

4. Обеспечение электробезопасности при протекании тока ОЗЗ через заземляющие устройства (ЗУ) выполняется при сопротивлении резистора, определяемом по формуле

$$R_{N3} \geq \frac{U_{\text{ном}}}{I_{N3} \sqrt{3}}, \quad (6)$$

где $I_{N3} = U_{3y}/R_{3y}$ — допустимый ток ОЗЗ по условию электробезопасности; U_{3y} — допустимое напряжение на ЗУ, соответствующее предельно допустимому значению напряжения прикосновения для определённой продолжительности воздействия замыкания; R_{3y} — сопротивление ЗУ на подстанции.

Для обеспечения условий электробезопасности ток ОЗЗ должен быть по возможности минимальным, исходя из выбора по другим критериям, либо следует применять специальные дополнительные мероприятия. В целях исключения выноса высокого потенциала на трансформаторные подстанции и в сеть 0,4 кВ при двухстороннем заземлении экранов кабельных линий 20 кВ рекомендуется использовать предлагаемое в ГОСТ Р 50571.18–2000 (МЭК 60364-4-442–93) [7] разделение заземлителей высоковольтных и низковольтных частей подстанции.

При выполнении пересчитанных условий 1–4 номинальное значение резистора может выбираться таким образом, чтобы ток, создаваемый им в точке ОЗЗ, был примерно равен фазному рабочему току самого мощного присоединения $I_{R_N} \equiv I_{\text{прис макс}}$.

Требования по транспортированию, хранению и утилизации

Консервация устройств заземления нейтрали должна производиться по ГОСТ 23216 [8] с учётом технических условий на конкретное устройство и быть рассчитана на срок хранения три года. При транспортировании РУЗН автомобильным транспортом, в вагонах или контейнерах вид упаковки по согласованию между потребителем и изготовителем (поставщиком) может быть упрощён, однако должны быть приняты меры против возможных повреждений.

Условия транспортирования и хранения в части воздействия климатических факторов внешней среды должны соответствовать требованиям ГОСТ 23216 [8], ГОСТ 15150 [9] и предусматриваться в технических условиях на конкретный тип устройства. Диапазон температур при транспортировании — от -50 до $+50$ °С, при хранении — от -50 до $+40$ °С. Хранить устройства необходимо в упаковке.

Устройства заземления нейтрали не должны: представлять опасность для окружающей среды и здоровья людей после окончания срока службы, содержать драгоценные металлы, содержать и выделять вредные вещества в про-

цессе эксплуатации и хранения. По истечении срока службы (его списания) устройства подлежат утилизации на общепринятых основаниях (разделению на отходы металлические, неметаллические и пр.). Другие специальные меры не требуются.

Выводы

1. Разработка и введение Регламента обеспечивает решение организационно-технических мероприятий на всех стадиях внедрения и эксплуатации устройств заземления нейтрали электрических сетей 20 кВ, нормирует необходимый набор требований к РУЗН, определяет выбор номинального значения резистора, исходя из условий снижения перенапряжений, селективного срабатывания защит от ОЗЗ, обеспечения термической устойчивости оборудования, электробезопасности.

2. Данный регламент может быть рекомендован в виде проекта при разработке подобного нормативного документа (стандарта) для сетей 20 кВ предприятий ПАО «Россети».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Технические требования к построению опорной сети 20 кВ* г. Москва ОАО «Объединённая энергетическая компания» (утверждены ОАО «ОЭК» 18.10.2011 г.).
2. *Методические указания по применению в ОАО «Московская объединённая электросетевая компания» основных технических решений по экс-*

плуатации, реконструкции и новому строительству электросетевых объектов (утверждены приказом ОАО «МОЭСК» от 04.07.2014 г. № 723).

3. *Регламент организации ОАО «ОЭК» по способам подключения, обслуживанию и ремонту устройств заземления нейтрали электрических сетей 20 кВ* (утверждён ОАО «ОЭК» 15.08.2014 г.).

4. *Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации*. СО 34.20.501–03. — М.: ОРГРЭС, 2003.

5. *Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок*. — М.: ЭНАС, 2014. — 168 с.

6. Майоров А. В., Челазнов А. А., Ильиных М. В. Экспериментальные исследования переходных процессов при однофазных замыканиях в сети 20 кВ // Иваново: Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 6.

7. *ГОСТ Р 50571.18–2000* (МЭК 60364-4-442–93). Ч. 4. Требования по обеспечению безопасности.

8. *ГОСТ 23216–78*. Изделия электро-технические. Хранение, транспортирование, временная противокоррозионная защита, упаковка. Общие требования и методы испытаний.

9. *ГОСТ 15150–69*. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.



А. В. Майоров



А. И. Ширковец

Мировой опыт применения, схемы подключения и конструкции резисторов в электрических сетях 20 кВ

МАЙОРОВ А. В.

АО «Объединённая энергетическая компания»
115035, Москва, Раушская наб., д. 8
mayorov@uneco.ru

ШИРКОВЕЦ А. И., канд. техн. наук
ООО «Болид»; 630015, г. Новосибирск,
Электрозаводская ул., д. 2, корп. 6
nio_bolid@ngs.ru

Рассмотрены технические решения по реализации резистивного заземления нейтрали в электрических сетях напряжением 20 кВ в России и за рубежом. Проанализирован опыт построения опорной кабельной сети этого класса напряжения в Московской энергосистеме. С точки зрения оперативной гибкости сопоставлены схемы включения резистора в нейтраль сети 20 кВ, выполнены расчёт и выбор мощности нейтралеобразующих трансформаторов. На основе нормативных документов обоснована целесообразность применения в отечественных электрических сетях резисторов из композиционного материала.

Ключевые слова: опорная сеть 20 кВ, заземление нейтрали, низкоомный резистор, схема подключения, активный ток, композиционный материал, температура резистивных элементов.

Быстрый рост плотности электрической нагрузки в мегаполисах России обуславливает необходимость увеличения пропускной способности сети. Это может быть достигнуто путём строительства (реконструкции) центров питания (ЦП) и кабельных линий (КЛ) напряжением 10 кВ, что оправдано для большинства городских распределительных сетей. Однако высокая степень износа существующего электрооборудования в классе 10 кВ, наличие протяжённых сетей 6 кВ (примерно 14 % питающих сетей Москвы), высокая стоимость отчуждаемой под новые линии территорий и другие причины приводят к технически и экономически ограниченному решению проблемы «запертых» в ЦП мощностей.

Выход из данной ситуации — перевод электрических сетей на класс 20 кВ, что позволяет увеличить пропускную способность не менее чем вдвое в пределах той же территории и в два-три раза снизить потери активной мощности. В настоящее время реализуются проекты создания комплексной схемы опорной кабельной сети 20 кВ Москвы, которая позволит в перспективе до 2020 г. обеспечить доступность потребителей около 7,1 ГВ · А мощности.

Принципы построения сетей напряжением 20 кВ в Московской энергосистеме реализованы по двухлучевой схеме питания трансформаторных подстанций (ТП) с двухсекционными распределительными пунктами (РП) или без них [1]. Схема, реализованная в АО «ОЭК», выполнена на двухсекционных РП с АВР на секционном выключателе 20 кВ и питанием РП от двух независимых территориально разнесённых ЦП по двум независимым КЛ, а соединительные пункты (СП) — по принципу магистрали между РП с отбором мощности через СП.

Отключение однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) и коротких замыканий (КЗ) в сети происходит на РП с выдержкой времени 0,7 с. Вариант построения сети напряжением 20 кВ без РП, применяемый в ПАО «МОЭСК», с использованием СП и питания их от разных секций РУ 20 кВ ЦП обеспечивает независимое электроснабжение двух секций СП и соответственно ТП. Отключение ОЗЗ и КЗ в такой схеме сети происходит на ЦП с выдержкой времени 1,0 – 1,7 с.

При построении опорной сети 20 кВ важен выбор параметров оборудования для заземления нейтрали и схемно-конструкторских решений по его реализации. В электрических сетях 20 (22) кВ разных стран мира, в том числе Франции, Великобритании, США, используется преимущественно низкоомное резистивное заземление. Исключения составляют воздушные сети с изолированной нейтралью или

с компенсацией ёмкостного тока в Латвии, Финляндии, Италии и ряде других стран.

Основным критерием для определения оптимального сопротивления резистора служит требуемая чувствительность ненаправленной токовой релейной защиты от замыканий на землю (РЗЗ), позволяющей селективно отключать однофазное повреждение с минимальной выдержкой времени. Безусловно, такой принцип — необходимое условие надёжной эксплуатации кабельных сетей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Основываясь на опыте проектирования и эксплуатации кабельных сетей 20 кВ во Франции, в качестве стандартного решения при построении опорной сети 20 кВ в Москве принято использование резисторов с номинальным током 1000 А. В настоящее время это положение нормативно закреплено в Технических требованиях АО «ОЭК» [2] и Методических указаниях ПАО «МОЭСК» [3]. Следует отметить, что в Регламенте [4] отмечена возможность снижения активного тока до значений не менее 500 А. Малое сопротивление резистора (12 – 24 Ом) обеспечивает: ограничение перенапряжений до уровня не более $2,5U_{\phi}$ по стандарту IEEE 142 [5], исключение перемежающегося характера горения дуги, ликвидацию многоместных и многофазных замыканий в силовом оборудовании напряжением 20 кВ.

Основные задачи настоящего исследования: анализ мирового опыта применения силовых резисторов в электрических сетях 20 кВ; оценка изменения сопротивления резисторов в рабочих режимах в зависимости от материала,

из которого изготавливаются токопроводящие элементы; выбор схем подключения резисторов к нейтрали сети и расчёт мощности нейтралиобразующего трансформатора.

Мировой опыт применения резисторов в сетях 20 кВ

Высоковольтные резисторы изготавливаются более чем на двадцати предприятиях по всему миру, наиболее известные производители — Avtron (Канада), Hilkar (Турция), Microelettrica Scientifica (Франция), Telema (Италия), Gino ESE (Германия) и пр. Для заземления нейтрали сетей среднего напряжения в большинстве стран Европы и Америки используются металлические резисторы с малым сопротивлением, рассчитанные на повторно-кратковременный режим приложения номинального напряжения в течение 10, 30, 60 с и более при условии предельного нагрева на 610 – 760 °С согласно стандарту IEEE 32 [6].

В зависимости от фактического времени работы резистора и температурного коэффициента сопротивления (ТКС) сплава, из которого он изготовлен, ток резистора может снизиться в процессе ОЗЗ до двух раз относительно его номинального значения. Теоретически это позволяет минимизировать термическое воздействие на изоляцию в месте пробоя, что становится значимо к моменту отключения повреждения. При этом очевидно уменьшение коэффициента чувствительности РЗЗ на отходящих от шин присоединениях.

Согласно стандарту IEEE 142 [5]: «допускается протекание токов замыка-

Таблица 1

Страна	Характеристика резисторов		
	R_{Nl} , Ом	I_{Rl} , А	$t_{ном}$, с ¹
США	10 – 60	1200 – 200	10
Германия	6,0 – 8,0	2000 – 1500 для кабельных сетей	≥10
Франция	12 (10)	1000 (1200) для кабельных сетей	≥3
	40 (33,3)	300 (360) для воздушных сетей	—
Великобритания	20 (19,3)	600	17
	10 (9,6)	1200	13
Нидерланды	30	400	10
Испания	46	300	10
	25	500	10
Ирландия	20	600	—
Словения	80	150	—
Австралия (22 кВ)	64, 32; 16, 8 ²	187,5; 375; 750; 1500	—
Вьетнам (22 кВ)	12 – 10	1000 – 1270 кратковременно ³	—
Япония (22 кВ)	130 ⁴	100	—
ЮАР	30	360 для воздушных сетей	—
	10	960 для кабельных сетей	—

Примечания: 1. Проверки в последнем столбце означают, что формально значение должно быть не меньше 10 с. 2. Эквивалентное сопротивление в нейтрали всех трансформаторов в сети 22 кВ, которые могут быть включены параллельно (значение 8 Ом — наименьшее допустимое). 3. Резистор в нейтрали воздушно-кабельной четырёхпроводной сети 22 кВ должен выдерживать не ограниченное по времени протекание тока до 50 А по нейтральному рабочему проводу. 4. Рекомендуется как универсальное значение, обеспечивающее допустимое наведённое напряжение до 300 В в сети 0,4 или 6 кВ при замыкании на землю в сети 22 кВ.

ния на землю в пределах $I_R = 100 \div \div 1000$ А в целях обеспечения желаемого тока для селективного срабатывания релейной защиты от ОЗЗ». Для сети 20 кВ это условие обеспечивается при сопротивлении резистора в нейтрали $R_N = 120 \div 12$ Ом. Обзор параметров резисторов, применяемых в разных странах для сетей 20 (22) кВ, приведён в табл. 1.

Подключение низкоомных резисторов в нейтраль с организацией селективной защиты, действующей на отключение однофазных повреждений, обуславливает существенный экономический эффект как для проектируемых и вновь строящихся, так и для реконструируемых сетей. В первом случае могут быть снижены капитальные затраты на прокладку новых КЛ (за счёт применения кабелей с минимальными сечениями экранов). Однако это справедливо только при отключении замыканий на землю с выдержкой времени до 0,1 с. В противном случае сечение экранов кабелей со СПЭ-изоляция выбирается по току двухфазного КЗ на землю, т. е. так же как и для сетей с изолированной нейтралью. Для реконструируемых сетей эффект заключается в снижении числа аварийных отключений потребителей.

Во Франции согласно стандарту HN-64-S-50 национальной энергетической компании Electricity De France (EDF) [7] используются резисторы с токами 300 А для воздушных сетей и 1000 А для кабельных. Такие резисторы выполняются из металлических сплавов, характеризующихся увеличе-

нием сопротивления (максимум вдвое) при нагревании.

Тепловые испытания на достижение максимального сопротивления резистора проводятся следующим образом. На первом этапе предполагается его нагревание током 5 А до стабилизации температуры в диапазоне 10 – 40 °С, затем к резистору прикладывается такое напряжение, чтобы через него протекал ток 20 А в течение 10 мин. На втором этапе прикладывается номинальное напряжение циклами по 5 с, сопровождающееся охлаждением между циклами до температуры 20 °С. При этом оценка изменения сопротивления выполняется с допущением — принимается, что процесс адиабатический. Для точного расчёта необходимо знать теплоёмкость и ТКС для конкретного материала, из которого выполнены токоведущие элементы резистора.

Схемы подключения резисторов в сети 20 кВ

В Германии, Франции, Швеции, Австралии для подключения резисторов используются преимущественно мало-мощные трансформаторы со схемой соединения обмоток «зигзаг» (Z_0) без вторичной обмотки — фильтры нулевой последовательности (ФНП). Мощность нейтралеобразующего устройства выбирается с учётом условия ограничения тока резистора сопротивлением трансформатора или ФНП не более чем на 15 %. Наиболее надёжна схема с отдельным выключателем (рис. 1, а), альтернативный вариант — использование ФНП на шинах секционных вводов 20 кВ (рис. 1, б) либо непосред-

ственно нейтрали со стороны 20 кВ питающих трансформаторов 66 – 154 кВ (рис. 1, в). Аналогичные схемы применяются за рубежом для подключения резисторов в сетях номинального напряжения 10 (11) и 33 кВ.

В Московской энергосистеме в настоящее время применяется схема с включением резистора в нейтраль обмотки 20 кВ силового трансформатора 110 (220)/20 кВ со схемой Y_0/Y_0 , мощностью 80 – 160 МВ · А [4]. Технически целесообразный вариант — подключение резисторов с помощью трансформатора заземления нейтрали (ТЗН) 20/0,4 кВ со схемой соединения обмоток Y_0/Δ , вторичную обмотку которого можно использовать для питания собственных нужд (например, зарядки аккумуляторных батарей в системе оперативного тока), либо ФНП со схемой Z_0 . Для реализации этих вариантов потребуется установка на каждой секции 20 кВ ЦП линейной ячейки с силовым выключателем и комплектом (терминалом) релейных защит.

Реализация схем с отдельным нейтралеобразующим устройством позволяет избавиться от эффекта влияния переходных процессов при несимметричных КЗ на землю в сети 110 (220) кВ на напряжения и токи на стороне 20 кВ. Так, при возникновении однофазного КЗ на КЛ 220 кВ, питающей шины 20 кВ через трансформатор 220/20 кВ со схемой Y_0/Y_0 , за счёт индуктивной и ёмкостных связей обмоток с заземлёнными нейтральями происходит передача волны перенапряжений на сторону 20 кВ.

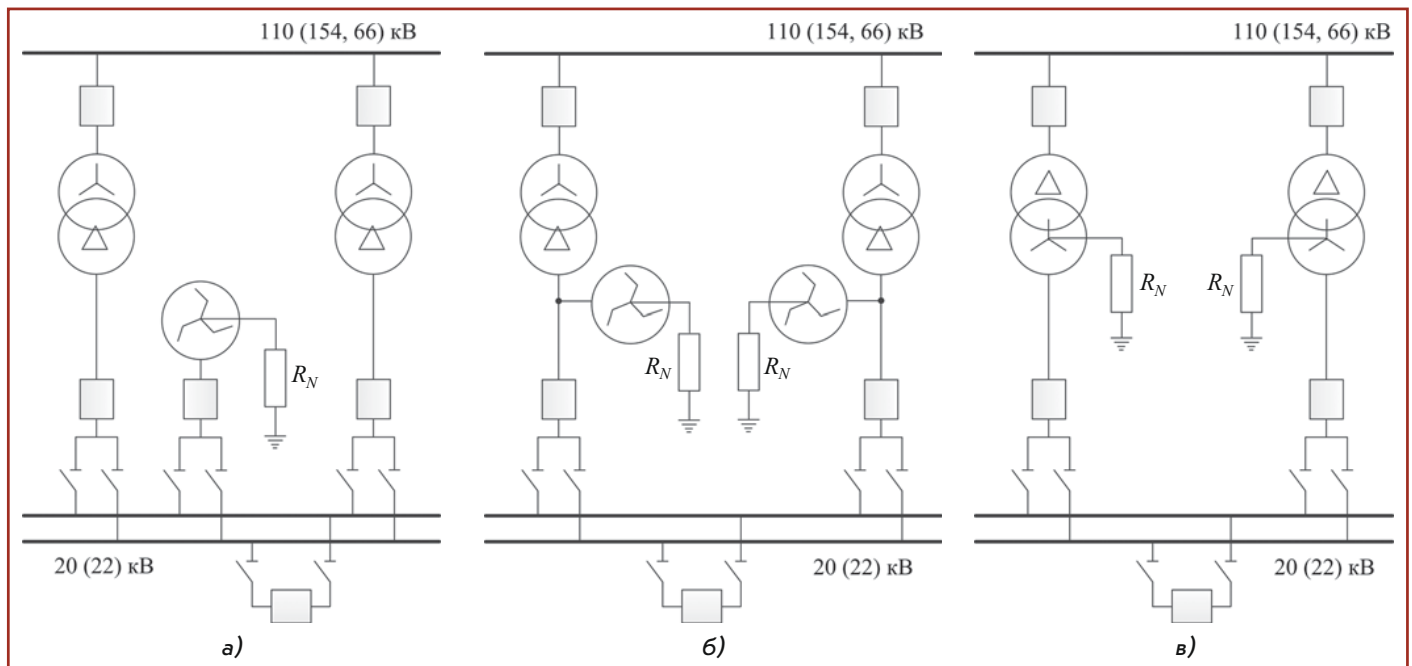


Рис. 1. Принципиальные электрические схемы подключения резистора в нейтраль сети 20 кВ, применяемые за рубежом: а — ФНП со схемой Z_0 через отдельный выключатель; б — ФНП на шинных вводах от питающих трансформаторов; в — нейтраль обмотки 20 кВ питающего трансформатора

Ток резистора I_R , А	Ток от резистора в обмотке трансформатора I , А	Допустимый ток КЗ в обмотке трансформатора $I_{k \max}$, А	Сопротивление КЗ трансформатора Z_T , Ом	Расчётная мощность трансформатора S , кВ · А	Номинальная мощность трансформатора $S_{ном}$, кВ · А
1000	333,3	527,1	21,9	1460	1600
800	266,7	421,6	27,4	1168	1250
600	200,0	316,2	36,5	876	1000

Амплитуда перенапряжений и частота переходного процесса определяются в основном волновыми параметрами КЛ 220 кВ (ввод на подстанцию в условиях города выполнен кабельной линией) и ёмкостями между обмотками высокого и низкого напряжения трансформатора, расстоянием до точки замыкания, а также сопротивлением резистора в нейтрали. Наибольшие перенапряжения на стороне 20 кВ возникают в случае однофазного КЗ в начале линии 220 кВ и могут превышать $2,6U_{ф}$.

Оперативная гибкость для схем включения резистора в нейтраль отдельного ТЗН или ФНП выше, чем для схемы с использованием нейтрали на стороне 20 кВ питающего силового трансформатора, поскольку при отключении присоединения с резистором на одной из секций ЦП автоматически отработает схема АВР на секционном выключателе, которая отключит ввод 20 кВ на эту секцию. Формально отключать питающий силовой трансформатор не требуется, хотя с учётом допустимой перегрузки и для исключения протекания между секциями уравнивающих токов это мероприятие, как правило, выполняется.

Секции 20 кВ на ЦП объединяются на время, необходимое для ввода в работу присоединения с резистором, так как эксплуатация сети 20 кВ в режиме изолированной нейтрали не допускается. По этой же причине однополюсный разъединитель в цепи резистора обычно не устанавливается, за исключением тех случаев, когда это необходимо по условиям безопасности (создание видимого разрыва) для профилактических испытаний и измерений параметров резистора.

С учётом особенностей построения опорной сети 20 кВ в Москве представляется целесообразным переход к подключению резисторов с помощью отдельных нейтралеобразующих устройств в схемах с РП. Это технически оправдано, поскольку отключение однофазных замыканий в такой сети осуществляется выключателями на РП. В такой ситуации возможно использование в качестве питающих трансформаторов 110(220)/20 кВ с «развязкой» высокой и низкой сторон за счёт типовой схемы и группы соединения обмоток Y_0/Δ -11.

Поскольку резисторы устанавливаются в ЦП 110 (220)/20 кВ, выполненных в виде подстанций закрытого типа, по условиям пожаробезопасности целесообразно применение в качестве ТЗН сухих силовых трансформаторов. Расчёт мощности ТЗН выполняется, исходя из стойкости сухих трансформаторов при КЗ согласно ГОСТ Р 52719–2007 [8] и ГОСТ Р 54827–2011 [9].

Преобразовав формулу, приведённую в ГОСТ [8] для расчёта сопротивления КЗ трансформатора, определим мощность трансформатора

$$S = \frac{u_k U_{ном}^2}{100 Z_T}, \quad (1)$$

где $u_k = 8\%$ — напряжение КЗ для сухих трансформаторов с обмоткой низкого напряжения 20 кВ; $U_{ном} = 20$ кВ; Z_T — сопротивление КЗ трансформатора.

Сопротивление КЗ внешней сети Z_c согласно [8] принимается равным нулю для трансформаторов мощностью менее $3,15$ МВ · А, если $Z_c \leq 0,05 Z_T$. Тогда последнее можно определить по формуле

$$Z_T = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} I_{k \max}}, \quad (2)$$

где $I_{k \max}$ — максимальный установившийся ток КЗ в расчёте на фазу двухобмоточного трансформатора, А.

Преобразовав формулу, приведённую в [8], для расчёта допустимой продолжительности $t_{доп}$ протекания тока менее максимального установившегося тока КЗ определим последний по формуле

$$I_{k \max} = \sqrt{\frac{t_{доп}}{t_{k \max}}} I^2, \quad (3)$$

где $t_{доп} = 10$ с — номинальное время работы резистора в режиме ОЗЗ; $t_{k \max} = 4$ с — допустимая продолжительность КЗ при наибольшем установившемся токе КЗ; I — ток, протекающий через каждую обмотку трансформатора, который меньше наибольшего установившегося тока КЗ и равен трети номинального тока резистора I_R .

Результаты расчётов представлены в табл. 2, где приведена ближайшая большая типовая мощность $S_{ном}$ для ряда резисторов с токами 600 – 1000 А.

Предложенная методика выбора мощности ТЗН справедлива для сухих трансформаторов, в том числе типов ТЛС, ТСЗ или ТСЗФ, со схемой соединения обмоток Y_0/Δ . Силовые ФНП без вторичной обмотки со схемой Z_0 на класс напряжения 20 кВ в настоящее время в России серийно не выпускаются. Следует отметить, что ТЗН обладает активно-индуктивным сопротивлением, поэтому ток через резистор

в режиме ОЗЗ будет меньше его номинального тока по уточнённым расчётам на 10 – 14 %. Это следует учитывать при выборе уставок токовых защит нулевой последовательности.

Конструкция силовых резисторов

В задаче обеспечения надёжного отключения однофазных повреждений в сети 20 кВ значительную роль играют технические характеристики материала, из которого изготавливаются резисторы для заземления нейтрали сети. При их производстве используются в основном два вида материалов — различные марки коррозионностойкой, жаропрочной нержавеющей стали с рабочими температурами до 750 – 900 °С и электропроводящие композиционные материалы с меньшими почти на порядок (до 100 – 120 °С) рабочими температурами.

В конструкции металлических резисторов для заземления нейтрали (см. табл. 1, рис. 2) используются, как правило, штампованные решётки из стали AISI 304 (Fe-Cr-Ni10, аналог по ГОСТ 5632–72 — сталь 08X18H10), AISI 430 (Fe-Cr-Si-Mn, аналог по ГОСТ 5632–72 — сталь 12X17) или Ohmalloy 30 (40) (Fe-Al-Cr, ближайшие аналоги по ГОСТ 5632–72 — 03X18ЮЗБТ и Х23Ю5Т, последняя марка — разновидность сплава «фехраль»), соединённые точечной сваркой и изолированные керамическими или полимерными опорными элементами.

Реже применяются конструкции с бифилярной намоткой стальной (например, нихромовой) проволоки на керамические несущие элементы [10], не являющиеся, как правило, термостойкими и часто повреждающиеся при протекании тока более 10 с. Металлические резисторы, изготавливаемые из указанных марок стали, характеризуются положительным ТКС $\alpha = +(0,00077 \div 0,00012)/^{\circ}\text{C}$, значения которого рассчитаны на основе электрических сопротивлений при разных температурах [11].

В случае нагревания металлических резисторов до 640 °С в стационарном режиме ($\Delta T = 610$ °С) и до 790 °С ($\Delta T = 760$ °С) при импульсном нагружении в соответствии со стандартом IEEE 32 [5] их сопротивление увеличивается в 1,07 – 1,9 раза (рис. 3, а). При этом активный ток резистора пропорционально уменьшается, что приво-



а)



б)

Рис. 2. Типовая конструкция резистора (MS Resistances, Франция) в корпусе из нержавеющей стали (а) с активной частью из решёток на основе металлического сплава (б)

дит к снижению чувствительности РЗЗ. За счёт высоких температур нагрева резистора повышается вероятность его отказа.

При достижении температуры 400 – 500 °С имело место разрушение литой изоляции трансформаторов тока в цепи нейтрали, что повлекло за собой потерю сигнала для защиты и перегорание резистора. Эта проблема решается путём размещения измерительных трансформаторов в нижней части корпуса резистора. При расположении высоковольтного ввода сверху или сбоку корпуса резистора сохраняется возможность электрического пробоя воздушной и комбинированной изоляции, в том числе по запылённой поверхности ввода, из-за снижения её электрической прочности с ростом температуры.

Следует отметить, что ГОСТ 8024–90 [12] ограничивает допустимые температуры нагрева токоведущих частей электрооборудования с номинальным напряжением выше 1000 В значениями 90 – 250 °С в зависимости от клас-

са нагревостойкости соприкасающихся с проводниками изоляционных материалов. Предельный кратковременный нагрев заземляющих проводников электроустановок напряжением выше 1000 В при КЗ не должен превышать 400 °С, наибольшая допустимая температура нагрева стальных проводников ограничивается на уровне 300 – 400 °С [13]. Поэтому применение в энергетике России силовых резистивных установок со стальными токоведущими частями, которые нагреваются до температур, значительно превышающих регламентированные, недопустимо.

При использовании резисторов на основе композиционного материала [14] с отрицательным ТКС $\alpha = -(0,0010 \div 0,0015) / ^\circ\text{C}$ нормальное нагревание резистора на 50 – 70 °С относительно эффективной температуры окружающего воздуха, принятой равной 40 °С по ГОСТ 15543.1–89 [15], вызывает снижение его сопротивления не более чем на 10,5 % (рис. 3, б), что

практически укладывается в допуск $\pm 10\%$.

Значительное повышение температуры стального сплава связано в том числе с его теплоёмкостью, которая в 1,60 – 1,74 раза меньше, чем у композиционного материала [14] при температуре 20 °С. Однако в случае нагрева стали до температур более 400 °С разница в теплоёмкости стали и композита снижается до 35 % и менее. Таким образом, у резисторов из композиционного 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 температурой токопроводящих элементов менее 200 °С позволяет обеспечить высокую надёжность эксплуатации полимерной изоляции в составе резистивной установки, а повышение активного тока при нагревании резистора гарантирует требуемую чувствительность РЗЗ независимо от момента отключения однофазного повреждения. С этим связан и вопрос номинального времени термической стойкости резисторов, которое некоторыми производителями ограничивается до 2,5 с. Несмотря на то, что отключение ОЗЗ на отходящих присоединениях 20 кВ резервируется как выключателем ввода на РП (1,3 с), так и ввода на ЦП (2,3 с), номинального времени работы металлического резистора 2,5 с может оказаться недостаточно для устойчивой работы РЗЗ при необходимости отключения нескольких однофазных повреждений подряд.

Резисторы 12 Ом/1000 А повышенной термической стойкости из композиционного материала с номинальным временем работы в режиме ОЗЗ не менее 10 с установлены в нескольких ЦП Московской энергосистемы (рис. 4) — ПС 844 «Магистральная» (2007 г.), ТЭЦ-16 (2007 г.), ПС «Ступино» (2014 г.), а также на ПС «Союз»

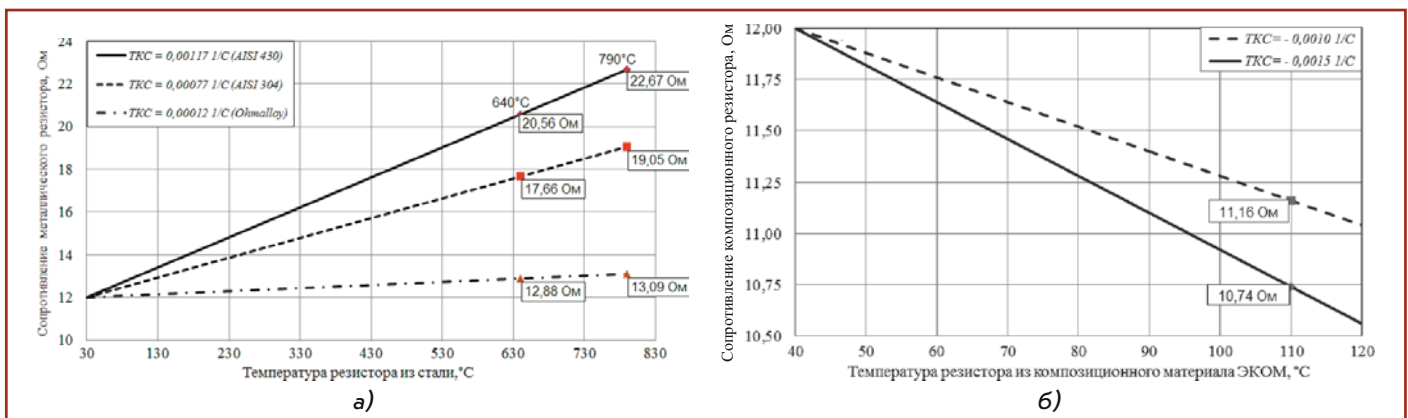


Рис. 3. Температурная зависимость металлического (а) и композиционного (б) резисторов с сопротивлением 12 Ом

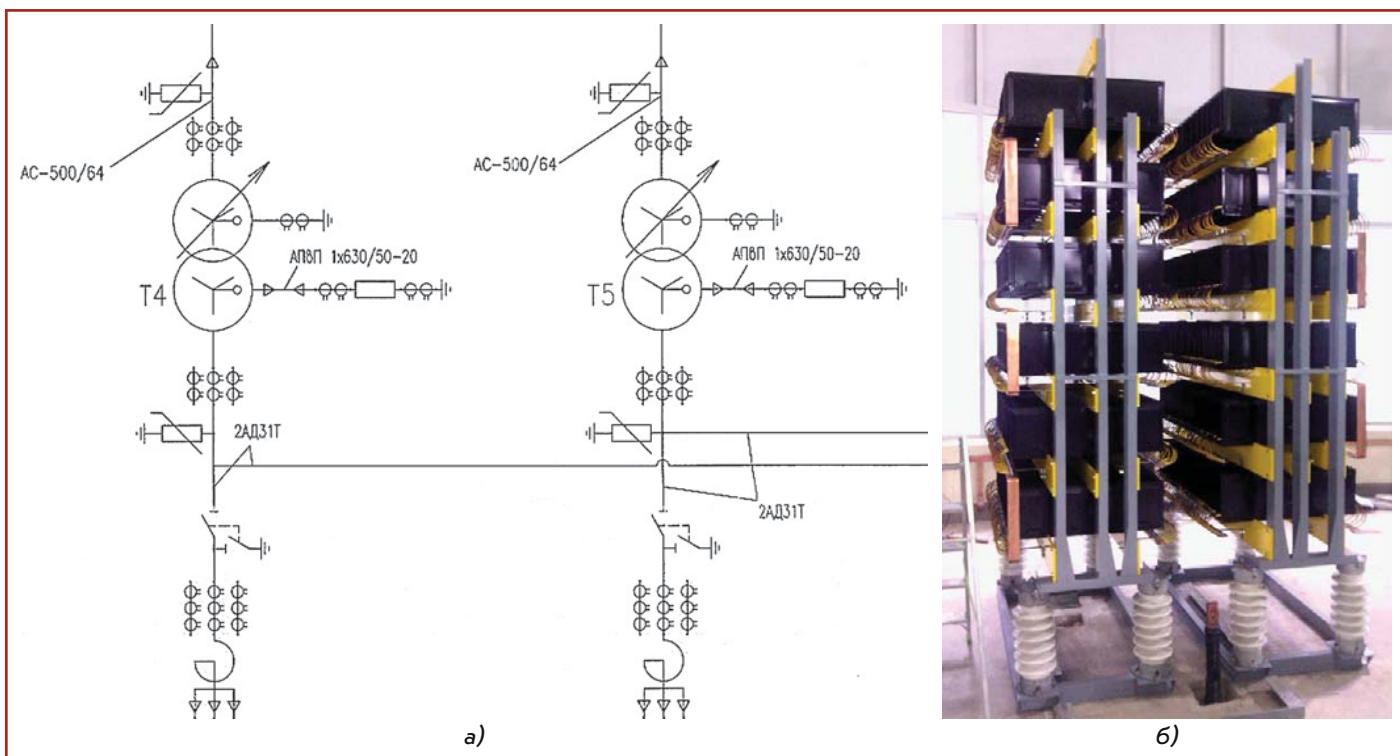


Рис. 4. Типовая электрическая схема подключения (а) и внешний вид резистора 12 Ом из композиционного материала (б) в эксплуатируемой сети 20 кВ

(2015 г.) в системе электроснабжения инновационного центра «Сколково». Смонтированы резисторы 20 кВ также на ПС «Медная» АО «Екатеринбургская электросетевая компания» (2014 г.).

Следует отметить, что стоимость импортных силовых устройств для организации резистивного заземления нейтралей по сравнению с отечественными в 1,5 – 2 раза выше, но это не означает пропорционального роста их качества, надёжности и технической эффективности. В России с 2013 г. активно реализуется государственная программа импортозамещения, в том числе в энергетике, где доля импортного оборудования составляет согласно экспертным оценкам от 30 до 100 %.

В рамках реализации этой программы в ПАО «Российские сети» планируется снижение доли электрооборудования нероссийского производства в электросетевом комплексе к 2019 г. до 14 % (в настоящее время около 40 %). Следовательно, активное применение силового оборудования зарубежного производства, в том числе для электрических сетей 20 кВ, неактуально. Вместе с тем применение композиционных резисторов, разработанных и изготавливаемых в России на основе материалов отечественного производства, соответствует принципам государственной программы по импортозамещению в промышленности.

Таким образом, адекватная задача на перспективу — уточнение технических требований к оборудованию, используемому при проектировании

и строительстве сетей 20 кВ в новых районах Санкт-Петербурга, Москвы, Екатеринбурга. Это позволит предупредить ввод в эксплуатацию силового оборудования, не отвечающего требованиям надёжности, экономичности и эффективности систем защиты от замыканий на землю на основе силовых резисторов.

Выводы

1. В электрических сетях 20 (22) кВ разных стран мира сопротивление резистора для заземления нейтрали выбирается с учётом ряда критериев: конструкции сети, обеспечения чувствительности ненаправленных релейных защит от ОЗЗ, норм по электробезопасности. В зависимости от этих требований применяются резисторы сопротивлением от 6 – 8 Ом (Германия, Австралия) до 60 – 80 Ом (Япония, Словения, США). В кабельной сети 20 кВ Московской энергосистемы в качестве типового используется техническое решение с резистором сопротивлением 12 Ом и током 1000 А, однако нормативно закреплена возможность снижения тока до 500 А.

2. Для исключения влияния со стороны сети 110 (220) кВ и повышения оперативной гибкости схемы для подключения резистора в нейтраль в схемах опорной сети 20 кВ с РП предлагается использовать отдельный трансформатор, мощность которого выбирается с учётом его кратковременной перегрузки на основе требований ГОСТ [8, 9]. Типовая мощность нейтралеб-

разующего трансформатора со схемой соединения обмоток Y_0/Δ для подключения резистора с параметрами 12 Ом/1000 А составляет 1600 кВ · А. Ограничение тока резистора за счёт сопротивления трансформатора не должно превышать 15 % и учитывается при выборе типа резистора, схемы его подключения и датчиков тока нулевой последовательности.

3. У резисторов из композиционного материала температура на поверхности рабочих элементов в рабочем режиме в 5 — 10 раз меньше, чем у металлических аналогов, что удовлетворяет требованиям отечественных нормативных документов (ГОСТ, ПУЭ) по допустимым температурам нагрева. Применение композиционных резисторов с предельной температурой токопроводящих элементов менее 200 °С позволяет обеспечить высокую надёжность 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миловидов С. С. Основные положения построения схем питающих и распределительных электрических сетей 6 – 10 – 20 кВ в районах нового строительства // Принципы построения, развития и эксплуатации городских распределительных сетей: СПб., 2010. С. 19 – 25. Сб. докл. 17 расширенного заседания

Ассоциации электроснабжения городов России «Прогрессэлектро».

2. Технические требования к построению опорной сети 20 кВ г. Москвы ОАО «Объединённая энергетическая компания», утверждённые ОАО «ОЭК» 18.10.2011 г.

3. Методические указания по применению в ОАО «Московская объединённая электросетевая компания» основных технических решений по эксплуатации, реконструкции и новому строительству электросетевых объектов, утверждённые приказом ОАО «МОЭСК» от 04.07.2014 г. № 723.

4. Регламент организации ОАО «ОЭК» по способам подключения, обслуживанию и ремонту устройств заземления нейтрали электрических сетей 20 кВ, утверждённый 15.08.2014 г.

5. IEEE Standard 142–2007. Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, 2007.

6. IEEE Standard 32–1972 (Reaffirmed 1997) Standard Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices, 1997.

7. EDF HN-64-S-50. Resistances metalliques monophasées, destinées, a la mise a la terre du neutre des reseaux a moyenne tension. Specification D'Enterprise. — Electricity De France/Centre de Normalisation, Fevrier 1988. P. 13.

8. ГОСТ Р 52719–2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2007.

9. ГОСТ Р 54827–2011 (МЭК 60076-11:2004). Трансформаторы сухие. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2013.

10. Ефимов Ю. К., Шилов В. И., Шишкина О. Г. Опыт эксплуатации сетей собственных нужд блоков 500 МВт с заземлением через резистор // Электрические станции. 1992. № 5.

11. Ho C. Y., Chu T. K. Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of Nine Selected AISI Stainless Steels (Prepared for AISI) // Center for Information and Numerical Data Analysis and Synthesis (CINDAS). Report 45. 1977. P. 53.

12. 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.

13. Правила устройства электроустановок. 7 изд. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.

14. Патент РФ № 2289172. МПК H01B 1/18. Состав для композиционного электропроводного материала / Л. И. Сарин, Н. Г. Царегородцев, В. М. Копылов // Бюл. Изобретения. 2006. № 34.

15. ГОСТ 15543.1–89. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам. — М.: Изд-во стандартов, 1990.

Ограничение тока однофазного короткого замыкания в четырёхпроводной электрической сети 22 кВ во Вьетнаме

ВАСИЛЬЕВА А. Ю., ЕМЕЛЬЯНОВ Н. И., канд. техн. наук

КОЧУРА Д. В., ООО «Болид»

630015, г. Новосибирск, Электrozаводской пр., д. 1; nio_bolid@ngs.ru

ВЬЕТ Н. К., департамент науки, технологий и окружающей среды,

Viet Nam Electricity, Вьетнам, г. Ханой; КУАН Н. Х., Dong Anh Electrical

Equipment Manufacturing Corporation, Вьетнам, г. Хошимин



А. Ю. Васильева



Н. И. Емельянов



Д. В. Кочура



Н. К. Вьет



Н. Х. Куан

Представлено эффективное решение по ограничению токов короткого замыкания (КЗ) и как следствие повышению надёжности работы распределительных сетей напряжением 6 – 35 кВ с нулевым проводом. Это установка активного сопротивления в нулевой провод. Последний технически целесообразно выбирать согласно критериям эффективного ограничения токов КЗ и минимальному ограничению мощности однофазной нагрузки. При этом конструкция резистора должна обеспечивать допустимую по термической стойкости длительно рассеиваемую мощность, обусловленную током несимметрии в нормальном режиме, и кратковременно рассеиваемую мощность в режиме КЗ.

Ключевые слова: четырёхпроводная сеть, смешанная однофазно-трёхфазная нагрузка, резистор для заземления нейтрали, ток короткого замыкания.

В настоящее время в России и странах ближнего зарубежья наблюдается устойчивая тенденция к частичному пересмотру режимов заземления нейтрали электроустановок 6 – 35 кВ. В частности, предлагается исключить режим изолированной нейтрали и внедрять в эксплуатацию режимы заземления нейтрали через активное сопротивление (резистивное заземление), через параллельно подключённые дугогасящий реактор и резистор (комбинированное заземление нейтрали). Указанные режимы применяются в трёхфазных сетях, для которых изменение способа заземления нейтрали решающим образом влияет на перенапряжения при дуговых замыканиях на землю, а также определяет способ выполнения селективной защиты от замыканий на землю [1].

В ряде стран (США, Австралии, Канаде, Испании, Вьетнаме) используемый режим глухого заземления нейтрали применяется в том числе в четырёхпроводных сетях среднего напряжения 4 – 25 кВ. Концепция построения сетей с нулевым проводом заключается в возможности организации электроснабжения путём подключения не только к линейному, но и фазному напряжению [2]. Токи однофазного замыкания в таких сетях достигают десятков килоампер. В рамках данного исследования ставится задача ограничения токов однофазного замыкания в четырёхпроводных сетях

среднего напряжения при смешанной трёхфазно-однофазной нагрузке.

Четырёхпроводные сети со смешанной нагрузкой

Четырёхпроводные сети среднего класса напряжения — частный случай электрических цепей, нешироко распространённый в современной электроэнергетике. В отличие от трёхпроводных цепей, в которые, как правило, можно включать только симметричные приёмники, трёхфазные четырёхпроводные сети могут иметь смешанную нагрузку. Выбор режима работы нейтрали в таких сетях определяется комплексом требований: экономической эффективностью, надёжностью электроснабжения и электробезопасности.

За рубежом в сетях среднего класса напряжения система распределения электрической энергии по четырёхпроводным сетям применяется в городах, на промышленных объектах и в сельской местности. Сети электроснабжения в сельской местности характеризуются меньшей плотностью электрической нагрузки. В них при трёхфазном распределении электроэнергии к мелким потребителям приходится подключать три провода сети, что приводит к повышенному расходу цветного металла.

Для устранения отмеченных недостатков применяется смешанная трёхфазно-однофазная система распределения электроэнергии. При этом достигается значительное удешевление электроустановки