму ОМКЗ предъявляются высокие требования по быстродействию, поскольку оно в значительной степени определяет быстродействие защиты. Достижение высокой точности определения $l_{кз}$ в большинстве случаев не требуется, так как ОМКЗ фиксирует место повреждения на предмет его возникновения на защищаемой линии или за ее пределами. Исключением являются отрезки, расположенные в конце защищаемой линии или вблизи на смежном участке. Существенные погрешности определения $l_{кз}$ в указанных местах могут приводить к сокращению зоны мгновенного отключения КЗ или неселективной работе защиты.

Для получения реактивных составляющих входных сопротивлений поврежденных фаз X_{ij} используется информация о токах и напряжениях, на основе которой осуществляется реализация алгоритма функционирования защиты. В микропроцессорных токовых защитах такой информацией обычно являются ортогональные составляющие (ОС) входных токов и напряжений.

При известных синусной и косинусной ОС токов i_{sij} , i_{cij} и напряжений u_{sij} , u_{cij} в поврежденной петле реактивная составляющая ее входного сопротивления вычисляется по выражению [4]

$$X_{ij} = \frac{u_{sij}i_{cij} - u_{cij}i_{sij}}{i_{sij}^2 + i_{cij}^2}. \quad (4)$$

Следует отметить, что функция ОМКЗ реализуется на временном интервале существования КЗ. При этом она запускается сработавшими измерительными органами тока последней ступени защиты.

Анализ описанного принципа ОМКЗ и оценка его работоспособности осуществлялись методом вычислительного эксперимента с ис-

пользованием компьютерной программы, в основу которой положена математическая модель радиальной распределительной сети 6–35 кВ с одним источником питания. Программа позволяет воспроизводить двух- и трехфазные КЗ как металлические, так и через переходное сопротивление на защищаемой линии и на смежных участках. Получаемые на выходе модели сети вторичные токи и напряжения являются исходной информацией для моделирования функций ОМКЗ. Указанные сигналы токов и напряжений предварительно обрабатываются аналоговыми и цифровыми элементами измерительного тракта, математическая модель которого включает модели входных преобразователей тока и напряжения, аналоговых частотных фильтров, аналого-цифрового преобразователя и цифровых формирователей ОС. По полученным на выходе модели измерительного тракта ОС токов и напряжений определяется $l_{кз}$.

В качестве оценочных параметров принципа выполнения и работоспособности ОМКЗ выбраны относительная погрешность и время определения $l_{кз}$.

Относительная погрешность определения $l_{кз}$ рассчитывается по выражению

$$\delta = \frac{l_{кз} - l_{кзф}}{l_{кзф}} \cdot 100, \quad (5)$$

где $l_{кз}$ – расчетное расстояние до места повреждения; $l_{кзф}$ – фактическое расстояние до места повреждения.

В этом случае при положительных значениях δ расчетные расстояния будут больше фактических, а при отрицательных – меньше.

Время определения $l_{кз}$, характеризующее быстродействие алгоритма ОМКЗ, представляет собой временной интервал от момента возникновения КЗ до момента времени, по истечении которого отклонение $l_{кз}$ от установившегося значения не превышает $\pm 5\%$.

На рис. 1, 2 приведены относительные погрешности δ определения $l_{кз}$ при трех- и двухфазных КЗ на линии с односторонним питанием при ее работе в режимах максимальной нагрузки и холостого хода. При этом, если $l_* \leq 1$, то местом КЗ является защищаемая линия, а при $l_* > 1$ – смежная.

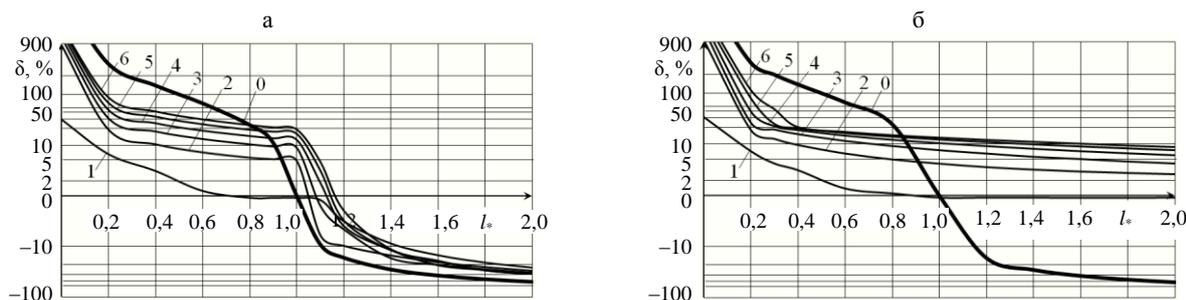


Рис. 1. Относительные погрешности определения $l_{кз}$ при трехфазных КЗ: а – режим максимальных нагрузок; б – режим холостого хода; 0 – кривая предельных погрешностей; 1 – металлические КЗ; 2, 3, 4, 5, 6 – КЗ через переходное сопротивление с $R_d = 2, 4, 6, 8, 10$ Ом соответственно

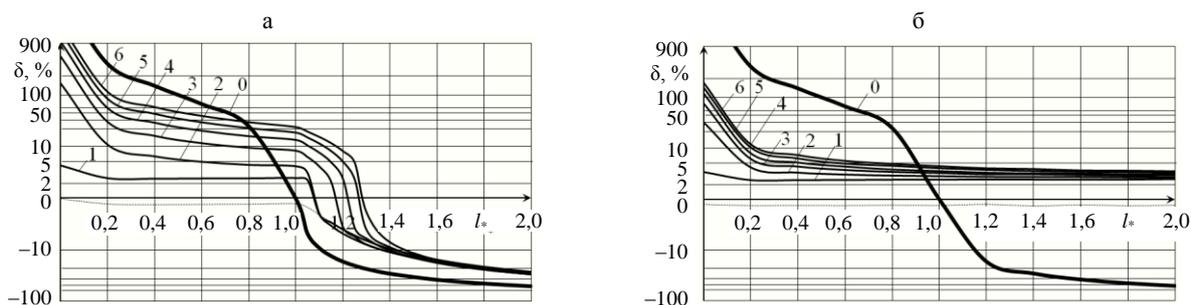


Рис. 2. Относительные погрешности определения $l_{кз}$ при двухфазных КЗ: а – режим максимальных нагрузок; б – режим холостого хода; 0 – кривая предельных погрешностей; 1 – металлические КЗ; 2, 3, 4, 5, 6 – КЗ через переходное сопротивление с $R_d = 2, 4, 6, 8, 10$ Ом соответственно

В результате выполненных методом вычислительного эксперимента исследований установлено, что при трехфазных металлических КЗ на линии при ее работе в режимах максимальной нагрузки и холостого хода обеспечивается соответственно одинаковый характер изменения погрешностей δ при определении $l_{кз}$ по любому из выражений (1). Наличие переходного сопротивления R_d в месте КЗ обуславливает различие характера изменения δ в зависимости от выбранного выражения для расчета $l_{кз}$. На основе проведенных исследований установлено, что минимальные уровни δ обеспечиваются при определении $l_{кз}$ в случае трехфазных повреждений через переходное сопротивление на линии с односторонним питанием с использованием последнего выражения (1), которое выбрано в качестве основного при выполнении всех экспериментов.

Анализ представленных на рис. 1, 2 зависимостей показывает, что характер изменения относительных погрешностей δ при различных видах повреждений примерно одинаковый. Большие по модулю значения δ имеют место в режиме максимальной нагрузки линии. При работе линии на холостом ходу погрешности δ являются положительными при КЗ как на защищаемом, так и на смежном участках.

Наличие переходного сопротивления R_d в месте повреждения обуславливает увеличение δ , и тем больше, чем выше R_d . Существенные значения δ положительного знака отмечаются при КЗ на головном участке линии ($l_* < 0,4$). Это объясняется влиянием погрешностей трансформаторов тока, которые при КЗ на указанном участке работают в режимах насыщения или близких к ним. По мере удаления точки КЗ от места установки защиты δ снижаются, могут изменить знак и возрастать по модулю при перемещении места повреждения в направлении конца смежной линии.

Представленная на рис. 1, 2 кривая предельных погрешностей 0 ($\delta_{пр} = f(l_*)$) ограничивает область допустимых значений относительных погрешностей, при которых обеспечивается достоверное ОМКЗ. При повреждениях на защищаемой линии ($l_* \leq 1$) достоверное установление места КЗ будет обеспечено, если все возможные значения δ расположены ниже кривой 0. В противном случае место КЗ будет установлено неверно и им может оказаться смежная линия. Это будет сопровождаться сокращением зоны мгновенного отключения КЗ, и повреждения на защищаемой линии будут отключаться медленно действующей ступенью. Такое вполне

возможно при повреждениях вблизи конца линии, где требуется замер $l_{кз}$ с высокой точностью ($\delta_{пр} \rightarrow 0$). Следует отметить, что реально существующие погрешности $\delta > \delta_{пр}$ на участке $l_* \leq 1$ уменьшают зону мгновенного отключения КЗ. Ее расширение в небольших пределах может быть достигнуто выбором корректирующего коэффициента $K_k > 1$. При этом для исключения неселективной работы защиты в случае КЗ на смежной линии K_k не должен превышать значения, вычисленного по выражению

$$K_k \leq \left(1 + \frac{\delta_{\min}}{100}\right), \quad (6)$$

где δ_{\min} – минимальная погрешность из области значений, находящихся выше предельной кривой 0 для различных режимов и видов повреждений на участке $l_* \leq 1$.

Следует отметить, что рассмотренное положение по выбору значения K_k не является определяющим.

При КЗ на смежной линии ($l_* > 1$) достоверное определение их места будет обеспечено при условии, что все возможные значения δ располагаются выше кривой 0. В противном случае место КЗ будет установлено неверно и им окажется защищаемая линия, что повлечет за собой неселективную работу защиты. Такое вполне возможно при повреждениях в начале смежной

линии ($l_* > 1$), где необходимо определять $l_{кз}$ с высокой точностью, поскольку $\delta_{пр} \rightarrow 0$. В этой связи реально существующие погрешности $|\delta| > |\delta_{пр}|$ при КЗ на участке $l_* > 1$ определяют зону неселективной работы защиты. Ее устранение может быть обеспечено выбором корректирующего коэффициента $K_k < 1$. Для исключения неселективной работы защиты при КЗ за пределами линии ($l_* > 1$) K_k не должен превышать значения, рассчитываемого по выражению

$$K_k \leq \left(1 - \frac{|\delta|_{\max}}{100}\right), \quad (7)$$

где $|\delta|_{\max}$ – максимальная величина модуля погрешности из области значений, находящихся ниже предельной кривой 0 для различных режимов и видов повреждений на участке $l_* > 1$.

Следует отметить, что с уменьшением K_k сокращается зона мгновенного отключения КЗ на защищаемой линии.

На рис. 3 представлены динамические характеристики алгоритма ОМКЗ, позволяющие оценить время определения места повреждения при различных режимах работы линии и видах КЗ. Их анализ свидетельствует о практически не отличающихся в количественном и качественном отношении характеристиках для режимов максимальной нагрузки и холостого хода линии при трех- и двухфазных КЗ.

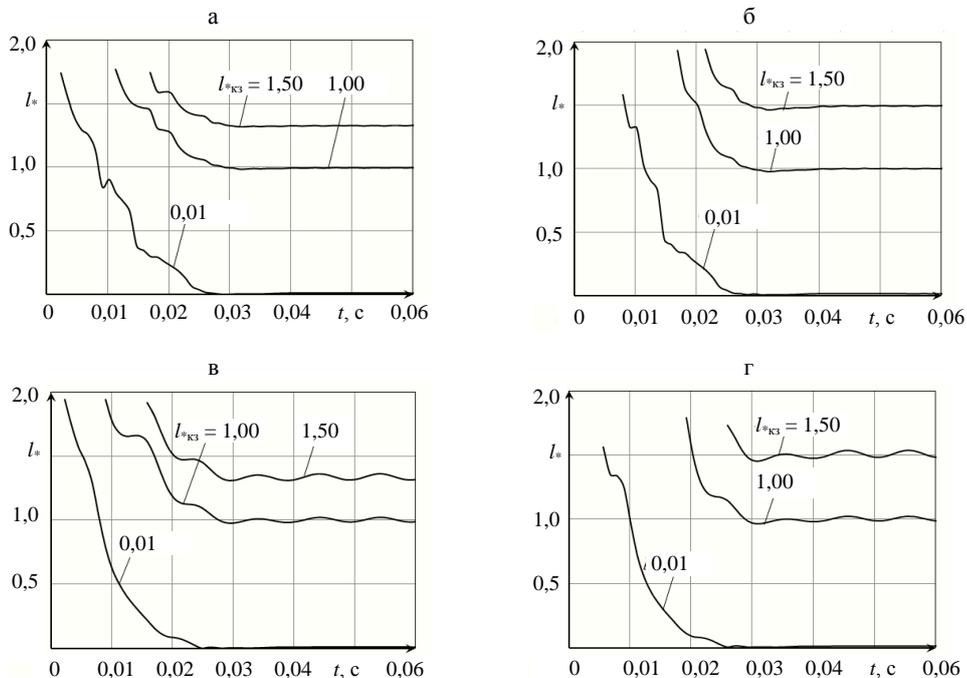


Рис. 3. Динамические характеристики алгоритма ОМКЗ в режимах максимальной нагрузки и холостого хода линии: а, б – при трехфазных КЗ; в, г – при двухфазных КЗ

Предложенный алгоритм ОМКЗ обеспечивает фиксацию места повреждения за 0,02–0,03 с как при металлических КЗ, так и через переходное сопротивление.

Расчет численных значений $I_{кз}$ с минимальными δ обеспечивается при частоте 50 Гц. Дополнительные погрешности определения $I_{кз}$ при отклонении частоты (50 ± 1) Гц могут достигать порядка $\pm 3,7$ %. Исходя из полученных методом вычислительного эксперимента уровней δ для различных режимов работы линии и видов КЗ в соответствующих точках, а также с учетом влияющих факторов для рассмотренного случая можно принять $K_k = (0,90–0,95)$.

ВЫВОДЫ

1. Реализация функции ОМКЗ в микропроцессорных токовых защитах линий с односторонним питанием позволяет расширить зону мгновенного отключения КЗ с охватом ею до 95 % длины линии.

2. Положенный в основу ОМКЗ дистанционный принцип определения расстояния до ме-

ста КЗ создает реальные предпосылки исключения зависимости зоны мгновенного отключения повреждений от режима работы распределительной сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Романюк, Ф. А.** Определение места короткого замыкания на линиях распределительных сетей в объеме функций микропроцессорных токовых защит / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, О. А. Гурьянчик // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 6. – С. 5–13.

2. **Романюк, Ф. А.** Определение вида повреждения на линиях распределительных сетей в объеме функций микропроцессорных токовых защит / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, Е. В. Булойчик // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 4. – С. 5–10.

3. **Шнеерсон, Э. М.** Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

4. **Федосеев, А. М.** Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: учеб. пособие для вузов / А. М. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.

Поступила 15.05.2012