

О переводе сетей 6–10 кВ горных и металлургических предприятий на режим эксплуатации с резистивно-заземленной нейтралью



А.И. Ширковец,
канд. техн. наук,
нач. отдела

ООО «Болид»



И.Г. Хадыев,
нач. лаборатории

ОАО «Оскольский
электрометаллурги-
ческий комбинат»



Д.С. Кудряшов,
канд. техн. наук,
доцент

КузГТУ

В статье рассмотрены варианты реализации резистивного заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ электроснабжения карьеров, выработок и цехов горных и металлургических предприятий. Показано, что такой режим нейтрали позволяет значительно снизить тяжесть воздействий на изоляцию сети при однофазных повреждениях, уменьшить объем разрушения и обеспечить его локализацию.

The Article reviews the options of resistive-grounded neutral in the networks with the voltage of 6–10 kV of power supply to quarries, workings and shops of mining and metallurgical enterprises. It is shown that such mode of neutral grounding will allow for significantly reduce the severity of effect on the network insulation at single-phase damages, reduce the volume of failure and ensure its localization.

Ключевые слова: однофазное повреждение, резистор для заземления нейтрали, схема подключения, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, электробезопасность, композиционный материал.

Key words: single-phase damage, resistor for neutral grounding, connection diagram, cables with insulation of cross-linked polyethylene, electrical safety, composite material.

Специфика тяжелых условий эксплуатации электрооборудования и электрических сетей разрезов при ведении горных работ способствует возникновению большого числа повреждений. Для электрических сетей горных предприятий характерны частые повреждения силовых кабелей, измерительных трансформаторов напряжения, а также приводных электродвигателей 6–10 кВ.

Значительная часть повреждений в высоковольтных сетях промышленных предприятий приходится на долю однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), которая составляет 60–90 % общего числа повреждений. В условиях эксплуатации систем электроснабжения бывают случаи возникновения множественных повреждений электрооборудования, приводящих к отключению питания электроприемников нескольких участков или даже целого разреза. Как было установлено, эти явления связаны с перемежающейся дугой в режимах ОЗЗ, которая сопровождается перенапряжениями, охватывающими всю электрическую сеть. Опасность для людей связана с появлением на металлических нетоковедущих частях электрооборудования, элементах заземляющих устройств, поверхности земли в местах ОЗЗ и в непосредственной близости от них напряжений, пропорциональных току замыкания на землю.

Для уменьшения вероятности поражения электрическим током и ограничения длительности существования ОЗЗ применяют защиту, которую в соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) [1] необходимо устанавливать на всех линиях напряжением выше 1000 В, отходящих от подстанций и питающих карьерные передвижные электроустановки, приводные технологические механизмы в цехах металлургических предприятий и других потребителей. Защита должна действовать на отключение поврежденной линии без выдержки времени (первая ступень). Невыполнение указанного требования ПУЭ или отказ защиты приводят к возникновению аварийных ситуаций, характеризующихся повышенной опасностью поражения людей и повреждения электроустановок.

Реализация резистивного заземления нейтрали позволяет решить проблемы, связанные с настройкой релейной защиты от замыканий на землю и перенапряжениями при горении однофазной дуги.

Седьмое издание ПУЭ (пп. 1.2.16, 4.2.166) [1] предусматривает и обязывает эксплуатировать сети 3–35 кВ с изолированной, заземленной через резистор или дугогасящий реактор нейтралью. Использование резистора не приводит к переводу сети в разряд сетей с эффективно заземленной нейтралью

(ПУЭ, п. 1.7.3), поскольку коэффициент замыкания на землю в сети с резистивно заземленной нейтралью остается равным 1,73, как и для сетей с изолированной нейтралью.

Нормативное обоснование способа заземления нейтрали через резистор и сопутствующей этому способу возможности построения селективной защиты от ОЗЗ приведено в действующих инструкциях по горнорудной промышленности — РД 06-572—03 (гл. 10, п. 171) [2] и РД 05-334—99 (ч. 1, п. 1) [3].

Задачи, решаемые при внедрении резисторов

Многие энергосистемы России, в том числе предприятия горной и металлургической отраслей используют заземление нейтрали через резистор. Энергетические службы этих предприятий для снижения аварийности в питающих сетях и сокращения затрат на восстановительные ремонты, а также затрат от простоя оборудования считают экономически целесообразным использование высоковольтных резисторов, рассчитанных на решение конкретных проблем и минимизацию негативных последствий от режимов ОЗЗ.

Из отзывов специалистов горных и металлургических предприятий следует, что переход к резистивно-заземленной нейтрали позволяет:

эффективно ограничить перенапряжения, возникающие при однофазных дуговых замыканиях, до $(2,2 \div 2,6) U_{\phi \max}$;

ликвидировать устойчивые и неустойчивые феррорезонансные процессы, вызванные насыщением магнитной системы электромагнитных трансформаторов напряжения (ТН) и возможным перегоранием их первичных обмоток;

добиться более глубокого ограничения коммутационных перенапряжений путем использования нелинейного ограничителя перенапряжения (ОПН) с меньшим остающимся напряжением и меньшей энергоемкостью (классы I и II), предупредить повреждение ОПН;

обеспечить снижение смещения нейтрали в сетях с дугогасящими реакторами (ДГР) до уровня, нормируемого правилами технической эксплуатации (не более 15 %, а часто существенно ниже);

повысить надежность работы релейной защиты при дуговых замыканиях на землю и обеспечить ее гарантированное срабатывание при глухом замыкании. При низкоомном R -заземлении нейтрали это достигается переводом горения перемежающейся дуги в устойчивую фазу при активном токе резистора $I_R = (2 \div 4) I_C$ (I_C — емкостный ток сети) и селективным отключением поврежденного фидера ненаправленными токовыми защитами; высокоомное R -заземление позволяет обеспечить работоспособность защит на наложенном токе и направленных защит.

Высокоомный резистор в нейтрали сети находится в постоянно подключенном состоянии. По-

скольку он рассчитан на длительную (6 ч и более) эксплуатацию в режиме ОЗЗ, можно обойтись без устройств автоматики и защиты для его отключения. Главная задача высокоомного резистора — ограничение перенапряжений и при необходимости срыв условий возникновения феррорезонанса. При этом должно выполняться условие $I_R = (0,6 \div 1,2) I_C$. Схемы с высокоомными резисторами пока более распространены в российских сетях 6–10 кВ. Промышленные предприятия нередко применяют схему с комбинированным заземлением нейтрали, когда высокоомный резистор включается параллельно ДГР, что позволяет совместить плюсы сетей с компенсацией емкостного тока и решить вопрос с селективным выявлением поврежденного фидера, а также ограничить перенапряжения при расстройках компенсации до 20 %.

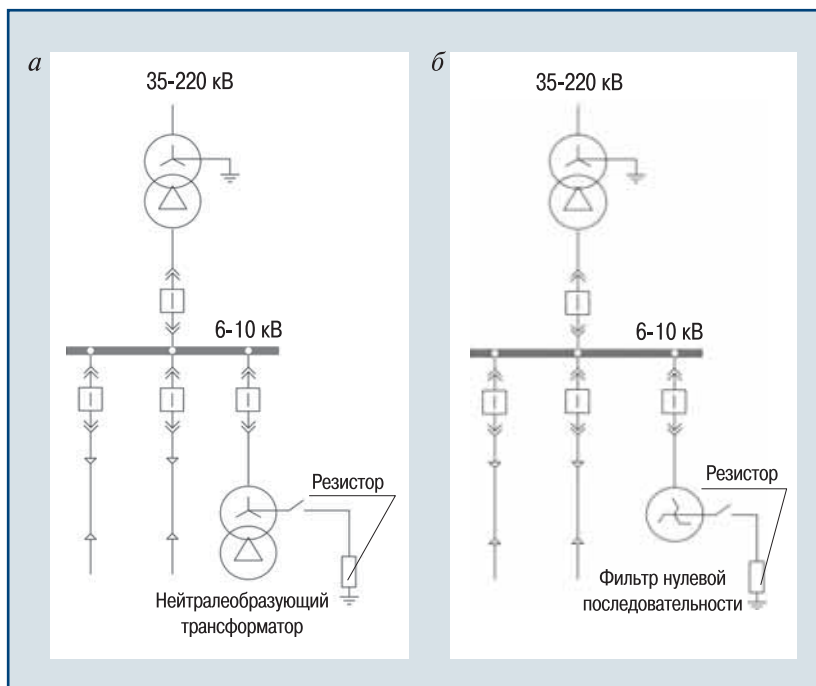
Схемы включения резисторов в нейтраль сети

Для подключения резистора необходим сухой или масляный трансформатор для заземления нейтрали (ТЗН) 10(6)/0,4 со схемой соединения обмоток « Y_0/Δ » (рис. 1, а) или фильтр нулевой последовательности (ФНП) без вторичной обмотки со схемой «зигзаг с выведенной нейтралью» (рис. 1, б). Производители фильтров для организации нейтральной точки — ОАО «Раменский электротехнический завод Энергия» (фильтры ФМЗО), ОАО «Электрозавод» (фильтры ФЗМ), ООО «НПП Бреслер» (фильтры ТМГН), ООО ВП «Процион» (фильтры ФЗГ). Маломощные трансформаторы 10(6)/0,4 кВ серийно выпускают трансформаторные заводы в Екатеринбурге, Самаре, Барнауле, Минске и т.д. Следует обратить внимание на то, что для подключения резистора необходимо использовать двухобмоточный трансформатор с нейтральным выводом на стороне 10 (6) кВ.

Для подключения резистора требуется отдельная ячейка, укомплектованная силовым выключателем и стандартным набором линейных защит. В цепи резистора как правило устанавливают трансформатор тока, с которого поступает сигнал для защиты резистора. Климатическое исполнение низкоомных резисторов предусматривает их установку как в помещении, так и на открытом воздухе. Резистор ограждают металлической сеткой в соответствии с требованиями безопасности либо выполняют в виде пожаробезопасного комплектного устройства в защитном кожухе. При размещении низкоомных резисторов в помещении дополнительной приточно-вытяжной вентиляции не требуется.

Опыт эксплуатации резисторов

Защитные резисторы серии РЗ на основе композитного материала установлены и успешно эксплуатируют на энергообъектах следующих предприятий: ОАО «СУЭК» (разрезы «Тугнуйский», «Бородинский», «Назаровский»), ОАО «УК «Кузбассразрез-



▲ Рис. 1. Рекомендуемые схемы подключения резисторов в нейтраль сети 6–10 кВ

уголь» (разрез «Талдинский»), ОАО «Карельский Окамыш», Иршанский ГОК (Украина), Соколовско-Сарбайский ГОК и АО «Жайремский ГОК» (Казахстан), Навоийский ГКМ (Узбекистан).

Установка высокоомных резисторов на обогатительной фабрике «Соколовско-Сарбайского ГОКа» позволила решить наблюдавшуюся на протяжении последних лет проблему — множественные повреждения высоковольтных двигателей при ОЗЗ (практически при каждом ОЗЗ наблюдалось повреждение двух и более двигателей 6 кВ).

Проведенные экспериментальные исследования в сети напряжением 6 кВ подстанции (ПС) «Карьерная-2» разреза «Тугнуйский» для режима изолированной и резистивно-заземленной нейтрали наглядно подтвердили эффективность резистивного заземления нейтрали [4]. По оценкам технического руководства ОАО «СУЭК», реализация резисторов на разрезе «Тугнуйский» окупилась в течение месяца. Для разрезов ОАО «СУЭК» разработана унифицированная конструкция устройства резистивного заземления нейтрали с подключением резистора в нейтраль фильтра ФМЗО (рис. 2)

Режим резистивного заземления нейтрали реализован и эксплуатируется с 2005–2006 гг. в сетях 6–10 кВ Кузнецкого металлургического комбината (в настоящее время — площадка железнодорожного проката ЕВРАЗ-ЗСМК), Магнитогорского металлургического комбината, ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова», Череповецкого металлургического комбината ПАО «Северсталь», ОАО «Первоуральский новотрубный завод», ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» и т.д.

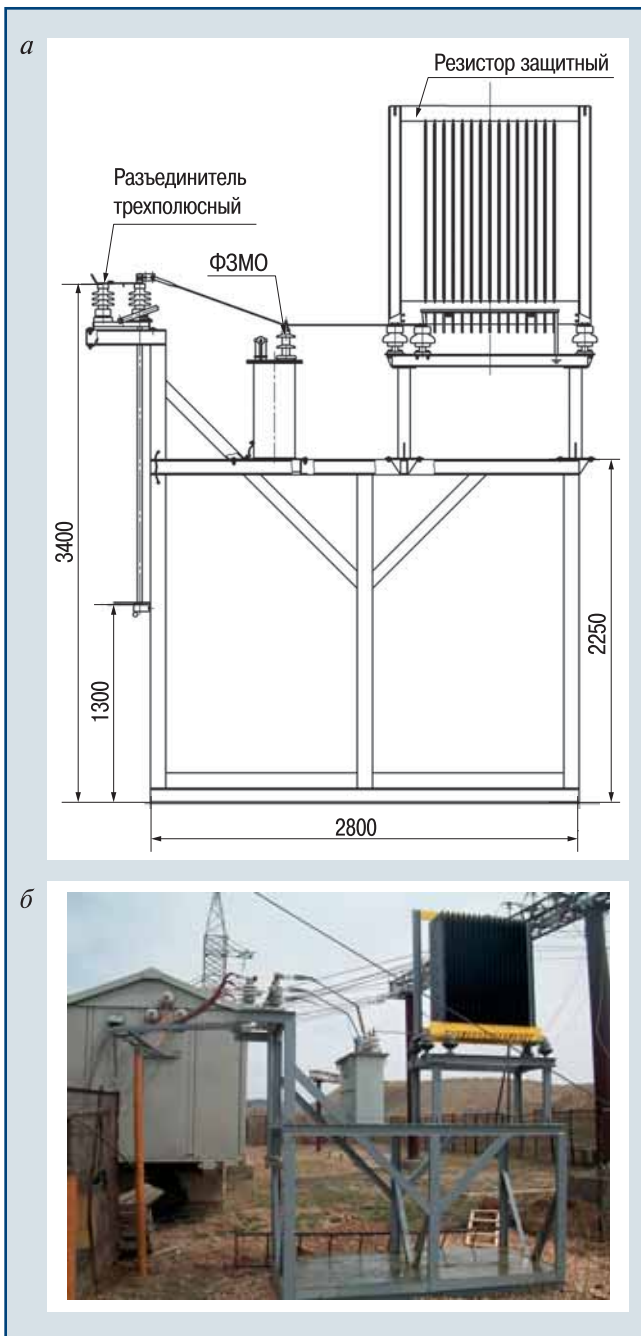
Низкоомное резистивное заземление нейтрали с селективным отключением однофазных повреждений

Низкоомный резистор с активной составляющей тока в месте замыкания ($I_R \geq 40\div 50$ А) рассчитан на отключение фидера с ОЗЗ устройствами релейной защиты, действующими, как правило, с выдержками времени 0,2–2,5 с. Согласно международному стандарту [5] время термической стойкости такого резистора должно быть не менее 10 с для обеспечения отключения нескольких последовательных замыканий на землю. В случае несрабатывания защит и неотключения выключателей фидера и выключателя на вводе секции резистор должен быть принудительно отключен вместе с нейтралеобразующим устройством. Схемы с низкоомным резистором для отключения всех ОЗЗ в настоящее время активно внедряются в сетях

6–10 кВ питающих подстанций 110–220 кВ. Схемы подключения низкоомных резисторов аналогичны приведенным на рис. 1.

Применение низкоомных резисторов позволяет: построить селективную релейную защиту от ОЗЗ на основе простых токовых реле с отключением только поврежденного присоединения и вводом резерва на стороне 6–10 кВ или на стороне 0,4 кВ; минимизировать область повреждения при ОЗЗ за счет быстрого его отключения; уменьшить сроки и стоимость восстановительных ремонтов электрооборудования; предупредить несчастные случаи поражения электрическим током людей и животных.

Низкоомные резисторы были установлены в 2013–2014 гг. в городской кабельной сети 10 кВ (г. Санкт-Петербург) на ПС № 75 «Лахта» и № 155 «Пискаревская», общая протяженность сети более 220 км, емкостный ток 50–70 А на секцию. Присоединения питающихся от подстанций более 50 распределительных пунктов (РП) и трансформаторных пунктов (ТП) были дооснащены кабельными трансформаторами тока нулевой последовательности (ТТНП) и терминалами релейных защит. При возникновении ОЗЗ происходит отключение от центра питания не магистрали, а исключительно участка с повреждением (на РП или ТП). За полтора года эксплуатации резисторов во всей сети отмечено 11 селективных отключений ОЗЗ (90 % случаев — повреждения кабельных муфт), что существенно ниже ранее отмечаемых показателей по повреждаемости (38 аварийных отключений в год). Малое количество замыканий на землю связано со стеканием избыточных зарядов через низкоомный резистор в нейтраль и устранением условий развития повре-



▲ Рис. 2. Схема (а) и общий вид (б) унифицированной конструкции устройства резистивного заземления нейтрали 6–10 кВ для разрезов

ждений кумулятивного характера. Объем повреждений при этом значительно снижается, а место пробоя кабеля (с последующим ремонтом) можно быстро определить современными беспробоговыми методами.

При резистивном заземлении нейтрали обеспечивается точная локализация участка сети с однофазным повреждением, поскольку активный ток от резистора протекает только через ТТНП в поврежденном фидере (рис. 3). На рис. 3 приняты следующие обозначения: U_A , U_B , U_C — напряжения на фазах A , B , C ; U_N — напряжение на нейтрали се-

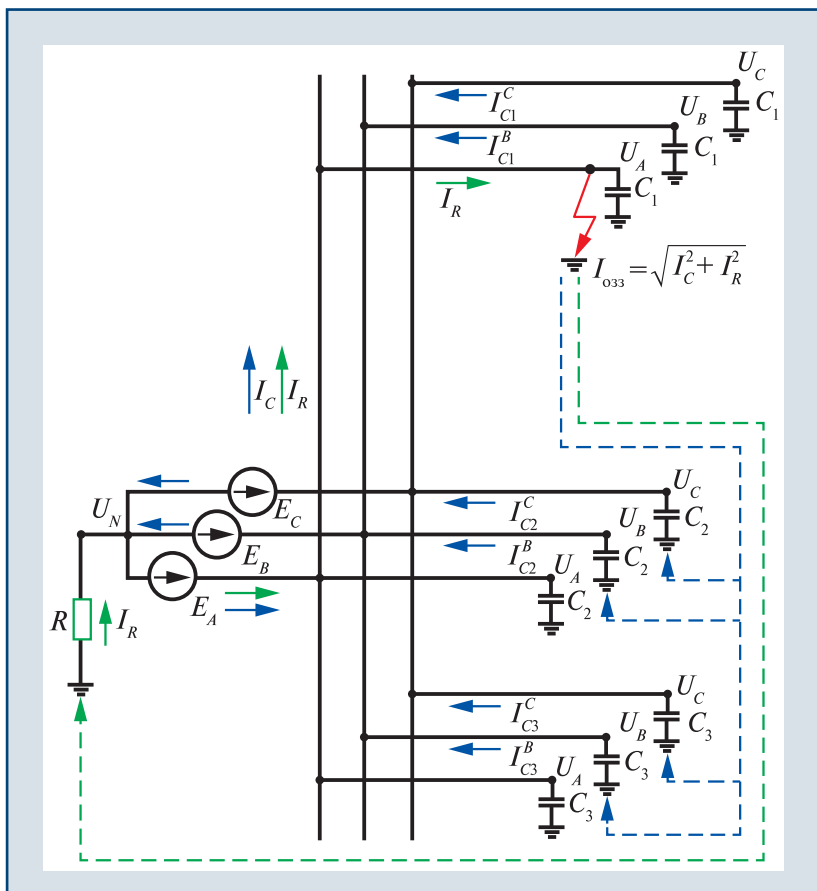
ти; E_A , E_B , E_C — электродвижущие силы фаз A , B , C источника питания; C_1 , C_2 , C_3 — емкости фаз относительно земли на присоединениях 1, 2, 3; I_{C1}^A , I_{C1}^B , I_{C2}^A , I_{C2}^B , I_{C3}^A , I_{C3}^B — емкостный ток замыкания, стекающий на землю с фаз B , C на присоединениях соответственно 1, 2, 3; R — сопротивление резистора в нейтрали; I_{O33} — результирующий ток ОЗЗ в месте повреждения, равный геометрической сумме активного и полного емкостного тока сети. Поскольку активный ток от резистора (единицы и десятки ампер) не менее чем на шесть порядков отличается от активного тока проводимости изоляции относительно земли, последний на схеме не учитывается. Схема растекания активного тока также не требует учета эквивалентного тока искажения от высших гармоник в сети, который протекает в цепи замыкания на землю.

Применение резистивного заземления на подстанциях карьеров Иршанский ГОК и ОАО «Карельский Окамыш» обеспечило надежную работу защит присоединений от замыканий на землю со срабатыванием на отключение.

В настоящее время кабельные сети проектируют и строят преимущественно на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Данный тип изоляции не обладает свойством самовосстановления. Воздействие перенапряжений на СПЭ-изоляцию кабеля неизбежно ведет к накоплению дефектов и последующему ее пробоя (рис. 4). Все ОЗЗ в сетях с такими кабелями необходимо отключать. Это обусловлено тем, что СПЭ — горючий материал, его кислородный индекс равен 18,4 (у негорючих оболочек кабелей с антипиренами — не ниже 40), а удельная теплота сгорания 46,5 МДж/кг (для сравнения: керосин — 41 МДж/кг, дизельное топливо — 42,7 МДж/кг). Эксперименты показали, что энерговыделение в СПЭ-изоляции примерно в 3–3,5 раза выше, чем в бумажно-пропитанной изоляции кабелей.

Из рис. 4, а видно, что длительное удержание замыкания на землю может приводить не только к обширному повреждению СПЭ-кабеля, но и к выгоранию нескольких ячеек 6–10 кВ. Организация быстрого автоматического отключения ОЗЗ в сети существенно ограничивает объем повреждения. Как правило, ремонта или замены требует только пробитая кабельная муфта (рис. 4, б).

Согласно стандарту МЭК 60502-2:2014 [6] в сети с СПЭ-кабелями при номинальном напряжении кабеля, равном номинальному напряжению сети, длительность существования режима ОЗЗ должна быть ограничена, как правило, до одной минуты. Для этого поврежденный фидер нужно селективно выявить и отключить, что при наличии ДГР или изолированной нейтрали проблематично. Фактором, ограничивающим широкое внедрение принципа отключения всех ОЗЗ, также служит нормативное указание на возможность длитель-



▲ Рис. 3. Схема растекания активного тока при резистивном заземлении нейтрали сети 6–10 кВ

ной работы линий электропередачи с замыканием на землю до устранения повреждения (п. 5.11.7 Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации). Однако актуальность этой нормы для сетей, где удержание однофазного замыкания может привести к серьезной аварии, по мнению авторов, находится под большим вопросом.

В кабелях с пропитанной бумажной изоляцией, эксплуатируемых более 20 лет, изоляция ослаблена. Воздействие значительных перенапряжений при ОЗЗ в такой сети практически гарантированно приведет к дополнительному пробое (пробоям) с развитием области повреждения. Быстрое селективное отключение ОЗЗ позволяет продлить срок службы изношенной кабельной изоляции.

При низкоомном резистивном заземлении нейтрали возможны локализация и отключение поврежденного участка сети при ОЗЗ за 0,2–2,5 с при условии правильной настройки релейных защит. Номинальная мощность нейтралеобразующего устройства (трансформатора или фильтра, см. рис. 1) для подсоединения низкоомного резистора, как правило, не превышает 250 кВ·А для сухих трансформаторов и 500 кВ·А — для масляных. Это связано с сокращением времени работы резистора под фазным напряжением и возможностью эксплуатации

трансформатора в режиме кратковременной перегрузки. При низкоомном резистивном заземлении нейтрали все защиты от ОЗЗ в сети 6–10 кВ должны быть настроены на отключение поврежденного фидера.

Для резервирования потребителей следует предусмотреть автоматический ввод резерва (АВР) в сети 6–10 кВ, что вполне возможно при типовых двухлучевых схемах питания и четном числе секций ПС и РП. Затраты на реализацию низкоомного резистивного заземления нейтрали связаны не только с установкой первичного оборудования, но и с дооснащением релейными защитами в следующем объеме (вариант использования индивидуальных защит):

доустановить при необходимости ТТНП в ячейках питающих ПС на всех отходящих присоединениях; для действующей сети можно использовать разъемные ТТНП, монтируемые без перезаводки кабеля;

разместить цифровые терминалы с функцией защит от ОЗЗ в ячейках питающей ПС на всех отходящих присоединениях, подключить токовые входы $3I_0$ защит к ТТНП, включить функцию ненаправленной (направ-

ленной) защиты от ОЗЗ в терминале и выставить уставки срабатывания;

укомплектовать ячейки РП прилегающей сети 6–10 кВ кабельными ТТНП и цифровыми терминалами защит (где необходимо) либо электромеханическими реле тока, реле времени и указательными реле, подключить токовый вход защит к ТТНП и выставить уставки срабатывания;

проверить для организации резервирования наличие и работоспособность устройств АВР на секционных выключателях, питающих ПС и РП, при необходимости — дооснастить и настроить их.

В стандартной линейной ячейке присоединения с нейтралеобразующим трансформатором и резистором необходим полный комплект релейных защит. Выбор варианта защиты (индивидуальные терминалы или шкафы централизованных защит) определяет заказчик на этапе проектирования.

При отказе в работе защиты поврежденного присоединения защита нулевой последовательности ТЗН с выдержкой времени действует на отключение выключателя ТЗН, переводя тем самым сеть в режим работы с изолированной нейтралью. Выдержка времени не должна превышать времени термической стойкости резистора (10 с). Если выключатель ТЗН не отключился, эта защита должна действовать на отключение выключателя ввода и секционного



▲ Рис. 4. Масштаб повреждения при удержании (а) и быстром отключении (б) однофазного замыкания в сети с СПЭ-кабелями

выключателя (если он включен), при этом должен быть выполнен запрет АВР.

Применение автоматического повторного включения (АПВ) на КЛ 6–10 кВ после отключения ОЗЗ следует исключить из-за возможного перехода ОЗЗ в междуфазные короткие замыкания (КЗ). Выбор варианта АПВ (однократное, двукратное, отказ от АПВ) на кабельно-воздушных линиях 6–10 кВ осуществляется для конкретной сети по результатам анализа количества успешных и неуспешных АПВ в текущих условиях эксплуатации сети. При ОЗЗ непосредственно на секции шин, к которой подключен резистор, защита должна отключать ввод на секцию с запретом АПВ и АВР.

Особенности материала активной части резисторов

В задаче ограничения перенапряжений и надежного отключения однофазных повреждений в сетях 6–10 кВ значительную роль играют технические характеристики материала, из которого изготавливают резисторы для заземления нейтрали сети. При производстве активной части резистора используют в основном два вида материалов — различные марки жаропрочной нержавеющей стали с рабочими тем-

пературами до 900 °С и электропроводящие композиционные материалы с меньшими, почти на порядок (до 100–120 °С), рабочими температурами. В конструкции металлических резисторов зарубежного производства (Чехия, Германия, Франция, Италия, Канада и др.) в качестве активной части используют разные виды нержавеющей стали, чаще всего AISI 304 (Fe-Cr18-Ni10), AISI 430 (Fe-Cr-Si-Mn), с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) $\alpha = (0,0008 \div 0,0012) / ^\circ\text{C}$. В случае нагревания таких резисторов на 610–760 °С, что допускается стандартом [5], в зависимости от применяемого сплава происходит рост их сопротивления в 1,1–2 раза относительно номинального значения при температуре 20 °С. При этом активный ток резистора пропорционально уменьшается, что приводит к значительному снижению чувствительности релейных защит от замыканий на землю.

За счет высоких температур нагрева активной части резистора повышается вероятность его отказа. При нагревании воздуха до 500 °С в ряде случаев происходит необратимое разрушение литой изоляции опорных изоляторов и даже трансформатора тока в цепи нейтрали (в зависимости от его расположения), что обуславливает разрушение несущих элементов внутри корпуса резистора, потерю сигнала для защиты и перегорание резистора. ГОСТ 8024–90 [7] ограничивает допустимые температуры нагрева токоведущих частей электрооборудования с номинальным напряжением выше 1000 В значениями 90–250 °С, в зависимости от класса нагревостойкости соприкасающихся с проводниками изоляционных материалов. Предельный кратковременный нагрев заземляющих проводников электроустановок напряжением более 1000 В при КЗ не должен превышать 400 °С в соответствии с п. 1.7.114 ПУЭ [1]. Наибольшая допустимая температура нагрева стальных проводников (см. п. 1.4.16 ПУЭ [1]) ограничивается 300–400 °С. Поэтому применение в отечественных условиях силовых резистивных установок со стальными токоведущими частями, которые нагреваются до температур, значительно превышающих регламентированные, строго говоря, недопустимо. В таких конструкциях полимерная изоляция будет подвергаться существенным тепловым перегрузкам. Электрическая прочность воздуха внутри корпуса резистивной установки при нагревании до сотен градусов Цельсия существенно снижается, что служит дополнительным фактором, повышающим вероятность пробоя комбинированной изоляции токоведущих элементов относительно заземленного корпуса или между фазами.

В основе активной части резисторов серии РЗ лежит композиционный электропроводный материал [8] с отрицательным ТКС, равным $-(0,0010 \div 0,0015) / ^\circ\text{C}$. Нагревание композиционного резистора ведет не к росту сопротивления, а к его снижению на 10–15 % при нормальных температу-

рах перегрева 50–70 °С относительно эффективной температуры окружающей среды 40 °С по ГОСТ 15543.1–89 [9]. Активный ток пропорционально увеличивается, а это приводит к росту чувствительности защит и более глубокому ограничению перенапряжений.

Таким образом, у резисторов из композиционно-го материала температура на поверхности рабочих элементов в рабочем режиме в 5–10 раз меньше, чем у металлических аналогов, что удовлетворяет требованиям всех отечественных нормативных документов по допустимым температурам нагрева. Применение композиционных резисторов с предельной температурой токопроводящих элементов менее 100–120 °С позволяет обеспечить высокую надежность эксплуатации полимерной изоляции в составе резистивной установки, а повышение активного тока при нагревании резистора гарантирует требуемую чувствительность релейных защит независимо от момента отключения однофазного повреждения. Надежность конструкции резисторов серии РЗ на основе композиционного электропроводного материала [8] подтверждена сертификацией в международной системе TUV Rheinland InterCert Kft. и многолетним опытом эксплуатации более 2000 резистивных установок в сетях России, Беларуси, Украины, Казахстана, Киргизии, Вьетнама, Ирана. Использование резисторов, разработанных и изготовляемых в России на основе материалов отечественного производства (сталь, корунд, слюдопласт, силицированный графит, текстолит), полностью соответствует принципам государственной программы по импортозамещению в промышленности.

Обеспечение электробезопасности в сети с резистором

Вопрос электробезопасности в сети с высокоомным резистором, обеспечивающим при однофазном замыкании активный ток 2–12 А, решается за счет малого сопротивления заземляющего устройства (ЗУ), поскольку резисторы устанавливают, как правило, в центрах питания с напряжением 110 кВ и более. Для подстанции с глухозаземленной нейтралью $R_{ЗУ} \leq 0,5$ Ом (п. 1.7.51 ПУЭ [1]), откуда следует, что напряжение на ЗУ при условии $I_R = I_C$ (полный ток замыкания около 17 А) составит не более 8,5 В. Максимальные сопротивления ЗУ для РП и ТП оценивают согласно п. 1.7.57 ПУЭ как $250/I_{ОЗЗ}$ (но не более 10 Ом при отсутствии на РП связи с ЗУ 0,4 кВ) и $125/I_{ОЗЗ}$ (но не более 4 Ом для ТП 6–10/0,4 кВ и РП при наличии такой связи), для $I_R \leq 12$ А и $I_R = I_C$ составляют 14,7 и 7,4 Ом для первого и второго случаев соответственно. Это означает, что выполнения требований п. 1.7.57 ПУЭ достаточно для обеспечения допустимого напряжения на ЗУ при высокоомном заземлении нейтрали.

Электробезопасность в кабельной сети с низкоомным резистором обеспечивается быстрым отключением ОЗЗ и растеканием 80–90 % тока замыкания

по хорошо проводящим оболочкам силовых кабелей 6–10 кВ [10], заземленных с двух сторон и связанных с главными контурами заземления на питающих подстанциях класса 110 кВ, где сопротивление ЗУ не превышает 0,5 Ом (п. 1.7.51 ПУЭ). При низкоомном резистивном заземлении нейтрали электрической сети, помимо растекания до 85 % тока ОЗЗ по оболочкам кабелей 6–10 кВ, до 20 % этого тока растекается по PEN-проводникам низковольтной сети, а на долю непосредственно ЗУ приходится не более 2–3 % тока замыкания на землю. При использовании в кабельной сети низкоомного резистора с током 100–200 А ожидаемые значения напряжения прикосновения и шага с вероятностью 0,95 не превысят 25–50 В, что при отключении однофазных повреждений даже за время более 1 с (до 5 с) не представляет опасности согласно ГОСТ 12.1.038–82 [11]. Несколько сложнее оценить условия электробезопасности в кабельно-воздушной сети с низкоомным резистором в нейтрали. Из соображений перевода перемежающейся однофазной дуги в устойчивую фазу горения, что соответствует «металлическому» замыканию на землю, стараются, как правило, обеспечить активный ток не менее 10–20 А. Исходя из нормированного значения сопротивления ЗУ на РП и ТП не более 4 Ом, такой ток допустим по нормам ГОСТ 12.1.038–82 [11], поскольку при реально достижимом времени отключения замыкания 0,5 с допустимое напряжение прикосновения составляет 200 В (если рассматривать сеть с отключением ОЗЗ как сеть с глухим заземлением нейтрали, эксплуатируемой по аналогичному принципу отключения всех однофазных КЗ). С другой стороны, однофазное замыкание на ВЛ 6–10 кВ опасно с точки зрения попадания человека под шаговое напряжение, например при обрыве провода. В этом случае, с учетом нормированного сопротивления ЗУ каждой опоры, равного 30 Ом (на основе анализа протоколов периодических измерений на ВЛ 6–10 кВ городской сети выявлено, что по факту это сопротивление не превышает 10 Ом), напряжение может оказаться недопустимо высоким. Ситуация разрешается следующим образом: во-первых, ток замыкания будет существенно ограничен сопротивлением ЗУ самой опоры и эквивалентным сопротивлением всей цепи его протекания от питающей подстанции, а во-вторых, отключение ОЗЗ с выдержками времени до 1 с сводит вероятность попадания под шаговое напряжение к нулю.

Выполнение условий электробезопасности при переводе сети на резистивно-заземленную нейтраль подтверждает целесообразность применения резисторов в системах электроснабжения 6–10 кВ, обеспечивающих питание технологических машин и механизмов, размещенных как на поверхности земли (разрезы, карьеры), так и под землей (шахтные выработки). Для металлургических предпри-

ятий это актуально в силу эксплуатации большого количества обслуживаемых персоналом электроприводов технологических установок в электросталеплавильном цехе, цехах металлизации, сортового проката и пр.

Заключение

Перевод сетей напряжением 6–10 кВ горных и металлургических предприятий на режим эксплуатации с резистивно-заземленной нейтралью технически обоснован и экономически выгоден. Срок окупаемости силового резистора по прямым затратам составляет 3–5 лет. Разработанные и изготавливаемые в России резисторы на основе композиционного электропроводного материала зарекомендовали себя в эксплуатации как надежное и практически не требующее обслуживания защитное оборудование. Положительный эффект от внедрения резисторов достигается за счет снижения количества неселективных аварийных отключений и остановов технологических потребителей, уменьшения времени простоя и затрат на текущий ремонт, повышения надежности схемы электропитания.

Список литературы

1. *Правила устройства электроустановок.* — 7-е изд.: утв. приказом Минэнерго России от 8 июля 2002 г. № 204. — М.: Издательский дом «Энергия», 2009. — 815 с.
2. *РД 06-572-03.* Инструкция по безопасной эксплуатации электроустановок в горнорудной промышленности: утв. постановлением Госгортехнадзора России от 5 июня 2003 г. № 65. — Сер. 06. — Вып. 3. — М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2003. — 152 с.
3. *РД 05-334-99.* Нормы безопасности на электроустановки угольных разрезов и требования по их безопасной эксплуатации: утв. постановлением Госгортехнадзора России от 24 дек. 1999 г. № 96. — Сер. 05. — Вып. 9. — М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2003. — 160 с.
4. *Исследование процессов при металлических и дуговых ОЗЗ в условиях резистивно-заземленной и изолированной нейтрали в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» ОАО «Разрез Тугнуйский»/ М.В. Ильиных, А.И. Ширковец, А.А. Кузьмин, И.Е. Волокитин// Электрфикация и энергоэффективность: отд. вып. Горн. информ.-аналит. бюл. — 2011. — № 4. — С. 344–361.*
5. *IEEE Std 32-1972.* Standard Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices. URL: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/32-1972.html> (дата обращения: 14.12.2015).
6. *МЭК 60502-2:2014.* Кабели силовые с экструдируемой изоляцией и кабельная арматура на номинальное напряжение от 1 кВ ($U_{\max} = 1,2$ кВ) до 30 кВ ($U_{\max} = 36$ кВ) включительно. Ч. 2. Кабели на номинальное напряжение от 6 кВ ($U_{\max} = 7,2$ кВ) до 30 кВ ($U_{\max} = 36$ кВ). URL: <https://webstore.iec.ch/publication/2272> (дата обращения: 14.12.2015).
7. *ГОСТ 8024-90.* Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 1990.
8. *Состав для композиционного электропроводного материала:* пат. 2289172 Рос. Федерация. № 2004115998/09; заявл. 12.05.04; опубл. 10.12.06, Бюл. № 34.
9. *ГОСТ 15543.1-89.* Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 27 с.
10. *Study of Neutral Grounding for 22 kV Distribution System/ K. Oka, J. Yoshinaga, S. Koizumi at al.// Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES.* — Vol. 3 — P. 2143–2148.
11. *ГОСТ 12.1.038-82.* Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 7 с.

nio_bolid@ngs.ru

Материал поступил в редакцию 30 ноября 2015 г.

СЕРИЯ 03. ВЫПУСК 84

ПРАВИЛА ПО ОХРАНЕ ТРУДА ПРИ РАБОТЕ С ИНСТРУМЕНТОМ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯМИ

Правила по охране труда при работе с инструментом и приспособлениями устанавливают государственные нормативные требования охраны труда при работе с устройствами, механизмами и иными средствами труда, используемыми для воздействия на предмет труда и его изменения, как перемещаемыми работником в ходе выполнения работ, так и установленными стационарно.

Правила обязательны для исполнения работодателями, являющимися индивидуальными предпринимателями, а также работодателями юридическими лицами независимо от их организационно-правовой формы, осуществляющими работы с применением инструмента и приспособлений.

Правила вступили в действие с 08.01.2016.



Эту книгу и другие нормативные документы можно приобрести по адресу:

Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 21, а также заказать в отделе распространения по тел/факсам:

(495) 620-4753 (многоканальный), 620-4747, 620-4746. E-mail: ornd@safety.ru.