ПРИМЕНЕНИЕ ТИРИСТОРОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

АВТОРЫ:

А.А. КУВШИНОВ,
Д.Т.Н.,
ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.В. ВАХНИНА,
Д.Т.Н.,
ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.Н. ЧЕРНЕНКО,
К.Т.Н.,
ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Д.А. КРЕТОВ,
К.Т.Н.,
ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.Ю. ХРЕННИКОВ,
Д.Т.Н.,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Мощные солнечные геомагнитные бури (ГМБ) представляют серьезную опасность для современной инфраструктуры, в том числе и для энергетики. Особую опасность солнечные бури представляют для трансформаторов. Вариации геомагнитного поля во время таких бурь индуцируют на поверхности Земли медленно меняющееся электрическое поле. В связи с этим во время ГМБ в силовых трансформаторах, оказавшихся в этом поле, между заземленными нейтралями возникает наведенная ЭДС.

Ключевые слова: электроэнергетическая система; силовой трансформатор; геомагнитная буря; тиристорная защита.

Северное сияние — классическое проявление геомагнитной бури

ВВЕДЕНИЕ

Экстремальные геомагнитные бури регулярно происходят каждый год и, охватывают территории размером до десятков тысяч километров, инициируют критические режимы функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС), что приводит к системным авариям и, как следствие, к чрезвычайным ситуациям техногенного характера [1, 2]. Из-за геомагнитных бурь были отключения или выходы из строя ЭЭС в Финляндии (1982, 1986 г.), Швеции (1982, 1986, 1991, 2003 г.), США и Канаде (1958, 1980, 1989, 1991, 1994, 2003 г.), Великобритании (1989 г.), Дании (2003 г.), ЮАР (2003 г.). Самые серьезные повреждения ЭЭС были вызваны геомагнитной бурей 13–14 марта 1989 г. В результате ГМБ произошло полное отключение ЭЭС Hydro-Quebec, повреждение двух автотрансформаторов 400/275 кВ в Южной Англии, отключение линии электропередачи (ЛЭП) 400 кВ/400 МВт в Швеции, выход из строя генератора и силовых трансформаторов на АЭС «Салем» в Нью-Джерси (США) из-за перегрева паразитными магнитными потоками (рис. 1). В результате аварии в ЭСС Hydro-Quebec 6 млн человек и большая часть промышленности провинции Квебек в Канаде остались без электричества.

ПОСЛЕДСТВИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Энергетические аварии дали основу для оценки влияния ГМБ на ЭЭС. Однако в этих исторических авариях только один или несколько основных элементов ЭЭС выходили из строя. Оценка социально-экономических последствий от экстремальных ГМБ зависит от того, как перебои в работе уязвимых технологических систем могут влиять на различные секторы экономики и общества, которые зависят от функционирования этих систем. В середине XIX в. социальные и экономические последствия ГМБ 1859 г., известной как Carrington Event, ограничились нарушениями работы телеграфа, что привело к убыткам телеграфных компаний на сумму 300 тыс. долл. (стоимость замены вышедшего из строя оборудования плюс неполученные доходы). В случае, если ГМБ, сопоставимая с Carrington Event, произойдет в наши дни, последствия могут быть совершенно иными, потому что центральную роль в жизни современного общества занимают ЭЭС, от бесперебойного функционирования которых зависит вся инфраструктура.

Согласно отчету комиссии по оценке угрозы Соединенным Штатам от атаки электромагнитным импульсом [5], ГМБ могут стать причиной насыщения сотен силовых трансформаторов. Также возникают серьезные реактивные нагрузки в ЭЭС, приводя к падению напряжения и повреждению элементов ЭЭС. Исследования американских ученых показывают, что при экстремальной ГМБ на территории США могут выйти из строя более 300 силовых трансформаторов сверхвысокого класса напряжения, при этом без электричества останутся более 130 млн человек. Каждый из таких силовых трансформаторов весит более 200 т и стоит более 10 млн долл. Даже самые крупные трансформаторные заводы могут построить только от 30 до 50 силовых трансформаторов сверхвысокого класса напряжения в год. При недостатке квалифицированной рабочей силы и специализированных материалов, который, скорее всего, будет сопровождать длительное отсутствие электроснабжения, и эти показатели окажутся недостижимы. Можно сделать вывод, что даже минимальное восстановление электроснабжения займет много недель, с большой

ВНЕШНИЙ ВИД И ВИД ПОВРЕЖДЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРА НА АЭС «САЛЕМ»

Рис. 1

МЕХАНИЗМ ПРОНИКНОВЕНИЯ ГИТ В НЕЙТРАЛЬ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

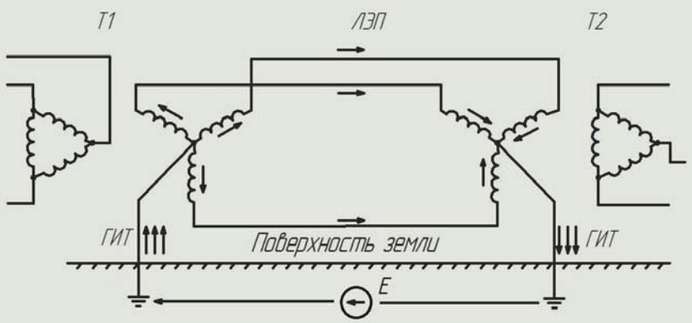

Рис. 2

ЗНАЧЕНИЯ НОМИНАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВТК

Номинальное напряжение, кВ	
ВТК	Защищаемого трансформатора
6	110
10	220
15	330
20	500
35	750

Таблица 1

вероятностью несколько месяцев или даже лет.

Территория России находится в средних и высоких широтах и подвержена воздействию ГМБ. Парковый ресурс действующего электрооборудования в российской энергетике выработан примерно на 80 %, оборудование электрических станций и линий электропередачи изношено примерно на 50 %, что приводит к росту аварийности даже без учета воздействия ГМБ.

В России до настоящего времени вопросу влияния ГМБ на функционирование силовых трансформаторов ЭЭС с разработкой мер по их защите не уделялось должного внимания. Отсутствуют рекомендации по повышению надежности их функционирования в ЭЭС при ГМБ, как, например, в Document C-15 [6] и Geomagnetic Disturbance Operating Procedure Template [7]. Возникает предположение, что, как показано в отчетах ПАО «ФСК ЕЭС» [8], 27 % невыясненных причин отключений ЛЭП, силовых трансформаторов и их повреждений возможны из-за протекания геоиндуцированных токов (ГИТ). Однако это предположение не подтверждается актами и отчетами по технологическим нарушениям. В списках классификационных признаков, включенных в Инструкцию по расследованию и учету технологических нарушений в работе энергосистем, электростанций, котельных, электрических и тепловых сетей, и причин возникновения аварий, содержащихся в Правилах расследования аварий в электроэнергетике, отсутствует одна — влияние на режимы работы ЭЭС геоиндуцированных токов при ГМБ.

В этой связи актуальной становится задача защиты силовых трансформаторов от воздействия ГИТ, которая должна решаться без снижения нагрузки электроснабжения потребителей. Наиболее перспективны инновационные подходы, основанные на достижениях современной силовой электроники. В частности, созданы силовые полупроводниковые приборы, способные коммутировать мощность до десятков мегаватт и позволяющие создавать сравнительно дешевые средства защиты силовых трансформаторов, пригодные для массового применения.

ТИРИСТОРНАЯ ЗАЩИТА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

При ГМБ возмущения геомагнитного поля индуцируют на поверхности Земли геоэлектрическое поле с частотой не более 0,1 Гц, в результате чего между заземлителями трансформаторных подстанций возникает квазипостоянная электродвижущая сила. На рис. 2 показан фрагмент электрической сети, содержащий два силовых трансформатора Т1, Т2, связанных протяженной воздушной линией ЛЭП, и путь протекания ГИТ под действием квазипостоянной электродвижущей силы E.

Структура тиристорной защиты силовых трансформаторов Т1, Т2 от воздействия ГИТ приведена на рис. 3.

В нормальном режиме на силовые тиристоры VS1, VS2 подаются управляющие импульсы и высоковольтный тиристорный ключ (ВТК) обеспечивает режим глухозаземленной нейтрали для силового трансформатора Т1. При возникновении ГИТ подача управляющих импульсов прекращается и ВТК создает режим изолированной нейтрали для силового трансформатора Т1, в котором блокируется протекание ГИТ и обеспечивается защита силовых трансформаторов Т1 и Т2.

Изменение состояния ВТК возможно либо в режиме автоматического управления по сигналам датчика ГИТ в случае внезапного техногенного воздействия, либо в режиме оперативного управления в периоды прогнозируемой геомагнитной активности.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВТК

Для защиты силовых трансформаторов с номинальной мощностью (40÷1250) МВт, номинальным напряжением (110÷500) кВ необходим достаточно широкий модельный ряд ВТК с соответствующими номинальными параметрами:

а) номинальное напряжение ВТК. В табл. 1 представлены значения номинальных напряжений ВТК, предназначенных для защиты силовых трансформаторов разных классов напряжения;
б) номинальный ток ВТК. Выбирается в зависимости от номинальной мощности защищаемого силового трансформатора из ряда значений, рекомендованных ГОСТ 6827-76 для номинального тока электротехнического оборудования — 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250 А;
в) ударный ток однофазного короткого замыкания, (1÷25) кА;
г) длительность протекания аварийного тока, (0,1÷0,2) с;
д) климатическое исполнение и категория размещения УХЛ1.

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ВТК

Современная элементная база силовой электроники предоставляет

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ТИРИСТОРНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ Т1, Т2 ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГИТ

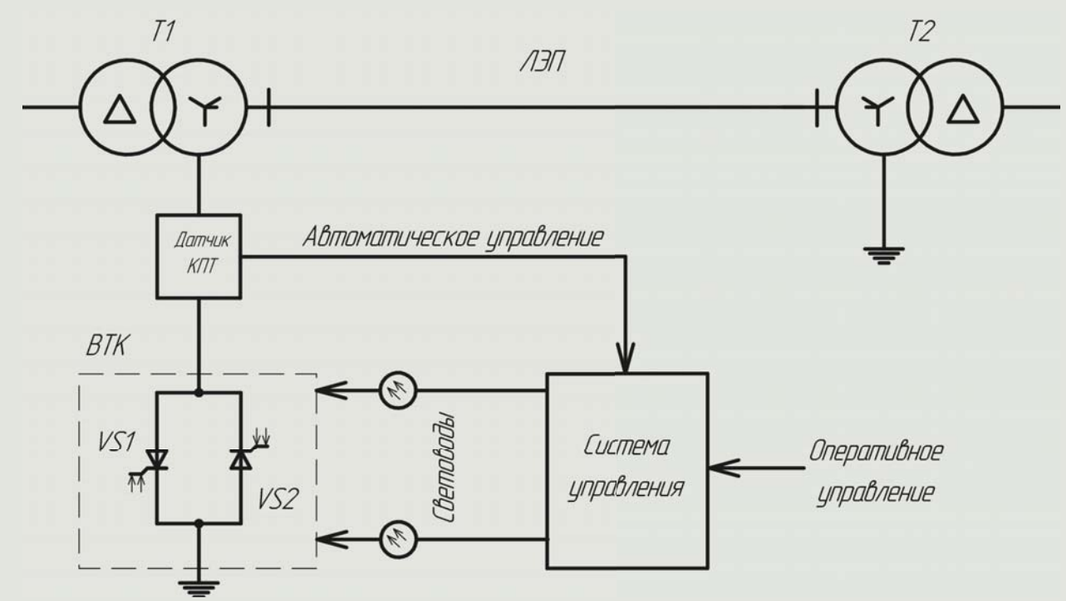

Рис. 3

ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОТИРИСТОРОВ НА ТОКИ ДО 2000 А И НАПРЯЖЕНИЕ ДО 7000 В

Параметр	Значение		
	ТФ353-600	ТФ173-1000	ТФ183-2000
Напряжение переключения, В	6500	6500	6500
Повторяющееся импульсное обратное напряжение, В	7000	7000	7000
Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии при температуре корпуса 70 °С, А	773	1406	2268
Ударный ток в открытом состоянии, кА	12	24	40
Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии, А/мкс	300	300	300
Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии, В/мкс	2000	2000	5000
Оптическая мощность управления, мВт	40	40	40

Таблица 2

достаточно широкий выбор различных видов силовых полупроводниковых приборов (СПП), которые обладают потенциальной возможностью для применения в составе ВТК. К числу таких СПП можно отнести:

- мощные низкочастотные тиристоры с управлением электрическим током (ETT);
- мощные низкочастотные тиристоры с прямым управлением светом (фототиристоры LTT);
- запираемые тиристоры (GTO);
- запираемые тиристоры с кольцевым выводом управляющего электрода (GCT);
- запираемые тиристоры с интегрированным устройством управления (IGCT);
- биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

Наиболее эффективно использование в составе ВТК фототиристоров, которые обладают целым рядом преимуществ: высоковольтной гальванической развязкой между схемой управления и силовой схемой, большими интервалами между профилактическими работами, безопасностью обслуживания.

ОАО «Электровыпрямитель» совместно с ФГУП «ВЭИ» разработало и освоило производство серии фототиристоров на токи до 2000 А и напряжение до 7000 В. В табл. 2 представлена краткая информация о наиболее перспективных для использования в составе ВТК приборах [3, 4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фототиристоры, выполненные в металлокерамическом корпусе таблеточной конструкции, наиболее удобны для сборки высоковольтных «столбов». Управляющий импульс подается к светочувствительной области кремниевой структуры через оптоволоконный световод, который оптическими разъемами соединяется одним концом с корпусом фототиристора, а другим — с лазерным диодом в системе управления (см. рис. 3 на с. 69). Для включения фототиристора достаточно оптического сигнала мощностью 40 мВт и длительностью 10 мкс. Затухание оптического сигнала в световоде весьма незначительно (~1дБ/км), поэтому длина не накладывает ограничения на взаимное расположение ВТК и системы управления в пределах трансформаторной подстанции.

В кремниевую структуру фототиристоров интегрирована защита от пробоя при прямых перенапряжениях, которая формирует внутренний сигнал управления и включает фототиристор при увеличении прямого напряжения до уровня 6500 В (см. табл. 2). Интегрированная защита позволяет полностью отказаться от электронных компонентов в канале управления, размещенных на высоком потенциале, и предельно упростить силовую схему ВТК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Effects of geomagnetically induced currents in the BC Hydro 500 kV system / D.H. Boteler, R.M. Shier, T. Watanabe, R.E. Horita // IEEE Transactions on Power Delivery. 1989. Vol. 4. Issue 1. Pp. 818–823.
2. Pirjola R. Effects of interactions between stations on the calculation of geomagnetically induced currents in an electric power transmission system // Earth, Planets and Space. 2008. Vol. 60. I. 7. Pp. 743–751.
3. Хренников А.Ю., Кувшинов А.А. Электродинамические испытания силовых трансформаторов с компенсацией реактивной мощности // Электротехника. 2017. № 11. С. 80–87.
4. Хренников А.Ю., Александров Н.М., Радин П.С., Шкуропат И.А. Исключение провалов напряжения в прилегающей энергосистеме при электродинамических испытаниях силовых трансформаторов с номинальной мощностью до 630 МВА в условиях сетевого испытательного центра // Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 8. С. 25–36.
5. Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack. Critical National Infrastructures, 2008. URL: http://www.futurescience.com/emp/A2473-EMP-Commission.pdf.
6. Document C-15. URL: https://www.npcc.org/Standards/Procedures/c-15.pdf.
7. Geomagnetic Disturbance Operating Procedure Template. URL: http://www.nerc.com/docs/pc/gmdtf/Template_TOP.pdf.
8. Отчеты ПАО «ФСК ЕЭС». URL: http://www.fsk-ees.ru.

УВАЖАЕМЫЕ ДРУЗЬЯ!

Мы живем в условиях начала коренной трансформации глобальной экономики, стремительно меняющегося миропорядка и возрастающей потребности государств в обеспечении своей безопасности.

Грядущие перемены открывают уникальные возможности для российских высокотехнологичных компаний по завоеванию лидирующих позиций на глобальных рынках безопасности и высокотехнологичной инфраструктуры следующего поколения.

Работа оргкомитета инициативы «Экспорт высокотехнологичной безопасности», начатая в 2016 г., направлена на поддержку и содействие отечественным высокотехнологичным компаниям в завоевании позиций на рынках зарубежных стран. Результатом нашей работы стало создание Ассоциации экспорта технологического суверенитета.

В 2017 г. была проведена большая работа по продвижению отечественных разработчиков, успешно осуществлены деловые миссии в 10 стран Юго-Восточной Азии, Ближнего Востока и Африки.

Мы очень рады, что в текущем году к работе Ассоциации экспорта технологического суверенитета по направлениям «Безопасный умный город», «Безопасность промышленного интернета вещей», «Российские физико-математические школы», «Инфраструктурная безопасность» добавилось направление «Умная безопасная энергетика».

Поздравляю с Днем энергетика, желаю профессиональных успехов и, конечно, значительных результатов в работе на зарубежных рынках. Присоединяйтесь к нашей работе, с наступающим Новым годом!

Президент Ассоциации экспорта технологического суверенитета
А.О. Безруков