

Эффективные направления разработок сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии для энергетики

Ш.И. Лутидзе, Э.А. Джафаров, Ф.Ф. Юлдашев

ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского», 119991, Москва, Россия

Эффективные направления разработок сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии (СПИН) должны основываться как на серьезных фундаментальных исследованиях по созданию новых СП материалов, СП проводов, СП и традиционной силовой электроники, криогенного оборудования, так и на исследованиях по коммерциализации СПИН и применению СПИН в энергетических объектах, где их использование экономически оправдано.

Последнее направление стало усиливаться после запуска в эксплуатацию в энергосистему ВРА в г. Такома штата Вашингтон в 1985 г. СПИН энергоемкостью 30 МДж [1]. Это определяется тем, что обобщение опыта разработки и эксплуатации первого в мировой истории СПИН позволило уточнить и улучшить конструктивные и эксплуатационные параметры, обеспечив самокупаемость таких систем в отдельных энергетических объектах. Мировым лидером по коммерческому внедрению СПИН является Американская Корпорация Сверхпроводимости (АСК) [2,3,4].

С июня 1990 г. АСК успешно ввела в эксплуатацию СПИН почти в двадцати различных местах расположения покупателей. Системы различного конструктивного исполнения обеспечивают в настоящее время защиту чувствительного оборудования заказчика в химической, пластмассовой и бумажной промышленности, научных установок и военных центров обработки данных. Эти вариации в конструкции коммерчески известны как PQDC, PQAC и PQVR различаются интерфейсом между сетью и нагрузкой.

Первая СПИН система, сконструированная как защита от падения напряжения или PQVR (регулятор напряжения) была разработана АСК и установлена на SAPPI Ltd на современной бумажной фабрике в Стейнджере штата Эском в Южноафриканской национальной системе электроснабжения в апреле 1997 г [2].

Областью применения СПИН, которые используют высокотемпературную сверхпроводимость, станут проблемы энергоснабжения, такие как кратковременное падение напряжения и перенапряжение, и эти применения начинают приобретать коммерческий характер в США. Разработчик, Сверхпроводящая Инкорпорация (СИ), требует от СПИН-технологии значительно большей компактности по сравнению с накопителями на базе аккумуляторных батарей и большей экологичности. СИ, дополняя АСК,

оценивает, что рынок СПИН, их производство по стоимости составит более чем 500 млн. долларов в год. Эта технология нацелена особенно на промышленные производства, где она может обеспечить защиту устройств, таких как технологическое оборудование и приводы, от кратковременных нарушений в энергоснабжении. В соответствии с данными Института Электроэнергетических исследований, 80-90% проблем качества энергоснабжения являются результатом отключений или перерывов электроснабжения, длящихся менее одной секунды. Эти перерывы оцениваются ежегодными потерями для промышленности США более чем в 12 млрд долларов [3].

АСК отметила, что благодаря её коммерческой продукции в виде СПИН после непрерывно-длительных поисков теперь применена сверхпроводимость в электроэнергетике Европы с июня 1999 г. Промышленный СПИН был использован для защиты от кратковременных падений напряжения, действующих на производственное оборудование по изготовлению автозапчастей, в Австрии. Он управлял электрической системой Стеваг-Стег и предоставлял возможность проскакивать падения напряжения длительностью до 0.8 с, имея управляющую мощность 1.4 МВт. Он мог также преодолевать падения напряжения, длящиеся даже дольше, когда электрической нагрузкой было освещение и немедленно выдавать активную и реактивную энергию на завод всякий раз при условиях обнаружения колебаний напряжения [4].

На этапе подготовки запуска СПИН в энергосистеме г. Такома потребовалось активное участие специалистов-энергетиков, так как требовалась привязка СПИН к действующей энергосистеме и учет особенностей режимов её работы. В настоящее время необходимость более активного участия энергетиков в разработке СП-оборудования проявляется в том, что энергетические компании Японии и США являются головными при создании СП-оборудования для энергетических систем [5].

Современные зарубежные исследования удельного веса стоимости отдельных элементов СПИН в общей стоимости устройства показывают, что наибольшее значение приходится на сверхпроводящую катушку - порядка 62% и на криогенное оборудование -24%, на конвертор на базе GTO тиристоров - около 5%, а остальное на разработку и прочие элементы [6].

Наиболее перспективными являются разработки, обеспечивающие оптимизацию конструкции СП катушки и условий её охлаждения. Эффективность СП катушки оценивают по удельной энергетической плотности, т.е. по количеству энергии приходящейся на единицу массы обмотки [Дж/ кг] или на единицу объема, занимаемого катушкой [Дж/м³]. Снижение массы обмотки является одновременно улучшением условий охлаждения. Параметр инерционности нагрева или охлаждения СП катушки представляет важное значение как на этапе ввода в эксплуатацию и ремонте СПИН, так и для решения вопросов повышения безопасности его работы в энергосистеме. Например, время охлаждения СПИН от температуры окружающей среды до рабочей температуры 1.8К составляет по зарубежным исследованиям до 14 дней для СПИН с запасаемой энергией 80 МДж или 47 суток для СПИН 10¹³ Дж [1]. Инерционность охлаждения из-за ограниченности площади контакта хладагента с обмоткой является фактором, способствующим переходу обмотки в нормальное состояние. Зарубежные исследования показывают, что явление деградации происходит внутри многослойной обмотки с последующим распространением к её поверхности, т.е. обычно там, где наихудшие условия. При этом отмечено, что формирование каналов охлаждения для многослойной обмотки соленоида со стороны каркаса способствует увеличению критического тока в 1,8 раза и, соответствует увеличению запасаемой энергии при исходном расходе СП проводника [7].

В свою очередь, скорость охлаждения определяется соотношением между массой или объемом, охлаждаемого тела, и площадью поверхности охлаждения. Эффект применения «чайного блюдца» яркий пример практического увеличения скорости охлаждения за счет увеличения площади охлаждения при фиксированном объеме охлаждаемого материала. Причем, чем меньше толщина охлаждаемой жидкости при заданной поверхности охлаждения, тем эффективнее охлаждение. Это имеет место применительно к СП обмотке, имеющей фиксированную площадь охлаждения, определяющуюся, например, для соленоида ее высотой и длиной витка. Поэтому условием максимального увеличения скорости охлаждения будет уменьшение толщины обмотки до минимально возможного значения. Таким значением по конструктивным и технологическим условиям является диаметр СП провода, т.е. однослойная обмотка.

Следует отметить, что в соответствии с теоретическими исследованиями, проведенными в ОАО «ЭНИН им. Г.М. Кржижановского», величина критического тока сверхпроводящей обмотки снижается пропорционально количеству слоев в

обмотке [8]. Поэтому переход к однослойной обмотке обеспечивает максимальный критический ток при снижении длины СП провода в результате уменьшения числа витков на величину кратную слоям исходной обмотки. Однако количество энергии, запасаемой СПИН, и величина плотности энергии, пропорциональная половине квадрата индукции, при этом не изменятся, так как сохраняется объем катушки и величина индукции В, которая пропорциональна произведению тока в обмотке на общее количество её витков.

Таким образом, разработки по созданию сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии с однослойной СП обмоткой обеспечивают как снижение расхода СП провода, себестоимости обмотки СПИН, так и улучшение условий охлаждения, позволяющее снизить удельный вес стабилизирующей медной или алюминиевой матрицы и, соответственно, дополнительно массу и габариты СП катушки.

Дальнейшим развитием исследований по одновременному снижению стоимости катушки СПИН и криогенной техники могут быть исследования по предотвращению преобразования энергии магнитного поля в тепловую, выделяющуюся в СП проводнике. Подобные разработки позволили бы дополнительно уменьшить массу и объем стабилизирующей матрицы СП провода и улучшить условия работы криогенного оборудования.

Рассматривая различные формы обмоток СПИН, можно отметить наибольшую эффективность тороидальной, которая принята за основу учеными и специалистами США, Японии и Германии. Причем, с целью снижения динамических усилий в обмотках СПИН предлагается спиральный навив витков, который был разработан и запатентован специалистами ОАО «ЭНИН им. М.Г. Кржижановского» [9].

Кроме того, для улучшения режимов работы СПИН при его зарядке и разрядке и увеличения тем самым безопасности работы специалистами ОАО «ЭНИН им. М.Г. Кржижановского» разработан и запатентован для выполнения функций конвертора трансформатор постоянного тока [9].

1. В.В. Бушуев и др. «Динамические свойства энергообъединений». М.: Энергоатомиздат, 1995.
2. R. Schottler, R.G. Coney. "Power eng.", V13, 149.
3. T. Sacks "Electrical Review", 1997. V230, p. 8
4. Wire Industry 2002, V69, N833, P. 404
5. П.П. Долгошеев и др. ICEMC-2001, 12
6. K. Tsutsumi, et al. "Cryogenic eng." 2002, V37, 3-19
7. K. Ryu et al. IEEE Tr. Appl. Superc. 2002, 12, 796.
8. Ш.И. Лутидзе. Инженерная физика. 2002. N3, 36.
9. Ш.И. Лутидзе, Э.А. Джафаров. «Сверхпроводящие трансформаторы». М.: Научтехлитиздат, 2002.