

УДК 621.3

Трансформатор со сверхпроводящими обмотками

Гузелевич И. С., Фирсов Э. А., Шостак А. В.

Научный руководитель – к. т. н., доцент КОНСТАНТИНОВА С. В.

Традиционные силовые трансформаторы имеют достаточно высокий коэффициент полезного действия, однако увеличение стоимости электрической энергии вследствие увеличения стоимости топлива стимулирует интенсивные поиски путей снижения потерь, в том числе и в силовых трансформаторах.

Сверхпроводимость (СП) – свойство некоторых материалов обладать нулевым сопротивлением электрическому току. Открытие явления сверхпроводимости связано с исследованием электрического сопротивления металлов при низких температурах – вблизи абсолютного нуля (1...10 К). В 1908 г. в криогенной лаборатории Лейденского университета (Нидерланды) Хейке Камерлинг - Оннесу удалось получить жидкий гелий (температура кипения 4,2 К), а через три года он уже открыл явление сверхпроводимости (при охлаждении ртути жидким гелием). Действие этого явления ограничивается тремя параметрами: критическая температура, критическое магнитное поле, критическая плотность тока, при которых происходит переход сверхпроводников в резистивное состояние.

В конце 1986 года исследователями корпорации ИВМ швейцарцем Карлом Мюллером и немцем Георгом Беднорцем был открыт эффект высокотемпературной сверхпроводимости, возникающий при температуре 35 К в композитном керамическом материале под названием барий-лантан-медный оксид, что дало начало научному направлению, в рамках которого создавались проводники, где наблюдалась сверхпроводимость при все более и более высоких температурах. В итоге для охлаждения проводника стало возможным использовать хладагент в виде жидкого азота с температурой кипения 77,4 К. Жидкий азот намного дешевле и доступнее гелия, он обладает высокими диэлектрическими характеристиками и по своим электроизоляционным свойствам близок к трансформаторному маслу. С этого момента в разных странах мира начались практические работы по созданию электротехнических объектов на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП).

В 1997 году был создан первый ВТСП-трансформатора рассчитанный на напряжение 18,7 / 0,4 кВ мощностью 630 кВ·А производства компании АВВ, при участии американской компании ASC и французской электроэнергетической системы Electricite de France (EDF). К концу этого же года в энергетическую сеть г. Женевы был введен вышеупомянутый трансформатор.

Принцип устройства ВТСП трансформатора (рис. 1). Обмотки погружены в жидкий азот, служащий одновременно и изоляцией, и охлаждающей средой. Сердечник трансформатора работает при температуре окружающей среды, т. к. его охлаждение приведет только к лишним нагрузкам криогенной системы, а не к улучшенным характеристикам. Обмотки термически изолированы от сердечника и окружающей среды с помощью двустенных контейнеров (так называемых криостатов), выполненных из эпоксида, между стенками которых поддерживается вакуум, обеспечиваемый непрерывной работой насоса.

Обмотки ВТСП трансформатора могут изготавливаться как из проводников первого поколения, так и проводников второго поколения (рис. 2). Провода 1-го поколения (1G) – это провода на основе серебряной матрицы с микроканалами, в которых находится сверхпроводящая керамика Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO), как правило, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi-2212) с критической температурой 80 К или $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223) с критической температурой 110 К. Однако, технология 1 G обладает рядом недостатков: 1) необходимость деформировать ВТСП материал в процессе прокатки (отсюда – многократные отжиги); 2) токонесущая способность полученных проводов висмутовой системы падает уже в магнитных полях ~1 Тл (что ограничивает их применение в ряде устройств); 3) высокая стоимость, определяемая не в последнюю очередь дороговизной серебряной матрицы. Эти обстоятельства привели к

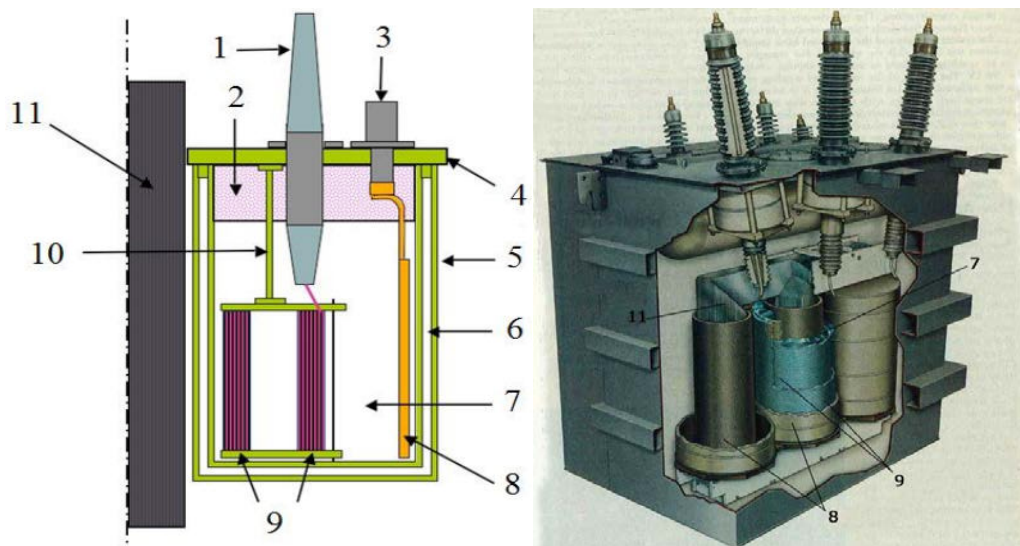


Рисунок 1 – Схематическое устройство ВТСП трансформатора: 1 – токоввод первичной обмотки; 2 – газовая подушка; 3 – криокуллер; 4 – крышка; 5 – криостат; 6 – вакуум; 7 – жидкий азот; 8 – охлаждающая оболочка; 9 – обмотки; 10 - поддерживающая трубка; 11 – магнитопровод.

разработке сверхпроводников второго поколения (2G) на основе иттриевой керамики Y-Ba-Cu-O (YBCO) с критической температурой 92 К. Преимущества 2G заключаются в том, что они обладают большей плотностью критического тока, способностью ограничивать ток короткого замыкания, ограничивать броски тока нагрузки, быстро восстанавливать сверхпроводящие свойства.

ВТСП провод первого поколения (1G)

ВТСП провод второго поколения (2G)

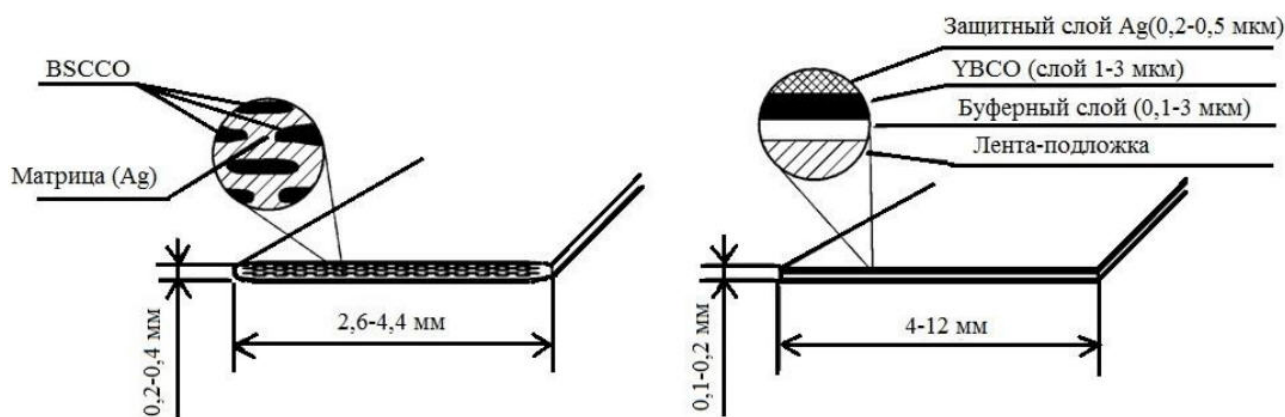


Рисунок 2 – Сечение ВТСП лент на основе BSCCO и YBCO

Вольт-амперная характеристика ВТСП провода имеет вид, приведенный на рис. 3. Считается, что сверхпроводник перешел в нормальное состояние, если на проводе длиной 1 см появилось напряжение величиной 1 мкВ.

Из проводников, как первого, так и второго поколения образуют многослойную ленту, из которой впоследствии крутят обмотки трансформатора. Для того чтобы поддерживать их температуру на уровне температуры жидкого азота создаются зазоры между слоями проводника (охлаждающие каналы). Эта операция позволяет держать охлаждающую жидкость в непосредственном контакте с обмотками.

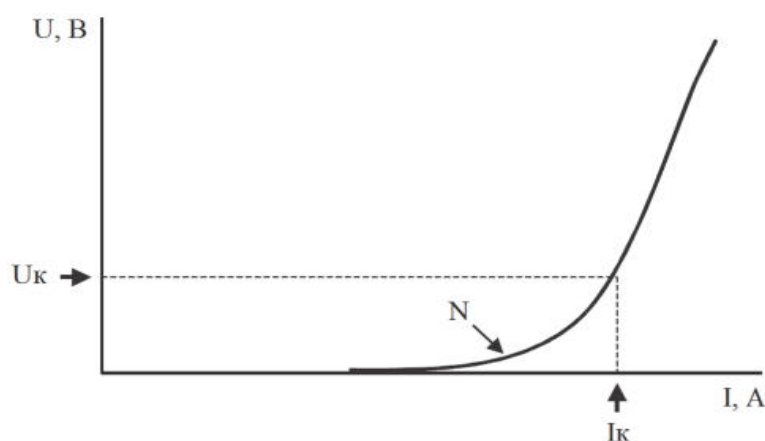


Рисунок 3 – Вольт-амперная характеристика ВТСП провода

Обмотки, изображенные на рис. 4, разделены композитными стеклопластиковыми или “прокладками”. Каналы охлаждения расположены вертикально и равномерно.

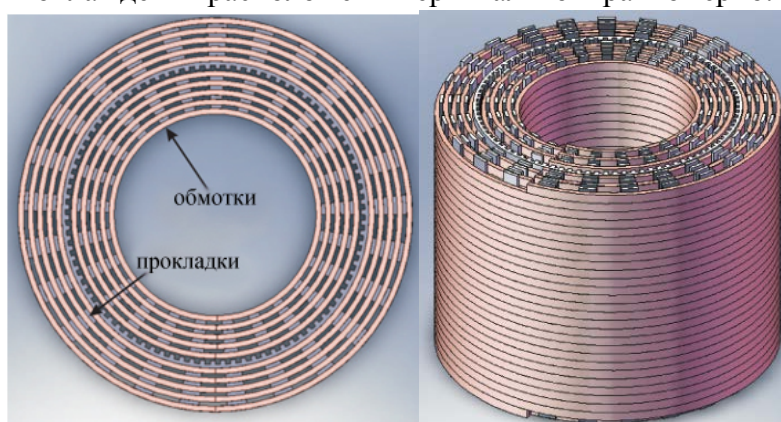


Рисунок 4 – Первичные и вторичные обмотки со слоем изоляции и охлаждающими каналами.

Для снижения потерь ВТСП трансформаторов также проработаны подходящие магнитные сердечники: Крупнейшая китайская компания по проектированию и изготовлению трансформаторов ТВЕА разработала первый в мире ВТСП трансформатор с аморфным сплавным сердечником. В Испании, в настоящее время, продумана и изучается прямая соленоидная геометрия в трансформаторе с воздушным сердечником. Корейская энергетическая компания рассматривает возможность использования ВТСП трансформатора с общим магнитным сердечником для увеличения мощности без строительства новых подстанций.

Ведущие промышленно развитые страны (Япония, США, Германия, Франция, Австралия, Швеция, Англия) к настоящему времени изготовили опытные образцы ВТСП трансформаторов (рис. 5). Часть из них была установлена в опытную эксплуатацию в энергосети с целью проверки их работоспособности параллельно с трансформаторами традиционных конструкций.

Преимущества ВТСП трансформаторов

Таблица 1 отражает общие потери ВТСП трансформатора и сравнивает их с соответствующими цифрами для трансформатора традиционной конструкции. Потери выражаются в процентном отношении от общих потерь в традиционном трансформаторе, принятые за 100%.

Трансформаторы с ВТСП обмотками обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными силовыми трансформаторами:

- низкие нагрузочные потери;
- ограничение токов короткого замыкания, что в аварийных режимах защищает электрооборудование сети;
- большая перегрузочная способность;

- нестареющая высококачественная изоляция;
- меньшие массогабаритные показатели;
- меньшие уровни шумов;
- пожаробезопасность;
- экологическая безопасность.

Главное преимущество сверхпроводниковых трансформаторов перед традиционными трансформаторами – низкие нагрузочные потери. Однако, из-за высокой стоимости сверхпроводящего трансформатора использование его в данное время с существующим уровнем развития сверхпроводниковых технологий представляется нецелесообразным. Необходимо значительное снижение уровня цен на СП провода для широкого использования СП в трансформаторах.

Таблица 1 – Анализ потерь (общие потери в традиционном трансформаторе = 100%)

Тип трансформатора	ВТСП трансформатор	традиционный
Потери в магнитопроводе	8	9
Потери в контактах	5	5
Потери в масляном баке	-	7
Потери на проводимость	<1	79
Мощность рефрижератора	7	-
Потери охлаждающего вентилятора	2	-
Суммарные потери	23	100

Совершенствование технологии производства ВТСП трансформаторов и её доведение до промышленных масштабов позволит наладить их коммерческий выпуск и постепенную замену трансформаторов традиционного исполнения.

Литература

1. I. E. Chew, “SUPERCONDUCTING TRANSFORMER DESIGN AND CONSTRUCTION”, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. March 2010.
2. Professor Jan Sykulski, “SUPERCONDUCTING TRANSFORMERS”, Southampton, UK, ARWtr2004, 28 – 30 October 2004.
3. Лутидзе Ш.И., Джафаров Э.А. Сверхпроводящие трансформаторы. – М: Научтехлитиздат, 2002. – 206 с.
4. Vasantkumar Upadhye, Utkarsh C. Savardekar, “SUPERCONDUCTING TRANSFORMERS”, International Journal of New Innovations in Engineering and Technology, Volume 4 Issue 3 – March 2016.
5. Александров Н.В., Манусов В.З., “ТРАНСФОРМАТОРЫ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ ОБМОТКАМИ”, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия, 2011.
6. Александров Николай Васильевич, “ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ”, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия, 2011.