

УДК 629.735

## СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Жмуренков Ю.С.

Научный руководитель – ассистент Юршо Е.Л.

Использование сверхпроводящих кабелей позволяет существенно повысить пропускную способность линии электропередач. Сети, использующие такие кабели, имеют существенные преимущества, такие как снижение потерь, увеличение удельной мощности передачи, экологическая чистота и пожарная безопасность. Сверхпроводящие линии постоянного тока дополнительно обеспечивают дальнейшее снижение потерь энергии, осуществление функции токоограничения, повышение управляемости и уменьшение мощности криогенного оборудования по сравнению с линиями переменного тока.

В настоящее время в мире разрабатываются различные устройства с применением технологии высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), в том числе ограничители тока короткого замыкания, двигатели, накопители электроэнергии и различные вариации сверхпроводящих кабелей.

Сверхпроводящие кабели наряду с токоограничителями в наше время являются наиболее популярной темой в области применения эффекта сверхпроводимости в электроэнергетике. Сверхпроводящие кабельные линии (ВТСП КЛ) имеют очевидные преимущества при передаче больших потоков энергии по электрическим сетям по сравнению с традиционными линиями. Это стимулировало разработку большого количества конструкций кабелей для передачи энергии. Именно при разработке ВТСП КЛ накоплен начальный опыт эксплуатации в реальных электрических сетях, а уровень передаваемой мощности находится в интервале от единиц мегаватт до единиц гигаватт на одну цепь.

**СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ.** Основным элементом любого сверхпроводникового устройства являются сверхпроводящие материалы, из которых оно изготавливается. Более чем 50-летний опыт создания низкотемпературных практических сверхпроводников и почти 30-летний опыт разработок высокотемпературных сверхпроводников привели к формированию широкой номенклатуры различных сверхпроводящих материалов, из которых могут быть созданы всевозможные сверхпроводниковые устройства.

Терминологически технические сверхпроводящие материалы делятся на две категории: 1) низкотемпературные сверхпроводящие (НТСП) материалы, имеющие критическую температуру (температуру перехода в сверхпроводящее состояние в нулевом магнитном поле) ниже 25 К и работающие при гелиевом уровне температур; 2) высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) материалы, имеющие, как правило, критическую температуру выше 25 К и зачастую способные работать при температуре порядка температуры кипения жидкого азота [ $\sim 77$  К) и несколько выше.

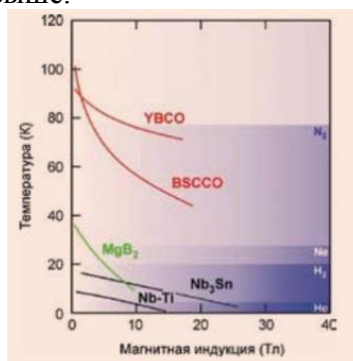


Рисунок 1 - Области существования сверхпроводимости в сверхпроводящих материалах, обладающих практическим значением, в зависимости от температуры и магнитной индукции

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКУ. Во всем мире ведутся активные исследования и разработки различных типов электротехнических устройств на основе ВТСП: силовых кабелей, токоограничителей, индуктивных накопителей энергии, электрических машин и пр. Причем именно силовые сверхпроводящие кабели являются наиболее разработанным и продвинутым видом применения сверхпроводимости в электроэнергетике в настоящее время.

*Основными преимуществами сверхпроводящих кабелей являются:*

1. Низкие потери энергии в сверхпроводящей кабельной линии;
2. Возможность замены существующего кабеля на кабель с большей передаваемой мощностью при тех же габаритах;
3. Легкий вес за счет меньшего количества используемого материала;
4. Увеличение «жизненного цикла» кабеля в результате замедления процессов старения изоляции;
5. Отсутствие электромагнитных и тепловых полей рассеяния, экологическая чистота и пожаробезопасность;
6. Возможность передачи больших потоков энергии при сравнительно низком напряжении.

Высокотемпературные сверхпроводящие кабельные линии постоянного и переменного токов являются инновационной разработкой, позволяющей решить значительную часть проблемы 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 энергорайонов;
- ✓ 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.

В электрических сетях возможно создание схемы с применением ВТСП КЛ как переменного, так и постоянного токов. Обе системы имеют свои предпочтительные области применения, и в конечном итоге выбор определяется и техническими, 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 токов короткого замыкания и управление потоками мощности. Поэтому в тех случаях, когда помимо передачи больших потоков мощности на низком напряжении требуется еще 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[1].

**ОБЩИЕСВЕДЕНИЯ О ВТСП КЛ.** Упрощенно сверхпроводящий кабель устроен следующим образом (Рис 3.1). В центре обычно находится пучок медных проводов, диаметров около 20 мм, который является несущим элементом. На этот элемент по окружности укладываются ВТСП ламинированные латуной ленты 2-го поколения, то есть, проводников, где ВТСП-жила занимает лишь около 5% сечения (против 40% для ВТСП 1-го поколения) и представляет собой тонкое покрытие на поверхности подложки. Они укладываются спиралью, скручиваются под углом. 24 ленты – это первый слой (повив). Поверх этого слоя укладывается второй слой сверхпроводящих лент с противоположным направлением скрутки. Затем накладывается изоляция от 6 до 12 толщиной мм. Далее кладется еще примерно такое же количество сверхпроводящих лент – это так называемый сверхпроводящий экран. Поверх медный экранчик – это защита сверхпроводника. Этот кабель упаковывается в длинную гибкую трубу из гофрированной нержавейки. Причем труба эта двойная – внутренняя труба обмотана так называемой суперизоляцией, и между двумя трубами откачан воздух – это так называемая высоковакуумная термоизоляция. По внутренней трубе прокачивается жидкий азот. И таким образом сверхпроводящий кабель находится в криостате. Главная проблема – это надежная криогенная система, которая создает этот жидкий азот и качает его по длинному кабелю[3].



Рисунок 2 - Пример ВТСП проводника

**АКТУАЛЬНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТСП КЛ.** Разрабатываемая технология является продолжением научно-исследовательских работ по разработке опытного образца силовой электрической высокотемпературной сверхпроводящей кабельной линии (далее – ВТСП КЛ) 200 м. В рамках разработки данной технологии предполагается доработка существующих, изготовление дополнительных элементов КЛ и проведение комплексных испытаний. Силовые ВТСП кабельные линии признаны актуальными во всем мире, поскольку они позволяют решить коренные проблемы передачи больших потоков электроэнергии и энергосбережения. Такое значительное увеличение (в 3 - 8 раз) мощности распределительных сетей (без изменения напряжения) может быть достигнуто путем замены традиционных силовых кабелей сверхпроводящими. Конструкция предполагаемой разработки состоит из трех сверхпроводящих кабелей и системы автономного криообеспечения. Основной задачей данных работ является разработка на основе экспериментального образца опытно-промышленной модульной высокоэффективной системы криообеспечения ВТСП КЛ на жидком азоте, а также новых токоотводов и комплектов основных деталей.

Основные преимущества силовых ВТСП кабелей следующие: высокая токовая нагрузка, малые потери в сверхпроводнике, экологическая чистота (отсутствие масел, минимальное электромагнитное и тепловое воздействие на окружающую среду), высокий

уровень пожарной безопасности. При передаче большой мощности при относительно низком напряжении – 10–20 кВ (генераторном) – не требуется промежуточных подстанций, что дает значительную экономию капитальных затрат и городских земельных ресурсов. Области внедрения в рамках разработки данной технологии планируется определение объекта, на котором предполагается внедрение ВТСП КЛ после апробации на полигоне в ОАО «ФСК ЕЭС» [1].

**ПРИНЦИП ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВТСП КЛ.** Криогенная кабельная линия включает три основных компонента: собственно, криогенный кабель, систему криогенного обеспечения, концевые устройства (токоотводы). Токоотводы сверхпроводниковой кабельной линии сочетают функции высоковольтной концевой кабельной муфты и теплового моста между холодной зоной и окружающей средой. Схематическое изображения кабеля в разрезе отображено на рисунке 5.1. Преимущества такой конструкции заключаются в том, что при нарушении вакуума в одном из модулей линия может оставаться работоспособной продолжительное время, а место нарушения вакуума легко может быть обнаружено. В конструировании ВТСП кабелей для передачи малой мощности на относительно небольшие расстояния (внутри города, через небольшие водные преграды и пр.) прослеживается тенденция создания гибких кабелей большой единичной длины куска ( $> 1$  км) с криогенной электрической изоляцией и узкой концентрической щелью для прокачки хладагента (проект LPA, выполняемый компанией Nexans совместно с AMSC). Для линий большой протяженности, предназначенной для передачи больших мощностей ( $P > 1$  ГВА), вполне подходят модули небольшой ( $\sim 50$  м) протяженности, с отдельным для каждого модуля вакуумом, где в качестве основной электрической изоляции используется сверхкритический азот. Модули могут соединяться между собой посредством муфт, имеющих отдельный вакуум. Соединительная муфта может закрепляться на месте спая ВТСП кабелей, как при помощи болтов, так и сваркой. Прокладка такой линии ненамного сложнее, чем прокладка магистрального газопровода. По такой линии легко прокачивать требуемые количества сверхкритического азота на большие расстояния при разумных ( $D < 200$  мм) поперечных сечениях ЛЭП. Потери на спаях при токе  $\sim 7$  кА остаются более чем на порядок меньше потерь на теплоприток из окружающей среды [2].

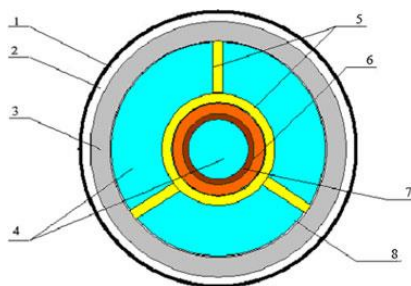


Рисунок 3 - Схематическое изображение кабеля в разрезе: 1 – наружный вакуумный кожух, 2 – вакуум, 3 – многослойная экрановакуумная изоляция, 4 – сверхкритический азот, 5 – стеклотекстолит, 6 – ВТСП, 7 – медный формер (он же защита), 8 – внутренний кожух.

**ВОЗМОЖНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ БОЛЬШИХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ ПО СВЕРХПРОВОДЯЩИМ КАБЕЛЬНЫМ ЛИНИЯМ.** Специфика размещения источников электроэнергии (АЭС, ГЭС, ветропарки) на больших расстояниях от крупных городов и потребителей электроэнергии приводит к необходимости транспортировки больших потоков энергии на значительные расстояния. При этом схема выдачи мощности предполагает использование высоковольтных воздушных линий передачи (220-750 кВ), что обусловлено стремлением минимизировать потери энергии при ее транспортировке. Это приводит к необходимости создания высоковольтных повышающих подстанций, заметным потерям энергии (6-8%) при ее транспортировке и отчуждению значительных площадей земли [2].

При оценке длинных линий будем рассматривать линии постоянного тока, так как любые кабельные линии переменного тока имеют ограничение по длине вследствие



возникновения зарядных токов, которые приводят к снижению мощности на дальнем конце линии. В результате этого длина кабельных линий переменного тока не превышает нескольких десятков километров.

**ВОЗМОЖНЫЕ УРОВНИ ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ ПО ВТСП КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.** Оценим возможный уровень передаваемой мощности при различных напряжениях, исходя из достигнутых характеристик сверхпроводящих материалов.

При величине конструктивной критической плотности тока, равной 200 А/мм<sup>2</sup>, реальным является создание кабелей постоянного тока с номинальным током 10,0-20,0 кА. Кабели с рабочим током в 10,0 кА уже созданы. Примем для нижеприведенных оценок, сведенных в табл. 7.1, рабочий ток равным 15,0 кА. [1]

Таблица 1 - Передаваемая мощность по ВТСП линии постоянного тока

## ПЕРЕДАВАЕМАЯ МОЩНОСТЬ ПО ВТСП ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (В МВт)

Напряжение передачи, кВ	Монополярная передача		Биполярная передача	
	Одна линия	Две линии	Одна линия	Две линии
50	750	1500	1500	3000
100	1500	3000	3000	6000
200	3000	6000	6000	12 000

Таблица 2

Как видно из таблицы, мощность любой действующей электростанции может быть передана в сеть уже при напряжении 50-200 кВ, а передача энергии от одного энергоблока возможна на генераторном напряжении. Для увеличения надежности передачи целесообразно рассматривать передачу по двум параллельным линиям.

В настоящее время мы являемся свидетелями начала внедрения ВТСП кабельных линий в реальную электроэнергетику. В электрических сетях возможно создание схемы с применением ВТСП КЛ как переменного, так и постоянного тока. Обе системы имеют свои предпочтительные области применения, и в конечном итоге выбор определяется как техническими, так и экономическими соображениями.

При современном уровне развития сверхпроводниковой и криогенной техники возможно создание длинных сверхпроводящих кабельных линий постоянного тока для передачи энергии на расстояния в десятки и сотни километров. При этом мощность единичной линии может достигать нескольких гигаватт, а потери энергии в ней будут существенно ниже, чем в воздушных ЛЭП. Электрическое напряжение на линии и преобразовательной подстанции может быть снижено до 200 кВ и менее, однако его уровень должен быть оптимизирован с точки зрения эффективности работы и кабеля и преобразовательной установки. Криогенные станции для охлаждения линии могут располагаться на ее концах при длине линии до 30 км (в перспективе до 60 км). При создании линий большей длины криогенные станции должны размещаться вдоль трассы с шагом 20-60 км. Максимальная длина линии при таком подходе не имеет технических ограничений.

Успешная опытная эксплуатация первых линий постоянного и переменного токов может стать существенным ускорителем процессов внедрения ВТСП-устройств в электроэнергетику[1].

*Основными сдерживающими факторами широкого внедрения ВТСП-кабельных линий являются:*

- Высокая стоимость сверхпроводников, криогенной техники и НИОКР;
- Низкая эффективность криогенного оборудования и тепловой изоляции;
- Отсутствие стандартов по производству и испытаниям ВТСП- кабелей;
- Отсутствие реального длительного опыта эксплуатации; консерватизм энергетических компаний.

Тем не менее, есть все основания надеяться, что в обозримом будущем мощные сверхпроводящие кабельные линии позволят оптимизировать электрические сети мегаполисов и сформировать глобальную энергетическую сеть с передачей электроэнергии на сверхдальние расстояния, выполнять межсистемные связи, соединять несинхронизированные энергосистемы, строить длинные подводные линии и пр. Все это позволит существенно увеличить эффективность и надежность электрических сетей.

#### Литература

1. В.Е. Сытников. Сверхпроводящие кабели и перспективы их использования в энергетических системах XXI века. II Сверхпроводимость: исследования и разработки, 2011, № 15; 165-76.
2. И.А. Глебов, Н.А. Черноплеков, В.А. Альтов. Сверхпроводниковые технологии - новый этап в развитии электротехники и энергетики II Сверхпроводимость: исследования и разработки, 2002, № 11.