

Режим заземления нейтрали в задаче автоматизации распределения электроэнергии и построения интеллектуальных сетей

ВАЛОВ В. Н., Новосибирский государственный технический университет
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

ШИРКОВЕЦ А. И., канд. техн. наук

ЛИСКЕ А. Г., ТЕЛЕГИН А. В., ООО «Болид»

630015, г. Новосибирск, Электrozаводская ул., 2, корп. 6

nio_bolid@mail.ru



В. В. Валов



А. И. Ширковец



А. Г. Лиске



А. В. Телегин

Выбор оптимального режима заземления нейтрали распределительной сети, в значительной мере определяющего показатели надёжности электроснабжения потребителей — объективная необходимость в рамках развития концепции интеллектуальных сетей. Переход на качественно новый уровень эксплуатации возможен при исключении режима изолированной нейтрали, который предполагает длительное удержание замыкания на землю (создание электро- и пожароопасных ситуаций) и реализации 100 % автоматического отключения участков сети с однофазным повреждением. Предлагаемое техническое решение основано на применении низкоомных резисторов и в настоящее время активно внедряется в распределительных кабельных сетях в соответствии с политикой инновационного развития электросетевого комплекса, включая автоматизацию распределения электроэнергии.

Ключевые слова: режим заземления нейтрали, автоматизация, интеллектуальная сеть, замыкание на землю (однофазное повреждение), низкоомное резистивное заземление, селективная релейная защита, определение повреждённого участка.

В настоящее время в электрических сетях среднего напряжения России, Чехии, Латвии, Австрии, Финляндии, Италии и других стран по-прежнему используются режимы изолированной нейтрали и компенсации ёмкостных токов, вследствие чего отсутствует необходимость в немедленном отключении присоединения при первом однофазном замыкании на землю (ОЗЗ).

Однако в современных условиях это приводит к негативным последствиям. Изношенность эксплуатируемого оборудования, массовое внедрение кабельных линий (КЛ) с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) способствуют переходу ОЗЗ в короткие замыкания (КЗ) с аварийным отключением и значительным объёмом повреждений. Поэтому при построении интеллектуальных распределительных сетей важная и актуальная задача — локализация и быстрая ликвидация замыкания на землю с минимизацией времени потери питания.

Предлагаемый для решения данной задачи режим низкоомного резистивного заземления нейтрали отвечает принципам построения цифровых подстанций и сетей напряжением 6 – 35 кВ, соответствует приоритетному сегменту «надёжные и гибкие распределительные

сети» дорожной карты EnergyNet Национальной технологической инициативы и отвечает нормам Положения ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе», Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) и лучшим зарубежным практикам [1, 2]. Заземление нейтрали через низкоомный резистор широко применяется в электрических сетях Франции, Великобритании, Германии, Австралии, США. Научно-техническая основа использования активного сопротивления в контуре нулевой последовательности для повышения чувствительности токовых релейных защит и ограничения дуговых перенапряжений заложена ещё в 1950 – 1960-х годах прошлого столетия [3, 4].

В рамках создания интеллектуальной электроэнергетической системы техническое перевооружение невозможно без изменения режима нейтрали сети. Одним из основных принципов построения такой системы и цифровой сети как её составляющей, является принцип самовосстановления после сбоев в подаче электроэнергии. Важное условие его реализации — поэтапный перевод распределительных сетей 6 – 35 кВ крупных питающих подстанций на режим заземления нейтрали через низкоомный

резистор, что позволяет полностью исключить развитие однофазных повреждений в междуфазные и многоместные, организовать дистанционный контроль на базе оборудования телемеханики, сократить время существования режима замыкания на землю и снизить время поиска повреждений. Указанные факторы, обеспечивающие положительный эффект, соответствуют реализации концепции «Цифровая трансформация 2030», предусматривающей внедрение интеллектуальных систем контроля, управления и телемеханики [5].

Особенности применения низкоомных резисторов

Практическая реализация

Преимущественной областью применения низкоомного резистивного заземления нейтрали являются кабельные сети 6 – 35 кВ. Для реализации такого режима нейтрали необходима установка специального силового оборудования и автоматизация прилегающей распределительной сети с оснащением всех присоединений релейными защитами и датчиками тока. При этом достигается:

- исключение КЗ, возникающих при развитии ОЗЗ, снижение динамических воздействий на электрооборудование, в том числе на обмотки силовых трансформаторов;

- исключение многоместных повреждений и каскадных отключений присоединений;

- сохранение дорогостоящего оборудования вследствие ограничения перенапряжений;

- оперативное выявление и локализация участка с ОЗЗ с автоматическим включением резерва и минимизацией времени восстановления питания.

Заземление нейтрали сети через резистор предусмотрено в действующей редакции ПУЭ [1] и новой редакции Положения о технической политике ПАО «Россети», проходящей этап обсуждения в экспертном сообществе.

Протекание активного тока от резистора только в повреждённом присоединении обеспечивает селективное выявление с возможностью быстрого отключения ОЗЗ (повреждённого присоединения или участка сети) релейными защитами в течение долей и единиц секунд, что обеспечивается в силу устойчивого горения заземляющей дуги. В настоящее время накоплен большой опыт применения низкоомного резистивного заземления нейтрали. Существенное снижение повреждаемости, связанное с автоматическим селективным отключением ОЗЗ, зафиксировано в сетях 6 – 10 кВ ПАО «Ленэнерго», Группы «ИнтерРАО», ГПО «Белэнерго», сетях 35 кВ АО «ДРСК» (г. Владивосток), сетях 20 кВ АО «Объединённая энергетическая компания» и филиала ПАО «ФСК ЕЭС» — «МЭС Центра».

Так, для двух крупных питающих центров одного из отечественных мегаполисов с общей протяжённостью прилегающих кабельных сетей более 200 км собраны и проанализированы данные, демонстрирующие в течение 5 лет после установки низкоомных резисторов снижение удельной повреждаемости и затрат на ремонт КЛ в 1,6 – 4,1 раза. Эти показатели зависят от числа, конструкции и срока эксплуатации линий: меньшие значения показателей соответствуют относительно новой (порядка 10 лет с начала эксплуатации) сети, выполненной преимущественно кабелями с изоляцией СПЭ, большие — достаточно изношенной сети (более 30 лет), в основном на основе кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией.

Низкоомное резистивное заземление нейтрали реализуется вне зависимости от значения ёмкостного тока сети, при этом не требуется установка или замена дугогасящих реакторов (ДГР) на питающих подстанциях 110(220)/6(10,35) кВ. Ключевые требования по выбору и реализации режима заземления нейтрали, в том числе через резистор, отражены в рамках стандартов организаций «Россети Московский регион», «Россети Ленэнерго», «Россети Волга», «Россети Сибирь», «Россети Центр», «Объединённая энергетическая компания».

В связи с положительным эффектом данного технического решения кабельная сеть напряжением 20 кВ в Московской энергосистеме строится и эксплуатируется исключительно с низкоомным резистивным заземлением нейтрали при условии, что ток от резистора равен 1000 А. В «Россети Ленэнерго» утверждена программа 2016 – 2032 гг. по переводу кабельной сети 6 – 10 кВ Санкт-Петербурга на низкоомное резистивное заземление нейтрали, в соответствии с которой четыре проекта уже реализовано, ещё шесть находятся

в стадии выполнения строительно-монтажных работ.

К настоящему времени распределительные сети 6 – 10 кВ более чем 20 питающих подстанций ГПО «Белэнерго» (Республика Беларусь) оснащены низкоомными резисторами согласно действующему стандарту [6].

Схемы подключения резисторов

Для подключения резистора в сети 6 – 35 кВ используется сухой или масляный трансформатор заземления нейтрали 6 – 10 – 35/0,4 со схемой соединения обмоток Y_0/Δ или фильтр нулевой последовательности без вторичной обмотки со схемой «зигзаг» Z_0 . Из серийно выпускаемых известны фильтры типа ФМ30 и ФЗМ. В сети 35 кВ резистор может подключаться в нейтраль блочного трансформатора блока генератор-трансформатор или в нейтраль отдельного трансформатора или силового фильтра. В сетях 20(35) кВ применяется схема включения резистора в нейтраль обмотки соответствующего напряжения силового трансформатора класса 110 – 220 кВ.

Как правило, в цепи заземления низкоомного резистора устанавливают трансформатор тока, с которого поступает сигнал для защиты резистора, обеспечивая возможность его отключения по истечении заданной выдержки времени. Чаще всего для подключения резисторов используются фильтры со схемой Z_0 мощностью до 1600 кВА, обладающие малым сопротивлением нулевой последовательности и лучшими массогабаритными характеристиками. Параметры устройства для подключения резисторов выбирают таким образом, чтобы избежать значительного ограничения тока резистора за счёт сопротивления трансформатора, приемлемым считается снижение этого тока до 10 % (реже до 15 %) от номинального. В этом случае соблюдаются требования ГОСТ Р 52719–2007 [7] по до-

пустимой кратковременной перегрузке трансформатора для подключения резистора. Чем выше мощность заземляющего трансформатора, тем ниже его сопротивление току нулевой последовательности и тем меньше он ограничивает ток подключаемого резистора.

Основные схемы подключения низкоомных резисторов показаны на рис. 1.

В схеме подключения резистора в нейтраль силового трансформатора (рис. 1, б) резистор входит в зону защиты трансформатора. Последний вариант, не показанный на рис. 1, представляет собой «глухое» подключение заземляющего трансформатора и резистора (без коммутационного аппарата) к шинам и соответствует норме стандарта IEEE Std. 142 [2, п. 1.5.3] — «не допустить непреднамеренного отключения (случайного вывода из работы) <резистора> при срабатывании коммутационных аппаратов». Очевидное достоинство схем на рис. 1, б и в — исключение возможности работы сети без резистора, т. е. предупреждение таких случаев, когда релейная защита от замыканий на землю в прилегающей сети окажется неработоспособна. Для реализации варианта, показанного на рис. 1, а, требуется установка на каждой секции центра питания линейной ячейки с силовым выключателем и комплектом (терминалом) релейных защит. Но при этом гибкость схемы также достаточно высока и позволяет выводить резисторы в ремонт поочерёдно.

Характерный пример организации релейной защиты трансформатора и резистора в типовой схеме подключения на напряжение 20 кВ представлен на рис. 2.

Длительное удержание ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью или неправильно настроенной компенсацией ёмкостного тока приводит к росту объёма повреждений, в ряде случаев с выгоранием высоковольтных ячеек (шкафов).

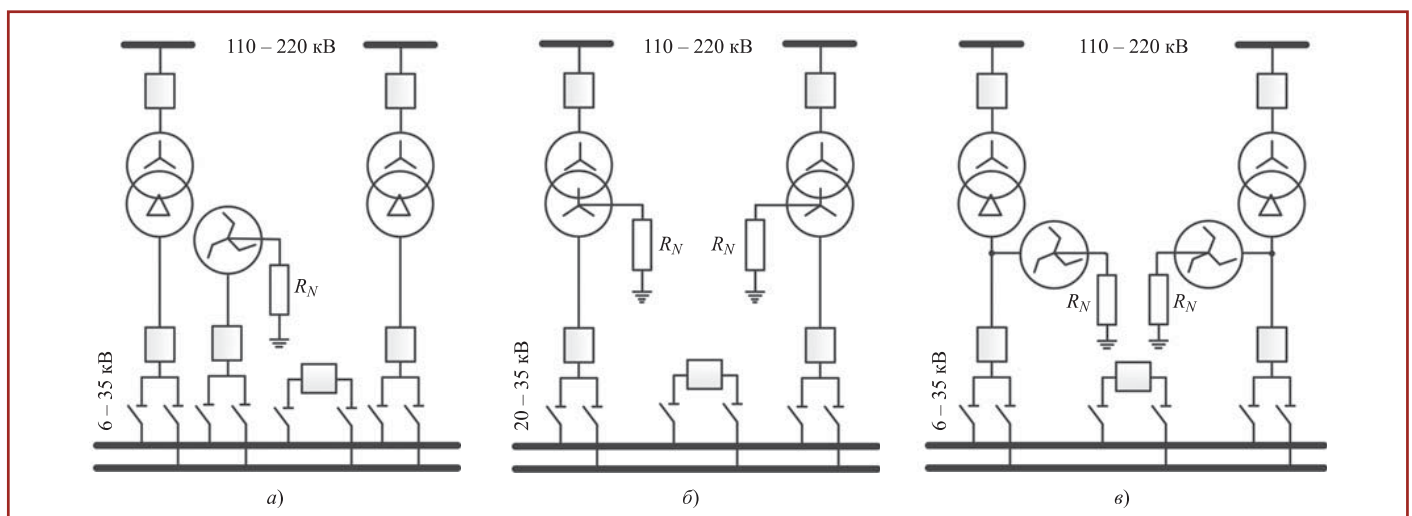


Рис. 1. Принципиальные схемы подключения резистора в нейтраль сети с использованием:

а — фильтра со схемой «зигзаг» Z_0 через отдельный выключатель; б — нейтрали обмотки 20(35) кВ питающего трансформатора; в — фильтра со схемой «зигзаг» Z_0 на шинных вводах от питающих трансформаторов

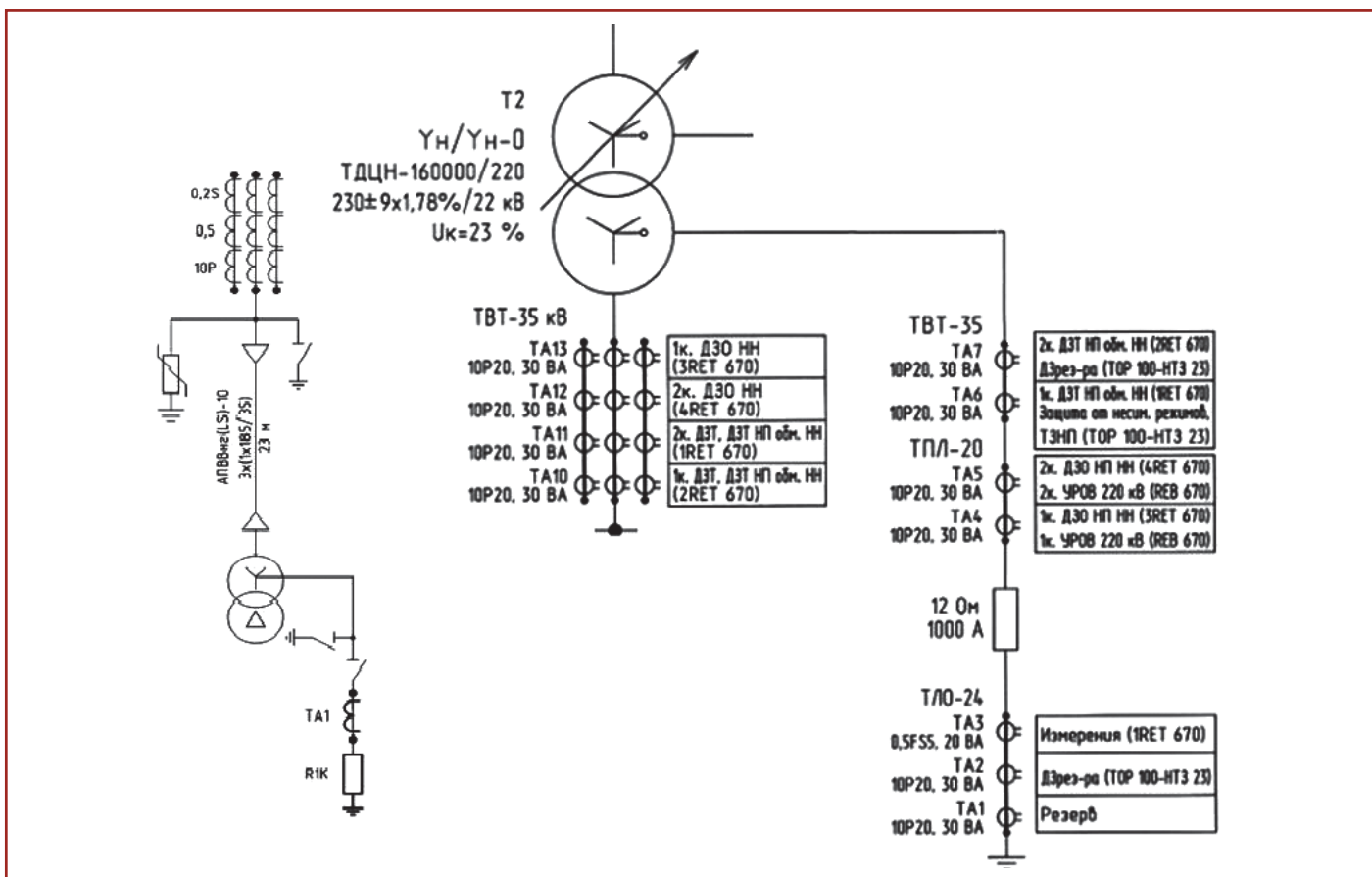


Рис. 2. Пример проектного решения по организации релейной защиты силового оборудования в схеме заземления нейтрали с использованием отдельной ячейки (слева) и силового питающего трансформатора (справа)

Поэтому для защиты линий с изоляцией из СПЭ от ОЗЗ следует применять устройства релейной защиты с действием на отключение в комплексе с автоматическим выделением повреждённого участка сети и автоматическим вводом резерва (АВР), что наиболее просто осуществить при включении низкоомных резисторов в нейтраль [8]. Учитывая, что срок эксплуатации линий на основе кабелей с бумажной пропитанной изоляцией во многих сетях превышает 30 лет (иногда такие кабели находятся в работе 50 — 70 лет), продлить их ресурс становится возможно благодаря быстрому селективному отключению однофазных повреждений с сокращением времени воздействия перенапряжений до долей секунд.

Обеспечение электробезопасности

При реализации режима заземления нейтрали с кратным увеличением тока ОЗЗ вследствие включения резистора особенно актуальным становится вопрос электробезопасности. В ПУЭ [1, пп. 1.7.64] указано, что «...Защита от замыканий на землю должна устанавливаться с действием на отключение по всей электрической связанной сети в тех случаях, когда это необходимо по условиям безопасности». Учитывая необходимость кардинального сокращения числа и длительности аварийных ситуаций в цифровых электрических сетях,

а также их безопасной эксплуатации, пристальное внимание следует уделить этому аспекту, связанному в том числе с режимом нейтрали.

Требования к параметрам заземляющих устройств (ЗУ) и значениям напряжения прикосновения для сетей с низкоомными резисторами не регламентированы отечественными нормами. Защитные мероприятия при низкоомном заземлении нейтрали целесообразно выполнять на основе системы нормирования условий электробезопасности по допустимому напряжению прикосновения по ГОСТ 12.1.38–82 [9]. Данная система позволяет оценить реальную опасность для эксплуатационного персонала случаев повреждения изоляции и появления потенциала на доступных для прикосновения заземлённых частях электроустановок. В пользу такого решения свидетельствует п. 5.2 стандарта [10]: «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 напряжения прикосновения и должна быть обеспечена при любых условиях эксплуатации подстанции. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения установлены в ГОСТ 12.1.038–82».

Положительными факторами, улучшающими условия электробезопасности при использовании низкоомного резистора, являются следующие:

- естественное параллельное соединение контуров заземления на питающей подстанции и на объектах прилегающей сети, что приводит к «распределённому» растеканию токов, когда на долю непосредственно ЗУ приходится не более 2 – 3 % растекания тока однофазного замыкания;
- быстрое и селективное отключение всех однофазных повреждений, что практически сводит к нулю вероятность попадания человека под напряжение.

Таким образом, относительно малые токи, протекающие по ЗУ подстанций, не создают опасных значений напряжения прикосновения при малом времени отключения ОЗЗ релейной защитой (доли и единицы секунд).

Для проверки условий электробезопасности конкретной сети следует, при необходимости, выполнить специальные расчёты растекания тока с учётом дополнительной связи контуров заземления распределительных (РП) и трансформаторных подстанций (ТП) с ЗУ центров питания 110 – 220 кВ. Металлическая связь обеспечивается посредством медных экранов кабелей с изоляцией из СПЭ, а также свинцовых или алюминиевых оболочек кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией.

Такие расчёты были выполнены с использованием компьютерной модели в программе EMTP-RV для участка кабельной сети 10 кВ г. Зеленограда, входящего в состав Московских кабельных сетей (МКС) «Россети Московский регион». В модели два резистора сопротивлением 15 Ом, установленные в нейтрали трансформаторов 630 и 1600 кВА, электрически связаны с сопротивлением ЗУ питающей подстанции 110/10 кВ ($R_{ЗУ} = 0,3$ Ом в соответствии с протоколом периодических измерений). В МКС сопротивление заземляющего контура в новых и реконструированных ТП должно быть не более 0,5 Ом, а в РП — не более 1,0 Ом¹. Указанные требования реализованы при создании компьютерной модели. Нереконструированные ТП моделируются своими сопротивлениями $R_{ЗУ} = 4$ Ом.

В расчётной модели КЛ напряжением 10 кВ были заданы частотно-независимыми линиями с распределёнными параметрами. Также в модели учтены геометрические параметры кабеля и электрические характеристики конструктивных материалов в его составе. Марка, сечение и длина КЛ приняты согласно сведениям из кабельных журналов. Трансформаторы 10/0,4 кВ на ТП не моделировались, поскольку их использование не изменяет величины токов, протекающих через ЗУ подстанций. Удельное электрическое сопротивление грунта учтено в модели кабеля для более точной оценки стекания тока замыкания на землю через оболочки кабелей. Расчёты проводили комбинированием метода Эйлера и метода трапеций с шагом $12 \cdot 10^{-8}$ с.

На объединённых секциях питающей подстанции, включённых по нормальной схеме, смоделирован режим низкоомного резистивного заземления с суммарным активным током $I_R = 770$ А, что соответствует эквивалентному сопротивлению резистора 7,5 Ом. Ёмкостный ток рассматриваемой сети составляет $I_C = 176,2$ А. Полный ток ОЗЗ при отсутствии результатов измерений активной проводимости изоляции сети и высших гармонических составляющих принят равным геометрической сумме активного и ёмкостного токов сети

$$I_{\Sigma \text{ОЗЗ}} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{770^2 + 176,2^2} = 790 \text{ А.}$$

Однофазное замыкание на землю моделировалось глухим замыканием фазы В на землю в нескольких точках сети на удалении не более 5 % от длины отходящего кабеля. Результаты расчётов токов через ЗУ и напряжений на ЗУ в разработанной модели при замыкании на землю вблизи шин 10 кВ питающей подстанции, удалённой РП (на расстоянии 5,27 км по кабельной сети от центра питания) и наиболее удалённой ТП (суммарная протяжённость по линиям 10,44 км от центра питания)

¹ Информационное сообщение № 444/93 «О сопротивлении заземляющего устройства», утв. 25.10.1993 г. главным инженером МКС С. Н. Тодиркой.

Результаты расчёта напряжений на ЗУ и напряжений прикосновения*

Место ОЗЗ	I_R факт, А	U_R , В	$U_{ЗУ \text{ ПС}}$, В	$U_{\text{пр ПС}}$, В	$U_{ЗУ \text{ РП}}$, В	$U_{\text{пр РП}}$, В	$U_{ЗУ \text{ ТП}}$, В	$U_{\text{пр ТП}}$, В
Питающая подстанция	735	5510	70	28	4,50	1,80	0,20	0,10
Распределительная подстанция	670	5028	55	22	34,2	13,7	0,20	0,10
Трансформаторная подстанция	574	4303	45	18	63,9	25,6	204,2	81,7

* *Примечание:* точный расчёт напряжения прикосновения является весьма сложным, поскольку требует учёта сопротивления **всех** металлических связей на территории **каждой** электроустановки, что позволяет получить точное распределение потенциала по заземляющему контуру.

представлены в таблице 1. Место замыкания на землю указано в первом столбце таблицы, остальные точки в каждом случае являются точками наблюдения, где регистрируются требуемые значения $U_{ЗУ}$.

Расчёты подтвердили, что активный ток $I_{R \text{ факт}}$ не совпадает с расчётным номинальным током, поскольку ограничивается эквивалентным сопротивлением заземляющего контура относительно точки повреждения, а также, в меньшей степени, сопротивлением нейтралеобразующих трансформаторов. При удалении точки замыкания от шин подстанции пропорционально току снижается и падение напряжения на резисторе U_R . Для определения напряжения прикосновения использована оценка, предложенная в стандарте Великобритании EDS 06-0014 [11]. В этом документе указано, что при наличии в сети только КЛ, возврат тока через землю принимается равным 40 % от полного тока ОЗЗ, поэтому с допустимой точностью напряжение прикосновения принимается как $U_{\text{пр}} = 0,4U_{ЗУ}$ в точке расчёта.

Результаты расчёта показывают, что для рассмотренной схемы значения напряжений прикосновения на питающей подстанции, РП и ТП не превышают предельно допустимых значений для глухозаземлённой нейтрали согласно ГОСТ 12.1.038–82 [9]. Возможность такого подхода связана с тем, что ОЗЗ в сети с низкоомным резистором рассматривается как аварийный режим и отключается с минимальными выдержками времени. При этом требуемое время отключения ОЗЗ во всех случаях не превышает 5 с. Следовательно, при характерной конфигурации кабельных разветвлённых сетей 6–10 кВ допустимым по условию электробезопасности является использование резисторов с суммарным активным током как минимум до 800 А на электрически объединённом участке сети.

Локализация замыкания на землю

Важный фактор, повышающий управляемость и наблюдаемость сети, — выявление участка с однофазным повреждением с помощью контроля направления токов ОЗЗ на основе специальных индикаторов-датчиков [12], эффективность применения которых существенно повышается вследствие протекания активного тока исключительно по направлению от питающего центра к точке однофазного повреждения (рис. 3).

Это позволяет надёжно локализовать любое однофазное замыкание и особенно актуально в разветвлённой кабельной сети крупных городов — мегаполисов, где время ликвидации повреждения и подачи электропитания потребителям жёстко ограничены. Поэтому реализация комплекса мероприятий по оперативному выявлению и устранению повреждений в сети с низкоомными резисторами в современных условиях является необходимым условием создания цифровой распределительной сети высокого уровня автоматизации и, безусловно, означает улучшение параметров надёжности электроснабжения потребителей, т. е. снижение индексов SAIDI и SAIFI.

Расчёты, выполненные в «Россети Ленэнерго», показали, что в зависимости от уровня автоматизации городской распределительной сети коэффициент SAIFI без переноса нормального разрыва при однолучевой схеме можно снизить примерно на 60 %, а при организации двустороннего питания ТП в цепочке с автоматическим переключением на другую РП — более чем на 90 % [13]. Основные затраты на локализацию, отключение участка с однофазным повреждением и автоматическое восстановление питания потребителей требуются в части дооснащения (модернизации) РП и ТП. Дополнительно необходимо модернизировать ячейки распределительных устройств с установкой исполнительных органов (реле тока, времени, промежуточные и пр.), а также организовать каналы связи и передачи данных между РП и ТП и центром питания, а также центром управления сетями.

Эксплуатация низкоомного резистивного заземления в Молодечненских сетях РУП «Минскэнерго» показала, что достигаемый при этом уровень автоматизации распределительной сети 10 кВ позволяет в несколько раз снизить количество отключений потребителей по сравнению с ранее применяемым режимом изолированной нейтрали. В рассматриваемой кабельной сети общей протяжённостью более 350 км резисторы были установлены на трёх питающих подстанциях в 2008–2013 гг. Защита от ОЗЗ с действием на селективное отключение участка сети реализована на подстанции и РП, выдержка времени на подстанции составляет 1,2 с (была несколько увеличена относительно проектной уставки, чтобы «дожигать» кабели и потом легче находить место повреждения), на РП — от 0,5 с. На магистральных линиях и линиях между РП установлены указатели тока КЗ,

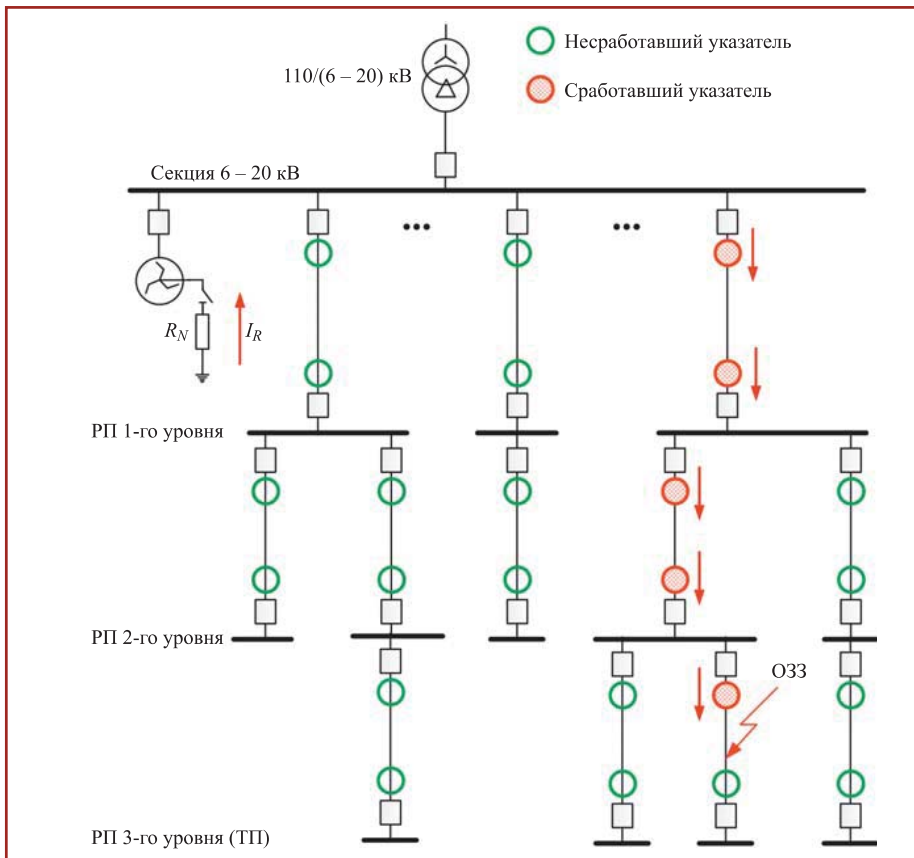


Рис. 3. Участок кабельной сети, оснащённый низкоомным резистором и указателями аварийного тока

устройства АВР реализованы по стороне 0,4 кВ, сеть полностью телемеханизирована. Средняя удельная повреждаемость за 5 лет при всех видах замыканий составила 7,5 ед./100 км/год, что подтверждает более чем двукратное снижение этого показателя по сравнению с ситуацией до установки резисторов.

Технико-экономические показатели внедрения

Состав оборудования и объём строительно-монтажных работ

Внедрение низкоомного резистивно-го заземления нейтрали в большинстве случаев включает установку следующего оборудования на питающих подстанциях:

1. Нейтралеобразующий трансформатор или фильтр устанавливается на каждой секции шин подстанции для организации нейтральной точки. Как правило, для подключения используется типовая линейная ячейка (существующая резервная или новая).

2. Резистор для заземления нейтрали подключается к нейтралеобразующему трансформатору. В зависимости от исполнения трансформаторы и резисторы могут быть установлены на открытом или в закрытом распределительном устройстве.

3. Трансформатор тока нулевой последовательности (ТННП) устанавливается в каждой ячейке питающей подстанции и на распределительных пунк-

тах прилегающей сети, кроме присоединений, не оснащённых силовыми выключателями (шинные трансформаторы напряжения и фидеры с выключателями нагрузки).

4. Устройства автоматического ввода резерва должны быть установлены не только на питающих подстанциях, но и на РП с силовыми выключателями. Также в случае отсутствия трансформаторов напряжения на РП их необходимо установить.

5. Комплекты релейной защиты от ОЗЗ устанавливаются во всех ячейках с силовыми выключателями, которые оснащаются ТННП. В общем случае защита возможна в следующих исполнениях: токовые реле в сочетании с реле времени и указательные реле, микропроцессорные терминалы защиты с функцией 51N/51G по кодировке ANSI (подходят практически все современные терминалы) на каждом присоединении.

При внедрении такого комплекта оборудования возможна организация защиты с отключением направления, т. е. магистрального присоединения на подстанции, где установлены резисторы. В целях локализации повреждённого участка на уровне РП необходимо выполнить дооснащение силовых ячеек в прилегающей сети с модернизацией релейной защиты и установкой ТННП [14].

Строительные работы по внедрению указанных мероприятий включают организацию фундамента (монолитный,

лежневый, буронабивные сваи, железобетонные стойки) и опорных конструкций для силового оборудования. Монтажные работы по внедрению указанных мероприятий включают установку ячеек с высоковольтными выключателями для подключения оборудования заземления нейтрали, прокладку от них силовых кабелей до также монтируемых нейтралеобразующего устройства с резистором на каждой секции шин; монтаж комплектов (терминалов) релейной защиты и трансформаторов тока нулевой последовательности. При необходимости выполняется ограждение трансформаторов и резисторов. Строительно-монтажные и пусконаладочные работы, касающиеся силового оборудования, занимают, как правило, не более одной недели в расчёте на секцию шин, а в части релейной защиты — в основном зависят от возможности вывода ячеек в ремонт для производства работ.

Следует отметить, что если на подстанции дугогасящие реакторы (ДГР) уже были установлены, то после их демонтажа для подключения низкоомных резисторов можно использовать существующие нейтралеобразующие трансформаторы. В большинстве случаев также можно использовать фундаменты и/или опорные стойки ДГР для установки резисторов. Также на подстанциях и/или РП с микропроцессорными терминалами релейной защиты модернизация в этой части не требуется, достаточно смонтировать кабельные ТННП. В целях удешевления проекта на РП, не оснащённых релейной защитой от ОЗЗ, возможна установка защит на совмещённом реле тока и времени вместо микропроцессорных терминалов. Автоматизация сети с индикацией повреждённого участка и функцией самовосстановления после потери питания потребует также установки датчиков, фиксирующих протекание тока ОЗЗ и создание каналов передачи данных об изменении конфигурации сети в диспетчерский центр.

Стоимость внедрения

В качестве примера рассмотрим выполненный в 2018 г. проект реализации низкоомного заземления нейтрали на четырёхсекционной подстанции 110/10 кВ. Проведены следующие работы: установка нейтралеобразующих трансформаторов и силовых резисторов (по 4 шт.), прокладка четырёх трёхжильных КЛ общей протяжённостью 200 м с установкой концевых муфт, монтаж и наладка микропроцессорных терминалов (4 шт.), ретрофит одной ячейки 10 кВ с установкой вакуумного выключателя, восстановление ячеек с установкой в каждой трёх опорных трансформаторов тока, комплектов ограничителей перенапряжений нелинейных. В прилегающей сети на РП были смонтированы комплекты релейных защит ячеек на основе совмещённого реле тока и времени PRI-51, а также промежуточного реле, автоматического выключателя, клемм, проводниковой про-

дукции (98 комплектов) и установлены ТНП (55 шт.), электромагниты отключения выключателей (11 шт.). Полная фактическая стоимость выполненных работ, включая предпроектное обследование сети и разработку рабочей документации, а также весь комплекс строительно-монтажных и наладочных работ, составила примерно 10 млн руб. без НДС.

Для сравнения: стоимость внедрения на той же подстанции системы компенсации ёмкостных токов, включая установку четырёх нейтралобразующих трансформаторов и такого же количества ДГР единичной мощностью до 500 кВА, шкафов их автоматического управления, шкафов определения повреждённого фидера (ОПФ), оценивалась в размере 18,5 млн руб. без НДС. Приведённые затраты не включают организацию выявления повреждённого участка в прилегающей сети 10 кВ релейными защитами. Явным недостатком в данном варианте является сохранение самого принципа удержания ОЗЗ, что означает возможность развития неотключённого однофазного повреждения в КЗ с аварийным (а не штатным с АВР, как при низкоомном заземлении) отключением потребителей. Более того, система ОПФ в сети с компенсацией устанавливается только на питающей подстанции и предусматривает определение «направления» замыкания на землю на магистральных линиях. К сожалению, это не позволяет оперативно локализовать участок сети с однофазным замыканием.

Системный эффект и срок окупаемости

К составляющим системного эффекта от внедрения низкоомного заземления нейтрали следует отнести:

1. Сокращение недоотпуска электроэнергии.

Упущенная выгода из-за недоотпуска электроэнергии возникает при перерыве электроснабжения потребителей, в частности, при повреждении КЛ с последующим отключением, поиском места повреждения и ремонтом. Низкоомное заземление нейтрали предполагает селективное отключение повреждённого фидера при ОЗЗ с минимальной выдержкой времени и автоматический ввод резерва по стороне 6–35 кВ (или 0,4 кВ). При этом перерыв питания потребителей на время поиска ОЗЗ исключается.

2. Снижение капитальных затрат (CAPEX) на восстановительные ремонты.

При воздействии коммутационных и дуговых перенапряжений в изоляции КЛ неизбежно возникают микродефекты, интенсивность развития которых зависит от многих факторов и в итоге приводит к пробоям. В большинстве случаев ослабленными местами КЛ являются концевые и соединительные муфты. Зачастую происходят многоместные повреждения КЛ при неотключении ОЗЗ. Согласно опыту эксплуатации внедрение низкоомного заземления нейтрали приводит к снижению числа слу-

чаев и объёма повреждений кабелей и кабельной арматуры в несколько раз вследствие уменьшения кратности дуговых и коммутационных перенапряжений и предупреждения развития однофазных замыканий в многофазные и многоместные пробой.

3. Снижение операционных затрат (ОРЕХ) на содержание оперативного и ремонтного персонала, транспортных средств.

Автоматическое определение повреждённого участка в кабельной сети значительно сокращает время поиска повреждения оперативно-выездной бригадой и затраты на горюче-смазочные материалы, а при достаточном уровне телемеханизации необходимость выезда бригады при ОЗЗ практически исключается. Снижение аварийности в кабельной сети уменьшает нагрузку на ремонтный персонал.

Выполненные на основе анализа суммарных затрат и эффективности реализованных проектов оценки показали, что срок окупаемости мероприятий по внедрению низкоомного резистивного заземления нейтрали на питающей подстанции городской кабельной сети 6–10 кВ составляет в среднем 3–5 лет и определяется как затратами на силовое оборудование, так и глубиной автоматизации прилегающего района распределительной сети.

Выводы

1. Внедрение низкоомного резистивного заземления нейтрали в условиях жёстких требований по снижению времени обесточивания потребителей строго соответствует концепции цифровой интеллектуальной сети. За счёт перехода к такому режиму нейтрали при параллельном оснащении распределительных и трансформаторных подстанций устройствами релейной защиты, автоматики и связи достигается высокий уровень автоматизации распределения электроэнергии вследствие быстрой локализации повреждённого участка, ликвидации нарушения и восстановления питания потребителей.

2. Экономический эффект от реализации низкоомного резистивного заземления заключается в снижении капитальных затрат (CAPEX) при внедрении по сравнению с традиционным решением с компенсацией ёмкостных токов и снижении операционных затрат (ОРЕХ) на обслуживание и ремонт оборудования и улучшении индексов надёжности электроснабжения (SAIDI, SAIFI и CAIDI). Социальный эффект — в сохранении жизни людей вследствие обеспечения электробезопасности.

3. Низкоомное резистивное заземление нейтрали обеспечивает выраженный технико-экономический эффект и является более выгодным в отношении стоимости строительства и владения, чем классические схемы с использованием дугогасящих реакторов. Капитальные затраты при реализации низкоомного резистивного заземления

с учётом автоматизации сети как минимум на 40 % ниже затрат на введение автоматической компенсации ёмкостных токов и системы определения повреждённого фидера при прочих равных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок. — 7 изд.: утв. приказом Минэнерго России от 08 июля 2002 г. № 204.

2. IEEE Std. 142–2007 (Revision of IEEE Std 142–1991): IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.

3. Вильгельм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах / пер. с англ.; под ред. Д. В. Разевига. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. — 416 с.

4. Беляков Н. Н. Перенапряжения от заземляющих дуг в сетях с активным сопротивлением в нейтрали // Труды ВНИИЭ. 1961. Вып. 11. С. 84–101.

5. Концепция «Цифровая трансформация 2030». https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf.

6. Методические указания по заземлению нейтрали сетей 6–35 кВ Белорусской энергосистемы через резистор. Стандарт ГПО «Белэнерго», СТП 09110.20.187–09.

7. ГОСТ Р 52719–2007. Трансформаторы силовые, общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2007.

8. Переход к резистивному заземлению нейтрали в сети 6–10 кВ ПАО «Ленэнерго» как шаг на пути к автоматизации / И. А. Кузьмин, Н. Н. Магдеев, Г. А. Евдокунин и др. // Электроэнергия. Передача и распределение. Спецвыпуск, 2018. № 3 (10). С. 18–24.

9. ГОСТ 12.1.038–82 (1996). ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. — М.: Стандартинформ, 1982.

10. СТО 56947007-29.130.15.114–2012. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6–750 кВ. www.fsk-ees.ru/upload/docs/20.135_sto_56947007-29.130.15.114-2012_n.pdf.

11. British Standard EDS 06-0014 Secondary Substation Earthing Design. <http://library.ukpowernetworks.co.uk/library/asset/4af0cfe6-475e-4782-b928-0f8ded417311/EDS+06-0014+Secondary+Substation+Earthing+Design.pdf>.

12. Применение указателей тока короткого замыкания в сети с низкоомным резистивным заземлением нейтрали / И. А. Кузьмин, Н. Н. Магдеев, О. И. Грунина и др. // Электроэнергия. Передача и распределение. Спецвыпуск, 2019. № 1 (12). С. 38–43.

13. Самовосстановление в кабельных электрических сетях 6–10 кВ / И. А. Кузьмин, Н. Н. Магдеев, Г. А. Евдокунин и др. // Электроэнергия. Передача и распределение. Спецвыпуск, 2019. № 2 (13). С. 8–19.

14. Организация релейной защиты при переводе городских сетей 6–10 кВ с компенсацией ёмкостного тока на низкоомное резистивное заземление нейтрали / В. Н. Валов, А. И. Ширковец, Д. С. Кудряшов // Энергетик. 2016. № 9. С. 13–16.