

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316.54

**КОММУТАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КРИОГЕННЫХ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА*****Инж. П. В. ЛЫЧЕВ****Белорусский ордена Трудового Красного Знамени
политехнический институт*

Изучение технических и экономических параметров сверхпроводящих кабелей [1] показывает их конкурентоспособность с традиционными способами передачи электроэнергии. В последние годы ведутся исследования по разработке схем включения сверхпроводящих кабелей в электропередачи. Для коммутации в них могут применяться обычные выключатели. Однако соединение сверхпроводящих кабелей друг с другом с помощью обычных выключателей приводит к двойному переходу теплая-холодная зона с дорогами тоководными устройствами, являющимися дополнительными источниками тепла. В связи с этим, а также с учетом возможности создания общей системы хладобеспечения, увеличивающей экономичность сверхпроводящих электропередач, целесообразно применять коммутационные устройства, работающие в холодной зоне.

Рассмотрению конструкций двух таких устройств и оценке их некоторых характеристик посвящена данная статья.

Большой интерес представляют криогенные бесконтактные коммутационные устройства, работа которых основана на свойстве сверхпроводниковых материалов резко увеличивать сопротивление при переходе в нормальное состояние [2]. На принципиальную возможность создания таких выключателей для электроэнергетических систем указывается в [3].

Исследуем влияние параметров сверхпроводящего материала на технико-экономические характеристики сверхпроводящих бесконтактных выключателей, включенных непосредственно в электрическую сеть.

Одна из возможных конструктивных схем бесконтактного выключателя приведена на рис. 1. Она содержит переходный элемент, выполненный в виде последовательно соединенных блоков 1, каждый из которых представляет бифилярно уложенную электрически изолированную ленту из сверхпроводящего материала. Бифилярная укладка делает переходный элемент практически безындуктивным, что предотвращает накопление в нем больших количеств энергии, способной превращаться в тепло при возврате элемента в нормальное состояние. Такое исполнение выключателя позволяет заменять отдельные блоки при повреждениях в процессе эксплуатации. Управление состоянием переходного элемента производится обмоткой отключения 3 и экраном 2. При этом в

сверхпроводящем состоянии из-за эффекта Мейсснера экран препятствует действию магнитного поля обмотки отключения на переходный элемент. Для отключения выключателя сверхпроводящий экран источником тока переводится в нормальное состояние. Так как эффект Мейсснера исчезает, магнитное поле обмотки отключения, проникая в переходный элемент, переводит его в нормальное состояние с большим сопротивлением. Все указанные элементы находятся в криостате 4, имеющем теплоизоляцию 5 и заполненном хладагентом 6.

Выбор сверхпроводника переходного элемента производится с запасом по пропускной способности, который для селективной работы противоаварийной автоматики должен выдерживать кратковременное протекание тока короткого замыкания.

Для оценки экономической эффективности выключателя разработан алгоритм определения его технико-экономических параметров, согласно которому капитальные вложения определяются по следующему выражению:

$$K_{\text{спв}} = (K_{\text{сп}} + K_{\text{ха}} + K_{\text{ру}} + K_{\text{ти}} + K_{\text{уу}}) k_{\text{м}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{сп}}$, $K_{\text{ха}}$, $K_{\text{ру}}$, $K_{\text{ти}}$, $K_{\text{уу}}$ — соответственно стоимость сверхпроводника переходного элемента, хладагента, рефрижераторной установки, теплоизоляции и устройства управления;

$k_{\text{м}}$ — коэффициент, учитывающий затраты на монтажные работы.

На общую стоимость выключателя значительное влияние оказывает оптимизируемая в алгоритме величина сопротивления R переходного элемента в нормальном состоянии, так как при его увеличении растет стоимость сверхпроводника и одновременно уменьшаются затраты на рефрижераторную установку. При этом стоимость сверхпроводника определяется по формуле

$$K_{\text{сп}} = c_{\text{сп}} \gamma_{\text{сп}} k_{\text{I}}^2 I_{\text{н}}^2 R / \rho_{\text{н}} j_{\text{к}}^2, \quad (2)$$

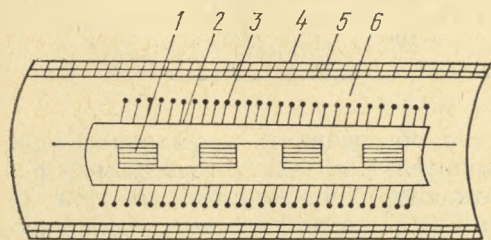


Рис. 1. Конструктивная схема сверхпроводящего бесконтактного выключателя

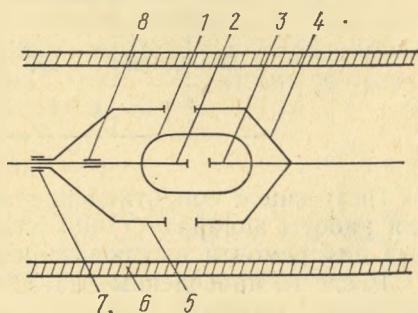


Рис. 2. Конструктивная схема сверхпроводящего выключателя с ВДК

где $c_{\text{сп}}$ — удельная стоимость сверхпроводника в готовом изделии;

$\gamma_{\text{сп}}$ — плотность материала;

k_{I} — коэффициент запаса по току;

$\rho_{\text{н}}$ — удельное сопротивление сверхпроводника в нормальном состоянии;

$j_{\text{к}}$ — критическая плотность тока сверхпроводника;

$I_{\text{н}}$ — номинальный ток выключателя.

Стоимость рефрижераторной установки

$$K_{\text{ру}} = U^2 c_{\text{ру}} / R, \quad (3)$$

где c_{py} — удельная стоимость рефрижераторной установки;

U — номинальное напряжение выключателя.

Следует отметить, что при определенной длине сверхпроводника мощность рефрижераторной установки обуславливается потерями мощности в переходном элементе, находящемся в сверхпроводящем состоянии. Величину потерь найдем по несколько преобразованной формуле [4]

$$\Delta P_{сп} = \sqrt{2} \mu_0 f I_n^3 R / 12 \pi j_{кp} \rho_n, \quad (4)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума;

f — частота тока.

Минимальное сопротивление R выбирается из условия сохранения термостабилизации [3] и определяется по выражению

$$R_{min} = U \sqrt{h_{сп} \rho_n} / F_{сп} \sqrt{2 q_{пр}}, \quad (5)$$

где $h_{сп}$ — толщина ленты сверхпроводника;

$q_{пр}$ — предельно возможная мощность, которую может отводить хладагент;

$F_{сп}$ — сечение сверхпроводника.

Таблица 1

Параметры выключателя			Критическая плотность тока, А/м ²	Стоимость выключателя, тыс. руб.
U, кВ	I _n , А	отключаемый ток, кА		
20	9 000	135	5 · 10 ¹⁰	210
			10 ¹¹	130
			5 · 10 ¹¹	75
20	20 000	250	5 · 10 ¹⁰	700
			10 ¹¹	520
			5 · 10 ¹¹	220

Полученное сопротивление должно обеспечивать нормальные условия работы аппарата (типа разъединитель), создающего видимый разрыв для ремонта выключателя и отключающего сопровождающий ток.

Расчеты, проведенные на ЭВМ ЕС-1022 по программе, составленной на основе разработанного алгоритма, показывают (табл. 1), что при $\rho_n = 0,05$ Ом·м стоимость выключателя существенно зависит от критической плотности тока материала сверхпроводника.

Для создания сверхпроводящих бесконтактных выключателей необходимы сверхпроводниковые материалы не только с большим сопротивлением в нормальном состоянии [3], но и с высокой критической плотностью тока. Из известных материалов для переходных элементов наилучшими параметрами ($j_{к} = 10^7$ А/м², $\rho_n = 10^{-4}$ Ом·м) обладает кермет [5].

В связи с отсутствием необходимых сверхпроводниковых материалов определенный интерес представляет коммутационное устройство контактного типа (рис. 2).

Основной его узел — вакуумная дугогасительная камера (ВДК) 1 с контактами 2 и 3. Ее выбор объясняется тем, что разработанные во многих странах мира ВДК характеризуются допустимостью большого ко-

личества отключений без необходимости производства ревизий, высоким быстродействием, малой массой, отсутствием ограничений для применения при низких температурах [6]. Параллельно контактам 2 и 3 снаружи ВДК включены сверхпроводящие контакты 4 и 5, находящиеся вместе с камерой в криостате 6. Управление подвижными обычным 2 и сверхпроводящим 5 контактами производится приводами 8 и 7.

При включенном выключателе обе пары контактов замкнуты и ток протекает только через сверхпроводящие контакты. Для отключения первыми замыкаются сверхпроводящие контакты, при этом ток из-за роста сопротивления в их цепи вытесняется в цепь шунтирующих контактов 2 и 3, которыми и производится отключение тока. При включении первыми замыкаются контакты 2 и 3.

К особенностям работы предложенного выключателя относится кратковременное протекание тока через контакты ВДК, вследствие чего она может выбираться на меньший номинальный ток.

Стоимость сверхпроводящих контактов, хладагента и теплоизоляции в значительной мере зависит от геометрических размеров ВДК, которые в свою очередь определяются техническими параметрами выключателя (напряжением, током отключения). Так, корреляционный анализ конструктивных параметров ВДК [7] позволил установить следующую зависимость между ее высотой и напряжением:

$$h = a + bU^c,$$

где a , b , c — коэффициенты уравнения регрессии.

Малые размеры ВДК способствуют небольшому расходу материалов на сверхпроводящие контакты и холодную зону. Этим также объясняются весьма низкие гистерезисные потери и теплопритоки через теплоизоляцию, определяющие мощность рефрижераторных станций. Как показывает оценочный анализ стоимости отдельных составляющих выключателя, наибольшая ее часть приходится на ВДК. Так как ВДК — только часть вакуумных выключателей, стоимость которых, согласно [6], лишь на 5—10% выше маломасляных, можно считать, что общая стоимость сверхпроводящих выключателей с ВДК будет соизмерима со стоимостью воздушных выключателей напряжением до 35 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В. А., Зуев Э. Н. Криогенные кабельные линии.— В кн.: Электротехнические материалы, электрические конденсаторы, провода и кабели, т. 9. Сверхпроводимость и ее применения.— М.: ВИНТИ, 1977, с. 71—152.
2. Результаты исследований сверхпроводящих ключей с высокой удельной разрывной мощностью / В. А. Глухих и др.— В кн.: Докл. Всесоюзной конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов, т. 3.— Л.: НИИЭФА, 1977, с. 136—143.
3. Создание устройств, управляющих режимами электроэнергетических систем на основе явления перехода веществ из одного состояния в другое / Ю. Н. Вершинин и др.— Электричество, 1978, № 12, с. 1—5.
4. Фастовский В. Г., Петровский Ю. В., Ровинский А. Е. Криогенная техника.— М.: Энергия, 1972,—495 с.
5. А. с. 454624 (СССР). Сверхпроводящее коммутационное устройство / Авт. изобрет. В. А. Алексеев, А. А. Веденов, Т. С. Мильникова; заявл. 24.04.1973, № 1903400/24-07; Опубл. в Б. И., 1974, № 47, МКИ Н01V 11/12.
6. Козлов В. Б., Улиссова И. Н. Развитие вакуумной коммутационной аппаратуры в СССР и за рубежом.— Электротехника, 1980, № 4, с. 9—12.
7. Shinzo Sakuma, Yutaka Kashimoto. New Type Vacuum Interrupters.— Meiden Review Int. Edition, 1979, 2, p. 4—8.