

- **Вопросы выбора режима заземления нейтрали особенно актуальны на современном этапе развития сетей 6–35 кВ при их расширении, резервировании потребителей, повсеместном внедрении перспективного оборудования – в частности, кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.**

Сейчас уже не подвергается сомнению, что резистивное заземление нейтрали позволяет повысить надежность работы сети. Данные эксплуатации, накопленные по отдельным энергообъектам за 5-10 лет, свидетельствуют о снижении числа аварийных отключений при однофазных замыканиях на землю, связанных с повреждением электрооборудования, в среднем в 4–6 раз при внедрении резистивного заземления нейтрали. Авторы статьи предлагают рассмотреть вопрос увеличения срока службы кабельных линий с СПЭ-изоляцией и обосновывают необходимость специального подхода к режиму заземления нейтрали в таких сетях.

РЕЗИСТИВНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ 6–35 кВ С СПЭ-КАБЕЛЯМИ

Подходы к выбору резисторов и принципы построения релейной защиты

Андрей Ширковец, ведущий инженер научно-исследовательского отдела

Леонид Сарин, директор

Михаил Ильиных, руководитель научно-исследовательского отдела ООО «ПНП БОЛИД», г. Новосибирск

Виктор Подъячев, начальник производственно-технического департамента ОАО «Институт «Энергосетьпроект», г. Москва

Алексей Шалин, д.т.н., проф. кафедры «Электрические станции», Новосибирский государственный технический университет

ВЫБОР РЕЖИМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ

В условиях замены кабелей традиционного исполнения с бумажно-масляной изоляцией (БМИ) на кабели изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-кабели) в единой, электрически связанной распределительной сети – городской, сети электроснабжения промышленных предприятий, схеме выдачи мощности электростанций и т.д., – могут оказаться кабели с различными механизмами пробоя и деградации электрической изоляции.

Инструкции производителей по сооружению и эксплуатации СПЭ-кабелей не предусматривают специальных требований к их испытаниям в комбинированной сети, не выработано и единого подхода к уровням испытательных напряжений (в частности, выпрямленного) [1, 2]. После успешно проведенных испытаний в СПЭ-изоляции возможно развитие спровоцированных дефектов, что будет способствовать снижению ее электрической прочности в эксплуатации. С другой стороны, длительность воздействующих на СПЭ-изоляцию внутренних перенапряжений, а значит, интенсивность ее старения, в значительной мере определяются режимом заземления нейтрали сети.

За рубежом кабельные сети эксплуатируются в основном с резистивно-заземленной нейтралью и при возникновении режима однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) поврежденный фидер отключается с переводом потребителя на резервное электроснабжение. Следовательно, изоляционная конструкция «здоровых» фаз кабеля СПЭ не находится длительное время под линейным напряжением, а значит, не создается дополнительных условий для прорастания триингов в толще твердой СПЭ-изоляции.

В зависимости от величины емкостного тока замыкания на землю отечественные кабельные сети 6–35 кВ эксплуатируются с изолированной нейтралью, либо нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор (ДГР) или резистор. При возникновении в них режима ОЗЗ

изоляция «здоровых» фазов СПЭ-кабелей может длительно (2–6 часов) подвергаться воздействию линейного напряжения. Поэтому конструкция отечественных СПЭ-кабелей была адаптирована к более тяжелым условиям эксплуатации за счет увеличения толщины изоляции кабеля: например, для кабеля номинальным напряжением 10 кВ с 3,4 мм до 4 мм [1]. Фактически при этом просто увеличилось время зарождения и развития триингов, что и определяет электрическую прочность и остаточный ресурс СПЭ-кабелей. Однако не все производители приняли необходимость усиления основной изоляции КЛ и реализовали ее при производстве СПЭ-кабелей [2].

Согласно исследованиям [3, 4] в зависимости от значения емкостных токов ОЗЗ, возникающие в распределительной сети с кабелями БМИ, замыкания фазы на землю на начальной стадии вследствие «заплавания» канала электрического пробоя могут самоустраниться через несколько периодов промышленной частоты, либо перейти в режим устойчивого горения дуги, длительностью в единицы и десятки секунд, с последующим переходом в режим глухого металлического замыкания.

На начальном этапе ОДЗ повторные пробои в дуговом промежутке происходят при напряжении $(0,6-1,0)U_{фм}$, и в дальнейшем с науглероживанием канала электрического пробоя снижаются до $(0,6-0,8)U_{фм}$. При достаточно хорошей компенсации емкостного тока в сети с ДГР возникающие в переходном процессе при ОДЗ перенапряжения не превысят $(2,3-2,5)U_{фм}$. Если же нейтраль изолирована, перенапряжения могут достигать $(3,0-3,2)U_{фм}$ [5]. Эти условия неприемлемы для несамовосстанавливающейся изоляции – сшитого полиэтилена, в котором скорость роста триингов (рис. 1) напрямую определяется характером воздействующих перенапряжений [6].

Как показывает анализ свойств сшитого полиэтилена [7, 8], он, в отличие от бумажно-масляной изоляции более чувствителен к воздействию высокочастотных перенапряжений. Изоляция кабеля СПЭ может подвергаться воздействию как грозových, так и внутренних перенапряжений (коммутационные и перенапряжения при ОЗЗ, в том числе дуговые; частотой от единиц кГц до десятков МГц). Высокочастотные внутренние перенапряжения представляют опасность для СПЭ в сетях 6–35 кВ. При резком вводе энергии в твердый диэлектрик происходит разрыв связей между молекулами углерода и водорода в местах повышенной напряженности электрического поля – например, на кончике триинга, где напряженность электрического поля на 2–3 порядка может превышать среднюю напряженность

■ Рис. 1.

Типичная картина триингов в изоляции СПЭ кабеля, находившегося в эксплуатации

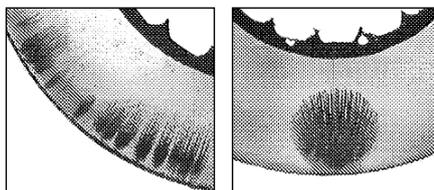
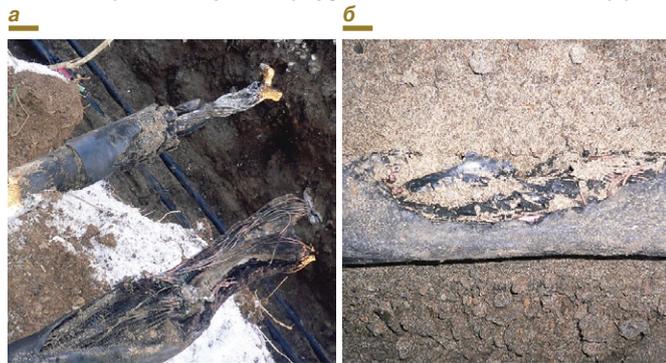


Рис. 2. Повреждение соединительной муфты одной фазы линии 35 кВ СПЭ (а) и фазы проходящей рядом (в той же траншее) другой цепи линии СПЭ 35 кВ (б).



[9]. Это приводит к изменению структуры и физико-механических свойств СПЭ и возникновению внутри него новых микрополостей, которые способствуют дальнейшему развитию электрического триинга в толще твердого диэлектрика в виде дендрита – древовидного образования, имеющего повышенную проводимость и приводящего к прогрессирующему разрушению изоляции.

Следовательно, необходимо подавить высокочастотные перенапряжения и максимально ограничить время воздействия напряжения промышленной частоты на СПЭ-изоляцию соответственно в переходном и установившемся режимах замыкания на землю. Этого можно добиться при переходе к низкоомному резистивному заземлению нейтрали, когда при возможности обеспечения резервного питания поврежденный кабель практически сразу же отключается.

При этом достигается не только существенное ограничение перенапряжений (за счет малого номинала резистора), но и точное определение поврежденного фидера с его последующим отключением (за счет организации селективной и чувствительной защиты от ОЗЗ). Как следствие, срок эксплуатации СПЭ-кабелей в сети с низкоомным заземлением нейтрали может быть значительно увеличен.

Вышеизложенная концепция перехода к режиму резистивного заземления нейтрали справедлива не только для комбинированных сетей 6–35 кВ, где одновременно эксплуатируются СПЭ-кабели и БМИ-кабели, но и для проектируемых сетей, базирующихся на использовании только кабелей с изоляцией из СПЭ.

МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОМИНАЛА РЕЗИСТОРА

Вопрос выбора режима заземления нейтрали в сетях с СПЭ-кабелями должен быть решен однозначно: только включение в нейтраль резистора, эффективно ограничивающего перенапряжения и создающего ток, которого будет достаточно для быстрого/мгновенного срабатывания защиты от ОЗЗ, позволит продлить срок службы СПЭ-кабелей и минимизировать затраты на их восстановление.

Иначе говоря, наиболее приемлемым вариантом является перевод любого возникающего в сети ОЗЗ в устойчивое с отключением поврежденного фидера и его последующим ремонтом. В противном случае длительное воздействие высокочастотных перенапряжений при неотключенном ОЗЗ (например, при горении «прерывистой» дуги) га-

рантирует накопление и развитие дефектов в изоляции СПЭ и приведет в дальнейшем к многоместным пробоям с необходимостью замены больших участков кабеля на одном или нескольких присоединениях.

Отметим также следующее. Поскольку определение места повреждения КЛ зачастую определяется с помощью прожига (для снижения переходного сопротивления), изоляция поврежденного кабеля все равно будет нарушена. При этом может пострадать СПЭ-изоляция кабелей, расположенных рядом в траншее или кабельном канале. Подобная ситуация имела место, в частности, при развитии повреждения кабеля 35 кВ АПвП–(1×150/50) двухцепной кабельной вставки длиной 680 м в городских электрических сетях г. Новокуйбышевска (рис. 2). В результате поиска места повреждения КЛ-35 по одной цепи в результате неоднократного прожига из-за термического воздействия произошло полное разрушение соединительной муфты и была повреждена фаза соседнего кабеля другой цепи 35 кВ.

Компенсация емкостного тока в сети 6–35 кВ с СПЭ-кабелями нецелесообразна, поскольку выше было показано, что поддержание режима ОЗЗ даже в течение небольшого времени крайне неблагоприятно для твердой изоляции из СПЭ. Кроме того, при возникновении двухместного ОЗЗ и/или значительных расстройках компенсации в сети с ДГР из строя могут выйти сразу несколько СПЭ-кабелей, а изоляция оставшихся в работе линий будет подвергаться деградации в течение всего времени существования замыкания за счет развития имеющихся (либо возникших) дефектов. К тому же самогашение дуги в кабелях СПЭ даже при очень хорошей компенсации емкостного тока ОЗЗ неэффективно, поскольку «заплывания» канала пробоя не происходит.

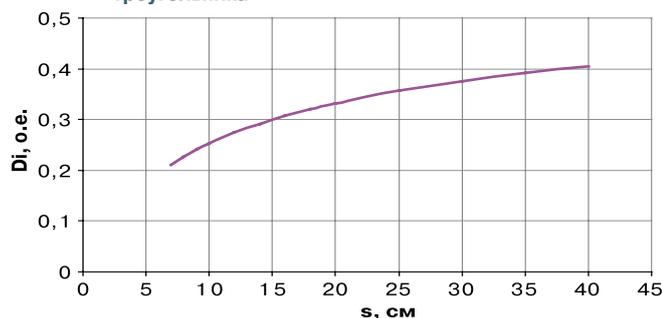
Нелишним будет упомянуть и о включении СПЭ-кабелей в комбинированные сети с БМИ-кабелями и ДГР, когда поиск поврежденного присоединения, даже при современном уровне автоматизации, может происходить путем поочередного отключения фидеров. Каждая коммутация выключателем, особенно вакуумным, присоединения с СПЭ-кабелем, приводит к генерации высокочастотных перенапряжений, также сокращающих изоляционный ресурс кабеля СПЭ.

Переход к глухому заземлению нейтрали также необоснован: при высоких уровнях токов однофазного короткого замыкания на землю и двустороннем заземлении экрана СПЭ-кабеля возможно перегорание экрана. Хотя допустимый ток односекундного КЗ для медного экрана сечением 16–95 мм² довольно велик и составляет (3,3–19,3) кА [10], фактически такие значения достигаются только при грамотном проектном решении и качественном монтаже КЛ с двусторонним заземлением экранов.

Однако при таком варианте заземления экрана одножильного СПЭ кабеля по экрану возможно протекание тока, составляющего значительную долю от номинального тока присоединения даже в нормальном режиме работы. Система «жила-изоляция-экран» является «трансформатором», коэффициент передачи которого зависит от параметров кабеля и расстояния между осями соседних фаз при их расположении в вершинах равностороннего треугольника [11] (рис. 3).

Например, при расчетном коэффициенте передачи 0,3 и токе нагрузки порядка 1000 А ток в экране составит 300 А. Такие значения были зафиксированы при осциллографировании токов в экранах фаз кабеля 35 кВ АПвП-6(1×630/35) длиной 1250 м фидера «ДСП» (ПС «Электро-сталь», Металлургический завод им. А.К. Серова). Частые коммутации

Рис. 3. Доля тока в экране однофазного СПЭ кабеля 10 кВ – 240/35 мм² по отношению к току в жиле: s – расстояние между осями соседних фаз в случае расположения в вершинах равностороннего треугольника



печной установки – до 400 раз в сутки – с бросками тока нагрузки, отсутствие активного демпфера высокочастотных колебаний на направлении «КЛ – ПС» и ошибки монтажа (неправильная опрессовка жил на концевых заделках) привели к многочисленным повреждениям кабеля вследствие многоместного ослабления электрической прочности СПЭ-изоляции (рис. 4), необходимости установки дополнительных муфт. При отсутствии резервного питания на время ремонтных работ (3–4 часа) питание дуговой сталеплавильной установки прекращалось.

В работе [11] убедительно показано, что токи в экранах однофазных кабелей 6–35 кВ из сшитого полиэтилена представляют опасность для этих кабелей. Для снижения токов в экране в зависимости от длины кабеля осуществляется заземление экранов только в одной точке либо применение N циклов транспозиции экранов с установкой в рассечки специальных ОПН.

Поэтому при выборе резистора для заземления нейтрали в сети с СПЭ-кабелями необходимо найти компромиссное решение. С одной стороны, следует обеспечить термическую стойкость экранов КЛ, т.е. фактически ограничить ток однофазного КЗ, с другой – создать условия для максимально быстрого отключения поврежденного кабеля, используя резистор «разумного» номинала (т.е. не завышая чрезмерно «достаточный» для срабатывания РЗиА тока).

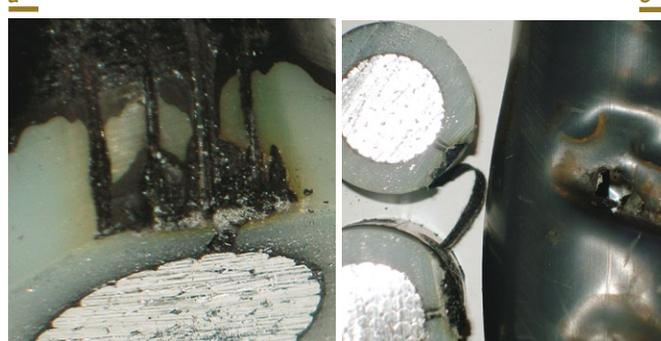
Обе эти задачи могут быть успешно решены при следующем условии: номинал резистора выбирается так образом, чтобы ток, создаваемый им в точке ОЗЗ, был примерно равен фазному току самого мощного присоединения:

$$I_{RN} \cong I_{\text{фидМАХ}} \quad (1)$$

Приняв этот тезис за исходный, необходимо разрешить вопрос организации селективной и чувствительной защиты от ОЗЗ.

В качестве «базового» примера рассмотрим новый проект установки отключаемых резисторов в нейтрали сети 20 кВ ТЭЦ-16 и ПС «Сити-2» «Мосэнерго», выполненной кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена. Номинал каждого резистора – 12 Ом – обеспечивает создание активного тока в месте замыкания величиной $I_{RN} \cong 1000$ А, что сопоставимо с током нагрузки ($I_{\text{фидМАХ}} \cong 800$ – 900 А). В данных сетях, вследствие достаточного уровня резервирования, при ОЗЗ поврежденное присоединение отключается.

Рис. 4. Радиальный пробой «жила-экран» (а) и прогорание внешней оболочки (б) кабеля СПЭ 35 кВ присоединения с дуговой сталеплавильной печью металлургического завода



ЗАЩИТА ОТ ОЗЗ В СЕТИ С НИЗКООМНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ

Исходить нужно из следующего: при однофазных замыканиях на землю должна срабатывать специальная защита от ОЗЗ, а при междуфазных КЗ – своя соответствующая защита. Такое исполнение защит позволит быстрее устранить аварию.

Если значение тока ОЗЗ, определяемое сопротивлением резистора в нейтрали, будет соизмеримо с токами нагрузки, поврежденное присоединение можно будет отключать не мгновенно, а с выдержкой времени. Выполнение защиты только с действием на сигнал нецелесообразно.

Современная практика проектирования предусматривает возможность установки в ячейках КРУ трех трансформаторов тока (ТТ), на базе которых могут быть собраны трехтрансформаторные фильтры тока нулевой последовательности.

Обратим внимание на следующие ключевые моменты:

1. Большие токи междуфазных КЗ (20–60 кА) приводят к появлению в трехтрансформаторных фильтрах тока нулевой последовательности значительных токов небаланса $I_{нб}$, от которых необходимо отстраивать ток срабатывания защиты от ОЗЗ, если она не имеет соответствующей выдержки времени:

$$I_{нб} = k_{\text{одн}} \varepsilon I_{\text{КЗмаХ}} \quad (2)$$

где $k_{\text{одн}} = 1,0$ – коэффициент однотипности ТТ;

$\varepsilon = 0,1$ – предельная погрешность ТТ;

$I_{\text{КЗмаХ}}$ – максимальный ток междуфазного КЗ, который будет протекать по фильтру;

$$I_{\text{СЗ0}} = k_n I_{нб} \quad (3)$$

где $k_n = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент запаса.

2. Чувствительность защиты оценивают коэффициентом чувствительности k_χ :

$$k_\chi = I_{\text{ОЗЗ}} / I_{\text{СЗ0}} \quad (4)$$

где $I_{\text{ОЗЗ}}$ – ток однофазного замыкания на землю, определяемый сопротивлением резистора для заземления нейтрали.

Чувствительность защиты считается удовлетворительной, если $k_{\text{ч}} \geq 1,5$.

При $I_{\text{КЗmax}} = (20-60)$ кА получаем $I_{\text{СЗО}} = (2,2-7,2)$ кА. Если ток резистора 1000 А, что близко к току нагрузки, защита от ОЗЗ оказывается нечувствительной. Для обеспечения минимально необходимого $k_{\text{ч}} = 1,5$ ток резистора должен быть (3,3–10,8) кА, что представляет сложность с точки зрения обеспечения термической стойкости оборудования – в частности, кабельных экранов.

Заметим: даже при включении в схему токоограничивающих реакторов (а их использование в сетях с СПЭ кабелями целесообразно при токах трехфазного КЗ свыше 15–20 кА) и соответствующем повышении $k_{\text{ч}}$ чувствительность защиты от ОЗЗ будет недостаточной. Это следует из того, что для получения минимального $k_{\text{ч}} = 1,5$ в рассматриваемых сетях ток должен быть ограничен согласно (2), (3), (4) до величины $I_{\text{КЗmax}} \leq 6, I_{\text{ОЗЗ}}$, что представляется труднодостижимым.

3. Поскольку при заданных условиях чувствительность защиты оказалась ниже требуемой, выполнить защиту от ОЗЗ можно с выдержкой времени $\Delta t_{\text{ОЗЗ}}$, превышающей выдержку времени защиты от междуфазных КЗ $\Delta t_{\text{КЗ}}$ на ступень селективности Δt :

$$\Delta t_{\text{ОЗЗ}} = \Delta t_{\text{КЗ}} + \Delta t. \quad (5)$$

Выдержку времени защит от междуфазных КЗ примем $\Delta t_{\text{КЗ}} = 0,1$ с; ступень селективности $\Delta t = (0,3-0,4)$ с. Тогда выдержка защиты от ОЗЗ составит $\Delta t_{\text{ОЗЗ}} = (0,4-0,5)$ с.

При этом выражение (2) запишется в виде:

$$I_{\text{нб}}^1 = k_{\text{одн}}^1 \varepsilon I_{\text{НАГРmax}}, \quad (6)$$

где $k_{\text{одн}}^1$ принимается равным 0,5...1,0;

$I_{\text{НАГРmax}}$ – максимальный ток нагрузки, который оценочно можно принять равным номинальному первичному току установленных на защищаемом фидере ТТ $I_{\text{номТТ}}$.

При $I_{\text{номТТ}} = (200-1500)$ А значение тока небаланса в соответствии с (5) $I_{\text{нб}}^1 = (10-150)$ А, ток срабатывания защиты согласно (3) $I_{\text{СЗО}} = (11-180)$ А.

При токе резистора 1000 А чувствительность защиты от ОЗЗ будет обеспечена с большим запасом.

Таким образом, селективная и чувствительная защита от ОЗЗ в кабельных, в том числе комбинированных сетях с СПЭ кабелями может быть выполнена в виде ненаправленной токовой защиты нулевой последовательности. Защита реагирует на основную гармонику тока $3I_0$, протекающего по нулевому проводу трехтрансформаторного фильтра ТТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из важнейших условий, необходимых для продления срока эксплуатации сети с СПЭ-кабелями, является рациональный выбор режима заземления нейтрали.

Глухое заземление нейтрали сети 6–35 кВ, как было показано выше, неприемлемо по причине возникновения сверхтоков в экранах СПЭ-кабелей (как при коротких замыканиях на землю, так и в нормальном режиме, сопровождающемся, например, бросками тока нагрузки) и нарушении термической стойкости экранов.

Достаточно давно ведется активное обсуждение необходимости исключения из практики эксплуатации режима изолированной нейтрали, для чего имеется целый ряд веских оснований [12, 13]. Если нейтраль заземлена через ДГР, возможно возникновение значительных уровней перенапряжений при ОДЗ, а наличие автоматических систем настройки компенсации не всегда решает проблему многоместных повреждений оборудования при замыканиях на землю [14]. К тому же такие способы заземления нейтрали подразумевают возможность длительного сохранения режима ОЗЗ без отключения потребителей.

Воздействие линейных напряжений на «здоровые» фазы СПЭ-кабеля приводит к увеличению средней напряженности электрического поля в СПЭ-изоляции и созданию благоприятных условий для развития триингов в электрически ослабленных местах, локально распределенных по толщине изоляции и длине кабеля. Это, в свою очередь, способствует накоплению и развитию дефектов в изоляционной системе СПЭ-кабелей, а в конечном итоге – повышению аварийности рассматриваемых сетей.

Наиболее приемлемым вариантом является режим заземления сети с СПЭ кабелями через низкоомный резистор, работающий в

комплексе с релейной защитой и гарантирующий быстрое отключение поврежденного фидера при однофазном замыкании на землю. Для этого необходимо обеспечить резервирование участков сети, которые могут быть отключены при ликвидации ОЗЗ.

Анализ особенностей изоляционной среды рассматриваемых КЛ – сшитого полиэтилена, специфических факторов ее старения и зависимости этого процесса от режима заземления нейтрали сети позволил предложить в качестве наиболее рационального способа заземления резистивное.

Учитывая это, а также принимая во внимание опыт использования заземляющих резисторов в ряде сетей 20 кВ «Мосэнерго», считаем целесообразным рекомендовать для включения в перспективные планы развития и модернизации кабельных сетей 6–35 кВ (в том числе сетей крупных промышленных предприятий и городов) с использованием СПЭ-кабелей:

1. Установку в нейтраль трансформаторов головных ПС (ТП) со стороны 6–35 кВ низкоомного резистора, выбранного из условия обеспечения им активного тока в месте ОЗЗ, близкого по величине фазному току наиболее мощного присоединения на шинах ПС (ТП). При этом обеспечивается ограничение перенапряжений и подавление резонансных и феррорезонансных явлений, инициируемых однофазными дугowymi замыканиями на землю.

2. Организацию селективной релейной защиты от ОЗЗ для сети с СПЭ-кабелями на базе включенного в нейтраль резистора. Ток срабатывания защиты определяется номиналом выбранного резистора и для сетей 20 кВ может быть принят на уровне 150–200 А. Защита должна иметь выдержку времени, превышающую выдержку времени резервной ступени защиты от междуфазных КЗ, установленной на том же фидере.

ЛИТЕРАТУРА

- Инструкция по прокладке кабелей силовых с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20 и 35 кВ. RUKAB/ID 23-2-019 (ABB Москвабел).
- Инструкция. Прокладка силовых кабелей на напряжение 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. ИМ СК-20-03 (Камкабель).
- Кадамская К.П., Качесов В.Е., Лавров Ю.А., Овсянников А.Г., Сахно В.В. Диагностика и мониторинг кабельных сетей среднего напряжения // Электротехника – 2000. – № 11. – с. 48–51.
- Ильиных М.В., Ширковец А.И., Сарин Л.И. Компенсированная и комбинированно заземленная нейтраль. Опыт эксплуатации сети 6 кВ металлургического комбината // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – №2 (44).
- Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов – М.: Энергия, 1971.
- Публикации МЭК 60502-2-1997 «Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение от 1 до 30 кВ».
- Кожевников А.С. Стойкость к триингам подтверждена испытаниям // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 2(38). – С. 128–129.
- Бустром Д.О. Соплимерные композиции сшитого полиэтилена для высоконадежных кабелей среднего напряжения // Кабели и провода. – 2005. – № 5(294). – С. 7–22.
- Лавров Ю.А. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 6(42); 2007. – № 1(43).
- Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20, 35 кВ. Технические условия. ТУ 16.К71-335-2004. (ОАО ВНИИКП)
- Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения. / 6-е заседание международной научно-технической конференции «Современные средства защиты электрических сетей предприятий нефти и газа от перенапряжений». Труды конф. – Самара, 2007.
- Глушко В., Ямный О., Ковалев Э., Бохан Н. Белорусские сети 6–35 кВ переходят на режим заземления нейтрали через резистор // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 3(39) – С. 37–40.
- Титенко С.С. России стоило бы подумать над аналогичным документом. Оценки и прогнозы // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 3(39) – С. 42.
- Софинский А.В., Кучеренко В.И., Хуртов И.И. и др. Резистивное заземление нейтрали в сети собственных нужд Энгельской ТЭЦ-3 «Саратовэнерго» // Электрические станции. – 2003. – № 2.