

Комплексные инновационные решения по заземлению нейтрали в сетях 6-35 кВ

Александр НАЗАРЫЧЕВ, д.т.н., профессор,
ректор ФГАОУ ДПО "ПЭИПК" Минэнерго России

Сергей ТИТЕНКОВ, к.т.н., генеральный директор ЕGE-Энерган

Андрей ПУГАЧЕВ, к.т.н., заместитель
генерального директора ЕGE-Энерган

Выбор режима (способа) заземления нейтрали в сети 6–35 кВ является исключительно важным вопросом при проектировании, эксплуатации и реконструкции конкретных электрических распределительных сетей. Режим заземления нейтрали в сети 6–35 кВ определяется исходя из следующих параметров и соображений [1, 2]:

- тока в месте повреждения и перенапряжения на неповрежденных фазах при однофазном замыкании на землю;
- схемы построения релейной защиты от замыканий на землю;
- уровня изоляции электрооборудования;
- выбора ОПН для защиты от перенапряжений;
- бесперебойности электроснабжения;

- допустимого уровня сопротивления контура заземления подстанции;
- безопасности персонала и электрооборудования при однофазных замыканиях.

Таким образом, очевидно, что режим заземления нейтрали в сети 6–35 кВ влияет на значительное число технических решений, которые реализуются в конкретной распределительной сети, и в целом на надежность ее работы и безопасность эксплуатации.

По зарубежной классификации, согласно стандарта [3], в сетях среднего напряжения (с номинальным напряжением от 1 до 69 кВ) применяются пять режимов заземления нейтрали (рисунок 1).

То есть всего в мире в сетях среднего напряжения (от 1 до 69 кВ), в отличие от сетей высокого напряжения

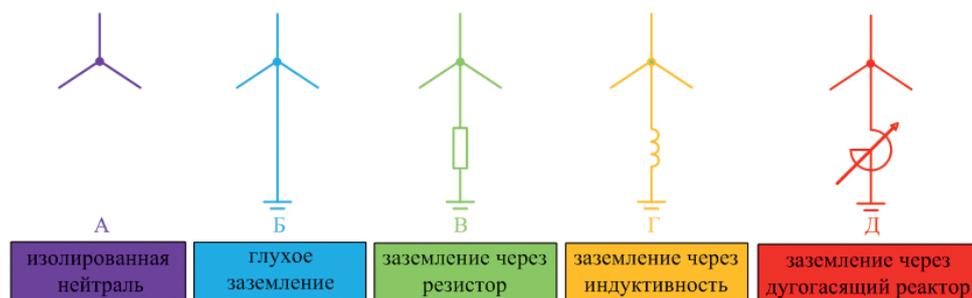


Рис. 1 Режимы заземления нейтрали в сетях среднего напряжения

(110 кВ и выше), используются пять возможных вариантов заземления нейтральной точки сети:

- А** — изолированная (незаземленная);
- Б** — глухозаземленная (глухое заземление);
- В** — заземленная через резистор (низкоомный или высокоомный);
- Г** — заземленная через индуктивность постоянной величины;
- Д** — заземленная через дугогасящий реактор (индуктивность переменной величины).

В настоящее время в России в сетях 6–35 кВ согласно «Правилам устройства электроустановок» (ПУЭ) разрешены к применению три режима заземления нейтрали. Пункт 1.2.16 ПУЭ (7-е издание), введенных в действие с 01.01.2003 г. гласит: «... работа электрических сетей напряжением 3–35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор».

1. Изолированная нейтраль

Изолированная нейтраль — это первый по времени возникновения в электрических сетях режим заземления нейтрали. Этот режим нейтрали используется в трехфазных электрических сетях, начиная с 1891 года (трехфазная электропередача Лауфен-Франкфурт 15 кВ, разработанная и представленная русским инженером М.О. Доливо-Добровольским на Франкфуртской выставке).

Режим изолированной нейтрали имеет существенные недостатки [1, 2, 4, 5], а именно:

- возникают дуговые перенапряжения при однофазных замыканиях на землю в сети и пробое изоляции на первоначально неповрежденных фидерах (многоместные повреждения изоляции, когда одновременно повреждается изоляция нескольких фидеров);
- происходят повреждения трансформаторов напряжения при замыканиях на землю и при возникновении феррорезонансных процессов;
- сложность обнаружения места повреждения;
- возможна неправильная работа релейных защит от однофазных замыканий на землю;
- существует опасность поражения персонала и посторонних лиц электрическим током при длительном существовании замыкания на землю в сети.

В связи с наличием такого количества недостатков режим изолированной нейтрали в сетях 1–69 кВ был практически исключен из широкого использования еще в 40–50-х годах XX века в подавляющем большинстве стран Европы, Австралии, Северной и Южной Америки.

Одна из европейских стран, в которой по-прежнему имеется значительное число сетей с изолированной нейтралью, Финляндия. Там указанный режим используется в воздушных сетях 20 кВ и его применение существенно отличается от отечественной практики эксплуатации. В частности, при наличии режима изолированной нейтрали в сети 20 кВ защиты от замыканий на землю действуют на мгновенное отключение поврежденной воздушной линии. При отказе отключения выключателя отходящей линии с выдержкой времени 0,5 секунды отключается выключатель вво-

да на секцию. Режим изолированной нейтрали в воздушных сетях 20 кВ Финляндии применяется исключительно для повышения чувствительности защит от замыканий на землю, так как сопротивление грунта на большей части территории этой страны в 20–50 раз выше, чем среднеевропейские значения. При таком высоком удельном сопротивлении грунта заземление нейтрали (глухое или через резистор) не увеличивает ток в поврежденном фидере, так как он, в основном, определяется сопротивлением грунта. Применение изолированной нейтрали в данном случае является вынужденной мерой и причина такого технического решения не обеспечение надежности электроснабжения потребителей, а повышение чувствительности защит от замыканий на землю и безопасности людей.

В последнее время в Финляндии с целью повышения электробезопасности и надежности электроснабжения потребителей происходит переход от режима изолированной нейтрали к режиму заземления через дугогасящий реактор. В качестве примера можно привести пригородные сети 20 кВ г. Хельсинки [6], где использование дугогасящих реакторов начато в 2012 году и планируется полное переоснащение ими питающих подстанций к 2016 году.

Италия также одна из последних европейских стран, осуществляющая переход от режима изолированной нейтрали к другим вариантам. В 2000 году итальянская сетевая компания ENEL начала реализовывать программу по заземлению нейтрали сетей 10–15–20 кВ через дугогасящие реакторы [7]. С 2000 по 2006 годы в этих сетях было установлено 1793 дугогасящих реактора.

Кроме Финляндии и Италии режим изолированной нейтрали применяют по тем же причинам в Норвегии, Швеции и Греции. Тем не менее, тренд на отказ от режима изолированной нейтрали достаточно четко прослеживается для всех этих стран.

2. Глухое заземление нейтрали

Глухое заземление нейтрали в сетях 6–35 кВ (рисунок 1Б) в России согласно ПУЭ не применяется, но подобный вариант заземления нейтрали широко используется в англоязычных странах, в частности в США, Австралии, Канаде, Латинской Америке. Такой режим заземления нейтрали находит применение в четырехпроводных воздушных сетях среднего напряжения 4–25 кВ. Воздушные линии в таких сетях на всем своем протяжении и ответвлениях снабжены четвертым нулевым проводом. Ток однофазного замыкания на землю при таком режиме заземления нейтрали может достигать единиц-десятков кА, что является существенным недостатком.

3. Резистивное заземление нейтрали

Практически во всех странах как европейских, так и англоязычных, режим резистивного заземления нейтрали (рисунок 1В) широко применяется в промышленных электрических сетях. Особенно в сетях с высоковольтными электродвигателями, а также в городских кабельных сетях при наличии резервирования потребителей. Все режимы заземления нейтрали через резистор можно разделить на две большие группы с позиции создаваемого активного тока:

- **высокоомное резистивное заземление нейтрали** — это заземление нейтрали через резистор, при котором суммарный ток в месте замыкания (активный ток резистора плюс емкостный ток сети) не превышает 10 А. Как правило, однофазное замыкание на землю при таком режиме заземления нейтрали можно не отключать и защиты от замыканий на землю действуют на сигнал;
- **низкоомное резистивное заземление нейтрали** — это заземление нейтрали через резистор, при котором суммарный ток в месте замыкания (активный ток резистора плюс емкостный ток сети) превышает 10 А. Как правило, суммарный ток однофазного замыкания при этом режиме заземления нейтрали существенно превышает 10 А, а именно, достигает десятков и сотен ампер (диапазон 20–2000 А), что требует действия защит от замыканий на землю на отключение без выдержки времени (или с малой выдержкой).

Указанное деление на высокоомное и низкоомное резистивное заземление в отечественных документах не выполнено. Достаточно четкая граница между этими двумя подвидами резистивного заземления нейтрали дана в зарубежных нормативных документах, в частности, в [3], и это именно значение тока 10 А. При этом, в некоторых работах, например [10, 11], ошибочно трактуются положения стандарта [3] о границе между низкоомным и высокоомным резистивным заземлением нейтрали применительно к российским сетям 6–35 кВ.

Так в [10, 11] отмечено: «В действующей же редакции IEEE Std 142 2007 г. граница между высокоомным и низкоомным заземлением нейтрали определена с помощью отношения тока ОЗЗ при наличии резистора к току трехфазного короткого замыкания (к.з.) конкретной сети. Низкоомным заземлением нейтрали считается, если $I_{R_{033}} \geq 0,2 I_{к.з.}^{(3)}$ (до 100–1000 А). Если же $3I_{CO} \leq I_{R_{033}} \leq 0,01 I_{к.з.}^{(3)}$, это высокоомное заземление нейтрали...» (здесь $3I_{CO}$ — полный емкостный ток сети, $I_{R_{033}}$ — активный ток, создаваемый резистором).

Авторы работ [10, 11] правильно воспроизвели положение стандарта [3], только не учли, что это положение применяется в США в основном к сетям 2,4÷4,16 кВ и ток трехфазного к.з. в этих сетях существенно отличается от тока трехфазного к.з. в сетях 6–35 кВ в России. Отключающая способность выключателей 6–10 кВ в наших сетях, как правило, равна 20 кА и если принять реальный ток трехфазного к.з. в сети скажем равным 15 кА, то высокоомным заземлением согласно [10, 11] будет заземление с током резистора в диапазоне $3I_{CO} \leq I_{R_{033}} \leq 150$ А, что неправильно, так как ток 150 А уже попадает в диапазон низкоомного заземления нейтрали 100–1000 А, указанный в этих же работах. Приняв тот же ток 15 кА, мы получим, согласно [10, 11], что для низкоомного заземления в этой сети нужен резистор с током не менее $I_{R_{033}} = 0,2 I_{к.з.}^{(3)} = 0,2 \times 15000 = 3000$ А, что также не попадает в заданные пределы 100–1000 А.

Дополнительно отметим, что даже по отечественным нормам ПУЭ ток однофазного замыкания на землю величиной более 10 А нельзя длительно держать не отключенным в сетях с железобетонными и металлическими опорами из-за возможного разрушения по-

следних, что вполне согласуется с положениями стандарта [3].

Поэтому еще раз отметим для читателей, что определение высокоомного заземления нейтрали из стандарта [3] следующее: «...1.2.7 высокоомно заземленная: резистивно заземленная система, спроектированная для ограничения тока замыкания на землю до такой величины, который может протекать длительно, при этом одновременно удовлетворяющая критерию $R_0 < X_{CO}$, так чтобы перенапряжения от дуговых замыканий были снижены. Ток однофазного замыкания обычно ограничен до значений менее чем 10 А, обеспечивая минимальные повреждения даже при длительных однофазных замыканиях».

Высокоомное резистивное заземление нейтрали может выполняться только в сетях с емкостным током I_C не более 5÷7 А, при этом активный ток I_R , создаваемый резистором, должен быть больше емкостного тока сети: $I_C \leq 5\div 7$ А, $I_R \geq I_C$.

При резистивном заземлении нейтрали суммарный ток в месте повреждения складывается из емкостного тока сети и активного тока, создаваемого резистором заземления нейтрали:

$$I_{зам} = \sqrt{I_C^2 + I_R^2}$$

Указанные активный и емкостный ток суммируются векторно и сдвинуты друг относительно друга на 90° (рисунок 2). При равенстве активного тока, создаваемого резистором, и емкостного тока сети суммарный ток в месте повреждения увеличивается всего в $\sqrt{2}$ раз. Так при емкостном токе сети величиной 7 А и активном токе 7 А, создаваемом резистором, суммарный ток в месте повреждения составит ≈ 10 А.

Высокоомное резистивное заземление нейтрали имеет ряд ограничений, как по емкостному току сети, так и по классам напряжений сетей, в которых оно может использоваться.

В частности в зарубежной практике эксплуатации оно успешно применяется в промышленных сетях среднего напряжения (особенно с высокими требованиями к надежности электроснабжения) от 2,4 до 5,5 кВ с емкостными токами до 5,5 А совместно с селективной сигнализацией однофазных замыканий, а также в блочных схемах «генератор — трансформатор» до 14,4 кВ. В промышленных сетях 11, 13,8 и 14,4 кВ в США опыт применения высокоомного резистивного заземления нейтрали был unsuccessful, так как емкостные токи там как правило выше 5,5 А и однофазные замыкания развивались в междуфазные к.з. до момента отключения их персоналом энергообъекта.

В России режим высокоомного резистивного заземления нейтрали может применяться в воздушных сетях 6–35 кВ с малыми токами однофазного замыкания на землю (до 5–7 А) и любым типом опор (деревянные, железобетонные, стальные). Применение





Рис. 3. Высокоомный резистор NER 35 кВ, 4000 Ом, 5 А (длительно) в сети ТЭЦ-11 Иркутскэнерго



Рис. 4. Низкоомные резисторы NER 10 кВ, 30 Ом, 200 А (10 секунд) на ПС Петродворец

такого решение позволит исключить феррорезонансные процессы и повреждения трансформаторов напряжения.

Низкоомное резистивное заземление нейтрали может выполняться в сетях с любым емкостным током, при этом активный ток I_R , создаваемый резистором, также должен быть больше емкостного тока сети.

Как правило, активный ток, создаваемый резистором, превышает емкостный ток сети не менее чем в 2 раза. При таком соотношении ток однофазного замыкания на землю определяется в основном только активным током резистора, а любые изменения емкостного тока оказывают незначительное влияние на полный ток однофазного замыкания. Приняв емкостный ток за одну относительную единицу, а активный соответственно за две мы получим полный ток однофазного замыкания равным:

$$I_{\text{зам}} = \sqrt{I_C^2 + I_R^2} = \sqrt{1^2 + 2^2} = 2,24$$

При таком соотношении наличие емкостного тока меняет полный ток однофазного замыкания всего на 12%.

Обычно ток, создаваемый резистором при низкоомном резистивном заземлении нейтрали, лежит в пределах от 20 до 2000 А. Величина тока, создаваемого резистором, выбирается исходя из нескольких конкретных условий: стойкость опор ВЛ, оболочек и экранов кабелей к протеканию такого тока однофазного замыкания; наличие в сети высоковольтных электродвигателей и генераторов; чувствительность релейной защиты.

В США типовыми значениями токов низкоомных резисторов являются 200 А и 400 А для промышленных сетей классов напряжения от 2,4 до 25 кВ. Во Франции в Electricite de France низкоомный резистор выбирается таким образом, чтобы ток однофазного замыкания в воздушных сетях не превышал 300 А, а в кабельных 1000 А. Согласно действующих нормам в Бельгии ток, создаваемый низкоомным резистором в сетях 6,3 и 11 кВ, лимитируется величиной не более 500 А. В Великобритании в сетях 11 кВ применяют низкоомные резисторы 750, 1000 и 1500 А.

Термическая стойкость зарубежных низкоомных резисторов, согласно стандарту [3], то есть способность выдерживать нормируемый ток в течение промежутка времени, составляет обычно от 10 до 30 се-

кунд. Стандарт [12] в свою очередь регламентирует температуры нагрева резисторов при прохождении тока в течение 10, 60, 600 секунд и длительно.

Тем не менее, авторы работы [11], несомненно знакомые с положениями стандартов [3, 12], утверждают, что: «...Особенностями производимых и применяемых зарубежом высоковольтных резисторов являются малое номинальное время работы (обычно до 3 секунд)...», при этом в более ранней работе [10] упоминалось о длительности 10 и 60 секунд. Поэтому отметим, что приводимая в работах [10, 11] информация относительно термической стойкости зарубежных резисторов не соответствует действительности.

Режим заземления нейтрали через резистор находит в последнее время все более широкое применение и в России (рисунки 3, 4).

Особо следует отметить применение резистивного заземления нейтрали в новом классе напряжения 20 кВ, который ранее в России не применялся. В последнее время сети 20 кВ интенсивно развиваются в Москве и Московской области. В кабельных сетях 20 кВ в качестве типового решения используется низкоомное резистивное заземление нейтрали через резистор $R = 12$ Ом, $I = 1000$ А (в течение не более 10 секунд). Это техническое решение было принято на основании анализа опыта эксплуатации сетей 20 кВ во Франции, где в кабельных городских сетях такое решение используется достаточно давно.

По нашему мнению величина 1000 А в некоторых случаях представляется избыточной. Исторически значение 1000 А было принято в связи с низкой чувствительностью старых защит от замыканий на землю (код ANSI 51N) с минимальной возможной уставкой 0,5 А (по вторичной стороне), которые включались на фазные трансформаторы тока 1000/5 А (схема соединения вторичных обмоток ТТ в звезду с включением реле в нейтральный провод). Соответственно при уставке 0,5 А по вторичной стороне минимальная возможная уставка по первичной стороне составляла 100 А. Согласно старому зарубежному правилу релейной защиты для надежной работы защиты ток однофазного замыкания на землю должен в 10 раз превосходить уставку. Отсюда величина тока резистора должна была быть никак не меньше 1000 А.

В современных условиях использования резистивного заземления нейтрали в сетях 20 кВ в зависи-

мости от емкостного тока конкретной сети можно бы было рассмотреть варианты применения резисторов на 200–600 А. Тепловыделение в месте повреждения (разделка, кабельный отсек КРУ) зависит от квадрата тока. Снижение тока низкоомного резистора в 2 раза даст уменьшение энергии в месте повреждения в 4 раза, а это существенно уменьшит объем разрушения оборудования в месте возникновения дуги. Использование кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности позволяет исключить небалансы, присущие трех-трансформаторной схеме с фазными ТТ, и снизить уставки. В случае недостаточной чувствительности простых токовых защит от замыканий на землю для повышения чувствительности могут использоваться направленные защиты по активной составляющей тока замыкания на землю.

Следует отметить, что применение низкоомного резистивного заземления нейтрали в сетях 20 кВ на начальном этапе внедрения таких технических решений сопряжено с неизбежными ошибками проектных и эксплуатирующих организаций. В качестве примера можно привести термическое повреждение резистора $NER\ 12\ \text{Ом}\ 1000\ \text{А}$ (термическая стойкость не более 10 секунд) на ПС «Смирново» Московского ПМЭС в 2015 году. Причиной термического повреждения резистора послужило длительное (десятки секунд) неотключенное однофазное замыкание на землю, возникшее вследствие порыва кабеля 20 кВ строительной техникой. Однофазное замыкание на землю, возникшее через значительное переходное сопротивление в месте повреждения, вызвало ток, который оказался ниже уставки токовой защиты от замыканий на землю КЛ 20 кВ. В связи с этим произошел отказ в отключении однофазного замыкания на линии. Резервная неселективная защита по $3U_0$ от замыканий на землю с действием на отключение выключателя ввода на секции ПС отсутствовала. Это привело к термическому повреждению резистора вследствие нерасчетного воздействия тока однофазного замыкания. Подобные события пока еще возникают вследствие малого опыта проектирования и эксплуатации инновационных решений в сетях 20 кВ. В целом, низкоомное резистивное заземление нейтрали является благоприятным режимом заземления нейтрали с позиций исключения дуговых перенапряжений, увеличения срока службы изоляции оборудования и более простой организации релейной защиты от замыканий на землю. Такой режим несомненно и далее будет использоваться в кабельных промышленных и городских сетях 6–35 кВ России.

4. Заземление нейтрали через индуктивность

Режим заземления нейтрали через индуктивность (рисунок 1Г) подразумевает ограничение тока однофазного замыкания на землю за счет заземления нейтрали через малое индуктивное сопротивление. В качестве такого индуктивного сопротивления чаще всего применяют специальный трехфазный заземляющий трансформатор (рисунок 5) с соединением обмоток в зигзаг и глухим заземлением его нейтральной точки. Такой режим заземления нейтрали применяется во Франции, Испании и Португалии (сети

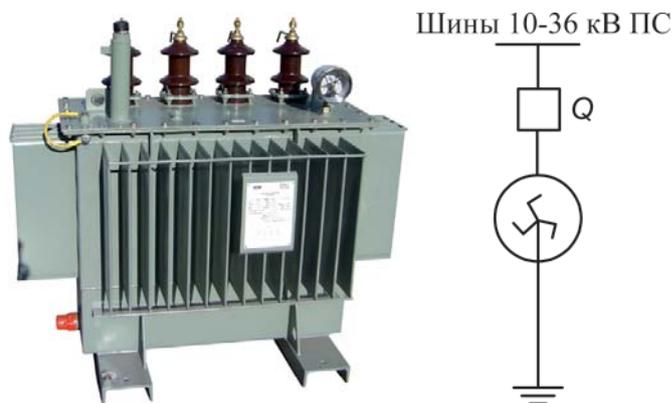


Рис. 5. Заземляющий трансформатор TEGE

10–36 кВ). Ток однофазного замыкания на землю ограничивается индуктивным сопротивлением нулевой последовательности заземляющего трансформатора до величины 300 А в воздушных сетях и 1000 А в кабельных сетях [8, 9]. При таких токах защиты от однофазных замыканий на землю действуют на мгновенное отключение.

Повышение требований к надежности электропитания потребителей привело к постепенному переходу и внедрению в воздушных сетях 20 кВ Франции и Испании дугогасящих реакторов, то есть к пересмотру режима заземления нейтрали и использованию режима (рисунок 1Д).

Следует также отметить, что при применении режима заземления нейтрали через малую индуктивность (рисунок 1Г) стандарт [3] рекомендует, чтобы ток однофазного замыкания на землю был: «...не менее 25%, а предпочтительно 60% тока трехфазного короткого замыкания для исключения серьезных переходных перенапряжений».

В России в сетях 6–35 кВ режим заземления нейтрали через малую индуктивность не разрешен к применению в ПУЭ. Это вполне оправданно, так как создавать токи однофазного замыкания на уровне 25–60% от уровня тока трехфазного к.з. не имеет смысла как с позиции избыточного термического воздействия на оборудование, так и с позиции достаточной чувствительности современных защит от замыканий на землю к существенно меньшим токам.

5. Заземление нейтрали через дугогасящий реактор

Режим заземления нейтрали через дугогасящий реактор (рисунок 1Д) широко применяется в большинстве европейских стран (Германия, Швейцария, Австрия, Чехия, Франция, Италия, Польша, Финляндия, Швеция и др.). В Германии и Австрии режим заземления нейтрали через дугогасящий реактор применяется даже в сетях 110 кВ. Основной причиной использования дугогасящих реакторов в европейских странах являются высокие требования к надежности электропитания потребителей и соответственно высокие штрафы, которым подвергаются энергоснабжающие компании за недоотпуск электроэнергии.

Особенно широко дугогасящие реакторы применяются в воздушных и смешанных кабельно-воздушных сетях 10–69 кВ, а также в чисто кабельных сетях при отсутствии резервирования потребителей.

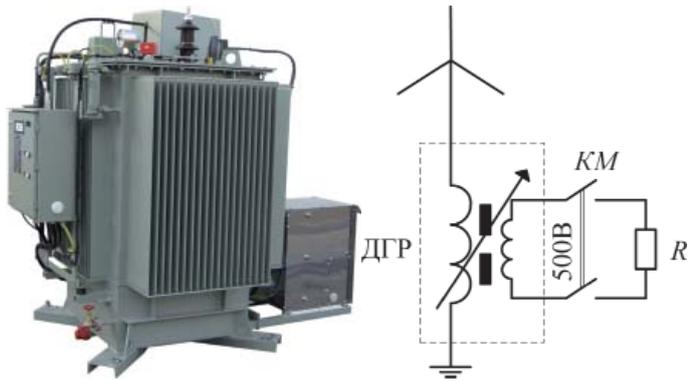


Рис. 6. Дугогасящий реактор ASR0.63P 480 кВА, 10 кВ с низковольтным шунтирующим резистором 500 В (справа на швеллерах)

Применение дугогасящих реакторов в сетях с ВЛ имеет существенные преимущества.

Во-первых, так как изоляция ВЛ является самовосстанавливающейся, а реактор обеспечивает гашение дуги тока однофазного замыкания, то любые однофазные перекрытия изоляции на землю по причине грозы, оседания росы и мокрого снега, воздействия птиц не влекут за собой возникновения устойчивого замыкания.

Во-вторых, применение дугогасящих реакторов в сетях с ВЛ увеличивает чувствительность сигнализации о замыканиях на землю к однофазным повреждениям через значительное переходное сопротивление (падение дерева на линию, падение провода на сухой песок, сухую траву). Расчеты, приведенные в [4], показывают, что при емкостных токах сети 6 кВ в диапазоне 5–30 А и активной проводимости изоляции равной 5% емкостной, сопротивление в месте замыкания, при котором напряжение на нейтрали меньше 15 В (уставки сигнализации по $3U_0$) превышает 10 кОм. То есть наличие настроенного в резонанс дугогасящего реактора позволяет выявлять даже замыкания через значительные переходные сопротивления (10 кОм и ниже). Причем эффективность реактора в выявлении таких повреждений растет с уменьшением емкостного тока сети. В сетях 6 кВ с емкостным током 3–5 А можно определить даже замыкание через переходное сопротивление 20 кОм. И таких воздушных сетей 6–35 кВ с малым емкостным током в России достаточно много, причем все они, в основном, работают в настоящий момент с изолированной нейтралью. Для заземления нейтрали за рубежом, как правило, применяют традиционные плавные регулируемые дугогасящие реакторы. Дугогасящие реакторы с подмагничиванием не используются в принципе по экономическим соображениям (затраты электроэнергии на подмагничивание).

Для организации релейной защиты от однофазных замыканий на дугогасящих реакторах применяют шунтирующие низковольтные резисторы (рисунок 6), подключаемые к вспомогательной обмотке 500 В реактора, или высоковольтные низкоомные резисторы (рисунок 7), подключаемые силовым выключателем непосредственно к нейтрали. Низковольтный шунтирующий резистор напряжением 500 В (рису-

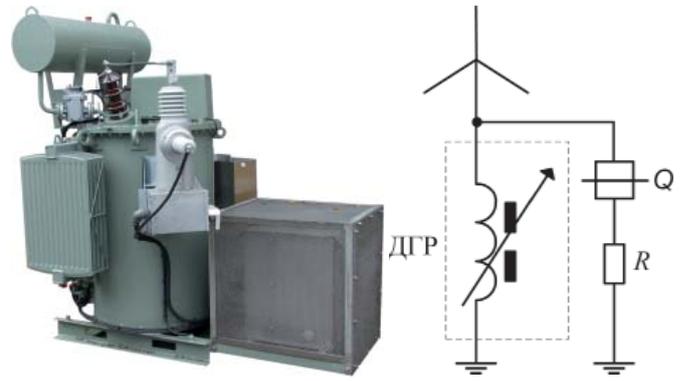


Рис. 7. Дугогасящий реактор ZTC250 15кВ с высоковольтным низкоомным резистором 15 кВ и силовым однофазным выключателем

нок 6) подключается через специальный контактор во вторичную силовую обмотку 500 В дугогасящего реактора.

В существующих российских сетях 6–35 кВ с заземлением нейтрали через дугогасящие реакторы, но без шунтирующего резистора существует проблема организации селективной защиты от однофазных замыканий на землю. В этих сетях не могут использоваться как простые токовые защиты от замыканий на землю (код ANSI 51G), так и направленные защиты (код ANSI 67N). Первые в связи с тем, что дугогасящий реактор компенсирует ток однофазного замыкания (ток $3I_0$) в поврежденном присоединении практически до нуля. Вторые в связи с совпадением направления тока $3I_0$ в поврежденном и неповрежденных фидерах по направлению. В поврежденном фидере в направлении «от шин» течет индуктивный ток $3I_0$ по величине равный собственному емкостному току фидера, а в неповрежденных фидерах собственные емкостные токи в направлении «к шинам».

Режим заземления нейтрали через дугогасящий реактор с шунтирующим низковольтным резистором, подключаемым во вторичную силовую обмотку напряжением 500 В, позволяет реализовать селективную защиту от замыканий на землю как с использованием простых токовых защит (код ANSI 51G), так и более сложных направленных защит по направлению тока $3I_0$ (код ANSI 67N) или активной мощности нулевой последовательности («ваттметрические», код ANSI 32). Как правило, защиты от замыканий на землю в этом случае действуют на сигнал (ток в месте повреждения мал и его немедленное отключение не требуется).

При наличии шунтирующего низковольтного (500 В) резистора логика использования дугогасящих реакторов следующая. До момента возникновения однофазного замыкания дугогасящий реактор настроен в резонанс, а шунтирующий резистор отключен. В начальной стадии замыкания дуга обычно неустойчива и возникают повторные зажигания и гашения. При этом реактор действует, как дугогасящее устройство и позволяет не отключать поврежденный фидер. В том случае, если замыкание перешло в устойчивое, с определенной выдержкой времени, задаваемой в регуляторе REG-DPA реактора, подключается шунтирующий

резистор (на время от 1 до 3 секунд). Цифровой регулятор REG-DPA реактора дает команду на включение контактора шунтирующего резистора напряжением 500 В, который подключается к вторичной силовой обмотке реактора 500 В (рисунок 6). Подключение шунтирующего резистора на 1–3 секунды создает только в поврежденном фидере активный ток $3I_0$, величина которого определяется сопротивлением резистора и может составлять от 5 до 100 А. Этого тока достаточно для селективного срабатывания даже обычной токовой защиты от замыканий на землю поврежденного присоединения. Уставка простых токовых защит (код ANSI 51G) от замыканий на землю по току $3I_0$ на фидерах выбирается, исходя из собственного емкостного тока присоединения (или суммарного тока присоединения и питаемого им РП).

Для современных цифровых защит с фильтрацией входного сигнала можно рекомендовать уставку на уровне $1,5I_{C, \text{СОБСТВ}}$ (собственных емкостных тока присоединения). Уставка по времени защит от замыканий на землю при действии на сигнал может приниматься в диапазоне от 0 до 0,5 секунды в зависимости от необходимости отстройки от переходных процессов.

В нормальном режиме низковольтный шунтирующий резистор SR дугогасящего реактора отключен и не влияет на точность настройки компенсации. Резистор подключается только на время, требуемое для срабатывания защит от замыканий на землю (1–3 секунды). Термическая стойкость резистора, как правило, 60 секунд. Подключение шунтирующего резистора регулятор REG-DPA реактора может выполнять как по факту перехода замыкания в устойчивое, так и просто через определенную выдержку времени (например, через 5 секунд после возникновения перемежающегося замыкания). Если замыкание в течение выдержки времени не перешло в устойчивое, то подключение шунтирующего резистора увеличивает активную составляющую в месте повреждения, тем самым, способствуя стабилизации дуги (переходу замыкания в устойчивое). Если замыкание самоустранилось за время менее 5 секунд, резистор не подключается и сеть продолжает работать в нормальном режиме.

В последнее время в Европе в смешанных кабельно-воздушных сетях используется вариант заземления нейтрали с высоковольтным низкоомным резистором (рисунок 7), подключаемым к нейтрали однофазным силовым выключателем. В Германии, например, параметры такого резистора для сети 20 кВ это: ток 1,5–2 кА, термическая стойкость — 10 секунд. Резистор подключается к нейтрали через 2 секунды после возникновения однофазного замыкания в сети. Считается, что если за 2 секунды реактор не ликвидировал однофазное замыкание, то оно устойчивое и находится в кабеле. В этом случае кабельную линию отключают, чтобы не удерживать длительно замыкание на землю в сети и не подвергать воздействию повышенных напряжений изоляцию других первоначально не поврежденных кабелей.

Таким образом на основании изложенного выше можно сделать вывод о том, что в качестве инновационных решений по заземлению нейтрали в сетях 6–35 кВ в настоящее время можно рекомендовать:

- высокоомное резистивное заземление нейтрали;
- низкоомное резистивное заземление нейтрали;
- заземление нейтрали через плавно-регулируемые дугогасящие реакторы, оснащенные шунтирующим низковольтным резистором, кратковременно подключаемым к дополнительной обмотке 500 В;
- заземление нейтрали через плавно-регулируемые дугогасящие реакторы, оснащенные высоковольтным низкоомным резистором, кратковременно подключаемым силовым выключателем к нейтрали сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Титенков С.С. Четыре режима заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ. Изолированную нейтраль объявим вне закона // Новости Электротехники, № 5(23), 2003. <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/23/05.php>.
2. Титенков С.С., Пугачев А.А. Режимы заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю // Энергоэксперт, №2, 2010. С. 36–43.
3. IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991) IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.
4. Евдокунин Г.А., Титенков С.С. Резистивное заземление нейтрали сетей 6–10 кВ. Санкт-Петербург: Русич, 2009. 264 с.
5. Евдокунин Г.А., Титенков С.С. Внутренние перенапряжения в сетях 6–35 кВ. Санкт-Петербург: Терция, 2004. 186 с.
6. O. Siirto, M. Loukkahti, M. Hyvärinen, P. Heine, M. Lehtonen «Neutral Point Treatment and Earth Fault Suppression» Proceedings of Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, 2012.
7. E. Di Marino, F. La Rocca, G. Valtorta, B. Ceresoli «Change of neutral earthing of MV networks from isolated to connected to ground through impedance: operation results and transition management» 17th International Conference on Electricity Distribution, 2003.
8. P. Folliot, J. M. Boyer, S. Bolle «Neutral grounding reactor for medium voltage networks» Electricity Distribution, 2001 CIRED 16th International Conference and Exhibition.
9. J. Pinto, M. Louro, P. Freitas «Neutral earthing reactors in overhead distribution networks» 20th International Conference on Electricity Distribution, 2009.
10. Емельянов Н.И., Ширковец А.И. Актуальные вопросы применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ // Энергоэксперт, № 2, 2010. С. 44–50.
11. Телегин А.В., Ширковец А.И. Проблематика замыканий на землю и режим заземления нейтрали в сетях среднего напряжения стран Европы и Америки // Релейная защита и автоматизация, № 3, 2012. С.30–39.
12. ANSI/IEEE Std 32-1972 IEEE Standard requirements, terminology, and test procedure for neutral grounding devices.