

Первое в энергосистеме России токоограничивающее устройство на основе высокотемпературной сверхпроводимости

МОЙЗЫХ М.Е., САМОЙЛЕНКОВ С.В., ВАВИЛОВ А.П.

ЗАО «СуперОкс», Москва, Россия

ПРОХОРОВ Е.С., ПУЧКОВ А.С.

АО «ОЭК», Москва, Россия

МАЙОРОВ А.В.

ПАО «Россети», Москва, Россия

ЖУКОВ А.В., БАЙБЕКОВ Р.Л., ТОКАРЕВА О.В.

АО «СО «ЕЭС», Москва, Россия

Применение токоограничивающих устройств на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП ТОУ) является инновационным методом снижения уровня токов короткого замыкания в высоковольтных электрических сетях, позволяющим сократить количество точек деления электрической сети по условиям ограничения токов короткого замыкания (ТКЗ) и тем самым повысить пропускную способность сети и надежность электроснабжения потребителей. В то же время разработка таких устройств ставит перед энергетиками новые задачи, связанные с интеграцией данного оборудования в действующую энергосистему. В работе рассмотрен процесс внедрения и опытной эксплуатации пилотного проекта ВТСП ТОУ 220 кВ (производитель ЗАО «СуперОкс») на высоковольтной подстанции 220/20 кВ «Мневники» в Москве. При реализации проекта требовалось проведение обширного комплекса научных исследований и испытаний для подтверждения характеристик новых устройств и возможности их применения в российских энергосистемах, применение цифровых технологий моделирования для проверки работоспособности средств релейной защиты, а также разработка новых методических документов для расчета ТКЗ и параметров релейной защиты. По итогам выполнения работ в конце 2019 г. состоялось включение ВТСП ТОУ на подстанции 220/20 кВ «Мневники». Последующая эксплуатация ВТСП ТОУ в 2019–2020 гг. полностью подтвердила заявленные характеристики устройства и правильность выбранных технических решений. Статья посвящена особенностям процесса интеграции нового устройства в действующую энергосистему и представляет основные конструктивные и технические решения, результаты испытаний и эксплуатации устройства, а также возможные перспективы развития технологии ВТСП ТОУ.

Ключевые слова: *высокотемпературная сверхпроводимость, токоограничивающее устройство, ток короткого замыкания, испытания, релейная защита, ВТСП ТОУ, программно-аппаратный комплекс реального времени, ПС 220/20 кВ «Мневники»*

Высокий уровень ТКЗ является одной из самых острых проблем, ограничивающих развитие электрических сетей крупных городов и мегаполисов [1]. Рост потребления электроэнергии, ввод новых объектов генерации (включая возобновляемые источники) приводит к повышению уровня токов в электрической сети. Традиционно в целях сдерживания роста уровня ТКЗ применяют следующие подходы.

Секционирование (деление) сети: размыкание автоматикой некоторых линий и шинных соедине-

ний [2, 3]. Эта мера позволяет снизить уровень токов и не требует больших денежных затрат. В то же время секционирование уменьшает надежность схемы электроснабжения и гибкость оперативно-технологического и диспетчерского управления режимами работы сети [3]. По этим причинам данный подход считается вынужденным решением.

Использование энергетического оборудования с большей стойкостью к ТКЗ. Такой подход требует применения коммутационного оборудования большей отключающей способности. Реализацию этого

подхода можно проследить исторически. Так в 90-х годах. XX в. уровень отключающей способности выключателей составлял 25–31.5 кА, к 2000 г. он возрос до 50 кА, а в 2010 г. типовым для Московского региона стало применение коммутационных аппаратов с номинальными токами отключения 63 кА. В 2013 г. в Нью Джерси (США) была введена в эксплуатацию первая подстанция с выключателями на уровень 80 кА [4]. Реализация этого подхода сопряжена с большими финансовыми затратами: часто требуется замена как коммутационного оборудования, так и значительной части элементов главной схемы (поскольку ток динамической или термической стойкости оказывается превышенным). При реконструкции замена оборудования не всегда возможна по причине технических ограничений (недостаток места или необходимость проведения комплексной реконструкции ПС вместо точечной замены оборудования).

Использование реакторов с высоким сопротивлением. Поскольку реактор создает в сети постоянное сопротивление, это приводит к «ослаблению» сети с точки зрения пропускной способности, росту потерь, необходимости перенастройки средств защиты и автоматики. Кроме того, применение реакторов приводит к возрастанию апериодической компоненты ТКЗ, переходных напряжений и создает условия для насыщения трансформаторов тока (т.е. ограничивает работоспособность средств релейной защиты). Указанные факторы существенно усложняют эксплуатацию сетей с токоограничивающими реакторами.

Таким образом, все перечисленные решения по ограничению уровня ТКЗ в электрических сетях имеют существенные недостатки. Задача разработки современных технологий ограничения ТКЗ направлена на создание токоограничивающих устройств (ТОУ), способных эффективно снижать токи ТКЗ и лишенных недостатков традиционных подходов [5, 6]. Последние успехи в области технологии производства и переработки высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения [7–9] позволили создать новый тип токоограничивающих устройств на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП ТОУ) [10].

ВТСП ТОУ по своему принципу работы является нелинейным активным сопротивлением, предназначенным для включения в электрическую схему объекта электроэнергетики с целью ограничения величины ТКЗ до значений, не превышающих отключающей способности коммутационного оборудования. ВТСП ТОУ имеет три основных режима работы:

1. Режим нормальной работы (участок НР на рис. 1). ВТСП ТОУ находится в сверхпроводящем состоянии и передает электроэнергию практически без потерь. Сопротивление ($R_{\text{норм}}$) устройства не превышает 0,1 Ом.

2. Режим токоограничения (участок ТО на рис. 1). В случае превышения током, протекающим через ВТСП ТОУ, определенной пороговой величины (тока срабатывания¹) сопротивление устройства резко увеличивается (до 40 Ом и более в зависимости от величины ТКЗ и перепада напряжения на вводах ВТСП ТОУ). Сопротивление ВТСП ТОУ продолжает возрастать в течение всего времени протекания через него ТКЗ (рис. 1) вплоть до достижения термической стойкости устройства или отключения короткого замыкания.

3. Режим восстановления (участок РВ на рис. 1). После отключения короткого замыкания сопротивление ВТСП ТОУ снижается до значения, близкого к нулю, после чего устройство переходит в режим нормальной работы с сопротивлением $R_{\text{норм}}$ (0,1 Ом). Для большинства ВТСП ТОУ время восстановления не превышает 1 мин.

Переход из режима нормальной работы в режим токоограничения происходит менее чем за 4 мс, что является уникальным свойством сверхпроводящего материала. Это качество делает ВТСП ТОУ эффективным средством ограничения аварийных токов, позволяющим со временем сократить количество точек деления электрической сети, повысить надежность электроснабжения потребителей и обеспечить возможность подключения новых потребителей.

Москва, являясь крупнейшим мегаполисом России, отличается интенсивным ростом потребления электроэнергии (59% за последние 20 лет). Как следствие, возрастает уровень ТКЗ, причем этот рост сопровождается интенсивной заменой воздушных линий электропередачи кабельными линиями с меньшим сопротивлением и одновременным развитием внутригородской генерации [11]. Задача ограничения уровня ТКЗ в энергосистеме мегаполиса признается исключительно важной для обеспечения планов его перспективного развития.

Реализуя эту задачу, АО «Объединенная энергетическая компания» (АО «ОЭК») приняла решение установить ВТСП ТОУ на подстанции (ПС) с высоким уровнем ТКЗ, расположенную в центре Москвы – ПС 220/20 кВ «Мневники». Эта подстанция соединяет северо-западную и юго-западную части Московской энергосистемы кабельными линиями

¹ Величина тока срабатывания выбирается производителем и должна превышать допустимый ток предельного нагрузочного режима для оборудования в цепи с ВТСП ТОУ. Как правило, эта величина лежит в диапазоне 1–3 кА.

Сопротивление ВТСП ТОУ

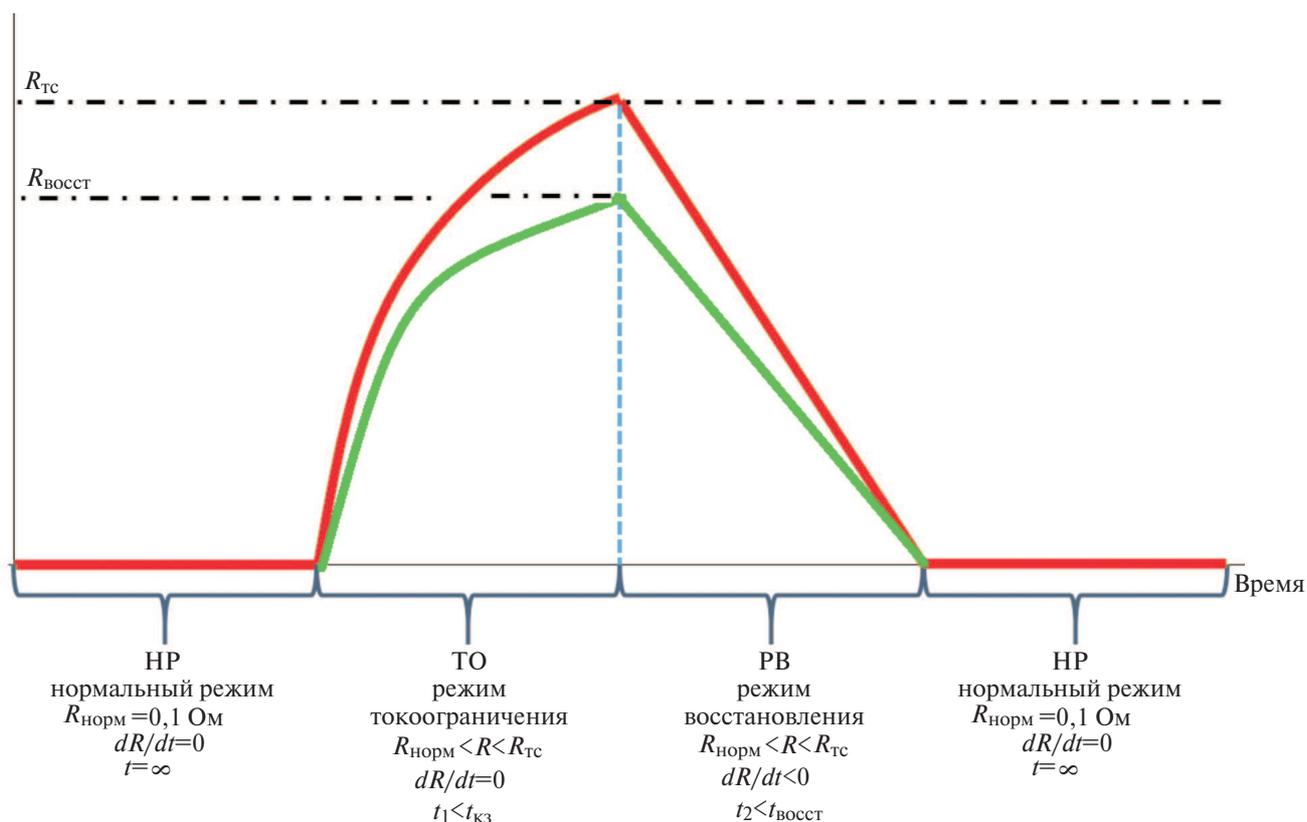


Рис. 1. Сопротивление ВТСП ТОУ в различных режимах его работы: $R_{\text{норм}}$ – сопротивление в нормальном режиме работы; dR/dt – изменение сопротивления по времени ($dR/dt > 0$ – режим токоограничения, сопротивление растет; $dR/dt < 0$ – режим восстановления, сопротивление уменьшается); $R_{\text{Тс}}$ – максимальное сопротивление, которое ВТСП ТОУ может развить без повреждения оборудования к моменту достижения термической стойкости (на момент достижения $R_{\text{Тс}}$ ВТСП ТОУ уже должно быть отключено от сети); $R_{\text{восст}}$ – сопротивление, при котором возможно восстановление до $R_{\text{норм}}$ без отключения ВТСП ТОУ от сети; $t_{\text{кз}}$ – максимальное время режима токоограничения (время, в течение которого ВТСП ТОУ может находиться в резистивном режиме – участок ТО), если сопротивление ВТСП ТОУ не превышает $R_{\text{восст}}$; $t_{\text{восст}}$ – максимальное время режима восстановления; t_1 – фактическое время режима токоограничения; t_2 – фактическое время режима восстановления

Fig. 1. SFCL resistance in various modes of its operation: $R_{\text{норм}}$ – resistance in normal mode; dR/dt – change in resistance over time ($dR/dt > 0$ – resistance increases, current limitation mode; $dR/dt < 0$ – resistance decreases, recovery mode); $R_{\text{Тс}}$ – maximum resistance that SFCL can develop without damaging the equipment by the time it reaches thermal resistance (The SFCL must already be disconnected from the network when $R_{\text{Тс}}$ is reached); $R_{\text{восст}}$ – the resistance at which it is possible to restore to $R_{\text{норм}}$ without disconnecting the SFCL from the network; $t_{\text{кз}}$ – maximum time of current limitation mode (the time during which the SFCL can be in resistive mode – the TO section) if the resistance of SFCL does not exceed $R_{\text{восст}}$; $t_{\text{восст}}$ – maximum recovery mode time; t_1 – actual time of current limitation mode; t_2 – actual recovery mode time

(КЛ) 220 кВ «ТЭЦ-16–Мневники 1, 2», «Очаково–Мневники 1, 2» и осуществляет электроснабжение Западного административного округа столицы,

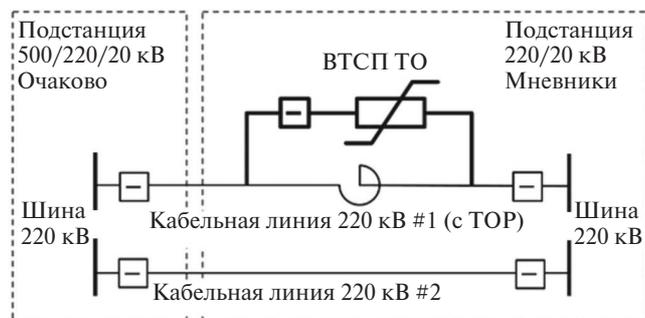


Рис. 2. Упрощенная электрическая схема установки ВТСП ТОУ в сети

Fig. 2. Simplified electrical diagram of the SFCL installation in the network

метрополитена, делового центра «Москва-Сити», а также жилых домов общей площадью 120 тысяч квадратных метров. Уровень ТКЗ в сети 220 кВ на этом электросетевом объекте превышает 50 кА (действующее значение). Было принято решение об установке ВТСП ТОУ на кабельной линии 220 кВ «Очаково–Мневники 1». Токоограничивающие реакторы (ТОР) сопротивлением 3.0 Ом были установлены на этой ПС ранее и оставлены в сети в качестве резервирующих (рис. 2).

Проект установки ВТСП ТОУ на ПС 220/20 кВ «Мневники» явился первым в российской электроэнергетике пилотным проектом внедрения устройств ограничения ТКЗ на платформе ВТСП, разработка и производство которых велись российской компанией ЗАО «СуперОкс». Внешний вид устройства приведен на рис. 3.

На старте проекта в 2015 г. отработанных решений по установке ВТСП ТОУ в высоковольтных электрических сетях не существовало. Из работоспособных устройств следует упомянуть разработку токоограничивающих устройств на напряжение 115 кВ *American Superconductor/Siemens* [12] и 154 кВ КЕРСО [13]. Будучи изготовленными и прошедшими необходимые испытания, эти устройства так и не были введены в работу в западных энергосистемах.

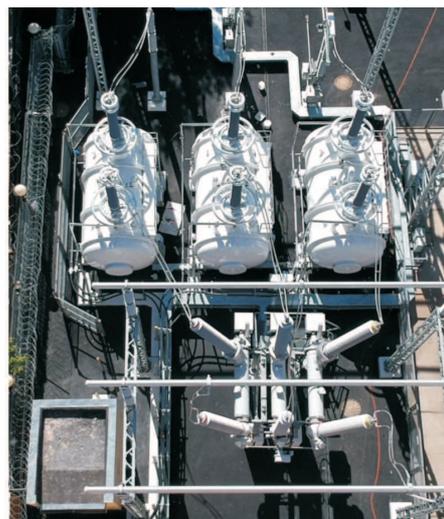
Проект был разбит на четыре ключевые стадии: проектирование, изготовление устройства, строительные и интеграционные работы, ввод в эксплуатацию. Проектирование было завершено в 2016 г. К 2018 г. ВТСП ТОУ было изготовлено, а в период 2018–2019 гг. проведены строительные работы и интеграция устройства в энергосистему. Ввод в эксплуатацию и приемка работ были выполнены в сентябре–декабре 2019 г. В декабре 2019 г. ВТСП ТОУ было введено в эксплуатацию.

Особенности конструкции ВТСП ТОУ 220 кВ. ВТСП ТОУ состоит из трех однофазных агрегатов открытой установки в виде горизонтальных цилиндров (рис.3), размещаемых на площади открытого распределительного устройства подстанции (далее – Фазы), и системы низкотемпературного (криогенного) охлаждения (далее – СКО), размещаемой в отдельном здании. Основные технические характеристики устройства приведены в табл. 1.

Фазы ВТСП ТОУ состоят из герметичного корпуса (криостата), высоковольтных токовых вводов и сверхпроводящей сборки (рис. 4).



а)



б)

Рис. 3. ВТСП ТОУ на 220 кВ на ПС 220/20 кВ «Мневники» в Москве: а – вид с торца фаз, видны круглые люки-лазы для доступа внутрь ВТСП ТОУ; б – вид сверху на фазы ВТСП ТОУ. Ниже фаз видна жесткая ошиновка и высоковольтный выключатель, установленный последовательно с ВТСП ТОУ

Fig. 3. SFCL for 220 kV at the 220/20 kV “Mnevniki” substation in Moscow: а – view from the end of the phases, you can see round manholes for access to the inside of the SFCL; б – top view of the SFCL phases. Below the phases, you can see a rigid busbar and a HV switch installed in series with the SFCL

Таблица 1

Технические характеристики ВТСП ТОУ 220 кВ
Technical characteristics of 220 kV SFCL

Характеристика	Значение
Номинальное напряжение	220 кВ
Максимальное напряжение	252 кВ
Базовый уровень изоляции	950 кВ
Предельное переменное напряжение	440 кВ
Номинальная частота	50 Гц
Номинальный ток	1200 А
Ток полного перехода в резистивное состояние	3400 А
Сопротивление в номинальном режиме	< 0.1 Ом
Сопротивление при ограничении ТКЗ	> 40 Ом
Время перехода	< 4 мс
Тип размещения	Открытое
Климатическое исполнение	-45 °С ÷ +40 °С
Размер 1 фазы (Д' Ш' В)	5500' 2850' 6500 мм
Масса 1 Фазы (сухая / с жидким азотом)	16/27 т
Габариты здания СКО (Д' Ш' В)	7' 14' 10 м

Корпус (криостат) представляет собой сосуд из нержавеющей стали с двойными стенками, между которыми создан вакуум, обеспечивающий термоизоляцию холодной внутренней части криостата от внешней среды, с вакуумной теплоизоляцией. Каждый криостат на заводе проходит проверку на отсутствие утечек в вакуумном и низкотемпературном объеме. Особенностью этих криостатов явля-

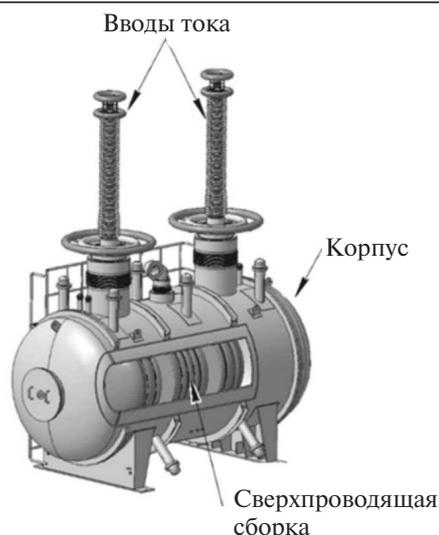


Рис. 4. Схематическое изображение фазы ВТСП ТОУ 220 кВ

Fig. 4. Schematic representation of the 220 kV SFCL phase

ется наличие двух съемных люков-лазов диаметром 0.5 м, обеспечивающих доступ внутрь криостата для выполнения монтажных работ.

Сверхпроводящая сборка включает в себя набор токоограничивающих модулей с рабочим токонесущим элементом – сверхпроводником. Модули помещены внутри металлических экранов для равномерного распределения электрического поля и обеспечения электрической прочности устройства. В качестве сверхпроводника используется так называемый высокотемпературный сверхпроводник 2-го поколения. В ходе изготовления устройства каждый модуль проверяется серией испытаний в рамках процедуры внутреннего контроля качества [14]. В серию испытаний входят: высоковольтные испытания, испытания воздействием ТКЗ, испытания номинальным током, замер тока полного перехода в нормальное состояние (критического тока) и другие. Указанные испытания проводились в российских научно-исследовательских центрах – Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ – филиал РФЯЦ–ВНИИТФ) и Научно-техническом центре ФСК ЕЭС (АО «НТЦ ФСК ЕЭС»).

Пространство между сверхпроводящей сборкой и внутренней стенкой криостата заполнено жидким азотом, который является охлаждающей и электроизолирующей средой. Криогенные токовые вводы с твердой изоляцией для ВТСП ТОУ на 220 кВ были разработаны непосредственно для этого проекта совместно с российской компанией «Изолятор». Все токовые вводы были подвергнуты отдельной серии высоковольтных испытаний перед установкой в ВТСП ТОУ.

Система криогенного охлаждения (СКО) состоит из трех подсистем – по одной на фазу ВТСП

ТОУ. Каждая из таких подсистем состоит из криогенного охладителя, регулятора давления, циркуляционного насоса и трубопроводов для транспортировки охлаждающей среды. Система обходных соединений резервирует подсистемы СКО: в случае отказа одной из подсистем оставшиеся две подсистемы обеспечивают полноценное функционирование ВТСП ТОУ. На подстанции СКО размещается в отдельном, специально построенном здании вне открытого распределительного устройства, что позволяет выполнять регламентные и ремонтные работы без прерывания передачи электроэнергии через ВТСП ТОУ.

Испытания ВТСП ТОУ. Программа испытаний была разработана международным коллективом, включающим представителей АО «ОЭК», АО «СО «ЕЭС», ЗАО «СуперОкс» и сотрудников испытательных центров *KERI*, ВЭИ, НТЦ ФСК ЕЭС. В качестве основы для формирования программы испытаний был выбран международный стандарт, специализированный на испытаниях ВТСП ТОУ [15]. В программу вошли высоковольтные испытания, испытания номинальным током и испытания ТКЗ; перечень последних был расширен относительно требований стандарта – ВТСП ТОУ испытывался не только в условиях максимальных нагрузок, но и в промежуточных режимах, характерных для функционирования оборудования в условиях реальной энергосистемы.

Каждая из фаз ВТСП ТОУ проходила испытания индивидуально в испытательном центре *KERI* в городе Чханвон (Республика Корея). По результатам испытаний напряжением грозового импульса базовый уровень изоляции ВТСП ТОУ составил 950 кВ (рис. 5, 6), что соответствует российским стандартам для высоковольтного оборудования на класс напряжения 220 кВ и является рекордной величиной испытательного напряжения, когда-либо приложенного к сверхпроводниковому устройству.

Испытания фаз ВТСП ТОУ токами КЗ доказали, что устройство эффективно выполняет функцию токоограничения. В частности, при ожидаемом токе КЗ в 38 кА (рис. 6) ток, протекающий через ВТСП ТОУ, не превысил 7 кА и в течение периода снизился до значения 1.5 кА. В то же время электрическое сопротивление ВТСП ТОУ превысило 40 Ом спустя 50 мс после начала короткого замыкания в соответствии с заявленными характеристиками устройства. Результаты испытаний явились необходимой основой для разработки технических решений по релейной защите и автоматике электрической сети и разработки эксплуатационной документации.

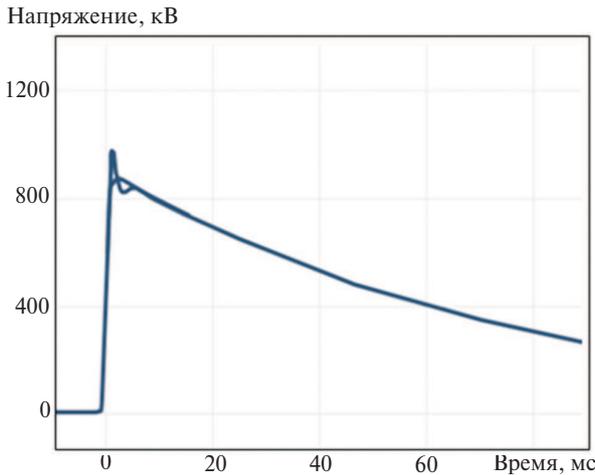


Рис. 5. Осциллограмма испытания фазы ВТСП ТОУ на базовый уровень изоляции

Fig. 5. SFCL phase Test waveform for baseline isolation

Технические решения по интеграции ВТСП ТОУ в энергосистему. Важнейшим этапом проекта внедрения явился этап научных исследований влияния характеристик и режимов работы ВТСП ТОУ на параметры электрического режима сети и разработки системных вопросов и, прежде всего, вопросов функционирования устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) сети. Будучи устройством с нелинейным активным сопротивлением, ВТСП ТОУ кардинально изменяет характер протекающих при коротких замыканиях электромагнитных переходных процессов, изменяет условия функционирования устройств РЗА прилегающей сети, что требует проверки работоспособности как отдельных уст-



Рис. 6. Фаза ВТСП ТОУ на 220 кВ в испытательном центре KERI на этапе монтажа ошиновки перед высоковольтными испытаниями

Fig. 6. 220 kV SFCL phase at KERI Test center during busbar installation before high voltage tests

ройств РЗА, так и оценки функционирования комплекса РЗА электрической сети в целом.

Для решения этой задачи потребовалось выполнить цикл испытаний ВТСП ТОУ воздействием ТКЗ, охватывающих:

- определение сопротивления ВТСП ТОУ во всем диапазоне времени ТКЗ, вплоть до времени термической стойкости ВТСП ТОУ 220 кВ;

- определение времени восстановления ВТСП ТОУ 220 кВ;

- проверка функционирования устройств РЗ с применением моделирующего комплекса RTDS, включая оценку влияния 2-й и 5-й гармоник ТКЗ на работу дифференциальных защит и проверку работоспособности измерительных органов РЗ в условиях резкого снижения тока КЗ;

- разработка методических указаний по выбору параметров срабатывания устройств РЗА в сети с установленным ТОУ ВТСП, работающих параллельно токоограничивающему реактору;

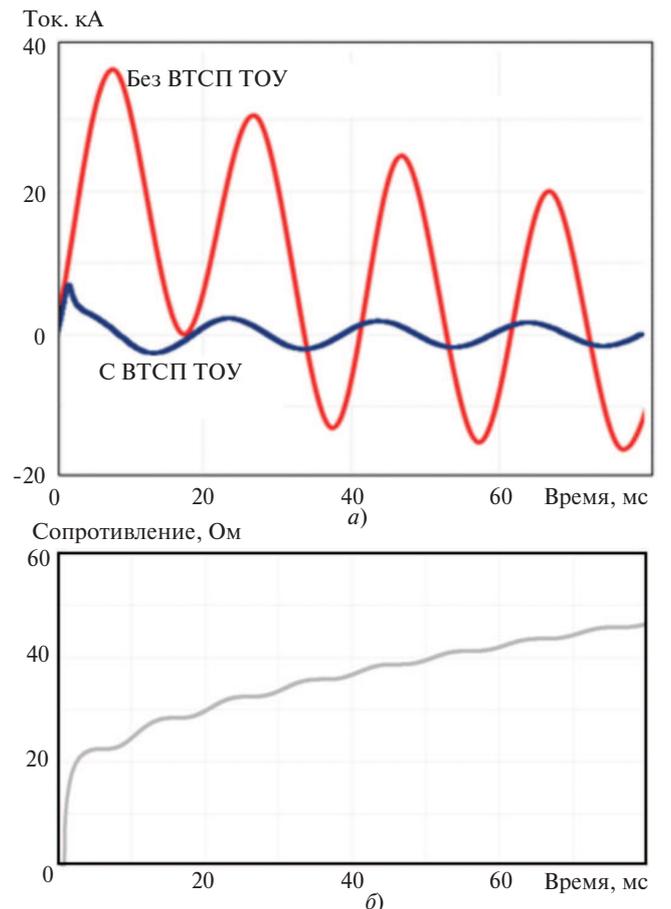


Рис. 7. Результаты испытания ВТСП ТОУ токами КЗ в условиях ПС 220/20 кВ «Мневники»: а – сравнение испытательной величины тока КЗ с ВТСП ТОУ и без него; б – сопротивление ВТСП ТОУ при воздействии импульса ТКЗ

Fig. 7. Results of the SFCL short-circuit current test in the conditions of the 220/20 kV substation “Mnevniki”: а – comparison of the test value of the short-circuit current with and without SFCL; б – resistance of SFCL under the influence of a short-circuit current pulse

разработка и верификация цифрового двойника – математической модели ВТСП ТОУ;

создание методики расчета ТКЗ с использованием математической модели ВТСП ТОУ, проверка расчетной модели электрической сети;

проверка соответствия отключающей способности выключателей сети, прилегающей к ПС 500 кВ «Очаково» и ПС 220кВ «Мневники», уровням ТКЗ, определенным с учетом полученных характеристик ВТСП ТОУ.

Интеграция ВТСП ТОУ в электрическую сеть 220 кВ города поставила новые задачи в части настройки РЗА, такие как:

обеспечение требуемой чувствительности, быстроты действия, селективности и надежности функционирования устройств РЗА в условиях резкого снижения величины ТКЗ;

прекращение протекания ТКЗ через ВТСП ТОУ за время, не превышающее время термической стойкости ВТСП ТОУ (0,4 с);

ограничение применения автоматического повторного включения (АПВ) элементов сети до восстановления сверхпроводящей характеристики ВТСП ТОУ;

оценка достаточности применения типовых решений по РЗА сети для конкретной схемы включения ВТСП ТОУ, необходимость разработки дополнительных мероприятий по РЗА;

разработка методик расчета параметров настройки устройств РЗА сети с ВТСП ТОУ.

Решение перечисленных задач потребовало разработки и внедрения целого ряда новых технологий по РЗА, не применявшихся ранее. На стадии согласования проектной документации по включению ВТСП ТОУ на ПС 220/20 кВ «Мневники» АО

«СО ЕЭС» инициировал существенную доработку проектной документации, проведение дополнительных исследований и испытаний. В результате был разработан проект РЗА, предусматривающий использование существующих и установку дополнительных терминалов защит (рис. 8), включающий устройства дифференциальной защиты ошиновки (ДЗОШ), делительной токовой защиты (ДТЗ), резервирования отказа выключателя в плече ВТСП ТОУ (УРОВ), максимальной токовой защиты (МТЗ), дистанционной защиты (ДЗ), токовой защиты нулевой последовательности (ТЗНП).

В основе логики системы РЗА заложено применение двух комплектов основных защит для КЛ и ВТСП ТОУ в связи с неэффективностью резервирования отказа основных защит КЛ и ВТСП ТОУ комплектами ступенчатых защит своей КЛ и резервными защитами смежных элементов сети по логике дальнего резервирования. АПВ на КЛ не применяется в соответствии с требованиями российских НТД.

Представленная архитектура РЗА основана на решении ряда проблем.

Во-первых, ВТСП ТОУ имеет достаточно ограниченную длительность термической стойкости (0,4 с) – она меньше времени действия резервных защит, что не гарантировало эффективности функционирования типовой РЗА по локализации режима короткого замыкания в сети за время, предотвращающего повреждение оборудования из-за превышения пределов термической стойкости. Для решения этой задачи было принято решение о необходимости применения постоянно введенных в работу двух комплектов основных быстродействующих защит ЛЭП и ВТСП ТОУ. При выводе из работы одного из комплектов ВТСП ТОУ должен

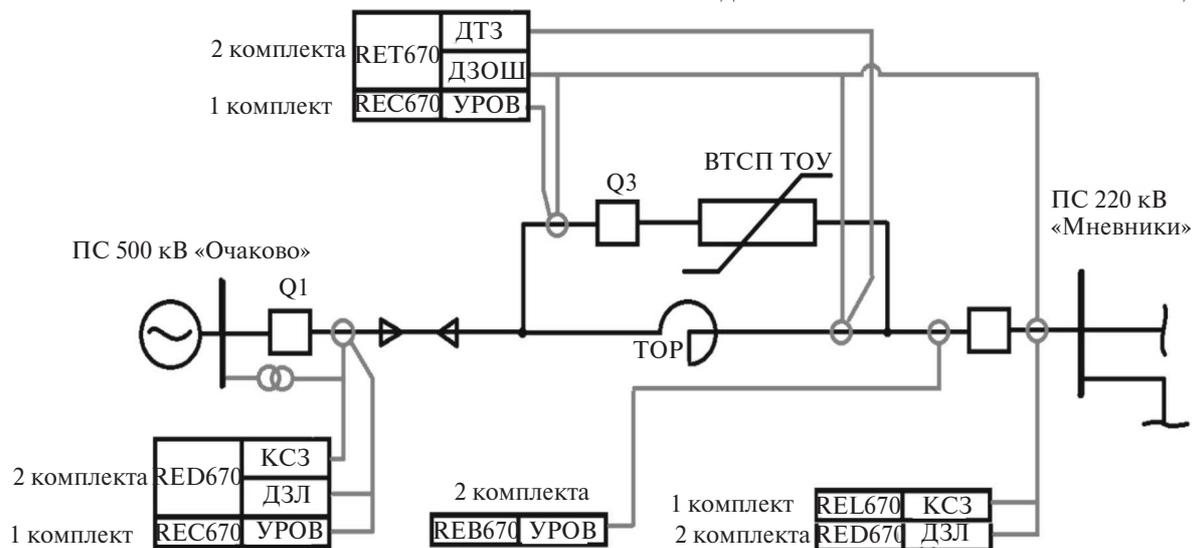


Рис. 8. Схема размещения защит ВТСП ТОУ

Fig. 8. SFCL protection layout

быть отключен. Обеспечение термической стойкости в случае отказа в отключении выключателя ЛЭП или ВТСП ТОО достигнуто путем снижения выдержки времени УРОВ с 0,4 до 0,2 с. Дополнительным мероприятием стала установка делительной токовой защиты ДТЗ, резервирующая вывод ВТСП ТОО из работы при его переходе в режим токоограничения при внешних КЗ и максимальной токовой защиты, резервирующей вывод ВТСП ТОО из работы в случае длительного протекания тока короткого замыкания, превышающего номинальное значение, но без перехода ВТСП ТОО в режим токоограничения.

Во-вторых, потребовалось пересмотреть принципы выбора параметров настройки пусковых органов РЗА электрической сети для обеспечения селективности работы первых ступеней резервных защит при внешних КЗ, а также чувствительности основных защит КЛ и ВТСП ТОО. Параметры настройки первых зон резервных защит без выдержки времени выбираются в предположении нулевого значения сопротивления ВТСП ТОО при внешних КЗ. Для обеспечения чувствительности основных защит выбор их параметров проводится с учетом максимально возможного сопротивления ВТСП ТОО – сопротивления термической стойкости.

Третья проблема – возможность перехода ВТСП ТОО в резистивный режим с необходимостью последующего отключения ВТСП ТОО при коротких замыканиях во внешней сети (например, при коротком замыкании за трансформатором на прилегающей подстанции ТКЗ превышает ток перехода ВТСП ТОО в резистивный режим, равный 3400 А). Для того чтобы отключение ВТСП ТОО не привело к отключению КЛ, ВТСП ТОО отключается действием делительной токовой защиты на выключатель ВТСП ТОО, в то время как КЛ остается в работе с включенным ТОР.

Четвертая проблема – возможность появления высших гармоник и резкое снижение тока КЗ при переходе ВТСП ТОО в режим ограничения тока, что может привести к замедлению или отказу функционирования защит, поскольку пусковые органы и алгоритмы РЗА должны обеспечить работоспособность в нерасчетном для них режиме резкого снижения величины тока КЗ. Для выяснения особенностей работы защит в сети с ВТСП ТОО были выполнены испытания терминалов РЗА (идентичных установленным на ЛЭП с ВТСП ТОО) на программно-аппаратном комплексе реального времени *RTDS* (рис. 9). На вход устройств РЗА подавались токи при различных видах КЗ с учетом динамики их ограничения ВТСП ТОО и оценивалась работоспособность защит: надежность

функционирования, время отклика измерительных и пусковых органов, время срабатывания защит и т.д. При исследованиях на *RTDS* применялись осциллограммы ТКЗ, полученные при натуральных испытаниях ВТСП ТОО, а также осциллограммы на основе применения цифрового двойника устройства.

В основе цифрового двойника лежит температурная зависимость сопротивления действующего элемента ВТСП ТОО – сверхпроводника [16]. Эта зависимость была определена при натуральных испытаниях устройства токами короткого замыкания. Температурная зависимость закладывается в специально разработанный программный комплекс, который анализирует условия работы ВТСП ТОО (схему прилегающей сети, уровни напряжений, удаленность места КЗ). Далее программный комплекс итерационно с дискретностью в единицы мс вычисляет количество энергии, рассеиваемое ВТСП ТОО при коротком замыкании, что позволяет определить температуру токоограничивающего элемента, а значит и сопротивление ВТСП ТОО, в любой момент работы устройства. Цифровой двойник позволяет моделировать влияние ВТСП ТОО на изменение параметров ТКЗ в сети и использовать эти данные для испытаний устройств РЗА, прогнозировать работу ВТСП ТОО в режимах, которые сложно воссоздать в условиях испытательных центров (например, при коротком замыкании за трансформатором прилегающей подстанции). Основанием для применения цифрового двойника при испытаниях РЗА и расчетах электрических величин стала верификация программного комплекса по экспериментальным данным, полученным в результате испытаний ВТСП ТОО в исследовательских центрах.

При включении ВТСП ТОО в сеть появляются вторая и пятая гармонические составляющие тока, значение которых в отдельных случаях может достигать 25% значения первой гармоники.

Появление в токе гармонических составляющих большой интенсивности может негативно отразиться на функционировании устройств РЗА. По результатам проведенных исследований функционирования устройств РЗА на программно-аппаратном комплексе реального времени *RTDS* установлено, что при переходе ВТСП ТОО в резистивный режим работы срабатывание устройства блокировки при появлении гармонических составляющих, предназначенной для исключения излишнего срабатывания защит при бросках тока намагничивания, приводит к задержке в срабатывании дифференциальных защит (ДЗЛ и ДЗОШ) на время порядка 30 мс. При рассмотрении условий функцио-

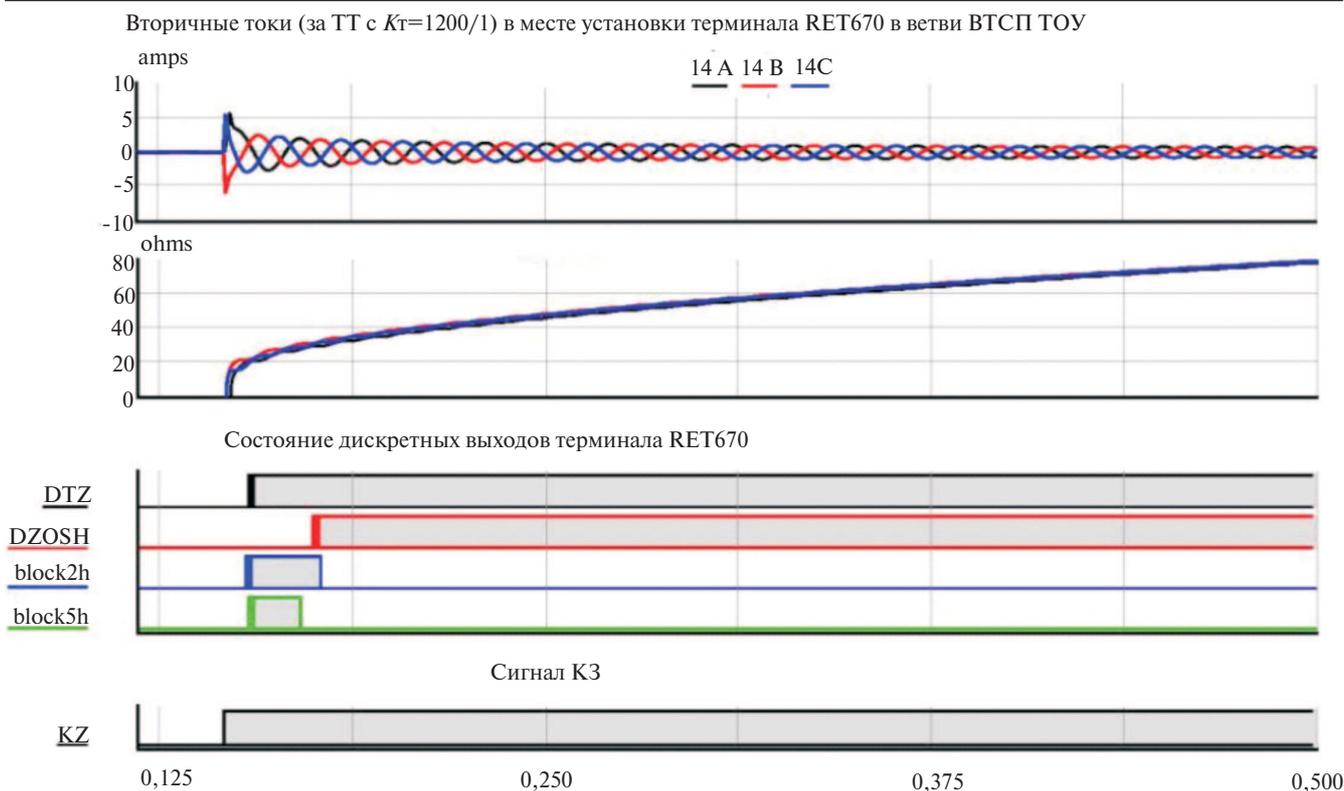


Рис. 9. Испытания терминалов релейной защиты в комплексе RTDS в сети с ВТСП ТОУ

Fig. 9. Testing of relay protection terminals in the RTDS complex in the network with SFCL

нирования устройств РЗА электрической сети при установленном ВТСП ТОУ на ПС 220/20 кВ «Мневники» в связи с отсутствием проблемы бросков тока намагничивания и в целях предотвращения задержки срабатывания защит при КЗ было принято решение о целесообразности вывода из работы вышеуказанных блокировок в микропроцессорных терминалах РЗА.

В итоге применение цифрового двойника позволило всесторонне проанализировать работу защит электрической сети. Исследования функционирования устройств РЗА подтвердили работоспособность устройств РЗА, установленных в электрической сети 220 кВ мегаполиса, в том числе в нерасчетных для них режимах резкого снижения величины тока КЗ при переходе ВТСП ТОУ в резистивный режим работы.

Для решения вопросов эксплуатации электрической сети с ВТСП ТОУ потребовалось дополнить методики проверки соответствия отключающей способности выключателей рассчитанным токам и параметров настройки устройств РЗА, что было успешно выполнено совместными усилиями специалистов АО «СО ЕЭС», АО «ОЭК» и ЗАО «Супер-Окс».

Решение перечисленных проблем позволило не только обеспечить защиту устройства с применением типовых устройств РЗА сети, но и позволило

выработать рекомендации для будущих модификаций ВТСП ТОУ.

Поскольку традиционный набор средств РЗА не всегда может обеспечить отключение ВТСП ТОУ за время, не превышающее время термической стойкости, для новых ВТСП ТОУ рекомендовано повысить время термической стойкости – в настоящее время разработаны решения по повышению времени термической стойкости ВТСП ТОУ до 1,0 с.

Для схемы включения ВТСП ТОУ в ЛЭП без параллельно установленного ТОР рекомендовано применять ВТСП ТОУ с возможностью восстановления сверхпроводящего состояния под нагрузкой, что повышает эффективность применения АПВ и надежность работы электрической сети.

Опыт эксплуатации ВТСП ТОУ в электрической сети г. Москвы. Совместными усилиями АО «ОЭК», ПАО «Россети» и АО «СО ЕЭС» был разработан поэтапный план ввода в эксплуатацию ВТСП ТОУ в 2019 г., включающий выполнение пусконаладочных работ, комплексных испытаний оборудования, разработку эксплуатационно-методической документации, разработку и реализацию программ ввода оборудования в эксплуатацию.

По состоянию на конец 2020 г. ВТСП ТОУ на ПС 220/20 кВ «Мневники» уже более 20 мес. находится в номинальном рабочем режиме (в низко-

температурном состоянии) и более 10 мес. – при непрерывном протекании электрического тока через ВТСП ТОУ (под постоянной электрической нагрузкой). В ходе эксплуатации устройство полностью подтвердило заявленные характеристики, включая передачу электроэнергии в условиях характерной для объекта установки электрической нагрузки (вплоть до 60% номинального тока ВТСП ТОУ), надежность системы криогенного охлаждения и эффективность ограничения ТКЗ электрической сети, подтвердив правильность принятых технических решений.

В течение периода эксплуатации ВТСП ТОУ произошло несколько остановок элементов системы криогенного охлаждения (в том числе одного из криогенных охладителей в связи с его неисправностью). Несмотря на указанные нарушения в работе системы криогенного охлаждения, ВТСП ТОУ продолжал функционировать в номинальном режиме;

Во всех случаях коротких замыканий технологические параметры криогенной системы (перепад температуры в Фазах ДТ, давление в системе криогенного охлаждения Др, уровень жидкого азота ДЛ) оставались в пределах рекомендованных производителем интервалов;

Устройства РЗА работали штатно (см. табл. 2).

Развитие технологии применения ВТСП ТОУ.

Учитывая положительные результаты пилотного проекта ВТСП ТОУ, АО «ОЭК» объявило конкурс на проектирование двух ВТСП ТОУ на ПС 220/20 кВ «Горьковская» (расположена в восточной части Москвы). В этом проекте ВТСП ТОУ также устанавливаются в кабельные линии 220 кВ и обеспечивают защиту как самих линий, так и коммутационного оборудования прилегающих подстанций (рис. 10). Предполагается, что стадия проектирования и закупки будет завершена в 2021 г., а поставка устройств – в 2022 г.

По итогам обсуждения опыта пилотного внедрения ВТСП ТОУ на ПС 220/20 кВ «Мневники» представителями Минэнерго России, АО «ОЭК», АО «СО ЕЭС», ПАО «Россети» и ЗАО «СуперОкс»

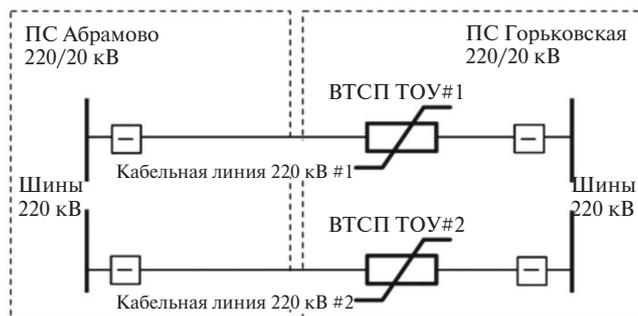


Рис. 10. Упрощенная схема установки двух новых ВТСП ТОУ
Fig. 10. Simplified diagram of the two new SFCLs installation

производителем были скорректированы технические характеристики ВТСП ТОУ и согласованы перспективные схемы включения последующих ВТСП ТОУ в сеть. Для двух новых устройств на ПС 220/20 кВ «Горьковская» намечены следующие технические решения:

установка двух ВТСП ТОУ в две параллельные кабельные линии (каждая 12 км в длину);

установка ВТСП ТОУ без токоограничивающих реакторов;

повышенная термическая стойкость к воздействию ТКЗ (более 400 мс при КЗ на ошиновке ВТСП ТОУ и более 1000 мс при удаленных КЗ);

заложена в проекте возможность восстановления сверхпроводящих свойств ВТСП ТОУ под нагрузкой;

новая система защит ВТСП ТОУ, контролирующая состояние ВТСП ТОУ посредством измерения его сопротивления.

Установка двух новых ВТСП ТОУ увеличит пропускную способность загруженной городской энергосистемы в восточной части Москвы. Эти устройства являются частью программы развития электроэнергетики города, которая включает в себя установку в дальнейшем еще шести ВТСП ТОУ 220 кВ.

В то же время при проведении дальнейших работ необходимо учитывать, что любой новый проект, предполагающий применение ВТСП ТОУ с иными по сравнению с ВТСП ТОУ на

Таблица 2

Результаты эксплуатации ВТСП ТОУ 220 кВ
Results of SFCL 220 kV operation

Дата	Тип замыкания	Срабатывание (переход в несверхпроводящее состояние)	Функционирование системы охлаждения	Работа систем РЗА
2020-04-16	Однофазное	Да	Номинальное: DT = 2 К Dp < 0.1 бар DL < 0.01 м	корректно
2020-07-14	Двухфазное	Нет*		корректно
2020-10-12	Однофазное	Нет*		корректно
2020-11-05	Однофазное	Нет*		корректно

* ТКЗ ниже тока срабатывания устройства (3400 А)

ПС 220/20 кВ «Мневники» характеристиками и иную схему включения устройств в сеть, потребует серьезной исследовательской работы, поскольку новации, связанные с новыми условиями применения ВТСП ТОУ, неизбежно приведут к возникновению проблем внедрения и поиску новых технических решений. И в первую очередь это касается исследования взаимного влияния двух ВТСП ТОУ на их рабочие характеристики и на характеристики ТКЗ при одновременном переходе ВТСП ТОУ в режим токоограничения, оценки влияния несимметричного режима во время восстановления сверхпроводящих характеристик ВТСП ТОУ под нагрузкой на функционирование устройств РЗА прилегающей электрической сети, вопросов совершенствования алгоритмов функционирования устройств РЗА в части идентификации высших гармонических составляющих ТКЗ, вызванных работой ВТСП ТОУ, вопросов применения АПВ элементов сети до восстановления сверхпроводящей характеристики ВТСП ТОУ и готовности схемы токоограничения к действию при следующем КЗ, типизации технических решений по системе РЗА для электрических сетей с ВТСП ТОУ.

Заключение. Совместные усилия компаний АО «ОЭК», АО «СО ЕЭС», ПАО «Россети» и ЗАО «СуперОкс» позволили реализовать пилотный проект применения сверхпроводящего оборудования в энергосистеме Российской Федерации, заложив основу для системного внедрения технологии токоограничивающего устройства на основе высокотемпературной сверхпроводимости. ЗАО «СуперОкс» разработало, изготовило и провело всесторонние испытания ВТСП ТОУ на класс напряжения 220 кВ. Специально разработанные решения позволили интегрировать новое оборудование в энергосистему Москвы и Московской области. На ПС 220/20 кВ «Мневники» ВТСП ТОУ находится в непрерывной эксплуатации с 2019 г., в ходе которой устройство полностью подтвердило заявленные технические характеристики и эффективность ограничения ТКЗ в электрической сети мегаполиса.

Последующее развитие предполагает установку двух новых ВТСП ТОУ в энергосистеме Москвы и Московской области к 2022 г. с внедрением впоследствии еще шести устройств, реализуя на практике разработку и применение инновационных технологий в российской электроэнергетике. Эти устройства будут иметь новые, отличные от ВТСП ТОУ на ПС 220/20 кВ «Мневники», технические характеристики и схему включения в сеть. При этом необходимо учитывать, что новые условия применения ВТСП ТОУ неизбежно потребуют проведения научных исследований и поиска новых технических решений, направленных на обеспече-

ние эффективной работы оборудования и надежной работы энергосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **CIGRE TB 239.** Fault current limiters in electrical medium and high voltage systems, WG A3.10 (High Voltage Equipment), December 2003, 80 p.
2. **Xueguang Wu, Mutale J., Jenkins N., Strbac G.** An investigation of Network Splitting for Fault Level Reduction. – Tyndall Centre for Climate Change Research, 2003, 25 p.
3. **Foote C.E.T., Ault G.W., McDonald J.R., Beddoes A.J.** The impact of network splitting on fault levels and other performance measures. – CIGRE 2005, 18th International Conference on Electricity Distribution. Turin, 2005, session 5, pp.1–6
4. **Labos W., Grossmann P.** Case study – 80 kA gas insulated substation Bergen switching station – New Jersey. – IEEE PES T&D Conference and exposition, 2014.
5. **Patil S., Thorat A.** Development of fault current limiters: a review. – International Conference on Data Management, Analytics and Innovation (ICDMAI), Pune, India, Feb 24–26, 2017 IEEE, 2017, pp. 122–126.
6. **Safaei A., Zolfaghari M., Gilvanejad M., Gharehpetian G.B.** A survey of fault current limiters: development and technical aspects. – Electrical Power Energy Systems, 2020, vol.118, 105729 (18 p.).
7. **Markelov A., Valikov A., Chepikov V., Petrzhik A., Massalimov B., Degtyarenko P., Uzkhih R., Soldatenko A., Molodyk A., Sim K., Hwang S.** 2G HTS wire with enhanced engineering current density attained through the deposition of HTS layer with increased thickness. – Progress in Superconductivity and Cryogenics, 2019, vol.21, No.4, pp.29–33.
8. **Samoilenkov S., Molodyk A., Lee S., Petrykin V., Kalitka V., Martynova I., Makarevich A., Markelov A., Moyzykh M., Blednov A.** Customised 2G HTS wire for applications. – Superconductor Science Technology, 2016, vol. 29, No.2, pp. 024001–024010.
9. **Chepikov V., Mineev N., Degtyarenko P., Lee S., Petrykin V., Ovcharov A., Vasiliev A., Kaul A., Amelichev V., Kamenov A., Molodyk A., Samoilenkov S.** Introduction of BaSnO₃ and BaZrO₃ artificial pinning centers into 2G HTS wires based on PLD-GdBCO films. Phase I of the industrial R&D programme at SuperOx. – Superconductor Science Technology, 2017, vol.30, No.12, pp. 124001–124012.
10. **Superconducting Fault Current Limiter: Innovation for the Electric Grids**, ed. Tixador P., World Scientific, 2018, 407 p.
11. **АО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ».** Оценка технико-экономического эффекта применения токоограничивающих устройств на основе высокотемпературной сверхпроводимости для условий энергосистемы г. Москвы и Московской области, Этап 1, Книга 1, 2016, 356 с.
12. **Kraemer H.-P. et al.** Superconducting fault current limiter for transmission voltage. – Physics Procedia, 2012, vol. 36, pp. 921–926.
13. **Han Y.-H. et al.** Development and long-term test of a compact 154-kV SFCL. – IEEE Transactions Applied Superconductivity. 2019, vol.29, No.4, 5600106, DOI: 10.1109/TASC.2018.2880325.
14. **CIGRE TB 644.** Common characteristics and emerging test techniques for high temperature superconducting power equipment, WG D1.38, December 2015, 154 p.
15. **C37.302–2015** IEEE Guide for Fault Current Limiter (FCL) Testing of FCLs Rated above 1000 V AC. IEEE, 2016, 53 p.
16. **Mineev N.A., Gorbunova D.A., Moyzykh M.E.** Model of calculating the response of a superconducting fault current limiter in the electrical grid. – International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2018, vol. 9, No.12, pp. 722–728.



А в т о р ы : Мойзых Михаил Евгеньевич – кандидат хим. наук, технический директор ЗАО «СуперОкс».



Самойленков Сергей Владимирович – кандидат хим. наук, генеральный директор ЗАО «СуперОкс».



Вавилов Андрей Петрович – доктор экон. наук, председатель совета директоров ЗАО «СуперОкс».



Прохоров Евгений Сергеевич – генеральный директор АО «Объединенная энергетическая компания».



Пучков Андрей Сергеевич – заместитель генерального директора – технический директор АО «Объединенная энергетическая компания».



Майоров Андрей Владимирович – кандидат техн. наук, член правления, первый заместитель генерального директора – главный инженер ПАО «Россети».



Жуков Андрей Васильевич – кандидат техн. наук, Советник директора АО «Системный оператор Единой Энергетической Системы».



Байбеков Рустам Лекманович – начальник Службы РЗА Филиала АО «Системный оператор Единой Энергетической Системы» (СО ЕЭС) «Региональное диспетчерское управление энергосистемы г. Москвы и Московской области» (Московское РДУ).



Токарева Оксана Викторовна – ведущий специалист Службы РЗА АО «Системный оператор Единой Энергетической Системы».

Elektrichestvo, 2021, No. 4, pp. 4–16

DOI:10.24160/0013-5380-2021-4-4-16

First Superconducting Fault Current Limiter in Russian Power Grid

MOZAH Michael E. (CJSC «SuperOx», Moscow, Russia) – Technical Director, Cand. Sci. (Chem.)

SAMOYLENKOV Sergey V. (CJSC «SuperOx», Moscow, Russia) – General Director, Cand. Sci. (Chem.)

VAVILOV Andrey P. (CJSC «SuperOx», Moscow, Russia) – Chairman of the Board of Directors, Dr. Sci. (Econom.)

PROKHOROV Evgeny P. (JSC «United Energy Company» (JSC «UNECO»), Moscow, Russia) – General Director

PUCHKOV Andrey S. (JSC «United Energy Company» (JSC «UNECO»), Moscow, Russia) – Deputy General Director – Technical Director

MAYOROV Andrey V. (PJSC ROSSETI, Moscow, Russia) – Member of the Management Board and First Deputy Director General and Chief Engineer, Cand. Sci. (Eng.)

ZHUKOV Andrey V. (JSC «System Operator of the Unified Energy System», Moscow, Russia) – Adviser to the Director, Cand. Sci. (Eng.)

BAYBEKOV Rustam L. (The Branch of JSC «System Operator of the Unified Energy System» (SO UES) «Regional Dispatching Department of the Power System of Moscow and the Moscow Region», Moscow, Russia) – Head of the Relay Protection and Automation Service

TOKAREVA Oksana V. (JSC «System Operator of the Unified Energy System», Moscow, Russia) – Leading Specialist of the Relay Protection and Automation Service

Superconducting fault current limiter (SFCL) is an innovative method for reducing the level of short-circuit currents in high-voltage electrical networks. This reduces the number of points of separation of the electrical network in conditions of short-circuit current limitation and thereby increases the network capacity and reliability of power supply to consumers. At the same time, the development of such devices poses new challenges for power engineers related to the integration of this equipment into the existing power system. The article discusses the process of implementation and pilot operation of the SFCT 220 kV pilot project (produced by CJSC “SuperOx”) at the 220/20 kV “Mnevniki” high-voltage substation in Moscow. The project required an extensive set of scientific studies and tests to confirm the characteristics of new devices and the possibility of their use in Russian power systems, the use of digital modeling technologies to test the operability of relay protection devices, as well as the development of new methodological documents for calculating the short-circuit current and relay protection parameters. As a result of the work, SFCT was switched on at the 220/20 kV “Mnevniki” substation at the end of 2019. The subsequent operation of the

SFCT in 2019–2020 fully confirmed the declared characteristics of the device and the correctness of the selected technical solutions. The article is devoted to the features of the process of integrating a new device into the existing power system, the main technical solutions, the results of testing and operation of the device, as well as possible prospects for the development of SFCT technology.

Key words: *high-temperature superconductivity, current-limiting device, short-circuit current, tests, relay protection, SFCT, real-time hardware and software complex, 220/20 kV “Mnevniki” substation*

REFERENCES

1. **CIGRE TB 239.** Fault current limiters in electrical medium and high voltage systems, WG A3.10 (High Voltage Equipment), December 2003, 80 p.
2. **Xueguang Wu, Mutale J., Jenkins N., Strbac G.** An investigation of Network Splitting for Fault Level Reduction. – Tyndall Centre for Climate Change Research, 2003, 25 p.
3. **Foot C.E.T., Ault G.W., McDonald J.R., Beddoes A.J.** The impact of network splitting on fault levels and other performance measures. – CIGRE 2005, 18th International Conference on Electricity Distribution. Turin, 2005, session 5, pp.1–6
4. **Labos W., Grossmann P.** Case study – 80 kA gas insulated substation Bergen switching station – New Jersey. – IEEE PES T&D Conference and exposition, 2014.
5. **Patil S., Thorat A.** Development of fault current limiters: a review. – International Conference on Data Management, Analytics and Innovation (ICDMAI), Pune, India, Feb 24–26, 2017 IEEE, 2017, pp. 122–126.
6. **Safaei A., Zolfaghari M., Gilvanejad M., Gharehpetian G.B.** A survey of fault current limiters: development and technical aspects. – Electrical Power Energy Systems, 2020, vol.118, 105729 (18 p.).
7. **Markelov A., Valikov A., Chepikov V., Petrzhek A., Massalimov B., Degtyarenko P., Uzkih R., Soldatenko A., Molodyk A., Sim K., Hwang S.** 2G HTS wire with enhanced engineering current density attained through the deposition of HTS layer with increased thickness. – Progress in Superconductivity and Cryogenics, 2019, vol.21, No.4, pp.29–33.
8. **Samoilenkov S., Molodyk A., Lee S., Petrykin V., Kalitka V., Martynova I., Makarevich A., Markelov A., Moyzykh M., Blednov A.** Customised 2G HTS wire for applications. – Superconductor Science Technology, 2016, vol. 29, No.2, pp. 024001–024010.
9. **Chepikov V., Mineev N., Degtyarenko P., Lee S., Petrykin V., Ovcharov A., Vasiliev A., Kaul A., Amelichev V., Kamenev A., Molodyk A., Samoilenkov S.** Introduction of BaSnO₃ and BaZrO₃ artificial pinning centers into 2G HTS wires based on PLD-GdBCO films. Phase I of the industrial R&D programme at SuperOx. – Superconductor Science Technology, 2017, vol.30, No.12, pp. 124001–124012.
10. **Superconducting Fault Current Limiter: Innovation for the Electric Grids**, ed. Tixador P., World Scientific, 2018, 407 p.
11. JSC «Institute» ENERGOSETPROEKT». Otsenka tekhniko-ekonomicheskogo effekta primeneniya tokoogranichivayushchikh ustrojstv na osnove vysokotemperaturnoj csverkhprovodimosti dlya uslovij energosistemy g. Moskvy i Moskovskoj oblasti, Etap 1, Kniga 1 (Assessment of the technical and economic effect of the use of current limiting devices based on high-temperature superconductivity for the conditions of the power system of Moscow and the Moscow region, Stage 1, Book 1). M., 2016, 356 p.
12. **Kraemer H.-P. et al.** Superconducting fault current limiter for transmission voltage. – Physics Procedia, 2012, vol. 36, pp. 921–926.
13. **Han Y.-H. et al.** Development and long-term test of a compact 154-kV SFCL. – IEEE Transactions Applied Superconductivity. 2019, vol.29, No.4, 5600106, DOI: 10.1109/TASC.2018.2880325.
14. **CIGRE TB 644.** Common characteristics and emerging test techniques for high temperature superconducting power equipment, WG D1.38, December 2015, 154 p.
15. **C37.302–2015 IEEE Guide for Fault Current Limiter (FCL) Testing of FCLs Rated above 1000 V AC.** IEEE, 2016, 53 p.
16. **Mineev N.A., Gorbunova D.A., Moyzykh M.E.** Model of calculating the response of a superconducting fault current limiter in the electrical grid. – International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2018, vol. 9, No. 12, pp. 722–728.

[22.12.2020]