

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316

Дмитрий Юрьевич Вихарев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: dvikhareff@yandex.ru

Екатерина Андреевна Воробьева

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: v_ea@rambler.ru

Андрей Юрьевич Мурзин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, декан электроэнергетического факультета, Россия, Иваново, e-mail: murzin-64@mail.ru

Никита Андреевич Родин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: rodin.na@ispu.ru

Автоматическое повторное включение кабельно-воздушных линий электропередачи напряжением 110–500 кВ с применением дистанционного метода определения поврежденного участка

Авторское резюме

Состояние вопроса. Для идентификации повреждения на кабельном участке кабельно-воздушных линий электропередачи напряжением 110–500 кВ в настоящее время применяется ряд методов, эффективность которых достигается за счет использования дополнительного оборудования и организации каналов связи. Существуют методы, позволяющие идентифицировать повреждение кабельной вставки без использования дополнительных устройств, однако они обладают существенным недостатком, связанным с невозможностью определения повреждения вблизи места перехода с воздушного участка на кабельный. В связи с этим актуальной является задача разработки эффективного метода определения поврежденного участка кабельно-воздушной линии электропередачи без применения дополнительного оборудования.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием методов математического моделирования электрических цепей. Реализация дистанционного метода определения поврежденного участка и оценка эффективности его применения произведена в компьютерном симуляторе PSCAD. Обработка результатов исследования произведена в системе автоматизированного проектирования MathCAD и программном комплексе MATLAB.

Результаты. Предложен дистанционный метод определения поврежденного участка кабельно-воздушной линии электропередачи по параметрам аварийного режима при расположении кабельной вставки на любом ее участке. Проанализировано влияние места заземления экрана кабеля на эффективность организации автоматического повторного включения кабельно-воздушной линии электропередачи. Проведено исследование влияния взаимного угла между электродвижущими силами систем по сторонам кабельно-воздушной линии электропередачи на эффективность дистанционного метода определения поврежденного участка.

Выводы. Разработанный метод определения поврежденного участка линии электропередачи позволяет повысить эффективность автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи. Ограничения применимости метода заключаются в его неэффективности при небольшой длине кабельной вставки по отношению к общей длине линии электропередачи. Для повышения эффективности применения разработанного метода для линий с короткой кабельной вставкой требуется использование специальных высокоточных алгоритмов определения параметров сигнала.

Ключевые слова: автоматическое повторное включение, дистанционный принцип определения места повреждения, кабельно-воздушная линия электропередачи, измерительный орган сопротивления от однофазных коротких замыканий на землю

Dmitry Yurievich Vikharev

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dvikhareff@yandex.ru

Ekaterina Andreevna Vorobyeva

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: v_ea@rambler.ru

Andrey Yurievich Murzin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Dean of Electrical Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: murzin-64@mail.ru

Nikita Andreevich Rodin

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: rodin.na@ispu.ru

Autoreclosing of 110–500 kV mixed transmission lines using a distance method to determine the damaged section

Abstract

Background. To identify damage on a cable section of mixed 110–500 kV power transmission lines, a number of methods are currently being used. Their effectiveness is achieved due to the use of additional equipment and the organization of communication channels. There are methods that make it possible to identify damage of the cable without using additional devices. However, they have a significant disadvantage due to the inability to determine short circuit near the transition point from the overhead section to the cable section. Thus, the important task is to develop an effective method to determine the damaged section of a mixed transmission line without the use of additional equipment.

Materials and methods. Methods of mathematical modeling of electrical circuits have been used. The implementation of the distance method to determine the damaged section and evaluate the effectiveness of its application has been carried out in the PSCAD. The results of the research have been processed by the MathCAD computer-aided design system and the MATLAB software package.

Results. A distance method is proposed to determine the damaged section of a mixed transmission line based on the emergency mode parameters when the cable is located at any of its sections. The authors have analyzed the influence of the grounding location of the cable shield on the effectiveness of the autoreclosing of a mixed power transmission line. The authors have studied the effect of the mutual angle between the electromotive forces of the systems on the sides of the mixed transmission line on the effectiveness of the distance method to determine the damaged section.

Conclusions. The developed method to determine the damaged section makes it possible to increase the efficiency of autoreclosing of mixed transmission lines. The limitations of the applicability of the method are related to the use of short cables located at a distance from the beginning and end of the power transmission line. To increase the efficiency of the developed method for lines with short cable section, the use of special high-precision algorithms to determine signal parameters is required.

Key words: autoreclosing, fault location distance method, mixed transmission line, distance measuring device for single-phase ground faults

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.019-027

Состояние вопроса. По статистике большинство коротких замыканий (КЗ) на линиях электропередачи (ЛЭП) в электрических сетях напряжением 110 кВ и выше самоустраняются в бестоковую паузу после отключения поврежденного объекта [1]. Для включения ЛЭП после действия защит применяется автоматическое по-

вторное включение (АПВ). Однако применение этого вида сетевой автоматики неоправданно на кабельных ЛЭП, поскольку изоляция кабеля не способна к самовосстановлению после КЗ. В электроэнергетике РФ и зарубежных стран получили распространение кабельно-воздушные линии (КВЛ), состоящие из воздушных и кабельных

участков. Такие линии находят широкое применение при организации заходов в закрытые комплектные распределительные устройства (РУ) и при сооружении переходов воздушных линий через водные преграды и крупные дорожные узлы [2]. Длина кабельного участка КВЛ может быть разной, только в энергетической организации «Московское предприятие магистральных электрических сетей» насчитывается около 65 смешанных ЛЭП, длина кабельной вставки которых составляет от нескольких десятков метров до нескольких десятков километров. Соответственно, чем короче длина кабельного участка, тем ниже вероятность его повреждения. В связи с вышесказанным АПВ рекомендуется для использования на КВЛ в случаях, если кабельный участок применяется для реализации захода в РУ (кроме комплектных РУ с элегазовой изоляцией) или если на КВЛ отсутствуют кабельные сегменты с расстоянием между кабелями разных фаз менее диаметра кабеля¹. Во всех остальных случаях целесообразность применения АПВ КВЛ должна определяться проектными решениями.

Наиболее универсальным решением при организации АПВ КВЛ является использование функции определения поврежденного участка. Принцип действия этой функции подразумевает определение КЗ на кабельной вставке и дальнейшую передачу запрещающей команды, позволяющую заблокировать действие функционального узла АПВ устройства релейной защиты и автоматики (РЗА). На сегодняшний день существует ряд методов, позволяющих определить повреждение кабельного участка КВЛ. Все методы можно разделить на две группы: по параметрам аварийного режима и высокочастотные. Высокочастотные методы рассматривать не будем, поскольку их реализация требует установки большого количества дополнительного оборудования. Методы по параметрам аварийного режима могут быть реализованы с применением типовых устройств РЗА с помощью установки дополнительных измерительных преобразователей, а также при организации канала связи. Обобщенная классификация методов определения поврежденного участка КВЛ по параметрам аварийного режима приведена на рис. 1.

К токовым методам относятся: дифференциальный метод, основанный на организации продольной дифференциальной токовой защиты кабельного участка с передачей запрещающей команды АПВ в начало и конец ЛЭП с помощью волоконно-оптической линии связи [3]; и метод контроля тока в месте заземления экра-

нов кабелей, позволяющий определять повреждение кабельной вставки по факту увеличения тока в экране [4, 5]. Направленные методы реализуются за счет применения органов направления мощности, устанавливаемых по сторонам кабельного участка [6]. Токовые и направленные методы подразумевают установку дополнительного оборудования по сторонам кабельной вставки, а если она располагается на расстоянии от начала и конца ЛЭП, то еще и организацию канала связи. Поскольку зачастую длина кабельного участка невелика, а частота его повреждения намного ниже частоты повреждения воздушных участков, применение дополнительной аппаратуры может быть экономически нецелесообразным.



Рис. 1. Классификация методов определения поврежденного участка КВЛ по параметрам аварийного режима

Дистанционные методы предполагают определение поврежденного участка за счет применения измерительных органов (ИО) сопротивления, реализованных в микропроцессорных устройствах РЗА, подающих запрещающие или разрешающие команды [2, 7]. Принцип действия дистанционных методов иллюстрирует рис. 2.

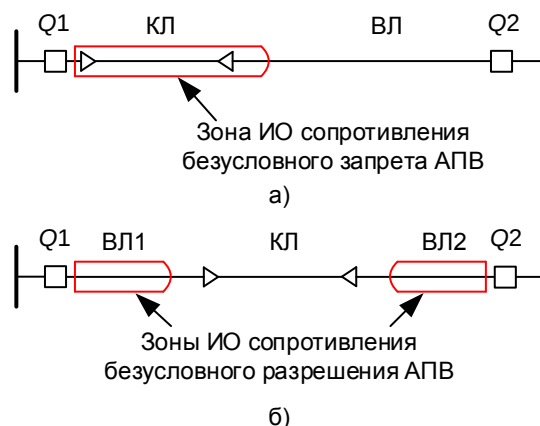


Рис. 2. Принцип действия дистанционного метода определения поврежденного участка: а – расположение кабельной вставки в начале ЛЭП; б – расположение кабельного участка на расстоянии от начала и конца ЛЭП

¹ Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 31 августа 2022 года № 884 «Об утверждении Методических указаний по технологическому проектированию линий электропередачи классом напряжения 35–750 кВ».

В случае расположения кабельного участка в начале ЛЭП (рис. 2,а) параметры срабатывания ИО сопротивления выбираются таким образом, чтобы характеристика срабатывания дополнительной ступени дистанционной защиты гарантированно охватывала кабельную вставку [7], т. е. расчетным условием является обеспечение требуемой чувствительности дистанционного ИО при КЗ в начале воздушного участка.

На КВЛ с кабельным участком, расположенным на расстоянии от начала и конца ЛЭП (рис. 2,б), ИО сопротивления не могут достоверно определить повреждение в конце воздушного участка, поэтому их параметры срабатывания определяются по условию отстройки от сопротивления на зажимах защиты при КЗ в конце воздушного участка КВЛ. Это позволяет исключить случаи подачи разрешающей команды при КЗ в начале кабельного участка, что гарантированно обеспечивает несрабатывание АПВ. Однако при такой настройке ИО сопротивления команда запрета АПВ будет сформирована при повреждениях, возникающих на части воздушных участков, близких к кабельной вставке.

В соответствии с вышесказанным, актуальной является задача разработки дистанционного метода определения поврежденного участка КВЛ, позволяющего однозначно идентифицировать КЗ на кабельной вставке путем функциональных изменений логики действия микропроцессорных устройств РЗА без установки дополнительного оборудования.

Материалы и методы. На КВЛ напряжением 110–500 кВ возможно возникновение однофазного КЗ, возникшего в результате пробоя изоляции между жилой и экраном кабеля или пробоя между экраном кабеля и его оболочкой [2]. Второй вид повреждения не приводит к возникновению больших токов, протекающих в первичной электрической сети, поэтому КВЛ возможно сохранить в работе. Однофазное КЗ наиболее опасно для кабеля, так как изоляция между жилой и экраном не способна восстановиться в бестоковую паузу и повторное включение на устойчивое повреждение приведет к еще большим разрушениям кабельного участка.

Наиболее важным фактором, определяющим эффективность применения дистанционного метода определения повреждения кабельного участка, является способ заземления экранов. Двустороннее заземление экранов кабелей напряжением 110 кВ и выше не рекомендовано по причине возникновения высокого тока, протекающего в замкнутом контуре экрана, что может привести к появлению больших активных потерь и разрушению изоляции. Наиболее частые способы заземления экранов кабелей напряжением 110–500 кВ – заземление экрана с одной стороны или в промежуточной точке на длине линии. Способы заземления экранов кабельных участков напряжением 110–500 кВ показаны на рис. 3.

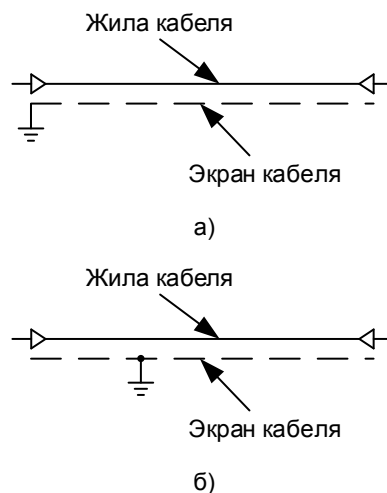


Рис. 3. Способы заземления экранов кабельных вставок КВЛ напряжением 110–500 кВ: а – заземление экрана в одной точке в начале кабельной вставки; б – заземление экрана в одной точке на расстоянии от начала кабельной вставки

Наличие заземления экрана в одной точке позволяет разработать эффективный метод определения повреждения кабельной вставки.

Поскольку единственный вид повреждения кабельного участка, сопровождающийся протеканием больших токов, – это пробой изоляции между жилой и экраном, для реализации дистанционного метода определения поврежденного участка может быть применен принцип, изложенный в [8, 9]. В основе принципа действия дистанционного ИО от однофазных КЗ на землю лежит способ определения сопротивления прямой последовательности (ПП), формирующегося на зажимах при возникновении однофазного КЗ на землю, с помощью компенсации составляющих нулевой последовательности (НП):

$$Z_3 = \frac{\dot{U}_\phi}{i_\phi + \frac{Z_{0уд} - Z_{1уд}}{Z_{1уд}} i_0}, \quad (1)$$

где $\dot{U}_\phi$ – напряжение поврежденной фазы; i_ϕ – сила тока в поврежденной фазе; i_0 – ток НП, протекающий через место измерения; $Z_{1уд}$ – комплексное значение удельного сопротивления ПП; $Z_{0уд}$ – комплексное значение удельного сопротивления НП.

Поскольку КВЛ состоит из нескольких участков, компенсацию токов нулевой последовательности следует выполнять с учетом их неоднородности, а также для исключения влияния сопротивления дуги в месте КЗ определение поврежденного участка должно производиться на основе анализа индуктивных сопротивлений. При этом следует различать удельные сопротивления ПП и НП кабельной

вставки в случае повреждения на ней и на воздушном участке.

В нормальном режиме и при однофазных КЗ на воздушных участках суммарное индуктивное сопротивление до места повреждения определяется эквивалентной глубиной возврата тока через землю (рис. 4).

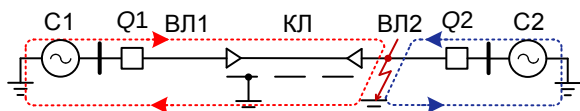


Рис. 4. Схема протекания тока от источников при однофазном КЗ на воздушном участке смешанной ЛЭП напряжением 110–500 кВ

В этих режимах по экрану кабеля ток не протекает. Однофазное КЗ на кабельной вставке приводит к резкому уменьшению индуктивного сопротивления кабельного участка, поскольку ток к месту заземления протекает не по эквивалентному проводнику в земле, расположенному на расстоянии около 1000 м², а по экрану кабеля (рис. 5).

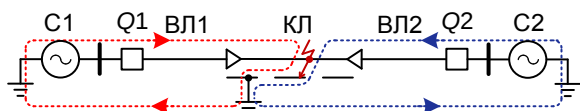
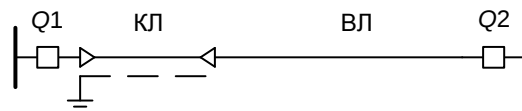


Рис. 5. Схема протекания тока от источников при однофазном КЗ на кабельном участке смешанной ЛЭП напряжением 110–500 кВ

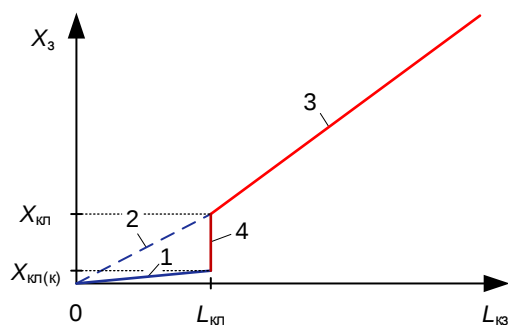
Поврежденный участок кабеля может быть представлен коаксиальным проводником, индуктивность которого в первую очередь определяется толщиной изоляции между жилой и экраном. Так как толщина изоляции намного меньше эквивалентной глубины возврата тока через землю, индуктивное сопротивление ПП кабельного участка при повреждении на нем намного меньше его сопротивления при повреждении на воздушном участке, что может быть использовано для идентификации поврежденного участка смешанной ЛЭП. Так, для трехфазной линии, выполненной кабелями типа 2XS(FL)2Y-1x2500RMS/300-500 kV SUDKABEL GmbH, расположенными горизонтально на расстоянии 0,5 м друг от друга, при глубине залегания под землей, равной 1 м, на основе математического моделирования в программном комплексе PSCAD получены следующие эквивалентные параметры кабельной линии: удельное индуктивное сопротивление ПП при повреждении «жила–экран» 0,053 Ом/км; индуктивное сопротивление НП при повреждении «жила–экран» 0,053 Ом/км; индуктивное сопро-

тивление ПП при повреждении «жила–земля» 0,205 Ом/км; индуктивное сопротивление НП при повреждении «жила–экран» 1,71 Ом/км.

Результаты исследования. При организации кабельного захода в распределительное устройство напряжением 110–500 кВ экран кабеля заземляется со стороны подстанции. Качественная зависимость индуктивного сопротивления ПП, формирующегося в месте измерения, от расстояния до места КЗ на КВЛ представлена на рис. 6.



а)



б)

Рис. 6. Схема исследуемой КВЛ (а); зависимость замера индуктивного сопротивления ПП от расстояния до места повреждения КВЛ (б): X_3 – замер индуктивного сопротивления ПП; $X_{кп}$ – индуктивное сопротивление ПП кабельной вставки без повреждения на ней; $X_{кп(к)}$ – индуктивное сопротивление ПП кабельной вставки при повреждении на ней; $L_{кп}$ – длина кабельной вставки; $L_{кз}$ – расстояние до места повреждения

При повреждении на кабельной вставке замер пропорционален индуктивному сопротивлению ПП кабельного участка $X_{кп(к)}$, соответствующему отрезку 1 на рис. 6,б. При повреждении на воздушном участке КВЛ замер определяется индуктивным сопротивлением ПП кабельного участка $X_{кп}$ без повреждения на нем и сопротивлением воздушного участка до места повреждения (рис. 6,б, отрезки 2 и 3).

Благодаря разнице между сопротивлениями $X_{кп}$ и $X_{кп(к)}$ (рис. 6,б, отрезок 4) определение поврежденного участка КВЛ может быть реализовано путем правильного выбора параметров срабатывания ступени дистанционной защиты от однофазных КЗ в соответствии с условием обеспечения чувствительности к однофазному КЗ в конце кабельного участка:

$$X_{ио} \geq K_{зап} X_{кп(к)}, \quad (2)$$

где $K_{зап}$ – коэффициент запаса.

Коэффициент запаса $K_{зап}$ может быть принят равным 1,2 и при применении специ-

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.

альных алгоритмов цифровой обработки токов и напряжений может быть уменьшен, так как указанная ступень является дополнительной и не влияет на эффективность остальных защит.

На рис. 7 представлена зависимость индуктивного сопротивления ПП от расстояния до места повреждения с указанием зоны запрета АПВ дистанционным ИО с кабельным участком в начале КВЛ.

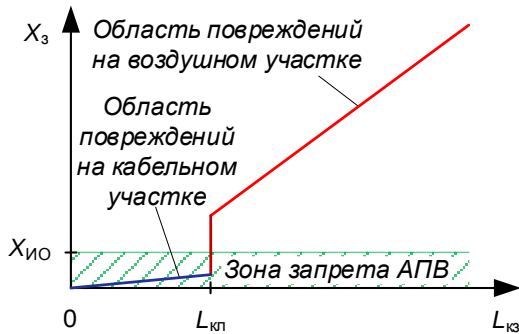


Рис. 7. Зависимость индуктивного сопротивления ПП от расстояния до места повреждения с указанием зоны запрета АПВ дистанционным ИО с кабельным участком в начале КВЛ

Если кабельная вставка расположена на расстоянии от начала и конца ЛЭП, то эффективность определения поврежденного участка с помощью дистанционного метода может быть осложнена по причине заземления экрана кабеля с одной из сторон. При одностороннем заземлении экрана кабеля (рис. 8) с помощью дистанционного ИО невозможно однозначно определить возникновение однофазного КЗ вблизи места перехода с воздушного участка ВЛ1 на кабельный КЛ.

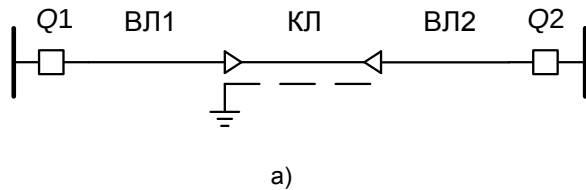


Рис. 8. Схема исследуемой КВЛ (а); зависимость замера индуктивного сопротивления ПП от расстояния до места повреждения КВЛ при расположении кабельной вставки на расстоянии от начала и конца КВЛ и одностороннем заземлении экрана кабеля (б)

По этой причине орган сопротивления, запрещающий действие АПВ, должен быть настроен таким образом, чтобы его сопротивление срабатывания было отстроено от однофазного КЗ в начале кабельной вставки:

$$X_{ио1} \leq K_{отс} X_{вл1}, \quad (3)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, а также чтобы обеспечивалась чувствительность при однофазном КЗ в конце кабельного участка:

$$X_{ио2} \geq K_{зап} (X_{вл1} + X_{кл(к)}). \quad (4)$$

Коэффициент отстройки $K_{отс}$ может быть принят равным 0,85 и увеличен при применении специальных алгоритмов цифровой обработки сигналов. На рис. 9 представлена зависимость индуктивного сопротивления ПП от расстояния до места повреждения с указанием зоны запрета АПВ в случае расположения кабельной вставки на расстоянии от начала и конца КВЛ.

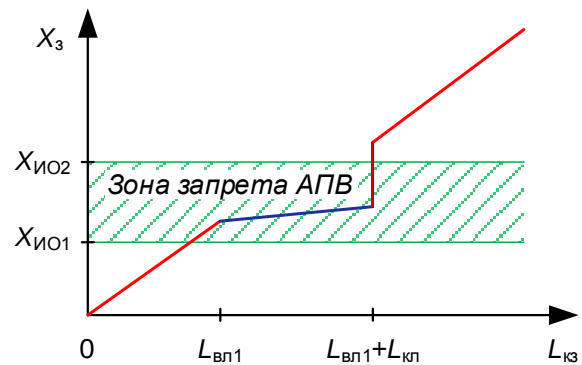


Рис. 9. Зависимость индуктивного сопротивления ПП от расстояния до места повреждения КВЛ при расположении кабельной вставки на расстоянии от начала и конца КВЛ и одностороннем заземлении экрана кабеля с указанием зоны запрета АПВ дистанционного ИО

Оптимальным местом заземления экрана кабеля КВЛ с точки зрения эффективности применения предложенного метода определения поврежденного участка является середина кабельной вставки (рис. 10). В этом случае индуктивные сопротивления срабатывания дистанционного ИО могут быть выбраны из условий отстройки от минимального индуктивного сопротивления на зажимах защиты при однофазном КЗ в начале кабельного участка

$$X_{ио1} \leq K_{отс} (X_{вл1} + 0,5 X_{кл}) \quad (5)$$

и обеспечения требуемой чувствительности при однофазном КЗ в конце кабельного участка

$$X_{ио2} \geq K_{зап} (X_{вл1} + 0,5 X_{кл} + X_{кл(к)}). \quad (6)$$

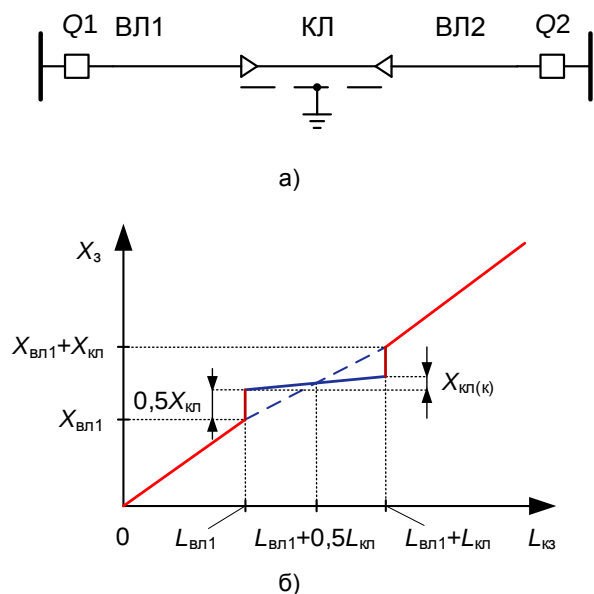


Рис. 10. Схема исследуемой КВЛ (а); зависимость замера индуктивного сопротивления ПП от расстояния до места повреждения КВЛ при расположении кабельной вставки на расстоянии от начала и конца КВЛ и заземлении экрана в середине кабельного участка (б)

На рис. 11 представлена зависимость индуктивного сопротивления ПП от расстояния до места повреждения с указанием зоны запрета АПВ в случае расположения кабельной вставки на расстоянии от начала и конца КВЛ с заземлением экрана в середине кабеля.

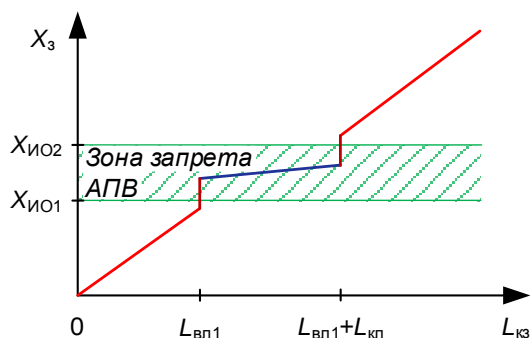


Рис. 11. Зависимость индуктивного сопротивления ПП от расстояния до места повреждения КВЛ при расположении кабельной вставки на расстоянии от начала и конца КВЛ и заземлении экрана в середине кабеля с указанием зоны запрета АПВ дистанционным ИО

Для верификации предложенного метода определения поврежденного участка в программном комплексе PSCAD разработана модель электрической сети напряжением 500 кВ, включающая в себя две питающих электро-энергетических системы и КВЛ (рис. 12).

Параметры и характеристики элементов исследуемой электрической сети представлены в таблице.

При моделировании ИО сопротивления со стороны системы 1 (см. таблицу) коэффициент компенсации токов НП был принят равным нулю по причине равенства удельных сопротивлений ПП и НП при однофазном КЗ, возникшем в результате пробоя изоляции между жилой и экраном кабеля. Со стороны системы 2 коэффициент компенсации был принят равным 0,647 в соответствии с удельными параметрами схемы замещения воздушного участка КВЛ.

Параметры и характеристики элементов электрической сети напряжением 500 кВ

Наименование элемента	Параметр	Значение / тип
System S1	$U_{ном}$	500 кВ
	φ	0°
	R	0,5 Ом
	X	5 Ом
System S2	$U_{ном}$	500 кВ
	φ	40°
	R	1 Ом
	X	10 Ом
Cable transmission line	Тип кабеля	2XS(FL)2Y-1x2500RMS/300-500 kV SUDKABEL GmbH
	Расстояние между центрами кабелей фаз	0,5 м
	Глубина прокладки кабелей	1 м
	Способ прокладки кабелей	Горизонтальный
	Длина	10 км
Overhead transmission line	Тип провода	AC 500/26
	Тип опор	У500Н-1+12
	Длина	50 км

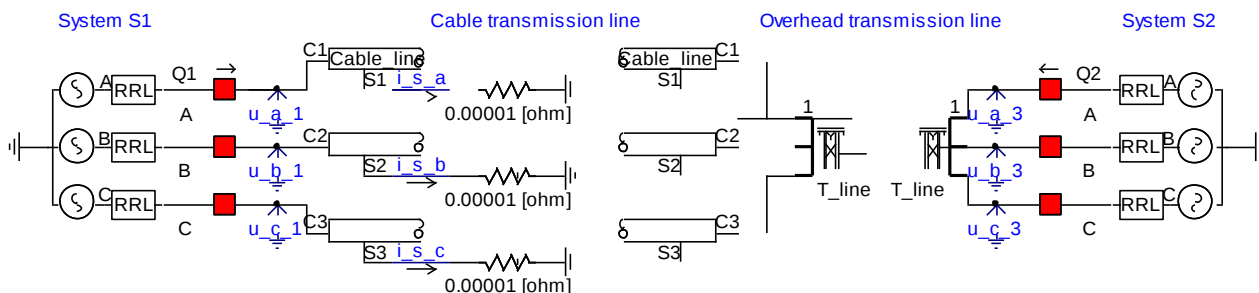


Рис. 12. Модель исследуемой электрической сети в программном комплексе PSCAD

В результате моделирования получены годографы (ИО1 и ИО2) комплексного сопротивления, измеряемого дистанционными ИО по сторонам КВЛ в зависимости от взаимного угла между электродвижущими силами (ЭДС) систем по сторонам линии (рис. 13, 14).

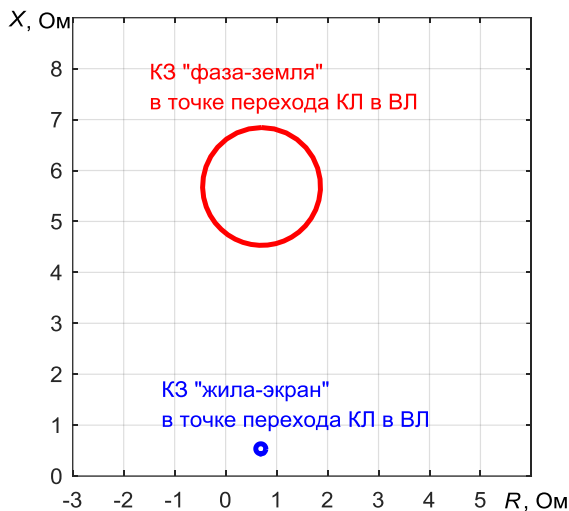


Рис. 13. Годограф комплексного сопротивления ИО1 при изменении угла между ЭДС систем 1 и 2 от 0 до 360 градусов

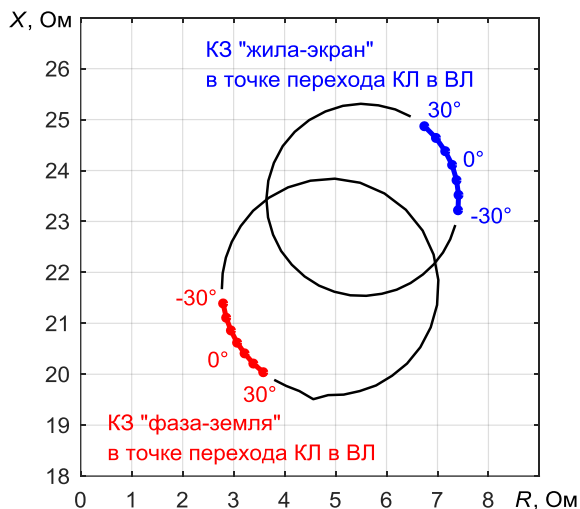


Рис. 14. Годограф комплексного сопротивления ИО2 при изменении угла между ЭДС систем 1 и 2 от 0 до 360 градусов

Для ИО1 годографы не пересекаются, что позволяет однозначно идентифицировать пробой изоляции между жилой и экраном кабеля и заблокировать действие АПВ. Минимальная разница между индуктивными сопротивлениями при различных видах КЗ составляет 4 Ом, что дает существенный запас при организации определения поврежденного участка КВЛ.

Годографы ИО2 при пробое изоляции между жилой и экраном и при однофазном КЗ на воздушном участке вблизи перехода КЛ в ВЛ пересекаются, однако в нормальном режиме

работы взаимный угол между ЭДС систем не превышает 30°, что позволяет определить область повреждений кабельной вставки и заблокировать действие АПВ.

Выводы. Разработанный дистанционный метод определения поврежденного участка КВЛ напряжением 110–500 кВ с односторонним и двусторонним питанием позволяет идентифицировать пробой изоляции между жилой и экраном кабеля. Метод предполагает применение цифровых дистанционных ИО, реагирующих на однофазные КЗ. Такие ИО реализованы во всех микропроцессорных устройствах РЗА ЛЭП напряжением 110 кВ и выше.

Ограничения применимости метода заключаются в его неэффективности при небольшой длине кабельной вставки по отношению к общей длине КВЛ. Дальнейшие исследования будут направлены на повышение эффективности дистанционного органа определения поврежденного участка при небольших длинах кабельной вставки.

Список литературы

1. Овчинников В.В. Автоматическое повторное включение. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с. (Библиотека электромонтера; Вып. 587).
2. Дмитриев М.В. Кабельные линии высокого напряжения. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – 688 с.
3. Горячих А.Д. Автоматическое повторное включение кабельно-воздушных линий с применением электронных оптических трансформаторов тока. Пилотный проект на ПС 220 кВ «Герцево». АО «ОЭК» // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № 1(52). – С. 116–118.
4. Дмитриев М.В. Автоматическое повторное включение на воздушно-кабельных линиях электропередачи 110–500 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2015. – № 1(28). – С. 68–73.
5. Селективное автоматическое повторное включение кабельно-воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше / В.Г. Алексеев, С.А. Арутюнов, С.В. Балашов и др. // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 3(48). – С. 94–101.
6. Живых А.А., Кухарчук А.В. Автоматическое повторное включение с функцией контроля состояния линии электропередачи // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы Всерос. науч.-техн. конф. В 2 т., Пермь, 09–11 июня 2020 г. – Пермь: Пермский нац. исслед. политех. ун-т, 2020. – С. 164–168.
7. Давлетшина А.М. Организация релейной защиты и автоматики линий электропередачи с кабельным участком в начале линии // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация»: материалы Междунар. молодеж. науч. конф. В 3 т., Казань, 28–30 апреля 2021 г. – Казань: ООО ПК «Астор и Я», 2021. – С. 328–331.
8. Goldsborough S.L., Smith R.M. A new distance ground relay // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1936. – Vol. 55, No. 6. – P. 697–703.

9. Аржанников Е.А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 176 с.

References

1. Ovchinnikov, V.V. *Avtomaticheskoe povtornoie vklyuchenie* [Autoreclosing]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 96 p.

2. Dmitriev, M.V. *Kabel'nye linii vysokogo napryazheniya* [High-voltage cable lines]. Saint-Petersburg: POLITEKh-PRESS, 2021. 688 p.

3. Goryachikh, A.D. *Avtomaticheskoe povtornoie vklyuchenie kabel'no-vozdushnykh liniy s primeneniem elektronnykh opticheskikh transformatorov toka. Pilotnyy proekt na PS 220 kV «Gertsevo». AO «OEK»* [Autoreclosing of cable-overhead lines using electronic optical current transformers. Pilot project at the 220 kV Herzevo substation. JSC UEK]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2019, no. 1(52), pp. 116–118.

4. Dmitriev, M.V. *Avtomaticheskoe povtornoie vklyuchenie na vozdushno-kabel'nykh liniyakh elektroperedachi 110–500 kV* [Autoreclosing on overhead cable power transmission lines 110–500 kV]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2015, no. 1(28), pp. 68–73.

5. Alekseev, V.G., Arutyunov, S.A., Balashov, S.V., Erokhin, E.Yu., Il'in, M.D., Mitrofanov, N.N., Nudel'man, G.S., Sdobin, A.V., Smekalov, V.V., Shapeev, A.A. *Selektivnoe avtomaticheskoe povtornoie vklyuchenie kabel'no-vozdushnykh liniy elektroperedachi napryazheniem 110 kV i vyshe* [Selective autoreclosing of cable-overhead power transmission lines with a voltage of

110 kV and higher]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2018, no. 3(48), pp. 94–101.

6. Zhiviykh, A.A., Kukharchuk, A.V. *Avtomaticheskoe povtornoie vklyuchenie s funktsiyey kontrolya sostoyaniya linii elektroperedachi* [Autoreclosing with the function of monitoring the state of the power line]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Avtomatizirovannye sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii»*. V 2 t., Perm', 09–11 iyunya 2020 g. [Proceedings of All-Russian scientific and technical conference, in 2 vols., Perm, June 9–11, 2020]. Perm': Permskiy natsional'nyy issledovatel'skiy politekhnicheskii universitet, 2020, pp. 164–168.

7. Davletshina, A.M. *Organizatsiya releynoy zashchity i avtomatiki liniy elektroperedachi s kabel'nyim uchastkom v nachale linii* [Organization of relay protection and automation of power transmission lines with a cable section at the beginning of the line]. *Materialy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «Energetika i tsifrovaya transformatsiya» (Tinchurinskie chteniya – 2021)*. V 3 t., Kazan', 28–30 aprelya 2021 g. [Proceedings of international youth scientific conference Tinchurin Readings – 2021 “Energy and Digital Transformation”. In 3 vols., Kazan, April 28–30, 2021]. Kazan': OOO PK «Astor i Ya», 2021, pp. 328–331.

8. Goldsborough, S.L., Smith, R.M. A new distance ground relay. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1936, vol. 55, no. 6, pp. 697–703.

9. Arzhannikov, E.A. *Dstantsionnyy printsip v releynoy zashchite i avtomatike liniy pri zamykaniyakh na zemlyu* [Distance principle in relay protection and automation of lines during ground faults]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 176 p.