

УДК 621.3.018.782.3

Сергей Олегович Алексинский

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры АУЭС, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: aleksinsky19@mail.ru

Дмитрий Сергеевич Шарыгин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры АУЭС, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: sharyginds@yandex.ru

Исследование влияния переходного сопротивления на дистанционное определение места повреждения на основе одностороннего метода

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одной из основных функций современных устройств релейной защиты является определение места повреждения на воздушных линиях электропередач напряжением 110–220 кВ. На сегодняшний день реальные погрешности определения места повреждения по параметрам аварийного режима в большинстве случаев составляют около 5 %. Однако бывают случаи, когда они превышают 10–20 %. Одностороннее определение места повреждения по параметрам аварийного режима и повышение его точности является актуальной задачей, поскольку не везде организован канал связи на ЛЭП для передачи аварийной информации. Основным параметром, оказывающим существенное влияние на точность одностороннего метода определения места повреждения, является переходное сопротивление. Целью исследования является изучение влияния переходного сопротивления на метод определения места повреждения по параметрам аварийного режима на основе одностороннего замера, предложенный А.Е. Аржанниковым. В ходе исследования были поставлены следующие задачи: оценка влияния переходного сопротивления на точность указанного метода определения места повреждения; определение поляризующей величины для определения места повреждения, обеспечивающей большую точность метода, в том числе, при наличии переходного сопротивления в месте короткого замыкания; получение критерия распознавания вида короткого замыкания, не зависящего от переходного сопротивления; получение способа определения величины переходного сопротивления в месте короткого замыкания.

Материалы и методы. Исследование и оценка погрешностей дистанционного определения места повреждения по параметрам аварийного режима произведена на основе серии расчетов токов короткого замыкания при различных переходных сопротивлениях в месте короткого замыкания и различных удалениях точки короткого замыкания. Расчет токов и обработка данных произведены в программном комплексе АРМ СРЗА. В качестве исследуемого объекта выбрана одиночная воздушная линия напряжением 110 кВ с двусторонним питанием и длиной 70 км. Для выполнения исследований первичные преобразователи принимались идеальными.

Результаты. Получена оценка погрешностей метода определения места повреждения одностороннего замера. Предложено использование тока нулевой последовательности в указанном методе определения места повреждения в качестве поляризующей величины, что обеспечивает большую точность, чем использование тока обратной последовательности. Для обеспечения устойчивого функционирования одностороннего определения места повреждения по параметрам аварийного режима, особенно при коротком замыкании через значительные переходные сопротивления, обосновано использование методов, нечувствительных к переходным сопротивлениям. Предложен параметр идентификации вида короткого замыкания – коэффициент образа $K_{обр}$. Определены его значения для каждого вида короткого замыкания, показана его малая зависимость от переходных сопротивлений. Дано расчетное обоснование значения коэффициента идентификации двухфазных замыканий (между фазами и между фазами и землей) по соотношению токов обратной и нулевой последовательностей. Дана оценка переходного сопротивления в месте короткого замыкания по соотношению симметричных составляющих для моделируемой ЛЭП.

Выводы. Результаты исследования могут использоваться для совершенствования существующих методов определения места повреждения по параметрам аварийного режима, а именно для повышения их точности за счет учета переходного сопротивления в месте повреждения и за счет использования подходящей поляризующей величины, а также для более точного определения вида короткого замыкания за счет использования предложенного параметра идентификации.

Ключевые слова: определение места повреждения, параметры аварийного режима, переходное сопротивление, виды короткого замыкания, ток прямой последовательности, ток обратной последовательности

Sergey Olegovich Aleksinsky

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electric Power Systems Automatic Control Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 269-906, e-mail: aleksinsky19@mail.ru

Dmitriy Sergeevich Sharygin

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Electric Power Systems Automatic Control Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 269-906, e-mail: sharyginds@yandex.ru

Study of influence of transient resistance on distance fault location based on one-sided method

Abstract

Background. Fault location on 110–220 kV overhead power lines is one of the main functions of modern relay protection devices. Currently, the actual errors of fault location based on emergency mode (EM) parameters in most cases are about 5 %. However, there are cases when they exceed 10–20 %. One-sided fault location based on EM parameters and improvement of its accuracy are important issues to study since there isn't a communication channel on power lines for the transmission of emergency information everywhere. The main parameter that has a significant impact on the accuracy of fault location method is the transient resistance. The aim of the research is to study the effect of transient resistance on the one-sided fault location method based on EM parameters proposed by A.E. Arzhannikov. In the course of the study, the following tasks are set: assessment of the effect of transient resistance on the accuracy of the specified fault location method; determination of the polarizing value for fault location, which ensures greater accuracy of the method, including the presence of transient resistance at the place of a short circuit; defining a criterion to recognize the type of short circuit that does not depend on the transient resistance; development of a method to determine the value of the transient resistance at the fault location.

Materials and methods. To study and evaluate the errors of distance fault location based on EM parameters, a series of calculations of short circuit currents has been made for various transient resistances at the fault location and at various distances of the fault. The calculation of currents and data processing has been carried out in the ARM SRZA software package. A single overhead line with a voltage of 110 kV with a two-sided supply and a length of 70 km is chosen as the object under study. To perform the research, the primary converters are taken as ideal.

Results. The authors have obtained the estimation of the errors of the one-sided fault location method. It is proposed to use the zero-sequence current as a polarizing quantity in the indicated fault location method, which provides greater accuracy than the use of the negative sequence current. To ensure the stable operation of one-sided fault location based on EM parameters, especially in case of short circuit with significant transient resistances, the use of methods that are insensitive to transient resistances is justified. A parameter to identify the type of short circuit is proposed, the coefficient of the image K_{obr} . Its values are determined for each type of short circuit, a small dependence on transient resistances is found. A calculation substantiation is given for the value of the identification coefficient of two-phase faults (Phase-to-Phase and Phases-to-Earth) according to the ratio of negative and zero sequence currents. The authors have estimated the transient resistance at the fault site by the ratio of symmetrical components for the simulated power transmission line.

Conclusions. The results of the study can be used to improve the existing methods of fault location based on EM parameters, namely: to improve their accuracy considering the transient resistance at the fault site; to improve their accuracy using a suitable polarizing value; to determine the type of short circuit more accurately by using the proposed identification parameter.

Key words: fault location, emergency mode parameters, transient resistance, types of short circuit, positive sequence current, negative sequence current

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.025-033

Введение. Определение места повреждения (ОМП) и вида замыкания на воздушных линиях электропередач напряжением 110–220 кВ является одной из актуальных задач электроэнергетики [1–7]. Погрешности ОМП в значительной части замеров близки к 5 %, однако нередки случаи, когда они превышают 10–20 % [1, 8–10]. Такие отклонения объясняются рядом причин: особенностями условий возникновения замыканий в энергосистеме; особенностями процессов в измерительном тракте; чувствительностью различных алгоритмов к тому или иному виду возмущений или искажений.

Как известно, наиболее вероятным видом повреждения (85 % случаев) в сетях напряжением 110 кВ и выше являются однофазные замыкания на землю [11]. Поскольку каналы связи, способные передавать значения параметров токов и напряжений с противопо-

ложного конца линии, организованы далеко не на всех линиях, методы одностороннего замера продолжают оставаться преобладающими. В устройствах одностороннего ОМП, функционирующих по параметрам аварийного режима (ПАР), широко применяется дистанционный метод. Известно [12], что одним из основных факторов, обуславливающих погрешность замера сопротивления до места замыкания, является переходное сопротивление в месте повреждения.

В связи с этим актуальным является исследование и оценка влияния переходного сопротивления на параметры короткого замыкания (КЗ) на воздушных линиях электропередачи (ВЛ). Ниже представлен новый способ распознавания вида КЗ для совершенствования методов дистанционного ОМП по ПАР.

Оценка влияния переходного сопротивления. Одним из основных факторов, ока-

зывающих влияние на точность ОМП по ПАР, является переходное сопротивление в месте замыкания [13]. Устранение влияния переходного сопротивления достигается измерением реактивной составляющей сопротивления в месте установки устройства ОМП [12]:

$$X = \operatorname{Im} \left(\frac{U_{\Phi}}{I_{\Phi} + K I_0} \right). \quad (1)$$

Способ эффективен только на линиях с односторонним питанием или ненагруженных линиях с двусторонним. Отсутствие нагрузки характеризует совпадение векторов напряжений систем с противоположных концов линии по фазе и отсутствие реактивной составляющей напряжения в переходном сопротивлении (по отношению к напряжению в месте установки устройства).

При наличии сдвига фаз между векторами напряжений систем с противоположных концов линии устранение влияния переходного сопротивления может быть достигнуто путем мгновенного замера сопротивления в момент перехода через нуль тока в переходном сопротивлении в месте замыкания [14]:

$$L = \frac{U_{\Phi}}{(I_{\Phi} + K I_0) Z_{1уд}}. \quad (2)$$

Считается, что в первом приближении ток в месте замыкания можно считать почти совпадающим по фазе с током нулевой последовательности в месте замера в начале линии. Способ чувствителен к искажениям фазы в измерительном тракте. Устойчивость функционирования средств ОМП повышается при использовании вместо мгновенных значений параметров интегральных величин. В целях совершенствования алгоритма ОМП по выражению (1) было предложено ввести поляризующую (опорную) величину, в качестве которой использовался ток нулевой последовательности в месте установки устройства ОМП [12]. Мнимые части отношений $\operatorname{Im}(U_{\Phi} / I_0)$ и $\operatorname{Im}((I_{\Phi} + K^* I_0) Z_{1уд} / I_0)$ при совпадении по фазе I_0 и $I_{0к}$ позволяют полностью устранить влияние переходного сопротивления:

$$L = \frac{\operatorname{Im}[U_{\Phi} / I_0]}{\operatorname{Im}[(I_{\Phi} + K I_0) Z_{1уд} / I_0]}; \quad (3)$$

$$K = \frac{Z_{0уд} - Z_{1уд}}{Z_{1уд}}. \quad (4)$$

Совпадение фаз имеет место в режиме опробования линии при АПВ или при разземлении нейтрали трансформатора нагрузки. В качестве поляризующего тока вместо тока нулевой последовательности I_0 в ряде случаев используют ток обратной последовательности I_2

или аварийный ток прямой последовательности $I_{1ав} = I_1 - I_1^{(нагр)}$ [15].

Для оценки погрешностей методов поляризации произведена серия расчетов токов КЗ при различных переходных сопротивлениях в месте КЗ и при различных удалениях точки КЗ.

На рис. 1 представлена часть расчетной схемы замещения для АРМ СРЗА. Рассмотрена одиночная воздушная линия напряжением 110 кВ с двусторонним питанием длиной 70 км. Сдвиг по фазе между ЭДС систем с противоположных концов линии отсутствует. Линия разбита на четыре участка длиной по 17,5 км. Вычисления производились при $K^{(1)}$ через переходное сопротивление $R_{пер} = [0, 1, 10, 20, 40, 60]$ Ом.

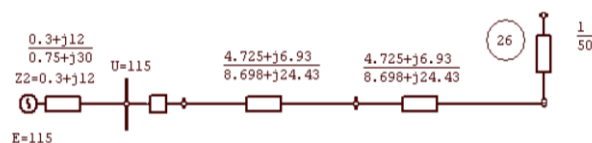


Рис. 1. Расчетная схема замещения для участка воздушной линии в программном комплексе АРМ СРЗА

Результаты расчетов отражены на рис. 2, 3, где показаны зависимости приведенных погрешностей методов ОМП по выражению (3) от удаления точки повреждения для различных переходных сопротивлений. На рис. 2 в качестве поляризующей величины использован ток нулевой последовательности в месте замера, а на рис. 3 – ток обратной последовательности. На рис. 2, 3 линии 1–6 отражают изменение погрешности (относительно длины ЛЭП) при изменении переходного сопротивления $R_{пер} = [0, 1, 10, 20, 40, 60]$ Ом.

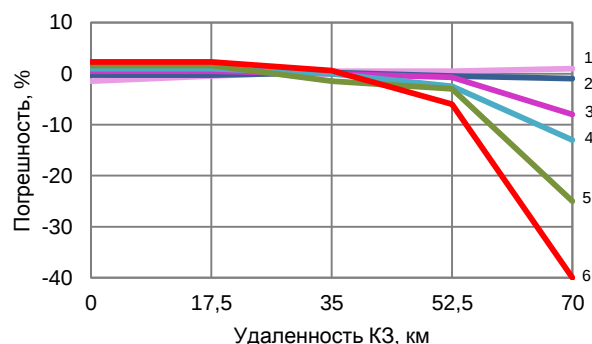


Рис. 2. Погрешности дистанционного метода с поляризацией по току нулевой последовательности

Общий характер изменения погрешностей аналогичен: при КЗ в первой половине линии погрешности незначительны и преимущественно положительны, вблизи середины линии они меняют знак и становятся отрицательными. По мере перемещения точки КЗ к концу линии наблюдается резкий рост погрешности. При опорной величине I_2 даже

наблюдается эффект сокращения замера по мере удаления точки КЗ.

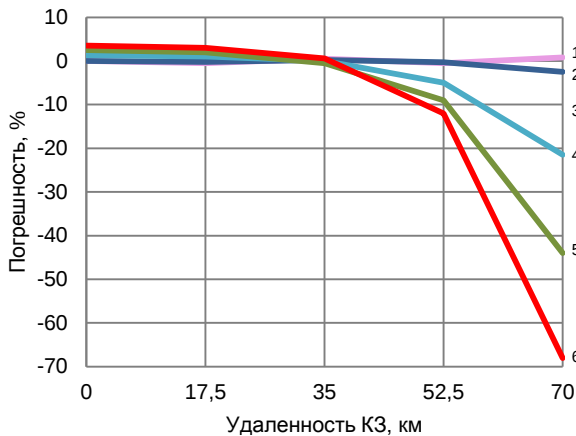


Рис. 3. Погрешности дистанционного метода с поляризацией по току обратной последовательности

Способы распознавания вида КЗ. Одной из задач, решаемых в устройствах ОМП, является распознавание вида короткого замыкания. Традиционно [12] для этого использовались симметричные составляющие. Замыкание принято считать симметричным при условии

$$4 \cdot I_2 < I_1 \text{ и } I_n < I_1, \quad (5)$$

где I_n – номинальный ток линии (трансформатора тока линии).

Замыкание считается двухфазным при условии

$$6 \cdot I_0 < I_2. \quad (6)$$

Замыкание на землю характеризуется соотношением $6 \cdot I_0 > I_2$.

Разделение однофазных и двухфазных замыканий на землю производится путем анализа амплитудных и фазовых соотношений между параметрами, прежде всего токами нулевой, обратной и прямой последовательностей.

Совершенствование методов определения вида повреждения производится на основе анализа характерных признаков вида повреждения. Так, для $K^{(3)}$ характерно приращение тока прямой последовательности и отсутствие (минимальное значение из-за погрешностей измерения, несимметрии сопротивления дуги) составляющих обратной и нулевой последовательностей. Признаки образа $K^{(3)}$ наиболее эффективно проявляются в относительном параметре:

$$K_{обр} = \frac{|I_1| - |I_{доав}|}{|I_2| + |I_0|}, \quad (7)$$

где $K_{обр}$ – коэффициент образа замыкания; $|I_1|$, $|I_2|$, $|I_0|$ – модули симметричных составляющих токов; $|I_{доав}|$ – модуль доаварийного тока прямой последовательности.

Очевидно, что при $K^{(3)}$ в полностью симметричном режиме $K_{обр}$ стремится к бесконечности. Для примера приведены значения $K_{обр}$ при различных видах замыканий для расположения точек КЗ в начале и середине линии с односторонним питанием при нагрузке 30 МВт (см. таблицу). Расчеты произведены для различных сочетаний сопротивлений дуги и земли.

Значения $K_{обр}$ при различных видах замыканий

R_d/R_z , Ом/Ом	$K^{(1)}$		$K^{(2)}$		$K^{(1,1)}$	
	$I = 0$ км	$I = 35$ км	$I = 0$ км	$I = 35$ км	$I = 0$ км	$I = 35$ км
10/50	0,495	0,477	0,997	0,991	0,986	0,979
50/50	0,492	0,486	0,987	0,995	0,973	0,952
200/50	0,468	0,474	0,931	0,95	0,929	0,884
0/0	0,5		1		~1	
$\Delta K_{обр}^*$	0,07		0,07		0,12	

При различных сочетаниях сопротивлений и варьировании места КЗ относительные отклонения коэффициента образа $K_{обр}$ от предельного значения для различных видов замыканий не превышают 0,07 или 0,12, что позволяет идентифицировать вид замыкания. С учетом запаса, определим $K_{обр}$ для разных видов КЗ:

- для $K^{(3)}$ – при $K_{обр} > 5$ погрешности $\Delta I_2 = \Delta I_0 = 0,1 \cdot I_1$, тогда $K_{обр. мин} = 1/(0,1 + 0,1) = 5$;
- для $K^{(1)}$ – при $K_{обр} < 0,7$ полусумма предельных значений для разных видов КЗ $K_{обр} = (0,88 + 0,5)/2 \sim 0,7$;
- для $K^{(2)}$ или $K^{(1,1)}$ – при $0,7 < K_{обр} < 1,3$ различить $K^{(2)}$ и $K^{(1,1)}$ параметр $K_{обр}$ не позволяет, для этой цели используется соотношение I_2/I_0 .

Схема замещения для расчета токов при $K^{(1,1)}$ приведена на рис. 4.

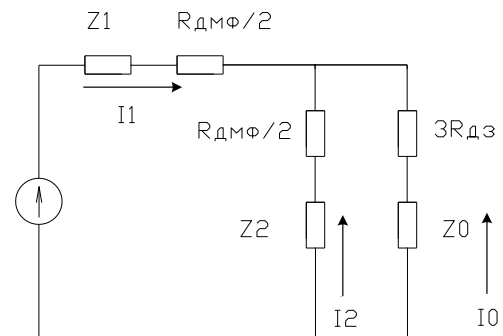


Рис. 4. Схема замещения для расчета токов при $K^{(1,1)}$

В месте КЗ выполняется соотношение $I_1 = -(I_2 + I_0)$. Распределение токов обратной и нулевой последовательностей происходит обратно пропорционально сопротивлениям соответствующих ветвей:

$$K_{обр2фнз} = \frac{I_2}{I_0} = \frac{3 \cdot R_{дз} + Z_0}{R_{дмф}/2 + Z_2}, \quad (8)$$

$$K_{\text{обр2фнз}} = \frac{3 \cdot (0,33 + 0,05) + j \cdot 5,5 X_2}{0,2 + j \cdot X_2} = 5,5,$$

где $K_{\text{обр2фнз}} = \frac{I_2}{I_0}$ – коэффициент образа двухфазного КЗ на землю; $R_{\text{дз}}$ – сопротивление дуги на землю и земли ($R_{\text{дз}} = 0,05 \cdot L_{\text{КЗ}} + R_{\text{пр.уд}} \cdot L_{\text{КЗ}}$; $R_{\text{пр.уд}} = 0,33$ (Ом/км) для АС-95); $R_{\text{дмф}}$ – сопротивление дуги между фазами ($R_{\text{дмф}} = 0,4$ Ом).

Для двухцепной линии без троса выполняется соотношение $X_0/X_2 = 5,5$.

Для определения максимального значения параметра $K_{\text{обр2фнз}}$ принимаются максимальные значения $R_{\text{дз}}$ и минимальные $R_{\text{дмф}}$.

С учетом коэффициента запаса $K_3 = 1,1$ принимаем $K_{\text{обр2фнз}} = 6$, что соответствует (6).

Различие между $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ также может быть установлено по факту приращения тока в одной или двух фазах на соизмеримую величину.

Влияние переходного сопротивления на параметры КЗ. Соотношение параметров токов и напряжений при различных видах КЗ, как металлических, так и через переходное сопротивление, описано в литературе, например в [16]. При этом модель места КЗ в ряде случаев принималась упрощенной, не учитывался характер замыкания. Двухфазное замыкание на землю моделировалось сопротивлением на землю и металлическим замыканием между фазами, что может приводить к неточности в представлении замыкания из-за неучета сопротивления дуги или сопротивления предмета, через который происходит междуфазное замыкание. В целях уточнения соотношения электрических величин при разных видах КЗ произведена серия расчетов. Пример расчетной схемы замещения для программного комплекса АРМ СРЗА приведен на рис. 1.

Рассматривались следующие типы замыканий: наброс металлического предмета ($R_1 = R_2 = 0,1$ Ом) и дуговое замыкание с перекрытием междуфазного промежутка. Замыкание на землю рассматривалось через опору с перекрытием гирлянды изоляторов и учетом характера грунта (влажный, скальный). Сопротивление принято максимальным нормируемым в диапазоне 10–30 Ом¹. Поскольку в схеме замещения нулевой последовательности участвует утроенное значение переходного сопротивления $R_0 = 3 \cdot (R_{\text{д}} + R_{\text{оп}})$, при среднем значении $R_{\text{оп}} = 15$ Ом и $R_{\text{д}} = 1,5$ Ом принимается $R_0 = 50$ Ом. Поскольку реальные значения сопротивления в месте замыкания часто оказываются меньшими,

значительная часть расчетов проведена для ряда меньших величин R_0 .

Параметры активного междуфазного переходного сопротивления находятся в диапазоне $R_1 = R_2 = 0,1 - 500$ Ом².

Рассчитываются модули и углы фазных напряжений и фазных токов, а также напряжений и токов симметричных составляющих.

Результаты расчетов представлены на векторных диаграммах.

1. На рис. 5 представлены векторные диаграммы токов и напряжений фаз, а также их симметричных составляющих при $K^{(2)}_{\text{вс}}$ через переходное сопротивление.

Анализ векторных диаграмм двухфазного замыкания $K^{(2)}_{\text{вс}}$ позволил сделать следующий вывод: при увеличении переходного сопротивления напряжение опережающей поврежденной фазы превышает напряжение отстающей; напряжение отстающей фазы в диапазоне сопротивлений от 0 до 5 Ом уменьшается, а далее от 5 Ом до максимума – возрастает. Фаза напряжения (сдвиг вектора) отстающей фазы в диапазоне сопротивлений от 0 до 15 Ом возрастает, а от 15 Ом до максимума – уменьшается. Поворот вектора тока замыкания при увеличении переходного сопротивления происходит от 0° до 90°. Характерным признаком $K^{(2)}$ является существенный рост вектора напряжения опережающей фазы и меньшее отклонение по фазе от аналогичного вектора при металлическом замыкании.

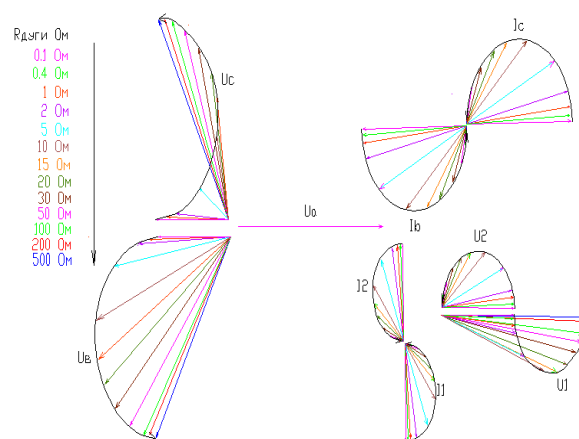


Рис. 5. Двухфазное КЗ. Векторные диаграммы токов и напряжений фаз, а также их симметричных составляющих при $K^{(2)}_{\text{вс}}$ через переходное сопротивление

Амплитудные соотношения напряжений прямой и обратной последовательностей при $K^{(2)}$ с ростом переходного сопротивления имеют монотонный характер: напряжение обратной

¹ Правила устройства электроустановок. Раздел 2. Передача электроэнергии. Гл. 2.4. Воздушные линии электропередачи напряжением до 1 кВ. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ. – 7-е изд. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2005. – 192 с.

² Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

последовательности убывает, а прямой – увеличивается. Фазовые же соотношения немонотонны: до сопротивления 10 Ом угол между векторами увеличивается, а при больших значениях – сокращается. Таким образом, по соотношению амплитуд напряжений прямой и обратной последовательностей можно оценить величину переходного сопротивления.

2. На рис. 6, 7 представлены векторные диаграммы токов и напряжений при $K^{(1,1)}_{BC}$.

Замыкания через повышенные (десятки и сотни Ом) переходные сопротивления имеют место при замыканиях на землю в пролете между опорами, на дерево, на проезжающую под ВЛ крупногабаритную технику.

Как показали расчеты, при значительных переходных сопротивлениях уровни токов КЗ существенно снижаются и становятся сопоставимыми с токами нагрузки.

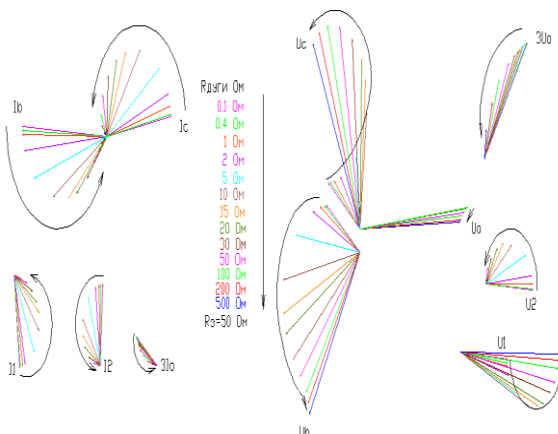


Рис. 6. Двухфазное КЗ. Векторные диаграммы токов и напряжений фаз при $K^{(1,1)}$

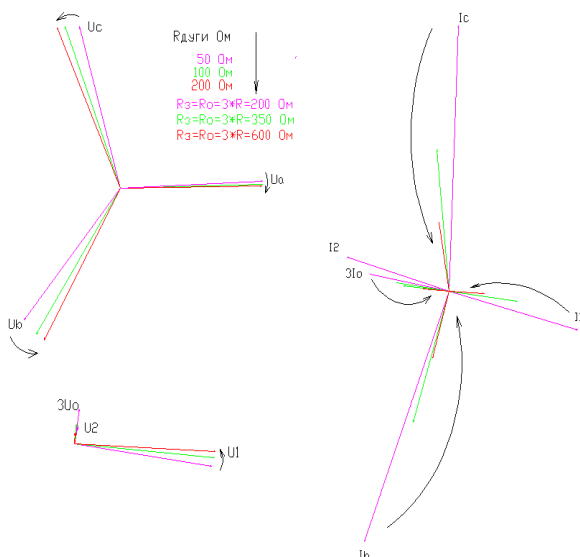


Рис. 7. Двухфазное КЗ. Векторные диаграммы токов и напряжений фаз при $K^{(1,1)}$ через переходное сопротивление

Анализ векторных диаграмм фазных напряжений показывает, что характер ампли-

тудно-фазовых соотношений напряжений поврежденных фаз принципиально позволяет дать оценку величине переходного сопротивления. При росте переходного сопротивления до 15 Ом угол между векторами напряжений поврежденных фаз увеличивается, при этом амплитуда напряжения опережающей поврежденной фазы постоянно растет, а отстающей при сопротивлении от 0 до 5 Ом даже уменьшается и только при больших сопротивлениях начинает расти.

При двухфазном замыкании на землю через значительное переходное сопротивление со стороны земли токи и напряжения изменяются монотонно: при увеличении сопротивления напряжения растут, а токи уменьшаются; фазовые соотношения как токов, так и напряжений стабильны и изменяются незначительно.

При варьировании междуфазного переходного сопротивления в пределах 500 Ом диапазон изменения фаз токов и напряжений нулевой последовательности оказался существенно меньше, чем у составляющих обратной последовательности.

3. На рис. 8 представлены векторные диаграммы токов и напряжений при $K^{(1)}$ на опору.

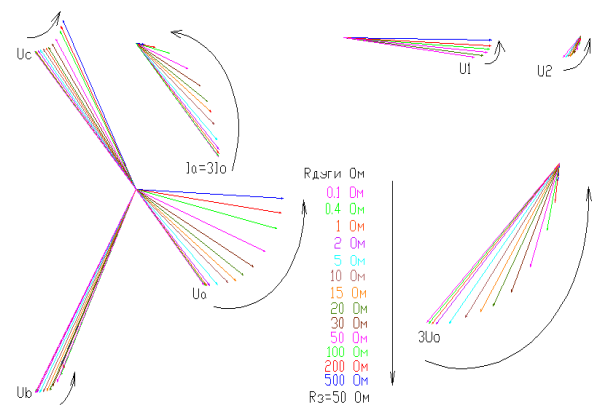


Рис. 8. Однофазное КЗ. Векторные диаграммы токов и напряжений фаз при $K^{(1)}$ на опору

При увеличении переходного сопротивления напряжение опережающей неповрежденной фазы (U_b) монотонно уменьшается, а отстающей фазы (U_c) до 50 Ом уменьшается, а затем увеличивается. Угол между векторами напряжений неповрежденных фаз монотонно возрастает.

4. Для оценки влияния нагрузки на параметры токов и напряжений при $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ при замыкании через значительное сопротивление на землю производилась серия расчетов. Результаты в виде векторных диаграмм представлены на рис. 9. Расчеты велись для $K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$ при нагрузке $318+j199$ Ом, что соответствует мощности нагрузки 30 МВт.

Соотношения сопротивлений прямой (обратной) и нулевой последовательностей в ме-

сте замыкания принимались: 50/200; 100/350; 200/600. Сопротивления нулевой последовательности принимались достаточно высокими ввиду возможности высокого сопротивления грунтов, например, в горной местности.

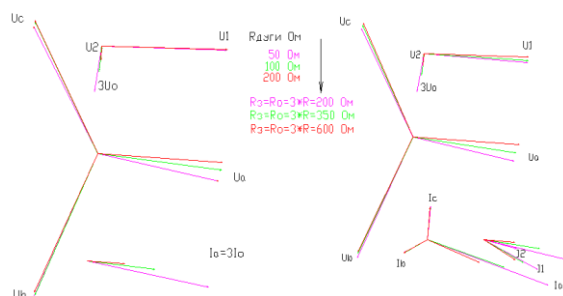


Рис. 9. Однофазное КЗ. Векторные диаграммы токов и напряжений фаз при $K^{(1)}$ через переходное сопротивление без и с учетом нагрузки 30 МВт

Расчеты показали, что даже при таких значительных переходных сопротивлениях токи КЗ превышают токи нагрузки не менее чем в 2 раза: $342/162 = 2,11$ для $K^{(1)}$ и $416/161 = 2,58$ для $K^{(1.1)}$.

Влияние нагрузки проявляется в расхождении по фазе векторов прямой, обратной и нулевой последовательностей на угол до 20° ; остальные амплитудные и фазовые соотношения сохраняются.

Выводы. Результаты исследований влияния переходного сопротивления на точность дистанционного метода ОМП на основе одностороннего замера, проиллюстрированные для модели одиночной воздушной линии 110 кВ, выполненной в АРМ СРЗА, отражают конкретную схемно-режимную ситуацию. Для получения более объективных выводов необходимо применить предложенную методику к другим моделям ВЛ, что и планируется выполнить в ходе дальнейших исследований.

В рассмотренном дистанционном методе одностороннего замера расстояния до точки однофазного КЗ на землю применение в качестве поляризующей величины тока нулевой последовательности более целесообразно, чем использование тока обратной последовательности, так как при этом обеспечивается большая точность и практически отсутствие зависимости от переходного сопротивления в месте КЗ при рассмотрении линий с односторонним питанием или ненагруженных линий с двусторонним.

Выполненная оценка влияния переходного сопротивления в месте КЗ позволяет более точно определить место КЗ, т. е. выполнить ОМП. Например, если расчетное переходное сопротивление имеет большую величину, то следует использовать методы, нечувствительные к переходным сопротивлениям.

Предложенный параметр идентификации вида замыкания – коэффициент образа

$K_{обр}$ – показал его малую зависимость от переходных сопротивлений. В дальнейших исследованиях требуется рассмотреть применение коэффициента образа на модели сети с двусторонним питанием.

Расчетное обоснование значения коэффициента идентификации двухфазных замыканий (между фазами и между фазами с землей) по соотношению токов обратной и нулевой последовательностей показало, что по соотношению напряжений прямой и обратной последовательностей возможна оценка величины переходного сопротивления. Рассмотрение амплитудно-фазовых соотношений напряжений поврежденных фаз принципиально позволяет дать оценку величине переходного сопротивления, в том числе, и при токах КЗ, сравнимых с токами нагрузки. Результаты данного анализа позволяют повысить точность методов одностороннего ОМП и могут применяться, например, при компенсации в алгоритме ОМП погрешности, вносимой переходным сопротивлением (например, аналогично [17]).

Список литературы

1. Гуря Д.Н., Корольков А.Л. Сравнение традиционных и волнового методов определения места повреждения по итогам натурных испытаний на ЛЭП 220–330 кВ // Материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017», 2–6 октября 2017 г. – Самара, 2017. – С. 415–418.
2. Guerra W., Kagan N. Fault Location and Voltage Estimation in Transmission Systems by Evolutionary Algorithms // 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. DOI:10.1109/ISAP.2009.5352871.
3. Asynchronous Fault Location in Transmission Lines Considering Accurate Variation of the Ground-Mode Traveling Wave Velocity / R. Liang, Z. Yang, N. Peng, et al. // Energies. – 2017. – Vol. 10. – P. 1957. DOI:10.3390/en10121957.
4. Подшивалин А.Н., Исмуков Г.Н. Адаптация методов определения места повреждения к современным требованиям эксплуатации линий электропередачи [Электронный ресурс] // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., г. Екатеринбург, 3–7 июня 2013 г. – Режим доступа: <https://b-ok.org/book/3208751/87a52e>
5. Chen X., Jiao Z. Accurate fault location method of distribution network with limited number of PMUs // Proc. 2018 China Int. Conf. Electricity Distribution (CICED). – China, 2018. – P. 1503–1507. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592074.
6. Gama J.R., Lopes F.V. On compensating synchronization errors in two-terminal based fault location approaches // Proc. 2017 Workshop Commun. Netw. Power Syst. (WCNPS). – Brasilia, Brazil, 2017. – P. 1–4. DOI:10.1109/WCNPS.2017.8253082.

7. **Машенков В.М.** Особенности определения места повреждения на ВЛ напряжением 110–750 кВ: учеб. пособие. – М.: Издание Центра подготовки кадров энергетики, 2005.

8. **Абрамочкина Л.В.** Повышение точности определения места повреждения воздушных линий электропередачи по параметрам предаварийного и аварийного режимов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Томск: НИТПУ, 2014.

9. **Ефремов В.А.** Виды погрешностей ОМП и их влияние на точность замера // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – № 2(15). – С. 54–58.

10. **Оценка** точности определения места повреждения ЛЭП методом искусственного короткого замыкания / Д.Н. Гура, А.Л. Корольков, В.М. Пасторов, В.М. Кожевников // Электротехника. – 2019. – № 2. – С. 73–77.

11. **Ермаков К.И.** Совершенствование методов и средств определения места повреждения на линиях электропередачи для организации аварийно-восстановительных работ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Чебоксары, 2021. – 209 с.

12. **Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш.** Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / под ред. В.А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.

13. **Yablokov A., Sharygin D., Filatova G.** Methodology of a multifactorial automated research of fault location determination methods on EHV lines // 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – М., 2022. – P. 1–7. DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731468.

14. **Суяр, Саркиз, Мутон.** Развитие принципов измерения и выполнения систем защиты и определения места повреждения для трехфазных ВЛ // Релейная защита и противоаварийная автоматика (СИГРЭ-74). – М.: Энергия, 1976. – С. 20–33.

15. **Диагностика** линий электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, В.А. Ефремов и др. // Электротехнические микропроцессорные устройства и системы: межвуз. сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1992.

16. **Ульянов С.А.** Электромагнитные переходные процессы. – М.: Энергия, 1970.

17. **Филатова Г.А.** Разработка и исследование способов и алгоритмов определения места однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ по параметрам переходного процесса: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Иваново, 2017. – 239 с.

References

1. Gura, D.N., Korol'kov, A.L. Sroavnenie traditsionnykh i volnovogo metodov opredeleniya mesta povrezhdeniya po itogam naturnykh ispytaniy na LEP 220–330 kV [A comparison of conventional and wave methods for fault location according to the results of the experiments of full-scale tests on power lines 220–330 kV]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi –*

2017», 2–6 oktyabrya 2017 g. [Proceedings of the VIII International scientific and technical conference “Electric power industry through the eyes of youth – 2017”, October 2–6, 2017]. Samara, 2017, pp. 415–418.

2. Guerra, W., Kagan, N. Fault Location and Voltage Estimation in Transmission Systems by Evolutionary Algorithms. 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. DOI: 10.1109/ISAP.2009.5352871.

3. Liang, R., Yang, Z., Peng, N., Liu, C., Zare, F. Asynchronous Fault Location in Transmission Lines Considering Accurate Variation of the Ground-Mode Traveling Wave Velocity. *Energies*, 2017, vol. 10, p. 1957. DOI: 10.3390/en10121957.

4. Podshivalin, A.N., Ismukov, G.N. Adaptatsiya metodov opredeleniya mesta povrezhdeniya k sovremennym trebovaniyam ekspluatatsii liniy elektroperedachi [A modern Look at RFL in emergency mode parameters]. *Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye napravleniya razvitiya sistem releynoy zashchity i avtomatiki energosistem»*, Ekaterinburg, 3–7 iyunya 2013 g. [Proceedings of the IV International scientific and technical conference “Current trends of the development of relay protection systems and automation of power systems”, Yekaterinburg, June 3–7, 2013]. Available at: <https://b-ok.org/book/3208751/87a52e>.

5. Chen, X., Jiao, Z. Accurate fault location method of distribution network with limited number of PMUs. Proc. 2018 China Int. Conf. Electricity Distribution (CICED), pp. 1503–1507. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592074.

6. Gama, J.R., Lopes, F.V. On compensating synchronization errors in two-terminal based fault location approaches. Proc. 2017 Workshop Commun. Netw. Power Syst. (WCNPS), Brasília, Brazil, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/WCNPS.2017.8253082.

7. Mashenkov, V.M. *Osobennosti opredeleniya mesta povrezhdeniya na VL napryazheniem 110–750 kV* [Features of determining the location of damage on overhead lines with a voltage of 110–750 kV]. Moscow: Izdanie Tsentra podgotovki kadrov energetiki, 2005.

8. Abramochkina, L.V. *Povyshenie tochnosti opredeleniya mesta povrezhdeniya vozdukhnykh liniy elektroperedachi po parametram predavariynogo i avariynogo rezhimov*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving the accuracy of fault location on overhead power lines according to the parameters of pre-emergency and emergency modes. Cand. tech. sci. diss.]. Tomsk: NITPU, 2014.

9. Efremov, V.A. Vidy pogreshnostey OMP i ikh vliyanie na tochnost' zamera [Types of fault location errors and their influence on measurement accuracy]. *Releytnaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2014, no. 2(15), pp. 54–58.

10. Gura, D.N., Korol'kov, A.L., Pastоров, V.M., Kozhevnikov, V.M. Otsenka tochnosti opredeleniya mesta povrezhdeniya LEP metodom iskusstvennogo korotkogo замыкания [Evaluation of fault location accuracy on power lines by the method of artificial short circuit]. *Elektrotekhnika*, 2019, no. 2, pp. 73–77.

11. Ermakov, K.I. *Sovershenstvovanie metodov i sredstv opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyakh*

elektroperedachi dlya organizatsii avariynovosstanovitel'nykh rabot. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of methods and means for fault location on power lines for organizing emergency recovery work. Cand. tech. sci. diss.]. Cheboksary, 2021. 209 p.

12. Arzhannikov, E.A., Lukoyanov, V.Yu., Misrikhanov, M.Sh. *Opredelenie mesta korotkogo замыкания на высоковольтных линиях электропередачи* [Determining the location of a short circuit on high-voltage power lines]. Moscow: Energoatomizdat, 2003. 272 p.

13. Yablokov, A., Sharygin, D., Filatova, G. Methodology of a multifactorial automated research of fault location determination methods on EHV lines. 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, 2022, pp. 1–7. DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731468.

14. Suyar, Sarkis, Mouton. *Razvitie printsipov izmereniya i vypolneniya sistem zashchity i opredeleniya mesta povrezhdeniya dlya trekhfaznykh VL* [Development of the principles of measurement and implementation of protection systems and fault location for three-phase overhead lines]. *Releynaya zashchita i*

protivoavariynaya avtomatika (SIGRE-74) [Relay protection and emergency automatics (CIGRE-74)]. Moscow: Energiya, 1976, pp. 20–33.

15. Lyamets, Yu.Ya., Antonov, V.I., Efremov, V.A., Nudel'man, G.S., Podshivalin, N.V. *Diagnostika liniy elektroperedachi* [Diagnostics of power lines]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Elektrotekhnicheskie mikroprotsessornye ustroystva i sistemy»* [Interuniversity collection of scientific works "Electrotechnical microprocessor devices and systems"]. Cheboksary: Izdatel'stvo Chuvashskogo universiteta, 1992.

16. Ul'yanov, S.A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy* [Electromagnetic transients]. Moscow: Energiya, 1970.

17. Filatova, G.A. *Razrabotka i issledovanie sposobov i algoritmov opredeleniya mesta odnofaznogo замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 kV по параметрам переходного процесса*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Development and research of methods and algorithms for fault location of a single-phase earth fault in cable networks of 6–10 kV according to the parameters of the transient process. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2017. 239 p.