

ВОЗМОЖНОСТИ ТОКОГРАНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

В статье рассматривается российский опыт производства инновационных высокотемпературных сверхпроводниковых лент и возможности применения на подстанциях 220 кВ инновационных токоограничивающих устройств (ТОУ), созданных на базе сверхпроводников. Внедрение этой технологии в Белорусской энергосистеме позволит снизить уровни токов короткого замыкания в сетях 110 кВ.



А.М. ОРЛОВ,
главный инженер
РУП «Белэнергосетьпроект»

Сверхпроводники – уникальные материалы. Они обладают близким к нулевому электрическим сопротивлением при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (77 К) и способны проводить токи высокой плотности. Принцип действия высокотемпературных сверхпроводников основан на их способности переходить из состояния с высокой проводимостью в резистивное состояние при воздействии тока, превышающего пороговое значение. При плотности тока выше порогового значения 500 А/мм^2 сопротивление сверхпроводника резко увеличивается – за 5 мс оно возрастает от $0,01\text{ Ом}$ до порядка 40 Ом (рис. 1).

Открытие высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в 1986 году дало мощный импульс развитию прикладной сверхпроводимости, поскольку появилась возможность использовать для охлаждения низкотемпературных сверхпроводников на основе ниобия жидкий

азот (температура кипения 77 К) вместо жидкого гелия (4 К). Благодаря этому появилась перспектива широкого применения сверхпроводимости.

Высокотемпературные сверхпроводники открыли и продолжают открывать новые перспективы в энергетике, транспорте, промышленности, науке и медицине. Использование ВТСП позволяет создавать многочисленные устройства, превосходящие аналоги, созданные на основе обычных проводников. В частности, в энергетике появилось электрическое оборудование на базе высокотемпературных сверхпроводниковых лент, которое отличается высокой эффективностью и безопасно для человека и окружающей среды.

ВТСП-ленты представляют собой текстурированные покрытия на длинных металлических подложках и являются ключевым материалом, позволяющим создавать сверхпроводниковые устройства (рис. 2).



А.Е. СМОЛЬСКИЙ,
и.о. заведующего группой отдела
проектирования энергосистем

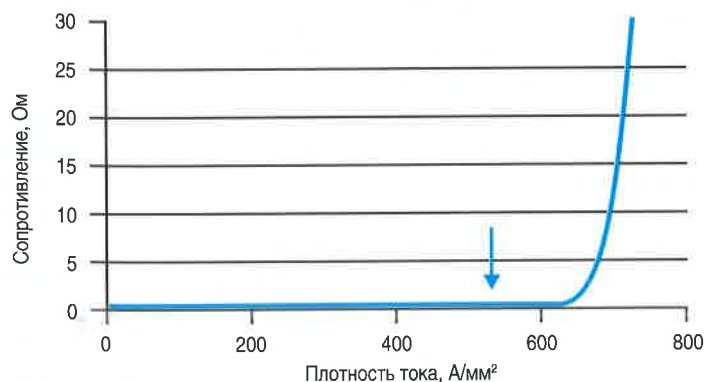


Рис. 1. Зависимость сопротивления высокотемпературного сверхпроводника от плотности тока при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (стрелкой показана критическая плотность тока 500 А/мм^2)

Для охлаждения ВТСП-лент до температуры $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ применяется криосистема со сжиженным азотом под давлением 6 атм.

Сегодня на основе ВТСП-лент изготавливают компактные электрические кабели, быстрые ограничители токов короткого замыкания (КЗ), эффективные моторы и генераторы, системы накопления энергии, а также электромагниты, которые создают недостижимые ранее сверхвысокие магнитные поля. Устройства на основе сверхпроводников эколого-



Рис. 2. ВТСП-лента длиной 1015 м

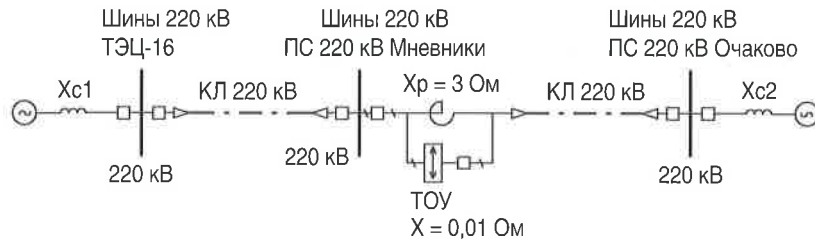


Рис. 3. Схема подключения ТОУ в электросетях г. Москвы

гичны, обладают рекордной мощностью, компактностью и энергоэффективностью.

В процессе создания такой сложной многослойной структуры, как ВТСП-лента, используются электрополирование, магнетронное напыление, нанесение текстурированных покрытий во вспомогательном ионном пучке (IBAD), импульсное лазерное напыление (PLD), электрохимическое осаждение, лужение, нанесение изолирующего покрытия и другие процессы. Для контроля качества применяются такие методы, как оптическая дефектоскопия, высокоточные измерения геометрических параметров ленты, анализ химического состава и кристаллической структуры слоев, бесконтактные и транспортные измерения сверхпроводящего тока, измерения диэлектрической прочности изоляции и др.

Токоограничивающие устройства (ТОУ), созданные на основе ВТСП для ограничения токов КЗ в энергосистеме, имеют следующие преимущества:

- быстродействие и надежность срабатывания;
- отсутствие активного сопротивления в рабочем режиме;
- отсутствие реактивного сопротивления и индуктивности;

- регулируемое активное сопротивление после КЗ (от единиц до десятков ом);
- ограничение тока КЗ без отключения линии;
- самовосстановление, длительный срок службы, пожаробезопасность.

К примеру, в настоящее время уровни токов КЗ в сети 220 кВ г. Москвы при отсутствии мероприятий по их ограничению превышают 63 кА. Это обусловлено ростом электропотребления и активным строительством кабельной сети 220 кВ и новых объектов генерации. Использование токоограничивающих реакторов на напряжение 220 кВ позволяет решить проблему ограничения токов КЗ, однако приводит к появлению в сети индуктивности, что затрудняет управление энергосистемой в аварийных и переходных режимах и увеличивает нагрузочные потери.

В настоящее время компанией, которая занимается развитием, эксплуатацией и реконструкцией электрических сетей г. Москвы, заказана разработка пилотного проекта по установке ТОУ 220 кВ на основе сверхпроводников на ПС 220 кВ «Мневники». Ввод устройства в эксплуатацию намечен на 2018 год. ТОУ планируется установить параллельно существую-

ющему токоограничивающему реактору 220 кВ с индуктивным сопротивлением 3 Ом в цепи КЛ 220 кВ Мневники – Очаково (рис. 3). Устройство предназначено для шунтирования токоограничивающего реактора, снижения нагрузочных потерь и уменьшения величины падения напряжения в сети 220 кВ в нормальном режиме.

Расчеты показывают, что после установки ТОУ уровни однофазных токов КЗ в сети 220 кВ в первые несколько миллисекунд после начала КЗ превышают величину 50 кА. Однако в связи с быстроедействием ТОУ (время изменения сопротивления от 0,01 до 40 Ом составляет 5 мс при протекании тока КЗ) уже через 5 мс уровни однофазных токов КЗ в сети 220 кВ составляют менее 50 кА, что не превышает отключающей способности существующих выключателей 220 кВ.

Во избежание перегрева ВТСП-ленты выше допустимой температуры (около 400 °С) время протекания тока КЗ через ТОУ ограничено и составляет порядка 0,4 с. Отключение ТОУ осуществляется последовательно установленным выключателем 220 кВ. В настоящее время ведутся разработки по усовершенствованию конструкции криосистемы с целью увеличения времени отключения ТОУ до 3 с. Время восстановления сверхпроводника ТОУ (время охлаждения ВТСП-ленты от 400 °С до –196 °С) составляет порядка 30 с. После этого ТОУ может повторно вводиться в работу.

Таким образом, применение ТОУ на основе ВТСП в комплексе с токоограничивающим реактором снижает уровни токов КЗ в сети 220 кВ и шунтирует индуктивность токоограничивающего реактора. В результате появляется возможность применения выключателей с меньшей отключающей способностью, а также снижаются нагрузочные потери в сети.

Выводы

1. Применение ТОУ является одним из инновационных способов ограничения токов КЗ в сетях различных классов напряжения переменного и постоянного тока.

2. Сверхпроводниковые ТОУ можно эффективно применять для защиты линий, объединения шин, ограничения пусковых токов. Перспективно применение устройств разного класса напряжения как при переменном, так и при постоянном токе.