

# ПРИМЕНЕНИЕ ВТСП КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

АВТОРЫ:

СЫТНИКОВ В.Е.,  
Д.Т.Н.,  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

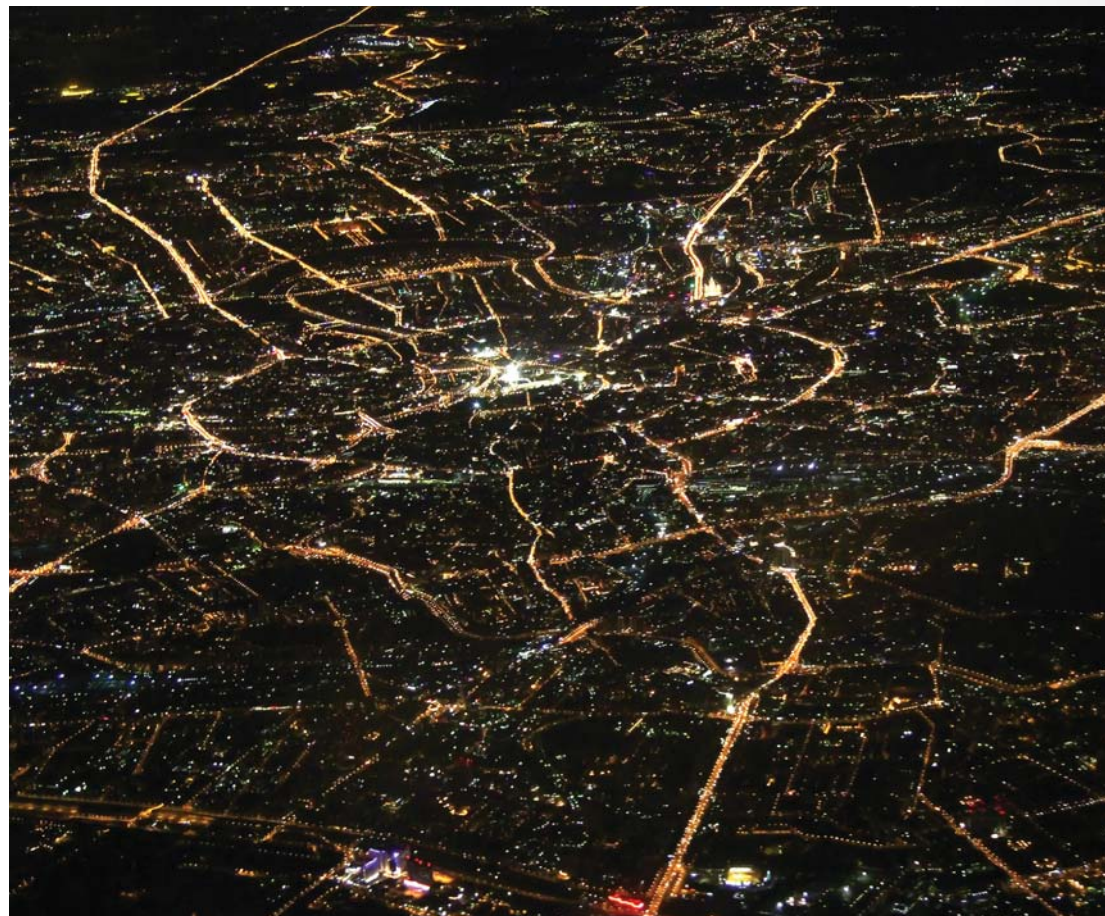
РЯБИН Т.В.,  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

СОРОКИН Д.В.,  
К.Т.Н.,  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

**В** 1986 году сотрудники IBM Георг Беднорц и Алекс Мюллер создали совершенно новый материал, который проявлял сверхпроводящие свойства при относительно высоких температурах. Помимо всего прочего, это открытие позволило

создать путь для разработки новых видов электротехнических устройств на основе сверхпроводников. Современные исследования, проводимые во многих странах мира, показали, что такие устройства способны работать при охлаждении дешевым и легкодоступным жидким азотом.

**Ключевые слова:** сверхпроводящие кабели; электрическая сеть; критический ток; криогеника.



Электроэнергетика обеспечивает жизнедеятельность и безопасность общества и государства. При этом электрические сети являются технологическим ядром энергосистемы

## ВВЕДЕНИЕ

Насущные проблемы электроэнергетики XXI в. требуют создания интеллектуальных энергетических систем, обеспечивающих высокую эффективность выработки, транспортировки и потребления электроэнергии. Одновременно повышаются требования к управляемости энергосистемы, а также к экологическим и ресурсосберегающим характеристикам на всех этапах производства и распределения электроэнергии.

Одним из путей решения многих проблем электроэнергетики является создание нового Я для интеллектуальной электроэнергетической системы на базе сверхпроводниковых технологий. Таким образом обеспечивается качественно новый уровень функционирования электроэнергетики.

В большинстве промышленно развитых стран мира ведутся интенсивные исследования и разработки новых видов электротехнических устройств на основе сверхпроводников. Интерес к таким разработкам особенно усилился в последние годы в связи с открытием так называемых высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), не требующих сложных и дорогих охлаждающих приборов. Такие устройства способны работать при охлаждении дешевым и легкодоступным жидким азотом.

Принимая во внимание очевидные преимущества сверхпроводящих кабельных линий при передаче больших потоков электроэнергии через электрические сети по сравнению с традиционными кабелями, Федеральной сетевой компанией Единой энергетической системы (ПАО «ФСК ЕЭС») была принята программа НИОКР. Она включает создание высокотемпературных сверхпроводящих кабельных линий (ВТСП КЛ) переменного и постоянного тока. Две кабельные линии на передаваемую мощность

50 МВА/МВт при 20 кВ были изготовлены и испытаны в рамках программы. Учитывая тот факт, что результаты разработки и испытаний ВТСП линии переменного тока были достаточно полно опубликованы ранее, основное внимание в статье уделено результатам испытаний и перспективам широкого внедрения ВТСП кабельных линий постоянного тока в электроэнергетику.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКУ

Во всем мире ведутся активные исследования и разработки различных типов электротехнических устройств на основе высокотемпературных сверхпроводников. Это силовые кабели, токоограничители, индуктивные накопители энергии, электрические машины и пр. Именно силовые сверхпроводящие кабели являются наиболее разработанным и продвинутым способом применения сверхпроводимости в электроэнергетике в настоящее время [1, 2].

Основными преимуществами сверхпроводящих кабелей являются:

- высокая эффективность в связи с малыми потерями энергии в сверхпроводнике;
- возможность замены существующего кабеля на кабель с большей передаваемой мощностью при тех же габаритах;
- легкий вес за счет меньшего количества используемого материала;
- увеличение «жизненного цикла» кабеля в резуль-

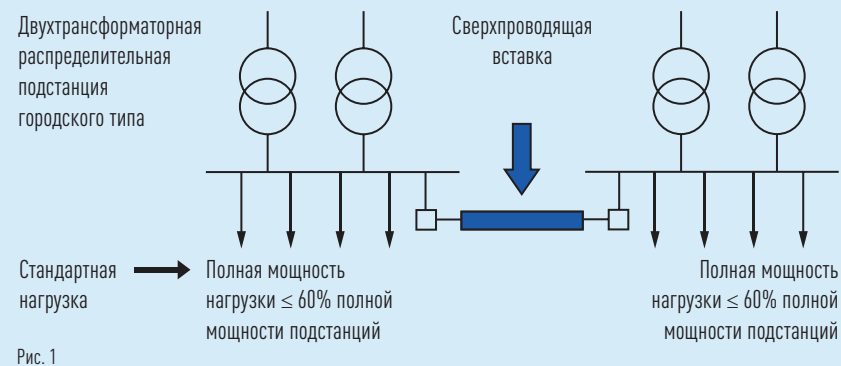
тате замедления процессов старения изоляции;

- низкий импеданс и большая критическая длина;
- отсутствие электромагнитных и тепловых полей рассеяния, экологическая чистота и пожаробезопасность;
- возможность передачи больших мощностей при сравнительно низком напряжении.

ВТСП КЛ постоянного и переменного тока являются инновационной разработкой, позволяющей решить значительную часть проблем электрических сетей. Однако при использовании ВТСП КЛ постоянного тока приобретает еще и новое качество передачи, так как линия становится управляемым элементом сети, регулирующим потоки передаваемой энергии вплоть до реверса передачи. ВТСП КЛ постоянного тока имеют ряд дополнительных преимуществ по сравнению с линиями переменного тока, а именно:

- ограничение токов короткого замыкания, что позволяет соединить по «низкой» стороне отдельные секторы энергосистемы без увеличения токов короткого замыкания;
- повышение устойчивости сети и предотвращение каскадных отключений потребителей за счет взаимного резервирования энергоагрегатов;
- регулирование распределения потоков мощности в параллельных линиях;
- передача мощности с минимальными потерями в кабеле и, как следствие, снижение требований к криогенной системе;
- возможность связи несинхронизированных энергосистем.

## ВОЗМОЖНАЯ СХЕМА СОЕДИНЕНИЯ ДВУХ ПОДСТАНЦИЙ



В электрических сетях возможно создание схемы с применением как ВТСП КЛ переменного, так и линий постоянного тока. Обе системы имеют свои предпочтительные области применения, и в конечном итоге выбор определяется как техническими, так и экономическими соображениями.

ВТСП КЛ переменного тока целесообразны в тех случаях, когда необходима передача больших потоков электроэнергии на распределительном напряжении, а также при замене воздушных линий на кабельные без изменения класса напряжения. Возможна также передача энергии непосредственно с шин генератора на подстанцию или в распределительную сеть.

ВТСП КЛ постоянного тока, выполняя те же функции, что и ВТСП КЛ переменного тока, способны также осуществлять функцию ограничения управления токов короткого замыкания и управление потоками мощности. Поэтому, когда помимо передачи больших потоков мощности на низком напряжении требуется еще и обеспечить и функцию ограничения токов короткого замыкания и управления потоками мощности, (что характерно для мегаполисов),

ВТСП КЛ постоянного тока наиболее предпочтительны. Кроме того, сверхдальние кабельные передачи возможны только при использовании линий постоянного тока.

Принимая во внимание очевидные преимущества ВТСП КЛ, во многих странах (США, Южная Корея, Китай, Япония, Европа) проводятся работы по созданию и опытной эксплуатации таких линий для различных целей. В России по инициативе РАО ЕЭС, а затем ПАО «ФСК ЕЭС», проводятся работы, целью которых является создание ВТСП КЛ постоянного и переменного токов на напряжение 20 кВ. При реализации этих проектов предусматривается как создание собственно сверхпроводящей кабельной линии, так и всей необходимой инфраструктуры: криогенной станции, токовых вводов, соединительных муфт, преобразовательных подстанций, систем диагностики, управления и защиты. Создана научно-производственная кооперация производителей всех элементов кабельных линий. В ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» введен в эксплуатацию криогенный стенд для проведения испытаний ВТСП кабелей постоянного и переменного токов.

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ВСТАВКИ МЕЖДУ ПОДСТАНЦИЯМИ В МЕГАПОЛИСАХ

Энергетические сети мегаполисов являются динамично развивающейся структурой, которая имеет следующие особенности:

- быстрый рост потребления энергии, что обычно превышает средний темп роста потребления по всей стране;
- высокая плотность энергопотребления;
- наличие «дефицитных» по энергообеспечению районов;
- высокая степень разветвленности распределительных электрических сетей, что обусловлено необходимостью многократного дублирования линий электропитания потребителей;
- секционирование электрической сети с целью уменьшения токов короткого замыкания.

Все эти факторы в конечном счете определяют основные проблемы в сетях городских агломераций, а именно:

- высокий уровень потерь электроэнергии в распределительных сетях;
- высокие уровни токов короткого замыкания, значения которых в некоторых случаях превосходят отключающую способность коммутационного оборудования;
- низкий уровень управляемости.

При этом нагрузка подстанций в городе очень неравномерна. Во многих

случаях трансформаторы подстанций загружены только на 30–60%. Как правило, подстанции глубокого ввода в городах запитываются по отдельным линиям высокого напряжения. Соединение подстанций на стороне среднего напряжения может обеспечить взаимное резервирование энергоагрегатов и высвободить резервные трансформаторные мощности, что в конечном итоге приведет к снижению потерь энергии в сети. Кроме того, такой тип подключения позволяет использовать высвободившиеся мощности для подключения дополнительной нагрузки без необходимости ввода в эксплуатацию новых трансформаторов или строительства новых подстанций и линий электропередачи [3, 4, 5]. Рис. 1 иллюстрирует эту концепцию.

Как видно из рисунка, при наличии вставки три трансформатора полностью обеспечат электроэнергией присоединенных потребителей при загрузке не более 80%. Четвертый трансформатор и питающая его линия могут быть выведены в оперативный резерв, что приведет к снижению потерь энергии. Также они могут использоваться для подключения дополнительных потребителей. Такая вставка может быть выполнена как по традиционным технологиям, так и с использованием сверхпроводящих кабельных линий.

Однако при передаче больших потоков энергии на распределительном напряжении сверхпроводящие линии имеют неоспоримые преимущества. Основной проблемой при реализации вышеприведенной схемы является тот факт, что прямое соединение подстанций приведет к существенному увеличению тока короткого замыкания. Данная схема станет работоспособна только в том случае, если вставка будет выполнять две функции: передачу мощности и ограничение токов короткого замыкания. В связи с тем, что решение задачи создания вставки сулит большие перспективы по совершенствованию систем элек-

троснабжения мегаполисов, в настоящее время в мире осуществляются три крупных научных проекта:

1. **Проект HYDRA, Нью-Йорк, США** [1, 6]. Цель проекта — разработка и установка сверхпроводящей кабельной линии переменного тока между двумя городскими подстанциями в Нью-Йорке. Линия должна обеспечивать связь с высокой пропускной способностью (96 МВА)

между подстанциями на стороне вторичной обмотки трансформаторов (13,8 кВ). Кабельная система будет иметь способность ограничивать ток короткого замыкания за счет быстрого перехода в нормально проводящее состояние ВТСП лент второго поколения. За счет этого обеспечивается низкое значение сопротивления линии в номинальном режиме (сверхпроводящее

## ОБЪЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ ВТСП КЛ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СХЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

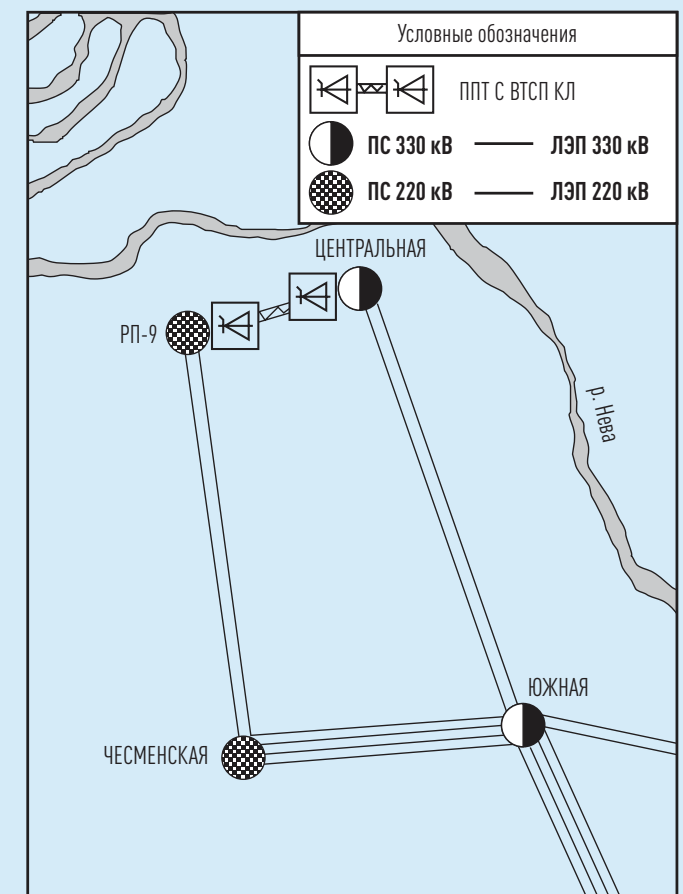


Рис. 2

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Узел расчета токов короткого замыкания	I <sub>откл</sub> , кА	КЛ		ВТСП КЛ	
		переменного тока	I <sup>3</sup> , кА	I <sup>1</sup> , кА	I <sup>3</sup> , кА
Шины 110 кВ ПС «Центральная»	40	39,8	45,6	18,4	20,9
Шины 110 кВ ПС РП-9	31,5	40,6	46,0	29,5	31,4

Обозначения:

I<sup>3</sup> — ток трехфазного короткого замыкания, кА;

I<sup>1</sup> — ток однофазного короткого замыкания, кА;

I<sub>откл</sub> — номинальный ток отключения выключателей, кА (принят по состоянию выключателей подстанции на уровне 2014 г.).

Таблица 1

состояние линии) и переход в состояние с высоким сопротивлением при перегрузке по току.

2. **Проект AmraCity, Эссен, Германия** [2, 7]. Цель проекта — разработка и установка сверхпроводящей передачи переменного тока мощностью 40 МВА между двумя городскими подстанциями. Передача состоит из сверхпроводящего кабеля длиной 1000 м и токоограничителя на напряжение 10 кВ, включенных последовательно. Эта передача соединяет две подстанции 110/10 кВ Herkules и Dellbrugge в центре города Эссен. Реализация проекта позволит вывести из эксплуатации один трансформатор мощностью 40 МВА и линию 110 кВ.

3. **Проект Санкт-Петербург, Россия** [3, 8]. Цель проекта — разработка и установка сверхпроводящей линии постоянного тока мощностью 50 МВт между двумя городскими подстанциями с целью повышения надежности электроснабжения потребителей и огра-

ничения тока короткого замыкания в городской сети Санкт-Петербурга. Проект предусматривает монтаж кабельных линий между подстанцией 330/20 кВ «Центральная» и подстанцией 220/20 кВ РП-9. Сверхпроводящая линия постоянного тока свяжет две подстанции на стороне среднего напряжения 20 кВ. Длина линии — 2500 м, а передаваемая мощность — 50 МВт.

Все три проекта имеют целью передачу высокой мощности на среднем напряжении между двумя подстанциями при одновременном ограничении токов короткого замыкания.

В проекте HYDRA сочетаются функции передачи большой мощности и ограничения тока в одном устройстве — сверхпроводящем кабеле специальной конструкции. Это делает чрезвычайно сложной задачу оптимизации кабеля с учетом возможных сетевых режимов, условий охлаждения и прокладки кабеля. Кроме того, технические решения, разработанные для одного проекта, не могут тиражироваться для других в силу различных режимных условий и условий прокладки, а значит, и условий охлажде-

ния кабеля, который периодически должен переходить из сверхпроводящего состояния в нормально проводящее.

В проекте AmraCity функции передачи мощности и ограничения токов короткого замыкания разделены между кабелем и токоограничителем. Это упрощает задачу разработки каждого устройства и позволяет изготавливать кабель с высокой степенью стабилизации, что невозможно в проекте HYDRA. Разумеется, требуется согласование характеристик кабеля и токоограничителя, однако это не является сложной задачей, и разработанные при выполнении проекта технические решения могут тиражироваться при разработке других линий с аналогичными параметрами.

В Санкт-Петербургском проекте функции передачи мощности и ограничения токов короткого замыкания разделены между кабелем и преобразователями при их соответствующей настройке. Сверхпроводящий кабель постоянного тока, в отличие от кабеля переменного тока, не имеет потерь энергии, что существенно снижает требования к мощности криогенной установки. Однако при данной схеме возникают дополнительные потери энергии в преобразователях. В отличие от двух вышеупомянутых проектов линия постоянного тока является

активным элементом сети и позволяет управлять энергетическими потоками в прилегающих линиях как по направлению, так и по мощности передачи.

## РОССИЙСКАЯ ВТСП КЛ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Как показали выполненные исследования, по сумме критериев наиболее предпочтительным вариантом для внедрения ВТСП КЛ постоянного тока в схеме электроснабжения г. Санкт-Петербурга является сооружение ВТСП кабельной линии между ПС 220 кВ РП-9 и ПС 330 кВ «Центральная». Наиболее существенными критериями, определившими выбор места размещения пилотного проекта, являются следующие:

- повышение управляемости электрических режимов при вводе ВТСП КЛ постоянного тока (обусловленная обеспечением возможности регулирования и реверса передачи);
- повышение надежности электроснабжения (степени резервированности) потребителей без увеличения уровней токов короткого замыкания в энергосистеме;

- возможность размещения необходимого электротехнического и криогенного оборудования ВТСП КЛ на территории выбранных подстанций.

Участок географической карты г. Санкт-Петербурга, на которой ориентировочно показана схема электрических соединений энергорайона, ввода в эксплуатацию ВТСП КЛ постоянного тока РП-9-ПС «Центральная» (линии электропередачи показаны условно без привязки к географическим координатам опор), представлен на рис. 2.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВВОДА ВТСП КЛ ПОСТОЯННОГО ТОКА РП-9-ПС «ЦЕНТРАЛЬНАЯ» НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ

В энергорайоне Центральной части г. Санкт-Петербурга (энерго-район ПС 330 кВ «Центральная» и ПС 220 кВ РП-9) возможно возник-

новение ряда послеаварийных режимов, обусловленных аварийным отключением линий электропередачи и связанных с нарушением электроснабжения потребителей (выделением энергорайонов на изолированную нагрузку).

Расчеты показали, что резервирование электроснабжения потребителей за счет строительства и ввода в эксплуатацию линии электропередачи переменного тока («традиционной» кабельной или воздушной линии электропередачи) ПС 330 кВ «Центральная» — ПС 220 кВ РП-9 невозможно, так как это приводит к повышению тяжести послеаварийных режимов. В частности, ввод в эксплуатацию традиционной линии электропередачи переменного тока ПС 330 кВ «Центральная» — ПС 220 кВ РП-9 приводит к возникновению недопустимых (аварийных) электрических режимов, сопровождающихся токовыми перегрузками смежных электрических сетей.

Избежать возникновения таких аварийных электрических режимов можно за счет ввода в эксплуатацию управляемой передачи постоянного тока с ВТСП КЛ постоянного тока. Ввод в схему ВТСП КЛ постоянного тока в данном случае позволяет реализовать реверсивный поток мощности

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТСП КЛ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Передаваемая мощность	50 МВт	Тип преобразователей	12-пульсный
Номинальное напряжение	20 кВ	Возможность реверса	Предусмотрена
Номинальный ток	2500 А	Холодопроизводительность криогенной установки	12 кВт при 70 К
Рабочая температура	66–80 К	Давление жидкого азота	До 1,4 МПа
Длина	2500 м	Расход жидкого азота	0,1 ÷ 0,6 кг/с

Таблица 2

и обеспечить повышение надежности электроснабжения (степени резервированности) потребителей без возникновения недопустимых (аварийных) электрических режимов.

Управление величиной и направлением потока мощности ВТСП КЛ постоянного тока позволяет также обеспечить возможность:

- снижения потерь активной мощности в электрических сетях (за счет перераспределения и ликвидации «транзитных» потоков мощности);
- подключения новых потребителей на базе существующей электросетевой инфраструктуры (за счет перераспределения потоков мощности и снятия токовых перегрузок электрических сетей в нормальных эксплуатационных и послеаварийных режимах энергосистем).

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВВОДА ВТСП КЛ ПОСТОЯННОГО ТОКА РП-9-ПС «ЦЕНТРАЛЬНАЯ» НА УРОВЕНЬ ТОКОВ КРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

В табл. 1 представлены результаты расчета уровней токов короткого замыкания в энергосистеме для случая ввода в схему «традиционной» кабельной линии переменного тока, а также для случая ввода в схему ВТСП КЛ постоянного тока. Расчеты токов короткого замыкания выполнены на базе применения перспективной схемы энергосистемы г. Санкт-Петербурга

и Ленинградской области на уровень 2020 г.

По результатам расчета токов короткого замыкания видно, что ввод в схему электроснабжения г. Санкт-Петербурга кабельной линии переменного тока РП-9 «Центральная» приводит к росту величины тока короткого замыкания выше уровня номинального тока отключения выключателей. Это означает, что ввод в схему указанной кабельной линии переменного тока невозможен без реализации дополнительных токоограничивающих мероприятий или замены коммутационных аппаратов на подстанциях.

Применение в данном случае ВТСП КЛ постоянного тока не приводит к увеличению токов короткого замыкания в энергосистеме. Таким образом, организация токоограничивающих мероприятий и/или замена коммутационных аппаратов не требуются.



Рис. 3  
Общий вид 860-метровой  
ВТСП КЛ на полигоне

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТСП КЛ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Линия постоянного тока длиной 2500 м на передаваемую мощность 50 МВт соединит две подстанции в г. Санкт-Петербурге 330 кВ ПС «Центральная» и 220 кВ ПС РП-9 [9]. Генеральным подрядчиком по проекту является ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Основные соисполнители и задачи:

- ОАО «НТЦ ЕЭС» — решение вопросов обоснования и интеграции линии в энергосистему Санкт-Петербурга;
- ОАО «Иркутсккабель» и НИЦ «Курчатовский институт» — разработка и изготовление кабеля и арматуры;
- Leds Group (при научном руководстве ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС») — изготовление двух вентильных преобразовательных установок;
- НПО «Гелиймаш» и НИЦ «Курчатовский институт» — разработка и изготовление криогенной системы [8];
- Испытания разработанных устройств и контроль всех конструктивных решений осуществляет ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» при участии заказчика ПАО «ФСК ЕЭС».

На всех этапах изготовления оборудования организована тесная кооперация научных и производственных организаций с целью облегчения процесса дальнейшей передачи разработок в промыш-

## ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА 860-МЕТРОВОЙ ЛИНИИ И ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ 60-МЕТРОВОЙ ЛИНИИ

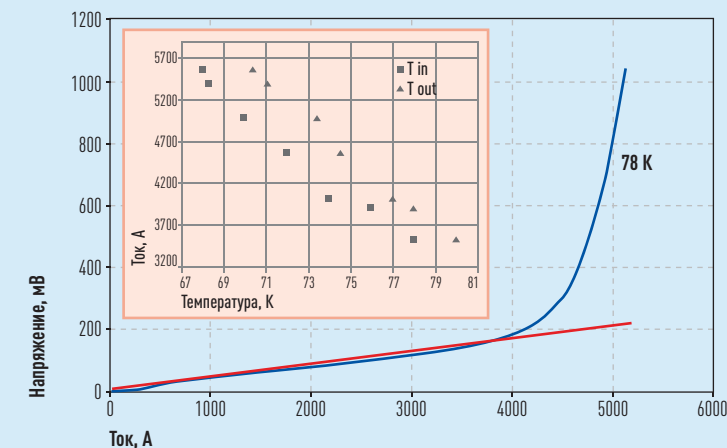


Рис. 4

ленное производство. Проектные параметры линии представлены в табл. 2.

В качестве базовой была выбрана монополярная конструкция с прямым и обратным проводником в одном кабеле. Кабель состоит из концентрических слоев, содержащих следующие элементы:

- стабилизирующий формообразующий элемент;
- сверхпроводящий прямой проводник;
- высоковольтная изоляция;
- сверхпроводящий обратный проводник;
- внешний стабилизатор;
- внешняя (экранная) изоляция;
- электрический (несверхпроводящий) экран;
- криостат с защитным покрытием из сшитого полиэтилена [10].

Высоковольтная изоляция между прямым и обратным проводниками рассчитана на номинальное напряжение, а экранная изоляция — на 2 кВ. Прямой и обратный проводники изготовлены из лент ВТСП первого поколения с критическим током 160 А и 180 А, а количество лент в проводниках подобрано исходя из условия обеспечения суммы критических токов лент на уровне 3500 А.

Высокое значение критической плотности тока в сверхпроводнике позволило разместить прямой и обратный проводники в конструкции одного кабеля, что приводит к локализации магнитного поля внутри сечения обратного проводника кабеля. Отсутствие электромагнитных и тепловых полей рассеяния и использование в качестве пропиточного состава жидкого азота, делает такие кабели экологически чистыми и существенно снижает требования к условиям прокладки кабельной трассы.

## ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ВТСП КЛ НА 2011 Г.

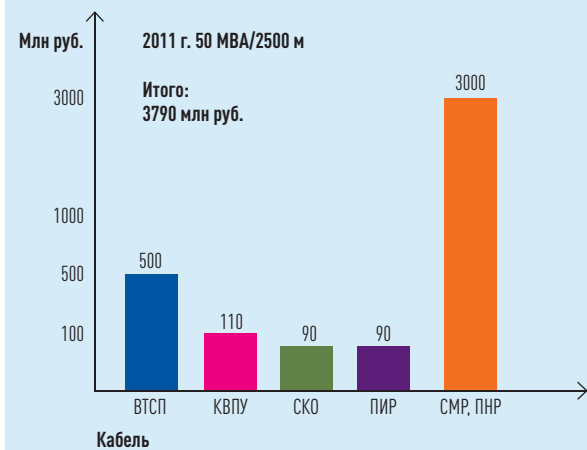


Рис. 5

Первоначально были изготовлены две 30-метровые линии кабеля, которые были собраны в одну 60-метровую линию с двумя токовыми вводами и одной соединительной муфтой. На этой стадии были отработаны конструкции муфт и технология соединения отрезков кабеля. Успешные испытания данной линии и подробное исследование характеристик соединений [8, 11] позволили приступить к изготовлению в заводских условиях штатных длин кабеля.

Общая длина кабеля была изготовлена состоящей из пяти отрезков длиной 430 м и одного меньшего отрезка в соответствии с проектом кабельной трассы. На рис. 3 показана 860-метровая кабельная линия, состоящая из двух штатных отрезков во время испытаний на полигоне ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». На рис. 4 показана вольтамперная характеристика 860-метровой кабельной линии и температурная зависимость критического тока для 60-метровой линии, отнесенная к температуре азота

на входе и выходе из линии (до и после токовых вводов). При изменении температуры от 68 К до 80 К критический ток линии изменялся от 5600 А до 3500 А. Значения критического тока короткой и длинной линии абсолютно идентичны, что свидетельствует о высокой надежности разработанной заводской технологии изготовления ВТСП-кабелей.

Основные результаты испытаний сводятся к следующему [12]:

- критический ток кабеля равен сумме критических токов исходных ВТСП-лент; подтверждена надежность разработанных технологий и конструкций;
- сопротивление соединений стабильно вплоть до 5000 А и не превосходит для токовых вводов 20 мОм;
- все кабели успешно прошли испытания высоким напряжением 50 кВ в течение 30 мин.

## ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ВТСП КЛ НА 2015 Г.

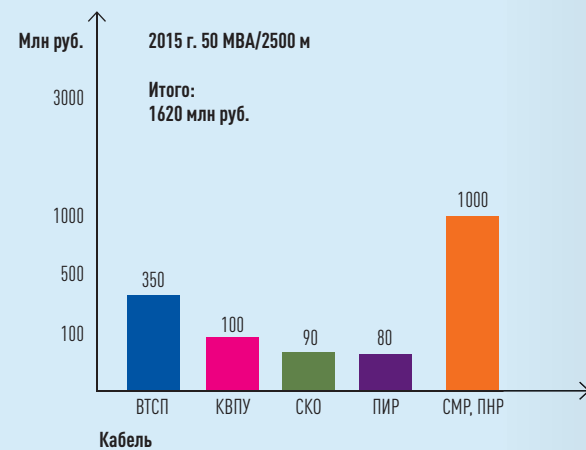


Рис. 6

В 2014 г. были изготовлены и испытаны две вентильные преобразовательные установки. Криогенная система будет полностью изготовлена в 2015 г.

## ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ЛИНИЯХ

В линиях переменного тока среднего напряжения потери электрической энергии имеют место в самом кабеле, электрической изоляции и токовых вводах. В линии постоянного тока потери энергии в кабеле и изоляции отсутствуют, однако они присутствуют в преобразовательных устройствах, токовых вводах. Кроме того, криогенная система потребляет электроэнергию для компенсации всех теплопритоков в «холодную» зону и для прокачки хладагента по всей трассе.

## ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ВТСП КЛ 200 МВА

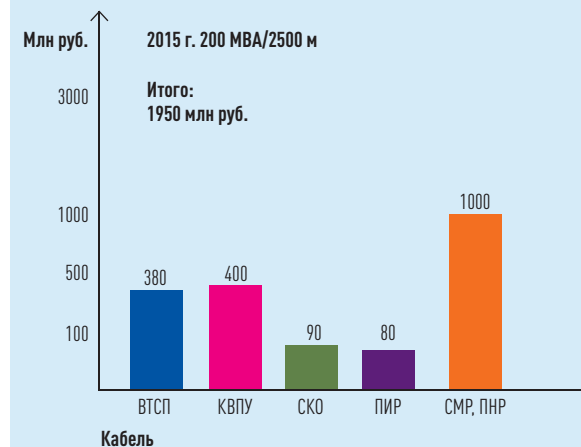


Рис. 7

Для трехфазной линии переменного тока среднего напряжения на передаваемую мощность 100 МВА потери энергии на фазу складываются из следующих величин:

- электромагнитные потери в жиле кабеля — 1,0–1,5 Вт/м;
- теплопритоки через криостат — 1,5 Вт/м;
- теплопритоки через токовводы — (200–300 Вт) × 2;
- потери энергии в изоляции — порядка 0,1 Вт/м.

Тогда общие теплопритоки в «холодную» зону при длине трехфазной линии 10 км составят 78,5–93,5 кВт. Умножая эту величину на типичное значение коэффициента рефрижерации, равное 20, получим 1,57–1,87 МВА или менее 2% от передаваемой мощности.

Для аналогичной линии постоянного тока теплоприток в «холодную» зону ограничивается только

теплопритоками через криостат и токовводы. Тогда общие потери энергии в кабеле длиной 10 км с учетом криогенной системы составят 0,31 МВА или 0,31% от передаваемой мощности.

Для оценки общих потерь в линии постоянного тока следует прибавить потери в преобразователях — 2% от передаваемой мощности. Итоговые потери в ВТСП КЛ постоянного тока длиной 10 км на передаваемую мощность 100 МВт оцениваются величиной не более 2,5% от передаваемой мощности.

Приведенные оценки показывают, что потери энергии в сверхпроводящих кабельных линиях существенно меньше, чем в традиционных кабельных линиях. При увеличении передаваемой мощности процент потерь энергии снижается. При сегодняшнем уровне характеристик материалов возможна передача энергии 150–300 МВт при напряжении 20 кВ и до 1000 МВт при 110 кВ.

## ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ СТОИМОСТИ ВТСП КЛ

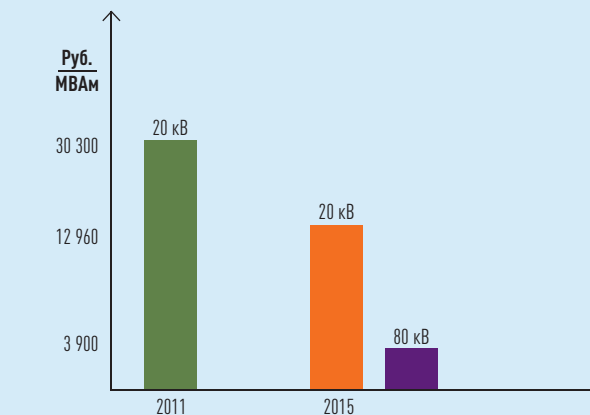


Рис. 8

## ВТСП — ДОСТУПНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Подводя итоги проделанной работы, можно с уверенностью сказать, что создание ВТСП КЛ было одной из самых масштабных и амбициозных исследовательских работ в новейшей истории электросетевого комплекса РФ. Очевидно, что за 5 лет, в течение которых проводились НИОКР, было переоценено и пересмотрено множество технических решений, конструкций и подходов к проектированию и строительству. В результате можно смело заявить, что в сегменте передачи большой мощности в условиях мегаполисов появилась новая доступная технология, которая без труда выдерживает конкуренцию с традиционными технологиями передачи больших мощностей, а в ряде случаев значительно их опережает.

Достаточно интересно посмотреть, как изменялись представления об удельной стоимости ВТСП КЛ постоянного тока в начале проекта (в 2011 г.) и каковы они сегодня.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВСП КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

Параметры ВСП КЛ	Год		
	2011	2015	2015
Напряжение, кВ	20	20	80
Мощность, МВт	50	50	200
Длина, м	2500	2500	2500
Стоимость, млрд руб.	3,79	1,62	1,95
Удельная стоимость, тыс. руб./МВт•м	30,3	12,9	3,9

Таблица 3

Как видно из рис. 5, общая стоимость прокладки ВСП КЛ 50 МВт длиной 2500 м оценивалась в 3,79 млрд руб. Такая стоимость в первую очередь обусловлена необходимостью строительства тоннеля для прокладки кабеля, а также затратами на НИОКР, связанными с разработкой конструкции кабеля, оснастки для его изготовления, конструкции тоководов и соединительных муфт. По мере реализации НИОКР, опираясь на мировой опыт (в частности, проект линии переменного тока в г. Эссен, Германия), было разработано техническое решение, позволяющее укладывать ВСП КЛ в лоток. Это в разы снизило стоимость прокладки и существенно повысило шансы на прокладку в центре мегаполиса.

На рис. 6 представлена оценочная стоимость такой линии с учетом корректировки затрат на ВСП-кабель, связанных с ранее выполненной НИОКР.

В процессе испытаний кабеля выяснилось, что конструкция кабеля, изготовленного в рамках НИОКР на параметры 20 кВ и 2500 А постоянного тока, практически без существенных изменений может обеспечивать работу КЛ на уровне напряжения 80 кВ постоянного тока. Это существенно повышает пропускную

способность кабеля. При этом система криообеспечения не требует каких-либо изменений, ведущих к удорожанию. Изменения потребуются только в КВПУ, стоимость которого существенно увеличится за счет перехода на другой уровень напряжения и передаваемой мощности. Также потребуются незначительная доработка кабельной арматуры. Однако это не окажет существенного влияния на общий объем инвестиций при строительстве линии на мощность 200 МВт (см. рис. 7).

В табл. 3 представлены основные параметры рассматриваемых ВСП КЛ, включая их удельную стоимость (руб./МВА•м). Если сравнить удельные стоимости ВСП КЛ в начале проекта и ту оценочную стоимость, что мы имеем на сегодняшний день (рис. 9), то разница оценивается практически в один порядок в расчете (руб./МВА•м).

Дополнительно следует отметить, что оценочная стоимость ВСП КЛ постоянного тока на 200 МВт длиной 2500 м соизмерима по стоимости с традиционными решениями. В последующих публикациях мы представим подробный сравнительный анализ ВСП КЛ с целым рядом традиционных способов передачи электрической энергии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТОК И ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ ВНЕДРЕНИЯ

Проведенные НИОКР успешные испытания ВСП КЛ постоянного и переменного [13, 14, 15] токов продемонстрировали высокую эффективность сверхпроводящих линий и подтвердили правильность принятых технических решений. В процессе выполнения работы была создана научно-производственная кооперация предприятий, создана технологическая и испытательная базы, способные решать подобные и более сложные задачи. Выработанные конструкторские и технологические решения могут служить надежной базой при проведении новых работ и позволят существенно сократить объем и стоимость последующих НИР.

Кардинально новые технические решения обычно с большим трудом внедряются в устоявшиеся инфраструктуры. Одним из основных преимуществ сверхпроводящих кабельных линий является возможность передачи больших потоков энергии (сотни мегаватт) на распределительном напряжении. Эти открывшиеся новые возможности целесообразно учитывать и использовать

при проектировании или кардинальной реконструкции сетевых объектов. Например, при реконструкции/создании энергосистемы «новой» Москвы целесообразно было бы предусмотреть создание продольных мощных сверхпроводящих линий, а несколько мощных подстанций связать в кольцевую структуру сверхпроводящими линиями постоянного тока на стороне среднего напряжения. Это позволит существенно повысить энергоэффективность сети, уменьшить количество базовых подстанций, обеспечить высокую управляемость энергопотоками и, в конечном счете, увеличить надежность энергоснабжения потребителей. Такая сеть может стать реальным примером «умной» сети будущего.

В международном плане особое внимание привлекают планы создания Северо-восточного азиатского энергетического кольца (Asian Energy Supergrid). Приказом Минэнерго России Сколковский институт науки и технологий назначен оператором проекта, одной из целей которого является удвоение транспорта энергии из России к 2035 г. Использование разработанных и более мощных ВСП КЛ позволит повысить роль России и ПАО «ФСК ЕЭС» в данном международном проекте. Японские компании также ведут в этом плане активные разработки с целью создания в перспективе ВСП КЛ между островами Сахалин и Хоккайдо. ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» заключило соглашение о сотрудничестве в данной области с университетом Чубу, Япония.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время мы являемся свидетелями начала внедрения ВСП КЛ в реальную электроэнергетику, что сулит существенное повышение эффективности энергосистемы.

Синтез двух технологий — сверхпроводимости и передач постоянного тока — обеспечивает новое качество

функционирования электрических сетей мегаполисов. Благодаря возможности передавать значительные мощности на распределительном напряжении и высокому уровню контроля, ВСП КЛ постоянного тока оказывает положительное влияние на режимы энергосистем и надежность снабжения потребителей.

Оба российских проекта по изготовлению и испытанию кабельных линий будут завершены в 2015 г., и далее планируется их опытная эксплуатация. Успешная реализация проектов позволит тиражировать ВСП КЛ для энергосистем мегаполисов, что повысит надежность энергоснабжения потребителей и снизит потери энергии в сетях. Полученный в рамках выполнения проекта опыт позволяет прогнозировать увеличение мощности ВСП КЛ до 150–250 МВА/МВт на распределительном напряжении и до 500–1000 МВА/МВт при напряжении 50–110 кВ при минимальном объеме НИОКР. Успешная реализация данных проектов будет первым шагом к внедрению технологии ВСП в электрические сети мегаполисов и ускорит процессы внедрения иных ВСП-устройств в электроэнергетику.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глебов И.А., Черноплеков Н.А., Альтов В.А. Сверхпроводниковые технологии – новый этап в развитии электротехники и энергетики // Сверхпроводимость: исследования и разработки. 2002. № 11.
2. Сытников В.Е. Сверхпроводящие кабели и перспективы их использования в энергетических системах XXI века // Сверхпроводимость: исследования и разработки. 2011. № 15. С. 65–74.
3. EPRI. Superconducting Power Equipment Technology Watch 2012. Palo Alto, CA, USA, 2012.
4. Stemmler M., Merschel F., Noe M. Physics Procedia 36 (2012). P. 884.
5. Сытников В.Е., Копылов С.И., Шакарян Ю.Г., Кривецкий И.В. ВСП передача по-

стоянного тока как элемент «интеллектуальной сети» крупных городов. Материалы 1-й Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013. С. 294–298.

6. Maguire J. et al. IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 19. No 3 (2009). P. 1740.
7. Stemmler M. et al. Proceedings of IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. Beijing, China, October, 2013, paper ID3122
8. Kopylov S., Sytnikov V., Bemert S. et al. // Journal. Physics.: Conference. Series. 2014. V. 507. P. 032047.
9. Sytnikov V.E., Bemert S.E., Ivanov Yu.V. et al. // IEEE. Transaction on Applied Superconductivity, 2013. V. 23. № 3. P. 5401904.
10. Сытников В.Е., Бемеерт С.Е., Бердников Р.Н. и др. Российский проект: сверхпроводящая кабельная линия постоянного тока для электрических сетей современного мегаполиса // Энергия единой сети. 2012. № 4. С. 24–27.
11. Naumov A., Diev D., Anashkin O. et al. // Advances in Cryogenic Engineering. 2014. V. 1573. P. 1692.
12. Sytnikov V.E., Bemert S.E., Kopylov S.I. et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 06/2015. V. 25. Issue 3. Part 2. Article 5400904.
13. Э.П. Волков, В.С. Высоцкий, А.В. Карпышев, В.В. Костюк, В.Е. Сытников, В.П. Фирсов. Создание первого в России сверхпроводящего кабеля с использованием явления высокотемпературной сверхпроводимости. Сборник статей РАН «Инновационные технологии в энергетике» под редакцией Э.П. Волкова и В.В. Костюка, Москва, Наука 2010.
14. E.P. Volkov, V.S. Vysotsky, V.P. Firsov, First Russian long length HTS power cable, Physica C 482 (2012) 87–91.
15. A.A. Nosov, S.S. Fetisov, V.V. Zubko, N.V. Polyakova, V.S. Vysotsky, Yu.G. Shakaryan, A.N. Kiselev, A.Yu. Kovalenko; Overload and High Voltage Tests of Witness Samples of 200m HTS Power Cable, Physics Procedia 36 (2012) pp. 1127–1130.