

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В.В. Вахнина*, А.А. Кувшинов, А.Н. Черненко, Р.Н. Пудовинников, О.В. Федяй

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

*E-mail: VVVahнина@yandex.ru

Аннотация. Предложено регистрацию геоиндуцированных токов осуществлять в критических узлах электрической сети, выбор которых обусловлен топологией сети и конструкцией магнитной системы силовых трансформаторов. Выполнен анализ существующих систем мониторинга с различными типами измерительных преобразователей с элементом Холла, устанавливаемых в нейтраль силового трансформатора. Приведена количественная оценка геоиндуцированных токов в нейтральных силовых трансформаторов в зависимости от интенсивности геомагнитных возмущений и параметров электрической сети. Обоснован выбор предела преобразования измерительного преобразователя с элементом Холла, который должен осуществляться не только с учетом ожидаемой величины геоиндуцированных токов, но и фоновых токов, обусловленных несимметрией и несинусоидальностью фазных напряжений в узле включения силового трансформатора. Для мониторинга геоиндуцированных токов в нейтрали силового трансформатора предложено использовать измерительный преобразователь прямого усиления с элементом Холла, допустимая перегрузка которого достаточна для безопасного протекания токов однофазного короткого замыкания.

Введение

Мониторинг геоиндуцированных токов (ГИТ) при геомагнитных бурях (ГМБ) в различных узлах электрической сети может использоваться не только для оценки степени угрозы конкретному силовому трансформатору, но и для формирования текущей оценки дополнительной реактивной нагрузки, появляющейся только в периоды ГМБ из-за насыщения силовых трансформаторов и создающей опасный дефицит реактивной мощности. В этой связи, актуальной является задача определения основных требований к системе мониторинга ГИТ в критических узлах электрической сети, силовые трансформаторы в которых наиболее уязвимы к воздействию ГИТ с точки зрения насыщения магнитной системы. Однако основной сложностью в осуществлении процессов мониторинга и регистрации ГИТ является то, что во временной области ГИТ представляют собой реализацию непрерывного случайного процесса в виде непрерывной последовательности однополярных выбросов со случайными вариациями амплитуды и длительности. Дополнительная сложность вызвана протеканием в нейтрали силового трансформатора при отсутствии геомагнитных возмущений «фоновый» ток со сложным гармоническим составом, обусловленных несимметрией и несинусоидальностью фазных напряжений электрической сети в узле включения силового трансформатора.

Комплексный подход к определению геоиндуцированных токов в электрической сети

Режим работы силового трансформатора в условиях насыщения магнитной системы под воздействием ГИТ необходимо идентифицировать как аномальный режим, который с учетом кумулятивного характера воздействия может развиваться в аварийный режим, сопровождающийся повреждением силового трансформатора. Кроме того, силовой трансформатор, магнитная система которого находится в состоянии насыщения, становится источником дополнительной реактивной нагрузки на электрическую сеть. Поэтому идентификация аномального режима необходима для принятия адекватных оперативно-диспетчерских решений, например, по снижению нагрузки силового трансформатора, компенсации дополнительной реактивной нагрузки на электрическую сеть. Для этого необходим комплексный подход к определению ГИТ, учитывающий ряд требований:

- учитывать топологию электрической сети и выбирать для регистрации ГИТ критические узлы, в которых возможны максимальные уровни ГИТ;
- выбирать для регистрации ГИТ силовые трансформаторы с бронестержневой магнитной системой и трехфазные группы однофазных силовых трансформаторов с броневой магнитной системой как наиболее уязвимые для воздействия ГИТ и подверженные опасности насыщения магнитной системы под воздействием даже ГИТ, соизмеримых с токами холостого хода;
- приоритетными для регистрации ГИТ должны являться критические узлы электрической сети, в которых установлены трехфазные силовые трансформаторы с бронестержневой магнитной системой и трехфазные группы однофазных силовых трансформаторов;
- измерительный преобразователь тока для регистрации ГИТ должен допускать возможность длительной регистрации как постоянной составляющей тока нейтрали силового трансформатора, так и гармоник тока намагничивания;
- частота измеряемого ГИТ от 0 Гц до 0,1 Гц;
- измерительный преобразователь тока для регистрации ГИТ должен выдерживать протекание тока однофазного короткого замыкания в течение нескольких периодов сетевого напряжения до отключения силового трансформатора действием релейной защиты;
- выходной сигнал измерительного преобразователя тока должен передаваться на общеподстанционный пункт управления для последующей обработки и интеграции с системной автоматикой, например, с автоматикой ограничения снижения напряжения;
- измерительный преобразователь тока для регистрации ГИТ должен устанавливаться на шину, соединяющую вывод нейтрали силового трансформатора с заземляющим устройством, и допускать возможность эксплуатации на открытой площадке в условиях умеренного и холодного климата.

При выполнении указанных требований будут регистрироваться только те ГИТ, которые представляют опасность, поскольку вызывают насыщение магнитной системы силовых трансформаторов. Кроме того, при минимальном количестве точек регистрации будет обеспечиваться возможность оценки уязвимости электрической сети в целом к воздействию ГИТ по критерию дефицита реактивной мощности и перспективы последующего развития «лавины» напряжения.

Выбор основных параметров измерительного преобразователя для регистрации ГИТ

За рубежом серийно выпускаются специализированные средства для непосредственного измерения ГИТ. В качестве примера можно привести простой датчик типа GIC-4 (Dynamic Ratings), позволяющий измерять ГИТ величиной до 360 А и выполненный в виде трансформатора тока с разъемным сердечником и элементом Холла. Более совершенным является устройство типа ECLIPSE HECT (Advanced Power Technologies), которое кроме измерения ГИТ определяет уровень гармоник в токе силового трансформатора, появляющихся из-за насыщения магнитной системы. Существуют системы непрерывной регистрации ГИТ, которые развернуты в Северной Америке Metatech Corporation и Minnesota Power [1], а также единственная в России система регистрации воздействия магнитосферных возмущений на линии электропередачи 330 кВ «Северный транзит» на Кольском полуострове. Последняя действует с 2010 года под руководством Полярного Геофизического Института РАН (ПГИ РАН) совместно с Центром физико-технических проблем энергетики Севера [2-4]. Измерения ГИТ в нейтралях силовых трансформаторов и автотрансформаторов проводились на ряде подстанций напряжением 330 кВ Кольской энергосистемы. В частности, в нейтрали автотрансформатора АТ-2 подстанции 330 кВ «Выходная» регистрировались ГИТ значительно превышающие 100 А.

В зарубежной и отечественной практике для мониторинга ГИТ используются измерительные преобразователи с элементом Холла, которые устанавливаются в нейтрали силового трансформатора и позволяют измерять как переменные, так и постоянные токи [1,5]. Существуют две основные разновидности измерительных преобразователей тока с элементом Холла – прямого усиления и компенсационные [6,7]. В первом случае магнитное поле, создаваемое первичным током, концентрируется в магнитной цепи и преобразуется в воздушном зазоре элементом Холла в электрический сигнал, который усиливается для получения на выходе пропорциональной копии первичного тока. В измерительных преобразователях компенсационного типа магнитное поле первичного тока компенсируется магнитным полем вторичной обмотки. Вторичный (компенсационный) ток генерируется с помощью элемента Холла и электронной схемы и является пропорциональной копией первичного тока. Использование компенсационной обмотки

обеспечивает более высокую линейность и точность преобразования, но существенно ограничивает перегрузочную способность измерительного преобразователя. Кратность перегрузки по первичному току измерительных преобразователей компенсационного типа не превышает, как правило, значений (1,5 - 2,0).

Допустимая перегрузка измерительных преобразователей прямого усиления из-за отсутствия вторичной обмотки вполне соизмерима с токами электродинамической и термической стойкости стандартных электромагнитных трансформаторов тока. Например, допустимая перегрузка измерительного преобразователя прямого усиления типа SZ9HA-800...5000 составляет 30000 А·вит [7]. Если первичным витком является шина, соединяющая вывод нейтрали силового трансформатора с заземляющим устройством, то допустимая перегрузка измерительного преобразователя составит 30 кА.

Выбор конкретного типа измерительного преобразователя прямого усиления может проводиться с учетом номинальных параметров силового трансформатора и параметров примыкающей электрической сети, которые определяют величину ГИТ, протекающих в нейтрали, а также таких показателей качества электроэнергии в узле включения силового трансформатора, как коэффициенты несимметрии и несинусоидальности фазных напряжений, которые определяют величину токов нулевой последовательности.

При появлении ГИТ, достаточных по величине для насыщения магнитной системы силового трансформатора, в условиях нарушения симметрии и синусоидальности фазных напряжений ток в нейтрали приобретет сложный гармонический характер

$$I_N = 3 \cdot (I_{\text{ГИТ}} + I_{(0)} + \sum_{3k}^{\infty} I_{3k}), \quad (1)$$

где $I_{\text{ГИТ}}$ – геоиндуцированный ток, обусловленный геомагнитными возмущениями; $I_{(0)}$ – ток нулевой последовательности основной частоты 50 Гц, обусловленный нарушением симметрии фазных напряжений; I_{3k} – ток гармоник нулевой последовательности ($k=1,2,3\dots$), обусловленных при отсутствии геомагнитных возмущений нарушением синусоидальности фазных напряжений, а в периоды геомагнитных возмущений – как нарушением синусоидальности фазных напряжений, так и насыщением магнитной системы силового трансформатора.

Величина ГИТ определяется интенсивностью геомагнитных возмущений, которые инициируют появление горизонтальной компоненты геоэлектрического поля, и величиной суммарного активного сопротивления контура протекания [8]. Количественные оценки ГИТ будут предельными для силовых трансформаторов как узловых, так и тупиковой подстанций радиальной сети, если трасса только одной воздушной линии (ВЛ) совпадает с направлением вектора напряженности E геоэлектрического поля, а трассы остальных ВЛ перпендикулярны вектору напряженности E геоэлектрического поля. Для этого случая в таблице 1 представлены расчетные значения ГИТ ($I_{\text{ГИТ}(L)}$) в нейтрали силовых трансформаторов номинальной мощностью 200 МВА (узловая подстанция) и 40 МВА (тупиковая подстанция), связанных воздушной линией номинальным напряжением 220 кВ протяженностью (l) от 50 км до 400 км.

Таблица 1. Количественные оценки ГИТ в нейтралях силовых трансформаторов, связанных ВЛ 220 кВ различной протяженности.

$l, \text{ км}$	$I_{\text{ГИТ}}, \text{ А}$					
	1,0	5,0	10	15	20	25
50	$\frac{11,82}{14,73}$	$\frac{59,1}{73,64}$	$\frac{118,2}{147,28}$	$\frac{177,3}{220,91}$	$\frac{236,41}{294,55}$	$\frac{295,51}{368,19}$
	$\frac{15,64}{21,14}$	$\frac{78,19}{105,71}$	$\frac{156,37}{211,42}$	$\frac{234,56}{317,12}$	$\frac{312,74}{422,83}$	$\frac{390,93}{528,54}$
200	$\frac{18,64}{27,05}$	$\frac{93,2}{135,23}$	$\frac{186,39}{270,45}$	$\frac{279,59}{405,68}$	$\frac{372,79}{540,91}$	$\frac{465,98}{678,13}$
	$\frac{20,62}{31,42}$	$\frac{103,12}{157,11}$	$\frac{206,24}{314,22}$	$\frac{309,36}{471,33}$	$\frac{412,48}{628,44}$	$\frac{515,6}{785,55}$

Представленные данные служат предельными оценками возможных значений ГИТ, причем в числителе представлены значения ГИТ при выполнении ВЛ проводом АС-240, а в знаменателе – значения ГИТ при выполнении ВЛ проводом АС-400. Как видно, в зависимости от протяженности, географической ориентации ВЛ и вектора напряженности E геоэлектрического поля величина ГИТ в нейтрали силовых трансформаторов может изменяться от единиц до сотен ампер.

Ток нулевой последовательности основной частоты 50 Гц при нарушении симметрии фазных напряжений непосредственно в узле подключения силового трансформатора с наиболее распространенной схемой соединения обмоток Y_0/Δ можно записать в виде

$$I_{(0)} = (1,05 - 1,25) \cdot \frac{k_{U(0)\%}}{u_{к\%}} \cdot \frac{S_{ном}}{U_{ном}}, \quad (2)$$

где $k_{U(0)\%}$ – коэффициент несимметрии фазных напряжений по нулевой последовательности; $u_{к\%}$ – напряжение короткого замыкания силового трансформатора, выраженное в процентах; $S_{ном}$ – номинальная мощность силового трансформатора; $U_{ном}$ – номинальное напряжение силового трансформатора.

Выражение (2) позволяет оценить величину тока нулевой последовательности основной частоты по паспортным данным силового трансформатора и реальной несимметрии фазных напряжений в узле подключения силового трансформатора в электрическую сеть. Величина коэффициента несимметрии не должна превышать 2% в течение 95% времени интервала в одну неделю, т.е. не более 8,4 часа непрерывной несимметрии с коэффициентом 2%, либо случайные всплески различной продолжительности каждый, но суммарной продолжительностью не более 8,4 часа [9].

Например, при $k_{U(0)\%} = 2\%$, паспортных параметрах силового трансформатора $S_{ном} = 200$ МВА, $U_{ном} = 220$ кВ, $u_{к\%} = 12\%$ действующее значение тока нулевой последовательности составит $I_{(0)} = (160 \div 190)$ А, действующее значение тока нейтрали составит $I_{N(0)} = 3 \cdot I_{(0)} = (480 \div 570)$ А. Если силовой трансформатор связан с электрической сетью ВЛ 220 кВ с проводами АС-400 и протяженностью 200 км, то в нейтрали при напряженности горизонтальной компоненты геоэлектрического поля $E_0 = 20$ В/км величина ГИТ достигнет значения ≈ 628 А, а амплитуда суммарного тока нейтрали без учета высших гармонических составляющих достигнет значения $I_{N(амп)} \cong 628 + \sqrt{2} \cdot (480 \div 570) \cong (1307 \div 1434)$ А.

В качестве примера в таблице 2 представлены основные параметры измерительного преобразователя тока типа SZ9HA-800 производства ООО «ТВЕЛЕМ», предел преобразования которого удовлетворяет полученным выше значениям амплитуды суммарного тока нейтрали [7].

Аналогичным образом можно получить предельную оценку амплитуды суммарного тока в нейтрали силового трансформатора при любых других значениях номинальной мощности с учетом собственных параметров примыкающих ВЛ, качества электроэнергии в узле подключения силового трансформатора, интенсивности геомагнитных возмущений. С учетом полученного значения амплитуды суммарного тока в нейтрали силового трансформатора необходимо выбирать измерительный преобразователь с соответствующим пределом преобразования силы тока.

Таблица 2. Основные характеристики измерительного преобразователя тока прямого усиления SZ9HA-800.

Первичный ток, А(эфф)	800
Диапазон преобразования, А	± 2400
Допустимая перегрузка, А·вит	30000
Выходное напряжение, В	$4,0 \pm 0,04$
Электрическая прочность изоляции, В (50 Гц, 1 мин)	1500
Точность преобразования, %	$< \pm 1,0$
Нелинейность преобразования, %	$< \pm 1,0$
Частотный диапазон, кГц (-3дБ)	0...25
Рабочая температура, °С	-40...+85

Заключение

Для прогнозирования дефицита реактивной мощности и принятия адекватных диспетчерских решений по предотвращению недопустимых снижений напряжения в узлах электрической сети при геомагнитных бурях необходимо контролировать величину ГИТ в нейтральных трехфазных силовых трансформаторов с бронестержневой магнитной системой и трехфазных групп однофазных силовых трансформаторов с броневой магнитной системой, установленных на узловых и тупиковых подстанциях.

Для мониторинга ГИТ необходимо использовать измерительный преобразователь тока прямого усиления, предел преобразования которого выбирается с учетом ожидаемой величины длительно протекающих ГИТ и уровня гармоник нулевой последовательности в составе тока нейтрали. Допустимая перегрузка измерительного преобразователя тока должна допускать возможность протекания токов однофазного короткого замыкания в течение 4÷5 периодов сетевого напряжения, предельная величина которого определяется паспортными параметрами силового трансформатора.

Список литературы

1. Карпенман J.G. Geomagnetic storms and their impact on the US power grid. Meta-R-319 Report, 2010.
2. Сахаров Я.А., Кудряшова Н.В., Данилин А.Н. и др. Влияние геомагнитных возмущений на работу железнодорожной автоматики. Вестник МИИТ. 2009. Вып. 21. С. 107–111.
3. Сахаров Я.А., Селиванов В.Н., Билин В.А., Николаев В.Г. Экстремальные величины геоиндуцированных токов в региональной энергосистеме. «Physics of Auroral Phenomena», Proc. XLII Annual Seminar, Apatity. 2019.
4. Селиванов В.Н., Данилин А.Н., Колобов В.В., Сахаров Я.А., Баранник М.Б. Результаты длительных регистраций токов в нейтральных силовых трансформаторов. Труды КНЦ РАН: Энергетика. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2010. Вып. 1. С. 84–90.
5. Баранник М.Б., Данилин А.Н., Каткалов Ю.В., Колобов В.В., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Система регистрации геоиндуцированных токов в нейтральных силовых трансформаторов // ПТЭ, 2012, №1, С.118–123.
6. Датчики тока и напряжения для промышленности. Промышленный каталог LEM.
7. Изолированные датчики тока и напряжения производства ООО «ТВЕЛЕМ». Характеристики – Применение – Расчеты.
8. Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Кузнецов В.А., Рыбалко Т.А., Зюзин М.О. Анализ механизмов распространения геоиндуцированных токов в системообразующих электрических сетях различной топологии // Электричество, 2015, №5, С.36–45.
9. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.