

РОССИЙСКИЙ ПРОЕКТ: СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СОВРЕМЕННОГО МЕГАПОЛИСА

АВТОРЫ:

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

БЕМЕРТ С. Е.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

БЕРДНИКОВ Р. Н.
ОАО «ФСК ЕЭС»

ФРОЛОВ О. В.,
К. Т. Н.
ОАО «НИИПТ»

ШАКАРЯН Ю. Г.,
Д. Т. Н.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ШЕРШНЕВ Ю. А.,
Д. Т. Н.
ОАО «НИИПТ»

Использование сверхпроводящих кабелей позволяет существенно повысить пропускную способность линии электропередачи. 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.



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» обладает современным полигоном по испытаниям ВТСП оборудования под нагрузкой

Получение и передача электрической энергии является одной из ключевых проблем XXI века. При этом нужно учитывать, что общество существенно ужесточает требования по соблюдению экологических и ресурсосберегающих условий. Использование передовых и прогрессивных технологий, таких как технологии, основанные на явлении высокотемпературной сверхпроводимости, является основной (и, возможно, единственной) возможностью удовлетворить эти требования. Причем для мегаполисов эти проблемы особенно актуальны.

Существующая система распределения электроэнергии в современном мегаполисе – это сложная развивающаяся система, для которой характерны следующие особенности:

- быстрый рост потребления электроэнергии, который, как правило, превышает стандартный рост потребления по всей стране;
- высокая плотность потребления электроэнергии;
- наличие перераспределения и дефицита в электросетях;
- сильное ветвление электрической сети для уменьшения токов короткого замыкания.

Эти факторы определяют основные особенности проблематики электрических сетей мегаполисов, а именно:

- наличие высокого уровня потерь в распределительных сетях;

- высокое значение токов короткого замыкания, существенно превышающее отключающую способность выключателей;
- низкий уровень контроля и управляемости.

В настоящей статье мы обсуждаем перспективы решения этих проблем с помощью высокотемпературных сверхпроводящих кабельных линий постоянного тока. Такая линия становится ключевым элементом сети, регулирующим поток мощности. Явные преимущества сверхпроводящего кабеля видны в таблице 1.

Как видим, высокотемпературная сверхпроводящая кабельная линия (ВТСП КЛ) обладает существенно более низким импедансом, чем у других линий. Следовательно, при параллельной работе ток идет в основном по ВТСП КЛ. Увеличение мощности нагрузки ВТСП КЛ за счет повышения рабочего тока позволяет уменьшить количество параллельных линий и снизить напряжение передачи, что, в свою очередь, повышает предельно допустимую протяженность линии.

В общем, использование высокотемпературной сверхпроводящей кабельной линии переменного и постоянного тока существенно снижает потери в линиях и позволяет повысить плотность передаваемой энергии без увеличения напряжения. Более того, ВТСП КЛ постоянного тока имеет несколько дополнительных преимуществ:

- возможность соединения различных частей

ИНФОРМАЦИЯ

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВТСП

ПС 220/110/20 кВ крупных мегаполисов:

- Москва;
- Санкт-Петербург;
- Новосибирск;
- Екатеринбург.

энергосистемы по низкой стороне напряжения, что повышает надежность энергообеспечения без увеличения токов короткого замыкания;

- защита от каскадных отключений;
- регулирование потока мощности.

ИСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ. ПЕРВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ ПЛАНА РАЗВИТИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ МОСКВЫ И САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» совместно с ОАО «НИИПТ» провели анализ текущей и перспективной ситуации в таких мегаполисах, как

Наименование кабеля	Импеданс (Ом/км)	Индуктивность (мГн/км)	Емкость (нФ/км)
ВТСП-кабель переменного тока	0,0001	0,06	200
XLPE-кабель	0,03	0,36	257
Линия электропередачи	0,08	1,26	8,8

Таблица 1

БАЗОВЫЕ ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИИ ВТСП-КАБЕЛЯ

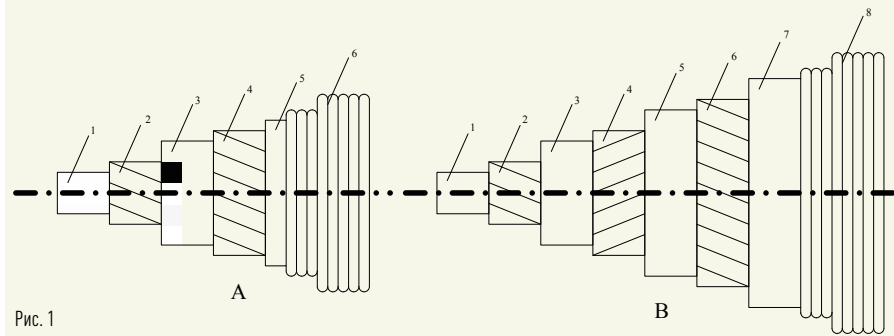


Рис. 1

А – униполярный кабель: 1 – формер; 2 – слой ВТСП-элементов; 3, 5 – слои изоляции; 4 – слой ВТСП-элементов для тока обратного направления; 6 – криостат.
В – биполярный кабель: 1 – формер; 2 – слой ВТСП-проводников для токов прямого направления; 3, 5, 7 – изоляция; 4 – ВТСП-экран; 6 – слой ВТСП-элементов для тока обратного направления; 8 – криостат.

Москва и Санкт-Петербург. В качестве объекта для экспериментальной установки ВТСП КЛ была выбрана подстанция «Динамо» в Москве (200-метровый ВТСП-кабель переменного тока) [2]. Кроме того, мы оценили возможность передачи энергии с помощью сверхпроводящей кабельной линии постоянного тока в Санкт-Петербурге.

Были рассмотрены такие характеристики, как защита от токов короткого замыкания и распределение токовой нагрузки по линиям электропередачи с использованием ВТСП КЛ постоянного тока и без нее. В результате анализа было выбрано несколько потенциально возможных мест установки такой кабельной линии. Расчеты показали, что наиболее предпочтительной является прокладка ВТСП-кабеля между ПС «Центральная» и ПС РП-9 (таблица 2). Такая ВТСП КЛ

обеспечивает взаимное резервирование энергорайонов, которые получают энергию от ПС РП-9 и ПС «Центральная».

Как показано в таблице 2, в отличие от кабельной линии переменного тока, ВТСП КЛ постоянного тока (включенная между ПС «Центральная» и ПС РП-9) не увеличивает значения токов короткого замыкания, поэтому такая структура не требует замены коммутационного оборудования. Параметры ВТСП КЛ показаны в таблице 3.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВТСП КЛ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотрим две основные концепции ВТСП-кабеля (рис. 1).

В предложенной конструкции ВТСП-кабеля прямой и обратный токи идут только по сверхпроводнику и сверхпроводящему экрану, в результате чего омические потери в таких кабелях отсутствуют. Магнитное поле концентрируется внутри поперечного сечения кабеля. Отсутствие потерь рассеяния и использование жидкого азота в качестве хладагента делают кабель экологически чистым и пожаробезопасным.

СРАВНЕНИЕ ВТСП КЛ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКОВ

Обычные высоковольтные линии постоянного тока (без учета высоковольтных преобразователей) существенно дешевле высоковольтных линий переменного тока. Однако стоимость высоковольтных

преобразователей (КВПУ) очень высока – соизмерима со стоимостью всей остальной линии. Использование сверхпроводящих кабелей существенно меняет картину. Благодаря высокой плотности тока в кабеле возможно существенное снижение напряжения в нем, что значительно снижает стоимость преобразователей.

Для воздушных ЛЭП постоянного тока экономически оправданная длина – это примерно 400–800 км. Но для распределительных линий на основе высокотемпературных сверхпроводников эти длины значительно меньше (рис. 2). Результаты сравнительных расчетов стоимости разных ВТСП КЛ представлены на рис. 2.

Следует отметить, что оценка стоимости ВТСП КЛ постоянного и ВТСП КЛ переменного тока проводилась без учета затрат на исследования и тестовые испытания. При расчетах мы использовали следующие параметры: мощность ВТСП КЛ – 50 МВА, напряжение – 20 кВ, стоимость ВТСП-лент – \$150 за кА·м; стоимость AC-DC-AC – \$100–150 за кВт, криогенное оборудование – \$150 за Вт, потери энергии в кабеле переменного тока – 1,0 Вт/м или 2,0 Вт/м, потери в криостате – 1,5 Вт/м.

Как видно из рис. 2, ВТСП КЛ постоянного тока с учетом стоимости преобразователей дешевле ВТСП КЛ переменного тока уже при длине линии более одного километра и, как было упомянуто выше, имеет значительные технологические преимущества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ВТСП КЛ постоянного тока могут существенно воздействовать на энергетические режимы современных мегаполисов. Благодаря способности пропускать большую мощность в системах, использующих ВТСП КЛ постоянного тока, наблюдается снижение нагрузки на параллельных и резервных линиях. Последнее позволяет решить и другие проблемы, такие как быстрый уровень роста энергопотребления и высокая плотность энергопотребления в современных мегаполисах.
- Применение ВТСП КЛ постоянного тока существенно увеличивает надежность энергоснабжения потребителей за счет взаимного резервирования. При этом токи короткого замыкания в месте включения не возрастают, и, следовательно, исключаются замены коммутационного оборудования. Это, наверное, самое главное преимущество данной системы, поскольку проблема увеличения токов короткого замыкания является весьма насущной в основных крупных городах.
- Предложенная конструкция ВТСП КЛ постоянного тока благоприятна для окружающей среды с экологической точки зрения.

СРАВНЕНИЕ СТОИМОСТИ ВТСП-ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

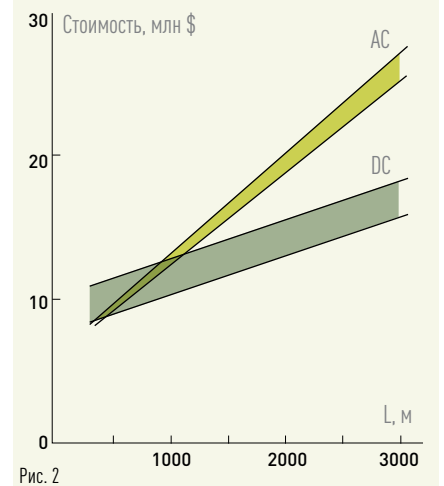


Рис. 2

ЛИТЕРАТУРА:

1. Jipping J. et. al. Impact of HTS Cables on Power Flow Distribution. – IEEE, 2001.
2. Сытников В. Е. Сверхпроводящие кабели и перспективы их использования в энергетических системах XXI века, // Сверхпроводимость: исследования и разработки, № 15, 2011. – стр. 65–74.
3. Гуревич М. К., Сорокин Д. В., Гук О. М., Севастьянова А. В. Разработка схемы передачи постоянного тока мощностью 50 МВт со сверхпроводящим кабелем, основных технических требований к оборудованию на основе инновационных схемотехнических решений и анализ режимов работы сети и передачи постоянного тока. Выбор пилотного объекта // Отчет для ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». – ОАО «НИИПТ», 2011 г.

ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ПРЕДПОЛАГАЕМОМ МЕСТЕ УСТАНОВКИ

Объект	Трехфазное короткое замыкание, кА		Однофазное короткое замыкание, кА	
	КЛ переменного тока	ВТСП КЛ постоянного тока	КЛ переменного тока	ВТСП КЛ постоянного тока
ПС «Центральная»	40	18	41	22
ПС РП-9	40	26	46	27

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ ВТСП КЛ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Длина ВТСП КЛ постоянного тока, км	Рекомендованная передаваемая мощность, МВт	Номинальный рабочий ток, А	Необходимость обратнотной линии	Необходимость компенсации реактивной мощности
2,5	50	2500	Да	Нет

Таблица 3