SECTION XIX. ENERGETICS

Попова М.В., Переверзев А.А.

Перспективы использования токоограничивающего устройства с применением сверхпроводящих материалов

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный заочный университет»
(Россия, Балашиха)

doi 10.18411/gq-31-03-2021-50

idsp sciencerussia-31-03-2021-50

Аннотация

Энергосбережение и эффективность в системах электропередачи являются важнейшими задачами в области электроэнергетики. Использование свойства сверхпроводимости, проявляющегося у проводящих материалов определенного химического состава при определенных температурных параметрах и сопровождающегося резким падением удельного электрического сопротивления до значений близких к нулю, даёт большие перспективы в развитии электроэнергетики. Использование явления сверхпроводимости приводит к снижению потерь электроэнергии при ее получении и передаче, возможности уменьшения в разы габаритов двигателей и генераторов, созданию сверхмощных магнитов, применяемых в промышленности, в научных исследованиях, в медицине и на железной дороге при достижении эффекта левитации. Существуют и некоторые недостатки, например, необходимость использовать достаточно низкие температуры для достижения данного свойства проводника, что на данный момент является не простой и дорогостоящей задачей. В связи с этим в настоящее время все больше уделяется внимания разработкам, направленным на повышение критической температуры сверхпроводимости. Также стоит задача развития технологий для равномерного охлаждения проводников и надежной изоляции от воздействия окружающей среды. Но, несмотря на некоторые недостатки в работе со сверхпроводящими материалами, технология признана актуальной в решении задач энергосбережения при передаче больших потоков электроэнергии [2].

Ключевые слова: сверхпроводимость, ВТСП (высокотемпературный сверхпроводящий) кабель, токоограничитель, токонесущий элемент, задачи энергосбережения.

Abstract

Energy conservation and transmission efficiency in transmission systems are critical challenges in the power industry. The use of the superconducting property, which manifests itself by a sharp drop in resistivity to values close to zero in conductive materials of certain chemical composition at a certain temperature, holds great prospects for the development of the electric power industry. The use of the superconducting effect leads to a decrease in electricity losses during generation and transmission of electrical energy, to the possibility of reducing several times the size of electric engine and generators, to the creation of super-powerful magnets used in industry, in scientific research, in medicine, and on the railway when the levitation effect is achieved. There are also some disadvantages, for example, the need to use sufficiently low temperatures to achieve this property of a conductor, which currently is a rather complex and expensive action. In this regard, at present, more and more attention is paid to developments aimed at increasing the critical temperature of superconductivity. There is also the task of developing technologies for uniform cooling of conductors and reliable isolation from environmental influences. But despite some disadvantages in working with superconducting materials, the technology is recognized as

relevant in solving energy-saving problems when transmitting large flows of electrical power [2].

Keywords: superconductivity, HTS (high-temperature superconducting) cable, current limiter, current-carrying part, power saving tasks.

Создание высокотемпературных сверхпроводников с высокими токонесущими характеристиками дало новые возможности в практическом применении эффекта сверхпроводимости. В настоящее время ВТСП кабели нашли практическое использование в передаче постоянного и переменного токов на значительные расстояния. Так, например, однофазный ВТСП кабель с «холодным» диэлектриком длиной 500 м, который был изготовлен по проекту Super-ACE (Furukawa), успешно прошел испытания и является автономной секцией, которая удовлетворяет техническим требованиям к силовым кабелям.

Применение высокотемпературных сверхпроводников для обмоток магнитных систем дает возможность увеличить плотность тока почти в 100 раз с одновременным уменьшением тепловых потерь до нуля для постоянного тока и в 10 – 100 раз для переменного тока частотой 50 Гц. Огромными преимуществами использования ВТСП являются как экономичность тепловых потерь, так и значительное сокращение весогабаритных характеристик. При этом имеются некоторые ограничения:

1. При наложении внешнего магнитного поля (например, при увеличении до 2 Тл) плотность критического тока существенно снижается (примерно в 5 раз).

2. При увеличении амплитуды колебаний внешнего переменного магнитного поля от 0,01 до 0,1 Тл резко возрастают потери на перемагничивание в сверхпроводнике. При частоте 50 Гц эти потери, с точки зрения охлаждения обмоток, не несут проблем, но при этом значительно снижают экономические показатели, в связи с тем, что при температуре жидкого азота КПД может составлять 10%.

Так, например, высокотемпературные сверхпроводящие материалы второго поколения (ВТСП-2) нашли применение в создании сверхпроводящего резистивного ограничителя тока, с практически отсутствующем в номинальном режиме сопротивлением, не имеющем влияния на работу сети в обычном рабочем режиме, но увеличивающимся при возникновении тока короткого замыкания, тем самым уменьшая его. Особенность быстрого перехода в обычное состояние составляет 0,1–0,3 мс и достигается использованием ВТСП-2, что и обуславливает его целесообразность использования при начальном процессе ограничения токов. Решение вопроса соответствия параметров используемого оборудования сети и величин токов короткого замыкания является важным вопросом, который удастся решить при использовании токоограничителя, поскольку установка токоограничивающего устройства на существующих или проектируемых подстанциях является эффективным. Применение токоограничивающих устройств со сверхпроводниками могут иметь различные схемы токоограничения: резистивная, трансформаторная, реакторная с насыщающимся магнитопроводом и другие [3].

Рисунок 1. Токоограничивающие устройства со сверхпроводниками [3]

Рассмотрим характеристики токоограничивающего устройства с токонесущим элементом с параметрами ВТСП второго поколения. За основу возьмем сверхпроводник, выпускаемый фирмой Super Power марки SCS-12050 (USA). Этот проводник представляет собой полностью стабилизированную медью ленту с сечением $12 \times 0,095$ мм и 50%-м коэффициентом заполнения ленты медью. В расчете на полное сечение ленты, критическая плотность равна $j_c = 220$ А/мм². При частоте 50 Гц, в расчете на единицу длины ленты, потери составляют $P_{sp} = 0,4$ Вт/(кА·м). Лента изготавливается с гарантированной однородностью характеристик по длине 5% в виде отрезков до 600 м.

Необходимое значение критического тока может быть определено двумя путями:

1. При номинальном режиме работы сети обмотка является в полной мере сверхпроводящей. Если возникает в сети превышение номинального тока I_n , то избыток тока вытесняется в медную подложку, что позволяет токоограничителю сохранять работоспособность при условии полной стабилизации процесса. При этом возникающие дополнительные потери в меди являются незначительными, поскольку увеличение номинального тока несет кратковременный характер. Учитывая запас надежности, равный 20%, $I_c = 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_n = 1,7$ кА.

2. Обмотка остается сверхпроводящей вплоть до возникновения тока отключения. В таком случае, с учетом такого же запаса надежности в 20%, $I_c = 1,2 \cdot I_0 = 3,6$ кА.

Рассмотрим второй вариант, расценивая как менее благоприятный, то есть в случае $I_c = 3,6$ кА. Помимо этого необходимо учесть возрастание собственного магнитного поля проводника за счет того, что сечение токонесущего элемента будет больше сечения ленты-прототипа, а это может увеличить потери и уменьшить критическую плотность тока. Поэтому рассмотрим величину потерь и ожидаемую критическую плотность тока хуже, чем в ленте:

$$j_c = 150 \text{ А/мм}^2, P_{sp} = 0,8 \text{ Вт/(кА·м)}.$$

Основываясь на вышеописанных данных, примем сечение выполненного из сверхпроводящего композита шины равным $2 \text{ мм} \cdot 12 \text{ мм} = 24 \text{ мм}^2$. Сохранив между шинами зазоры, получим, сокращение расстояния между шинами от 10 мм до 7 мм, а между центрами витков в слое – с 90 мм до 17 мм. Это дает возможность увеличить более чем в пять раз, при одновременном увеличении плотности обмотки в радиальном направлении, плотность расположения витков в слое. Таким образом, длина проводника уменьшается только в 1,4 раза. Но за счет уменьшения сечения вес его уменьшается более чем в 20 раз. При этом в сто раз сокращается мощность потерь в номинальном режиме. КПД отвода тепла при температуре жидкого азота составляет 10%, что необходимо учесть при оценке фактических потерь электроэнергии.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование сверхпроводящих обмоток способно значительно улучшить характеристики токоограничивающего устройства, что делает его фактически токоограничителем следующего поколения [1, 3].

1. Geschiere A. Повышение возможностей кабелей большой длины с применением высокотемпературных сверхпроводников / A. Geschiere, D. Willen, E. Piga // Доклад СИГРЭ. – 2008. – В1-307.
2. Зарудная А.П. Передовые мировые решения в области внедрения в электроэнергетике технологий сверхпроводниковых элементов. – Челябинск: ЮУрГУ, Э-441, 40 с.
3. Попова М.В. Разработка и обоснование параметров токоограничивающего устройства для систем сельского электроснабжения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2012.