

В таблице 1 приведены статистические данные о том, какой режим заземления нейтрали является актуальным на данный момент в ряде промышленных стран мира.

Таблица 1

Предпочитаемые режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ в различных странах мира

Страна	Принятое напряжение, кВ	Способ заземления нейтрали			
		Изолированная	Через дугогасящий реактор	Через резистор	Глухое
Россия	6-35	+	+	+	
Австрия	11-12			+	+
Канада	4-25			+	+
США	4-25			+	+
Испания	10-30			+	+
Италия	10-20	+			
Португалия	10-30			+	
Франция	12-24			+	
Япония	6,6	+		+	
Германия	10-20		+		
Австрия	10-30		+		
Бельгия	6,3-17			+	+
Великобритания	11				+
Швейцария	10-20		+		
Финляндия	20	+	+		

Г.К. Смолин, Н.Е. Высоковских

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ СЕТЕЙ 6-35 кВ

Изолированная (незаземленная, нефиксированная) нейтраль.

Область применения (согласно п. 1.2.16 [1]) – на объектах, где емкостные токи не превышают:

- 30 А при напряжении 3-6 кВ;
- 20 А при напряжении 10 кВ;
- 15 А при напряжении 15-20 кВ;
- 10 А в сетях, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи;

- 5 А в схемах генераторного напряжения 6-20 кВ блоков генератор-трансформатор.

Реализация: нейтральная точка источника (генератора или трансформатора) не присоединена к контуру заземления. В распределительных сетях 6-10 кВ России обмотки питающих трансформаторов, как правило, соединяются в треугольник (рис. 1), поэтому нейтральная точка физически отсутствует.

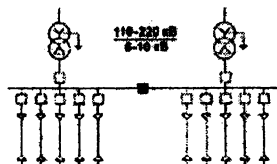


Рис.1. Схема двухтрансформаторной подстанции с изолированной нейтралью на стороне низкого напряжения

Этот способ заземления нейтрали – первый, он довольно широко, несмотря на очевидные недостатки, применяется в России..

Достоинства: не происходит немедленного отключения присоединения, что предоставляет возможность самоликвидации; допускает в определенных случаях работу с ОЗЗ, что дает резерв времени для принятия решения.

Недостатки: нежелательное *воздействие* на изоляцию сети и оборудования дугowych *перенапряжений*, вероятность *перехода в КЗ* однофазных замыканий на землю, *необходимость поочередного отключения потребителей с целью поиска поврежденного фидера*.

Особенности эксплуатации. Сети, работающие в режиме изолированной нейтрали, введены в эксплуатацию, как правило, не менее двадцати-тридцати лет назад, оснащены, в основном, маломасляными либо воздушными выключателями, с бумажно-масляной изоляцией кабелей.

Перспективы развития. При проведении реконструкции распределительных сетей 6-10 кВ, связанной с заменой кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена и маломасляных (или воздушных) выключателей на вакуумные, необходимо предотвратить либо минимизировать повторные зажигания дуги в вакуумной дугогасящей камере (ВДК) высоковольтных выключателей при коммутациях, т.к. возникающие при

этом высокочастотные процессы с большой вероятностью могут привести к нарушению электрической прочности СПЭ-изоляции кабелей или к её быстрой деградации. В настоящее время ведется работа по совершенствованию как ВДК, так и технологии производства СПЭ-изоляции высоковольтных кабелей, однако, на данном этапе при принятии проектных решений приходится учитывать их вышеуказанные особенности.

Более желательное решение в условиях реконструкции сетей, работающих в режиме изолированной нейтрали – применение в сочетании с вакуумными выключателями кабелей с бумажно-масляной изоляцией и перевод сети в режим эффективной нейтрали: с высокоомным резистором либо дугогасящим реактором, в зависимости от величины емкостного тока сети. Эти меры направлены на ограничение дуговых перенапряжений при ОЗЗ и создании условий для его самоликвидации (с вероятностью 85%, согласно[2]), особенно учитывая высокую способность к самовосстановлению бумажно-маслянной изоляции высоковольтных кабелей.

Если комбинация «кабели из сшитого полиэтилена+вакуумные высоковольтные выключатели» неизбежна, нейтраль сети рекомендуется заземлить следующим образом: через высокоомный резистор, если величины емкостных токов не превышают вышеуказанных значений и не предполагается расширения сети; или через параллельное соединение дугогасящего реактора и высокоомного резистора в противном случае. Эти меры в большей степени направлены на ограничение дуговых перенапряжений и создание некоторых условий для самоликвидации ОЗЗ (в меньшей степени, ввиду снижения добротности контура нулевой последовательности сети вследствие введения в него дополнительного активного сопротивления). Впрочем, в условиях вышеуказанной комбинации ("кабели из сшитого полиэтилена совместно с вакуумными высоковольтными выключателями") вероятность самоликвидации ОЗЗ, возникшего в высоковольтном кабеле, крайне невелика в силу его конструктивных особенностей, здесь речь идет скорее о подавлении ОЗЗ, возникших на других элементах сети.

В случаях, когда в сети недопустима работа с ОЗЗ, рекомендуется включение в нейтраль сети низкоомного резистивного сопротивления. Таким же образом можно поступить, если имеется хорошая возможность резервирования питания энергопотребителей и/или достаточно сильно «изношена» изоляция сети (почти нет надежды на самоликвидацию ОЗЗ).

Глухозаземленная нейтраль в сетях напряжением 6-35 кВ в России не применяется.

Эффективно заземленная нейтраль.

- Резонансно – заземленная нейтраль;
- Резистивно - заземленная нейтраль;
- Комбинированная нейтраль;
- Полное подавление однофазных замыканий на землю.

Резонансно-заземленная нейтраль.

Область применения. Компенсация емкостного тока замыкания на землю согласно [1] должна применяться при значениях этого тока в нормальных режимах:

- в сетях напряжением 3-20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях напряжением 35 кВ - более 10 А;

- в сетях, не имеющих железобетонных и металлических опор на воздушных линиях электропередачи: более 30 А при напряжении 3-6 кВ; более 20 А при напряжении 10 кВ; более 15 А при напряжении 15-20 кВ; в схемах генераторного напряжения 6-20 кВ блоков генератор-трансформатор - более 5А;

- при токах замыкания на землю более 50 А рекомендуется применение не менее двух заземляющих реакторов.

Реализация: нейтральную точку получают, используя трансформатор со схемой соединения обмоток "звезда-треугольник", в нейтраль которого подключают дугогасящий реактор (рис. 2). Иногда вместо вышеуказанного трансформатора применяют фильтр токов нулевой последовательности ФМЗО, представляющий собой маслонеполненный трехфазный трансформатор, не имеющий низковольтной вторичной обмотки, Возможно также подключение дугогасящего реактора к ненагруженному трансформатору собственных нужд (ТСН) с вышеуказанной схемой соединения обмоток - в этом случае необходима проверка ТСН по допустимой нагрузке.

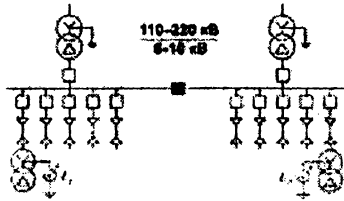


Рис.2. Схема двухтрансформаторной подстанции с резонансно-заземленной нейтралью на стороне низкого напряжения

Расчетная мощность реактора определяется по формуле, квар:

$$Q_k = I_C * U_{ном} / \sqrt{3},$$

где -- I_C - емкостной ток замыкания на землю, А;

$U_{ном}$ -- номинальное напряжение сети, кВ.

Достоинства:

- уменьшает ток через место повреждения до минимальных значений (в пределе – до активной составляющей и высших гармоник), обеспечивая надежное дугогашение;
- безопасность при растекании токов в земле;
- ограничение перенапряжений, возникающих при дуговых замыканиях на землю до уровней, безопасных для изоляции электрооборудования;
- обеспечение надежности и бесперебойности электроснабжения;
- значительное снижение скорости восстанавливающихся напряжений на поврежденной фазе, способствующее восстановлению диэлектрических свойств места повреждения;
- предотвращение набросов реактивной мощности на источники питания при дуговых замыканиях на землю (сохраняя качество электроэнергии у потребителя);
- облегчение требований к заземляющим устройствам.

Недостатки:

- отсутствие на данном этапе 100%-селективной сигнализации при дуговых замыканиях на землю и сопряженные с этим трудности отыскания поврежденного фидера;

- сложности, сопряженные с точностью резонансной настройки КНПС, возникающие в сильно несимметричных сетях с малыми емкостными токами и часто меняющейся конфигурацией.

Особенности эксплуатации: В 2004–2005 гг. ОРГРЭС провел опрос почти 50 энергосистем России на предмет уровня оснащенности сетей 6–35 кВ ДГР. По этим данным, суммарное количество сетей (секций) 6–35 кВ на начало 2005 г. составило 25264 (в исследовании не учитывались энергосистемы Москвы и Петербурга ввиду их особой специфики).

Общее количество сетей, в которых, согласно п. 5.11.8 ПТЭ, необходимо применять компенсацию емкостного тока, составило 2632 штук (т.е. около 10,4% от общего числа сетей). Причем в этих сетях установлено 2419 дугогасящих реакторов, что составляет 91,9% от общей потребности в них.

По данным ОРГРЭС, в России в сетях 6–35 кВ с компенсацией емкостного тока применяется 1986 ступенчатых дугогасящих реакторов (75,5% от общего числа ДГР) и 433 плавнорегулируемых реактора (24,5%).

То, что почти 3/4 установленных на сегодняшний день дугогасящих реакторов составляют ступенчатые ДГР, объясняет тот факт, что в п. 5.11.10 ПТЭ до сих пор допускаются такие «странные» расстройки компенсации. Почти 95% ступенчатых реакторов – это реакторы типа ЗРОМ или РЗДСОМ, которые на протяжении 50 лет выпускались по устаревшим ТУ, в которых было предусмотрено только 5 ответвлений. В то же время, например, в Германии еще в 50-е годы прошлого столетия ступенчатые дугогасящие реакторы выпускались с 16 отпайками.

Большинство плавнорегулируемых реакторов (403 шт., или 93,1%) составляют плунжерные реакторы типа РЗДПОМ (производства ПК «ХК Электрозавод», ЦРМЗ «Мосэнерго» и др.) или аналогичные реакторы западного производства (ZTC, GEUF и т.п.).

Автоматическими регуляторами оснащены (находятся в работоспособном состоянии) только 223 плавнорегулируемых реактора, что составляет 51,5% от потребности. Этот факт объясняется тем, что до последнего времени плунжерные реакторы типа РЗДПОМ не комплектовались автоматическими регуляторами на заводе-изготовителе.

Как показывает практика, многие из установленных на плунжерных ДГР автоматических регуляторов (РНДК, БАНК, БАРК, УАРК и т.п.) проработали

по 20–30 лет, выполнены на устаревшей элементной базе и зачастую представляют собой единичные опытные (а не серийные) экземпляры устройств. Поэтому реально уровень автоматизации плунжерных дугогасящих реакторов намного ниже 50%.

Чуть менее 7% от обследованных плавнорегулируемых реакторов – это дугогасящие реакторы с подмагничиванием (РДП, КДР, РУОМ, РЗДУОМ). Первые образцы дугогасящих реакторов с подмагничиванием были установлены более 30 лет назад. Все они управляются в ручном режиме, и до сих пор ни на одном из реакторов с подмагничиванием типа КДР или РДП не установлено ни одного автоматического регулятора (за исключением нескольких образцов, установленных в сетях 6–10 кВ целлюлознобумажных комбинатов, где применено ступенчатое регулирование тока компенсации).

Перспективы развития. В многочисленных статьях, опубликованных в последнее время, отмечается тот факт, что в сетях с компенсацией емкостного тока зачастую уже не хватает мощности установленных ДГР. Как временная мера, п. 5.11.10 ПТЭ, разрешается временная работа с недокомпенсацией при отсутствии ДГР необходимой мощности. И решение этого вопроса в последние 15–20 лет скорее лежало не в технической, а в экономической области. Сегодня в энергосистемах идет планомерное внедрение плунжерных дугогасящих реакторов необходимой мощности с учетом перспективного развития сетей.

Для подстанций, на которых ранее были установлены ступенчатые ДГР, рядом проектных институтов разработан и внедряется способ параллельной установки ступенчато регулируемого и плунжерного реакторов с микропроцессорными автоматическими регуляторами, автоматически настраиваемые в резонанс при изменении параметров сети. В этом случае возможно получение всех достоинств данного режима. Для обеспечения 100%-ной селективности при определении поврежденного фидера рекомендуется схема с кратковременным подключением в низковольтную обмотку присоединительного трансформатора низкоомного активного сопротивления (в случае неустранимости ОЗЗ, спустя некоторое время после его обнаружения). Эта возможность на сегодняшний день уже реализована в таких авторегуляторах, как МИРК-5 (фирма "Микроинжиниринг", г. Москва), УАРК-101D (ООО ВП "НТБЭ", г. Екатеринбург), однако может быть достаточно легко реализована самими инженерами-проектировщиками проектного института.

Величина резистора в этом случае выбирается исходя из условия:

$$R_N = 27 * U_{ВН} / (\sqrt{3} * K_{тр}^2 * I_c),$$

где $U_{ВН}$ – линейное напряжение стороны высшего напряжения трансформатора, В;

$K_{тр}$ – коэффициент трансформации ТЗ, вычисляемый по формуле $K_{тр} = U_{ВН} / U_{НН}$;

I_c – емкостный ток ОЗЗ, А.

В настоящее время идет интенсивная работа над устранением основного недостатка реакторов типа ЗРОМ, РЗДСОМ – "неплавности" регулирования величины индуктивного тока, выдаваемого ими в сеть. Например, в ситуации проведения реконструкции в сети, где мощность ступенчато регулируемого дугогасящего реактора является достаточной или даже избыточной, для обеспечения более точной настройки на сети на резонанс в пределах одной стпайки можно воспользоваться способом, разработанным в Липецком государственном техническом университете к.т.н. Зацепиной В.И. и инженером Волутаевой И.А. Вкратце, предлагается перекомпенсацию емкостных токов устранять следующим образом: параллельно ДГР, настроенному на фиксированную индуктивность L , подключать конденсаторные установки с регулируемой емкостью C_d . Подробнее об этом можно прочесть в [4]. Там же приведены формулы расчета величины C_d и факторов, влияющих на величины коэффициентов, входящих в эту формулу. Также, предприятием ООО ВП "НТБЭ" ведется работа по разработке высоковольтного тиристорного ключа для плавного управления величиной индуктивности ступенчато регулируемых дугогасящих реакторов.

Резистивно-заземленная нейтраль.

Область применения: в электрических сетях, где величина емкостных токов не превышает значений, указанных в п. 1.2.16 [1]. Резистивное заземление нейтрали может выполняться высокоомным и низкоомным. Компьютерные осциллограммы процессов, протекающих в сетях с низкоомным заземлением нейтрали, показаны на рис. 4.

Реализация: Высокоомный резистор в сетях 6-35 кВ может включаться так же, как и дугогасящий реактор, в нейтраль специального заземляющего трансформатора (рис. 3), а также нейтраль во вторичную обмотку трансформатора (в разомкнутый треугольник), при этом обмотки высокого напряжения заземляющего трансформатора соединяют с землей, а его магнитопровод должен быть броневой конструкции.

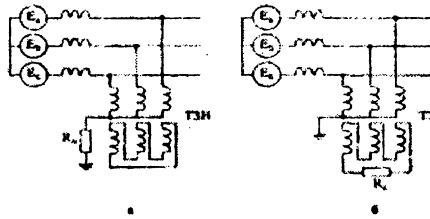


Рис. 3. Высокоомный резистор в сетях 6-35 кВ

Высокоомный резистор предназначен для ограничения дуговых перенапряжений и устранения феррорезонансных в режиме работы сети с ОЗЗ на время поиска и отключения поврежденного присоединения оперативным персоналом. Для схемы подключения высокоомного резистора, показанной на рис. 3.а, величина высокоомного резистора выбирается, исходя из условия:

$$I_R \geq I_C, \text{ или } R_N \leq U_{ВН} / \sqrt{3} I_C$$

где $U_{ВН}$ - линейное напряжение стороны высшего напряжения трансформатора, В;

$K_{тр}$ - коэффициент трансформации ТЗ, вычисляемый по формуле $K_{тр} = U_{ВН} / U_{НН}$;

I_C - емкостный ток ОЗЗ, А.

Для схемы подключения высокоомного резистора, показанной на рис. 3.б, величина высокоомного резистора выбирается, исходя из условия:

$$I_R \geq I_C, \text{ или } R_N \leq 27 * U_{ВН} / (\sqrt{3} I_C * K_{тр}^2),$$

где $K_{тр}$ - коэффициент трансформации ТЗ, вычисляемый по формуле $K_{тр} = U_{ВН} / U_{НН}$.

Низкоомное резистивное заземление нейтрали сети осуществляют с помощью специального трансформатора заземления нейтрали ТЗН со схемой соединения обмоток Y/Δ, согласно рис.3.а. Резистор R_N включают между нулевой точкой обмотки ВН и контуром заземления. Главной целью низкоомного резистивного заземления нейтрали сети является быстрое отключение ОЗЗ релейной защитой и максимальный охват обмоток электрических машин (двигателей, генераторов, трансформаторов) защитой от ОЗЗ. Величина назкоомного резистора выбирается, исходя из соотношения:

$$R_N \leq U_{ВН} / I_{сз \max},$$

где $I_{сз \max}$ - максимальный ток срабатывания защит от ОЗЗ.

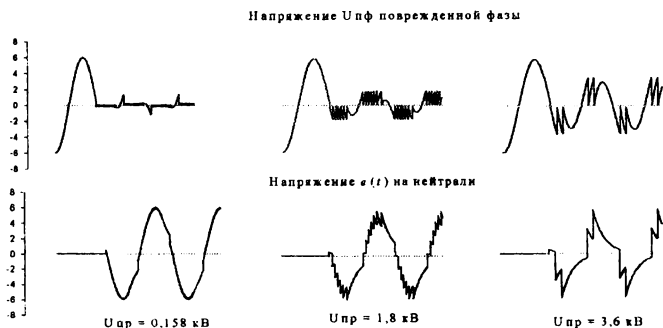


Рис.4. Компьютерные осциллограммы процессов, протекающих в сети с низкоомным заземлением нейтрали

Достоинства: Ограничение дуговых перенапряжений и феррорезонансных явлений при одновременном обеспечении длительной работы сети с ОЗЗ при высокоомном заземлении нейтрали и немедленное отключение поврежденного фидера со 100%-ной селективностью при низкоомном заземлении нейтрали.

Недостатки. В случае высокоомного заземления нейтрали – практически отсутствуют. В случае низкоомного заземления нейтрали в некоторых случаях не может быть 100%-ной уверенности в том, что будет обеспечен достаточный ток в месте ОЗЗ для надежного отключения его РЗ от ОЗЗ, поскольку величина пробивного напряжения $U_{пр}$ изоляции электрооборудования определяется степенью ионизации и в общем случае может оказаться различной и заранее неизвестной. При таком подходе в отдельных случаях невозможно избежать тяжелых аварийных последствий. Кроме того, даже в случае успешного отключения столь мощных двигателей со столь же мощной нагрузкой с их энергоресурсопотерями (запуск, самозапуск, гидроудары) вряд ли вообще поощрительна установка на защитное отключение, когда заранее известно, что до 85% всех ОЗЗ могли надежно самоликвидироваться [3]. Иными словами до 85% ОЗЗ могли не реализоваться в виде необратимых ОЗЗ, требующих согласно ПТЭ отключения. Тогда ведь только 15% ОЗЗ потребовали бы отключения.

Особенности эксплуатации: Высокоомное резистивное заземление нейтрали разрешено в России относительно недавно, с выходом седьмого издания ПУЭ. Внедряется оно в электрических сетях, которые ранее работали в режиме изолированной нейтрали, а также во вновь проектируемых сетях там, где не

требуется установки дугогасящих реакторов. В настоящее время в эксплуатации находится более 500 резисторов на номинальное напряжение 6, 10, 35 кВ, которые установлены в Российских электрических сетях различного назначения, вызывая положительные отклики, при этом практически не имея недостатков.

Низкоомное резистивное заземление нейтрали используется в Беларуси, а также в ряде зарубежных стран, особенно США, Канаде, и Франции.

Перспективы развития: в настоящее время в сетях 6-35 кВ, где не требуется компенсации емкостных токов, идет активное внедрение высокоомного резистивного заземления нейтрали, и с этой, безусловно, очень перспективной перспективной тенденцией, в вышеуказанных сетях может конкурировать только полное подавление однофазных замыканий на землю.

Комбинированная нейтраль.

Применяется в сетях 6-35 кВ, в которых согласно [1] требуется установка дугогасящих реакторов. Представляет собой комбинацию резонансного и резистивного способов заземления нейтрали. Резистор может быть высокоомным и низкоомным.

Низкоомный резистор включается кратковременно, как правило, в низковольтную обмотку дугогасящего реактора, для обеспечения 100%-й селективности в определении поврежденного фидера (при неустранимом ОЗЗ), с выдержкой времени, достаточной для принятия оперативных решений. Тогда при дуговых замыканиях на землю будут проявляться все положительные стороны резонансной настройки компенсации емкостных токов, т.е. снижение перенапряжений до безопасных для изоляции значений $2,2-2,4 U_{\phi}$, надежное гашение заземляющей дуги, снижение скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе.

Высокоомный резистор подключен постоянно, параллельно дугогасящему реактору. В последние 5-6 лет сторонниками резистивного заземления нейтрали данный способ заземления нейтрали предложен с целью ограничения перенапряжений, возникающих в сети с ОЗЗ при наличии расстроек компенсации, превышающих 5 %, то есть недопустимых с точки зрения ПУЭ, но имеющих место при недостаточной мощности дугогасящих реакторов либо неверной настройке компенсации. При параллельном включении ступенчатого ДГР и резистора эффективность компенсации емкостного тока резко падает, так как в этом случае увеличивается скорость нарастания напряжения на поврежденной фазе,

зачастую опережая скорость нарастания диэлектрической прочности изоляции в месте пробоя изоляции.

Полное подавление однофазных замыканий на землю.

Область применения: электрические сети с емкостными токами, не превышающими 15 А.

Реализация: Аналогично резонансному способу заземления нейтрали, дугогасящий агрегат подключается к нейтральной точке сети с помощью присоединительного трансформатора, фильтра ФМЗО. Оснащение сети с резонансным заземлением вторым контуром компенсации активной составляющей (КАС) в России и контуром компенсации остаточного тока (RCC) в Швеции (известная в западном мире, так называемая, "Шведская нейтраль") приводит к уникальной особенности этих устройств полностью предотвращать от повторных пробоев изоляцию электрооборудования. При этом сводится к нулю риск повреждения других питающих линий от перенапряжений и, как следствие, групповых аварий, не прекращая регулярную поставку электроэнергии.

Достоинства: системы защиты сетей с полным подавлением сохраняют преимущества систем с резонансным заземлением, дополняя их тем, что все 100% ОЗЗ эффективно подавляются без отключения нагрузки и ни одно из них не переходит ни в КЗ, ни в множественные повреждения электрооборудования. Тем самым обеспечивается длительная безопасная работа сети под защитой систем полного подавления дугowych ОЗЗ. Имеется стопроцентная селективность при определении поврежденного фидера при ОЗЗ.

Недостатки: на данный момент стоимость устройств полного подавления однофазных замыканий на землю достаточно велика.

Особенности эксплуатации: В данный момент в отечественных электрических сетях эксплуатации находится 12 устройств полного подавления однофазных замыканий на землю УАРК-201. Из них 6 – в сетях собственных нужд блоков 500 МВт Рефтинской ГРЭС (филиал ОАО "ОГК-5"), 6 – в сетях ОАО "Сибнефтепровод". В зарубежных электрических сетях внедрено около 70 устройств полного подавления однофазных замыканий на землю RCC.

Перспективы развития: Направление является перспективным, поскольку сочетает в себе все преимущества комбинированного заземления нейтрали, при этом не имея ни одного из их недостатков, позволяя долгую (до трех дней) работу электрической сети при наличии в ней ОЗЗ.. По системе полного подавле-

ния УАРК-201 имеется положительное заключение научно-технического совета РАО ЕЭС России.

Выводы.

При выборе способа заземления нейтрали сети необходимо учитывать следующие ее характеристики:

- величину однофазного тока замыкания на землю I_C ;
- состояние изоляции электрооборудования;
- наличие вращающихся электрических машин;
- возможность осуществления отключения присоединения с однофазным замыканием на землю (резервируемость нагрузки присоединений).

В сетях 6–35 кВ, в которых согласно п. 5.11.8 ПТЭ нужна компенсация емкостного тока замыкания на землю, целесообразно применять плунжерные ДГР с автоматической настройкой в резонанс. Применение совместно с резистором ступенчатых ДГР и дугогасящих реакторов с подмагничиванием менее эффективно. В процессе принятия проектных решений в сетях 6–35 кВ целесообразно учитывать возможность применения устройств полного подавления однофазных замыканий на землю

Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок. М.: Энергия, 2001. 7-е изд. - 492 с.
2. Лихачёв Ф.А. Защита от внутренних перенапряжений установок 3-220 кВ. М.: Энергия, 1968. - 192 с.
3. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. М.: Госэнергоиздат, 1959. - 415 с.
4. Лихачёв Ф.А. Инструкция по выбору, установке и эксплуатации дугогасящих катушек. М.: Энергия, 1971. - 104 с.