



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ(21)(22) Заявка: **2011111249/28, 24.03.2011**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.03.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **24.03.2011**(45) Опубликовано: **27.08.2012** Бюл. № 24

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **A.A.Ulbricht. Resistive Superconducting Power Switch with a Switching Power of 40 MW at 47 kV. - Cryogenics, 1979, №10, pp.591-602. Менке Х., Шишов Ю.Д. Модель сильноточного и высоковольтного сверхпроводящего выключателя. Препринт Р8-7855. - Дубна: ОИЯИ, 1974.. Ларионов Б.А. и др. Принципы сложения мощностей коммутирующих устройств при выводе (см. прод.)**

Адрес для переписки:

**634028, г.Томск, пр. Ленина, 2а, ФТИ,
ОПОРИД**

(72) Автор(ы):

Мащенко Александр Иванович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

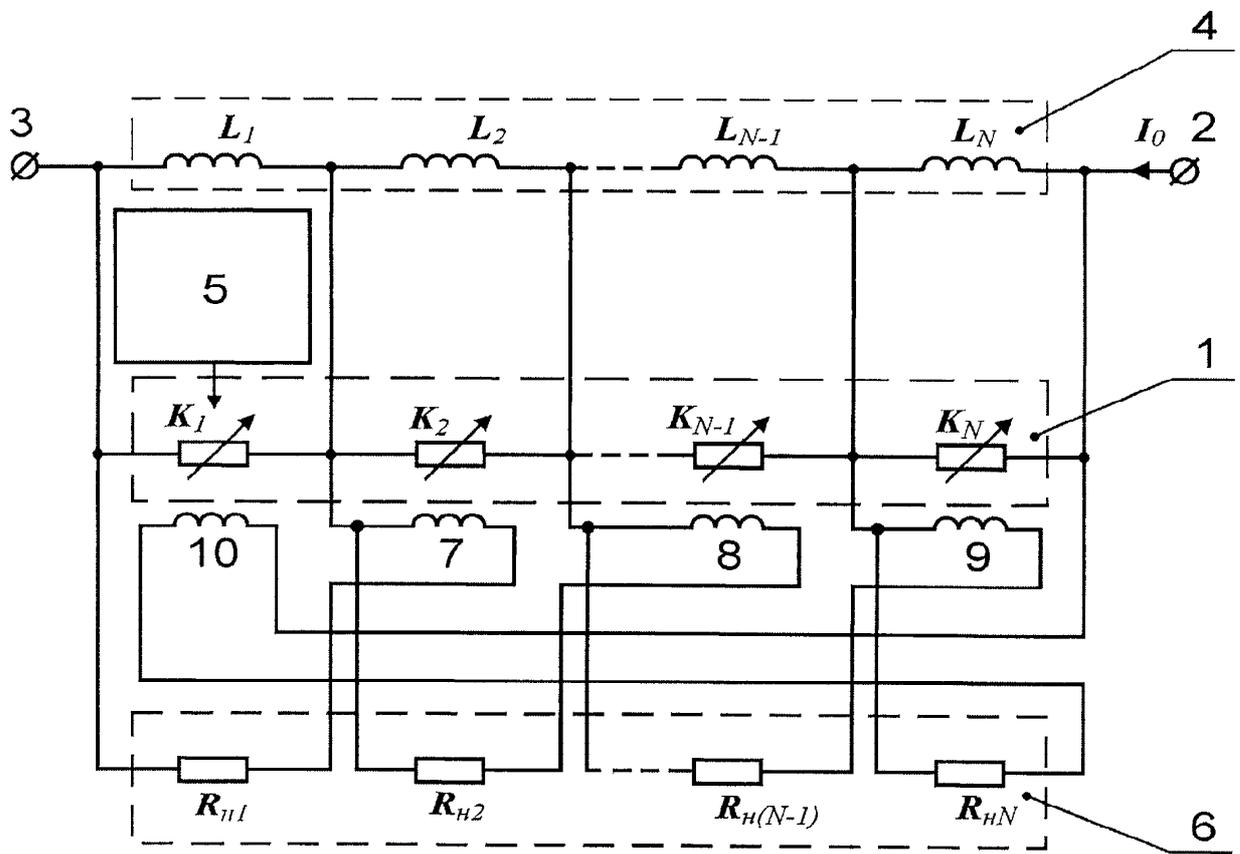
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)

(54) МОЩНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области сверхпроводящей электротехники и может быть использовано для коммутации электрических цепей постоянного тока. Сущность изобретения: мощный сверхпроводящий выключатель содержит систему управления и сверхпроводящий отключающий элемент, который выполнен из N последовательных секций и подсоединен своими выводами к выводам сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии и источника постоянного тока и к выводам нагрузки. Индуктивный накопитель энергии и нагрузка также состоят из N последовательных секций, включенных между собой и отключающим элементом посекционно параллельно. Система управления подключена к первой секции

отключающего элемента. Между одним из выводов каждой секции отключающего элемента и выводом одноименной секции нагрузки дополнительно включена обмотка, которая конструктивно расположена снаружи следующей секции отключающего элемента. Обмотка, электрически включенная в цепь N-й секции нагрузки, конструктивно расположена снаружи первой секции отключающего элемента, образуя замкнутую схему воздействия обмоток. Технический результат изобретения заключается в снижении энергии системы управления и повышении надежности выключателя за счет дополнительного использования энергии магнитного поля, создаваемого током, протекающим в цепи нагрузки. 1 ил.



Фиг.1

(56) (продолжение):

энергии из индуктивного накопителя. - В кн.: Тез. докл. 1 Всесоюзн. конф. по импульсным источникам энергии. - М.: ИАЭ, 1983, с.157. Физика и техника мощных импульсных систем: Сб. ст. / Под ред. Е.П.Велихова. - М.: Энергоатомиздат, 1987, с.105. RU 2230398 С1, 10.06.2004. WO 98/47186 А1, 22.10.1998. US 5757257 А, 26.05.1998.

RU 2460176 C1

RU 2460176 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
H01L 39/16 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2011111249/28, 24.03.2011

(24) Effective date for property rights:
24.03.2011

Priority:

(22) Date of filing: 24.03.2011

(45) Date of publication: 27.08.2012 Bull. 24

Mail address:

634028, g.Tomsk, pr. Lenina, 2a, FTI, OPORID

(72) Inventor(s):

Mashchenko Aleksandr Ivanovich (RU)

(73) Proprietor(s):

**Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie
vysshego professional'nogo obrazovaniya
"Natsional'nyj issledovatel'skij Tomskij
politehnicheskij universitet" (RU)**

(54) **POWERFUL SUPERCONDUCTIVE SWITCH**

(57) Abstract:

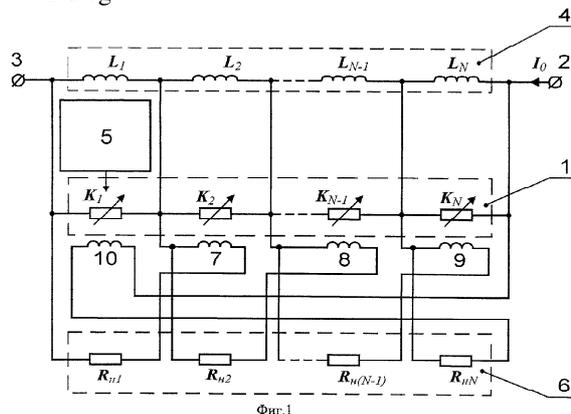
FIELD: electricity.

SUBSTANCE: powerful superconductive switch comprises a control system and a superconductive disconnecting element, which is made of N serial sections and is connected with their outputs to outputs of a superconductive inductive energy accumulator and a DC source and to load outputs. The inductive energy accumulator and the load also comprise N serial sections connected between each other and the disconnecting element section by section in parallel. The control system is connected to the first section of the disconnecting element. Between one of outputs in each section of the disconnecting element and the output of the identical load section there is a winding switched additionally, which is structurally arranged outside the next section of the disconnecting element. The winding connected electrically into the circuit of the N load section is structurally arranged outside

the first section of the disconnecting element, creating a closed circuit of windings impact.

EFFECT: lower energy of a control system and higher reliability of a switch by additional use of energy of a magnetic field developed by current flowing in a load circuit.

1 dwg



RU 2 460 176 C1

RU 2 460 176 C1

Изобретение относится к области сверхпроводящей электротехники и может быть использовано для коммутации электрических цепей постоянного тока, в частности в системах вывода энергии из индуктивных сверхпроводящих накопителей, для защиты крупных магнитных сверхпроводящих систем, работающих в режиме «замороженного» магнитного поля, сверхпроводящих обмоток электрических машин и в качестве токоограничителей в экспериментальных сверхпроводящих линиях электропередачи.

Для питания крупных электрофизических установок необходимы сверхпроводящие индуктивные накопители с энергозапасом 10^7 - 10^9 Дж. Одной из основных задач применения таких накопителей является создание сверхпроводящих выключателей многократного действия с быстродействием единицы - десятки микросекунд, рабочим напряжением - сотни киловольт и коммутируемой мощностью на уровне 10^9 - 10^{10} Вт и более [Физика и техника мощных импульсных систем: Сб. ст. / Под ред. Е.П.Велихова. М.: Энергоатомиздат, 1987, с.105]. Максимальная коммутируемая мощность разработанных и экспериментально исследованных сверхпроводящих выключателей составляет 10^7 - 10^{10} Вт, время выключения порядка 10 мкс [Разработка и исследование сильноточной сверхпроводящей коммутационной аппаратуры. - В кн.: Докл. Всесоюзн. совещ. по инженерным проблемам управляемого термоядерного синтеза. - Л.: НИИЭФА, 1975, т.3, с.181-194. Авт.: Глухих В.А. и др.; Куроедов Ю.Д. Мощные сверхпроводящие размыкатели. Обзор ГКАЗ СССР. - М.: ИАЭ, 1982]. Однако в тех случаях, когда требуемая мощность источника питания превосходит разрывную мощность коммутатора, выполнение мощного сверхпроводящего выключателя должно основываться на известных принципах модульного (секционированного) построения, которые позволяют путем последовательно-параллельного соединения модулей (секций) создавать выключатели с необходимыми параметрами по току и напряжению [Ларионов Б.А., Спесвакова Ф.М., Столов А.М. Принципы сложения мощностей коммутирующих устройств при выводе энергии из индуктивного накопителя. - В кн.: Тез. докл. 1 Всесоюзн. конф. по импульсным источникам энергии. - М.: ИАЭ, 1983, с.157]. Требование разработки модульных (секционированных) сверхпроводящих выключателей определяется также возможностью применения сверхпроводящей коммутационной аппаратуры в системах питания секционированных нагрузок от секционированных сверхпроводящих накопителей энергии.

Существуют три основных способа перевода сверхпроводящего выключателя в нормальное состояние: увеличение температуры либо магнитного поля в области сверхпроводника или увеличение тока в сверхпроводнике выше критических значений. Поэтому конструктивно сверхпроводящие выключатели содержат отключающий элемент, выполненный из сверхпроводящего материала, и систему управления. Основными элементами системы управления являются конденсатор с его зарядным устройством, управляемый замыкающий прибор со схемой запуска и в зависимости от способа управления нагреватель либо обмотка импульсного магнитного поля. При токовом управлении выводы конденсатора подсоединяются через управляемый прибор непосредственно к выводам отключающего элемента.

Для вывода энергии из сверхпроводящего индуктивного накопителя и сверхпроводящей магнитной системы применяется сверхпроводящий выключатель постоянного тока многократного действия [Менке Х., Шишов Ю.Д. Модель сильноточного и высоковольтного сверхпроводящего выключателя, - Препринт Р8-7855. - Дубна, ОИЯИ, 1974]. Устройство содержит отключающий элемент,

выполненный из сверхпроводника, и систему управления. Система управления состоит из конденсатора с зарядным устройством, который через управляемый прибор подсоединен к нагревателю. Замыкание управляемого прибора осуществляется схемой запуска. Отключающий элемент подключен своими выводами к выводам
5 сверхпроводящей магнитной системы, электропитание которой осуществляется от источника постоянного тока. Параллельно отключающему элементу выключателя и магнитной системе подключено сопротивление нагрузки.

При низких температурах теплоемкость металлов и сплавов весьма мала и поэтому
10 при адиабатических условиях требуется небольшая энергия, вводимая с помощью нагревателя, чтобы нагреть сверхпроводник до критической температуры. Для питания нагревателя могут быть применены сравнительно малые токи и низкие напряжения. Однако при высоких напряжениях вывода энергии и малых временах
15 выключения появляются серьезные проблемы обеспечения электрической изоляции между сверхпроводником и нагревателем. Для исключения возможности пробоя изоляции необходимо увеличивать объем используемых в конструкциях диэлектрических материалов, что ведет к дополнительным затратам энергии
управления, величина которой, отнесенная к объему сверхпроводящего материала,
20 равна 0,3-0,4 Дж/см³. Это примерно на порядок меньше, чем в известных сверхпроводящих выключателях с магнитным и токовым управлением.

Основным недостатком сверхпроводящих выключателей с тепловым управлением является большое время выключения, составляющее сотни мкс - 1 мс, из-за
25 ограниченной скорости тепловой диффузии в отключающем элементе.

Наиболее близким техническим решением является конструкция мощного сверхпроводящего выключателя [Ulbricht A. A Resistive Superconducting Power Switch with a Switching Power of 40 MW at 47 kV. - Cryogenics, 1979, №10, pp.591-602]. Данное устройство содержит сверхпроводящий отключающий элемент, выполненный из
30 восьми секций, соединенных последовательно и управляемых попарно с помощью четырех систем управления. Отключающий элемент подсоединен своими выводами к выводам сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии и его источника электропитания и к выводам нагрузки. Каждая система управления состоит из двух
35 последовательно соединенных конденсаторов, заряженных встречно от зарядного устройства, и управляемого прибора со схемой запуска. Управляемый прибор включен между точкой соединения конденсаторов и точкой соединения двух секций отключающего элемента, а противоположные выводы конденсаторов подсоединены к
40 противоположным выводам этих двух секций отключающего элемента. При этом осуществляется токовое управление выключателем.

При токовом управлении сверхпроводящим выключателем управляющее напряжение прикладывается непосредственно к отключающему элементу, соответственно, к цепям сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии и
нагрузки. Для перевода большей части элемента в нормальное состояние напряжение
45 управления U_y должно составлять не менее $0,3 I_c \cdot R_n$ (где I_c - критический ток сверхпроводника выключателя, R_n - сопротивление выключателя в нормальном состоянии). Это напряжение равно рабочему U_p (для выключателей из ниобий-титановых проводников) только при КПД передачи энергии, равном 0,7. При
50 больших значениях КПД управляющее напряжение значительно превышает рабочее, например при КПД=0,9 управляющее напряжение равно $\sim 3U_p$. Воздействие такого высокого напряжения может быть нежелательным как для сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии, так и для нагрузки.

В устройстве-прототипе величина управляющего напряжения снижается в два раза, что является достоинством выключателя.

Мощность отключения выключателя составляет 40 МВт при напряжении 47 кВ. Время выключения равно ~ 20 мкс, разброс времени срабатывания выключателя при токовом управлении - приблизительно 5 мкс. Величина энергии управления, отнесенная к единице объема NbTi-сверхпроводника, составляет 4,5-9 Дж/см³. Хорошие результаты по напряжению достигнуты благодаря секционированному построению отключающего элемента. Рабочее переключение секций (попарно) отключающего элемента выключателя осуществляется от отдельных систем управления.

Основным недостатком, присущим устройству-прототипу, является наличие у каждой секции отключающего элемента системы управления, состоящей соответственно из элементов: конденсатора, устройства заряда конденсатора, управляемого прибора, схемы запуска управляемого прибора. При этом суммарная энергия управления сверхпроводящим выключателем увеличивается пропорционально количеству секций отключающего элемента, используемых для вывода энергии из индуктивного накопителя в нагрузку, и достигает большой величины.

При самопроизвольном нарушении сверхпроводящего состояния какой-либо из секций отключающего элемента может произойти ее повреждение энергией индуктивного накопителя, выделившейся в локальной области сверхпроводника, перешедшей в нормальное состояние. Это снижает надежность сверхпроводящего выключателя и является недостатком. Большое количество элементов системы управления также снижает надежность сверхпроводящего выключателя.

Кроме того, большой разброс времени срабатывания выключателя требует применения дополнительной схемы синхронизации запуска.

Задачей предлагаемого изобретения является создание надежного мощного сверхпроводящего выключателя с уменьшенной энергией системы управления.

Техническим результатом является снижение энергии системы управления и повышение надежности выключателя за счет дополнительного использования энергии магнитного поля, создаваемого током, протекающим в цепи нагрузки.

Для решения данной задачи предлагается мощный сверхпроводящий выключатель, содержащий систему управления и сверхпроводящий отключающий элемент, который выполнен из N последовательных секций и подсоединен своими выводами к выводам сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии и источника постоянного тока и к выводам нагрузки, отличающийся от прототипа тем, что индуктивный накопитель энергии и нагрузка состоят из N последовательных секций, включенных между собой и отключающим элементом посекционно параллельно, система управления подключена к первой секции отключающего элемента, а между одним из выводов каждой секции отключающего элемента и выводом одноименной секции нагрузки дополнительно включена обмотка, которая конструктивно расположена снаружи следующей секции отключающего элемента, при этом обмотка, электрически включенная в цепь N-й секции нагрузки, конструктивно расположена снаружи первой секции отключающего элемента, образуя замкнутую схему воздействия обмоток.

Изобретение иллюстрируется графическим материалом, где изображено:

Фиг.1 - принципиальная электрическая схема устройства, где обозначено: 1 - сверхпроводящий отключающий элемент, состоящий из секций $K_1 \dots K_N$; 2 и 3 - выводы сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии (полюса источника постоянного

тока); 4 - сверхпроводящий индуктивный накопитель энергии, состоящий из секций $L_1 \dots L_N$; 5 - система управления выключателем (может быть построена по любому из трех способов управления: тепловому, магнитному или токовому); 6 - нагрузка, состоящая из секций $R_{H1} \dots R_{HN}$ в которую передается энергия; 7 - обмотка, расположенная снаружи секции K_2 отключающего элемента; 8 - обмотка, расположенная снаружи секции K_{N-1} отключающего элемента; 9 - обмотка, расположенная снаружи секции K_N отключающего элемента; 10 - обмотка, расположенная снаружи секции K_1 отключающего элемента.

Устройство содержит сверхпроводящий секционированный отключающий элемент 1, подсоединенный своими выводами к выводам 2 и 3 сверхпроводящего секционированного индуктивного накопителя энергии 4 и источника постоянного тока (не показан на фигуре 1), систему управления 5 выключателем, параллельно выводам отключающего элемента 1 подключена цепь из соединенных последовательно секций нагрузки 6 и соответствующих этим секциям обмоток 7, 8, 9 и 10. Обмотка 7, электрически включенная в цепь 1-й секции нагрузки, конструктивно расположена снаружи 2-й секции отключающего элемента. Обмотка 8, электрически включенная в цепь 2-й секции нагрузки, конструктивно расположена снаружи (N-1)-й секции отключающего элемента. Обмотка 9, электрически включенная в цепь (N-1)-й секции нагрузки, конструктивно расположена снаружи N-й секции отключающего элемента, а обмотка 10, электрически включенная в цепь N-й секции нагрузки, конструктивно расположена снаружи 1-й секции отключающего элемента.

Устройство работает следующим образом.

Первоначально от источника постоянного тока (полюса 2 и 3) вводится ток I_0 в сверхпроводящий индуктивный накопитель энергии 4. Отключающий элемент 1 выключателя находится в нормальном (разомкнутом) состоянии. При достижении током накопителя необходимого уровня отключающий элемент 1 переводится в сверхпроводящее состояние, каждая из секций накопителя 4 замыкается и переходит в режим хранения энергии. По секции K_1 отключающего элемента 1 течет ток секции L_1 накопителя 4, по секции K_2 течет ток секции L_2 , по секции K_{N-1} течет ток секции L_{N-1} и по секции K_N течет ток секции L_N . Система управления 5 не воздействует на отключающий элемент 1. Тип системы управления (тепловое, магнитное или токовое воздействие) не является принципиальным для работоспособности данного устройства и зависит только от требуемых коммутационных характеристик выключателя. В требуемый для переключения момент времени включается система управления 5 и производится ввод управляющей энергии в одну из секций (например, первую секцию K_1) отключающего элемента 1. При этом происходит нарушение сверхпроводящего состояния секции K_1 и возникшее сопротивление секции K_1 приводит к уходу части тока первой секции L_1 накопителя 4 из цепи секции K_1 отключающего элемента 1 в цепь первой секции R_{H1} нагрузки 6 и обмотки 7. Появление тока в цепи секции R_{H1} нагрузки 6 приводит к генерации обмоткой 7 импульсного магнитного поля в области второй секции K_2 отключающего элемента 1, которое воздействует на сверхпроводник секции K_2 и переводит его в нормальное состояние. Начинается процесс разряда второй секции L_2 накопителя 4 на вторую секцию R_{H2} нагрузки 6 и обмотку 8. Управляющее магнитное поле обмотки 8 переводит в нормальное состояние следующую секцию K_{N-1} отключающего элемента 1 и ток секции L_{N-1} накопителя 4 перераспределяется из цепи секции K_{N-1} отключающего элемента 1 в цепь секции $R_{H(N-1)}$ нагрузки 6 и обмотки 9.

Нарастающий в обмотке 9 ток создает импульсное магнитное поле, которое воздействует на сверхпроводник секции K_N отключающего элемента 1 и переводит его в нормальное состояние. Разряд последней секции L_N накопителя 4 на соответствующую ей последнюю секцию R_{HN} нагрузки 6 сопровождается генерацией магнитного поля обмоткой 10 уже в объеме первой секции K_1 отключающего элемента 1. Дополнительное воздействие магнитного поля на сверхпроводник первой секции K_1 отключающего элемента 1 увеличивает его сопротивление и, соответственно, увеличивает долю перехваченного в цепь первой секции R_{H1} нагрузки 6 тока, величина создаваемого обмоткой 7 магнитного поля в области второй секции K_2 отключающего элемента 1 возрастает и т.д. до полного перевода сверхпроводящего выключателя в нормальное состояние.

В данном выключателе, в отличие от прототипа, от системы управления 5 осуществляется переключение (перевод в нормальное состояние) только одной, первой секции K_1 отключающего элемента 1. А энергия, необходимая для переключения всех последующих секций отключающего элемента 1, кроме первой секции K_1 , подается не от системы управления 5, а используется энергия магнитного поля, которая создается током индуктивного накопителя 4, протекающим в цепях нагрузки 6. Таким образом, наличие обмоток 7...10 позволяет уменьшить энергию системы управления, необходимую для переключения секционированного отключающего элемента мощного сверхпроводящего выключателя.

В рабочем режиме выключения величина доли сверхпроводника первой секции K_1 отключающего элемента 1, перешедшего в нормальное состояние, зависит от величины энергии системы управления 5, тип и мощность которой выбирается в зависимости от требуемых параметров выключателя по быстродействию. Для быстрого и полного перевода в нормальное состояние секции с единичной коммутируемой мощностью 10^7 - 10^8 Вт необходимо использовать токовое либо магнитное управление, которые позволяют получить время выключения 5-20 мкс при средней удельной энергии управления 4-5 Дж/см³. Причем с точки зрения фиксации сверхпроводника в резистивном состоянии разница между управлением импульсным током и импульсным полем незначительна [Накопление и коммутация энергии больших плотностей. / Под ред. У.Бостика, В.Нарди, О.Цукера. - М.: Мир, 1979, с.249].

Но в любом случае при равной мощности, коммутируемой выключателями, и равном времени выключения отдельных секций отключающих элементов величина энергии системы управления в предлагаемом устройстве будет в N раз меньше, чем в устройстве-прототипе (где N - количество секций в отключающих элементах в предлагаемом устройстве и в устройстве-прототипе). С учетом общей требуемой коммутируемой мощности порядка 10^9 - 10^{10} Вт выключатель должен иметь от 10 до 100 секций ($N=10$ -100). Соответственно, величина энергии системы управления предлагаемого выключателя будет в 10-100 раз меньше, чем у прототипа. Количество секций более 100 является, очевидно, не рациональным.

При самопроизвольном нарушении сверхпроводимости какой-либо из секций отключающего элемента 1, например секции K_{N-1} , возникшее сопротивление этой секции ведет к переходу части тока секции L_{N-1} накопителя 4 в цепь одноименной секции $R_{H(N-1)}$ нагрузки 6 и обмотки 9. Обмотка 9 при этом создает магнитное поле в области последующей секции K_N отключающего элемента 1. Под воздействием магнитного поля часть секции K_N переходит в нормальное состояние и часть тока секции L_N накопителя 4 перераспределяется в цепь одноименной секции R_{HN}

нагрузки 6 и обмотки 10. При этом обмотка 10 создает магнитное поле в области секции K_1 отключающего элемента 1, которое переводит часть секции K_1 в нормальное состояние. Возникшее сопротивление секции K_1 ведет к снижению тока в ее цепи и появлению тока в цепи одноименной нагрузки R_{H1} и обмотки 7, которая создает магнитное поле, воздействующее на сверхпроводник следующей секции K_2 отключающего элемента 1 и осуществляющее перевод некоторой части секции K_2 в нормальное состояние и т.д. по круговой схеме воздействия. Вследствие замкнутости схемы воздействия обмоток 7...10, создающих импульсное магнитное поле, при этом автоматически обеспечивается полный перевод всех секций $K_1...K_N$ отключающего элемента 1 в нормальное состояние. Развитие полного сопротивления секций отключающего элемента ведет к снижению тока в них и предотвращает повреждение отключающего элемента выключателя из-за локального выделения в нем энергии индуктивного накопителя. Таким образом, благодаря наличию обмоток 7...10 обеспечивается сохранность секций отключающего элемента при их самопроизвольном переходе в нормальное состояние, а следовательно, надежность мощного сверхпроводящего выключателя в аварийных режимах повышается.

При одновременной посылке команды на срабатывание всех секций выключателя неизбежны разбросы во времени их срабатывания и вследствие этого перенапряжения на отдельных секциях накопителя относительно земли. Перенапряжения зависят от очередности срабатывания секций выключателя. Выбранная очередность срабатывания секций выключателя должна обеспечиваться схемой управления вывода энергии. Для безаварийного функционирования системы вывода целесообразно работу схемы управления коммутаторами строить таким образом, чтобы команда на срабатывание каждой последующей по очередности секции выключателя посылалась после получения информации о срабатывании предыдущей секции выключателя [Физика и техника мощных импульсных систем: Сб. ст. / Под ред. Е.П.Велихова. М.: Энергоатомиздат, 1987, с.29, 102].

В предлагаемом устройстве перенапряжения относительно земли при выводе энергии из секционированного сверхпроводящего накопителя могут быть ликвидированы или снижены при применении определенной очередности срабатывания секций выключателя. Режим поочередного выключения секций $K_1...K_N$ отключающего элемента 1 в устройстве выполняется автоматически, т.к. нарастание управляющего магнитного поля в области каждой последующей секции отключающего элемента 1 происходит только после срыва сверхпроводящего состояния каждой предыдущей секции отключающего элемента 1. Для установления требуемой очередности в схеме вывода энергии достаточно лишь соответственно переключить выводы обмоток 7...10 в цепях секций $R_1...R_N$ нагрузки 6. Любая очередность срабатывания секций выключателя, позволяющая обеспечить минимальные напряжения относительно земли, может быть выбрана при различном количестве секций.

Достоинством выключателя по сравнению с прототипом является также и то, что в N раз (N - число секций отключающего элемента) уменьшается количество управляющих конденсаторов с зарядным устройством и в $0,5 N$ - количество управляемых приборов со схемой запуска, упрощается развязка зарядных цепей.

Рассмотрим реализацию устройства на примере изготовленного и испытанного в Томском политехническом университете модуля сверхпроводящего выключателя [Амелин Г.П., Блудов А.И., Гусельников В.И., Машенко А.И. Мощный сверхпроводящий выключатель. - ПТЭ, 1990, №4, с.245]. Параметры выключателя:

рабочий ток 6 кА, рабочее напряжение до 80 кВ, сопротивление в нормальном состоянии (при температуре 10 К) 70 Ом. Размеры модуля выключателя 190×190×220 мм³, масса 17 кг. Отключающий элемент выполнен из сверхпроводящей фольги HT-50 толщиной 18 мкм и шириной 80 мм. Длина фольги составляет 160 м. Фольга уложена в виде меандра в пакет с лавсановой изоляцией между слоями и с парафиномазляным наполнителем.

Снаружи отключающего элемента расположена управляющая обмотка, представляющая собой прямоугольный соленоид с размерами 90×150×120 мм³, близкими к размерам отключающего элемента. Проводником обмотки является медная шина с сечением 28 мм². Число витков обмотки равно 9. Данный модуль выключателя может использоваться для вывода энергии из сверхпроводящего накопителя в нагрузку с сопротивлением 7 Ом при КПД передачи, равном 90%. Управляемый перевод выключателя из сверхпроводящего состояния с нулевым сопротивлением в нормальное состояние с конечным сопротивлением выполняется под действием импульса сверхкритического тока или импульса внешнего магнитного поля. Затраты энергии системы управления составляют при этом 200 Дж.

При построении мощного сверхпроводящего выключателя, например, из восьми (как и прототип) таких модулей (секций), включенных последовательно, систему управления с запасаемой энергией ≥200 Дж будет иметь только первая секция отключающего элемента выключателя. Конденсатор системы управления может быть подключен через управляемый прибор (управляемый разрядник) непосредственно к выводам первой секции отключающего элемента (токовое управление) либо к выводам обмотки управления, расположенной на первой секции (магнитное управление). А управляющие обмотки, расположенные на последующих секциях отключающего элемента, будут включены в электрические цепи предыдущих секций нагрузки.

При переводе в нормальное состояние 1-й секции выключателя ток накопителя I_0 (рабочий ток выключателя) 6 кА поделится по цепям 1-й секции нагрузки с управляющей обмоткой и 1-й секции отключающего элемента обратно пропорционально их сопротивлениям: 5455 А - в цепи 1-й секции нагрузки и управляющей обмотки, расположенной снаружи 2-й секции отключающего элемента, 545 А - в цепи 1-й секции отключающего элемента. При токе в управляющей обмотке 5455 А величина индукции B магнитного поля в области сверхпроводника 2-й секции отключающего элемента определяется из выражения:

$$B = \mu_0 \cdot I \cdot w / \ell = 0,685 \text{ Т}, \quad (1)$$

где $I=5455$ А - ток в управляющей обмотке (ток в цепи секции нагрузки), $w=9$ - число витков управляющей обмотки, $\ell=0,09$ м - аксиальная длина обмотки, $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная.

Энергия магнитного поля, затраченная на перевод в нормальное состояние 2-й секции отключающего элемента, определяется с учетом объема, охваченного витками управляющего соленоида:

$$W_y = B^2 \cdot V / 2\mu_0 = 302 \text{ Дж}, \quad (2)$$

где $V=0,09 \cdot 0,15 \cdot 0,12=1,62 \cdot 10^{-3}$ м³ - объем апертуры соленоида.

Поскольку при испытаниях модуля за время выключения 5 мкс от системы управления расходовалась энергия 200 Дж, то можно сделать вывод о высокой эффективности управления выключателем импульсным магнитным полем, создаваемым током индуктивного накопителя, протекающим в цепи нагрузки при

данных параметрах управляющей обмотки. Полный перевод в нормальное состояние всех последующих секций отключающего элемента происходит при аналогичных параметрах импульсного магнитного поля, генерируемого однотипными управляющими обмотками, включенными в электрическую цепь предыдущих секций нагрузки.

Величина энергии системы управления мощным сверхпроводящим выключателем предлагаемой конструкции в конкретном примере, с числом секций $N=8$ уменьшается по сравнению с прототипом в 8 раз. При увеличении числа секций отключающего элемента $N>8$ (при увеличении суммарной коммутируемой мощности) величина энергии системы управления не меняется и остается на прежнем уровне, достаточном для управления только одной, первой секцией отключающего элемента выключателя.

В случае самопроизвольного нарушения сверхпроводимости любой из секций $K_1...K_N$ отключающего элемента происходит автоматический последовательный перевод в нормальное состояние всех секций и, соответственно, обеспечивается контролируемый безаварийный вывод энергии из секций накопителя в нагрузку, что повышает надежность выключателя.

Таким образом, в предлагаемом мощном сверхпроводящем выключателе, коммутирующем мощность порядка 10^9-10^{10} Вт, осуществляется снижение энергии системы управления и повышение надежности путем использования для перевода в нормальное состояние каждой последующей секции отключающего элемента выключателя той части тока индуктивного накопителя, которая перераспределяется в цепь нагрузки и создает импульсное магнитное поле с помощью обмоток, электрически включенных между одним из выводов каждой предыдущей секции отключающего элемента и выводом предыдущей секции нагрузки, а конструктивно расположенных снаружи последующих секций отключающего элемента.

Формула изобретения

Мощный сверхпроводящий выключатель, содержащий систему управления и сверхпроводящий отключающий элемент, который выполнен из N последовательных секций и подсоединен своими выводами к выводам сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии и источника постоянного тока и к выводам нагрузки, отличающийся тем, что индуктивный накопитель энергии и нагрузка состоят из N последовательных секций, включенных между собой и отключающим элементом по секционно параллельно, система управления подключена к первой секции отключающего элемента, а между одним из выводов каждой секции отключающего элемента и выводом одноименной секции нагрузки дополнительно включена обмотка, которая конструктивно расположена снаружи следующей секции отключающего элемента, при этом обмотка, электрически включенная в цепь N -й секции нагрузки, конструктивно расположена снаружи первой секции отключающего элемента, образуя замкнутую схему воздействия обмоток.