



**“Fizika-2005”
Beynəlxalq Konfrans
International Conference
Международная Конференция**



7 - 9 **İyun** 2005 №121 **səhifə**
June **page** 460-464
Июнь **стр.**

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ДЛЯ
ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

МАНУСОВ В.З., МИХЕЕВ П.А.

*Новосибирский Государственный Технический Университет,
кафедра систем электроснабжения предприятий
г.Новосибирск, ул. Карла Маркса 20, 630092,
тел/факс..+7 (3832) 461551,
www.nstu.ru, Miheev_Avenger@rambler.ru*

В статье рассмотрены применения явления сверхпроводимости в энергетических системах, как в форме продольной установки (в линии), так и в поперечном виде (изменение режима нейтрали). В нормальных режимах работы сети выгодно иметь малое сопротивление для уменьшения потерь мощности в сети и падения напряжения, в аварийных режимах замыкания на землю, напротив, с точки зрения безопасности и надёжности работы такое сопротивление ну будет нас устраивать. Важнейшим свойством сверхпроводников является их способность изменять электрические параметры (в частности электрическое сопротивление) в зависимости от величины протекающего через них тока, то есть нелинейности их вольт-амперной характеристики. В работе рассмотрены высокотемпературные сверхпроводники, по причине экономической целесообразности охлаждения сверхпроводника жидким азотом вместо жидкого гелия. Применение сверхпроводников позволяет создать неуправляемые элементы электрической сети, позволяющие оптимизировать её работу, как в нормальном, так и в аварийном режимах.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЯВЛЕНИЯ

В 1911 г. голландский физик Х. Камерлинг-Оннес открыл явление сверхпроводимости, проводя измерения электрического сопротивления ртути при очень низких температурах (при 4,15K). После 1911 г. максимальное значение температуры перехода (критической температуры) T_c постепенно возрастало [1].

В 1973 г. была обнаружена сверхпроводимость напыленной пленки Nb_3Ge при 22,3 K, а вскоре эта температура увеличилась до 23,2 K [2]. Эта величина оставалась рекордной до 1986 г.

В январе 1986 г. в исследовательской лаборатории фирмы IBM в Цюрихе Г. Беднорц и К. Мюллер открыли высокотемпературную сверхпроводимость некоторого класса оксидов меди. Система $La-Ba-Cu-O$ испытывает сверхпроводящий переход при охлаждении ниже 35 K [3,4]. За это открытие, положившее начало исследованию высокотемпературных сверхпроводников, в 1987 г. Г. Беднорц и К. Мюллер были удостоены Нобелевской премии по физике.

В конце 1986 г. данные, полученные Г. Беднорцем и К. Мюллером были подтверждены в Токийском [5] и Хьюстонском [6] университетах.

В начале марта 1987 г. открытие группой исследователей из университета штата Алабамы и Хьюстонского университета соединения являющегося сверхпроводником при температуре, превышающей температуру кипения жидкого азота. Это был оксид $YBa_2Cu_3O_{7-d}$, имеющий критическую температуру на несколько градусов выше 90 K [7].

За открытием вышеупомянутых сверхпроводников с необычайно высокой температурой перехода последовало открытие двух классов соединений, имеющих еще более высокие значения T_c . Первый класс соединений, открытый в лаборатории Цукуба (Япония) [8] представляет собой систему $Bi-Sr-Ca-O$ с температурой резкого уменьшения электрического сопротивления 120 K и полным диамагнетизмом, также являющимся характеристикой сверхпроводников, при 110 K [9]. Открытие высокотемпературной сверхпроводимости стало одним из важных событий физики твердого тела. Вскоре за этой работой последовало открытие группы ученых в Арканзасском университете соединения $Tl-Ba-Ca-Cu-O$ с температурой перехода по электрическому сопротивлению $T_c \ll 140 K$ [10] и температурой диамагнитного перехода 118 K.

В настоящее время использование явления сверхпроводимости приобретает все большее и большее значение. Почему на сверхпроводимость не жалуют тратить иногда миллионы? В простом увеличении критической температуры еще нет ничего принципиально нового. Полученные результаты не сводятся к одной температуре, но до широкого круга доходят почти только сведения о повышении T_c . Главная причина повышенного интереса в другом: возможность охлаждать сверхпроводники жидким азотом вместо жидкого гелия сулит огромный экономический эффект. Более того, для охлаждения одинаковых масс требуется на порядок меньшее количество азота (у него теплота парообразования значительно выше, чем у гелия). К этому стоит так же добавить значительное упрощение и удешевление криогенной аппаратуры. А главные исследования продолжаются, и еще никто не доказал, что температуру нельзя поднять еще выше.

ПРИКЛАДНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Интерес к вопросам практического использования сверхпроводников появился в 50-х годах, когда были открыты сверхпроводники второго рода с высокими критическими параметрами, как по значениям плотности тока, так и по величинам магнитной индукции.

Применение сверхпроводников потребовало решения ряда новых задач, в частности, интенсивного развития материаловедения для области низких температур. При этом исследовались не только собственно сверхпроводники, но также конструкционные и изоляционные материалы.

Широкое практическое применение сверхпроводимость находит при создании крупных электромагнитных систем, идея магнитной термоизоляции плазмы, выдвинутая в начале 50-х академиками А.Д.Сахаровым и И.Е.Таммом, нашла воплощение в установках типа токамак (термоядерные установки со сверхпроводящей тороидальной обмоткой). Данная установка является основой для термоядерного реактора, в котором выделяемая плазмой энергия будет приблизительно равна энергии, расходуемой на разогрев плазмы. Сверхпроводящие катушки используются также в магнитах для пузырьковых водородных камер, для крупных ускорителей элементарных частиц. К числу уникальных электромагнитов со сверхпроводящей обмоткой относятся магниты МГД - электростанции.

Весьма перспективна идея использования низкотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для передачи электроэнергии на большие расстояния. Однако большая стоимость сверхпроводящего кабеля и сложное криогенное оборудование привели к угасанию интереса к данному вопросу. Реализовать идею линии электропередачи без потерь пока не удалось. В настоящее время технически сложно создать столь протяженное и равномерно охлаждаемое устройство. В разных странах испытываются небольшие опытные образцы линий электропередачи. На сегодняшний день создан ВТСП

кабель, пропускающий 1.5 кА, но ток в кабеле вытесняется в наружные слои, где плотность тока становится повышенной.

В 90 - е годы имело место широкое использование явления сверхпроводимости для создания турбогенераторов, электродвигателей, униполярных машин, топологических генераторов, электродвигателей, жестких и гибких кабелей, коммутационных и токоограничивающих устройств, магнитных сепараторов, транспортных систем и т.д. Применение сверхпроводимости в турбогенераторах большой мощности перспективно потому, что именно здесь удается достигнуть того, что при других технических решениях сделать

невозможно, а именно, уменьшить массу и габариты машины при сохранении мощности. Следует также отметить важное направление в работах по сверхпроводимости - это создание измерительных устройств для измерения температур, расходов, уровней, давлений и т.д.

Теоретические и экспериментальные исследования электрических машин с объемными ВТСП элементами показывают, что по сравнению с обычными машинами они имеют более высокие значения удельной выходной мощности, КПД и коэффициент мощности [11–13], поэтому могут найти широкое применение в таких областях, как наземные энергетические системы, высокоскоростной транспорт, аэрокосмическая техника, энергетические установки для морских судов. Новым перспективным классом среди ВТСП машин являются синхронные ВТСП реактивные двигатели с композитным ротором. Оценки показывают, что ВТСП РД, работающие на уровне температур жидкого азота, имеют в 3-5 раз более высокие энергетические показатели, чем обычные реактивные и асинхронные машины.

Сверхпроводниковые накопители энергии пока не имеют большого практического применения, однако, накопителям принадлежит, по-видимому, большое будущее, хотя проблема создания накопителя для энергетики очень сложна. Наиболее продвинулись в разработке этого вопроса в США и Японии.

Используя явления «слабой сверхпроводимости», так называемые сквиды, можно создавать на их основе сверхточные измерители напряженности магнитного поля. Также это явление все шире начинает использоваться в электронике и радиотехнике. В перспективе предстоит внедрение приборов на базе ВТСП в сотовой радиосвязи.

Явление сверхпроводимости используется для создания новых видов транспорта. В Японии в 1988 г. построен опытный образец железной дороги со сверхпроводящей магнитной подвеской. Использование для сверхскоростных участков дорог принципа магнитной подвески более перспективно, чем использование реактивных двигателей и воздушных подушек. В настоящее время подобные образцы железной дороги разрабатываются и в Европе (в частности в

Германии). Так же в Японии в 1988 г. начал осуществляться другой «сверхпроводящий» проект в области транспорта. Здесь предлагалось использовать магнитное поле для движения морских судов.

Начиная с 1986 г. после открытия ВТСП материалов обычные сверхпроводники отошли на второй план, их разработка относится, скорее всего, не к научным проблемам, а к технике и высоким технологиям. ВТСП обладают многими интересными свойствами и поэтому применяются во многих областях. Сверхпроводники применяют в физике (физика высоких энергии), медицине (магнитно-резонансная томография), электротехнике (сверхпроводящие линии электропередач, сверхпроводниковые накопители энергии, турбогенераторы, электродвигатели, измерительные приборы и т.д.). В последнее время находят все большее применение в радиосвязи, в соединениях ЭВМ, электронике на базе ВТСП устройств явление «слабой сверхпроводимости».

В настоящее время продолжают исследования по использованию ВТСП материалов в линиях электропередач и в качестве токоограничителей в сети на случай аварии. Сверхпроводящие ограничители аварийных токов предназначены для быстрого отключения или плавного регулирования аварийно больших токов в энергосистемах и локальных линиях электропередач. Они исключительно эффективны для критических производств, не допускающих сбоев в энергосистемах.

Хотя за последние 20 лет были созданы сверхпроводящие материалы для электротехнических устройств и прогресс в этой области значителен, но, тем не менее, в электротехнике сверхпроводимость не проявила себя пока в полной мере. Может быть, сказывается консерватизм той отрасли, которой требуются проверенные временем решения, надежные в повседневном употреблении. В последнее время число занятых в электротехнической промышленности выросло в 1.5 раза, идут ремонтные работы, но отсутствуют новации. В ближайшие десятилетия создание и внедрение сверхпроводящей техники могут дать более значительную экономию энергии, чем любая программа наращивания производства энергии. В том числе программа освоения термоядерной энергии.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА И ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ СОТ ИНДУКТИВНОГО ТИПА

Как показывает анализ научной и патентной литературы, среди технических решений ТОУ отдельную группу составляют те, в которых элемент, из ВТСП, непосредственно не включен в цепь, но используется способность ВТСП осуществлять пространственное перераспределение магнитного поля.

Если ВТСП элемент находится во внешнем магнитном поле, величина которого не превышает определенного порогового значения, то в нем текут экранирующие токи, причем их величина и

направление таковы, что суммарное поле в толще ВТСП или в объеме, ограниченном замкнутым ВТСП, равно нулю [14].

Применяя такой элемент в СОТ индуктивного типа, можно предельно снизить потокосцепление обмотки реактора, уменьшить магнитную связь или поля рассеяния обмоток трансформатора [15].

При КЗ экранирующее действие ВТСП элементов прекращается либо при превышении порогового магнитного поля, либо под влиянием специального управляющего элемента или воздействия. После прекращения экранирования магнитные потоки направляются в соответствующие магнитопроводы и обмотки, что ведет к резкому росту индуктивного сопротивления устройства. Тем самым происходит ограничение токов КЗ. На этом основан принцип действия СОТ (сверхпроводящий ограничитель токов) [16].

Простейшая конструкция СОТ приведена на рис. 1. и представляет собой обмотку из обычного проводника (медь, алюминий), размещенной на стержне магнитопровода. Между обмоткой и стержнем размещается замкнутый цилиндрический ВТСП экран, который охлаждается жидким азотом (N_2). Азот заливается в тороидальный неметаллический криостат.

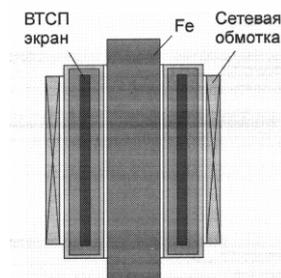


Рис. 1. Конструкция СОТ индуктивного типа.

Обмотка включается последовательно в цепь переменного тока. В нормальном режиме работы (т.е. когда ток в цепи меньше, чем пороговый ток срабатывания СОТ) магнитный поток полностью экранируется ВТСП экраном, не попадая в магнитопровод. При этом индуктивность устройства определяется потоком рассеяния в обмотке и мала по величине. Соответственно в нормальном режиме работы СОТ обладает малым реактансом. В аварийном режиме работы (т.е. в случае КЗ) ток в цепи возрастает, что приводит к увеличению магнитного поля на поверхности экрана. Магнитный поток начинает проникать в магнитопровод. Это приводит к резкому увеличению индуктивности и реактанса устройства. Таким образом, ток КЗ ограничивается возросшим импедансом устройства. На рис. 2, 3 и 4 показано поведение СОТ во время проведения опыта КЗ, при использовании экрана из висмутовой керамики.

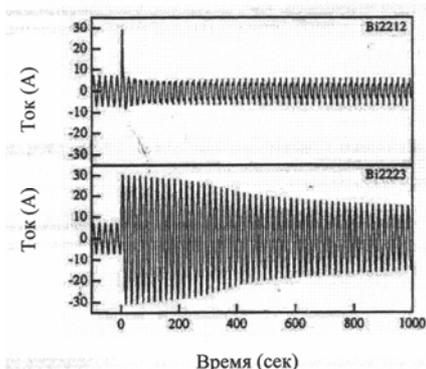


Рис. 2. Форма волны в опыте короткого замыкания для двух образцов висмутовой керамики.

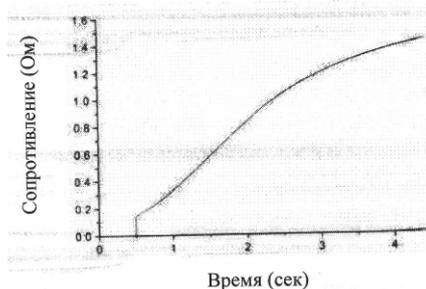


Рис. 3. Рост сопротивления в обмотке

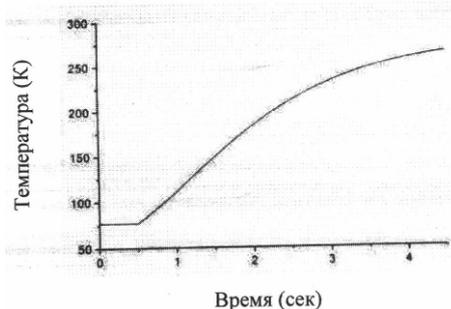


Рис. 4. Увеличение температуры в обмотке.

Работоспособность ТОУ будет определяться, главным образом, его динамическими характеристиками, т.е. быстродействием и способностью ограничивать ударную величину тока КЗ. Переходные процессы при коротком замыкании в цепи с СОТ были исследованы в работе [17]. Основной результат этих экспериментов состоит в том, что, во-первых, при наличии в цепи СОТ ударное значение тока КЗ составило лишь чуть более 10% от величины, которой оно достигает в отсутствие токоограничителя и, во-вторых, что процесс ограничения тока КЗ происходит без сколько-нибудь заметной временной задержки.

О РЕЖИМАХ НЕЙТРАЛИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В настоящее время энергетические системы работают с различными режимами (видами заземления) нейтрали. В основном это определяется классом напряжения сети, в которой расположена нейтраль. Так сети 110 кВ и выше выполняются с глухозаземленными нейтралью. Дело в том, что силовые трансформаторы 330 кВ и выше вообще не

могут работать с разземлённой нейтралью это связано с ограничениями по уровню изоляции. Сети 110 кВ и выше должны быть эффективно заземлены, то есть часть нейтралей заземляется, чтобы напряжение на неповреждённых фазах при КЗ не землю не превышало 80 % линейного напряжения сети ($1.4 \cdot U_{\text{ФНОМ}}$).

В сетях же высокого напряжения до 110 кВ нейтраль работает либо изолированной от земли, либо заземлённой через дугогасящий реактор с активным сопротивлением [18]. В нормальном режиме работы сети всегда имеется небольшое смещение нейтрали, то есть потенциал всегда отличен от нуля. Это происходит из-за несимметрии фаз линий электропередачи, исключить которую в распределительных сетях не удаётся. Смещение нейтрали составляет 3 – 4 % фазного напряжения, что вполне допустимо и не представляет опасности. Но при включении дугогасящего реактора в нейтраль её потенциал может существенно увеличиться.

ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ ЧЕРЕЗ СОТ

В настоящей статье прежде всего рассматривается вариант заземления нейтрали сетей класса напряжений 6 – 35 кВ, которые ранее эксплуатировались с изолированной нейтралью или с резистивным заземлением нейтрали или с заземлением через дугогасящую катушку (катушка Петерсена). Схема включения СОТ приведена на рис 5.

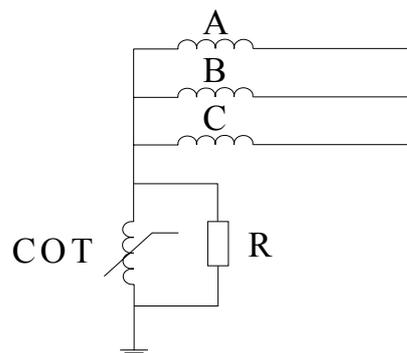


Рис. 5. Предлагаемый вариант заземления нейтрали.

При таком включении в нормальном режиме сеть будет работать с почти глухим заземлением нейтрали поскольку активное сопротивление будет зашунтировано практически нулевым сопротивлением СОТ. В нормальном режиме получим следующую схему замещения сети (рис. 6).

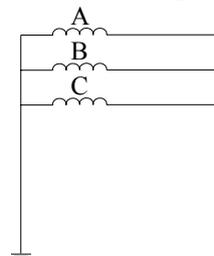


Рис. 6. Схема замещения сети в нормальном режиме.

Как следствие получаем новое свойство сети данного класса напряжения – нулевое смещение нейтрали, значение ради которого проводились многие мероприятия при других видах заземления.

В режиме же замыкания на землю получаем вариант параллельного соединения индуктивного сопротивления СОР и резистора в нейтрали, изображенный на рис. 7.

В результате получаем ограничение тока замыкания за счёт индуктивного сопротивления СОР и ограничение перенапряжений за счёт активного сопротивления нейтрали.

Сопротивление R должно подстраиваться в зависимости от протяжённости сети, чтобы наилучшим образом рассеять энергию электрической дуги, не дав ей повторно загораться.

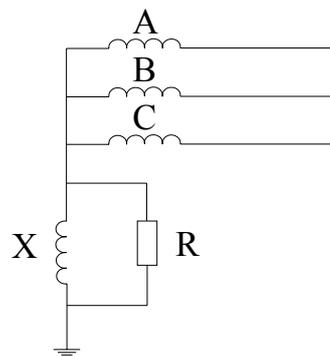


Рис. 7. Схема замещения сети в нормальном режиме.

Разработки в данном направлении только начаты и поэтому в ближайшее время можно ожидать результатов имитационных экспериментов проведённых с помощью специальных программ, позволяющих учитывать нелинейность вольтамперной характеристики высокотемпературных сверхпроводников.

-
- [1]. Khurana Physics Today, 1987, № 40, v.4, P.17.
 - [2]. J.R. Gavaler Appl. Phys. Lett., 1973, №23, P.480.
 - [3]. J.G. Bednorz, K.A. Mtiller Z. Phys., 1986, №64, P. 189.
 - [4]. J.G. Bednorz, K.A. Muller Revs. Mod. Phys., 1988, №60, P.585.
 - [5]. S. Uchida, H. Takagi, K. Kitazawa et al. Jpn. J. Appl. Phys., 1987, P.26.
 - [6]. C.W. Chu, P.H. Hor, R.L. Meng et al. Phys. Rev. Lett., 1987, №57, P.403.
 - [7]. J.M. Taraskon, L.H. Greene, W.R. McKinnon et al. Phys. Rev., 1987, B35, P.7115.
 - [8]. H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi et al. Japan, Appl. Phys., 1988, №27, P.209.
 - [9]. S.S.P. Parkin, V.Y Lee, E.M. Engler et al. Phys. Rev. Lett., 1988, №60, P.2539.
 - [10]. A.M. Hermann, Z.Z. Sheng, D.C. Vier et al. Phys. Rev., 1988, B37, 9742.
 - [11]. Ilushin K.V, Koneev S.M.-A, Kovalev K.L., Penkin V.T, Poltavetz V.N. Hysteresis and Reluctance Electric Machines with Bulk Rotor Elements.- IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1999, vol.9, №2
 - [12]. Ковалев Л. К., Илюшин К.В., Ковалев К.Л. и др. Электрические машины на основе высокотемпературных сверхпроводников. Состояние разработок и перспективы развития. - Наука - производству (Вып. Сверхпроводимость: мифы и реальность), 2000, №10.
 - [13]. Ковалев Л. К., Алиевский Б.Л., Илюшин К.В., и др. Сверхпроводниковые электрические машины: состояние разработок и перспективы развития. -Электричество, 2002, №5.
 - [14]. 14. Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников / Под ред. .М.Гинзберга. М.: Мир, 1990, 543с.
 - [15]. 15. Yu.A.Bashkirov, I.V.Yakimets, L.S.Fleishman et al., Application of Superconducting Shields in Current-Limiting and Special-Purpose Transformers, IEEE Trans. Appl. Supercon., 1995, v.5,1075.
 - [16]. 16.Yu.A. Bashkirov, L.S. Fleishman et al., Current-Limiting Reactor Based on High-Tc Superconductors, IEEETrans. Mag., 1991, v.27, P.1089.
 - [17]. 17. W. Paul. Th. Baumann, J. Rhyner, F.Platter Test of 100 kW High-Tc Superconducting Fault Current Limiter, IEEE Trans. Appl. Supercon., 1995, v.5 № 2, 1059.
 - [18]. 18. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. Пособие. – Новосибирск: Изд-во YUNE? 2002/ – 283 с. – (Серия “Учебники НГТУ”).