



Центр научно-технической информации и библиотек
– филиал ОАО «РЖД»

Дифференцированное Обеспечение Руководства

39/2022

Высокотемпературные сверхпроводящие кабели постоянного тока для применения на железнодорожной инфраструктуре Франции: проектирование и оптимизация характеристик

Использование высокотемпературных сверхпроводящих кабелей в энергосистеме повышает эффективность передачи электроэнергии и избавляет от необходимости возведения дополнительной энергетической инфраструктуры в целях увеличения пропускной способности. Данную технологию планируется в том числе задействовать на железнодорожной инфраструктуре Франции, оператором которой является национальная компания SNCF.

Энергосети постоянного тока составляют значительную часть от всех систем электрификации железных дорог как во Франции, так и во всем мире. Потребление электроэнергии в городах зависит от количества трансформаторов и других статических преобразователей, для монтирования которых, по мере увеличения интенсивности городской застройки, остается все меньше пространства. Кроме того, во избежание энергопотерь многие линии электропередачи работают при высоком напряжении, что требует наличия подстанции вблизи энергопотребителя: если он находится в густонаселенном районе, то строительство новых энергетических сооружений влечет за собой дополнительные трудности. С другой стороны, политика многих развитых стран, а также Европейского союза, связанная с декарбонизацией, предполагает увеличение потребления электроэнергии. В результате энергосети, включая связанные с обеспечением тяги электропоездов, должны адаптироваться к новым условиям. Одной из перспективных технологий в данном направлении как раз являются высокотемпературные сверхпроводящие кабели – среди

прочего, их внедрение позволит провести релокацию подстанций из густонаселенных районов с плотной застройкой и освободить пространство.

В связи с этим, планируется провести ряд исследований, касающихся проектирования высокотемпературных кабелей из композита $(RE)BaCuO^1$, эксплуатирующихся при силе тока в диапазоне 5–20 кА и напряжении 1750 В. На данной стадии учитываются следующие факторы: зависимость от критической плотности тока J_c (B , θ , T) проводов; температурные характеристики используемых материалов; различные режимы охлаждения в зависимости от длины кабеля.

Спроектировать сверхпроводящий кабель для подобной системы можно следующим образом. Сначала проводится определение значения критического тока (исследование электромагнитных свойств) – оно должно быть выше показателя рабочего тока. С этой целью можно создать 3D-модель с аналитическими данными, что позволит рассчитать показатели магнитного поля в кабеле. Затем необходимо выполнить гидравлические и температурные исследования охлаждающей жидкости (жидкого азота – в данной работе обозначается как LN_2). Наконец, нужно выявить необходимую толщину медного провода, чтобы обеспечить эксплуатационную устойчивость при возникновении отказа.

В рамках исследования электромагнитных свойств рассматриваемый высокотемпературный сверхпроводящий кабель, согласно принятой топологии², состоит из одного или двух коаксиальных каналов, в каждом из которых по несколько слоев. Основной слой состоит из обмоток N – чем больше обмоток, тем больше радиус основного слоя. Необходимо рассчитать характер распределения магнитного поля, генерируемого n кольцами N обмоток, расположенных в каждом из рассматриваемых каналов. Предполагается, что плотность тока J равномерно распределена между обмотками и является постоянной для каждого участка сверхпроводящего кабеля. В целях упрощения расчетов, связанных с динамикой геометрических параметров (например, в результате скручивания обмоток), основной $(RE)BaCuO$ -слой принимается за бесконечно узкую оболочку. Чтобы избежать проблем, затрагивающих три переменные в векторном пространстве, в качестве переменной состояния был выбран скалярный магнитный потенциал (V_m). Аналитическая модель основана на решении уравнения Лапласа путем использования метода деления переменных: сначала в рамках уравнения

¹ Также известный как $ReBCO$ – семейство высокотемпературных проводников, сочетающих в себе редкоземельные металлы и барий-медный оксид, например, оксид иттрия-бария-меди.

² В железнодорожных энергосетях постоянного тока применяются высокотемпературные сверхпроводящие кабели с 2 типами топологий: либо кабель с положительным входом вводится в одной точке линии электропередачи, в то время как обратный ток передается через рельс; либо используется коаксиальный кабель с положительным и отрицательным входами для подачи прямого и обратного тока.

решается переменная V_m , взятая за 0, а затем – внешняя задача Неймана (граничные и переходные условия), что позволяет уточнить значение V_m .

Для того чтобы узнать параметр критического тока, предполагается, что радиальный и тангенциальный компоненты магнитного поля действуют на каждой обмотке без учета влияния поля самой обмотки. В рамках моделирования было рассчитано значение и угол действия магнитного поля, генерируемого током, проходящим через кабель. На основе этих значений, а также данных о характеристиках обмоток, предоставленных производителем, был определен критический ток для выбранной эксплуатационной температуры при использовании с жидкостью LN_2 , контактирующей с обмотками. Потом было проведено сравнение значений критического и рабочего токов на предмет превышения пороговых значений, при этом учитывалось влияние неоднородности, связанной с длиной кабеля – как следствие, итоговый показатель был скорректирован на 20% (запас надежности).

В рамках гидравлического исследования за основной параметр, связанный с охлаждением кабеля, принимается расход жидкости \dot{m} , определяющий скорость течения LN_2 . Весовой расход жидкости, в дополнение к ограничениям, наложенным пропускной способностью испытательной установки, снижен за счет скачков давления в трубе, связанных с ее длиной. Уменьшение данного показателя ведет к снижению эффективности охлаждения и ухудшению диэлектрических свойств. Основные вычисления проводятся с помощью формулы Бернулли для каждой из труб. Скачки давления были выявлены путем использования статистических данных и корреляции Блазиуса – это позволило определить коэффициент трения. На рис. 1 показана типовая конфигурация криогенной системы охлаждения, задействующая отдельные трубы.

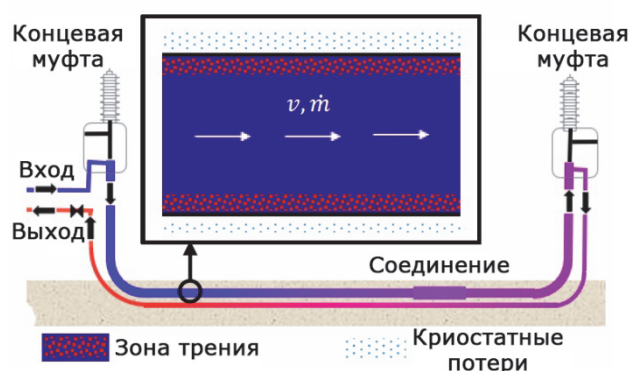


Рис. 1. Схема криогенной системы охлаждения для высокотемпературного сверхпроводящего кабеля, задействующей отдельные трубы

В рамках температурного исследования определяется температура обмоток по всей длине кабеля в нормальных эксплуатационных условиях. Предполагается, что потери связаны исключительно с криогенной системой

охлаждения и пропорциональны площади ее внешней поверхности. Кроме того, температура LN_2 в одной трубе варьируется в зависимости от длины кабеля, в то время как теплообмен между обмотками происходит только в радиальном направлении. Температура LN_2 по всей длине кабеля для каждой трубы получается путем интеграции расчетов. Например, на рис. 2 показано распределение температуры по двухслойному кабелю длиной 500 м при 10 кА и массовом расходе криогенной жидкости 0,3 кг/с. Взяты образцы следующих видов: отдельные трубы (SP), коаксиальные трубы (CP), коаксиальные трубы с отдельным рециркуляционным каналом (CPSR), коаксиальные трубы с системой двойного охлаждения на каждом конце кабеля (CPDS). Предлагаемые методы проектирования не только помогут определить габариты сверхпроводящего кабеля, но также и рассчитать необходимые характеристики системы охлаждения, а также требуемый объем резервуара с LN_2 .

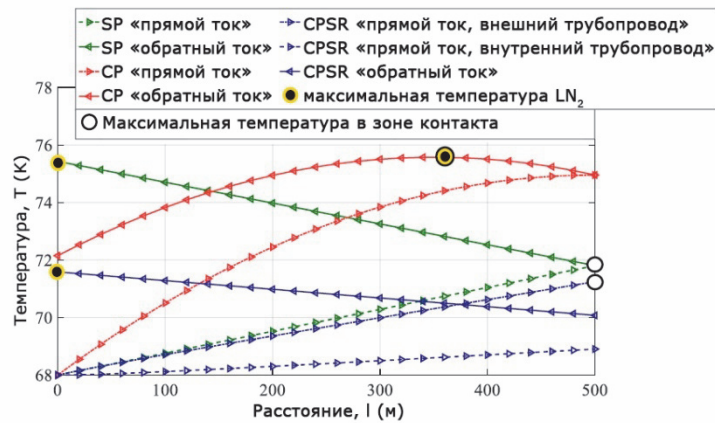


Рис. 2. Распределение температуры по двухслойному кабелю длиной 500 м, по которому протекает ток силой 10 кА

В рамках мероприятий по проектированию кабеля при определении сечения меди учитывается вероятность отказа, а также такие параметры, как индуктивность и сопротивление линии электропередачи. В целях изучения температурных характеристик различных обмоток, а также хладагента LN_2 , были использованы электрические и тепловые узловые модели. Необходимо выявить наиболее оптимальное сечение медного провода, позволяющее обеспечить протекание тока короткого замыкания до срабатывания автоматического предохранителя, а также удерживать азот в жидком состоянии.

В коаксиальных трубах, расположенных с внешней стороны, хладагент LN_2 находится в непосредственном контакте со сверхпроводящими обмотками. При отказе ток начинает проникать через медный слой, и температура обмоток быстро растет, достигая 10 К спустя несколько миллисекунд – это может привести к испарению азота. В результате снижаются показатели эффективности теплообмена кабеля, что, в свою очередь, может вызвать диэлектрический пробой в некоторых случаях. Исходя из этого,

необходимо наличие дополнительного защитного слоя между азотом и сверхпроводящими обмотками. Формирование теоретической базы по данному вопросу в рамках настоящего исследования пока еще не завершено.

В описываемой работе был предложен метод проектирования и оптимизации характеристик высоковольтных сверхпроводящих кабелей, которые планируется использовать на железнодорожной инфраструктуре Франции в будущем. Были проведены электромагнитные, температурные и гидравлические исследования. На основе этого были определены алгоритмы, которые позволят оптимизировать как габариты кабеля, так и работу его системы охлаждения, а также гарантировать его защиту в случае отказа. Все наработки пока находятся на стадии формирования. Детальное описание методов с приведением конкретных примеров и формул будет опубликовано позже.

*Источники: hal.inria.fr, 07.03.2022 (англ. яз.);
researchgate.com, 24.09.2021 (англ. яз.).*