

Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 61, № 5 (2018), с. 396–407
396 Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. V. 61, No 5 (2018), pp. 396–407

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-396-407>

УДК 621.316.925

Определение зоны повреждения по уровню токов короткого замыкания

Ф. А. Романюк¹⁾, Е. В. Булойчик¹⁾, М. А. Шевалдин¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Рассмотрены методы определения зоны повреждения по параметрам аварийного режима, которые могут быть использованы для улучшения показателей технического совершенства токовых защит линий распределительных сетей 6–10 кВ с односторонним питанием. Отмечено преимущество алгоритма определения зоны короткого замыкания (КЗ) по уровню аварийных токов по сравнению с дистанционным односторонним методом по параметрам поврежденной петли (петель). Предложено производить вычисление расчетной удаленности места КЗ на основе разностей токов поврежденных фаз, что обеспечивает независимость полученного результата от вида повреждения. Предложен способ повышения достоверности метода определения зоны короткого замыкания по уровню аварийных токов на основе информации о виде повреждения. Методом вычислительного эксперимента исследовано влияние нагрузочных токов и переходных сопротивлений различного уровня на величину и характер изменения погрешностей определения расчетного расстояния до места короткого замыкания. Определены уровни переходных сопротивлений относительно полного сопротивления линии в зависимости от места возникновения КЗ, при которых обеспечивается достоверное установление зоны повреждения, показано, что характер их изменения примерно одинаков для линий средней и большой длины. Показана целесообразность коррекции расчетного расстояния до места повреждения во многих случаях коротких замыканий через переходное сопротивление для повышения защитоспособности быстродействующей ступени токовой защиты. По результатам вычислительного эксперимента получены поправочные коэффициенты для коррекции величины аварийного тока, на основе которого производится определение зоны повреждения. Выполнена оценка работоспособности предложенного способа коррекции, показано, что его применение позволяет повысить достоверность определения зоны повреждения и расширить зону мгновенного отключения КЗ. Исследованы динамические свойства предложенного алгоритма для различных режимов работы линии. Установлено, что в наихудшем случае обеспечивается определение зоны короткого замыкания за время, не превышающее 27 мс.

Ключевые слова: линия электропередачи, токовая защита, техническое совершенство, зона короткого замыкания, относительная несимметрия, переходное сопротивление, быстродействие

Для цитирования: Романюк, Ф. А. Определение зоны повреждения по уровню токов короткого замыкания / Ф. А. Романюк, Е. В. Булойчик, М. А. Шевалдин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 5. С. 396–407. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-396-407>

Адрес для переписки

Романюк Федор Алексеевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-00-51
faromanuk@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Fiodar A.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-00-51
faromanuk@bntu.by

Determination of the Fault Zone by the Level of Short-Circuit Currents

F. A. Romaniuk¹⁾, E. V. Buloichyk¹⁾, M. A. Shevaldin¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The methods of determination the fault zone according to the parameters of the emergency mode, which can be used to improve the performance of technical perfection of current protection lines of distributive 6–10 kV one-way power networks, are considered. The advantage of the algorithm of determination the zones of short circuit (SC) according to the level of emergency currents as compared to the remote unilateral method addressing the parameters of the damaged loop corrupted loops (loops) is noted. Calculation of the estimated distance to the point of SC on the basis of difference of damaged phase currents has been proposed, that enables the independence of the obtained result on the type of the fault. A technique for increasing the reliability of the method for determination the short-circuit zone by the level of emergency currents based on information about the type of damage has also been proposed. The effect of load currents and contact resistances of different levels on the magnitude and nature of the changes in the errors of the calculated distance to the short circuit was investigated by the method of computational experiment. The levels of contact resistances relative to the total resistance of the line depending on the place of SC occurrence are determined that provides reliable determination of the fault zone; it is demonstrated that the nature of their alteration is approximately the same for lines of medium and long length. The expediency of correction of the calculated distance to the fault location in many cases of short circuits through the contact resistance so to improve the protection capacity of the high-speed current protection stage is demonstrated. Based on the results of the computational experiment, correction factors for the correction of the value of the emergency current have been obtained; on the basis of the latter the fault zone is determined. The estimation of efficiency of the proposed method of correction has been carried out; it is shown that its application makes it possible to improve the accuracy of determination the fault zone and to expand the zone of instantaneous shutdown of short circuit. The dynamic properties of the proposed algorithm for different modes of the line operation have been investigated; it is ascertained that, in the worst case, the determination of the short circuit zone for a time not exceeding 27 ms is provided.

Keywords: power line, overcurrent protection, technical excellence, short circuit zone, relative asymmetry, contact resistance, speed performance

For citation: Romaniuk F. A., Buloichyk E. V., Shevaldin M. A. (2018) Determination of the Fault Zone by the Level of Short-Circuit Currents. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (5) 396–407. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-396-407> (in Russian)

Введение

Функция определения зоны короткого замыкания (КЗ) по параметрам аварийного режима может быть использована в токовых ступенчатых защитах линий 6–10 кВ с односторонним питанием для повышения их технического совершенства. Так, для быстродействующей (первой) ступени токовой защиты, выполняющей функции токовой отсечки без выдержки времени (ТО), ток срабатывания выбирается из условия ее недействия в конце защищаемого участка [1, 2]. Данное обстоятельство обуславливает ограниченность зоны мгновенного отключения ТО, которая зависит от вида повреждения, режима работы сети и сокращается при наличии переходного сопротивления в месте повреждения, вследствие чего рассматривае-

мая ступень может стать неэффективной [2–5]. Введение в алгоритм функционирования токовой защиты функции определения зоны короткого замыкания позволяет уменьшить влияние отмеченных выше факторов и в ряде случаев добиться большей защитоспособности быстродействующей ступени.

Определение зоны короткого замыкания

В [3, 4] предложены методы определения зоны короткого замыкания на основе одностороннего дистанционного метода по параметрам поврежденной петли (петель). Место повреждения устанавливается путем сравнения расчетного расстояния $l_{*к}$ до точки КЗ, вычисленного по реактивной составляющей комплексного сопротивления поврежденной петли или петель, с длиной контролируемой линии. Метод обеспечивает расширение зоны мгновенного отключения до 95 % длины линии и повышает эффективность первой ступени при КЗ через переходное сопротивление, однако требует наличия цепей напряжения, что усложняет защиту и вызывает необходимость предусматривать контроль их исправности для исключения неправильных действий защиты в случае их нарушения. Поэтому в ряде случаев представляется целесообразным определять зону короткого замыкания и вычислять $l_{*к}$ только по уровню аварийных токов. Этот подход, предложенный в [5, 6], может применяться в сетях 6–10 кВ при наличии воздушных линий, питающих агропромышленную нагрузку. Отличительной особенностью таких линий является сравнительно большая протяженность при малом сечении проводов. Это обуславливает резкое изменение уровня тока КЗ по мере удаления точки повреждения от источника питания. Метод требует предварительного расчета токов трехфазного КЗ в контрольных точках, а для достоверного определения зоны повреждения при несимметричных КЗ в выражение для расчета $l_{*к}$ вводится коэффициент, величина которого выбирается в зависимости от вида короткого замыкания [6]:

$$l_{*к} = \frac{(kI_{к1}^{(3)} - I_{к2}^{(3)})I_{к2}^{(3)}}{(I_{к1}^{(3)} - I_{к2}^{(3)})I_{к}}, \quad (1)$$

где $I_{к1}^{(3)}$, $I_{к2}^{(3)}$ – рассчитанные по известным методикам токи трехфазного КЗ в начале ($I_{к1}^{(3)}$) и конце ($I_{к2}^{(3)}$) защищаемой линии; $I_{к}$ – среднее из двух или трех значений токов поврежденных фаз; k – коэффициент, учитывающий вид повреждения, $k^{(3)} = 1$, $k^{(2)} = \sqrt{3}/2$.

Как справедливо отмечено в [7], при двухфазных КЗ действующее значение разности токов поврежденных фаз будет наибольшим из трех петель AB , BC , CA и равным $\sqrt{3}I_{к}^{(3)}$. Для трехфазных КЗ для всех петель повреждения $I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = \sqrt{3}I_{к}^{(3)}$. С учетом этого обстоятельства из выражения (1) можно исключить коэффициент k и определять расчетную удаленность до точки короткого замыкания независимо от его вида

$$l_{*к} = \frac{(I_{кн} - I_{к})I_{кк}}{(I_{кн} - I_{кк})I_{к}}, \quad (2)$$

где $I_{кн}$, $I_{кк}$ – токи трехфазного КЗ в начале и конце защищаемой линии, умноженные на $\sqrt{3}$; $I_{к}$ – текущее значение тока КЗ, определяемое как наибольшее из действующих значений разностей фазных токов.

Алгоритм определения зоны повреждения для повышения его достоверности следует организовывать следующим образом:

– определяется расчетная удаленность до точки повреждения $l_{*к}$ согласно (2);

– если $l_{*к} \leq 1$, то короткое замыкание находится на защищаемой линии и расстояние до точки повреждения в именованных единицах может быть определено как

$$l_{к} = l_{*к}l_{л1}, \quad (3)$$

где $l_{л1}$ – фактическая длина защищаемой линии в именованных единицах;

– если $l_{*к} > 1$, то повреждение находится на смежной линии и для расчета расстояния от ее начала до места КЗ в (2) вместо $I_{кн}$ и $I_{кк}$ в начале и конце защищаемой линии подставляются соответствующие токи в начале и конце смежной линии;

– если $l_{*к} < 0$, то повреждение фиксируется на контролируемой линии, в противном случае общее расстояние от начала участка до места повреждения определяется по выражению

$$l_{к} = l_{л1} + l_{*к}l_{л2}, \quad (4)$$

где $l_{л2}$ – фактическая длина смежной линии в именованных единицах.

На достоверность определения зоны КЗ оказывает влияние множество факторов [3, 8], в том числе величина нагрузочных токов и переходного сопротивления в месте повреждения. На примере воздушных линий 10 кВ разной длины (10 и 15 км) при трех- и двухфазных КЗ в режимах холостого хода и с нагрузкой на рис. 1 показаны зависимости $R_{п}/Z_{л} = f(l_{*к})$ величины переходного сопротивления, отнесенного к полному сопротивлению защищаемой линии, от расстояния до точки повреждения, при которых зона короткого замыкания может быть установлена достоверно.

По результатам предварительных вычислительных экспериментов можно утверждать, что погрешности определения $l_{*к}$ при наличии переходного сопротивления в месте КЗ и по мере его увеличения будут возрастать независимо от вида повреждения и режима работы линии. Короткие замыкания через переходное сопротивление даже при малой его величине вблизи конца защищаемой линии будут восприниматься как внешние, причем чем ближе точка повреждения к концу участка, тем при меньших величинах $R_{п}$ зона КЗ будет установлена достоверно. Заметное влияние на величину допустимого переходного сопротивления оказывает вид короткого замыкания. Влияние величины нагрузочного тока ощутимо сказывается

при близких КЗ и снижается по мере удаления точки повреждения от места установки защиты.

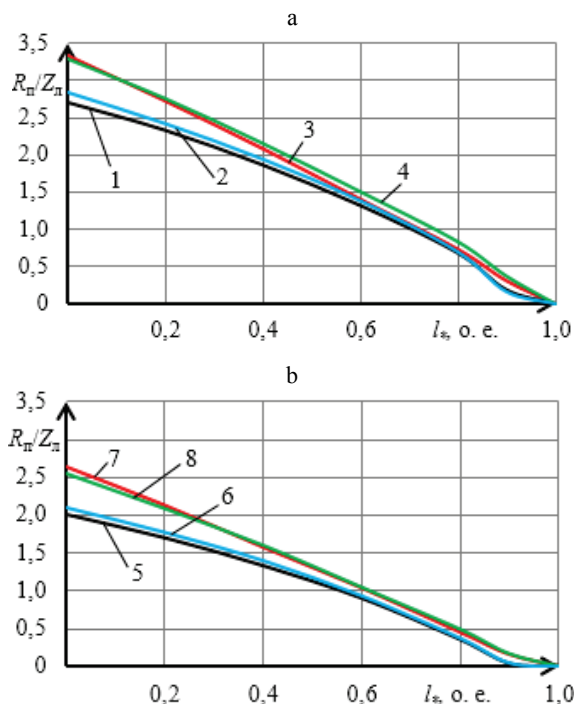


Рис. 1. Относительная величина переходного сопротивления, при которой обеспечивается достоверное установление зоны повреждения при трехфазных (а) и двухфазных (б) коротких замыканиях в режиме холостого хода (1, 2, 5, 6) и нагрузочном режиме (3, 4, 7, 8): 1, 3, 5, 7 – для линии длиной 15 км; 2, 4, 6, 8 – для линии длиной 10 км

Fig. 1. The relative magnitude of the contact resistance that provides the reliable determination the fault zone for three-phase (a) and two-phase (b) short circuits in the idle mode (1, 2, 5, 6) and load mode (3, 4, 7, 8): 1, 3, 5, 7 – for a line of 15 km long; 2, 4, 6, 8 – for a line of 10 km long

Удовлетворительные погрешности определения расчетной удаленности при КЗ в конце контролируемого и начале смежного участков, не приводящие к значительному сокращению зоны мгновенного отключения или неселективному действию защиты, могут быть получены при отсутствии R_n или относительно малых его значениях. Таким образом, в ряде случаев для повышения эффективности быстродействующей ступени токовой защиты целесообразно выполнять коррекцию расчетного расстояния до места повреждения. При этом осуществлять ее можно путем коррекции в (2) как текущего значения аварийного тока, так и предварительно рассчитанных и заданных токов КЗ в контрольных точках.

Для определения зоны повреждения по (2) не требуется выявление его вида, однако эта информация может быть использована для выполнения коррекции расчетной удаленности $l_{*к}$. При этом распознавание вида КЗ

производится на основе двух относительных несимметрий разностей фазных токов линий ΔI_1 и ΔI_2 согласно [9]:

$$\Delta I_1 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\min}}; \quad (5)$$

$$\Delta I_2 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{mid}} - I_{\min}}, \quad (6)$$

где I_{\max} , I_{mid} , I_{\min} – наибольшее, среднее и наименьшее действующие значения разностей фазных токов линии.

Путем анализа результатов большого количества вычислительных экспериментов были получены выражения для расчета поправочных коэффициентов и определены условия их применения, позволяющие как удовлетворить требованию селективного действия токовой отсечки без выдержки времени, так и установить зону повреждения с приемлемой достоверностью и обеспечить повышение защитоспособности быстродействующей ступени защиты. Для определения случаев, когда необходимо вводить коррекцию, достаточно контролировать по уровню только относительную несимметрию ΔI_1 , рассчитанную согласно (5).

Характер изменения $R_{\text{п}}/Z_{\text{л}} = f(l^*)$ для линий разной длины в идентичных условиях примерно одинаков (рис. 1), что позволяет рассматривать предлагаемый алгоритм как универсальный для линий 6–10 кВ средней и большой длины.

Определение корректирующих коэффициентов

Расчетная удаленность до точки повреждения при условии, когда коррекции подвергается текущее значение тока короткого замыкания, определяется как

$$l_{*к} = \frac{(I_{\text{кн}} - I_{\text{к}} K_{\text{п}}) I_{\text{кк}}}{(I_{\text{кн}} - I_{\text{кк}}) I_{\text{к}} K_{\text{п}}}, \quad (7)$$

где $I_{\text{кн}}$, $I_{\text{кк}}$, $I_{\text{к}}$ – то же, что и в (2); $K_{\text{п}}$ – поправочный коэффициент.

При металлических двухфазных КЗ на нагруженной линии и относительно малых значениях переходного сопротивления, когда уровень относительной несимметрии разностей фазных токов $\Delta I_1 \geq 0,95$, необходимость в коррекции отсутствует и $K_{\text{п}} = 1$. При $\Delta I_1 < 0,95$ независимо от уровня ΔI_2 поправочный коэффициент определяется по выражению

$$K_{\text{п}} = 2 - \Delta I_1, \quad (8)$$

где ΔI_1 – уровень относительной несимметрии, определяемый по (5).

Следует отметить, что для несимметричных КЗ на ненагруженной линии любого рода коррекция на основе относительной несимметрии то-

ков ΔI_1 не представляется возможной, так как независимо от уровней переходных сопротивлений и месторасположения повреждения ΔI_1 практически не изменяется ($\Delta I_1 = 1$), а использовать с этой целью относительную несимметрию ΔI_2 не позволяет значительный разброс ее значений [9]. При этом в указанном режиме принятое выражение для поправочного коэффициента не повлияет на результат расчета $I_{*к}$, что исключает необходимость выявления вида нагрузочного режима для обеспечения достоверного установления зоны короткого замыкания.

При металлических трехфазных КЗ и относительно малых значениях переходных сопротивлений, когда уровень относительной несимметрии разностей фазных токов $\Delta I_1 < 0,14$, необходимость в коррекции отсутствует и $K_{\Pi} = 1$. В противном случае, когда $\Delta I_1 \geq 0,14$, независимо от уровня ΔI_2 поправочный коэффициент определяется как

$$K_{\Pi} = \frac{I_{AB} + I_{BC} + I_{CA}}{3I_{\min}}, \quad (9)$$

где I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} – действующее значение разностей фазных токов; I_{\min} – наименьшее из них.

Принятый способ коррекции работоспособен при трехфазных КЗ как на нагруженной, так и на ненагруженной линиях.

Результаты исследования работоспособности метода

Исследование работоспособности предложенного алгоритма с учетом погрешностей, вносимых измерительными преобразователями тока, проводилось методом вычислительного эксперимента посредством программного комплекса, реализующего математическую модель радиальной сети напряжением 6–10 кВ с изолированной нейтралью и односторонним питанием [10, 11]. Предельное значение переходного сопротивления $R_{\Pi}/Z_{\Pi} = 3$, при котором проверялось поведение алгоритма, принято исходя из условия удовлетворения требуемой чувствительности последней (в общем случае третьей) медленнодействующей ступени (максимальная токовая защита), которая по уровню тока срабатывания отстраивается от наибольшего рабочего тока с учетом самозапуска электродвигательной нагрузки.

Оценка способа повышения достоверности определения зоны КЗ по уровню аварийных токов производилась по следующим показателям:

– относительная погрешность δ определения расчетного расстояния до точки повреждения позволяет оценить сокращение зоны мгновенного отключения в различных режимах работы сети и видах КЗ, определить пределы работоспособности метода и критерии обеспечения селективного действия защиты при одновременном сохранении эффективности быстродействующей ступени в неблагоприятных условиях. Определяется по выражению

$$\delta = \frac{l_{*к} - l_{*ф}}{l_{*ф}} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где $l_{*ф}$ – фактическое расстояние до места повреждения;

– время установления зоны повреждения – быстродействие метода является одним из решающих факторов, так как предложенный алгоритм рассматривается как способ повышения защитоспособности первой ступени токовой защиты, работающей без выдержки времени.

Анализ работоспособности метода при двухфазных КЗ выполнялся для нагруженного режима, так как при несимметричном повреждении на ненагруженной линии коррекция не производится. Следует отметить, что при этом зона мгновенного отключения составляет не менее 90 % длины линии при металлических коротких замыканиях и сокращается до 58 % при $R_{п}/Z_{л} = 1$. Быстродействующая ступень считается эффективной, если охватывает не менее 20 % длины линии [2], зона мгновенного отключения коротких замыканий на ненагруженной линии удовлетворяет этому условию при изменении переходного сопротивления в месте повреждения вплоть до $R_{п}/Z_{л} \leq 1,72-1,75$ (рис. 1b, зависимости 5, 6).

При трехфазных КЗ коррекция расчетного расстояния $l_{*к}$ производится независимо от режима работы линии. Однако короткие замыкания через переходное сопротивление на ненагруженной линии характеризуются меньшими погрешностями определения $l_{*к}$, чем аналогичные повреждения при наличии тока нагрузки. При отсутствии переходного сопротивления в месте короткого замыкания и относительно малых его значениях погрешности определения расчетной удаленности могут иметь отрицательный знак, в том числе при КЗ в конце защищаемой линии, где, с точки зрения обеспечения селективности действия ТО и сокращения зоны мгновенного отключения, точность определения $l_{*к}$ особенно важна. При повреждении в конце контролируемой линии в режиме холостого хода и относительно малых $R_{п}$ указанные погрешности меньше по абсолютному значению. По этим соображениям нагруженный режим был выбран для анализа работоспособности предложенного алгоритма как наиболее тяжелый. Отметим только, что при изменении относительной величины переходного сопротивления в пределах $R_{п}/Z_{л} = 0-3$ зона мгновенного отключения трехфазных КЗ на ненагруженной линии будет составлять не менее 95–70 % соответственно. Для сравнения, при отсутствии коррекции $l_{*к}$ зона действия быстродействующей ступени снижается до 20 % уже при $R_{п}/Z_{л} = 2,3-2,4$ (рис. 1a, зависимости 1, 2).

Зависимости $\delta = f(l^*)$ при трех- и двухфазных КЗ на нагруженной линии, построенные с учетом предложенного способа коррекции по результатам вычислительного эксперимента, представлены на рис. 2, 3. Место повреждения фиксируется на защищаемой линии при $l^* \leq 1$, в противном случае – на смежной. Зависимость 1 (рис. 2, 3) представляет собой кривую предельных погрешностей δ_{\max} , ограничивающую диапазон допустимых значений δ , при которых место повреждения будет установлено достовер-

но. Для этого необходимо выполнение условий: при КЗ в пределах контролируемой линии значения относительных погрешностей должны лежать ниже кривой 1, а при внешних КЗ – выше.

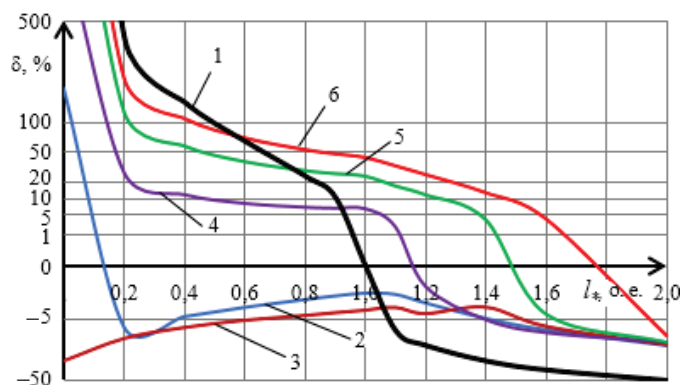


Рис. 2. Относительные погрешности определения $l_{*к}$ при трехфазных коротких замыканиях (КЗ): 1 – кривая предельных погрешностей; 2 – металлические КЗ; 3, 4, 5, 6 – КЗ через переходное сопротивление с $R_{п}/Z_{л} = 0,5; 1; 2; 3$

Fig. 2. Relative errors of determination of $l_{*к}$ for three-phase short circuits (SC): 1 – curve of limit errors; 2 – metal SC; 3, 4, 5, 6 – short circuit through contact resistance with $R_{п}/Z_{л} = 0,5; 1; 2; 3$

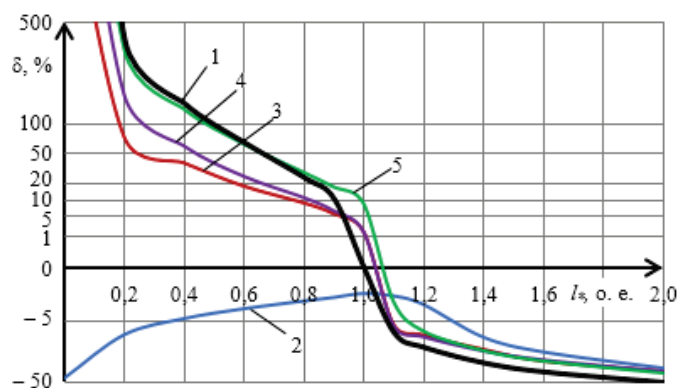


Рис. 3. Относительные погрешности определения расчетной удаленности точки повреждения при двухфазных коротких замыканиях:

1, 2, 3, 4, 5 – то же, что на рис. 2

Fig. 3. Relative error of determination of the calculated distance to fault points for two-phase short circuits: 1, 2, 3, 4, 5 – the same as in fig. 2

С ростом величины переходного сопротивления в месте повреждения погрешности определения $l_{*к}$ возрастают. Для металлических КЗ независимо от их вида характерно занижение расчетной удаленности точки повреждения как в пределах защищаемой линии, так и на смежной. То же можно сказать и про трехфазные КЗ с малым переходным сопротивлением ($R_{п}/Z_{л} < 1$), за исключением повреждений, близких к месту установки защиты. Зависимости $\delta = f(l_{*к})$ при двухфазных КЗ через переходное сопро-

тивление $R_{\text{п}}/Z_{\text{л}} \geq 0,5$ и трехфазных с $R_{\text{п}}/Z_{\text{л}} \geq 1$ носят аналогичный характер. При этом для коротких замыканий в пределах защищаемой линии характерно завышение $I_{*к}$ и, как следствие, сокращение зоны мгновенного отключения, а при $l_* \geq 1$ – завышение при близких и занижение при удаленных КЗ, но на величину, не превышающую δ_{max} .

Степень занижения расчетной удаленности в наихудшем случае при КЗ в конце защищаемой линии не превышает 5 %, что позволяет принять пороговое относительное значение фактической длины линии, путем сравнения с которым фиксируется зона повреждения, $l_{*п,ф} = 0,90-0,95$.

При трехфазных металлических КЗ на нагруженной линии $\Delta I_1 < 0,14$ и коррекция не производится, а зона мгновенного отключения с учетом имеющихся по тем или иным причинам погрешностей составляет до 95 % длины линии. При изменении переходного сопротивления в диапазоне $R_{\text{п}}/Z_{\text{л}} = 0,5-3,0$ зона мгновенного отключения охватывает до 95–56 % линии (рис. 2). При отсутствии коррекции и тех же величинах $R_{\text{п}}/Z_{\text{л}}$ зона действия токовой отсечки без выдержки времени сокращается до 74–12 % соответственно, а наибольшее значение переходного сопротивления, при котором ТО считается эффективной, $R_{\text{п}}/Z_{\text{л}} = 2,73$ (рис. 1а, зависимости 3, 4).

При двухфазных металлических КЗ на нагруженной линии и отсутствии коррекции ($\Delta I_1 \geq 0,95$) зона действия быстродействующей ступени охватывает не менее 90 % линии, а при $R_{\text{п}}/Z_{\text{л}} = 0,5-1,0$ до 90 % (рис. 3, зависимости 3, 4). При $R_{\text{п}}/Z_{\text{л}} = 2,0$ зона мгновенного отключения составляет до 63 % (рис. 3, зависимость 5). При тех же уровнях переходного сопротивления, но в случае отсутствия коррекции, зона действия ТО составляет порядка: 79 % – при $R_{\text{п}}/Z_{\text{л}} = 0,5$; 62 % – при $R_{\text{п}}/Z_{\text{л}} = 1$; 24 % – при $R_{\text{п}}/Z_{\text{л}} = 2$ (рис. 1б, зависимости 7, 8).

Динамические характеристики алгоритма определения зоны КЗ, представлены на рис. 4.

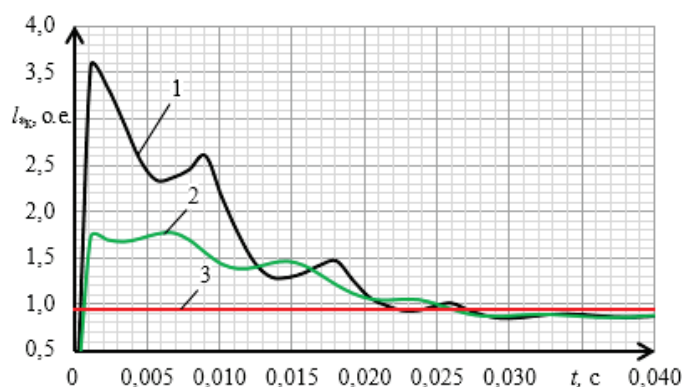


Рис. 4. Динамические характеристики алгоритма определения зоны коротких замыканий: 1 – трехфазное КЗ; 2 – двухфазное КЗ; 3 – принятое пороговое значение $I_{*п,ф} = 0,95$

Fig. 4. Dynamic characteristics of the short circuit zones determination algorithm: 1 – three-phase CS; 2 – two-phase CS; 3 – accepted threshold value $I_{*п,ф} = 0.95$

Эти характеристики позволяют оценить быстродействие предложенного метода, которое численно может быть определено как интервал времени от момента возникновения короткого замыкания и до момента времени, когда расчетная удаленность $l_{*к}$ достигнет принятого по результатам вычислительного эксперимента порогового значения $l_{*н,ф} = 0,95$.

Согласно приведенным динамическим характеристикам, которые построены для наихудшего случая, когда быстродействие алгоритма минимально, предложенные решения позволяют установить зону повреждения при двух- и трехфазных КЗ за время, не превышающее 27 мс.

ВЫВОДЫ

1. Зона повреждения на линиях 6–10 кВ с односторонним питанием при металлических коротких замыканиях независимо от их вида может быть установлена с приемлемой достоверностью путем контроля разностей токов коротких замыканий поврежденных фаз.

2. Достоверность определения зоны короткого замыкания по уровню аварийных токов при наличии переходных сопротивлений может быть повышена за счет применения поправочных коэффициентов, полученных по результатам большого числа вычислительных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1992. 528 с.
2. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 800 с.
3. Повышение достоверности определения зоны короткого замыкания на линиях 6–35 кВ / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-5-14>.
4. Романюк, Ф. А. Определение места короткого замыкания на линиях радиальных сетей с односторонним питанием / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, Е. В. Булойчик // Наука и техника. 2012. № 4. С. 69–73.
5. Романюк, Ф. А. Определение места повреждения на линиях напряжением 6–35 кВ с односторонним питанием / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 5. С. 5–14.
6. Романюк, Ф. А. Принципы выполнения токовой защиты линий с односторонним питанием от междуфазных коротких замыканий / Ф. А. Романюк, М. А. Шевалдин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 1. С. 5–11.
7. Analysis of an Adaptive Overcurrent Relay for Transmission and Distribution Lines / C. Yanxia [et al.] // Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, 7–12 Sept. 2003 / IEEE PES. 2003. Vol. 1. P. 250–255.
8. Шнеерсон, Э. М. Дистанционные защиты / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 1986. 448 с.
9. Определение вида повреждения в токовых защитах линий электропередачи 6–35 кВ / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 6. С. 497–504. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-497-504>.

10. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф. А. Романюк, В. И. Новаш. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. 174 с.
11. Новаш, И. В. Математическое моделирование коммутационных режимов в электроустановках с трансформаторами / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк. Минск: БНТУ, 2013. 225 с.

Поступила 06.06.2018 Подписана в печать 07.08.2018 Опубликовано онлайн 28.09.2018

REFERENCES

1. Fedoseev A. M., Fedoseev M. A. (1992) *Relay Protection of Electric Power Systems*. 2nd Ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 528 (in Russian).
2. Chernobrovov N. V., Semenov V. A. (1998) *Relay Protection of Power Systems*. Energoatomizdat Publ. 800 (in Russian).
3. Romaniuk F. A., Buloychik E. V., Huryanchyk O. A., Kachenya V. S. (2018) The Reliability of Determining the Short Circuit Zone of the Lines of 6–35 kV. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 5–14 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-5-14>.
4. Romaniuk F. A., Tishechkin A. A., Buloychik E. V. (2012) Detection of Short Circuit Location in Radial Network Lines with One-Side Supply. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (4), 69–73 (in Russian).
5. Romaniuk F. A., Shevaldin M. A. (2014) Detection of Fault Location on the Power Lines 6–35 kV with Unilateral Feed. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 5–14 (in Russian).
6. Romaniuk F. A., Shevaldin M. A. (2015) Principles of Implementation of Current Protection from Interphase Short-Circuits on the Power Lines with Unilateral Feed. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 5–11 (in Russian).
7. Yanxia C., Xianggen Y., Zhe Z., Deshu C. (2003) The Research of the Overcurrent Relays Based on Phase-to-Phase Differential Current-Adaptive Setting and Coordination. *Transmission and Distribution Conference and Exposition. 2003 IEEE PES*, 1, 250–255. <https://doi.org/10.1109/tde.2003.1335228>.
8. Shneerson E. M. (1986) *Remote Protection*. Energoatomizdat Publ. 448 (in Russian).
9. Romaniuk F. A., Buloychik E. V., Huryanchyk O. A., Shevaldin M. A. (2017) Determining a Type of a Damage in the Current Protection of Power Lines of 6–35 kV. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 497–504 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-497-504>.
10. Romaniuk F. A., Novash V. I. (1998) *Information Support of Computing Experiment in Relay Protection and Automation of Power Systems*. Minsk, VUZ-YuNITI Publ. 174 (in Russian).
11. Novash I. V., Romaniuk F. A. (2013) *Mathematical Modeling of Switching Modes in Electrical Installations with Transformers*. Minsk, BNTU. 225 (in Russian).

Received: 6 June 2018

Accepted: 7 August 2018

Published online: 28 September 2018