



Авторы:

Майоров А.В.,

АО «Объединенная энергетическая компания»,

Москва, Россия,

к.т.н. Ширковец А.И.,

Валов В.Н.,

ООО «Болд»,

Новосибирск, Россия.

Mayorov A.V.,

JSC «United Energy Company»,

Moscow, Russia,

Ph.D. Shirkovets A.I.,

Valov V.N.,

BOLID LLC,

Novosibirsk, Russia.

РЕЖИМ НЕЙТРАЛИ И ОРГАНИЗАЦИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ 20 кВ NEUTRAL CONDITIONS AND ORGANIZATION OF GROUND FAULT RELAY PROTECTION IN 20 kV NETWORK

Аннотация: в статье рассмотрены особенности реализации резистивного режима нейтрали в сетях 20 кВ, развитие которых актуально в условиях высокой плотности электрической нагрузки и необходимо для увеличения пропускной способности распределительной сети мегаполиса. Представлен принцип расчета защит от замыканий на землю для сети 20 кВ и определен минимальный требуемый ток резистора с учетом параметров датчиков тока нулевой последовательности. Для городской кабельной сети 20 кВ выполнена оценка ограничения активного тока в зависимости от сопротивления цепи замыкания на землю и конструктивного исполнения резисторов.

Ключевые слова: кабельная сеть 20 кВ, замыкание на землю, релейная защита, низкоомный резистор, активный ток, датчик тока нулевой последовательности, ограничение тока

Annotation: Features of resistive neutral conditions for 20 kV networks are reviewed in the paper. Such networks development is of a current interest under conditions of high electrical load density, it is needed to increase capability of megapolis distribution networks. Calculation principle of a ground fault protection for 20 kV networks is presented; a minimum required current of a resistor is determined taking parameters of zero-sequence current sensors into account. Resistive current limitation depending on an impedance of a ground fault circuit and on resistors design is assessed for a 20 kV city cable network.

Keywords: 20 kV cable network, ground fault, relay protection, low-ohmic resistor, active current, zero-sequence current sensor, current limitation.

Введение

Обеспечить надежное электроснабжение в условиях прироста электропотребления даже в пределах 2,5 – 3% в год в условиях мегаполиса возможно только при существенном повышении пропускной способности распределительной сети. Одним из вариантов решения этой задачи является развитие сетей класса 20 кВ. Переход на напряжение 20 кВ позволяет снизить количество новых ячеек на питающих подстанциях (ПС), увеличить экономический радиус обслуживания электроустановок, а также сократить количество вновь вводимых трансформаторных подстанций (ТП) и кабельных линий (КЛ). Развитие сети 20 кВ характерно для крупных городов с высокой и сверхвысокой плотностью электрической нагрузки. Например, в Московском регионе средняя плотность нагрузки к 2020 г. вырастет на 70% и составит 23 МВт/км², а в деловых районах столицы она превысит 100 МВт/км². Стратегические проекты создания сетей 20 кВ, рассчитанные на активное жилищное и инфраструктурное строительство, реализуются не только в Москве, но и в Санкт-Петербурге, Ханты-Мансийске, Екатеринбурге.

При построении сети напряжением 20 кВ в АО «ОЭК» используются двухсекционные распределительные пункты (РП), запитанные от независимых территориально разнесённых ПС. Питание каждой ТП осуществляется по взаимно-

резервируемым КЛ. В качестве типового решения по защите отходящих присоединений используются микропроцессорные терминалы, позволяющие организовать дистанционную защиту линии, токовую отсечку, максимальную токовую защиту, защиту от несимметрии, токовую защиту нулевой последовательности (ТЗНП).

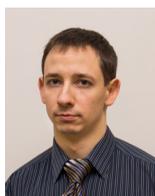
В целях повышения быстродействия срабатывания устройств РЗА, а также надежности опорной распределительной сети 20 кВ для вновь вводимых объектов в качестве пилотного проекта предусматривается установка на всех отходящих КЛ полукомплектов быстродействующей (ДЗЛ), соединённых между собой двумя независимыми каналами связи. При одновременном повреждении обоих каналов устройства защиты продолжают осуществлять функции токовых ступенчатых защит. Указанный подход позволяет обеспечить надежное отключение всех видов коротких замыканий (КЗ) в сети с максимальным быстродействием. К настоящему времени реализовано два проекта по электроснабжению следующих объектов: ПС № 851 «Грач» – ТП 72303 «Щербинка», РП 70048 – БКТП 72203 станция Московского метрополитена «Битцевский парк». По результатам опыта эксплуатации ДЗЛ в сети 20 кВ будет принято решение о его типовом применении.

Для защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сети 20 кВ используется ТЗНП,



**Майоров
Андрей Владимирович**

Дата рождения: 06.09.1967 г.
Окончил в 1994 г. Московский энергетический институт (Технический университет) по специальности «Электроэнергетические системы и сети». Имеет почетные звания «Заслуженный работник Единой энергетической системы России», «Почетный энергетик». Генеральный директор АО «Объединенная энергетическая компания» с 13.05.2014 г.



**Ширковец
Андрей Игоревич**

Дата рождения: 06.09.1983 г.
Окончил в 2006 г. Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), кафедра Техники и электрофизики высоких напряжений. В 2013 г. защитил кандидатскую диссертацию в НГТУ на тему «Исследование и моделирование электромагнитных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях с неэффективным заземлением нейтрали». Начальник отдела международных отношений и инжиниринга ООО «Болид».

уставки которой рассчитываются с учетом низкоомного резистора в нейтрали (рис. 1, t_{c3} – выдержка времени срабатывания защиты). Теоретически для локализации участка сети с ОЗЗ возможна организация дифференциальной токовой защиты (ДЗ) на трансформаторах тока нулевой последовательности (ТТНП), установленных с двух сторон на каждой КЛ. Однако в ряде случаев для этого необходима установка терминала с функцией ДЗ, а также прокладка линии связи, в то время как ТЗНП на активном токе резистора не требует дополнительных мероприятий: функционально защиты по коду ANSI 50/51N есть в любом современном терминале.

К настоящему времени реализован I этап инвестиционного проекта «Построение опорной кабельной сети 20 кВ АО «ОЭК» в городе Москве» до 2015 года. В период с 2012 по 2015 годы завершено строительство и осуществлен ввод в эксплуатацию 929,7 км кабельных линий 20 кВ, 23 новых РП 20 кВ, 68 ТП 20/0,4 кВ. Для строительства КЛ 20 кВ применяются одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Необходимым условием их надежной эксплуатации является быстрое отключение присоединения с однофазным повреждением и последующий ремонт. Селективная ТЗНП, обеспечивающая гарантированное отключение каждого ОЗЗ, реализуется с помощью низкоомного резистивного заземления нейтрали. Типовым и нормативно закрепленным решением в сетях 20 кВ Москов-

ской энергосистемы является использование на питающих ПС резисторов с током 1000 А [1, п. 2.5]. При проектировании и новом строительстве сетей 20 кВ, исходя из схемно-режимных условий, может быть обосновано снижение активного тока. Это потребует гармонизации с существующими нормами, но приведет к снижению термической нагрузки на оборудование и улучшению условий электробезопасности.

Целью настоящего исследования является проверка возможности снижения тока резистора в нейтрали сети 20 кВ, который требуется для устойчивой работы релейной защиты от замыканий на землю, относительно значения 1000 А. Для этого выполняется анализ параметров резисторов и вариантов организации ТЗНП в кабельной сети 20 кВ с расчетом коэффициентов чувствительности, оценивается ограничение тока резистора.

Параметры резисторов для сетей 20 кВ

В опорной сети 20 кВ Московской энергосистемы, как правило, используется схема, предусматривающая включение резистора в нейтраль обмотки низшего напряжения питающих трансформаторов 110 (220)/20 кВ мощностью 80 – 160 МВА с нестандартной схемой соединения обмоток « Y_0/Y_0 ». Исходя из опыта применения резисторов в сетях 20 кВ стран Европы и США, можно отметить возможность включения резисторов в нейтраль специально-

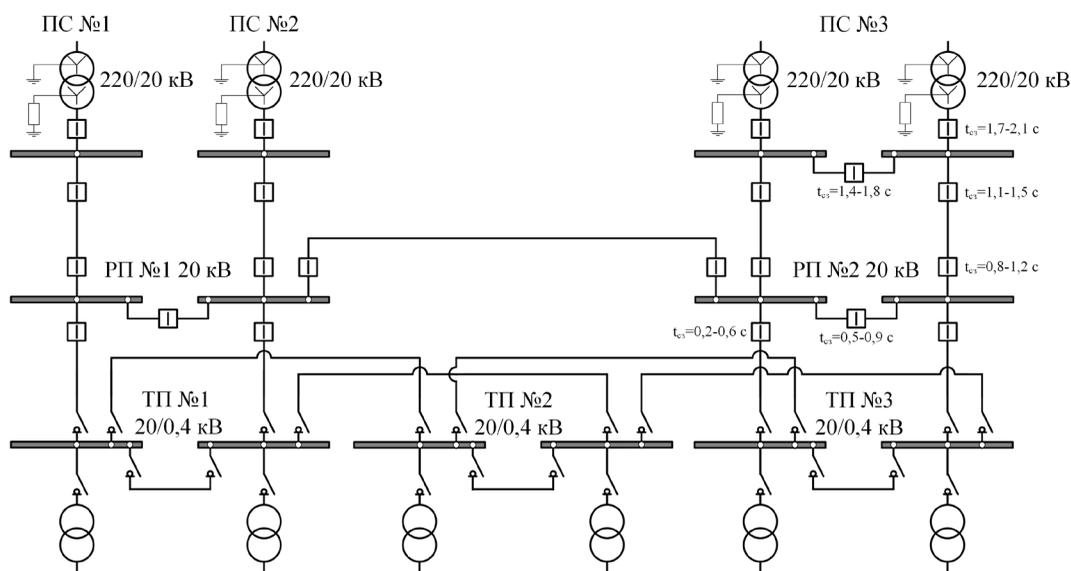


Рис. 1. Характерная конфигурация сети 20 кВ с распределительными пунктами



Валов Владимир Николаевич

Дата рождения: 05.02.1993 г. Окончил в 2015 г. Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), кафедра Электрических станций, профиль «Автоматика энергосистем». Защитил магистерскую диссертацию на тему «Резистивное заземление нейтрали и применение релейной защиты от замыканий на землю в городской распределительной сети».

Инженер РЗА отдела международных отношений и инжиниринга ООО «Болид».

го нейтралеобразующего устройства – трансформатора 20/0,4 кВ со схемой « Y_0/Δ » или фильтра НП со схемой « Z_0 » без вторичной обмотки. При организации низкоомного резистивного заземления нейтрали с помощью нейтралеобразующего устройства на каждой секции 20 кВ питающей ПС должна быть установлена ячейка с силовым выключателем и терминалом релейной защиты, аналогично тому, как это выполняется в сетях 6 – 10 кВ [2].

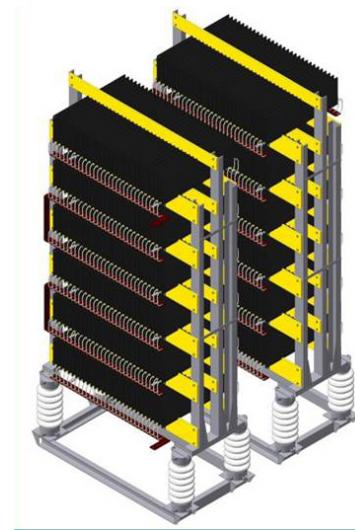
В зависимости от времени работы резистора под напряжением и температурного коэффициента сопротивления (ТКС) материала, из которого он изготовлен, активный ток может существенно измениться течение времени существования ОЗЗ. В настоящее время для изготовления резисторов используют разные марки жаропрочной нержавеющей стали с рабочими температурами до 900 °С и электропроводящие композиционные материалы, нагревающиеся не более чем до 200 °С. Для композиционного материала [3] за счет отрицательного ТКС характерно снижение сопротивления в пределах 10% при его нагревании в течение номинального времени работы 10 с. Металлические резисторы, напротив, обладают положительным ТКС, что приводит к увеличению их сопротивления в режимах однофазного замыкания до двух раз относительно номинального значения [2]. С одной стороны, это несколько снижает термическое воздействие заземляющей дуги в месте повреждения, с другой – приводит к уменьшению

коэффициента чувствительности ненаправленных ТЗНП. При выборе резисторов для эксплуатации в российских условиях следует учитывать, что наибольшая допустимая температура нагрева стальных проводников согласно нормам ПУЭ [4, п. 1.4.16] ограничивается на уровне 300 – 400 °С.

В разных странах мира используются резисторы, обеспечивающие активный ток, варьирующийся в широком диапазоне в зависимости от требуемой чувствительности релейной защиты, вида используемых датчиков тока НП, времени отключения ОЗЗ и условий электробезопасности. Например, в кабельных сетях 20 кВ в США применяются резисторы с активным током 200 – 1200 А (типичным является значение 400 А), в Великобритании – 600 и 1200 А, в Германии – 1500 – 2000 А, в Нидерландах – 400 А, в Испании – 300 и 500 А, в Словении – 150 А. Номинальное время работы резисторов в режиме ОЗЗ определяется техническими требованиями сетевой организации и составляет от 3 до 17 с [5, 6]. В то же время согласно стандарту *IEEE 32* [7] резисторы должны быть рассчитаны на повторно-кратковременный режим приложения рабочего напряжения в течение времени не менее 10 с. Это можно пояснить следующим образом. Отключение ОЗЗ на отходящих присоединениях прилегающей сети 20 кВ резервируется выключателем ввода на РП и, при несрабатывании последнего, ввода на секцию 20 кВ питающей ПС. Время отключения резистора для предотвращения его теплового разрушения составляет несколько секунд,



а)



б)

Рис. 2. Внешний вид (а) и 3D-модель (б) конструкции резистора 12 Ом/20 кВ/1000 А на основе композиционного материала



что справедливо при условии однократного включения резистора на фазное напряжение сети при возникновении ОЗЗ. Вероятность того, что потребуются отключить нескольких однофазных повреждений подряд, строго говоря, не равна нулю, поэтому в технических условиях номинальное время работы низкоомных резисторов принимают, по меньшей мере, с двукратным запасом.

В соответствии с нормами IEEE 142 [8] «допускается протекание токов замыкания на землю в пределах $I_R = 100 - 1000$ А с целью обеспечения желаемого тока для селективного срабатывания релейной защиты от ОЗЗ». Для сети 20 кВ это условие обеспечивается при сопротивлении резистора в пределах от 12 до 120 Ом. Ориентируясь на требования французской национальной компании EDF к резисторам для кабельных сетей 20 кВ [5], было принято решение использовать резистор с номинальными параметрами 12 Ом/20 кВ/1000 А как типовое решение в Московской энергосистеме (рис. 2).

При сохранении требуемой чувствительности защит в ряде случаев возможно снижение номинального тока устанавливаемого резистора до 500 А [9]. Перехода к эффективному заземлению нейтрали, несмотря на такие значения активного тока в цепи замыкания, не происходит. Для подтверждения этого тезиса в программе МАЭС [10] была реализована математическая модель сети 20 кВ. Выполненные с помощью этой модели расчеты показали, что при учете сопротивления заземляющего устройства (ЗУ) питающей ПС с высшим напряжением 110 – 220 кВ и сопротивлении резистора в нейтрали $R_N \geq 1$ Ом коэффициент замыкания на землю во всех случаях равен 1,73. Следовательно, для сети 20 кВ правомерно определение «ток замыкания на землю», а не «ток однофазного КЗ».

Варианты организации релейной защиты от замыканий на землю

Важным условием надежной работы защиты от ОЗЗ, действующей на отключение фидера с однофазным повреждением, является быстрый пере-

вод заземляющей дуги в устойчивую фазу горения, что достигается за счет большого активного тока. Последний должен превышать емкостный ток замыкания на землю в каждой электрически отделенной части сети не менее чем в 2 – 3 раза. Это соотношение может быть и другим, но оно должно обеспечить и требуемую чувствительность релейной защиты. При токах резистора в сотни ампер релейная защита от замыканий на землю выполняется в виде ненаправленной ТЗНП с независимой времятоковой характеристикой. Выбор требуемой величины тока и, соответственно, сопротивления резистора, в значительной мере зависит от вида датчика тока НП, с которого защита получает сигнал $3I_0$.

Датчик тока НП – трехтрансформаторный фильтр

Современная практика проектирования предусматривает установку в ячейках 20 кВ трех трансформаторов тока (ТТ), на базе которых могут быть собраны трехтрансформаторные фильтры тока НП. При использовании в качестве датчиков трехтрансформаторных фильтров тока НП ток резистора должен быть выбран так, чтобы гарантированно отстроиться от токов небаланса, вызванных протеканием токов междуфазных КЗ через фазные ТТ. С учетом необходимости отстройки от токов небаланса нагрузки при соединении «звезды» фильтров тока НП от обмоток с классом точности $10P$ это условие в первом приближении может быть выполнено, если ток резистора соответствует наибольшему нагрузочному току присоединения. Тогда поврежденное присоединение можно будет отключать не мгновенно ($t_{C3} = 0$), а с малой выдержкой времени. Для кабелей на магистральных КЛ сечением до 630 мм² с алюминиевыми жилами или до 500 мм² с медными жилами номинальный ток $I_{НОМ} = 700 - 960$ А и 770 – 1030 А в первом и втором случаях соответственно (при условии, что однофазные кабели конструктивно скрепляются в треугольник). В зависимости от условий и способа прокладки КЛ, фактический ток нагруз-

ки, на который можно ориентироваться при выборе сопротивления резистора по этому критерию, с учетом принятого запаса по передаваемой мощности, может оказаться до 50% меньше. Кроме того, в типовой схеме для магистралей между двумя ПС (ПП) применяются, как правило, кабели меньшего сечения – 500 мм² (алюминий, $I_{НОМ} = 620 - 830$ А) и 300 – 400 мм² (медь, $I_{НОМ} = 610 - 900$ А). Следовательно, для расчета можно принять $I_{НАГР} = 610 - 1030$ А.

Максимальный емкостный ток фидера при известной фазной емкости 0,42 – 0,46 мкФ/км, сечении кабеля 500 – 630 мм² и наибольшей длине КЛ 15 – 17 км (по условию допустимого падения напряжения) равен $I_{СФид} = 68,5 - 85,0$ А. Эти значения являются вполне адекватными, если учесть «добавочные» емкостные токи ОЗЗ от распределительных линий на СП и перемычек между ТП. Однако они являются и предельными в расчете на одну секцию примерно до 200 А в перспективе.

В качестве предельного тока трехфазного КЗ в сети 20 кВ принято значение, соответствующее отключающей способности силовых выключателей в составе ячеек РУ-20 кВ – не более 20 кА. Фактические значения тока КЗ, в том числе с учетом установки токоограничивающих реакторов, на шинах 20 кВ питающих ПС в большинстве случаев не превышают 12 кА. Поэтому для расчета можно принять $I_{КЗ} = 12 - 20$ кА.

При таких токах КЗ в фильтрах тока НП возникают значительные токи небаланса $I_{НБ}$, от которых необходимо отстраивать ток срабатывания защиты от ОЗЗ, если она не имеет выдержки времени. Ток небаланса может быть определен по упрощенной формуле [11]:

$$I_{НБ} = k_{НБ} I_{расч} \quad (1)$$

где коэффициент $k_{НБ} = 0,05$ при кратностях до $(2 - 3)I_{НОМ}$ и 0,1 при больших кратностях; $I_{расч}$ – максимальное значение тока, проходящего в месте установки защиты при внешнем трехфазном КЗ. В предельном случае можно принять $I_{расч} \approx I_{КЗ}$.



Ток срабатывания защиты с коэффициентом надежности $k_H = 1,1 - 1,2$ определяется как

$$I_{C3} = k_H (k_{БР} I_{Cфид} + I_{НБ}), \quad (2)$$

где $I_{Cфид}$ – максимальный емкостный ток фидера и $k_{БР} = 1,5$ – коэффициент броска емкостного тока.

Чувствительность защиты в кабельной сети по нормам ПУЭ [4, п. 3.2.21] обеспечивается при значении коэффициента чувствительности

$$k_{ч} = \frac{I_{O33}}{I_{C3}} \geq 1,25, \quad (3)$$

где $I_{O33} = 1,05 I_R$ – суммарный ток замыкания на землю, определяемый током резистора в нейтрали сети 20 кВ.

При известных значениях I_{K3} и $I_{Cфид}$ получаем $k_{ч} = 0,26 - 0,66$ для резистора с током $I_R = 400 - 1000$ А. Для обеспечения минимально необходимого $k_{ч} = 1,25$ (при условии нулевой выдержки времени) ток резистора должен быть не ниже $I_{Rmin} = 1896$ А ($I_{Rmin} = 6,1$ Ом) при условии ограничения тока трехфазного КЗ до значений $I_{K3} \leq 12$ кА. Очевидно, повышение тока резистора до единиц килоампер приводит к ухудшению условий электробезопасности и требует проверки термической стойкости оборудования.

Для обеспечения требуемой чувствительности защиты от ОЗЗ используют введение выдержки времени $\Delta t_{O33} = 0,2 - 0,4$ с, превышающей выдержку времени защиты от междуфазных КЗ смежных элементов на ступень

селективности (0,2-0,3 с). Тогда отстраиваться следует только от токов нагрузки $I_{НАГР}$ и выражение (1) запишется в виде

$$I'_{НБ} = k'_{НБ} I_{НАГР}, \quad (4)$$

Определив ток небаланса по формуле (4) при заданных выдержках времени, можно по (2) и (3) рассчитать значения тока срабатывания и коэффициента чувствительности защит. При известных значениях тока нагрузки расчетный $k_{ч} = 2,0 - 4,9$ для резистора с током $I_R = 400 - 1000$ А. Минимальный ток резистора, который обеспечит требуемую по ПУЭ чувствительность защиты с выдержкой времени, составит $I_{Rmin} = 253,6$ А ($R_{Nmax} = 45,5$ Ом) при $I_{НАГР} = 1000$ А. В этих условиях для обеспечения

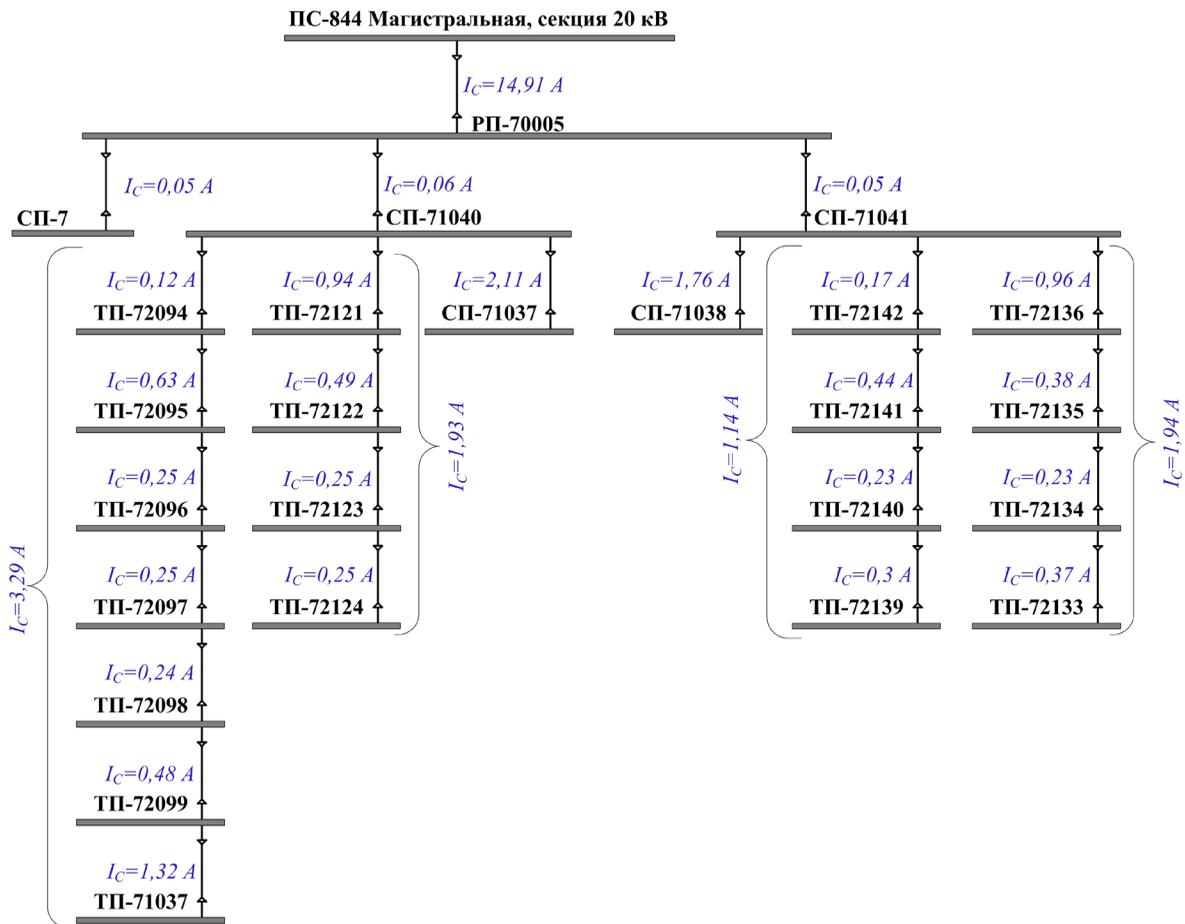


Рис. 3. Структурная схема участка сети 20 кВ для расчета минимального сопротивления резистора



$k_{\text{ч}} \geq 1,25$ при снижении доли емкостного тока в результирующем токе ОЗЗ ($I_{\text{ОЗЗ}} / I_{\text{R}} = 1,005$) следует принять $I_{\text{Rmin}} = 317,9 \text{ А}$ ($R_{\text{Nmax}} = 36,3 \text{ Ом}$). Следовательно, при активном токе более 318 А чувствительность ненаправленной ТЗНП, с выдержкой времени реагирующей на основную гармонику тока $3I_0$, который протекает по нулевому проводу трехтрансформаторного фильтра, будет обеспечена с достаточным запасом. Следует отметить, что значение активного тока I_{Rmin} рассчитано без учета его ограничения сопротивлением цепи замыкания.

Датчик тока НП – кабельный трансформатор тока

В качестве датчиков тока $3I_0$ для релейных защит от ОЗЗ обычно используют ТТНП, которые установлены во всех ячейках отходящих присоединений 20 кВ на ПС 110-220/20 кВ. Поскольку отключение замыкания на землю в сети 20 кВ выполняется силовыми выключателями на РП или ПС (рис. 1), следует оценить значения тока резистора, необходимого для обеспечения чувствительности ненаправленной токовой защиты НП, которая будет реагировать на основную гармонику тока $3I_0$ с ТТНП. В этом случае ток срабатывания защиты отстраивается от наибольшего собственного емкостного тока $I_{\text{Сфид}}$ присоединения и тока небаланса кабельного трансформатора тока по формуле (2), так же как и для трехтрансформаторного фильтра.

Ток небаланса может быть определен по [12] как

$$I_{\text{НБ}} = \frac{I_{\text{НАГР}} \cdot x_{\text{НБ}}}{1000 z_{\text{НАМ}}} \tag{5}$$

где $z_{\text{НАМ}}$ – полное сопротивление ветви намагничивания трансформатора; $x_{\text{НБ}}$ – результирующие, приведенные к одному витку, сопротивления взаимной индукции для токов прямой последовательности. Для трансформаторов типа ТЗЛМ принимаются следующие значения: $x_{\text{НБ}} = 0,33 \div 1,33 \text{ мОм}$ и $z_{\text{НАМ}} = 1,5$

мОм; для трансформаторов типа ТЗРЛ $x_{\text{НБ}} = 0,9 \div 4,5 \text{ мОм}$ и $z_{\text{НАМ}} = 1,2 \text{ мОм}$ [12].

Ток небаланса в нормальном режиме при токе нагрузки 1000 А будет составлять до 0,89 А для трансформаторов типа ТЗЛМ и до 3,75 А для трансформатора типа ТЗРЛ. При сквозных КЗ ток небаланса обычно не превышает $5 \div 6 \text{ А}$. Поэтому для обеспечения чувствительности токовой защиты НП на сигнале $3I_0$ с кабельного ТТНП и отстройки от собственного емкостного тока и тока небаланса принимается значение $I_{\text{Rmin}} \geq 190,7 \text{ А}$ ($R_{\text{Nmax}} = 60,55 \text{ Ом}$), которое указано без учета его ограничения сопротивлением цепи замыкания на землю.

Расчеты, выполненные для эксплуатируемой сети 20 кВ, показали, что значение требуемого тока резистора при выполнении защит от ОЗЗ с использованием в качестве датчиков ТТНП может оказаться существенно меньше 1000 А. В приведенной на рис. 3 схеме для обеспечения нормативной чувствительности защит достаточным является ток $I_{\text{R}} = 51,1 \text{ А}$ ($R_{\text{N}} = 226 \text{ Ом}$).

И трехтрансформаторные фильтры, и кабельные трансформаторы тока могут использоваться в сети 20 кВ совместно. В качестве примера рассмотрим способ организации защиты от ОЗЗ на ПС 844 «Магистральная». В каждой ячейке 20 кВ установлен ТТНП, с которого сигнал $3I_0$ выводится на отдельное цифровое реле защиты от замыканий на землю и осциллографируется в течение 1 с. Это реле по срабатыванию токовой уставки передает сигнал «земля» на линейный терминал защиты, который и выдает команду на отключение выключателя. На фазных трансформаторах тока собран фильтр НП, с которого сигнал $3I_0$ заведен на встроенный осциллограф линейного терминала, но защита от ОЗЗ по нему не работает.

Защиты резистора

Для защиты резистора в цепи нейтрали питающего трансформатора 220 (110)/20 кВ используются обычно

дифференциальная защита и ТЗНП. Первая предназначена для защиты от повреждения в цепи резистора (пробой на землю из-за перегорания элементов, перекрытия опорных изоляторов), вторая – для резервирования неотключения внешнего относительно цепи резистора ОЗЗ.

Уставка по току защиты резистора не должна превышать минимального активного тока, ограниченного в числе прочего сопротивлениями трансформатора и контура заземления. Выдержка времени ТЗНП резистора должна быть меньше половины допустимой длительности протекания тока ОЗЗ через резистор $t_{\text{СЗ}} \leq 0,5 \cdot t_{\text{ДЛИТ}}$. Коэффициент 0,5 учитывает не равную нулю вероятность возникновения повторного однофазного замыкания сразу же после отключения первого. Для схемы рис. 1 время отключения резистора не превышает, как правило, $t_{\text{СЗ}} = 2,1 \text{ с}$, что поясняется следующим образом. Отказ в отключении ОЗЗ на отходящих присоединениях на РП в прилегающей сети 20 кВ (примем выдержку времени $t_{\text{СЗ}} = 0,2 - 0,6 \text{ с}$) из-за несрабатывания релейной защиты или выключателя с шагом селективности до 0,3 с резервируется отключением ввода на РП ($t_{\text{СЗ}} = 0,8 - 1,2 \text{ с}$) и ввода на ПС ($t_{\text{СЗ}} = 1,7 - 2,1 \text{ с}$) (рис. 1). При этом необходимо выполнить запрет на срабатывание АВР на секционном выключателе 20 кВ на РП или ПС во избежание включения на неустраненное ОЗЗ.

Оценка ограничения тока резистора

Чувствительность ТЗНП определяется в основном параметрами резистора в сети 20 кВ. На ток во вторичных цепях защиты, по превышению уставки которого происходит ее срабатывание и который в итоге определяет надежность отключения однофазного повреждения, влияние оказывают следующие факторы: погрешность первичных датчиков тока НП, переходное сопротивление в месте замыкания на землю и суммарное сопротивление цепи протекания тока



ОЗЗ, время отключения однофазного повреждения, активная проводимость изоляции относительно земли, изменение сопротивления резистора при нагревании в рабочих режимах.

Усредненная амплитудная погрешность ТНП при первичных токах более 100 А равна 2,5% [13]. Для трехтрансформаторных фильтров, собранных по схеме «звезда» на вторичных обмотках класса точности $10P$, с учетом не превышения номинального тока фазных ТТ, погрешность можно принять равной регламентируемому в ГОСТ 7746-2001 значению 3% [14]. Следовательно, указанными факторами допустимо пренебречь. Переходное сопротивление при устойчивом однофазном повреждении СПЭ-изоляции и развитием канале пробоя составляет единицы миллиом и ниже. Сопротивление СПЭ-изоляции КЛ среднего напряжения, как правило, достигает сотен гигаом и единиц тераом. Поэтому активный ток, обусловленный проводимостью изоляции кабельной сети 20 кВ на землю, не окажет сколько-нибудь заметного влияния на ток в контуре НП, особенно при отрицательных погрешностях ТТ и ТНП.

При выборе параметров нейтралеобразующего устройства, как правило, исходят из того, что снижение тока резистора в цепи замыкания на землю не должно превышать 15%. Расчеты показали, что при этом условии для подключения резисторов стоком 500 и 1000 А можно использовать сухие трансформаторы 20/0,4 кВ со схемой Y_0/Δ , мощностью 1000 и 1600 кВА соответственно. В первом случае степень ограничения активного тока относительно номинала составит 10,2%, во втором – 12,7%. В зависимости от схемно-режимных требований мощность трансформатора можно подобрать таким образом, чтобы ток резистора был ограничен его сопротивлением не более чем на 5 или 10%.

Следует отметить, что при установке резистора в нейтраль обмотки 20 кВ питающего силового трансформатора с высшим напряжением 110 – 220 кВ ограничение активного тока в

нейтрали будет пренебрежимо мало: активно-индуктивное сопротивление обмоток таких трансформаторов в диапазоне мощностей 80 – 160 МВА составляет всего 0,55 – 0,28 Ом.

При электрическом удалении точки однофазного замыкания от ПС в распределительную сеть 20 кВ ток ОЗЗ может несколько снижаться за счет влияния сопротивления ЗУ и схемы заземления экранов кабелей. Степень этого ограничения зависит от количества и параметров силовых КЛ с такой схемой. Расчеты показали, что двухстороннее заземление экранов одножильных кабелей, при условии растекания всего тока резистора через сопротивление ЗУ на ТП, РП или ПС, соответствует снижению тока $I_R = 500 - 1000$ А примерно на 4 – 9% при удалении точки замыкания на 3,5 км. Принято, что для РП и ТП $R_{ЗУ} \leq 4$ Ом или 10 Ом [4, п. 1.7.57].

Без учета металлических подземных коммуникаций одностороннее разземление экранов в расчете дает ограничение тока резистора на 32 – 48%. Однако при рассмотрении этого вопроса следует учитывать несколько факторов. Во-первых, более 80% тока ОЗЗ растекается по хорошо проводящим оболочкам кабелей [15], связанных обычно с главными контурами заземления на питающих подстанциях класса 110-220 кВ ($R_{ЗУ} \leq 0,5$ Ом). Во-вторых, в проектах строительства сетей 20 кВ решение с односторонним разземлением экранов одножильных кабелей до настоящего времени не использовалось ввиду отсутствия проблемы с величиной индуктированных токов в медных экранах линий.

Натурные измерения в кабельной сети подтвердили факт ограничения активного тока сопротивлением цепи заземления [16]. Условия эксперимента следующие. Экраны всех КЛ-20 кВ в электрически связанной сети заземлены с двух сторон. Сопротивления ЗУ по протоколам соответствуют норме. В опытах использовался поверенный трансформатор тока ТОЛ-10 с коэффи-

циентом 2000/5 и классом точности 0,5S. При выполнении искусственного «металлического» ОЗЗ на шинах РП 20 кВ, связанного с питающей ПС 220/20 кВ линией длиной 1,2 км, было выявлено, что регистрируемый ток замыкания на землю оказался на 1,6% (15 А) меньше, чем тот же ток, измеренный ранее на шинах ПС. Приведенные значения получены после анализа цифровых осциллограмм и хорошо соотносятся с расчетами.

Для обеспечения требуемой чувствительности ТЗНП необходимо, помимо влияния нейтралеобразующего трансформатора (максимальное ограничение принято равным 15%) и контура заземления (максимальное ограничение принято равным 10%), учесть возможность снижения тока резистора по положительному допуску изготовителя на сопротивление (10%) и кратковременной эксплуатации сети с напряжением на 10% ниже номинального (на 13,4% ниже фазного 12 кВ), а также – для металлического резистора – рост сопротивления до двух раз при его нагревании.

С учетом приведенных положений определен коэффициент запаса K_Ω как множитель для оценки тока резистора с «заниженным» относительно расчетного сопротивлением, который обеспечит гарантированное срабатывание ненаправленной защиты в зависимости от материала резистора, способа его подключения к нейтрали и вида датчика тока НП (табл. 1). Из соображения дополнительного повышения коэффициента чувствительности релейных защит в расчетах не учитывается снижение сопротивления композиционного резистора в режиме ОЗЗ.

Из табл. 1 видно, что расчетное значение активного тока, обеспечивающего необходимую чувствительность ненаправленных защит, находится в диапазоне 260 – 950 А. Наименьшие значения тока резистора соответствуют схеме включения резистора в выведенную нейтраль обмотки 20 кВ силового трансформатора 110 – 220 кВ. Для надежной работы релейной защи-



Табл. 1. Значения тока резистора, требуемые для устойчивой работы ТЗНП в сети 20 кВ

Конструкция (вид) датчика тока $3I_0$	Схема «полной звезды» трехтрансформаторного фильтра, расчетный ток $I_{Rmin} = 318$ А		Кабельный трансформатор тока (ТТНП), расчетный ток $I_{Rmin} = 191$ А	
	Композит	Металл	Композит	Металл
Резистор устанавливается в нейтраль питающего силового трансформатора	$K_{\Omega} = 1,334$ $I_R = 424$ А	$K_{\Omega} = 2,668$ $I_R = 848$ А	$K_{\Omega} = 1,334$ $I_R = 255$ А	$K_{\Omega} = 2,668$ $I_R = 510$ А
Резистор устанавливается в нейтраль ТЗН	$K_{\Omega} = 1,484$ $I_R = 472$ А	$K_{\Omega} = 2,968$ $I_R = 944$ А	$K_{\Omega} = 1,484$ $I_R = 283$ А	$K_{\Omega} = 2,968$ $I_R = 566$ А

ты от ОЗЗ, вне зависимости от схемы подключения резисторов и датчиков тока НП, допустимо принять $K_{\Omega} = 1,5$ ($I_R \geq 480$ А) при условии применения композиционных резисторов и $K_{\Omega} = 3$ ($I_R \geq 950$ А) – металлических. Преимуществом первого варианта является снижение термического воздействия на оборудование, а также напряжений прикосновения и шага, пропорциональных току замыкания. Второй вариант отвечает установившейся практике эксплуатации и является типовым с точки зрения расчета уставок токовых защит НП и унификации их настройки. Оба варианта справедливы и имеют смысл прежде всего по отношению к значению тока, а не конструкции резистора. Отмеченные особенности должны учитываться при выборе параметров резистивного заземления нейтрали на независимых, территориально разнесённых ПС 110 – 220 кВ, обеспечивающих в некоторых режимах питание одних и тех же участков сети 20 кВ.

Выводы

1. Темпы и объемы нового строительства при развитии мегаполисов требуют увеличения пропускной способности распределительных сетей. В условиях высокой плотности электрической нагрузки эта задача может быть решена с помощью перехода на класс напряжения 20 кВ. Проекты строительства сетей 20 кВ реализуются в Москве, Санкт-Петербурге, Ханты-Мансийске, Екатеринбурге.

2. Селективная защита от замыканий на землю в кабельной сети 20 кВ Московской энергосистемы организуется в виде ненаправленной ТЗНП с действием на отключение поврежденной линии. Требуемая чувствительность защиты обеспечивается посредством включения в нейтраль низкоомного резистора с активным током до 1000 А. При выборе параметров резистора и расчетах уставок защит следует учитывать суммарное сопротивление цепи протекания тока ОЗЗ, время отключения однофазного повреждения, изменение сопротивления резистора при нагревании в рабочих режимах.

3. Для сетей 20 кВ разработаны конструкции резисторов на основе металлических сплавов и композиционных материалов. Применение композиционных резисторов, которые, в отличие от металлических, отвечают отечественным нормам по допустимой температуре токоведущих частей, дает возможность в сети 20 кВ уменьшить номинальный активный ток в 2 раза относительно регламентированного значения 1000 А. Это улучшает условия электробезопасности и снижает термическое воздействие на оборудование в режимах ОЗЗ при сохранении требуемой чувствительности защиты.

4. При проектировании и строительстве ПС 110 (220)/20 кВ особого внимания требуют схема резервирования потребителей и вопрос унификации параметров резистивного заземления нейтрали. Следует исключить

ситуации, когда один и тот же участок сети 20 кВ с определенным образом настроенными защитами в разных режимах эксплуатации будет питаться от ПС с разными по номиналу резисторами.

Литература:

1. Технические требования к построению опорной сети 20 кВ г. Москвы ОАО «Объединенная энергетическая компания». Утв. первым зам. ген. дир. – тех. дир. ОАО «ОЭК» А.В. Майоровым от 18.10.2011.
2. Ширковец А.И., Хадыев И.Г., Кудряшов Д.С. О переводе сетей 6-10 кВ горных и металлургических предприятий на режим эксплуатации с резистивно-заземленной нейтралью // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – №1. – С. 18 – 25.
3. Пат. 2289172 Рос. Федерация, МПК Н01В 1/18. Состав для композиционного электропроводного материала / Л.И. Сарин, Н.Г. Царегородцев, В.М. Копылов; заявл. 12.05.2004; опубл. 10.12.2006. - Бюл. № 34.
4. Правила устройства электроустановок, 7 изд., Утв. Приказом Минэнерго России от 08.07.2002.- №204.
5. Electricity De France Standard HN-64-S-50. Resistances metalliques monophasees, destinees, a la mise a la terre du neuter des reseaux a moyenne tension. Specification D'Enterprise. – Electricity De France/Centre de Normalisation, Fevrier. – 1988. – 13 p.
6. British Standard NPS/003/009 Technical Specification for 11 kV, 20 kV, 33 kV, 66 kV Neutral Earthing Resistor. URL: <http://www.northernpowergrid.com/asset/0/document/414.pdf> (дата обращения 17.12.2015)
7. IEEE Standard 32-1972 (Reaffirmed 1997) Standard Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices. URL: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/32-1972.html> (дата обращения 14.01.2016)
8. IEEE Standard 142-2007. Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. URL: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/142-2007.html> (дата обращения 21.04.2016)
9. Регламент организации ОАО «ОЭК» по способам подключения, обслуживанию и ремонту устройств заземления нейтрали электрических сетей 20 кВ. Утв. зам. тех. директора по высоковольтным сетям Н.Н. Нечипоренко 15.08.2014. – 99 с.
10. Свидетельство № 2005610081 Российской Федерации. Программа моделирования и анализа электроэнергетических систем (Программа МАЭС): свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / И. Е. Наумкин; зарегистр. 11.01.2005. – 1 с.
11. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 12. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110–500 кВ. Расчеты. – М.: Энергия, 1980. – 87 с.
12. Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. – Киев: Наукова Думка. – 1983. – 267 с.
13. Гондуров С.А., Кознов В.В., Чепелев В.Н. Централизованная защита от ОЗЗ на базе ПТК «Защита-3» // Новости Электротехники. – 2015. – № 6 (96). – С. 22–23.
14. ГОСТ 7746-2001. Трансформаторы тока. Общие технические условия.
15. Oka K., Yoshinaga J., Koizumi S., Uemura S., Ariga Y. Study of Neutral Grounding for 22 kV Distribution System/ In Proc. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES Vol. 3 – pp. 2143 – 2148.
16. Майоров А.В., Челазнов А.А., Ильиных М.В. Экспериментальные исследования переходных процессов при однофазных замыканиях в сети 20 кВ // Вестник ИГЭУ. – Вып. 6. – 2015. – С. 23 – 29.