**Разработка силовых трансформаторов с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками для ограничения токов короткого замыкания в электрических сетях**

***Галеев Р.Г., Манусов В.З.***

*Аспирант*

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», кафедра электрооборудования и автоматики, Новосибирск, Россия*

*E–mail: galeew.ratmir@yandex.ru*

Применение трансформаторов с диэлектрической средой – минеральное масло, требует особых условий окружающей среды, что не позволяет использовать его во всех сферах промышленности. К недостаткам можно отнести:

1. Достаточно большие потери мощности при нагрузке от 0,7 до 1,2 Рном, что составляет 3–5 % от номинальной мощности трансформатора;

2. Большой объем и вес трансформаторного оборудования за счет низкой плотности тока в медных и алюминиевых проводниках обмоток, что увеличивает размеры обмоток, длину ярма и высоту стержня магнитопровода.

3. Ограниченная область применения в густонаселенных районах, и мест с высокой пожарной уязвимостью (нефтяные месторождения, угольные шахты, лесные массивы и т.д.), по причине высоких пожарных рисков в случае аварийной ситуации;

4. Сложность и опасность аварийных ситуаций при замене диэлектрической среды.

Применение ВТСП трансформаторов, в которых при температуре кипения жидкого азота 77 К (-198ºС) активное сопротивление равно нулю, что исключает тепловые потери на активное сопротивление при любых коэффициентах нагрузки, как видно из рис. 1. Плотность тока в сверхпроводящем проводе может достигать 500 A/мм2, по сравнению с медью расчетное для трансформатора принимают 1,8 А/мм2, разница в 250 раз оказывает существенное влияние на уменьшение объема и массы обмоток трансформатора и следовательно на уменьшение массы магнитопровода. Диэлектрическая среда – жидкий азот не огнеопасен и абсолютно безвреден для человека, относительно легок в добывании, так как содержание азота в воздухе приблизительно 78%. Жидкий азот нейтрален для активных элементов трансформатора и не вызывает твердых отложений на поверхности обмоток и магнитопровода [1].



Рис. 1. Коэффициент полезного действия: *ηt* – классического трансформатора с масляным охлаждением; *ηst* – трансформатора со сверхпроводящими обмотками; *kнг* – коэффициент нагрузки

Основным преимуществом ВТСП трансформаторов является существенное уменьшение массогабаритных размеров в 2,5–3 раза при промышленной частоте 50 Гц, и в 8–9 раз при частоте 400 Гц, используемой в мобильных и автономных системах электроснабжения. Проведен расчет и анализ массогабаритных характеристик трансформатора со сверхпроводниками на частотах 50, 200, 400, 800 Гц. Наряду с этим ВТСП трансформаторы при коротких замыканиях в сети временно теряет свойство сверхпроводимости обмоток, существенно ограничивают токи короткого замыкания (т.к.з.) в электрической сети, тем самым они являются ограничителями тока короткого замыкания, что позволяет отказаться от дополнительного применения последовательно включенных реакторов и трансформаторов с расщепленной обмоткой. Эксперименты показывают, что в 2-2,5 раза ограничивается однофазное кроткое замыкание. Такое решение является одним из новых системных инновационных мероприятий, поскольку основная коммутационная аппаратура электрических сетей и электропотребителей выбиралось несколько десятилетий назад и последующее увеличение электрических нагрузок потребителей существенно увеличило т.к.з. по сравнению с теми, для которых коммутационная аппаратура выбиралась[2,3].

Указанные выше аспекты применение ВТСП трансформаторов в совокупности со сверхпроводящими индуктивными накопителями (СПИН), где в качестве диэлектрической среды, также использован жидкий азот, позволяет обеспечить бесперебойное электроснабжение электропотребителей с одновременным достижением пожаро- и взрывобезопасности, а также улучшением экологической среды. Внедрение СПИН является важным аспектом развития электроэнергетической системы, ввиду высокого коэффициента заряда и разряда, что составляет 99%. Благодаря высокой плотности тока сверхпроводящего проводника накапливается значительно больше энергии, чем индуктивный накопитель с медной обмоткой. Это позволит в периоды временного перебоя электроэнергии обеспечить бесперебойное электроснабжения потребителей или же стратегически важных объектов инфраструктуры.

Жидкий азот может быть получен прямо на открытом распределительном устройстве электроподстанции с помощью турбодетандеров из воздуха, что не требует его транспортировки и разработки каких-либо логистических маршрутов. Одновременно с этим кабельные линии на высоковольтной подстанции так же целесообразно выполнить в виде сверхпроводящих элементов, что повышает энергоэффективность электрических подстанций и в целом повышает их качество функционирования.

**Литература**

1. Sissimatos E. Technik und Einsatz von hochtemperatur-supraleitenden Leistungstransformatoren. Dissertation. Universität Hannover, 2005.

2. Волков Э.П., Джафаров Э.А., Флейшман Л.С., Высоцкий В.С., Суконкин В.В и др. Первый в России ВТСП трансформатор 1 МВА, 10/0, 4 кВ //Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2016. – №. 5. – С. 45-56.

3. Крюков Д.О., Манусов В.З. Обзор конструкций трансформаторов со сверхпроводящими обмотками // Электричество. 2019. № 8. С. 4-16.