



Авторы:

д.т.н. Вайнштейн Р.А.,
Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия.
к.т.н. Доронин А.В.,
к.т.н. Пашковский С.Н.,
к.т.н. Воронов П.Л.,
ООО НПП «ЭКРА»,
г. Чебоксары, Россия.
Валов В.Н.,
ООО «Болид»,
г. Новосибирск, Россия.

D.Sc. Vainshtein R.A.,
Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia.
Ph.D. Doronin A.V.,
Ph.D. Pashkovsky S.N.,
Ph.D. Voronov P.L.,
Research and Production Enterprise EKRA, Ltd.,
Cheboksary, Russia.
Valov V.N.,
Bolid LLC,
Novosibirsk, Russia.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ СЕТИ СОБСТВЕННЫХ НУЖД БЛОКА, ПИТАЕМОЙ ЧЕРЕЗ РЕАКТИРОВАННУЮ ОТПАЙКУ, НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

THE EFFECT OF NEUTRAL GROUNDING MODE AUXILIARY NETWORK UNIT POWERED VIA AN REACTED LINE ON THE IMPLEMENTATION OF EARTH FAULT PROTECTION

Аннотация: в работе рассмотрены проблемы выполнения защит от однофазных замыканий на землю в обмотке статора генератора и двигателей в блоках генератор-трансформатор с питанием сети собственных нужд через реактор при различных режимах заземления нейтрали. Предложено решение, обеспечивающее в таких схемах селективную защиту генератора без зоны нечувствительности и сохранение условий для выполнения селективной защиты двигателей собственных нужд. Такое решение принципиально может быть использовано при изолированной, заземленной через низкоомный или высокоомный резистор нейтрали сети собственных нужд. Показано, что наиболее предпочтительным является режим заземления через высокоомный резистор. Результаты работы могут быть использованы при проектировании новых объектов, а также модернизации существующих.

Ключевые слова: блок генератор-трансформатор, защита генератора от замыканий на землю, резистивное заземление нейтрали.

Abstract: the paper considers the problems of performing protection against single-phase earth faults in the stator winding of the generator and motors in generator-transformer units with power supply to the auxiliary network through the reactor under various neutral grounding modes. A proposed solution provides selective protection of the generator in such schemes without a dead zone and preserves the conditions for performing selective protection of auxiliary engines. Such a solution in principle can be used with an isolated auxiliary network earthed through a low-resistance or high-resistance neutral resistor. It is shown that the

Введение

Защита от замыканий на землю в обмотке статора современных генераторов большой мощности должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- защита должна действовать на отключение генератора при замыкании в любой точке обмотки статора, включая нейтраль;
- защита должна обладать свойством селективности при гальванической связи генератора с внешней сетью.

Для наиболее распространенных случаев, когда сеть собственных нужд подключена к линейным выводам генератора через трансформатор, известны принципы выполнения защиты, при использовании которых полностью удовлетворяются предъявляемые к ней требования. Такими принципами выполнения защиты являются: сравнение составляющих третьей гармоники в напряжении нулевой последовательности на выводах и в нейтрали генератора, наложение на цепи статора генератора по-

стоянного тока, наложение на цепи статора переменного тока с частотой, отличающейся от промышленной частоты. Сведения о конкретных устройствах защиты, выполненных на этих принципах, приведены во многих доступных материалах, например, в [1]. Так как в таких схемах блоков цепи статора генератора и сеть собственных нужд гальванически не связаны, способ выполнения защиты от замыканий на землю двигателей собственных нужд может приниматься независимо от способа выполнения защиты генератора.

Начиная с 1986 года в сетях собственных нужд, подключенных к линейным выводам генератора через трансформатор, на ряде электростанций используется заземление нейтрали через резистор, сопротивление которого принимается таким, что активная составляющая тока при металлическом замыкании составляет 30-40А [2, 3, 4]. Емкостная составляющая тока замыкания в сетях собственных нужд, как правило, составляет около 5А. Режим заземления



grounding mode through a high-resistance resistor is most preferable. The results of the work can be used in the design of new facilities, as well as the modernization of existing ones.

Keywords: generator-transformer unit, earth fault generator protection, resistive neutral grounding.



Вайнштейн

Роберт Александрович

Дата рождения: 01.08.1937.

В 1960 году окончил Томский политехнический институт по специальности «Электрические станции сети и системы».

В 2011 году защитил докторскую диссертацию на тему: «Защита от замыканий на землю генераторов и сетей среднего напряжения на основе использования низкочастотных составляющих токов нулевой последовательности» в Томском политехническом университете.

Профессор Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета.

нейтрали, когда активная составляющая тока замыкания значительно больше емкостной составляющей, принято называть низкоомным резистивным заземлением. По мнению специалистов, предложивших применить низкоомное заземления нейтрали, при большой активной составляющей тока дуга в месте замыкания становится устойчивой и поэтому может быть выполнена надежная токовая защита нулевой последовательности, обеспечивающая быстрое отключение электродвигателей или других элементов при однофазных замыканиях на землю. Естественно, что при этом также исключается возможность возникновения дуговых перенапряжений.

В настоящее время кроме блоков с питанием сети собственных нужд через трансформатор эксплуатируется и вновь проектируется немало блоков средней мощности, в которых сеть собственных нужд подключается через токоограничивающий реактор, как это показано на рис. 1.

В такой схеме блока сеть собственных нужд оказывается гальванически связанной с генератором и поэтому режим нейтрали сети собственных нужд и генератора становится одинаковым, а изменение электрических величин на генераторе связано с замыканиями в сети собственных нужд и наоборот. Задача выполнения защиты генератора в этом случае значительно усложняется, так как кроме обеспечения отсутствия зоны нечувствительности необходимо обеспечить свойство селективности, то есть в данном случае обеспечить несрабатывание защиты генератора при замыкании в сети собственных нужд.

Для блоков с питанием сети собственных нужд от реактивной отпайки в НПП «ЭКРА» разработана и выпускается защита от замыканий на землю в обмотке статора генератора типа Se(F25), которая не имеет зоны нечувствительности и обладает свойством селективности. Защита выполнена на принципе наложения на цепи генератора тока с частотой 25 Гц, называемого далее контрольным током [5]. Схема подключения основ-

ных элементов защиты генератора и двигателей к вторичным цепям трансформаторов тока и напряжения показана на рис. 1.

Защита Se(F25) входит в состав шкафа комплексной защиты генератора ШЭ111Х и применяется совместно со шкафом наложения тока с частотой 25 Гц ШНЭ1150. Источником тока с частотой 25 Гц является управляемый электронный генератор, который через фильтр присоединения (входит в состав шкафа ШНЭ1150) подключен к обмоткам группы трансформаторов напряжения ТН2, соединенных в разомкнутый треугольник. К устройству защиты подводятся ток нулевой последовательности, формируемый на типовых трансформаторах тока, установленных на линейных выводах генератора, и напряжение нулевой последовательности от группы трансформаторов напряжения ТН1. Практически токовый вход защиты включается в нулевой провод одной из групп трансформаторов тока.

Насколько нам известно, защита Se(F25) является единственным устройством, при использовании которого удовлетворяются все требования, предъявляемые к защите генератора в блоках с питанием сети собственных нужд через реактор.

Далее рассматриваются вопросы выполнения защиты от замыканий на землю в обмотке статора генератора в совокупности с проблемой выполнения селективной защи-

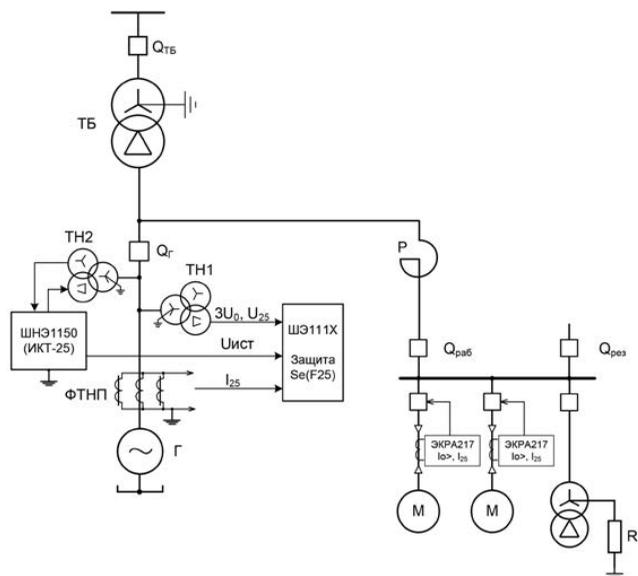


Рис. 1. Схема блока с питанием сети собственных нужд через реактор и размещение защит от замыканий на землю



Доронин

Александр Викторович

Дата рождения: 07.02.1976 г. В 1998 году окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова по специальности «Автоматизация электроэнергетических систем». В 2013 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Совершенствование защиты от замыканий на землю в обмотке статора генератора, работающего в блоке с реактированной отпайкой» в Томском политехническом университете. Заместитель заведующего отделом разработки станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».



Пашковский

Сергей Николаевич

Дата рождения: 07.12.1983 г. В 2006 г. окончил Оренбургский государственный университет. В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию в НГТУ на тему «Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в электрических сетях с комбинированным заземлением нейтрали». Заведующий отделом защиты низкого напряжения ООО НПП «ЭКРА».

ты двигателей собственных нужд при различных режимах заземления нейтрали. Защита Se(F25) полностью работоспособна и при режиме изолированной нейтрали имеется опыт ее применения в таких условиях. Однако, режим изолированной нейтрали в статье не рассматривается ввиду известного недостатка [6]. Можно отметить, что в настоящее время имеется тенденция к переходу от режима изолированной нейтрали к режиму резистивного заземления.

Режим низкоомного резистивного заземления нейтрали

В исходных материалах, где предложено низкоомное заземление нейтрали, блоки с питанием собственных нужд через реактор не рассматривались. Однако, как выше упомянуто, в ряде случаев проектными организациями это решение применено и реализовано для блоков с реактированной отпайкой.

Сопrotивление низкоомного резистора принимается равным 100 Ом для сети 6 кВ и 150 Ом для сети 10 кВ. В ряде случаев проектное решение может предусматривать иное значение сопротивления, как правило, в пределах 50–200 Ом. Активная составляющая тока в месте замыкания при этом составляет около 40 А. Емкостная составляющая тока, которая, как правило, составляет несколько ампер, практически не оказывает влияния на значение суммарного тока замыкания. Если принять ток срабатывания токовой защиты нулевой последовательности в сети собственных нужд равным 5 А, то могут выявляться устойчивые замыкания или замыкания через устойчиво горящую дугу в пределах не менее 80% витков обмотки статора электродвигателя от его линейных выводов.

Одним из важных вопросов, который при этом дополнительно возникает, это вопрос о влиянии повышенного тока в месте замыкания с точки зрения возможного недопустимого повреждения изоляции обмотки и стали статора генератора.

В российской практике током замыкания на землю, не приводящим к опасным повреждениям генератора, принимается ток 5 А и ниже [7]. Считается, что если этот ток превышает 5 А, то возможно повреждение активной стали сердечника. В крупных турбогенераторах, гидрогенераторах

и синхронных компенсаторах, особенно в машинах с непосредственным охлаждением обмотки статора, имеющих более высокие рабочие температуры меди и стали, внутреннее замыкание проводников одной фазы на землю даже с токами, равными 3 А, может сопровождаться развитием повреждений вплоть до «пожара» активной стали или перехода в междуфазные замыкания [8, стр. 50].

Согласно отчету CIGRE [9] заземляющий резистор в сети генератора должен быть выбран так, чтобы ток замыкания фазы на землю находился в диапазоне от 5 до 10 А.

В связи с применением низкоомного заземления нейтрали в сети собственных нужд в блоках с реактированной отпайкой может возникнуть вопрос об использовании увеличенного тока замыкания для выполнения достаточно чувствительной токовой защиты генератора. Возможность выполнения такой защиты от замыканий на землю генератора может быть установлена сопоставлением тока небаланса фильтра тока нулевой последовательности и увеличенного за счет низкоомного заземления нейтрали тока замыкания. Для защиты генератора от однофазных замыканий в качестве фильтра токов нулевой последовательности практически может использоваться фильтр на типовых фазных трансформаторах тока (ФТНП). Вторичный ток небаланса ФТНП может достигать значений 15–20 мА. Специальный трансформатор нулевой последовательности типа ТНПШ, имеющий сравнительно малый ток небаланса, в настоящее время промышленностью не выпускается.

Наиболее типичным случаем применения схемы с питанием сети собственных нужд через реактор является блок с генератором ТВФ-63-2 и с номинальным напряжением 6,3 кВ. Коэффициент трансформации трансформаторов тока, установленных на линейных выводах такого генератора, равен 1600. Ток небаланса, приведенный к первичным цепям, при этом будет составлять 24–32 А, то есть оказывается близким к току однофазного замыкания на линейных выводах генератора. Даже если принять из приведенного диапазона меньшее значение тока небаланса и сравнительно небольшой коэффициент отстройки от тока небаланса, равный 1,2, то зона нечувствительности по



Воронов

Павел Леонидович

Дата рождения: 09.07.1991 г. В 2014 году окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова по специальности «Электроэнергетика и электротехника». В 2019 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка и реализация методик и алгоритмов расчета по частям симметричных и несимметричных режимов систем электроснабжения» в Чувашском государственном университете им. И.Н. Ульянова. Инженер продуктового направления I категории ООО НПП «ЭКРА».



Валов

Владимир Николаевич

Дата рождения: 05.02.1993 г. Окончил Новосибирский государственный технический университет (НГТУ) в 2010 г., кафедра Электрических станций. Инженер РЗА отдела международных отношений и инжиниринга ООО «Болид».

виткам обмотки статора составит 70-80%, то есть защита будет работать только при замыканиях, близких к линейным выводам генератора.

Кроме этого необходимо учитывать, что при увеличенном токе в месте замыкания защиту необходимо выполнять с малой выдержкой времени, что вызовет затруднение или даже невозможность выполнения отстройки от переходных процессов в генераторной сети и измерительных органах самой защиты.

Защита от замыканий на землю в обмотке статора генератора типа Se(F25) при заземлении нейтрали через низкоомный резистор сохраняет свойства отсутствия зоны нечувствительности и селективности, но имеет пониженную чувствительность в случае замыкания через переходное сопротивление, ограниченную малым значением сопротивления заземляющего резистора. Таким образом, еще одним фактором, из-за которого применение режима низкоомного заземления нейтрали нежелательно, является негативное влияние на свойства защиты Se(F25).

Кроме отмеченных факторов, связанных с применением низкоомного заземления нейтрали, есть также основания полагать, что низкоомное заземление нейтрали не во всех случаях гарантирует, что дуга в месте замыкания будет устойчивой и, в частности, при замыкании в кабелях. На это указывается в книге [10] при рассмотрении вопроса о возможности дуговых перенапряжений при однофазных замыканиях в кабельных сетях. В частности, говорится (цитата): «При сравнительно больших токах замыкания на землю, когда повреждения сопровождаются взрывоподобным разложением компаунда (в муфте или кабеле), мгновенно деионизирующим дуговой промежуток». На это обращается внимание также в [11]. О закрытых дугах, горящих в узком канале, в этой книге сказано (цитата): «Для этих дуг характерно принудительное гашение из-за сильного продольного дутья за счет разложения изоляции в канале пробоя...».

Возможность прерывистого горения дуги при замыкании в кабельной изоляции подтверждается осциллограммами процессов при замыкании в сети собственных нужд блока Затонской ТЭЦ, упрощенная схема которого приведена на рис. 2.

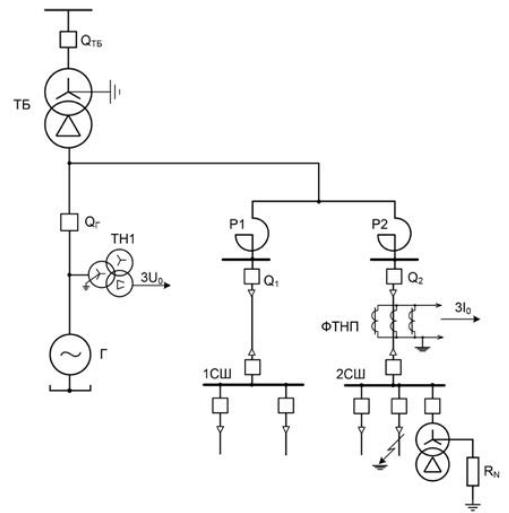


Рис. 2. Упрощенная главная схема блока Затонской ТЭЦ

Номинальная активная мощность генератора в этом блоке – 80 МВт, номинальное напряжение – 10,5 кВ. Две секции собственных нужд питаются от выводов генератора через отдельные реакторы. В сети собственных нужд на каждой секции предусмотрена возможность заземления нейтрали через резистор с сопротивлением 150 Ом. При работе двух секций включается заземляющий резистор только на одной секции, в данном случае он был включен на секции 2СШ. Активная составляющая тока при устойчивом металлическом замыкании составляет 40,4 А. На присоединениях сети собственных нужд установлена токовая защита нулевой последовательности. Генератор оснащен защитой Se(F25). Кроме защиты Se(F25) по желанию специалистов Затонской ТЭЦ были добавлены еще две ступени по напряжению нулевой последовательности с действием на отключение выключателей Q1 и Q2 в цепи питания секций собственных нужд с выдержкой времени 1,6 с и на отключение генераторного выключателя с выдержкой времени в 1,9 с.

Замыкание произошло на одном из присоединений секции 2СШ в кабеле с полиэтиленовой изоляцией. В кабелях с полиэтиленовой изоляцией в канале пробоя, вероятно, имеет место интенсивное выделение газообразных продуктов, а следовательно, и проявляется эффект, отмечаемый в приведенных выдержках из книг.

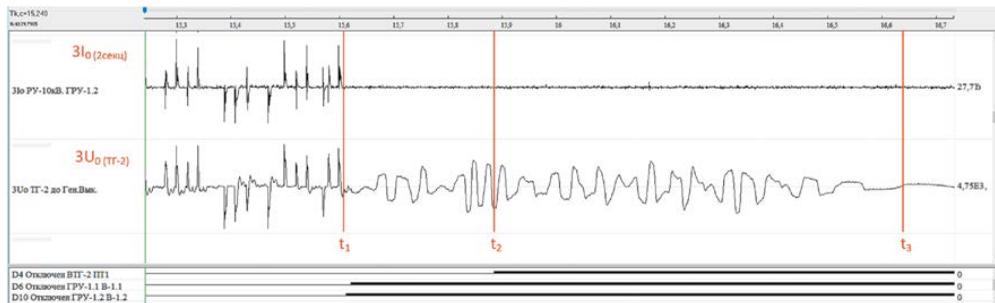


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения нулевой последовательности при замыкании в сети собственных нужд Затонской ТЭЦ

На рис. 3 приведены осциллограммы токов и напряжений нулевой последовательности, измеренных в различных участках схемы блока.

Интервал времени до $t=t_1$ это – стадия, когда в сети собственных нужд имеет место замыкание и реактивная отпайка включена. Прежде всего следует обратить внимание на ток нулевой последовательности в цепи питания секции, на присоединении которой произошло замыкание. Ток имеет характер коротких импульсов с довольно большими бестоковыми паузами. Осциллограмма напряжения нулевой последовательности, измеренного на разомкнутом треугольнике группы трансформаторов напряжения на линейных выводах генератора, имеет вид, характерный для перемежающегося замыкания. При пробое изоляции напряжение нулевой последовательности нарастает с постоянной времени контура дозаряда емкостей поврежденных фаз и быстро затухает после погасания дуги, так как на этом интервале генератор соединен с сетью с низкоомным заземлением нейтрали. Токовая защита нулевой последовательности на поврежденном присоединении не сработала, поскольку была рассчитана на условия устойчивого замыкания. Защита Se(F25) не работала по принципу действия, так как замыкание было внешним по отношению к генератору. Зона действия Se(F25) ограничивается трансформаторами тока на выводах генератора, с которых снимается ток 25 Гц.

В момент времени $t=t_1$ отключаются выключатели Q_1 и Q_2 и участок сети генераторного напряжения переходит в режим изолированной нейтрали при отсутствии замыкания. Напряжение нулевой последовательности при этом не становится равным нулю, а его мгновенные значения изменяются по сложному непериодическому закону. Характер изменения напряжения свидетельствует, что в данном случае имеют место автоколебания в контуре, содержащем нелинейные индуктивные сопротивления ветвей намагничивания трансформаторов напряжения и емкость фаз сети. Такой процесс принято называть феррорезонансным процессом, возможность возникновения которого в сети с изолированной

нейтралью обоснована теоретически и подтверждается на практике [12]. Далее в момент $t=t_2$ второй ступенью защиты по напряжению нулевой последовательности отключается генераторный выключатель $Q_Г$. Феррорезонансный процесс после этого продолжается и его окончательный срыв происходит в момент времени $t=t_3$.

Таким образом, при низкоомном заземлении нейтрали существует опасность значительного повреждения при замыкании в обмотке статора генератора и ухудшаются свойства селективной защиты Se(F25). Для организации защиты присоединений собственных нужд от ОЗЗ необходимо учитывать возможность прерывистых замыканий.

Защиты при высокоомном резистивном заземлении нейтрали

Под высокоомным резистивным заземлением нейтрали понимается такой режим, когда при устойчивом замыкании активный ток примерно равен емкостному току замыкания. При этом ток в месте замыкания увеличивается при равных токах в $\sqrt{2}$ раз по отношению к емкостному току. Суммарный емкостный ток сети собственных нужд вместе с генератором может лежать в пределах 3-5 А. Поэтому очевидно, что опасность значительного повреждения при замыкании в обмотке статора генератора значительно снижается по сравнению со случаем низкоомного заземления.

Защита генератора от замыканий на землю в обмотке статора Se(F25) полностью работоспособна и при высокоомном заземлении. Имеющее место некоторое снижение чувствительности при замыкании через переходное сопротивление значительно меньше по сравнению с условиями низкоомного заземления.

При высокоомном заземлении большинство замыканий, особенно в начальной стадии, могут быть дугowymi перемежающимися. Однако, благодаря тому, что обеспечивается практически полное стекание избыточных зарядов с емкостей фаз сети за время между ближайшими пробоями изоляции, максимальные перенапряжения не превышают $2,5U_{ф.л}$, в то время как при изолированной нейтрали дуговые перенапряжения могут достигать значений до $(3-3,5)U_{ф.л}$.

Защита Se(F25) работоспособна как при устойчивых, так и при перемежающихся дугowych замыканиях [13, 14]. Принцип действия защиты при устойчивом замыкании очевиден и заключается в том, что при замыкании на



землю в обмотке статора суммарный контрольный ток увеличивается и происходит его перераспределение. Доля тока, ответвляющегося в цепь генератора, увеличивается, а доля тока, ответвляющаяся в элементы сети собственных нужд, уменьшается. Пусковым признаком при замыкании в любой точке схемы, является снижение составляющей с частотой 25 Гц в напряжении нулевой последовательности, измеряемого на трансформаторе напряжения ТН2.

При перемежающихся замыканиях цепь, для протекания контрольного тока в цепи генератора замыкается на время горения дуги, которое может быть намного меньше периода контрольного тока. Механизм формирования составляющей с частотой 25 Гц при таких условиях заключается в том, что цепь, через которую разряжается емкость сети при зажигании дуги, имеет такую постоянную времени, что даже при очень малом времени горения дуги емкость сети, заряженная до некоторого напряжения, содержащего составляющую с частотой 25 Гц, практически полностью разряжается, и вся энергия, запасенная к моменту очередного зажигания дуги, передается в контур замыкания. Ток замыкания при этом представляет из себя последовательность импульсов, большой амплитуды, содержащую составляющую с частотой 25 Гц [15].

При высокоомном заземлении нейтрали также может быть выполнена достаточно надежная селективная защита присоединений собственных нужд, правильно функционирующая при устойчивых и перемежающихся замыканиях. Улучшение условий работы токовой защиты нулевой последовательности при устойчивых замыканиях очевидно, так как активная составляющая тока протекает только в поврежденном элементе.

При перемежающихся замыканиях избыточные заряды, накопившиеся на емкостях фаз сети при горении дуги, практически полностью стекают в бестоковую паузу через заземляющий резистор. Причем токи, обусловленные изменением зарядов, на стадии горения дуги и стадии стекания зарядов в поврежденной линии направлены одинаково, а в неповрежденных – противоположно. Потому интеграл тока нулевой последовательности, пропорциональный изменению зарядов, на поврежденной линии значительно больше, чем на неповрежденной. Техническая реализация защиты, реагирующей на интеграл тока, возможна, но относительно сложна, поэтому операция интегрирования приближенно заменяется фильтрацией в области низких частот [16, 17]. В настоящее время защиты на таком принципе реализованы на базе терминала ЭКРА217 производства ООО НПП «ЭКРА».

Выполнение высокоомного резистивного заземления нейтрали

Основные требования к элементам для реализации высокоомного заземления нейтрали определяются не-

обходимым значением активной составляющей тока при устойчивом замыкании и допустимым временем протекания тока. В отношении последнего условия возможны два варианта. Один из них, когда заземляющий резистор рассчитывается лишь на кратковременное протекание тока и в случае отказа защиты на присоединениях собственных нужд автоматически отключается. В этом случае резистор при прочих равных условиях может иметь сравнительно небольшие габариты и стоимость. Однако при отказе защиты и отключении резистора сеть переходит в режим изолированной нейтрали с замыканием на землю, что может привести к возникновению перенапряжений, опасных для генератора и двигателей собственных нужд. Поэтому предпочтительнее, безусловно, другой вариант, когда резистор и другие элементы заземления рассчитываются на длительную работу. Резистор при условии равенства активной и емкостной составляющих тока должен без превышения допустимой температуры рассеивать мощность, равную

$$P_N = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}} \cdot I_C,$$

где $U_{НОМ}$ – номинальное напряжение,
 I_C – суммарный емкостный ток сети собственных нужд и генератора.

Например, в сетях с номинальным напряжением 6 кВ или 10 кВ и емкостным током 5 А мощность P_N соответственно равна 17,34 кВт и 29 кВт.

Здесь уместно заметить, что упомянутые выше факторы положительного влияния высокоомного заземления нейтрали удовлетворительно сохраняются и при некотором уменьшении активной составляющей тока по отношению к емкостной (до $0,6I_C$). Для создания нейтральной точки может быть использован трансформатор со схемой соединения обмоток звезда – треугольник или силовой нейтралеобразующий трехфазный аппарат ФМ30 с соединением обмоток по схеме «зигзаг». Такие аппараты выпускаются промышленностью [18]. В данном случае может использоваться аппарат с наименьшей из выпускаемых по мощности 40 кВА, но не исключается и изготовление по параметрам заказчика.

В качестве заземляющих резисторов эффективным решением является применение резисторов из электропроводящего композиционного материала, разработанных и выпускаемых предприятием ООО «Болид» (г. Новосибирск) [19]. В отличие от резисторов с активными элементами на основе металлических сплавов, композиционные резисторы обладают более высокой теплоемкостью и равномерным распределением поглощаемой мощности отдельными элементами. При этом температура на их поверхности не превышает



Рис. 4. Резисторы на основе композиционного материала в сети СН Камчатской ТЭЦ-2

155 °С в условиях естественного воздушного охлаждения даже в закрытых помещениях. Таким образом, они удовлетворяют требованиям отечественных нормативных документов по допустимой температуре токоведущих частей, соприкасающихся с изоляцией – не более 250 °С

по ГОСТ 8865-93 [20]. Свойства этих резисторов таковы, что обеспечивается стабильный активный ток в режиме замыкания. Надежность таких резистивных установок подтверждена многолетним опытом их применения в сетях генераторного напряжения на главных распределительных устройствах крупных электростанций в Новосибирске, Уфе, Саратове, Кемерове, Тобольске [21]. Внешний вид используемых на практике исполнений композиционного резистора приведен на рис. 4.

Выводы

1. В блоках с питанием сети собственных нужд через токоограничивающий реактор защита генератора, удовлетворяющая требованиям отсутствия зоны нечувствительности и селективности, может быть выполнена на базе шкафов ШЭ111Х с функцией Se(F25) ООО НПП «ЭКРА», основанной на наложении на первичные цепи блока контрольного тока с частотой 25 Гц.

2. В блоках с реактированной отпайкой на сеть собственных нужд, где нейтраль заземлена через низкоомный резистор:

- ухудшаются характеристики защиты статора генератора от замыкания на землю;
- ток в месте замыкания превышает безопасное для генератора значение;
- не во всех случаях гарантируется устойчивое горение заземляющей дуги, что необходимо учитывать при выполнении токовой защиты нулевой последовательности на присоединениях собственных нужд.

3. При прочих равных условиях целесообразно использовать высокоомное заземление нейтрали сети собственных нужд вместо низкоомного, так как при этом:

- снижаются дуговые перенапряжения;
- токи в месте замыкания близки к допустимым значениям, не приводящим к опасным повреждениям генератора;
- значительно снижается влияние на чувствительность защиты Se(F25) при замыканиях через переходное сопротивление.

4. При высокоомном заземлении нейтрали имеют

место благоприятные условия для выполнения селективной защиты двигателей собственных нужд, основанной на приближенном формировании параметра, пропорционального интегралу тока нулевой последовательности и реализованной в терминале ЭКРА217 производства ООО НПП «ЭКРА».

5. Для реализации режима высокоомного заземления нейтрали наиболее эффективным решением является применение резисторов из электропроводящего композиционного материала, разработанных и выпускаемых ООО «Болид», подключаемых с помощью силовых фильтров со схемой «зигзаг».

Литература:

1. Вавин В.Н. Релейная защита блоков турбогенератор-трансформатор. – М.: Энергоиздат, 1982. – 256 с.
2. Зильберман В.А. О селективности и чувствительности релейной защиты питающих вводов собственных нужд блочных электростанций // Электрические станции. – 1987. – №4. – С. 61-66.
3. Зильберман В.А. Релейная защита сети собственных нужд электростанций, – М. Энергоатомиздат, 1992.
4. Циркуляр Ц-01-88. О повышении надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков АЭС. – М., 1988. – 7 с.
5. Цифровые защиты генераторов, трансформаторов и блоков генератор-трансформатор электростанций. Техническое описание. ЭКРА.656116.360 ТО. 2018
6. Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6-10 кВ. // Электричество. – 1998. – №12. – С. 8-22.
7. Правила устройства электроустановок. – М.: НЦ ЭНАС, 2007. – 174 с.
8. Пособие для изучения Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей (электрическое оборудование) / Под общ. ред. Ф.Л. Когана. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 356 с.
9. Guide for minimizing the damage from stator winding grounds on turbogenerators / Oscar Martinez, Convener (ES), Trevor Stokes (GB), Erli Figueiredo (BR), Fred Claassens (ZA). WG A1.09, CIGRE, 2009.
10. Черногубовский З.П. Заземление нейтрали электрических систем высокого напряжения. – Ленинград. – 1934. – 201 с.
11. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2004. – 368 с.
12. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы: монография / К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, О.И. Лаптев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 343 с.
13. Вайнштейн Р.А., Доронин А.В., Наумов А.М., Юдин С.М. Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов в схеме блоков с реактированной отпайкой // Известия вузов. Сер. Электромеханика. – 2011. – №6. – С 96-101.
14. Вайнштейн Р.А., Юдин С.М., Доронин А.В., Наумов А.М. Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов при различных первичных схемах // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №1. – С.26-31.
15. Доронин А.В. Функционирование защиты обмотки статора от замыканий на землю с наложением контрольного тока через трансформатор напряжения при перемежающихся замыканиях // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – №4, Том 321. – С.61-66.
16. Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В., Юдин С.М. Защита от замыканий на землю в сети с высокоомным заземлением нейтрали // Новости электротехники. – 2008. – №6. – С. 36-39.
17. Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В., Юдин С.М., Гурин Т.С. Учет дуговых перемежающихся замыканий при выборе тока срабатывания защиты от замыканий на землю в сети с резистивным заземлением нейтрали // Известия ВУЗов, Электромеханика. – 2006. – №3. – С. 115-118.
18. Быкова А.М., Жуйков А.В., Константинова А.Ю. и др. Применение нейтралезобразующих фильтров ФМ30 для резонансного и резистивного заземления нейтрали // Энергетик. – 2019. – №10. – С. 26 – 29.
19. Пат. 2289172 Рос. Федерация, МПК H01B 1/18. Состав для композиционного электропроводящего материала/ Л.И. Сарин, Н.Г. Царегородцев, В.М. Копылов; заявл. 12.05.04; опубл. 10.12.06. Бюл. № 34.
20. ГОСТ 8865-93 (МЭК 85-84) Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация
21. Ширковец А.И. Повышение эксплуатационной надежности сетей 6-35 кВ на электростанциях посредством включения резисторов в нейтраль/ Север России: стратегия и перспективы развития: материалы II Всерос. науч.-практич. конф. Сургут, 27 мая 2016 г. : в 4 т. – Сургут. гос. ун-т. – Сургут : ИЦ СурГУ, 2016. – Т.II. – С. 225 – 231.