УДК 621.314.21
Шифр специальности ВАК 2.4.2.

ИНТЕГРАЦИЯ ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ С РЕГИСТРАТОРОМ АВАРИЙНЫХ СОБЫТИЙ

АВТОРЫ:

А.А. Кувшинов, д. т. н.,
https://orcid.org/0000-0002-1557-4467,
В.В. Вахнина, д. т. н.,
https://orcid.org/0000-0001-9113-2348,
vvvahnina@yandex.ru,
А.Н. Черненко, к. т. н.,
https://orcid.org/0000-0002-1557-4467,
О.В. Федяй, аспирант,
https://orcid.org/0009-0006-7158-4367,
Тольяттинский государственный университет

А.Ю. Хренников, д. т. н.,
https://orcid.org/0009-0005-4085-227X,
ak2390@inbox.ru,
АО «Россети Научно-технический центр»

В статье обоснована необходимость считать аномальным и обязательным для регистрации режим работы силового трансформатора в условиях насыщения магнитной системы под воздействием геоиндуцированных токов (ГИТ), поскольку велика опасность развития такого аномального режима во время геомагнитных бурь в аварийный режим. Сформулированы требования, которые необходимо выполнить для интеграции системы мониторинга ГИТ, вызывающих насыщение магнитной системы силового трансформатора, с регистратором аварийных событий. Определены условия начала и окончания регистрации ГИТ и аномального режима работы силового трансформатора. Разработана структурная схема и определены основные технические характеристики интегрированной системы мониторинга ГИТ.

Определены критерии идентификации состояния насыщения магнитной системы силового трансформатора под воздействием ГИТ. Выбран тип фильтра нижних частот, позволяющий воспроизводить без искажений все частотные компоненты ГИТ и соответственно выделять из состава тока нейтрали силового трансформатора все временные вариации ГИТ с точным воспроизведением амплитуды отдельных выбросов. Обоснованы выбор частоты среза и порядок работы фильтра нижних частот, обеспечивающий полное подавление составляющих тока нейтрали основной частоты, а также выбор резонансной частоты, полосы пропускания и порядок полосового фильтра, позволяющего идентифицировать состояние насыщения магнитной системы силового трансформатора по превышению уровня гармоник тока намагничивания над «фоновым» уровнем. Разработан алгоритм формирования сигнала «Пуск» для регистратора аварийных событий.

Ключевые слова:
#силовой трансформатор; #геоиндуцированный ток; #мониторинг; #регистрация; #насыщение магнитной системы; #аномальный режим

Введение

Известны случаи повреждения силовых трансформаторов под воздействием геоиндуцированных токов (ГИТ) во время сильных геомагнитных бурь [1]. В ноябре 2003 г. во время геомагнитной бури в южно-африканской энергосистеме произошли повреждения и отказы 15 силовых трансформаторов в результате внутреннего перегрева, вызванного протеканием ГИТ [1–3]. Наиболее интенсивные ГИТ (до сотен ампер) и геоэлектрические поля в поверхностных слоях Земли напряженностью более 10 В/км возбуждаются при геомагнитных бурях и суббурях в авроральных (приполярных) широтах [4, 5].

В нашей стране измерения токов в нейтралях силовых трансформаторов и автотрансформаторов проводятся с ноября 2003 г. на ряде подстанций Кольской энергосистемы и «Северного транзита» [6, 7]. Несмотря на большое внимание, уделяемое в настоящее время развитию арктических регионов РФ, мониторинг ГИТ нигде больше не осуществляется, а отечественные технические средства для мониторинга ГИТ не выпускаются. По этой причине отсутствует упорядоченная информация о количестве и характере аварийных отключений, связанных с геомагнитными бурями.

Таким образом, актуальной является задача создания системы не только мониторинга, но и регистрации опасных уровней ГИТ в нейтрали силового трансформатора, вызывающих насыщение магнитной системы и создающих угрозу возникновения аварийной ситуации. В данной работе рассматривается возможность решения указанной задачи путем интеграции системы мониторинга ГИТ с регистратором аварийных событий (РАС), который должен устанавливаться на всех трансформаторных подстанциях напряжением 110 кВ и выше.

Основные требования к локальной системе мониторинга ГИТ в нейтрали силового трансформатора

Насыщение магнитной системы силового трансформатора под воздействием ГИТ сопровождается целым рядом негативных последствий, к числу которых относятся многократное увеличение тока и мощности намагничивания, генерация высших гармоник тока намагничивания, дополнительный нагрев обмоток и магнитопровода, рост вибраций, ускорение старения изоляции. Длительное воздействие ГИТ, вызывающее насыщение магнитной системы на протяжении десятков часов, приобретает кумулятивный характер и сокращает срок службы силового трансформатора. Повреждение силового трансформатора вследствие кумулятивного характера воздействия может произойти при любой величине ГИТ, вызывающей насыщение магнитной системы. Поэтому режим работы силового трансформатора в условиях насыщения магнитной системы необходимо идентифицировать как аномальный режим, который с достаточно высокой вероятностью во время геомагнитной бури может развиться в аварийный режим, в частности, из-за недопустимого повышения температуры наиболее нагретой точки силового трансформатора [8]. Такая идентификация необходима для принятия адекватных оперативно-диспетчерских решений, например, по снижению нагрузки силового трансформатора, а электрические параметры аномального (аварийного) режима должны регистрироваться.

В электроэнергетике широко применяются РАС, которые конструктивно выполняются в виде автономных устройств (автономные РАС) или устройств, интегрированных в шкафы релейной защиты и автоматики (встроенные РАС). При любом конструктивном исполнении РАС обеспечивают регистрацию аналоговых и дискретных сигналов при возникновении условий для формирования сигнала «Пуск». Для интеграции локальной системы мониторинга ГИТ с РАС необходимо выполнить ряд требований:

- установить в нейтрали силового трансформатора измерительный преобразователь тока с элементом Холла, позволяющий регистрировать постоянную составляющую и гармоники нулевой последовательности;
- выделить постоянную составляющую тока нейтрали и формировать аналоговый сигнал, пропорциональный величине ГИТ;
- выделить гармоники нулевой последовательности в составе тока нейтрали, четные гармоники обратной или прямой последовательности в составе фазных токов обмоток высокого напряжения (ВН) силового трансформатора и формировать аналоговые сигналы, пропорциональные уровню обнаруженных гармоник;
- начинать регистрацию параметров аномального режима работы силового трансформатора при одновременном достижении аналоговых сигналов, пропорциональных величине ГИТ и уровню обнаруженных гармоник, заданным уставкам;
- заканчивать регистрацию параметров аномального режима работы силового трансформатора при снижении аналоговых сигналов, пропорциональных уровню обнаруженных гармоник, до «фоновых» значений, определяемых степенью несинусоидальности напряжения на выводах обмоток ВН.

При выполнении указанных требований РАС будет регистрировать только опасные для силового трансформатора ГИТ, которые вызывают насыщение магнитной системы, а также электрические параметры возникающего в этом случае аномального (аварийного) режима работы.

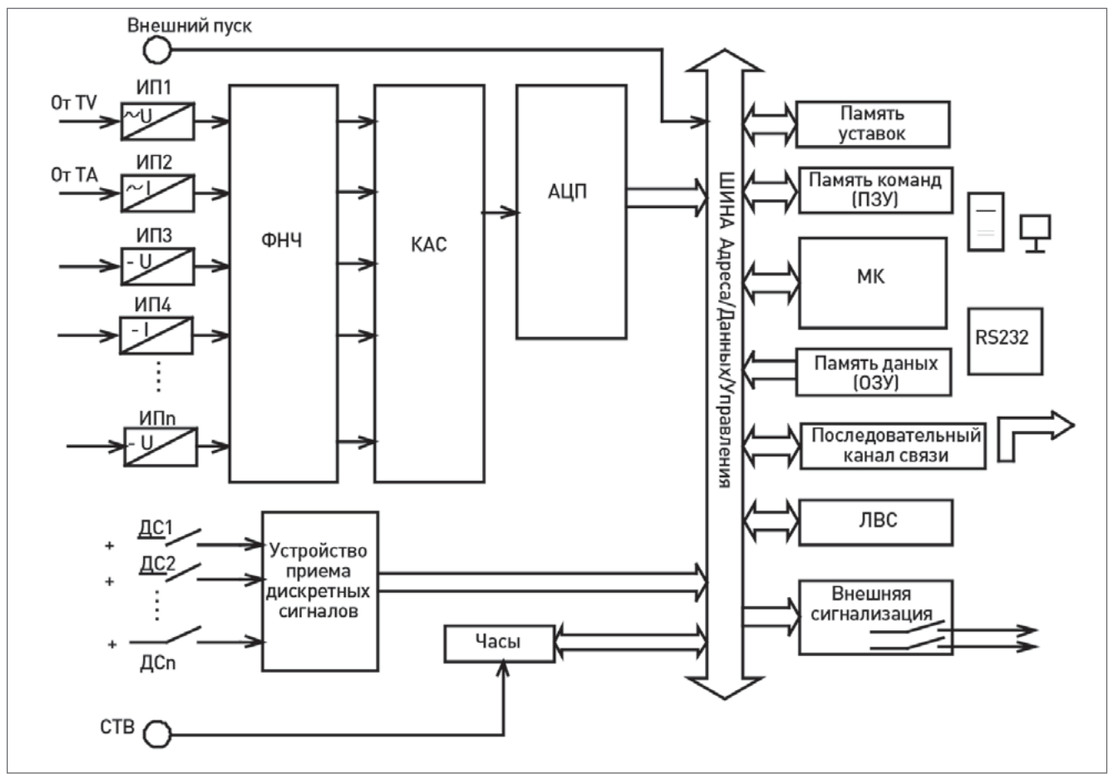
Обобщенная схема регистратора аварийных событий

В соответствии с требованиями нормативных документов автономные РАС должны устанавливаться на объектах электроэнергетики классом напряжения 110 кВ и выше [9, 10]. Автономный РАС должен функционировать в непрерывном круглосуточном режиме, осуществлять регистрацию данных, синхронизированных с помощью сигналов единого точного времени ГЛОНАСС/GPS, а также запись и хранение в энергонезависимой памяти зарегистрированных данных суммарной длительностью не менее четырех часов. При отсутствии аварии осуществляется непрерывная запись текущих значений контролируемых сигналов с параллельным стиранием старой информации. При возникновении аварии стирание прекращается и информация о предаварийном режиме сохраняется. Номенклатура отечественных автономных РАС довольно широкая. Однако, несмотря на различную аппаратно-программную реализацию, автономные РАС разных производителей содержат в своем составе одинаковые структурные элементы, поскольку должны соответствовать требованиям нормативных документов [9, 10]. Обобщенная структурная схема автономного РАС показана на рис. 1.

Основными структурными элементами автономных РАС являются блок измерительных преобразователей (ИП), обеспечивающих гальваническую развязку, нормализацию и масштабирование входных аналоговых сигналов, фильтр нижних частот (ФНЧ), обеспечивающий подавление импульсных и высокочастотных помех, многоканальный коммутатор аналоговых сигналов (КАС), обеспечивающий временное разделение входных аналоговых сигналов, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), обеспечивающий поочередное преобразование входных аналоговых сигналов в цифровые коды, устройство приема дискретных сигналов, обеспечивающее гальваническую развязку и преобразование контактных сигналов в цифровые сигналы логических «0» и «1».

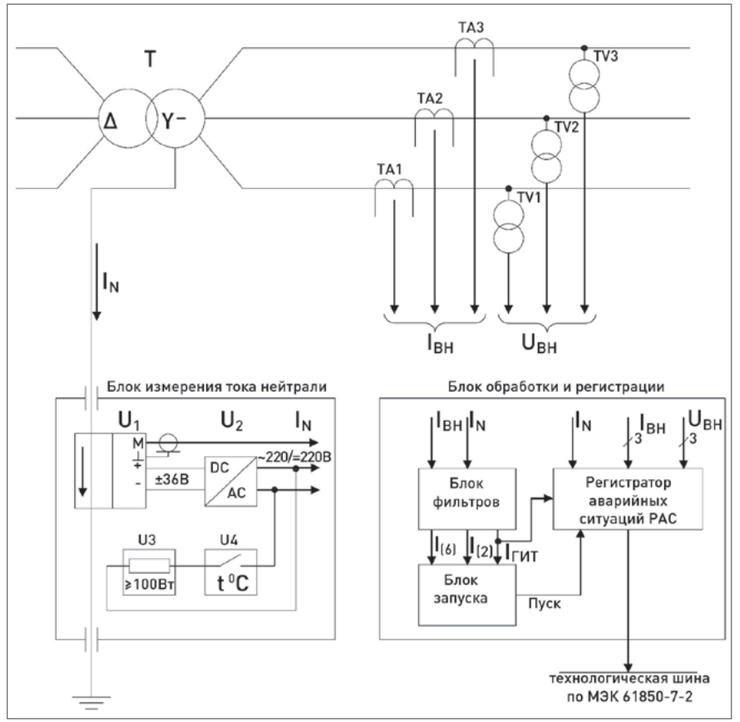
СТРУКТУРНАЯ СХЕМА РЕГИСТРАТОРА АВАРИЙНЫХ СОБЫТИЙ

Рис. 1



СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГИТ

Рис. 2



Система точного времени и цифровая подсистема в составе микроконтроллера (МК), памяти данных и уставок (ОЗУ), памяти команд (ПЗУ), интерфейсов связи и внешней сигнализации обеспечивают цифровую обработку, хранение и регистрацию всех аналоговых и дискретных сигналов, синхронизированных с помощью сигналов единого точного времени.

Согласно требованиям нормативных документов к числу аналоговых сигналов, которые должны регистрироваться, относятся фазные напряжения (U_A, U_B, U_C) и утроенное напряжение нулевой последовательности ($3U_0$); фазные токи (I_A, I_B, I_C) и утроенный ток нулевой последовательности ($3I_0$); частота переменного тока; ток ротора; напряжение между полюсами, полюсами и «землей» ротора; ток и напряжение возбудителя; напряжение между полюсами, полюсами и «землей» собственных нужд постоянного тока [9, 10]. Для преобразования постоянных токов и напряжений могут применяться измерительные преобразователи на базе эффекта Холла или на базе изолирующих усилителей. Источниками аналоговых сигналов переменного тока и напряжения служат штатные измерительные трансформаторы тока и напряжения 110 кВ и выше, источниками аналоговых сигналов постоянного тока и напряжения служат измерительные шунты 75 мВ.

К числу дискретных сигналов, которые должны регистрироваться, относятся сигналы блок-контактов «включенное/отключенное» положение высоковольтных выключателей и других коммутационных аппаратов, сигналы срабатывания пусковых и измерительных органов устройств релейной защиты и автоматики.

Структурная схема локальной системы мониторинга ГИТ в нейтрали силового трансформатора

На рис. 2 представлена структурная схема интегрированной с РАС локальной системы мониторинга ГИТ в нейтрали силового трансформатора Т, в состав которой входят:

- блок измерения тока нейтрали I_N, эксплуатируемый в условиях открытого распределительного устройства подстанции (электростанции) и содержащий измерительный преобразователь тока U1 с элементом Холла и разъемным корпусом для установки на токовую шину без ее демонтажа, источник питания U2 измерительного преобразователя тока U1, нагреватель U3 и термостат U4 системы микроклимата;
- блок обработки и регистрации, размещаемый на общеподстанционном пункте управления и содержащий блок фильтров для обнаружения ГИТ и появляющихся при насыщении магнитной системы силового трансформатора Т четных гармоник тока намагничивания — 6-й $I_{(6)}$ в составе тока нейтрали I_N и 2-й $I_{(2)}$ в составе фазного тока, блок формирования сигнала запуска регистрации параметров аварийного процесса, регистратор аварийных событий.

Блок измерения тока нейтрали устанавливается на шину, соединяющую вывод нейтрали силового трансформатора Т с заземляющим устройством подстанции (электростанции), и подключается к источнику оперативного напряжения (~220/=220 В) подстанции (электростанции).

Блок обработки и регистрации подключается к измерительному выходу (M, ⊥) измерительного преобразователя тока U1 блока измерения тока нейтрали и к штатным электромагнитным трансформаторам тока TA1… TA3 и напряжения TV1… TV3 подстанции (электростанции), установленных на стороне ВН силового трансформатора Т.

Локальная система мониторинга ГИТ должна соответствовать следующим техническим характеристикам:

- величина измеряемого ГИТ от 10 до 1000 А в зависимости от интенсивности геомагнитной бури, номинальной мощности силового трансформатора, протяженности и географической ориентации примыкающих воздушных линий электропередачи;
- ток однофазного короткого замыкания на стороне высокого напряжения силового трансформатора от 2 до 28 кА в зависимости от номинальной мощности силового трансформатора и удаленности места возникновения короткого замыкания;
- частота измеряемого ГИТ от 0 до 0,1 Гц;
- режим мониторинга ГИТ — непрерывный;
- режим регистрации ГИТ — по сигналу «Пуск» при насыщении магнитной системы силового трансформатора под воздействием ГИТ;
- регистрируемые сигналы — аналоговый сигнал тока нейтрали I_N, получаемый от измерительного преобразователя с элементом Холла, аналоговые сигналы ГИТ и гармоник тока намагничивания $I_{(2)}$, $I_{(6)}$, выделяемые блоком фильтров, аналоговые сигналы токов $I_{ВН}$ и напряжения $U_{ВН}$ обмоток ВН силового трансформатора Т, получаемые от штатных трансформаторов тока TA1… TA3 и напряжения TV1… TV3 подстанции (электростанции);
- возможность сохранения информации и передачи по протоколу МЭК 61850 для объединения локальных систем мониторинга ГИТ отдельных силовых трансформаторов в глобальную систему мониторинга ГИТ в критических узлах электрической сети;
- дополнительная визуальная индикация «светофорного» вида для быстрого принятия диспетчерского решения по снижению нагрузки для защиты от повреждения силового трансформатора Т: «зеленый» — ГИТ отсутствует, «желтый» — ГИТ недостаточно большой для насыщения магнитной системы, «красный» — ГИТ вызывает насыщение магнитной системы.

Предпочтительные узлы электрической сети для мониторинга ГИТ — блочные трансформаторы электростанций, сетевые трансформаторы тупиковых подстанций, узловых и проходных подстанций с различной пространственной ориентацией примыкающих линий электропередачи. Предпочтительные силовые трансформаторы для мониторинга ГИТ — номинальной мощностью свыше 80–100 МВА, с номинальным напряжением обмоток высокого напряжения 220 кВ и выше, с магнитной системой броневого и бронестержневого типа.

Необходимо добавить, что для создания интегрированной системы мониторинга ГИТ может использоваться автономный РАС, установленный на трансформаторной подстанции (электростанции), если для этого есть техническая возможность. В этом случае потребуется только дополнить имеющийся автономный РАС блоком измерения тока нейтрали, блоком фильтров и блоком запуска (см. рис. 2).

Состав и основные параметры блока фильтров

В составе блока фильтров должны использоваться ФНЧ для формирования аналогового сигнала, пропорционального величине ГИТ, и полосовые фильтры для формирования аналоговых сигналов, пропорциональных величине гармоник тока намагничивания силового трансформатора и многократно возрастающих при насыщении магнитной системы. В качестве индикатора насыщения магнитной системы силового трансформатора могут быть выбраны несколько критериев:

- появление четных гармоник обратной (2-й гармоники) и прямой (4-й гармоники) последовательностей тока намагничивания как наиболее значимых в составе фазных токов обмоток ВН, которые практически полностью отсутствуют в обычных условиях;
- увеличение уровня 6-й гармоники тока намагничивания в составе тока нейтрали по сравнению с «фоновым» уровнем, обусловленным нарушением синусоидальности фазных напряжений обмоток ВН;
- увеличение общего уровня гармоник нулевой последовательности в составе тока нейтрали по сравнению с «фоновым» уровнем, обусловленным нарушением синусоидальности фазных напряжений обмоток ВН.

Каждый из указанных критериев может использоваться как по отдельности, так и в сочетании с друг с другом в зависимости от конкретных условий. Например, для использования первого критерия необходимо установить дополнительные измерительные трансформаторы тока на стороне ВН силового трансформатора, если нет свободных вторичных обмоток у штатных трансформаторов тока, имеющихся на подстанции. При использовании второго критерия необходимо учитывать то обстоятельство, что уровень 6-й гармоники сложным образом зависит от величины ГИТ и соответственно от глубины насыщения магнитной системы, причем увеличение ГИТ в определенном диапазоне значений может даже сопровождаться уменьшением уровня 6-й гармоники в составе тока нейтрали. Поэтому в качестве надежного индикатора насыщения магнитной системы силового трансформатора нужно использовать сочетание первого и второго критериев (как показано на рис. 2) или третий критерий. В последнем случае вся информация о состоянии магнитной системы может быть получена от измерительного преобразователя силы тока, установленного в нейтрали силового трансформатора.

В качестве ФНЧ целесообразно использовать фильтр Баттерворта, который характеризуется равномерным горизонтальным участком амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания, что позволяет практически с одинаковой точностью воспроизводить все частотные компоненты ГИТ, и резким спадом АЧХ за частотой среза в полосе заграждения. Для повышения точности передачи через ФНЧ различных частотных компонент ГИТ необходимо, чтобы частота среза не менее чем на порядок превышала частоту наиболее высокочастотной компоненты. В этом случае частотный спектр ГИТ будет расположен в начальной, наиболее равномерной области АЧХ фильтра. Учитывая частотный диапазон ГИТ (0,0001–0,1 Гц), частоту среза ФНЧ необходимо выбирать не менее 1,0 Гц. Максимально возможное значение частоты среза ФНЧ зависит от порядка фильтра и соответственно от наклона АЧХ в полосе заграждения. Например, для ФНЧ пятого порядка наклон АЧХ в полосе заграждения будет составлять 100 дБ на декаду, а максимальная частота среза может быть выбрана равной 5 Гц. В этом случае коэффициент передачи ФНЧ в полосе заграждения для сигналов с частотой 50 Гц, обусловленных токами нулевой последовательности основной частоты в составе тока нейтрали, уменьшается в 10^5 раз, т. е. сигналы с частотой 50 Гц и выше будут подавляться практически полностью.

Не менее важными параметрами ФНЧ являются время нарастания, которое определяет интервал возрастания выходного сигнала от 10 до 90 % установившегося значения, и время задержки выходного сигнала, которое соответствует интервалу возрастания выходного сигнала до 50 % установившегося значения. Указанные параметры определяют точность воспроизведения амплитуды случайных выбросов ГИТ. Например, для ФНЧ пятого порядка с частотой среза 5 Гц время нарастания выходного сигнала при ступенчатом входном сигнале составит 0,0774 с, время задержки — 0,09 с. С учетом того, что время нарастания выбросов ГИТ до амплитудного значения составляет от единиц до десятков минут, ФНЧ с указанными выше параметрами не окажет влияние на точность воспроизведения амплитуды выбросов ГИТ и временной профиль ГИТ будет воспроизводиться практически без погрешности.

Если в качестве индикатора насыщения магнитной системы силового трансформатора под воздействием ГИТ выбрано появление четных гармоник тока намагничивания — 6-й гармоники $I_{(6)}$ в составе тока нейтрали I_N и 2-й гармоники $I_{(2)}$ в составе тока $I_{ВН}$ обмотки ВН, то в составе блока фильтров необходимо использовать два полосовых фильтра. Для обнаружения 2-й гармоники в составе фазного тока обмотки ВН в блоке фильтров необходимо использовать полосовой фильтр с резонансной частотой 100 Гц, полосой пропускания не менее 1,6 Гц, перекрывающей возможные изменения частоты 2-й гармоники тока намагничивания вследствие предельно допустимых отклонений частоты напряжения в электрической сети до ±0,4 Гц [11]. Порядок полосового фильтра должен выбираться не менее седьмого для обеспечения спада боковых ветвей АЧХ не менее 140 дБ на декаду для эффективного подавления соседних гармоник — основной и 3-й. Аналогичным образом выбираются параметры полосового фильтра 6-й гармоники: резонансная частота 300 Гц, полоса пропускания не менее 4,8 Гц, наклон боковых ветвей АЧХ не менее 140 дБ на декаду.

Алгоритм формирования сигнала «Пуск» автономного РАС для регистрации ГИТ

Автономный РАС должен предусматривать следующие возможности пуска [9, 10]:

- по заданным условиям;
- ручной пуск при отсутствии заданных условий.

В качестве заданных условий рекомендуется использовать изменение значений напряжений (токов) прямой, обратной или нулевой последовательности относительно (выше/ниже) заданных уставок, а также изменение состояния дискретных сигналов в результате срабатывания релейной защиты или изменения положения высоковольтных выключателей [9, 10]. Для регистрации опасных для силового трансформатора ГИТ, вызывающих насыщение магнитной системы, необходимо сформировать дополнительное условие пуска автономного РАС, которое не предусмотрено нормативными документами [9, 10]. Дополнительное условие пуска автономного РАС для регистрации ГИТ и параметров аномального (аварийного) режима функционирования силового трансформатора должно формироваться по факту появления ГИТ, достаточного по величине для насыщения магнитной системы, и гармоник тока намагничивания нулевой последовательности, а также четных гармоник прямой и обратной последовательности, появляющихся в составе тока нейтрали и фазных обмоток ВН.

«Фоновое» значение тока гармоник нулевой последовательности (кратных трем, т. е. при n = 3k) при отсутствии геомагнитных возмущений обусловлено нарушением синусоидальности фазных напряжений, его можно оценить с помощью выражения

$$I_{(n)} = \frac{k_{U(n)\%}}{u_{k\%}} \cdot \frac{S_{ном}}{n \cdot U_{ном}}, \quad (1)$$

где $k_{U(n)\%}$ — значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения электрической сети в узле подключения обмоток ВН силового трансформатора в процентах напряжения основной гармонической составляющей;

$S_{ном}$ — номинальная мощность силового трансформатора;

$U_{ном}$ — номинальное напряжение обмоток ВН силового трансформатора;

$u_{k\%}$ — паспортное значение напряжения короткого замыкания, выраженное в процентах.

Коэффициенты наиболее значимых гармонических составляющих напряжения нулевой последовательности, усредненные в интервале 10 мин, не должны превышать в электрических сетях 110–220 кВ значений $k_{U(3)\%}$ = 1,5%, $k_{U(6)\%}$= 0,2%, $k_{U(9)\%}$= 0,4% [11]. С помощью выражения (1) можно определить значение тока гармоник нулевой последовательности в нейтрали силового трансформатора $I_{N(n)} = 3 \cdot I_{(n)}$. Например, в нейтрали силового трансформатора номинальной мощностью 200 МВА, номинальным напряжением 220 кВ при указанных выше значениях коэффициентов гармонических составляющих напряжения электрической сети будут протекать токи гармоник нулевой последовательности $I_{N(3)} = 3 \cdot 37{,}58 = 112{,}74$ А; $I_{N(6)} = 3 \cdot 2{,}5 = 7{,}5$ А; $I_{N(9)} = 3 \cdot 6{,}7 = 20{,}1$ А.

При насыщении магнитной системы силового трансформатора под воздействием ГИТ величина указанных выше гармоник тока намагничивания нулевой последовательности, протекающих в нейтрали, многократно возрастет [12]. В составе фазных токов обмоток ВН появятся четные гармоники — 2, 4, 8-я и т. д., которых не было при отсутствии насыщения магнитной системы силового трансформатора.

При использовании в качестве индикатора насыщения магнитной системы силового трансформатора увеличения 2-й гармоники в составе тока фазной обмотки ВН и/или 6-й гармоники в составе тока нейтрали до уровня выбранных уставок (см. рис. 2) условие пуска автономного РАС и начала регистрации ГИТ может быть сформировано в виде логического сигнала «Пуск»:

$$\text{«Пуск»} = 1(I_{гит} - \sqrt{2} \cdot k_{мс} \cdot I_x) \Lambda [1(I_{(2)} - I_{уст(2)}) \text{ V } 1(I_{(6)} - I_{уст(6)})] =$$

$$= \begin{cases} 1 - \text{ГИТ вызывает насыщение магнитной системы} \\ 0 - \text{ГИТ отсутствует или недостаточен для насыщения,} \end{cases} \quad (2)$$

где I_x — паспортное значение тока холостого хода силового трансформатора;

$k_{мс}$ — коэффициент, учитывающий конструктивное исполнение магнитной системы силового трансформатора;

$I_{уст(2)}$ — уставка по току 2-й гармоники в составе тока обмотки ВН силового трансформатора;

$I_{уст(6)}$ — уставка по току 6-й гармоники в составе тока нейтрали силового трансформатора;

Λ, V — бинарные операторы конъюнкции («И») и дизъюнкции («ИЛИ») соответственно;

1 — единичная функция.

В зависимости от конструктивного исполнения магнитной системы и конкретного типа силового трансформатора значения коэффициента $k_{мс}$ обычно лежат в диапазоне:

$k_{мс}$ = (0,8–1,2) для силовых трансформаторов с броневой конструкцией магнитной системы;

$k_{мс}$ = (2,0–3,0) для силовых трансформаторов с бронестержневой конструкцией магнитной системы;

$k_{мс}$ = (5,0–10,0) для силовых трансформаторов со стержневой конструкцией магнитной системы [8, 12].

При необходимости логический сигнал может быть преобразован в дискретный контактный сигнал, который можно подавать на свободный дискретный вход РАС. Как следует из (2), при отсутствии геомагнитных возмущений или при появлении ГИТ, недостаточных для насыщения магнитной системы, формируется логический сигнал «Пуск» = «0». При появлении ГИТ, достаточных для насыщения магнитной системы силового трансформатора и увеличения уровня гармоник тока намагничивания до значений, превышающих заданные уставки, выполняются условия сравнения

$$1(I_{гит} - \sqrt{2} \cdot k_{мс} \cdot I_x) = \begin{cases} 1 \text{ при } I_{гит} \geq k_{мс} \cdot I_x \\ 0 \text{ при } I_{гит} < k_{мс} \cdot I_x, \end{cases} \quad (3)$$

$$1(I_{(2)} - I_{уст(2)}) = \begin{cases} 1 \text{ при } I_{(2)} \geq I_{уст(2)} \\ 0 \text{ при } I_{(2)} < I_{уст(2)}, \end{cases} \quad (4)$$

$$1(I_{(2)} - I_{уст(2)}) = \begin{cases} 1 \text{ при } I_{(6)} \geq I_{уст(6)} \\ 0 \text{ при } I_{(6)} < I_{уст(6)}. \end{cases} \quad (5)$$

Для формирования логического сигнала «Пуск» = «1», по которому начнется регистрация ГИТ и параметров аномального (возможно, аварийного) режима работы силового трансформатора, достаточно одновременного выполнения условий сравнения (3) и (4) или одновременного выполнения условий сравнения (3) и (5). Значения уставок $I_{уст(2)}$ и $I_{уст(6)}$ по токам 2-й и 6-й гармоник должны выбираться, исходя из «фоновых» уровней одноименных гармоник, обусловленных нарушением синусоидальности фазных напряжений электрической сети в узле включения силового трансформатора [13–17].

Выводы

1. Интеграция локальной системы мониторинга с автономным РАС позволяют регистрировать не только опасные ГИТ, вызывающие насыщение магнитной системы, но и параметры аномального электрического режима силового трансформатора. Для использования в локальной системе мониторинга пригодны автономные РАС, в которых предусмотрена возможность регистрации не только переменных, но и постоянных аналоговых сигналов. Автономными РАС должны оснащаться все трансформаторные подстанции 110 кВ и выше, поэтому при наличии свободных аналоговых и дискретных входов используемого на подстанции (электростанции) автономного РАС для реализации системы мониторинга ГИТ достаточно будет только блоков измерения тока нейтрали, фильтров и запуска (см. рис. 2). В этом случае функциональные возможности автономного РАС существенно расширятся за счет возможности регистрации ГИТ и параметров возникающего под воздействием ГИТ аномального (аварийного) режима работы силового трансформатора. Каналы связи автономных РАС с различными протоколами передачи данных открывают возможность для объединения локальных систем мониторинга ГИТ в нейтрали отдельных силовых трансформаторов в глобальную систему мониторинга ГИТ в наиболее уязвимых узлах электрической сети.
2. В качестве индикатора насыщения магнитной системы силового трансформатора под воздействием ГИТ целесообразно использовать четные гармоники тока намагничивания, из которых наиболее значимой в составе фазного тока обмотки ВН является 2-я гармоника, а в составе тока нейтрали — 6-я гармоника. Для обнаружения указанных гармоник необходимо использовать полосовые фильтры, резонансная частота которых соответствует номинальной частоте гармоники, а полоса пропускания выбирается таким образом, чтобы при отклонениях частоты электрической сети от номинального значения не выходить за пределы плоской части АЧХ. Порядок полосовых фильтров должен выбираться таким образом, чтобы наклон боковых ветвей АЧХ обеспечивал эффективное подавление соседних гармоник.
3. Алгоритм формирования сигнала «Пуск» начала регистрации ГИТ основан на выполнении логических операций сравнения и совпадения. Операции сравнения осуществляют непрерывное сравнение текущих значений ГИТ с амплитудой паспортного тока холостого тока силового трансформатора, а величин 2-й и 6-й гармоник тока намагничивания — со значениями заданных уставок, которые выбираются с учетом «фоновых» значений одноименных гармоник, определяемых несинусоидальностью и несимметрией фазных напряжений электрической сети. Результатом выполнения логической операции совпадения является формирование сигнала «Пуск» при совпадении результатов сравнения — превышение величины ГИТ заданного уровня паспортного тока холостого хода и превышение хотя бы одной гармоникой, 2-й или 6-й, или двумя одновременно значений заданных уставок. Такой алгоритм формирования сигнала «Пуск» обеспечит регистрацию только опасных для силового трансформатора ГИТ, вызывающих насыщение магнитной системы.
4. Локальная система мониторинга ГИТ с использованием автономного РАС позволит предотвратить повреждение силового трансформатора от воздействия ГИТ и уменьшить количество аварийных отключений в электрической сети при геомагнитных бурях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gaunt C.T., Coetzee G. Transformer failure in regions incorrectly considered to have low GIC-risks. IEEE Power Tech. 2007, Conference Paper 445, Lausanne, July. P. 807–812.
2. Kappenman J.G. Geomagnetic storms and their impact on power systems. IEEE Power Engineering Review. 1996. Vol. 16, iss. 5. P. 5–8.
3. Kappenman J.G. An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29–31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms. Space Weather. 2005. Vol. 3, iss. 8. S08C01.
4. Boteler D.H. Assessment of geomagnetic hazard to power systems in Canada. Natural Hazard. 2001. Vol. 23, No 2–3. P. 101–120.
5. Pulkkinen A., Lindal S., Viljanen A., Pirjola R. Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish highvoltage power transmission system. Space Weather. 2005. Vol. 3, iss. 8. S08C03.
6. Сахаров Я.А., Селиванов В.Н., Билин В.А., Николаев В.Г. Экстремальные величины геоиндуктированных токов в региональной энергосистеме. «Physics of Auroral Phenomena», Proc. XLII Annual Seminar, Apatity. 2019. С. 5–56.
7. Селиванов В.Н., Данилин А.Н., Колобов В.В., Сахаров Я.А., Баранник М.Б. Результаты длительных регистраций токов в нейтралях силовых трансформаторов. Труды КНЦ РАН: Энергетика. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2010. Вып. 1. С. 84–90.

8. Transformer Thermal Impact Assessments for DC Withstand Capability: Examining the Impacts of Geomagnetically Induced Current (GIC) on Transformer Thermal Performance. EPRI, Palo Alto, CA: 2019. 3002017708.
9. СТО 59012820.29.020.006–2015 Релейная защита и автоматика. Автономные регистраторы аварийных событий. Нормы и требования. Москва, 2015.
10. ГОСТ Р 58601–2019. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Релейная защита и автоматика. Автономные регистраторы аварийных событий. Нормы и требования.
11. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
12. Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Черненко А.Н., Рыбалко Т.А. Аналитическая модель эмиссии гармоник тока намагничивания силовым трансформатором при воздействии квазипостоянных токов // Электротехника. 2017. № 5. С. 25–31.
13. Хренников А.Ю., Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Черненко А.Н., Кретов Д.А. Применение тиристоров для защиты силовых трансформаторов во время геомагнитных возмущений // Энергия единой сети. 2018. № 6 (42). С. 66–70.
14. Хренников А.Ю., Вахнина В.В., Кувшинов А.А. Моделирование блока генератор-трансформатор при возникновении радиальных вибраций ротора от ГИТ // Энергия единой сети. 2019. № 2. С. 58–62.
15. Хренников А.Ю., Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Селемир В.Д., Карелин В.И. Влияние квазипостоянных токов на электродинамическую стойкость силовых трансформаторов: элементы теории и методы испытаний. Часть 1. Броски тока намагничивания при геомагнитных возмущениях. Часть 2. Методы электродинамических испытаний // Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик», Москва, НТФ «Энергопрогресс». 2019. Вып. 4–5 (244–245). С. 72, 80.
16. Хренников А.Ю., Кувшинов А.А., Вахнина В.В. Power Transformer Protection against Geomagnetic Induced Currents: Thyristor Neutral Earthing // Session 2024 Papers & Proceedings. Ref A2–10784–2024. Paper ID: 10784 A2 POWER TRANSFORMERS AND REACTORS — Full Papers Topics: A2 PS1 — Design of Resilient Transformers https://www.e-cigre.org/publications/detail/session2024-papers-session-2024-papers.html
17. Khrennikov A.Yu., Kuvshinov A.A., Shkuropat I.A. Providing Reliable Operation of Electric Networks. Учебное пособие на английском языке // Nova science publishers. New York, 2019, USA, p. 308. ISBN: 978-1-53615-422-1.

Для цитирования: Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Черненко А.Н., Федяй О.В., Хренников А.Ю. Интеграция локальной системы мониторинга геоиндуцированных токов с регистратором аварийных событий // Энергия единой сети. 2025. № 1. С 44–52.

РЭН 2025

РОСКОНГРЕСС
Пространство доверия

При поддержке:
ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПРАВИТЕЛЬСТВО МОСКВЫ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
«РОССИЙСКАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ НЕДЕЛЯ»

ВЫСТАВКА ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ТЭК

15-17 октября 2025 г.
Москва, Россия

rusenergyweek.com

Реклама 6+

ВАКУУМНЫЕ И ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА: УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ШУЛЬГА Р.Н.

ВОЛОГДА: ИНФРА-ИНЖЕНЕРИЯ. 2024. 220 С.

Рассмотрены переходные процессы генераторных, конденсаторных, гибридных выключателей переменного тока в коммутационных и аварийных режимах. Приведены результаты моделирования, управляемой и синхронной коммутации. Описана методика коммутационных испытаний и испытательные стенды указанных выключателей. Выполнены исследования приводов с использованием полупроводниковых приборов. Сравниваются схемотехника и испытательные стенды выключателей постоянного тока.

Для студентов и специалистов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по курсу «Специальные вопросы электрической части электроустановок».

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА. РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН: УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ШУЛЬГА Р.Н., ЛАБУТИН А.А.

ВОЛОГДА: ИНФРА-ИНЖЕНЕРИЯ. 2024. 136 С.

Исследованы динамика, особенности и методы испытаний быстроходных электрических машин. Разработан геометрический метод расчета и моделирования указанных машин. Предлагаются новые материалы и технологии изготовления электрических машин. Рассмотрены вопросы выбора изоляции, диагностики и испытаний. Предлагаются решения по выбору систем управления электрических машин.

Для студентов по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также для слушателей профессиональной переподготовки.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН: УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ШУЛЬГА Р.Н., ЛАБУТИН А.А.

ВОЛОГДА: ИНФРА-ИНЖЕНЕРИЯ. 2024. 156 С.

Исследованы динамика, особенности и методы испытаний быстроходных электрических машин. Разработан геометрический метод расчета и моделирования указанных машин. Предлагаются новые материалы и технологии изготовления электрических машин. Рассмотрены вопросы выбора изоляции, диагностики и испытаний. Предлагаются решения по выбору систем управления электрических машин.

Для студентов по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также для слушателей профессиональной переподготовки.