

Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов на электростанциях ОЭС Сибири

Вайнштейн Р. А., канд. техн. наук, Лапин В. И., Наумов А. М., канд. техн. наук,
Доронин А. В., Юдин С. М., канд. техн. наук

- Томский политехнический университет
- Филиал ОАО "СО ЕЭС" ОДУ Сибири
- ООО НПП "ЭКРА"

Обобщён многолетний опыт разработки и эксплуатации защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов на электростанциях ОЭС Сибири. В качестве основного метода выполнения защиты используется наложение на первичные цепи статора постоянного тока или переменного тока с частотой 25 Гц. Наложение постоянного тока используется для турбогенераторов, работающих в блоке с трансформатором и не имеющих гальванической связи с внешней сетью или с другими генераторами. Наложение контрольного тока с частотой 25 Гц применимо в электроустановках с компенсацией ёмкостного тока замыкания на землю. На базе этого способа выполнены защиты генераторов, работающих на сборные шины, гидрогенераторов с нейтралью, заземлённой через дугогасящий реактор, в том числе в укрупнённых блоках с генераторами, работающими параллельно на одну обмотку низкого напряжения трансформатора.

Ключевые слова: обмотка статора, защита от замыканий на землю, наложение контрольного тока.

Задача усовершенствования защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов на электростанциях ОЭС Сибири начала решаться с конца 60-х годов прошлого века, когда появилось нормативное требование отсутствия зоны нечувствительности у защиты при замыкании на землю вблизи нейтрали.

Необходимость выполнения защиты от замыканий на землю без зоны нечувствительности, как известно, объясняется тем, что наличие неконтролируемого замыкания вблизи нейтрали может привести к существенному повреждению генератора. Такие повреждения наблюдались в эксплуатации. В частности, в 1972 г. замыкание фазы на нейтраль возникло на генераторе ТВВ-200-2 Беловской ГРЭС, и лишь после перехода повреждения в междуфазное КЗ генератор отключился дифференциальной защитой при большом объёме повреждений обмоток и стали статора и ротора [1].

В этот же период времени в связи с прекращением выпуска специальных шинных трансформаторов тока нулевой последовательности потребовалась также разработка защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, работающих на сборные шины, с использованием фильтра нулевой последовательности на фазных трансформаторах тока.

В качестве основного метода выполнения защиты для различных схем включения генераторов был принят метод наложения на первичные цепи обмотки статора вспомогательного (контрольного)

тока, в частности постоянного тока или тока с частотой 25 Гц:

Защита от замыканий на землю с наложением постоянного тока. Такой вид защиты применим для генераторов, работающих в блоке с трансформатором и не имеющих гальванической связи с другими генераторами или с внешней сетью, например сетью собственных нужд. Независимо от конкретного технического исполнения, обязательным условием применения защиты с наложением постоянного тока является необходимость отделения по постоянному току всех заземляемых аппаратов, в частности нейтралей первичных обмоток измерительных трансформаторов напряжения. В большинстве случаев применения защиты нейтрали всех трансформаторов напряжения объединяются и заземляются через один разделительный конденсатор, который входит в состав источника постоянного контрольного тока (ИКТП) (рис. 1). Если трансформаторы напряжения удалены друг от друга на значительное расстояние, то некоторые из них могут быть отделены от земли через отдельные конденсаторы. Принципиально защита с наложением постоянного тока может быть применена и на гидрогенераторах, нейтраль которых заземлена через дугогасящий реактор. В этом случае дугогасящий реактор также должен быть заземлён через разделительный конденсатор.

Одно из первых предложений по использованию наложения постоянного тока, насколько нам

известно, было сделано немецким инженером М. Райком [2].

Первые технические разработки защиты от замыканий на землю с наложением постоянного тока для электростанций ОЭС Сибири были выполнены и введены в эксплуатацию на Беловской ГРЭС, Братской ГЭС и других электростанциях П. Т. Анохиным [3]. Этому предшествовало проведение необходимых научных исследований [4]. Большую работу по усовершенствованию защиты на гидрогенераторах Братской ГЭС выполнил работник этой электростанции Е. Н. Устюжанинов [5].

В этих первых разработках не была предусмотрена гальваническая развязка между элементами, связанными с первичными цепями и измерительными элементами защиты. Попадание высокого напряжения во вторичные цепи принципиально возможно при обрыве цепи разделительного конденсатора вместе с защитным разрядником и замыкании фазы на землю.

В связи с этим руководством Кузбассэнерго был поставлен вопрос о разработке защиты с гальваническим разделением первичных и вторичных цепей с соответствующей изоляцией. Такая защита была создана работниками Кузбассэнерго Е. Д. Коберником и М. А. Волгиным [6]. Разделение цепей было достигнуто тем, что изменение наложенного постоянного тока фиксировалось по изменению переменного тока в первичной обмотке разделительного трансформатора. В качестве последнего использовался типовой трансформатор напряжения.

В современных разработках, используемых, в том числе, и в составе комплексной цифровой защиты генераторов НПП "ЭКРА" (шкаф ШЭ-1111), разделение первичных и вторичных цепей осуществляется на трансформаторе питания и с помощью специального разделительного трансформатора тока, включаемого до выпрямителя в устройстве для наложения постоянного тока [7].

Большим достоинством защиты с наложением постоянного тока является возможность осуществлять непрерывный контроль эквивалентного сопротивления цепей статора генератора относительно земли, с подачей сигнала при снижении этого сопротивления до установленного уровня. Для генераторов с непосредственным водяным охлаждением обмотки статора верхний уровень измеряемого сопротивления устанавливается равным 1 МОм в соответствии с максимальным практически наблюдаемым значением, которое определяется в основном удельным сопротивлением дистиллята. Для генераторов с газовым охлаждением верхний уровень измеряемого сопротивления определяется аппаратными ограничениями и составляет 100 МОм.

Наличие непрерывного контроля сопротивления цепей статора относительно земли придало защите с наложением постоянного тока диагности-

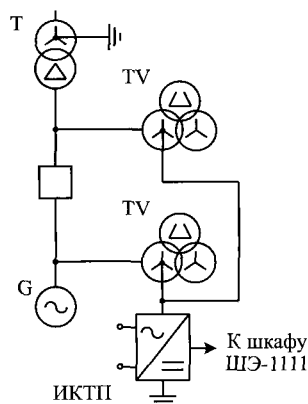


Рис. 1. Схема включения элементов защиты с наложением постоянного тока

ческие свойства, что подтвердилось длительным опытом эксплуатации. Обобщение и анализ случаев выявления некоторых дефектов и повреждений на ранней стадии были выполнены Е. Д. Коберником [1]. Неоднократно по срабатыванию чувствительной ступени защиты были выявлены следующие дефекты:

- трещины в изоляторах токопроводов генератора;
- трещины в изоляции стержня обмотки статора;
- увлажнение комплектных токопроводов из-за нарушения резиновых уплотнений;

- повреждение генераторного выключателя из-за ослабления и перегрева контактов и вытекания продуктов горения масла на поверхность изоляторов;

- попадание в дистиллят остатков щёлочи и кислоты после ремонта теплообменников в системе водяного охлаждения.

Защита с наложением постоянного тока используется на всех турбогенераторах электростанций Кузбассэнерго, работающих в блоке с трансформатором, и на ряде других электростанций.

Защита от замыканий на землю с наложением тока с частотой 25 Гц. Такой вид защиты впервые был применён для гидрогенераторов, у которых нейтраль заземлена через дугогасящий реактор (ДГР). Работа защиты при устойчивых замыканиях обеспечивается за счёт наложенного тока с частотой 25 Гц, а при дуговых перемежающихся замыканиях – за счёт низкочастотных гармоник, появляющихся в напряжении и токе нулевой последовательности из-за того, что частота пробоев изоляции в электроустановках с компенсацией ёмкостного тока при таком виде замыкания значительно ниже промышленной.

Необходимым элементом для реализации защиты является источник контрольного тока с частотой 25 Гц (ИКТ-25), который включается последовательно в цепь дугогасящих реакторов со стороны заземления (рис. 2).

Источник контрольного тока должен удовлетворять ряду специальных требований. В частности, включение источника контрольного тока, с

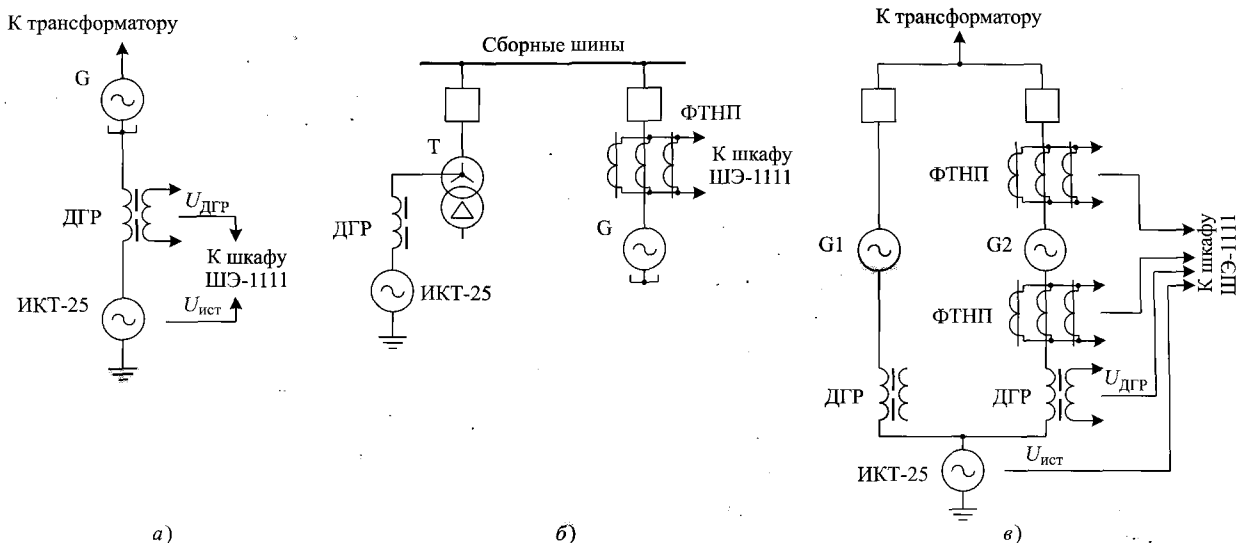


Рис. 2. Схемы включения элементов защиты с наложением контрольного тока с частотой 25 Гц

одной стороны, практически не должно изменять сопротивления в цепи заземления нейтрали, а с другой – протекание по нему при замыкании на землю тока дугогасящих реакторов не должно нарушать его работу. Безусловно, источник контрольного тока должен обладать высокой надёжностью и не требовать постоянного обслуживания.

Создание источника контрольного тока потребовало проведения большого объёма научных исследований [8, 9], в результате которых был разработан источник на базе видоизменённой конструкции электромагнитного параметрического делителя частоты, удовлетворяющий приведённым ранее требованиям [10, 11].

Первая защита от замыканий на землю в обмотке статора генератора с наложением тока с частотой 25 Гц была разработана для гидрогенераторов Красноярской ГЭС в 1970 г. [12]. Схема включения элементов защиты показана на рис. 2, а. К измерительному органу защиты подводятся напряжения с вторичной обмотки дугогасящего реактора и напряжение со специальной измерительной обмотки ИКТ-25. Изменение электрических величин с частотой 25 Гц при устойчивых замыканиях на землю весьма благоприятно, а именно: при изменении переходного сопротивления в месте замыкания от бесконечности до нуля напряжение на дугогасящем реакторе по модулю увеличивается в 3 раза, а его фаза изменяется на 180° .

Защита успешно эксплуатируется на всех генераторах до настоящего времени. За этот период эксплуатации дважды проводилась модернизация реагирующего органа защиты с целью перехода на новую элементную базу [13]. В настоящее время на шести генераторах Красноярской ГЭС защита выполнена в составе комплексной цифровой защиты НПП “ЭКРА”.

Наложение контрольного тока с частотой 25 Гц позволило также решить задачу выполнения защи-

ты от замыканий на землю генераторов, работающих на сборные шины в сети с компенсацией ёмкостного тока, с использованием фильтра токов нулевой последовательности (ФТНП), составленного из типовых фазных трансформаторов тока. Возможность использования такого фильтра обусловлена тем, что отстройка от тока небаланса промышленной частоты может быть осуществлена с помощью частотных фильтров.

Фильтры тока нулевой последовательности на фазных трансформаторах при малом первичном токе с частотой 25 Гц исследованы в работе [14], в которой показано, что ток с частотой 25 Гц передаётся во вторичную цепь с точностью, достаточной для выполнения защиты при изменении рабочего тока промышленной частоты от нуля до номинального.

Принципиальная схема включения элементов защиты генератора, работающего на сборные шины, и источника контрольного тока показана на рис. 2, б. Общий на всю сеть источник контрольного тока включается последовательно в цепь дугогасящего реактора со стороны заземления. При наличии в сети нескольких дугогасящих реакторов они объединяются со стороны заземления и затем заземляются через источник контрольного тока. Защита при устойчивых и дуговых перемежающихся замыканиях реагирует на уровень низкочастотных гармоник в токе нулевой последовательности на выводах генератора [15].

Возможность использования ФТНП, выполненного на типовых фазных трансформаторах тока, позволила также обеспечить защиту от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов в укрупнённых блоках, в которых генераторы работают параллельно на одну обмотку трансформатора. При этом, кроме устранения зоны нечувствительности, решается задача избирательности защиты по отношению к повреждённому генера-

тору. Такая защита разработана совместно со специалистами НПП “ЭКРА” и применена в составе комплексной цифровой защиты на генераторах Усть-Илимской ГЭС [16, 17]. Схема включения элементов защиты показана на рис. 2, в.

При устойчивых замыканиях избирательность защиты обеспечивается сравнением токов с частотой 25 Гц, протекающих через ФТНП, на выводах генераторов и в нейтрали, которые имеют взаимно противоположные направления в повреждённом и неповреждённом генераторах. Защита имеет и пусковой орган, который выполнен так же, как основной орган в защите одиночного гидрогенератора.

Необходимым условием применения защиты генераторов, работающих на сборные шины и в укрупнённых блоках, является обеспечение правильной работы не только при устойчивых, но и при дуговых перемежающихся замыканиях.

Основой для решения этой задачи служит то обстоятельство, что при перемежающихся замыканиях на стадии горения дуги, когда фаза замкнута на землю, на ёмкостях фаз сети накапливаются избыточные заряды. После обрыва дуги в бестоковую паузу избыточные заряды стекают через дугогасящий реактор. При этом в повреждённом элементе сети токи на стадии горения дуги и на стадии стекания избыточных зарядов имеют одинаковые направления, а в неповреждённом – противоположные.

Изменение зарядов может быть измерено формированием интеграла тока нулевой последовательности. К моменту каждого очередного зажигания дуги избыточный заряд стекает практически полностью, поэтому указанный интеграл при внешнем по отношению к генератору замыкании будет близок к нулю, а при замыкании в генераторе – к суммарному изменению заряда ёмкостей всей сети. Практически функцию приближённого интегрирования выполняет имеющийся в составе защиты фильтр низкой частоты.

В схеме укрупнённого блока при дуговом перемежающемся замыкании на стадии горения дуги токи, связанные с изменением зарядов, протекают по выводам повреждённого и неповреждённого генераторов в противоположных по отношению к трансформаторам тока направлениях. В бестоковую паузу токи стекания избыточных зарядов протекают со стороны нейтрали у всех генераторов в одинаковом направлении. Поэтому в области низких частот, выделяемых частотными фильтрами, условие работы защиты при перемежающихся дуговых замыканиях совпадает с условиями работы защиты при устойчивых замыканиях [18].

Защита на специальном трансформаторе тока нулевой последовательности (ТНПУ-3). При реконструкции электростанций, и в частности при установке новых генераторов на ТЭЦ, из-за конструктивных ограничений они часто присоединяются к сборным шинам пучком кабелей.

Для выполнения защиты в таких случаях разработан и изготавливается специальный тороидальный трансформатор тока нулевой последовательности (ТНПУ-3), через окно которого пропускается пучок кабелей. Применение для трансформатора высококачественных магнитопроводов с однородными пространственными магнитными свойствами, равномерным распределением вторичной обмотки и внутренним ферромагнитным экраном обеспечивает весьма низкое значение тока небаланса.

Первичный ток срабатывания защиты от однофазных замыканий устанавливается в пределах 2 – 3 А. Одновременно выполняется также и защита от двойных замыканий на землю, с первичным током срабатывания 80 – 100 А. Диаметр окна магнитопровода в зависимости от мощности генератора, а следовательно, от числа параллельных кабелей составляет от 250 до 400 мм. Защиты на трансформаторах ТНПУ-3 эксплуатируются на четырёх генераторах мощностью от 6 до 32 МВт.

Выводы

1. Опыт эксплуатации защит от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, выполненных на основе метода наложения контрольного тока, показал их достаточную надёжность и эффективность.

2. Практически важным обстоятельством является переход к использованию описанного метода на промышленной основе в составе современных комплексных цифровых устройств релейной защиты.

Список литературы

1. *Коберник Е. Д.* Стопроцентная земляная защита статора генератора на принципе наложения постоянного тока. – Электрические станции, 1995, № 4.
2. *Райк М.* Защита от замыканий на землю блоков генератор-трансформатор. – В сб.: Релейная защита (Энергетика за рубежом). М.: Госэнергоиздат, 1960, вып. 3.
3. *Анохин П. Т., Финкель А. А.* Защита от замыканий на землю и контроль изоляции обмотки статора блочного генератора. – Электрические станции, 1973, № 7.
4. *Анохин П. Т., Вайнштейн Р. А.* К расчёту защиты от замыканий на землю блочного генератора, работающего с заземлением нейтрали через дугогасящую катушку. – Известия ТПИ, 1972, т. 227.
5. *Устюжанинов Е. Н.* Эксплуатация гидрогенераторов с изношенной изоляцией. – Электрические станции, 1976, № 10.
6. А.с. 690584 (СССР). Устройство для защиты от замыкания на землю и контроля изоляции электроустановки переменного тока / Волгин М. А., Коберник Е. Д. Оpubл. в Б. И., 1979, № 37.
7. Пат. 2239269 (РФ). Устройство для защиты от замыканий на землю и контроля сопротивления изоляции электроустановки переменного тока / Вайнштейн Р. А., Шестакова В. В., Юдин С. М. Оpubл. в Б. И., 2004, № 30.

8. Вайнштейн Р. А., Шмойлов А. В., Коломиец Н. В. Расчёт ферромагнитных делителей частоты по средней собственной частоте. – Электричество, 1974, № 9.
9. Вайнштейн Р. А., Коломиец Н. В. О возможности использования первого приближения границы неустойчивости решения уравнения Хилла для практического расчёта параметрических систем. – Известия вузов. Электромеханика, 1975, № 8.
10. Пат. 2268524 (РФ). Устройство для защиты от замыканий в сетях с компенсацией ёмкостного тока / Вайнштейн Р. А., Шестакова В. В., Юдин С. М. Оpubл. в Б. И., 2006, № 2.
11. Вайнштейн Р. А., Шестакова В. В., Юдин С. М. Защиты от замыканий на землю. Источник контрольного тока. – Новости электротехники, 2007, № 6.
12. Стопроцентная защита от замыканий на землю обмотки статора гидрогенераторов Красноярской ГЭС / Вайнштейн Р. А., Гетманов В. Т., Шмойлов А. В., Пушков А. П. – Электрические станции, 1972, № 2.
13. Вайнштейн Р. А., Бобрин В. Д., Волков Г. А. Опыт эксплуатации и модернизации защиты от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов Красноярской ГЭС. – Электрические станции, 1992, № 9.
14. Вайнштейн Р. А., Воронова Л. И., Кутявин И. Д. О возможности выполнения защиты от замыканий на землю генераторов, работающих в компенсированной сети на наложенном токе 25 Гц с использованием фазных трансформаторов тока. – Известия ТПИ, 1969, т. 179.
15. Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ / Вайнштейн Р. А., Головкин С. И., Григорьев В. С. и др. – Электрические станции, 1998, № 7.
16. Пат. 2286636 (РФ). Устройство для защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, работающих в укрупнённом блоке / Вайнштейн Р. А., Наумов А. М., Шестакова В. В., Юдин С. М. Оpubл. в Б. И., 2006, № 30.
17. Пат. 2286637 (РФ). Устройство для селективной защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, работающих в укрупнённом блоке / Вайнштейн Р. А., Наумов А. М., Шестакова В. В., Юдин С. М. Оpubл. в Б. И., 2006, № 30.
18. Защита от замыканий на землю обмоток статоров генераторов, работающих на общие шины / Вайнштейн Р. А., Понамарёв Е. А., Доронин А. В. и др. – Энергетик, 2009, № 1.

Алгоритм оценки технической эффективности дифференциальной токовой защиты

Прутик А. Ф., Шмойлов А. В., канд. техн. наук

• Томский политехнический университет

Произведён анализ функционирования дифференциальной релейной защиты (РЗ). Определены основные источники помех (небалансов), выявляющихся в дифференциальных цепях РЗ. Показано, что компенсационно-настроечные мероприятия могут приводить к снижению чувствительности, быстродействия, селективности РЗ. Предложен алгоритм оценки технического эффекта и технической эффективности как объективных количественных критериев полезности внедряемой РЗ. Приведён пример результатов использования алгоритма.

Ключевые слова: релейная защита, дифференциальный принцип, электрическая сеть, параметр потока событий, технический эффект, техническая эффективность.

Дифференциальный принцип релейной защиты (РЗ) является наиболее естественным с точки зрения требуемых свойств РЗ: селективности, чувствительности и быстродействия. Действительно, при внешних коротких замыканиях (КЗ), идеальных датчиках (как правило, трансформаторах тока), выделяющих пространство защищаемого объекта из сети, и незначительности поперечных параметров последнего небаланс от сквозного тока в дифференциальной цепи практически равен нулю независимо от рабочих режимов и состояний сети. Это предопределяет возможность принятия незначительной (нулевой) уставкой дифференциальной РЗ. При внутренних же КЗ в самых неблагоприятных случаях значение электрического параметра реагирования, как правило тока в дифференциальной цепи, всегда равно конечному зна-

чению, что обуславливает высокую чувствительность.

При таких идеальных условиях практически нулевое значение небаланса в дифференциальной цепи при внешних КЗ имеет место для каждого мгновения контролируемой электрической величины любого вида, который может возникнуть в переходном процессе. Следовательно, контроль незначительного (практически нулевого) небаланса сквозных токов происходит непрерывно во времени, а время действия защиты при внутреннем КЗ определяется временем действия аппаратуры контроля, т.е. быстродействие идеальной дифференциальной защиты весьма высокое.

Неизбежные помехи дифференциального принципа имеют место за счёт поперечных параметров обмоток оборудования и проводов линий.