

ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ



2018
4

Учредитель: Московский институт энергобезопасности и энергосбережения

№ 4 (82) Издается с 2005 года. Включен в Перечень ВАК

Совет учредителей:

В. Д. Толмачев
В. Л. Титов
В. М. Гордиенко

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

С. П. Зернес

**Секция безопасности
деятельности человека**

Председатель: П. В. Косенков

Состав секции:

А. И. Даценко
Б. М. Степанов
А. П. Хаустов
В. И. Энгватов

**Секция энергоресурсосбережения
и энергоэффективности**

Председатель: В. М. Аванесов

Состав секции:

Ю. Ф. Тихоненко
А. П. Щеренко

**Секция электро- и теплоснабжения
предприятий и городов**

Председатель: К. В. Капелько

Состав секции:

В. А. Стенников
Ю. Е. Пащенко
В. В. Гудков

**Секция теории и методики
обучения в энергетике**

Председатель: И. С. Растворов

Состав секции:

А. А. Гуров
И. В. Клян
С. В. Семенов

Научный редактор:

Т. Б. Лецинская

Корректор:

Л. И. Ильина

Компьютерная верстка и дизайн:

Е. Е. Можжухина

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере массовых
коммуникаций, связи и охраны
культурного наследия.

Свидетельство о регистрации:

ПИ № ФС 77-28742

от 05 июля 2007г.

ISSN 2071-2219



9 772071 221004

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ТРУДА

**А. И. Ширковец, А. В. Телегин, В. Н. Валов,
И. Г. Хадыев.** Эффективная защита от однофазных
замыканий и их локализация в распределительной
сети с помощью низкоомных резисторов 5

А. М. Елин, М. Н. Карнаух. Аудит как инструмент
управления охраной труда организации 16

ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

**А. А. Ашрятов, С. А. Вишневский, Р. Р. Волков,
А. В. Казаков.** Оценка эффективности прожекторов
и прожекторных ламп, применяемых
на железнодорожном транспорте 21

С. М. Карпенко, М. С. Карпенко. Основные направления
совершенствования организационных механизмов
повышения энергоэффективности промышленных
предприятий 27

Е. В. Кочарян, Е. Д. Скиба. Пути повышения
эффективности транспорта газа
в магистральных газопроводах 32

В. В. Барановский, Т. Ю. Короткова, М. Ю. Коновалов.
Модернизация антиобледенительных систем
газотурбинных двигателей парогазовых
энергоустановок ТЭС 36

A. V. Kychkin, K. V. Sinitcina. Hardware-in-the-loop
simulation and energy monitoring software
for microgrid research 41

ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ

В. А. Петрова, А. А. Петров. О необходимости учета
вероятности отказа агрегата мини-ТЭЦ в момент
его запуска при решении задач надежности 48

Эффективная защита от однофазных замыканий и их локализация в распределительной сети с помощью низкоомных резисторов

А. И. Ширковец,

ООО «Болид», г. Новосибирск,
начальник отдела международных отношений и инжиниринга,
кандидат технических наук

А. В. Телегин,

Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск,
кафедра электроэнергетических систем и электротехники

В. Н. Валов,

Новосибирский государственный технический университет,
кафедра электрических станций

И. Г. Хадыев,

АО «Оскольский электрометаллургический комбинат», г. Старый Оскол,
начальник лаборатории диагностики электрооборудования

Обоснованы необходимость и возможность применения режима заземления нейтрали, обеспечивающего перевод сети на качественно новый уровень эксплуатации за счет селективного выявления и автоматического отключения участков сети с однофазным повреждением. Ключевыми преимуществами рассматриваемого способа заземления нейтрали, которые достигаются при выполнении ряда объективных условий, являются повышение наблюдаемости и управляемости режимами сети. В рамках исследования выполнен анализ схем подключения и предложены критерии выбора сопротивления низкоомного резистора, а также способы организации селективной релейной защиты. Проанализирована возможность выявления поврежденного участка сети за счет обеспечения чувствительности указателей аварийного тока при оснащении сети низкоомным резистором. Показано, что условия электробезопасности при увеличении активной составляющей тока замыкания на землю целесообразно оценивать по допустимому напряжению прикосновения с учетом времени отключения замыкания.

Ключевые слова: электробезопасность, заземление нейтрали, однофазное замыкание, низкоомный резистор, селективная релейная защита, напряжение прикосновения.

В условиях внедрения инновационных технологий в электроэнергетику пристального внимания заслуживает обеспечение безопасной эксплуатации распределительных сетей среднего напряжения, состояние которых в значительной мере определяет качество и надежность электроснабжения потребителей. Эта задача может быть решена с помощью комплекса мероприятий по модернизации, реконструкции и техническому перевооружению электрических сетей, включая оптимизацию режима нейтрали, реализацию принципов технического обслуживания и ремонта по состоянию, повышение культуры монтажа и эксплуатации, уровня управляемости параметрами сети и других факторов. Техничко-экономический эффект от реализации этих мер может быть увеличен за счет изменения способа заземления нейтрали сети 6–35 кВ, рассматриваемого как часть концепции интеллектуальной сети (*smart grid*), поскольку он позволяет предупредить ряд негативных эффектов, связанных с особенностями таких сетей.

Низкоомное резистивное заземление нейтрали, обеспечивающее селективное отключение однофазных повреждений, является наиболее эффективным в условиях, при которых возможно обеспечить резервирование потребителей. Такой режим нейтрали является оптимальным с позиции безопасности п. 1.7.64 ПУЭ 7-го издания и соответствует общей концепции построения интеллектуальных электрических сетей и цифровых подстанций. Дополнительным фактором, повышающим управляемость и наблюдаемость сети, является выявление участка сети с однофазным повреждением с помощью контроля направления токов однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) на основе специальных индикаторов-датчиков, надежность работы которых возрастает за счет активного тока, протекающего в точке однофазного повреждения [1]. Реализация комплекса мероприятий по оперативному выявлению и устранению повреждений означает улучшение индексов надежности электроснабжения (SAIDI, SAIFI и CAIDI согласно стандарту IEEE).

Перевод сети на режим низкоомного заземления нейтрали предусматривает не только установку и замену силового оборудования, но и автоматизацию прилегающей сети с настройкой, модернизацией и оснащением присоединений релейными защитами и датчиками тока нулевой последовательности [2]. Требуется решить и ряд организационных вопросов согласования новой схемы заземления нейтрали, действия релейных защит и устройств ввода резерва между эксплуатирующими организациями, которым принадлежат центры питания 110(220) кВ, и потребителями, на балансе и в эксплуатации которых находятся трансформаторные подстанции прилегающей сети.

Практика применения

Заземление нейтрали сети через резистор разрешено пунктами 1.2.16 и 4.2.166 ПУЭ 7-го изд. Использование на практике резисторов с сопротивлением от 12–15 Ом и выше не приводит к переводу сети в разряд сетей с эффективно заземленной нейтралью, поскольку коэффициент замыкания на землю остается равным 1,73 (напряжения на неповрежденных фазах возрастают до линейного при «металлическом» замыкании на землю), как и для сетей с изолированной нейтралью. Это подтверждено расчетами и натурными измерениями, в том числе в сети 20 кВ с резистором 12 Ом/1000 А [3].

Низкоомное резистивное заземление нейтрали предполагает обязательное селективное отключение ОЗЗ в течение минимально возможного времени (доли и единицы секунд). Активный ток от резистора должен быть достаточным для обеспечения устойчивого горения заземляющей дуги и селективного срабатывания релейной защиты на отключение поврежденного присоединения или участка сети, что требует определенного уровня автоматизации. Включение в нейтраль низкоомного резистора обеспечит ограничение перенапряжений до уровня не более $2,5 U_{\text{Фmax}}$ и нарушение условий существования резонансных явлений. Перевод однофазной дуги в устойчивую фазу, когда замыкание на землю по характеристикам становится подобным «металлическому», исключает вероятность возникновения повторных пробоев и двойных и междуфазных повреждений из-за развития ОЗЗ, в отличие от сети с изолированной нейтралью.

Исключение множественных повреждений изоляции за счет селективного отключения ОЗЗ зафиксировано при эксплуатации низкоомных резисторов в сетях филиала ОАО «МРСК Урала» – «Пермэнерго», сетях 35 кВ АО «ДРСК» (г. Владивосток) и АО «РЭС» (г. Новосибирск), сетях 20 кВ АО «ОЭК» и филиала ПАО «ФСК ЕЭС» – «МЭС Центра», ПАО «МОЭСК».

Реализация низкоомного резистивного заземления нейтрали выполняется вне зависимости от значения емкостного тока сети. При этом необходимость в компенсации емкостного тока, то есть установки или модернизации схем с дугогасящими реакторами на центрах питания 110–220 кВ, отсутствует. Включение резистора в нейтраль дает возможность

устранить практически все недостатки сети с изолированной нейтралью или компенсацией емкостного тока и является оптимальным вариантом при условии резервирования потребителей [4]. Такой режим нейтрали закреплен в локальных стандартах ПАО «МРСК Волги», «МРСК Сибири», «Ленэнерго», «МРСК Центра», АО «Объединенная энергетическая компания». Режим заземления нейтрали через низкоомный резистор в настоящее время находит активное применение в электрических сетях среднего напряжения в крупных городах, а также на некоторых промышленных предприятиях. Кабельная сеть напряжением 20 кВ в московской энергосистеме строится исключительно с низкоомным резистивным заземлением нейтрали (ток от резистора 1000 А) в центрах питания 110–220 кВ. Рассматриваемый режим нейтрали реализован на ряде подстанций ПАО «Ленэнерго», где действует программа по переводу кабельной сети 6–10 кВ Санкт-Петербурга на заземление через низкоомные резисторы в 2016–2032 гг. В электрических сетях Беларуси резисторы активно внедряются с 1999 г. и к настоящему времени установлены более чем на 20 подстанциях в сетях 6–10 кВ.

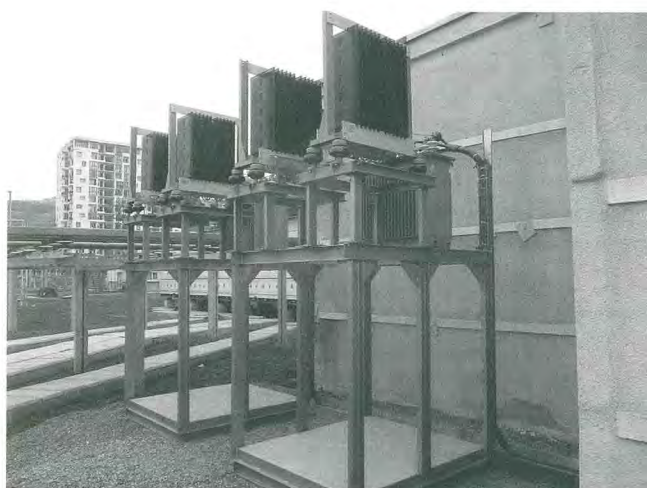
Варианты реализации низкоомного резистивного заземления приведены на рис. 1.

Актуальным является применение низкоомного резистивного заземления нейтрали в сетях с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена, в том числе с кабельными вставками на воздушных линиях. Из-за особенностей конструкции муфты на кабельных линиях всегда являются ослабленным элементом схемы, где развиваются частичные разряды, скорость и интенсивность которых резко возрастает при нарушениях технологии монтажа. За счет особенностей полимерной изоляции и кумулятивного характера развития дефектов в ней накапливаются и развиваются как электрические триинги, «прорастающие» при воздействии высокочастотных перенапряжений, так и водные триинги, в целом вызывающие старение изоляции и аварийные отказы [5, 6]. Сохранение режимов с длительным удержанием ОЗЗ, в том числе при изолированной нейтралью сети, приводит к пробоям и обширным повреждениям, в ряде случаев с выгоранием части линии, узла присоединения муфты, а в некоторых случаях – одной или нескольких ячеек (например, известно о выгорании большого количества моноблоков RM6 в сети 10 кВ с компенсацией емкостного тока в течение нескольких лет). В связи с этим для защиты линий с изоляцией из сшитого полиэтилена от однофазных замыканий на землю следует применять устройства релейной защиты с действием на отключение.

Кабельные линии на основе кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией в эксплуатируемых сетях зачастую изношены. Их нормативный срок службы составляет 30 лет, однако заложеного ресурса при технически правильном подходе, включая внедрение щадящих методов испытаний, может быть достаточно еще на несколько лет, а в некоторых случаях и десятилетий безаварийной эксплуатации. Быстрое



а



б

Рис. 1. Низкоомные резисторы сопротивлением 50 Ом (а) и 25 Ом (б), подключенные через масляные однофазные фильтры в схеме двух подстанций городской кабельной сети 6 кВ

селективное отключение ОЗЗ позволяет снижать воздействие перенапряжений на изоляцию таких кабелей и продлить срок их службы.

Потребители резервируются с помощью устройств автоматического ввода резерва по стороне 6–35 кВ, а при наличии возможности – и по стороне 0,4 кВ. Стоимость ремонта поврежденных кабелей при ОЗЗ меньше стоимости восстановительных работ после аварийных отключений из-за переходов ОЗЗ в междуфазные короткие замыкания. Необходимость отключения линий с изоляцией из сшитого полиэтилена при замыканиях на землю регламентирована в локальных стандартах ПАО «ФСК ЕЭС», «МРСК Сибири» и «Ленэнерго».

Режим нейтрали с низкоомными резисторами может использоваться в сетях 6–35 кВ без ограничения по уровню емкостных токов при I и II категориях по надежности электроснабжения и реализации селективной защиты присоединений с ОЗЗ, действующей на отключение. В этих условиях положительным эффектом является повышение категории некоторых потребителей на ступень (с III на II), кото-

рый технически достигается за счет организации автоматического резервирования.

Анализ схем подключения

Нейтрали сетей 6–35 кВ заземляются через резистор на питающих ПС или шинах ТЭЦ. Оборудование для заземления нейтрали сети устанавливаются на каждой секции шин 6–35 кВ. Для подключения резистора в сети 6–35 кВ необходим трансформатор заземления нейтрали 35(10,6)/0,4 со схемой соединения обмоток Y_0/Δ или фильтр нулевой последовательности без вторичной обмотки со схемой Z_0 .

В сети 35 кВ резистор может подключаться в нейтраль блочного трансформатора блока «генератор – трансформатор» или в нейтраль отдельного трансформатора заземления нейтрали или фильтра нулевой последовательности, а также в нейтраль обмотки 35 кВ силового трансформатора 110–220 кВ. Для подключения резистора, за исключением случаев его присоединения к нейтрали генератора 6–10 кВ (когда это предусмотрено производителем) или питающего трансформатора 110–220 кВ, требуется нейтралеобразующее устройство. В цепи низкоомного резистора обычно устанавливают трансформатор тока, с которого поступает сигнал для защиты резистора с возможностью его отключения по истечении заданной уставки по времени. В Австралии, США и ряде стран Европы для подключения резисторов используются в основном маломощные фильтры нулевой последовательности, обеспечивающие низкое сопротивление нулевой последовательности для минимального ограничения тока резистора – в пределах 5–15 % от номинального. Трансформатор (фильтр) для подключения резистора должен быть выбран с учетом его кратковременной перегрузки током резистора, желательно не более чем в 4–4,5 раза относительно номинальной мощности.

Стандарт IEEE Std 142-2007 [7], п. 1.5.3, в случае низкоомного заземления нейтрали в качестве рекомендуемой рассматривает схему с глухим включением трансформатора заземления нейтрали на шины, «чтобы не допустить его непреднамеренного отключения (случайного вывода из работы) при срабатывании коммутационных аппаратов. В данном случае трансформатор... будет защищаться релейной защитой шин». Подобной является схема с трехполюсным разъединителем для подключения нейтралеобразующего устройства к шинам, рассматриваемая в РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87) «Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ»: «при использовании трансформаторов только для подключения реакторов (дугогасящих – прим. авт.)». Такое техническое решение, кроме экономической составляющей, не несет в себе преимуществ.

Обоснованной и наиболее распространенной в отечественной практике является схема, предусматривающая отдельный выключатель с защитой (ячейку КРУ) для управления нейтралеобразующим устройством и резистором (рис. 2, где *grounding transformer* – заземляющий трансфор-

матор, *grounding resistor* – заземляющий резистор R_N). Степень локализации аварийной ситуации при этом несколько выше, чем в случае коммутации ввода с отключением питающего трансформатора, с точки зрения надежности и безопасности схемы этот вариант также является предпочтительным.

В действующих распределительных сетях, где предполагается перевод на низкоомное резистивное заземление нейтрали зачастую уже установленные нейтралеобразующие трансформаторы достаточной мощности, присоединенные к шинам через отдельные выключатели. Во многом это связано с рекомендациями выпущенных в 1994 г. «Типовых материалов для проектирования 407-03-642.94. Установка трансформаторов собственных нужд и заземляющих реакторов», где указано: «Трансформаторы 6–10 кВ, используемые для подключения заземляющих реакторов, подключаются к шинам при помощи трехполюсных выключателей».

В проектных решениях для сетей 6–10 кВ схема с отдельным выключателем (рис. 2) обычно используется «по умолчанию». В пользу этого решения свидетельствует и другая аналогия: практика проектирования сегодня предусматривает использование выключателей с организацией полноценной защиты ячейки даже для трансформаторов собственных нужд мощностью 100–160 кВА, несмотря на формальное разрешение применять в качестве защитных аппаратов предохранители вплоть для ТСН мощностью до 250 кВА.

Альтернативным вариантом, который широко применяется в сетях московской энергосистемы и предусмотрен в [7], п. 1.6.5, является использование резистора, подключаемого непосредственно к нейтрали обмотки низкого напряжения трансформато-

ров 110–220 кВ со схемой Y_0/Y_0 и мощностью 80–160 МВА (Регламент организации ОАО «ОЭК» по способам подключения, обслуживанию и ремонту устройств заземления нейтрали электрических сетей 20 кВ).

За рубежом в ряде случаев используется схема подключения фильтра и резистора непосредственно на шины за выводами 6–20 кВ силовых питающих трансформаторов (рис. 3). При таком способе подключения заземляющий трансформатор включается в схему релейной защиты силового трансформатора. Очевидное достоинство такой схемы, равно как и схемы с резисторами 20 кВ, включенными в нейтрали питающих трансформаторов с низкой стороны, – исключение возможности работы сети без резистора, то есть случаев, когда релейная защита от ОЗЗ в прилегающей сети окажется неработоспособной.

Глухое подключение нейтралеобразующего устройства к шинам не предусмотрено в отраслевых нормативных документах и пока не используется на отечественных электросетевых и промышленных предприятиях. Предпочтительной является типовая схема с отдельным выключателем в составе линейной ячейки для управления и защиты присоединения с резистором.

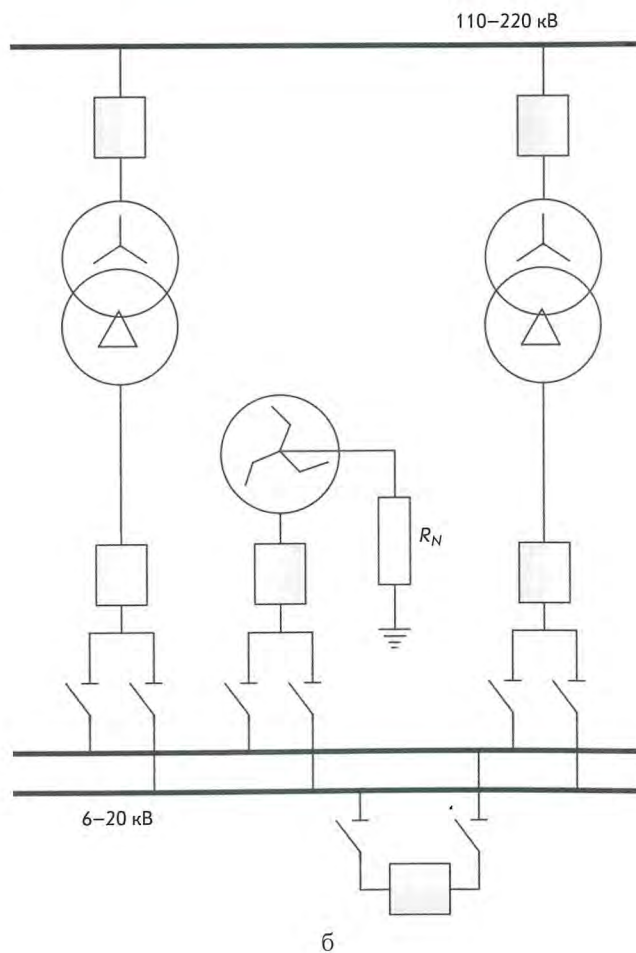
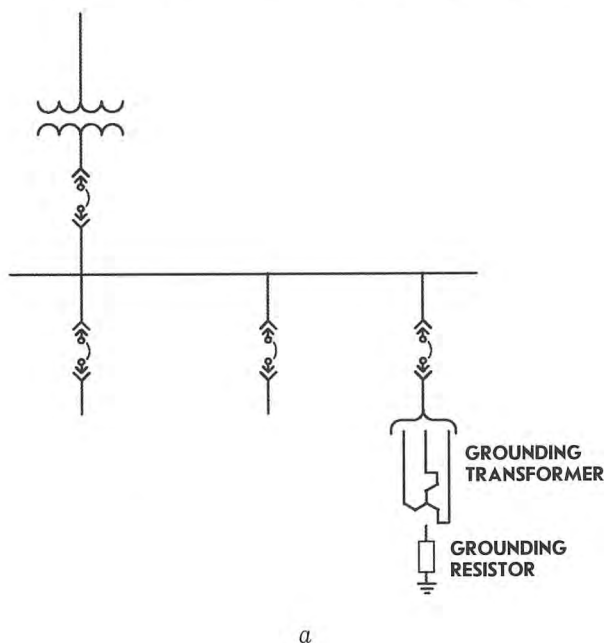


Рис. 2. Схема подключения заземляющего трансформатора к шинам через выключатель:

а – из IEEE Std 142;
б – стандартный вид

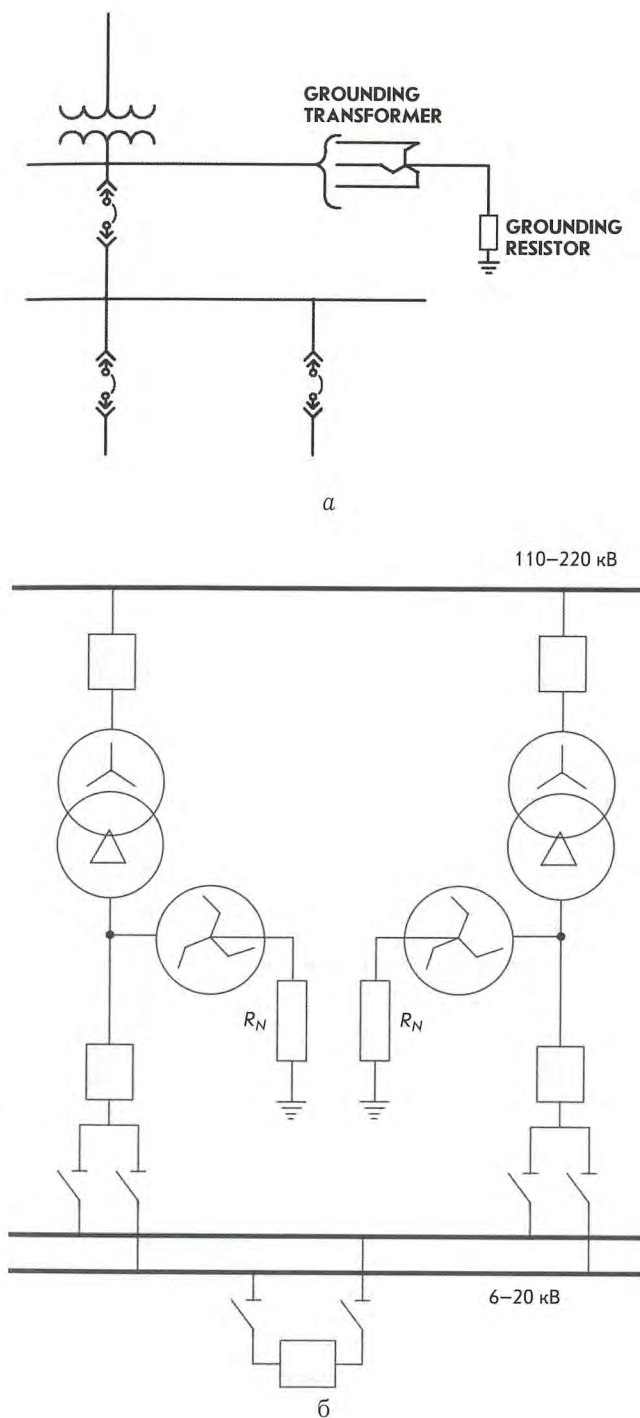


Рис. 3. Схема подключения заземляющего трансформатора с резистором на шины с низкой стороны питающего трансформатора:

а – из IEEE Std 142;
б – стандартный вид

Ограничение перенапряжений

Задача ограничения перенапряжений при низкоомном резистивном заземлении нейтрали не является ключевой, поскольку успешно решается благодаря существенному снижению добротности в сети с низкоомным резистором. Уровень перенапряжений K_U в сети с резистивным заземлением нейтрали

в зависимости от отношения активного и емкостного тока I_R/I_C можно определить по следующему выражению [8]:

$$K_U = 1,71 + \frac{(1-d)C_\Phi}{C_\Phi + C_{\Phi\Phi}} \cdot \left[0,93 - (\sin \psi_\Gamma - 0,2) \cdot \exp\left(-\frac{I_R}{I_C}(1,19 - \psi_\Gamma)\right) \right], \quad (1)$$

где d – коэффициент демпфирования свободных колебаний;

$C_\Phi \approx 3C_{\Phi\Phi}$ – фазная и междуфазная емкость сети соответственно.

В (1) фаза гашения дуги ψ_Γ , соответствующая максимуму перенапряжений, определяется как

$$\psi_\Gamma = \arcsin \frac{0,2(I_R/I_C)^2 - \sqrt{(I_R/I_C)^2 + 1}}{(I_R/I_C)^2 + 1}. \quad (2)$$

На основе (1) с учетом (2) построены кривые $K_U(I_R/I_C)$ (рис. 4). Для широкого класса сетей 6–35 кВ характерны значения $d = 0,05-0,10$, что соответствует нормальной и ослабленной изоляции сети.

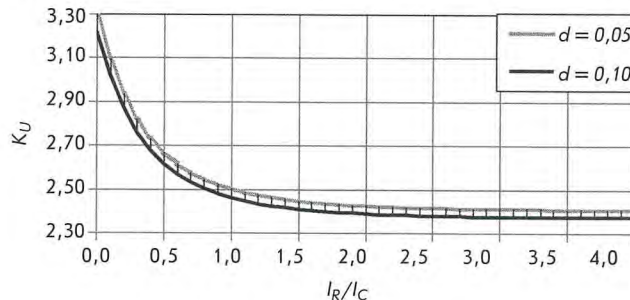


Рис. 4. Уровни перенапряжений при дуговых ОЗЗ в сети с резистивным заземлением нейтрали

Как следует из рис. 2, $K_{Umax}(I_R/I_C = 0) > 3,0$. Это объясняется тем, что расчет перенапряжений по формуле (2) справедлив для незначительно ослабленной изоляции КЛ и не учитывает дополнительное демпфирование высокочастотного переходного процесса, в том числе за счет сопротивления цепи замыкания. Очевидно также, что при $I_R/I_C \geq 2$ эффект ограничения K_U за счет дальнейшего повышения I_R становится незначительным. Следовательно, использование для заземления нейтрали резисторов с токами $I_R > 2I_C$ обусловлено необходимостью решения другой практической задачи – переводом дуги в устойчивую фазу горения за время примерно 0,1 с и обеспечения селективности релейных защит от ОЗЗ.

Критерии выбора сопротивления низкоомного резистора

Правильный выбор резистора для организации селективного автоматического отключения ОЗЗ в сети обеспечивает надежное решение ряда задач, в том числе глубокое ограничение перенапряжений и предупреждение вторичных замыканий, а также исключение переходов ОЗЗ в КЗ. На практике сопро-

тивление резистора выбирают наименьшим, исходя из двух нижеуказанных условий.

1. Обеспечение устойчивого горения дуги при ОЗЗ, при котором ток резистора должен превышать емкостный ток ОЗЗ в 2,5–4 раза [8, 9]:

$$I_R \geq (2,5 \div 4,0)I_C \Rightarrow R_N \leq \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot (2,5 \div 4,0)I_C}. \quad (3)$$

В зависимости от значения емкостного тока и класса напряжения сети 6–35 кВ предложены следующие условия устойчивого горения дуги для кабельных сетей:

$$I_C = \begin{cases} 4,0 \text{ при } I_C \leq I_{\text{норм}}; \\ 2,5 \div 4,0 \text{ при } I_{\text{норм}} < I_C < I_{\text{пред}}; \\ 2,5 \text{ при } I_C > I_{\text{пред}}, \end{cases} \quad (4)$$

где $I_{\text{норм}}$ – нормативное значение емкостного тока, по достижении которого требуется введение компенсации согласно нормам ПУЭ и ПТЭ;

I_C – суммарный емкостный ток сети;

I_R – активный ток резистора;

$I_{\text{пред}}$ – предельное значение тока ОЗЗ, обеспечивающего возможность самогашения дуги в сети согласно [10]. $I_{\text{пред}} = 60$ А для кабельных сетей 6–10 кВ и 30 А для сетей 35 кВ.

Выражение (4) используется для первичной оценки требуемого сопротивления резистора. В целях унификации резисторов по сопротивлению на разных секциях одной подстанции и на подстанциях одной сети, в зависимости от конкретных условий, активные токи от резисторов могут быть приняты большими относительно рассчитанных.

2. Обеспечение селективного срабатывания простых токовых защит на отключение ОЗЗ, при котором ток резистора должен превышать максимальный ток срабатывания защиты $I_{C3\text{max}}$ от ОЗЗ в соответствии с выражением (5). Требуемое сопротивление резистора по критерию надежной работы релейной защиты от ОЗЗ определяется выражением:

$$R_N \leq \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}I_{C3\text{max}} \cdot k_{\text{ч}} \cdot k_{\Omega}}, \quad (5)$$

где $I_{C3\text{max}}$ – максимальный ток срабатывания релейной защиты от ОЗЗ;

$k_{\text{ч}}$ – коэффициент чувствительности, принимаемым равным 1,25 и 1,50 для фидеров с кабельными и воздушными линиями соответственно (по ПУЭ 7-го изд., п. 3.2.21);

k_{Ω} – коэффициент запаса, учитывающий погрешность первичных датчиков тока, переходное сопротивление в месте замыкания (в кабеле) и суммарное сопротивление цепи протекания тока ОЗЗ (включая сопротивление нейтралеобразующего устройства), время отключения ОЗЗ, изменение сопротивления резистора при нагревании в рабочих режимах.

Принимается: $k_{\Omega} = 1,5$ при условии применения композиционных резисторов и 3,0 – металлических [11].

Для выбора сопротивления низкоомного резистора в сети с емкостными токами замыкания на землю до 100 А приоритетным считается условие гарантированного перевода перемежающейся дуги в устойчивую фазу горения, при емкостных токах замыкания более 100 А – условие гарантированной работы релейных защит от ОЗЗ. При выборе резистора по приведенным условиям обеспечивается ограничение перенапряжений при ОЗЗ до уровня $K_U = (1,73 \div 2,5)U_{\text{ф}}$. Кратность перенапряжений обратно пропорциональна времени горения дуги и приближается к значению $K_U = 1,73$ при времени ОЗЗ более 0,1 с.

Организация релейной защиты и требования к резисторам

Релейная защита от ОЗЗ, работающая в сочетании с низкоомными резисторами в нейтрали и действующая на отключение любого ОЗЗ в сети, возможна в следующих исполнениях: токовые реле в сочетании либо совмещенные с реле времени и указательные реле, цифровые терминалы защиты на каждом присоединении, централизованные защиты от замыканий на землю.

При низкоомном резистивном заземлении нейтрали селективная работа защит достигается при использовании токовых ненаправленных (код ANSI 51N/51G) и направленных (код ANSI 67/67N) защит от ОЗЗ. Применение направленных токовых защит от ОЗЗ допустимо в случае, если собственные емкостные токи отходящих присоединений велики и отстройка от них не представляется возможной при сохранении требуемой чувствительности ненаправленной защиты.

Согласование защит разных подстанций и распределительных/трансформаторных пунктов (РП/ТП) прилегающей сети необходимо производить путем установки разной выдержки времени срабатывания, если это допустимо по условиям электробезопасности, с шагом селективности 0,2–0,3 секунды в зависимости от рекомендаций производителя защит, при этом максимальная выдержка времени должна быть у защит от ОЗЗ питающей ПС.

Для повышения селективности защит на разных распределительных пунктах, помимо отстройки по времени, можно использовать ступенчатый принцип по току, когда ток срабатывания вышестоящей защиты отстраивается от тока срабатывания нижестоящей, например с коэффициентом 1,1–1,2. Однако область применения этого решения ограничена. В схемах с одним-двумя уровнями РП и близкими сечениями и длинами кабелей между центром питания и РП и между разными РП/ТП (продольные связи «РП – РП» и «РП – ТП») это облегчает выбор уставок и показывает неплохой результат, но в большинстве случаев, особенно для сложных схем городских сетей, такая унификация приведет к существенному загромождению уставок по току. В зависимости от количества уровней

«РП – ТП» для отходящих магистральных линий на центре питания будет сложно добиться нормативного коэффициента чувствительности (по ПУЭ 7-го изд., п. 3.2.21). Таким образом, выбор уставок защит по току с помощью ступенчатого принципа вносит большую погрешность, так как не учитывается реальная емкость линий относительно земли в зависимости от их протяженности. Последние значения могут существенно отличаться для разных присоединений. Чтобы избежать этого, отстраиваться нужно от реальных емкостных токов по каждому отходящему фидеру как на самой питающей ПС, так и на РП и ТП прилегающей сети (по условию несрабатывания защиты при внешнем ОЗЗ).

Приемлемым вариантом организации ненаправленных защит от ОЗЗ на распределительных и трансформаторных подстанциях, где в ближайшие 2–3 года не предполагается реконструкция или модернизация с заменой всех ячеек 6(10) кВ на новые с микропроцессорными защитами и вакуумными выключателями, является применение на каждом отходящем присоединении комплекта реле. В ряде современных проектов заложены и уже смонтированы на объектах надежные электромеханические реле серий РТ, РВ и РУ, а также микропроцессорные токовые реле, например PRI-51.

Следует отметить, что при ОЗЗ непосредственно на секции шин, к которой подключен низкоомный резистор, защита должна отключать секцию (ввод) с запретом АПВ и АВР. При отказе защит по отключению поврежденного присоединения должно быть выполнено резервное действие защит от ОЗЗ по отключению секции (ввода), к которой присоединено поврежденное присоединение, с целью защиты низкоомного резистора от термического повреждения и предотвращению работы сети в режиме ОЗЗ с большим током повреждения. При этом должен быть выполнен запрет АВР. Если допустима временная работа сети с изолированной нейтралью – отключается присоединение с низкоомным резистором. Последний вариант на практике не используется, поскольку защита от ОЗЗ, настроенная с учетом тока резистора, при этом становится неработоспособна.

Параллельная работа сети на ПС с низкоомным заземлением нейтрали и сети, где нейтраль изолирована или заземлена через дугогасящий реактор, возможна только кратковременно и, как правило, только в пределах одного или нескольких РП. При этом должен быть решен вопрос с уставками и принципами работы защит от ОЗЗ, в том числе оснащение присоединений основным и резервным комплектом релейной защиты на разных принципах [2].

В качестве индивидуальных защит присоединений при низкоомном резистивном заземлении нейтрали можно применять практически любые терминаторы, включающие функцию ANSI 51N/51G.

В режиме замыкания на землю протекание тока через резистор вызывает его нагрев и изменение сопротивления относительно номинального. Следовательно, актуальным становится вопрос о достаточности активного тока для надежной работы релейной защиты НП.

Анализ действующих нормативных документов в области режимов нейтрали, а также сравнительный анализ технических особенностей выпускаемых резистивных установок, позволили сформулировать следующие технические требования к силовым резисторам, выполнение которых гарантирует работоспособность защит (при правильном их выборе и настройке) независимо от времени отключения ОЗЗ:

- резистивный материал должен иметь температурный коэффициент сопротивления не более $0,000263 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ по требованиям стандарта IEEE C57.32-2015 [12]. Предпочтительным является отрицательный температурный коэффициент сопротивления, обеспечивающий повышение активного тока в режиме ОЗЗ для надежной работы релейной защиты;

- изменение активного тока от резистора в течение номинального времени работы не должно превышать номинального допуска $\pm 10 \%$ из ряда по ГОСТ 9664-74 «Резисторы. Допускаемые отклонения от номинального значения сопротивления»;

- при кратковременном режиме работы в режиме замыкания на землю для низкоомных (отключаемых) резисторов температура нагрева резистивных элементов не должна превышать температуру предельного кратковременного нагрева заземляющих проводников электроустановок выше 1000 В при однофазном замыкании, равную $400 \text{ }^\circ\text{C}$ (по ПУЭ 7-го изд., п. 1.7.114);

- резистор должен обладать минимальной индуктивностью;

- время работы в режиме замыкания на землю для низкоомных (отключаемых) резисторов, рассчитанных на номинальное напряжение сети, должно быть достаточным для срабатывания устройств РЗА от ОЗЗ с учетом норм [12].

Изложенные требования в настоящее время закреплены в ряде локальных отраслевых стандартов и применяются при проектировании и строительстве электрических сетей не только в России, но и странах ближнего зарубежья.

Выявление поврежденного участка сети

В разветвленных и протяженных кабельных сетях, в том числе сетях крупных городов, актуальной является задача оперативного выявления поврежденного участка. Это связано с возможностью значительного изменения конфигурации сети в течение небольшого промежутка времени за счет оперативных переключений, перевода потребителей, локализации замыканий и других причин. При этом происходит изменение величины тока ОЗЗ, протекающего в разных точках сети.

Для решения данной задачи наиболее эффективным является применение топографического метода определения поврежденного участка, заключающегося в дооснащении каждого участка сети указателями поврежденного участка, которые способны регистрировать факт протекания аварийного тока и передавать информацию об аварийных событиях на диспетчерские пункты и централизованные терминалы систем регистрации.

В случае значительных изменений тока ОЗЗ по причинам, указанным выше, чувствительность и селективность отдельных указателей поврежденного участка может быть не обеспечена. Для решения этой задачи можно предложить два пути: во-первых, применение указателей с улучшенными техническими характеристиками, например с функцией определения направления потока мощности; во-вторых, включение дополнительного силового оборудования, позволяющего увеличивать ток ОЗЗ до величины, превышающей порог срабатывания указателей и обеспечивающего их стабильную работу в различных режимах эксплуатации.

Использование указателей с улучшенными характеристиками приводит к увеличению затрат на реализацию. В этом случае наиболее надежным и эффективным вариантом является использование указателей, обладающих возможностью определения направления мощности нулевой последовательности. Однако при использовании указателей с чувствительностью срабатывания при токе ОЗЗ от 0,5 А следует учитывать тот факт, что в зависимости от класса напряжения сети и суммарной протяженности линии (ответвлений) могут наблюдаться ложные срабатывания указателей, особенно в сетях с изолированной нейтралью. Это объясняется тем, что ток ОЗЗ является током разряда распределенной емкости линии и будет собираться в месте замыкания со всех участков электрической сети, при этом возможно протекание через указатель поврежденного участка собственного емкостного тока присоединения, превышающего порог срабатывания этого указателя. Для отстройки от ложных срабатываний при протекании собственных емкостных токов необходимо учитывать суммарную протяженность разных присоединений и магистральных линий, типы применяемых указателей и места их установки. Однако способ может оказаться неэффективным при значительных переключениях в сети.

Второй способ обеспечения чувствительности указателей поврежденного участка может быть реализован с помощью низкоомного резистивного заземления нейтрали. В случае возникновения ОЗЗ во всех присоединениях протекают собственные емкостные токи, однако в поврежденном присоединении, кроме суммарного емкостного тока, протекает активный ток от резистора, значительно превышающий порог срабатывания указателей. Другими словами, активный ток от резистора будет протекать только по поврежденному участку: от подстанции, где он устанавливается, до места замыкания. Тем самым происходит увеличение аварийного тока ОЗЗ для обеспечения гарантированного срабатывания указателей поврежденного участка. Для исключения ложных срабатываний следует использовать указатели с высоким порогом срабатывания, например не менее 10 А.

На рис. 5 представлен пример включения указателей аварийного тока в сеть с резистивным заземлением нейтрали. Каждый указатель оснащается трансмиттером, который по GSM-каналу или радиоканалу передает данные на диспетчерский пульт либо на блок сбора данных, интегрированный в систему АСУ ТП.

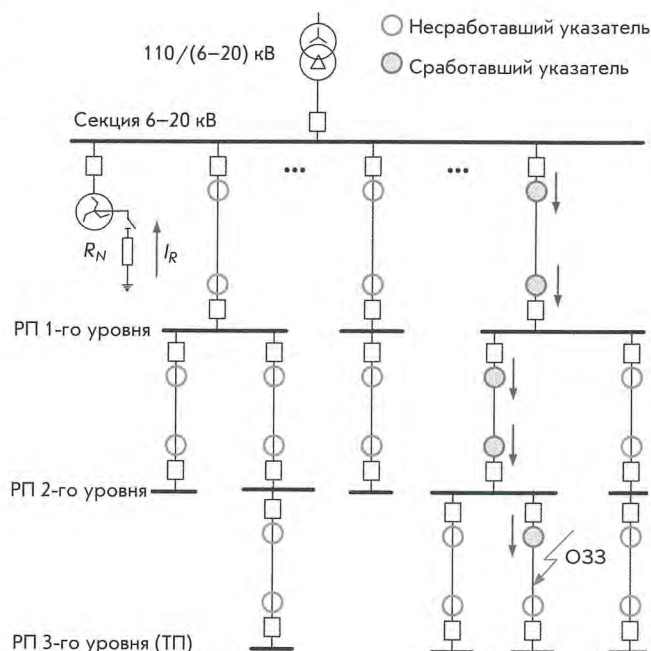


Рис. 5. Структурная схема кабельной распределительной сети с резистивным заземлением нейтрали, оснащенной указателями аварийного тока

Таким образом, целесообразно использовать низкоомное резистивное заземление нейтрали для увеличения тока в месте повреждения, чтобы гарантировать чувствительность и селективность указателей поврежденного участка сети. Это позволит повысить эффективность локализации однофазных повреждений в кабельных сетях.

Обеспечение электробезопасности

Требования к параметрам защитного заземления и напряжений прикосновения для сетей с резисторами не регламентированы в существующих нормативных документах. Обеспечение электробезопасности с точки зрения допустимого напряжения прикосновения является более рациональным и справедливым, поскольку позволяет оценить реальную опасность для эксплуатационного персонала случаев повреждения изоляции и появления потенциала на доступных для прикосновения заземленных частях электроустановок.

В пользу такого решения свидетельствует положение СТО ОАО «ФСК ЕЭС» 56947007-29.130.15.114-2012 «Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6–750 кВ» (п. 5.2): «ЗУ должно обеспечить защиту от поражения электрическим током (электробезопасность персонала) при появлении потенциалов на открытых проводящих частях в нормальных и аварийных режимах работы электроустановок. Электробезопасность характеризуется предельно допустимыми значениями напряжений прикосновения и должна быть обеспечена при любых условиях эксплуатации подстанции. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения установлены в ГОСТ 12.1.038-82».

Нормирование напряжения прикосновения может выполняться по одному из двух вариантов: как для сетей с изолированной нейтралью или как для сетей с глухозаземленной нейтралью по ГОСТ 12.1.038-82 «Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов». Возможность второго варианта связана с тем, что любое ОЗЗ в сети с низкоомным резистором рассматривается как аварийный режим и отключается с минимальными выдержками времени, как и все однофазные и многофазные повреждения в сетях напряжением 110 кВ и выше.

Расчет напряжения прикосновения достаточно трудоемкий и выполняется в специализированных программных комплексах с учетом конфигурации и состояния естественных и искусственных заземлителей. В первом приближении оценка напряжения прикосновения выполняется как произведение расчетного напряжения на заземляющем устройстве, полученного на модели сети, и понижающего коэффициента из диапазона 0,40–0,85.

Электробезопасность в кабельной сети с низкоомным резистором будет обеспечена быстрым отключением ОЗЗ и растеканием более 80 % тока замыкания по оболочкам кабелей [13], заземленных с двух сторон и связанных с главными контурами заземления ($R_{3y} \leq 0,5$ Ом) на питающих подстанциях класса 110–220 кВ. До 20 % тока ОЗЗ растекается по PEN-проводникам низковольтной сети, а на долю непосредственно заземляющего устройства приходится не более 2–3 % тока однофазного замыкания в сети среднего напряжения. Такие токи в заземляющем устройстве не создают опасных значений напряжения прикосновения при малом времени отключения ОЗЗ.

Натурные измерения в городских распределительных кабельных сетях с током $I_R = 950–1400$ А показали, что при этих условиях напряжения шага и прикосновения с вероятностью 0,95 не превышают 5 В/кА относительно тока ОЗЗ, а наибольшие значения достигают 20–30 В/кА при эквивалентном сопротивлении заземления 20–30 мОм [14]. Подобные результаты были получены при исследованиях напряжений прикосновения и шага в городских электрических сетях Чехии и Финляндии. При использовании в городской кабельной сети, насыщенной подземными металлическими коммуникациями, резистора с током 100–1000 А напряжение прикосновения составит десятки вольт, что при отключении повреждения за время до 5 с не представляет опасности по ГОСТ 12.1.038-82. Это было подтверждено авторами настоящей статьи при расчете на компьютерной модели участка кабельной сети 10 кВ, где для самых «тяжелых» расчетных случаев ОЗЗ напряжение на заземляющем устройстве питающего центра и наиболее удаленного ТП не превысило 24 В при заземлении нейтрали через резистор с током 1000 А.

С учетом большого количества трансформаторных подстанций 6(10)/0,4 кВ в городских сетях и на промышленных предприятиях актуален вопрос о возможном выносе потенциала на корпуса электрооборудования в сети 0,4 кВ. Однако проблема выноса потенциала не представляет серьезной опасности

при токах однофазного замыкания на землю до 700 А [15]. Более того, реализация рекомендуемых в СТО ОАО «ФСК ЕЭС» 56947007-29.130.15.114-2012 «Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6–750 кВ» решений, таких как «уменьшение шага ячеек сетки заземлителей, местное выравнивание потенциала и использование высокоомных (гравий, щебень) или изоляционных (асфальт) покрытий», позволяет снизить напряжение прикосновения до двух раз. Крайне полезным в этом плане представляется опыт московских кабельных сетей, где закреплена более жесткая относительно ПУЭ норма по допустимому сопротивлению заземляющего устройства объектов прилегающей сети – не более 0,5 и 1,0 Ом на ТП и РП соответственно.

Для сетей с воздушными линиями вопрос электробезопасности должен быть проанализирован отдельно с учетом конструкции сети (материал опор, тип проводов), норм сопротивления заземления опор, удельного сопротивления грунта, вида однофазных повреждений (пробой изоляторов, обрыв шлейфа, обрыв провода с падением на землю и т. д.), применяемых устройств релейной защиты от ОЗЗ и индикаторов протекания тока замыкания, наличия автоматических пунктов секционирования (реклоузеров) и их оснащения, наибольшей вероятной длительности ОЗЗ в сети с учетом времени поиска повреждения без отключения и других факторов.

В силу объективных причин обеспечить условия электробезопасности и надежную работу защит от ОЗЗ в воздушных и смешанных сетях сложнее, что необходимо учитывать при выборе параметров резистора для заземления нейтрали с учетом сформулированных требований.

Таким образом, наблюдаемость и управляемость режимами и параметрами оборудования на объектах электросетевого комплекса могут быть повышены помимо средств мониторинга и диспетчеризации за счет управления режимом нейтрали. Внедрение низкоомных резисторов позволяет снизить количество и длительность отключений потребителей, в широком контексте – улучшить показатели надежности электроснабжения (указанные индексы SAIDI, SAIFI и CAIDI). Практика применения низкоомных резисторов в городских сетях подтвердила приведенные положения.

Преимущества применения низкоомных резисторов реализуются благодаря эффективной защите оборудования сети от перенапряжений и организации селективной релейной защиты от замыканий на землю. Необходимым условием является автоматизация сети с отключением поврежденного присоединения или участка сети, включая решения по резервированию потребителей. В кабельных сетях с изоляцией из сшитого полиэтилена режим выполнения заземления нейтрали призван (при выполнении качественного монтажа) обеспечить нормативный срок эксплуатации линий.

Для подключения резисторов используются в основном маломощные трансформаторы со схемой

соединения обмоток Y_0/Δ и фильтры нулевой последовательности без вторичной обмотки со схемой Z_0 , мощность которых выбирается с учетом кратковременной перегрузки током резистора примерно в 4 раза и уровня ограничения активного тока в пределах 10–15 %.

На практике применяются разные схемы включения резистора. Варианты с глухим подключением нейтрализующего устройства к шинам, когда оно входит в область действия релейной защиты секции шин или силового трансформатора, предусмотрены только в зарубежных нормативных документах. Типовой для отечественных сетей является рекомендуемая схема с отдельным выключателем в составе линейной ячейки для управления и защиты присоединения с резистором, по аналогии с подключением дугогасящего реактора.

Необходимыми и достаточными критериями выбора сопротивления низкоомного резистора являются:

1) обеспечение устойчивого горения дуги при ОЗЗ – ток резистора должен превышать емкостный ток ОЗЗ в 2,5–4 раза;

2) обеспечение селективного срабатывания ненаправленных токовых защит на отключение – ток резистора должен превышать максимальный ток срабатывания защиты. Обычно выполнение первого условия означает и выполнение второго и, более того, гарантирует низкие уровни перенапряжений, поскольку обеспечивается устойчивый характер, аналогичный «металлическому» замыканию на землю.

Релейная защита от замыканий на землю при низкоомном резистивном заземлении строится на основе токовых ненаправленных и направленных защит (ANSI 51N/51G и 67/67N соответственно) и

реализуется как на основе микропроцессорных терминалов, так и отдельных реле. Надежное срабатывание защиты достигается при ее правильном выборе и настройке с учетом параметров резистора, удовлетворяющего сформулированным техническим требованиям.

Оперативное выявление поврежденного участка в сети с частым и существенным изменением конфигурации и значения тока ОЗЗ может быть достигнуто с помощью совместного применения резисторов и указателей тока замыкания. Благодаря протеканию заведомо известного тока резистора через место повреждения обеспечивается достоверное срабатывание указателей поврежденного участка с передачей информации на диспетчерский пульт. Это гарантирует сокращение времени поиска места замыкания и ликвидации технологических нарушений и аварий в протяженных кабельных сетях.

Защитные мероприятия при низкоомном заземлении нейтрали целесообразно выполнять на основе системы нормирования условий электробезопасности по допустимому напряжению прикосновения. Проблема выноса потенциала на корпуса электрооборудования в сети 0,4 кВ при низкоомном резистивном заземлении нейтрали успешно разрешается, с одной стороны, за счет естественного параллельного соединения контуров заземления в центре питания и прилегающей сети оболочками кабелей и подземными коммуникациями, с другой – потенциально возможным (и уже реализованным в Москве) усилением требований к сопротивлению заземляющего устройства на РП/ТП прилегающей сети. Дополнительные защитные меры включают местное выравнивание потенциала и использование изоляционных покрытий.

Литература

1. Карташев А. С., Рукавицын А. А., Кучерявенков А. А. Задача поиска ОЗЗ в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2016. – № 12. – С. 2–5.
2. Валов В. Н., Ширковец А. И., Кудряшов Д. С. Организация релейной защиты при переводе городских сетей 6–10 кВ с компенсацией емкостного тока на низкоомное резистивное заземление нейтрали // Энергетик. – 2016. – № 9. – С. 13–16.
3. Майоров А. В., Челазнов А. А., Ильиных М. В. Экспериментальные исследования переходных процессов при однофазных замыканиях в сети 20 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2015. – № 6. – С. 23–29. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2015.6.023-029>.
4. Востросаблина В. А. Резисторное заземление нейтрали в сетях среднего напряжения: «за» и «против» // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2014. – № 4. – С. 76–79.
5. Лавров Ю. А. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией. Факторы эксплуатационной надежности // Новосты электротехники. – 2006. – № 6.
6. Шувалов М. Ю., Образцов Ю. В., Овсиенко В. Л., Удовицкий П. Ю., Мнека А. С. Развитие водных триингов в экструдированной кабельной изоляции как электрический эффект Ребиндера // Кабели и провода. – 2006. – № 4. – С. 14–19; № 6. – С. 8–12.
7. IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991): IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.4396963>.
8. Беляков Н. Н. Перенапряжения от заземляющих дуг в сетях с активным сопротивлением в нейтрали // Труды ВНИИЭ. – 1961. – № 11. – С. 84–101.

9. Ширковец А. И. Особенности развития дуговых замыканий на землю в кабельной изоляции сети с резистором в нейтрали // Энергетик. – 2016. – № 9. – С. 36–40.
10. Fuchs E., Fickert L. The self-extinguishing current limit and the arc-burning time of compensated 20-kV-power-grids, Proceedings of PQ2012 8th International Conference: 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability, June 16–18, 2012, Tartu, Estonia, pp. 229–235. <https://doi.org/10.1109/PQ.2012.6256232>.
11. Майоров А. В., Ширковец А. И., Валов В. Н. Режим нейтрали и организация релейной защиты от замыканий на землю в сети 20 кВ // Релейная защита и автоматизация. – 2015. – № 2. – С. 34–40.
12. IEEE Std C57.32-2015 (Revision of IEEE Std 32-1972): IEEE Standard for requirements, terminology, and test procedure for neutral grounding devices. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7457587>.
13. Oka K., Yoshinaga J., Koizumi S., Uemura S., Ariga Y. Study of neutral grounding for 22 KV distribution system, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002, vol. 3, pp. 2143–2148. <https://doi.org/10.1109/TDC.2002.1177793>.
14. Fickert L., Schmutz E., Raunig C., Lindinger M. J. Verification of earthing global systems, 22nd International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2013), Stockholm, June 10–13, 2013. <https://doi.org/10.1049/cp.2013.0539>.
15. Кужеков С. Л. Кратковременное низкоомное заземление нейтрали в сетях 6–10 кВ. Электробезопасность обеспечена в полном объеме // Новости электротехники. – 2013. – № 2.

Efficient single-phase-to-ground fault protection and localization in distribution grids by using low-value resistors

A. I. Shirkovets,

*Bolid LLC, Novosibirsk, Russia,
Head of the International Relations and Engineering Department, PhD*

A. V. Telegin,

*Siberian State University of Water Transport,
Russia, Department of Electrical engineering systems and electrical power engineering,
postgraduate student*

V. N. Valov,

*Novosibirsk State Technical University, Russia,
Department of Power Stations*

I. G. Khadyev,

*Oskol Electrometallurgical Plant, Russia,
Head of the Electrical Equipment Diagnostics Laboratory*

We have clarified feasibility and prospects of a specific neutral grounding mode intended to selective identification and automated disconnection of grid sections where a single-phase-to-ground fault has occurred. Low-resistance grounding is highly compatible with the Smart Grid concept. The grounding method we describe in this paper, is able to boost power grid controllability as well as power supply reliability. Our study includes connection diagrams and selection criteria for low-value resistors and for organization of selective relay protection methods. Interruption locations can be sensibly detected by fault sensors if low-value resistors are part of a scheme. Electrical safety is estimated by acceptable touch potential and ground fault elimination time.

Keywords: *electrical safety, neutral grounding, single-phase-to-ground fault, low-value resistor, selective protection, touch potential.*