

Токовые и токовые
направленные защиты нулевой
последовательности в сетях с
изолированной нейтралью

4 режима заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ

Способ заземления нейтрали сети является достаточно важной характеристикой. Он определяет:

- ток в месте повреждения и перенапряжения на неповрежденных фазах при однофазном замыкании;
- схему построения релейной защиты от замыканий на землю;
- уровень изоляции электрооборудования;
- выбор аппаратов для защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений (ограничителей перенапряжений);
- бесперебойность электроснабжения;
- допустимое сопротивление контура заземления подстанции;
- безопасность персонала и электрооборудования при однофазных замыканиях.

4 режима заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ

В настоящее время в мировой практике используются следующие способы заземления нейтрали сетей среднего напряжения (термин «среднее напряжение» используется в зарубежных странах для сетей с диапазоном рабочих напряжений 1-69 кВ):

- изолированная (незаземленная);
- глухозаземленная (непосредственно присоединенная к заземляющему контуру);
- заземленная через дугогасящий реактор;
- заземленная через резистор (низкоомный или высокоомный).

4 режима заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ

В России, согласно п.1.2.16 последней редакции ПУЭ, введенных в действие с 1 января 2003 г., «...работа электрических сетей напряжением 3-35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор». Таким образом, сейчас в сетях 6-35 кВ в России формально разрешены к применению все принятые в мировой практике способы заземления нейтрали, **кроме глухого заземления**. Отметим, что, несмотря на это, в России имеется опыт применения глухого заземления нейтрали в некоторых сетях 35 кВ (например, кабельная сеть 35 кВ электроснабжения г. Кронштадта). Рассмотрим подробнее способы заземления нейтрали и дадим им общую характеристику.

4 режима заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ

Способы заземления нейтрали, используемые в разных странах мира.

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

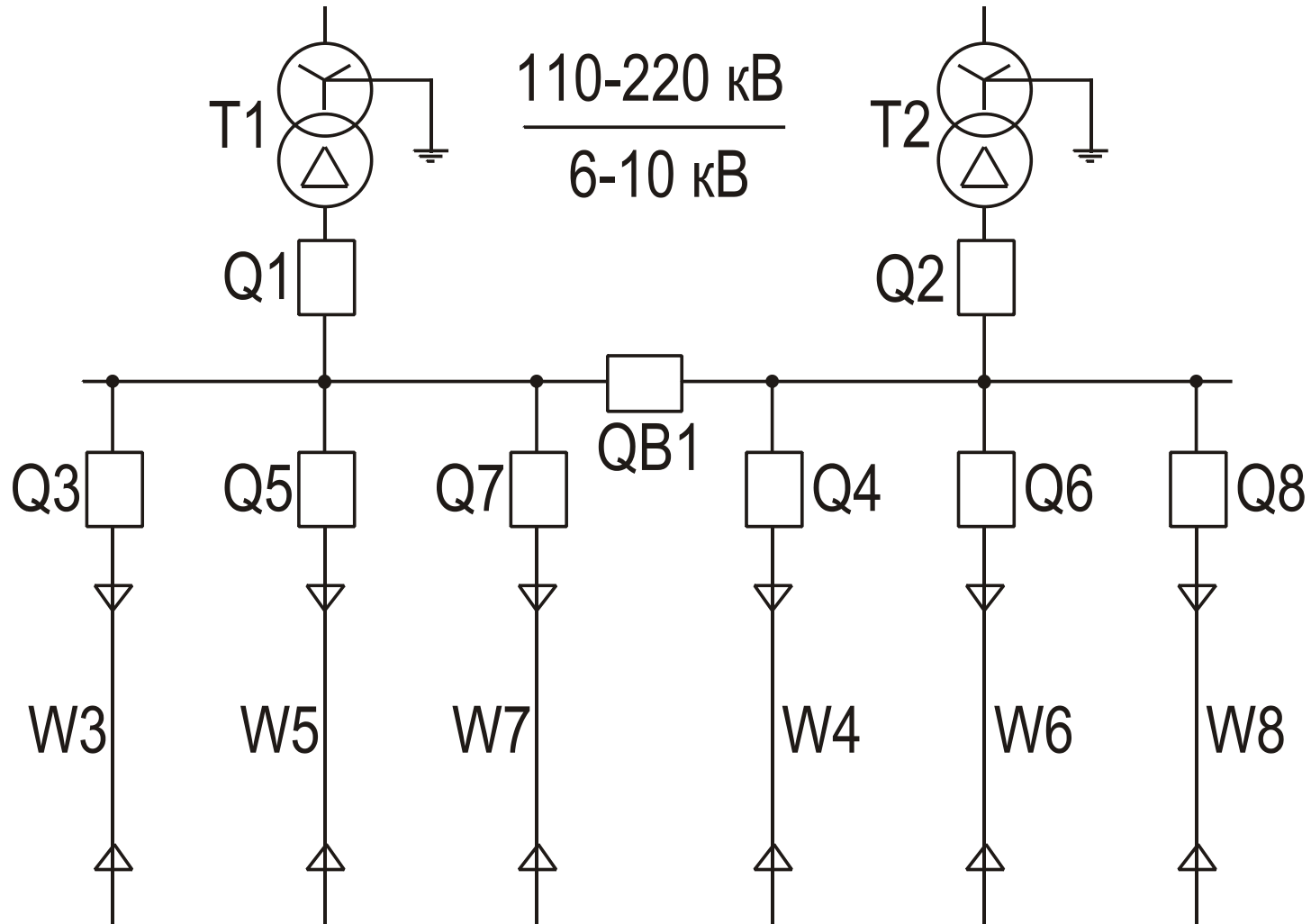
ИЗОЛИРОВАННАЯ НЕЙТРАЛЬ

- Режим изолированной нейтрали достаточно широко применяется в России. При этом способе заземления 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.

ПУЭ ограничивает применение режима изолированной нейтрали в зависимости от тока однофазного замыкания на землю сети (емкостного тока). Компенсация тока однофазного замыкания на землю (использование дугогасящих реакторов) должна предусматриваться при емкостных токах:

- более 30 А при напряжении 3-6 кВ;
- более 20 А при напряжении 10 кВ;
- более 15 А при напряжении 15-20 кВ;
- более 10 А в сетях напряжением 3-20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях напряжением 35 кВ;
- более 5 А в схемах генераторного напряжения 6-20 кВ блоков «генератор–трансформатор».

Схема двухтрансформаторной подстанции с изолированной нейтралью



ИЗОЛИРОВАННАЯ НЕЙТРАЛЬ

Вместо компенсации тока замыкания на землю может применяться заземление нейтрали через резистор (резистивное) с соответствующим изменением логики действия релейной защиты. Исторически режим изолированной нейтрали был первым режимом заземления нейтрали, использовавшимся в электроустановках среднего напряжения. Его достоинствами являются:

- отсутствие необходимости в немедленном отключении первого однофазного замыкания на землю;
- малый ток в месте повреждения (при малой емкости сети на землю).

ИЗОЛИРОВАННАЯ НЕЙТРАЛЬ

Недостатками этого режима заземления нейтрали являются:

- возможность возникновения дуговых перенапряжений при перемежающемся характере дуги с малым током (единицы–десятки ампер) в месте однофазного замыкания на землю;
- возможность возникновения многоместных повреждений (выход из строя нескольких электродвигателей, кабелей) из-за пробоев изоляции на других присоединениях, связанных с дуговыми перенапряжениями;
- возможность длительного воздействия на изоляцию дуговых перенапряжений, что ведет к накоплению в ней дефектов и снижению срока службы;
- необходимость выполнения изоляции электрооборудования относительно земли на линейное напряжение;
- сложность обнаружения места повреждения;
- опасность электропоражения персонала и посторонних лиц при длительном существовании замыкания на землю в сети;
- сложность обеспечения правильной работы релейных защит от однофазных замыканий, так как реальный ток замыкания на землю зависит от режима работы сети (числа включенных присоединений).

Нейтраль, заземленная через дугогасящий реактор

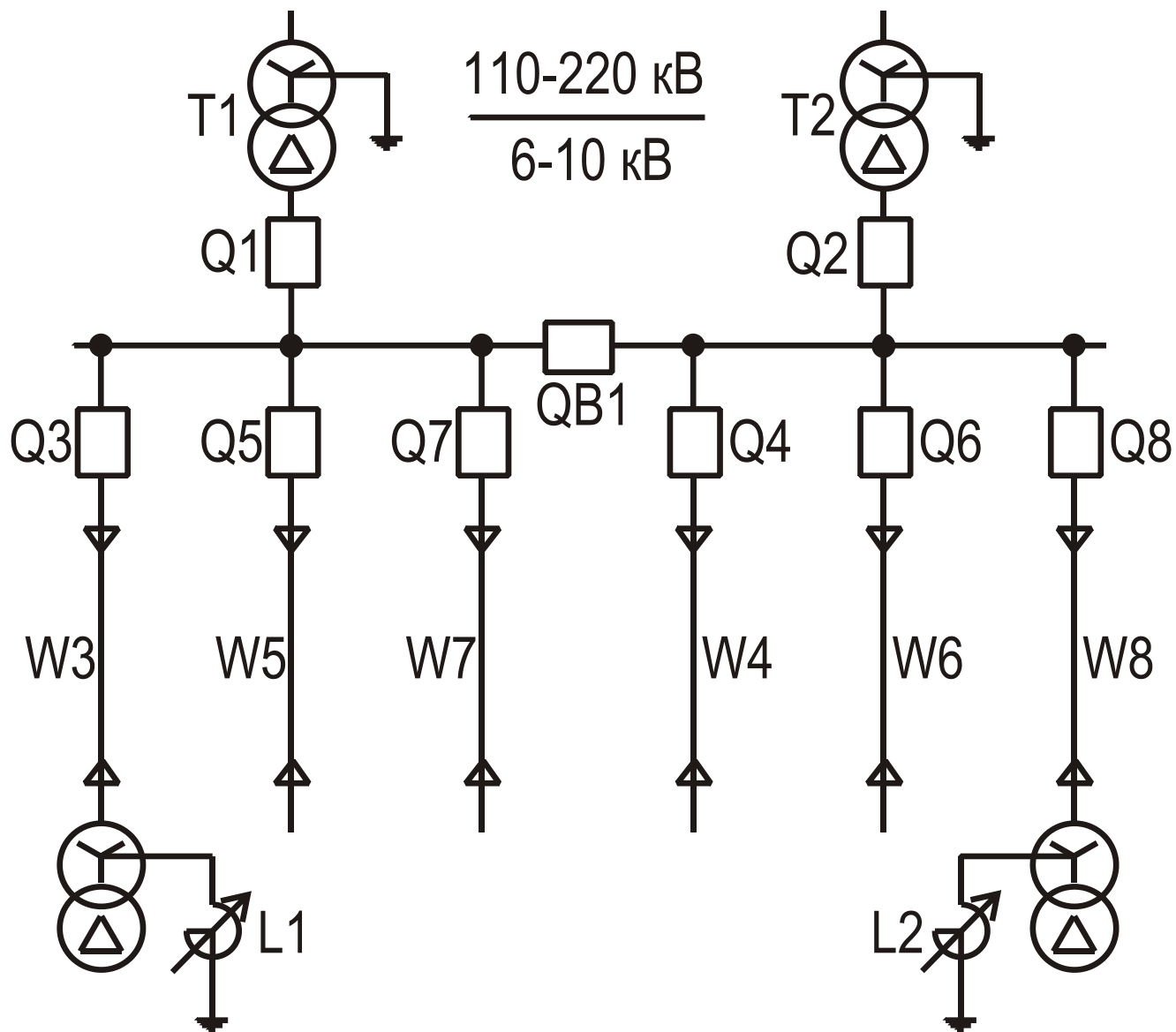
Она также достаточно часто применяется в России. Этот способ заземления нейтрали, как правило, находит применение в разветвленных кабельных сетях промышленных предприятий и городов. При этом способе нейтральную точку сети получают, используя специальный трансформатор (рис.2).

С точки зрения исторической последовательности возникновения этот способ заземления нейтрали является вторым. Он был предложен немецким инженером Петерсеном в 20-х годах прошлого столетия (в европейских странах дугогасящие реакторы называют по имени изобретателя «Petersen coil» — катушка Петерсена).

Достоинствами этого метода заземления нейтрали являются:

- отсутствие необходимости в немедленном отключении первого однофазного замыкания на землю;
- малый ток в месте повреждения (при точной компенсации — настройке дугогасящего реактора в резонанс);
- возможность самоликвидации однофазного замыкания, возникшего на воздушной линии или ошиновке (при точной компенсации — настройке дугогасящего реактора в резонанс);
- исключение феррорезонансных процессов, связанных с насыщением трансформаторов напряжения и неполнофазными включениями силовых трансформаторов.

Схема двухтрансформаторной подстанции с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор.



Нейтраль, заземленная через дугогасящий реактор

Недостатками этого режима заземления нейтрали являются:

- возникновение дуговых перенапряжений при значительной расстройке компенсации;
- возможность возникновения многоместных повреждений при длительном существовании дугового замыкания в сети;
- возможность перехода однофазного замыкания в двухфазное при значительной расстройке компенсации;
- возможность значительных смещений нейтрали при недокомпенсации и возникновении неполнофазных режимов;
- возможность значительных смещений нейтрали при резонансной настройке в воздушных сетях;
- сложность обнаружения места повреждения;
- опасность электропоражения персонала и посторонних лиц при длительном существовании замыкания на землю в сети;
- сложность обеспечения правильной работы релейных защит от однофазных замыканий, так как ток поврежденного присоединения очень незначителен.

Нейтраль, заземленная через дугогасящий реактор

В России режим заземления нейтрали через дугогасящий реактор применяется в основном в разветвленных кабельных сетях с большими емкостными токами. Кабельная изоляция в отличие от воздушной не является самовосстанавливающейся. То есть, однажды возникнув, повреждение не устранится, даже несмотря на практически полную компенсацию тока в месте повреждения. Соответственно для кабельных сетей самоликвидация однофазных замыканий как положительное свойство режима заземления нейтрали через дугогасящий реактор не существует.

При дуговом характере однофазного замыкания скважность воздействия перенапряжений на изоляцию сети ниже, чем при изолированной нейтрали, но и здесь существует возможность возникновения многоместных повреждений. В последние десятилетия сети 6-10 кВ разрослись, а мощность компенсирующих устройств на подстанциях осталась той же, соответственно значительная доля сетей среднего напряжения сейчас работает с существенной недокомпенсацией. Это ведет к исчезновению всех положительных свойств сетей с компенсированной нейтралью. Отметим дополнительно, что дугогасящий реактор компенсирует только составляющую промышленной частоты тока однофазного замыкания. При наличии в сети источников высших гармоник последние могут содержаться в токе замыкания и в некоторых случаях даже усиливаться.

Нейтраль, заземленная через дугогасящий реактор

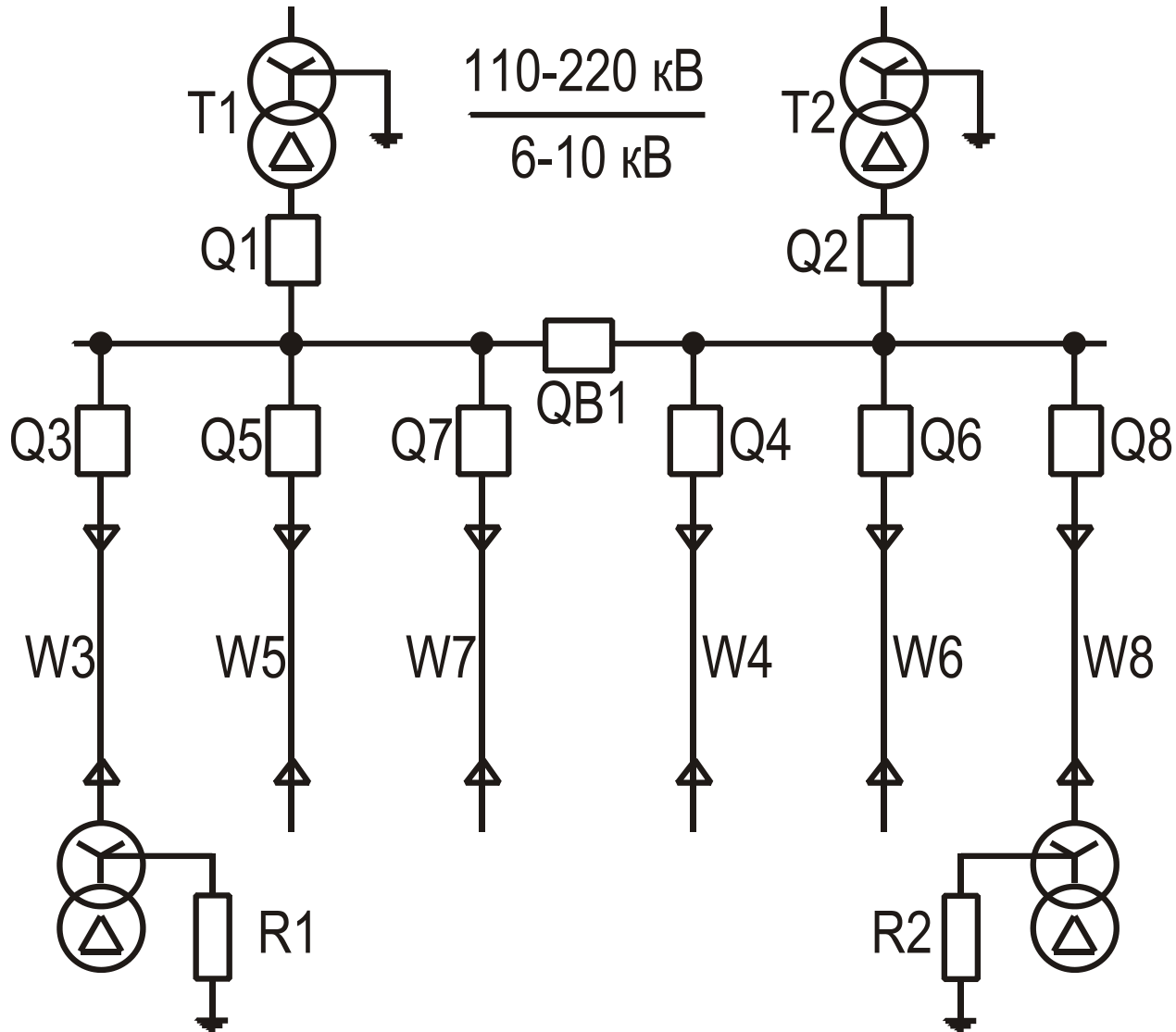
Применение режима с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор, в таких странах, как Финляндия, Швеция, отличается от российского. В этих странах он применяется в сетях с воздушными линиями, где его применение наиболее эффективно. Кроме того, в этих странах существует значительное сопротивление грунта, состоящего в основном из скальных пород, и режим заземления нейтрали через дугогасящий реактор позволяет обнаруживать однофазные замыкания через значительные переходные сопротивления 3-5 кОм. Применение режима заземления нейтрали через дугогасящий реактор в таких странах, как Германия, Австрия, Швейцария, носит в некоторой степени традиционный характер (выше уже говорилось о немецком инженерере – изобретателе этого способа). Тем не менее и в этих странах этот режим заземления нейтрали применяется в основном в сетях с воздушными линиями. В сетях среднего напряжения зарубежных промышленных предприятий используется резистивное заземление нейтрали.

Нейтраль, заземленная через резистор (высокоомный или низкоомный)

Этот режим заземления используется в России очень редко, только в некоторых сетях собственных нужд блочных электростанций и сетях газоперекачивающих компрессорных станций. В то же время, если оценивать мировую практику, то резистивное заземление нейтрали – это наиболее широко применяемый способ (см. табл.).

Резистор в отечественных сетях 6-10 кВ может включаться так же, как и реактор, в нейтраль специального заземляющего трансформатора (рис. 3). Возможны и другие варианты включения резистора, когда нейтраль заземляющего трансформатора наглухо присоединяется к контуру заземления, а резистор включается во вторичную обмотку, собранную в разомкнутый треугольник, либо используется однообмоточный трансформатор (фильтр нулевой последовательности) с соединением обмотки ВН в зигзаг. Возможны два варианта реализации резистивного заземления нейтрали: высокоомный или низкоомный.

Нейтраль, заземленная через резистор (ВЫСОКООМНЫЙ ИЛИ НИЗКООМНЫЙ)



Нейтраль, заземленная через резистор (высокоомный или низкоомный)

При высокоомном заземлении нейтрали резистор выбирается таким образом, чтобы ток, создаваемый им в месте однофазного повреждения, был равен или больше емкостного тока сети. Например, согласно нормам французской сетевой компании Electricite de France, ток, создаваемый резистором, должен быть в два раза больше емкостного тока сети. Это гарантирует отсутствие дуговых перенапряжений при однофазных замыканиях. Как правило, суммарный ток в месте повреждения при высокоомном заземлении нейтрали не превышает 10 А. То есть высокоомным заземлением нейтрали является такое заземление, которое позволяет не отключать возникшее однофазное замыкание немедленно. Соответственно высокоомное заземление нейтрали может применяться только в сетях с малыми собственными емкостными токами до 5-7 А. В сетях с большими емкостными токами допустимо применение только низкоомного заземления нейтрали.

Нейтраль, заземленная через резистор (высокоомный или низкоомный)

При низкоомном заземлении нейтрали используется резистор, создающий ток в пределах 10-2000 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 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 бельгийским нормам ток однофазного замыкания лимитируется величиной не более 500 А.

Нейтраль, заземленная через резистор (высокоомный или низкоомный)

При наличии в сети высоковольтных электродвигателей Electricite de France ограничивает ток в месте замыкания величиной 20 А (иногда допускается увеличение до 50 А). Эта норма связана с недопустимостью выплавления стали статора электродвигателя при однофазном замыкании. Похожие ограничения для сетей с высоковольтными электродвигателями были приняты при разработке устройств резистивного заземления нейтрали и в России. Например, такие заводы, как «Самарский Электрощит», «Московский Электрощит», выпускают ячейки заземления нейтрали, в которых используются резисторы, создающие активный ток 35-38 А (100 Ом для сетей 6 кВ и 150 Ом для сетей 10 кВ). Некоторое отличие представляет практика низкоомного резистивного заземления нейтрали англоязычных стран. Так, в США типовым решением является применение резистора, создающего ток 400 А, в том числе и для сетей с высоковольтными электродвигателями.

Нейтраль, заземленная через резистор (ВЫСОКООМНЫЙ ИЛИ НИЗКООМНЫЙ)

Достоинствами резистивного заземления нейтрали являются:

- отсутствие дуговых перенапряжений высокой кратности и многоместных повреждений в сети;
- отсутствие необходимости в отключении первого однофазного замыкания на землю (только для высокоомного заземления);
- исключение феррорезонансных процессов и повреждений трансформаторов напряжения;
- уменьшение вероятности поражения персонала и посторонних лиц при однофазном замыкании (только для низкоомного заземления и быстрого селективного отключения повреждения);
- практически полное исключение возможности перехода однофазного замыкания в многофазное (только для низкоомного заземления и быстрого селективного отключения повреждения);
- простое выполнение чувствительной и селективной релейной защиты от однофазных замыканий на землю, основанной на токовом принципе.

Нейтраль, заземленная через резистор (ВЫСОКООМНЫЙ ИЛИ НИЗКООМНЫЙ)

Недостатками резистивного режима заземления нейтрали являются:

- увеличение тока в месте повреждения;
- необходимость в отключении однофазных замыканий (только для низкоомного заземления);
- ограничение на развитие сети (только для высокоомного заземления).

Отсутствие дуговых перенапряжений при однофазных замыканиях и возможность организации селективной релейной защиты являются неоспоримыми преимуществами режима резистивного заземления нейтрали. Именно эти преимущества способствовали широкому распространению такого режима заземления нейтрали в разных странах.

Глухозаземленная нейтраль

Как уже было сказано, в отечественных сетях 6-35 кВ не используется. Этот режим заземления нейтрали широко распространен в США, Канаде, Австралии, Великобритании и связанных с ними странах. Он находит применение в четырехпроводных воздушных сетях среднего напряжения 4-25 кВ. В качестве примера на рис.5 приведен участок сети 13,8 кВ в США. Как видно из рис.5, воздушная линия на всем своем протяжении и ответвлениях снабжена четвертым нулевым проводом. Концепция построения сети заключается в том, чтобы максимально сократить протяженность низковольтных сетей напряжением 120 В. Каждый частный дом питается от собственного понижающего трансформатора 13,8/0,12 кВ, включенного на фаз-ное напряжение.

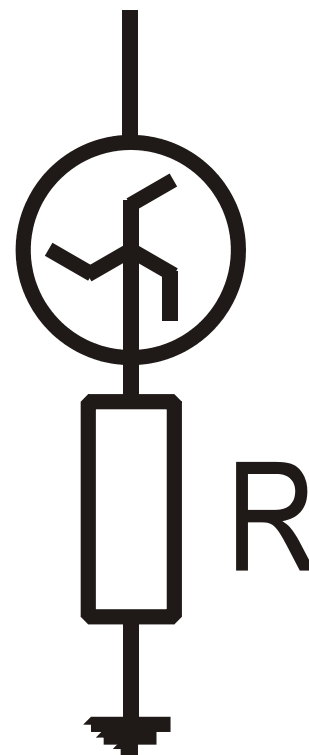
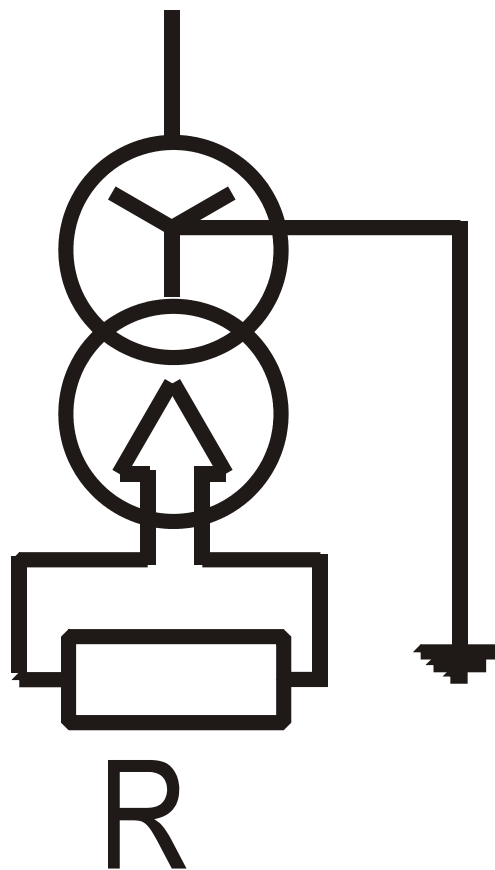
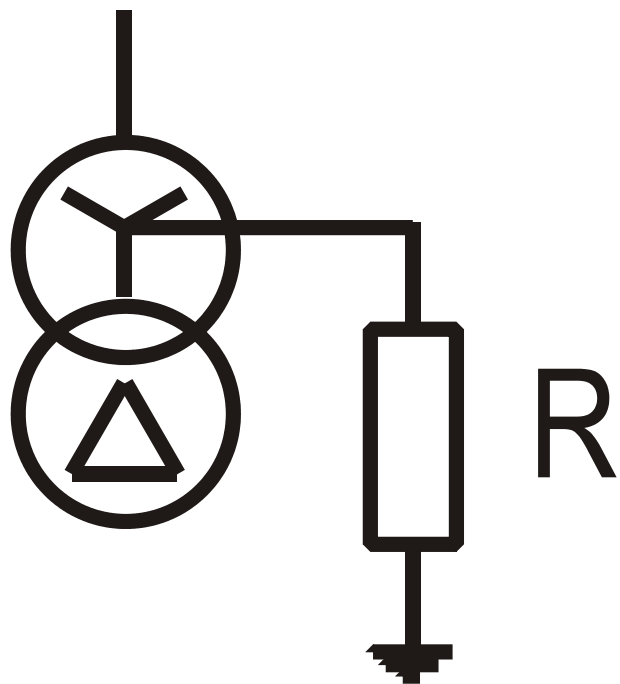
Глухозаземленная нейтраль

На рис. показан такой однофазный трансформатор потребителя с заземленной средней точкой обмотки НН. Основная воздушная линия делится на участки секционирующими аппаратами – реклоузерами. Трансформаторы каждого отдельного потребителя и ответвления от линии защищаются предохранителями. На отпайках от линии используются отделители, обеспечивающие отключение в бестоковую паузу. Этот способ заземления нейтрали не используется в сетях, содержащих высоковольтные электродвигатели. Токи однофазного замыкания в этом случае достигают нескольких килоампер, что недопустимо с позиций повреждения статора электродвигателя (выплавление стали при однофазном замыкании).

Североамериканский трансформатор потребителя.

На рис. показан такой однофазный трансформатор потребителя с заземленной средней точкой обмотки НН. Основная воздушная линия делится на участки секционирующими аппаратами – реклоузерами. Трансформаторы каждого отдельного потребителя и ответвления от линии защищаются предохранителями. На отпайках от линии используются отделители, обеспечивающие отключение в бестоковую паузу. Этот способ заземления нейтрали не используется в сетях, содержащих высоковольтные электродвигатели. Токи однофазного замыкания в этом случае достигают нескольких килоампер, что недопустимо с позиций повреждения статора электродвигателя (выплавление стали при однофазном замыкании).

Североамериканский трансформатор потребителя



Североамериканский трансформатор потребителя.

Применение глухого заземления нейтрали в сетях среднего напряжения в России вряд ли необходимо и вероятно в обозримом будущем. Все отечественные линии 6-35 кВ трехпроводные, а трансформаторы потребителей трехфазные, то есть сам подход к построению сети существенно отличается от зарубежного. Указанный выше случай глухого заземления нейтрали в кабельной сети 35 кВ, питающей г. Кронштадт, является исключением. Такое решение было сознательно принято проектным институтом в связи с тем, что ток однофазного замыкания в этой сети составляет около 600 А. Компенсация в данном случае малоэффективна, а надежных высоковольтных низкоомных резисторов на момент реализации решения в России не существовало

Область применения

В сетях с изолированной нейтралью (6-35кВ) при однофазном замыкании на землю присутствуют ток и напряжение нулевой последовательности. Величина тока однофазного замыкания на землю обычно имеет небольшую величину (несколько единиц или десятков ампер) и не больше рабочего тока линии, в связи с этим ПУЭ допускает работу поврежденной сети до двух часов. Однако существуют причины, из-за которых это повреждение необходимо отключать:

- — возникает большой градиент напряженности электрического поля, следовательно высокое шаговое напряжение, опасное для человека и животного;
- — однофазное замыкание на землю обычно сопровождается перемежающейся дугой, что чрезвычайно опасно для взрыво- и пожароопасных предприятий;
- — нулевой потенциал перемещается в поврежденную фазу, а к фазной изоляции неповрежденных фаз прикладывается линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раза больше номинального. Ослабленная изоляция может не выдержать, произойдет ее пробой и возникнет двойное замыкание на землю, или двухфазное КЗ;
- — перемежающаяся дуга, как известно, сопровождается высокочастотными гармониками. При наличии индуктивностей и емкостей возникают резонансные перенапряжения, которые в несколько раз больше номинального, что также может привести к двойному замыканию на землю, или двухфазному КЗ.

С учетом вышеупомянутых негативных воздействий к защите от замыканий на землю предъявляются следующие **требования**:

- — защита действует на сигнал в сетях, где допускается работа с повреждением до двух часов;
- — защита должна действовать без выдержки времени во взрывоопасных и пожароопасных производствах, строительных и некоторых других видах производства;
- — защита должна удовлетворять требованиям селективности при внешних замыканиях;
- — в целях упрощения допустимо не устанавливать защиту на электроустановках, удаленных от источников питания, или когда вероятность однофазного замыкания мала;
- — защита должна чувствовать однофазное замыкание через перемежающуюся дугу;
- — желательно иметь непрерывность действия защиты, а не только в первый момент времени при перезаряде емкостей сети.

Емкостный ток нулевой последовательности, протекающий через трансформатор тока нулевой последовательности, например линии Wn, может быть определен из соотношения:

$$I_{Cn} = 3j \frac{U_{\Phi}}{x_{Cn}} = 3j\omega C_n U_{\Phi}$$

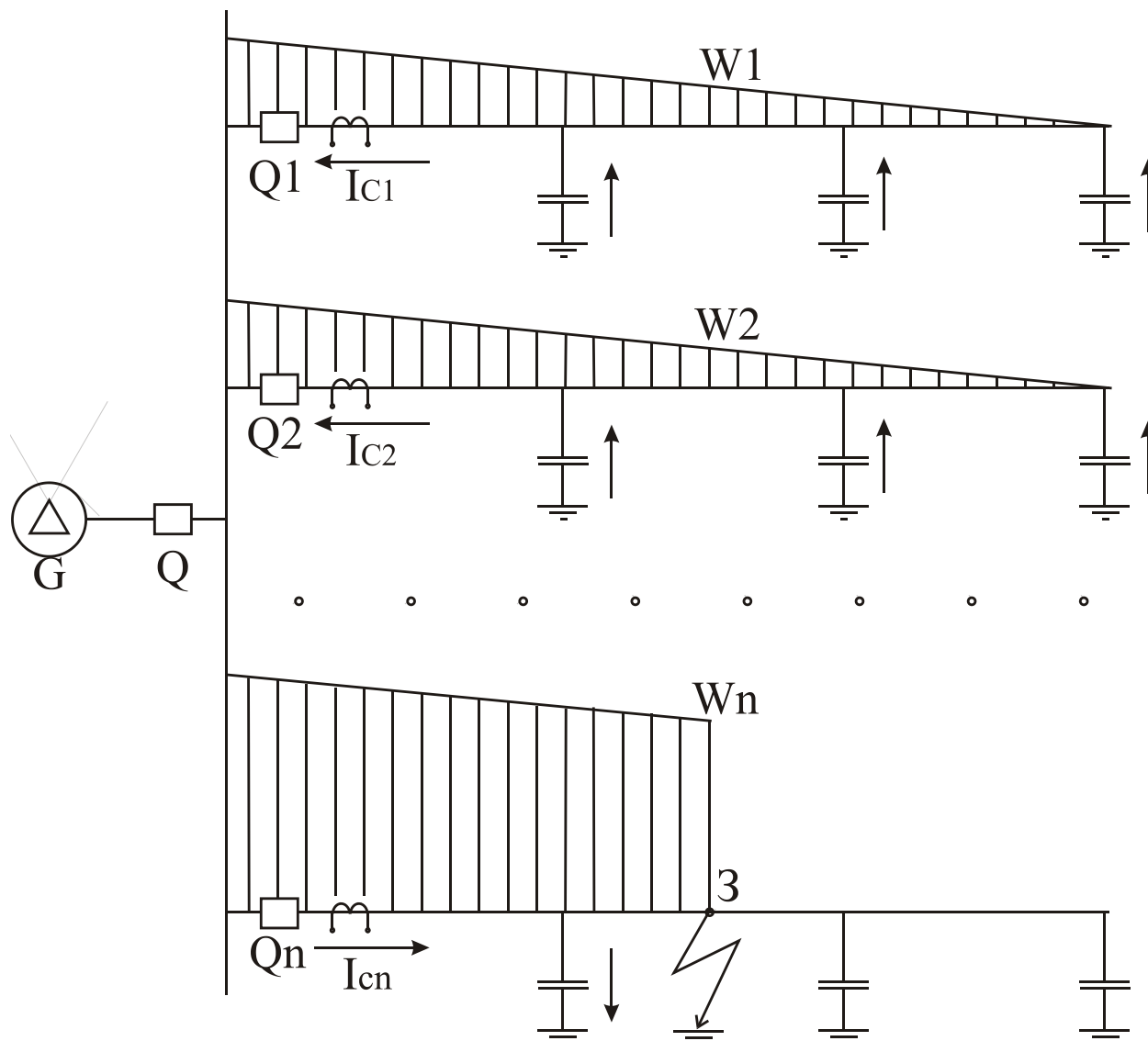
где U_{Φ} — фазное напряжение линии, x_{Cn} — емкостное сопротивление линии Wn, C_n — собственная емкость линии Wn, ω — круговая частота.

Этот ток можно найти из справочных данных:

$$I_{Cn} = I_{C,уд} \cdot l_n$$

где l_n — длина линии W1, $I_{C,уд}$ — удельный емкостный ток линии W1.

Процессы, протекающие в сети с изолированной нейтралью в режиме однофазного замыкания на землю (ОЗЗ).



При однофазном замыкании в точке 3 (рис.) на линии W_n токи неповрежденных линий меняют направление на противоположное, но величины остаются такими же, какие были до ОЗЗ. Ток I_{Cn} поврежденного присоединения W_1 складывается из суммарного тока всех неповрежденных присоединений $I_{C1}, I_{C2}, \dots, I_{C(n-1)}$, а также части $k_{ПОВР}I_{Cn}$ генерируемого емкостного тока поврежденного присоединения от шин до места повреждения:

$$I_{Cn(ПОВР)} = I_{C1} + I_{C2} + \dots + I_{C(n-1)} + k_{ПОВР}I_{Cn}$$

Рассчитать этот ток ОЗЗ, протекающий через переходное сопротивление дуги, можно по следующему выражению:

$$I_3 = 3 \frac{U_{\Phi,CP}}{3r_D - jx_{C0\Sigma}}$$

где r_D — сопротивление дуги, $x_{C0\Sigma}$ — суммарное емкостное сопротивление сети; а ток металлического замыкания соответствует формуле

$$I_3 = 3j \frac{U_{\Phi,CP}}{x_{C0\Sigma}}$$

Особенности процессов, протекающих в сети с изолированной нейтралью

Основной особенностью процессов, протекающих в сети с изолированной нейтралью, являются феррорезонансные явления.

- При равенстве сопротивления суммарной индуктивности трансформаторов напряжения и сопротивления суммарной емкости сети на частоте $f/2$ и $f/3$ может возникнуть резонанс. Обычно толчком для феррорезонанса является отключение или включение присоединения или возникновение однофазного замыкания на землю. Во время резонанса напряжение нулевой последовательности может увеличиваться в несколько раз, повреждая при этом трансформатор напряжения. Кроме того, при феррорезонансе ложно срабатывают защиты от замыканий на землю и устройства сигнализации замыканий на землю.
- Поэтому в настоящее время разработаны и используются антирезонансные трансформаторы напряжения (типа НАМИ), предотвращающие такие негативные явления.

Расчет тока срабатывания защиты от замыканий на землю

Расчет сводится к отстройке от собственного емкостного тока нулевой последовательности:

$$I_{C,3} = k_{OTC} k_{БР} 3\omega C_L U_\Phi$$

где k_{OTC} — коэффициент отстройки; $k_{OTC} = 1,1 \dots 1,3$; $k_{БР}$ — коэффициент броска, учитывающий переходный процесс перезаряда емкостей ВЛЭП; $k_{БР} = 4 \dots 5$ — для защит, не имеющих выдержку времени и не отстроенных от высших гармоник, $k_{БР} = 2 \dots 3$ — для защит, имеющих выдержку времени или отстроенных от высших гармоник.

Коэффициент чувствительности защиты для воздушных ЛЭП рассчитывается по выражению

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_0}{I_{C,3}} \geq 1,5$$

для кабельных ЛЭП должно выполняться соотношение $k_{\text{ч}} \geq 1,25$.

Техническое исполнение защиты от замыканий на землю

