

## НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ В ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Н. И. Смоленцев

*В статье рассмотрены вопросы развития альтернативной энергетики, основанной на экологически чистых возобновляемых источниках энергии, в частности локальные электрические сети. Важнейшими факторами развития и внедрения локальных электрических сетей является их интеллектуализация и создание накопителей энергии на физическом эффекте, высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП).*

*Ключевые слова: локальная электрическая сеть, энергоэффективность, интеллектуальные технологии, высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП), накопители энергии.*

Проблемы энергосбережения и повышения энергоэффективности становятся сегодня главными факторами развития мировой экономики. Решение данных проблем невозможно без внедрения в энергетику новых, прорывных технологий.

Внедрение новых технологий в энергетику идет по пути интеллектуализации электрических сетей, создания электрических машин, аппаратов и устройств на новых физических принципах или путем применения в известных аппаратах и устройствах новых материалов. Первый путь более затратен, но имеет большие потенциальные возможности. Второй путь менее затратен, но позволяет решить только краткосрочные задачи.

Интеллектуальные технологии в энергетике – это совокупность технических, информационных и телекоммуникационных проектов, включая оборудование, программное обеспечение и средства связи, которые обеспечивают паритетные отношения потребителей энергии и энергосбывающих предприятий, причем повышается качество электроэнергии и обеспечивается режим энергосбережения. Внедрение интеллектуальных технологий условно можно разделить на 3 направления или этапа.

Начальный этап внедрения интеллектуальных технологий (Smart Grid) в энергетику – это «умные» приборы, позволяющие решить задачу единой системы энергоучета. Внедрение «умных» приборов учета автоматизирует процесс снятия показаний со счетчиков, осуществляет удаленное управление ими, изменяет конфигурацию приборов учета, а данные, накопленные в ходе автоматизированного опроса приборов учета, позволяют проводить анализ потерь, планировать потребление и управлять работой сети [1].

Следующим этапом является разработка устройств и способов распределенной генерации или локальных электрических сетей и объединение их в единую сеть подобно Интернету [2].

Локальная электрическая сеть или «умная сеть» – это следующий этап работ по внедрению интеллектуальных технологий в энергетику. Цель данного этапа – максимальная автоматизация сетевой инфраструктуры. Результат этого этапа можно достигнуть путем объединения таких электрических локальных и централизованных сетей, как предприятия ФСК, МРСК, районные и городские сети, сети промышленных предприятий и индивидуальных потребителей, работающих на единой базе интеллектуальных технологий.

Такая автоматизация позволяет удаленно управлять работой сети, вести финансовый учет и анализ технологических нарушений и других событий в реальном масштабе времени.

Накопленная статистика дает возможность внедрить статистические методы учета и планирования нагрузок электроприемников, что повысит надежность электроснабжения и снизит общие затраты на производство единицы энергии, а также проводить анализ и планирование работ в сети для повышения надежности и сокращения затрат [3].

Таким образом можно достичь конечного результата – энергосбережения.

Второе направление внедрения новых технологий в энергетику – это создание электрических аппаратов и устройств на новых физических принципах. В результате можно реализовать ключевой или решающий этап. Результаты этого этапа не только объединяют достижения предыдущих этапов, но и поднимают их на новый качественный уровень.

## НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ В ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Этот этап – заключительный и объединяющий интеллектуальные технологии, новые типы электрических сетей, новые виды электрических машин. Создание электрических машин и аппаратов на новых физических принципах позволит усовершенствовать все технологические этапы генерации, передачи и распределения электрической энергии и аппаратных средств информационных технологий.

Сегодня прототипом таких сетей являются локальные электрические сети (ЛЭС), содержащие источник возобновляемой энергии (ВИЭ), накопители энергии и системы интеллектуального управления. В качестве источников возобновляемой энергии в таких сетях используется, как правило, энергия ветра и солнца. Однако большой проблемой массового использования ВИЭ является низкая пространственная плотность источников энергии, особенно ветровой, что ведет к большой странственной распределенности сетей. Особенно большой проблемой является использование таких ВИЭ в населенных пунктах с большой плотностью населения.

В связи с низкой плотностью ветровой энергии, распределением многих генерирующих блоков на обширной территории, неизбежно встает вопрос о концентрации мощности ВИЭ. Проблему можно частично решить установкой дополнительных ВИЭ, например, солнечных панелей, которые могут быть интегрированы в локальную электрическую сеть. Однако в таких разнородных системах возможны существенные колебания энергии, которые могут вызвать нестабильность работы системы [4, 5].

С другой стороны, управление электрической энергией похоже на управление информационными потоками, поэтому принципы работы сетей Smart Grid сходны, в некотором смысле, с принципами сетей Интернета. Разница только в том, что электрические сети включают в свой состав гораздо больше сетевых узлов. Здесь необходимо применить опыт интеграции, обработки важной информации и с его помощью оптимизировать потребление электроэнергии. Технология Smart Grid, основанная на протоколе IP, представляет собой лучшее решение для потребителей, которые становятся частью интеллектуальной сети и получают возможность управлять генерацией и потреблением энергии и оптимизировать эти процессы с помощью интеллектуальных счетчиков. Эта технология дает реальные преимущества каждому пользователю.

Зарубежные исследования показали, что подобные технологии могут сократить потребление электроэнергии на 10 и более процентов. Более того, экономия может достигнуть 15 процентов и более, если бытовая техника (посудомоечные машины, стиральные машины и т. п.) будет программироваться на включение в наиболее выгодные промежутки времени. Со временем сокращение потребления энергии в часы пиковой нагрузки поможет избежать ожидаемого на отечественном энергетическом рынке дефицита генерирующих мощностей. Более того, те, кто сегодня потребляет электроэнергию, могут стать ее поставщиками. До сих пор электричество генерировалось, как правило, на тепловых электростанциях, работающих на нефти и газе. После развертывания локальных сетей резервные генерирующие мощности будут, по крайней мере, частично, предоставляться самими потребителями. Расходы в сетях электропередач снизятся, что принесет существенную выгоду как производителям, так и потребителям электроэнергии [6, 7, 8].

На основании вышесказанного можно дать следующую характеристику локальной электрической сети.

Во-первых, это полностью интегрированная, саморегулирующаяся и самовосстанавливающаяся электроэнергетическая система, имеющая сетевую топологию. Во-вторых, включающая в себя все генерирующие источники, магистральные и распределительные сети, все виды потребителей электрической энергии, управляемая единой сетью информационно-управляющих устройств в режиме реального времени. Современная локальная электрическая сеть содержит, как правило, следующие основные элементы:

- источник ВИЭ;
- накопитель электрической энергии;
- блок преобразования и управления режимами работы источника электроэнергии и накопителя энергии;
- систему интеллектуального управления и контроля параметров.

Классификация ЛЭС может быть произведена, например, по типу ВИЭ. Это ЛЭС на основе солнечных фотоэлектрических устройств, водородно-воздушных топливных элементов, ветроэлектрических установок, пьезоэлектрических преобразователей, двигателей внутреннего сгорания, твердооксидных топливных элементов, термической переработки органической массы, сезонных колебания температуры окружающей среды,

поплавковых электрических станций и т. д. Важным элементом ЛЭС является накопитель энергии [9,10]. Накопитель энергии выполняет следующие функции в электрической сети:

- повышает экономическую эффективность сети;
- выравливает электрическую нагрузку при ее значительных колебаниях;
- служит резервным источником электропитания;
- служит средством коммерциализации энергетики.

В любой ЛЭС целесообразно использовать накопители энергии. Это позволит выровнять график нагрузок в разные периоды суточного и сезонного спроса на электрическую энергию. Применение накопителей энергии позволит коммерциализировать производство электроэнергии, что повысит эффективность работы энергетических компаний и качество электроснабжения потребителей за счет компенсации недостаточной пропускной способности элементов системы, управления реактивной мощностью, регулирования напряжения, снижения стоимости электроэнергии.

Отдельно следует выделить вопрос создания, так называемой, маневренной нагрузки. В качестве такой нагрузки может рассматриваться, например, теплоаккумулирующее электроотопление, которое использует электроэнергию в ночное время, обеспечивая комфортные условия проживания людей. Подобные решения в большинстве случаев дают интегральный эффект за счет выравнивания суточного графика электрических нагрузок, снижения требуемого объема маневренной генерации, упрощают обеспечение нормируемого качества электрической энергии т. д.

Интеграция ЛЭС с накопителями энергии в централизованные системы энергоснабжения осуществляется посредством Smart Grids технологий, которые используют усовершенствованную инфраструктуру измерений. Эта инфраструктура расширяет функциональные возможности интегрированной системы посредством использования общих аппаратных средств и единого программного обеспечения. Она способна собирать данные и передавать их другим системам, пересылать информацию через сеть в обратном направлении, т. е. к измерительным приборам для инициирования сбора дополнительных данных, контроля состояния электрооборудования, обновления математического обеспечения. Более того, интеллектуализация сетей

дает возможность реализовать функции автоматического обнаружения повреждений, их локализации, изоляции и восстановления электроснабжения.

Экономичность управления ЛЭС достигается за счет возможности комплексного воздействия на параметры режима. Например, регулирование напряжения помимо использования традиционных средств может быть реализовано путем изменения генерации активной или реактивной мощности, воздействием на средства аккумулирования энергии, управлением нагрузкой. Этот комплекс мер совместно с аппаратным и программным обеспечением называется энергетическим менеджментом. Энергетический менеджмент осуществляет:

- менеджмент энергетических данных;
- менеджмент энергоснабжения;
- менеджмент энергопотребления (рассматривает собственно процессы энергопотребления соответствующего объекта);
- менеджмент энергетических проектов, нацеленных на повышение эффективности использования энергии.

В условиях энергетики непрерывного развития эффективность управления процессами генерации, распределения и использованием энергии путем энергетического менеджмента очень важна.

Создание накопителей электроэнергии ВИЭ, своеобразных «складов» электроэнергии, подобных углеводородным, и разработка более экономичных и малогабаритных преобразователей электрической энергии (ПЭ) альтернативных источников являются решением данных проблем. Накопители энергии, высокоэкономичные, малогабаритные преобразователи и сверхпроводящие кабели составляют основу электроэнергетики будущего [11].

В таблице 1 приведены сравнительные данные накопителей, которые могут применяться в энергетике [10]. Удельная запасенная энергия характеризует количество энергии в накопителе, приведенное к единице его массы. Данный параметр определяет экономическую применимость накопителя и конкурентоспособность источников энергии ВИЭ. Из приведенных типов накопителей максимальным значением удельной запасенной энергии обладает пневматический накопитель.

Однако наиболее широко используются аккумуляторные батареи, хотя по данному показателю они уступают пневматическим, но по остальным параметрам значительно превосходят. Однако данные параметры накопителей не могут удовлетворить потребности

## НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ В ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

современной энергетики и особенно ЛЭС, сделать ее конкурентоспособной с углеводородной энергетикой. Для этого необходимы принципиально новые накопители, позволяющие увеличить удельную плотность запасенной энергии в сотни и тысячи раз по сравнению с приведенными в таблице 1.

Существуют прообразы таких накопителей, где энергия электромагнитного поля может накапливаться в сверхпроводящем соленоиде. Источником электромагнитного поля служит электрический ток, текущий по сверхпроводящему контуру. Поскольку такой контур не имеет сопротивления, ток можно увеличивать, увеличивая таким образом энергию электромагнитного поля. Для этого используется сверхпроводящая проволока из ниобия или его соединений, с температурой перехода  $T_c \geq 4\text{K}$ . Известно, что были разработаны и экспериментально опробованы несколько прототипов накопителей электроэнергии, сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии (СПИН) [12].

Метод накопления электроэнергии с помощью СПИНа отличается экологической чистотой: не используются вредные материалы, не происходит химических реакций, отсутствуют вредные выбросы производства электроэнергии и достигается эффект хранения электроэнергии. Применяемый для охлаждения жидкий гелий является безвредным инертным газом, а при аварийной разгерметизации криостата легко удаляется. С другой стороны явление сверхпроводимости позволяет создавать новые типы электрических машин, систем передачи электрического тока по сверхпроводящим кабелям [13, 14].

Однако работа накопителя при гелиевых температурах 4 К связана с большими затратами по низкотемпературному криостатированию, оправданными только при работе в очень крупных сетях. Переход на создание подобных систем на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), работающих при температуре жидкого азота  $T_c \leq 77\text{K}$  в целом многообещающий и в этом направлении ожидается большой прогресс, в том числе применение в ЛЭС.

Но пока применение устройств на ВТСП упирается в дороговизну стоимости проводного материала. Существующие провода первого поколения (1G) – это провода на основе серебряной матрицы с микроканалами, в которых находится сверхпроводящая керамика, как правило,  $\text{Bi-Sr-Ca-Cu-O}$  (BSCCO) и провода второго поколения 2G, на основе микронных керамических покрытий на под-

ложку из  $\text{Y-Ba-Cu-O}$  (YBaCuO). Первые длинномерные провода 1G были созданы давно. Сегодня технология их производства («порошок в трубе») развивается, выпускаются сотни километров провода, которые идут на создание сверхпроводящего электротехнического оборудования. Однако провода 1G более чем на 2/3 состоят из чистого серебра, что исключает значительное снижение их стоимости в будущем. Следующий недостаток – разрушение сверхпроводимости в BSCCO в сильном магнитном поле. Это ограничивает спектр применения сверхпроводников первого поколения устройствами с относительно слабыми рабочими магнитными полями и делает бесперспективным изготовление на их основе таких изделий, как генераторы, двигатели, трансформаторы, накопители энергии и другое.

Сверхпроводники второго поколения 2G, (YBaCuO), часто именуемые «лентами с покрытием», являются на сегодняшний день самым перспективным направлением развития технической сверхпроводимости. Основное фундаментальное преимущество 2G заключается в том, что они обладают максимальной плотностью критического тока. В сравнении с 1G, 2G могут работать в высоких полях и стоимость материалов в проводе 2G ниже стоимости материалов в проводе 1G. Основным недостатком 2G заключается в сложной технологии изготовления проводного материала на их основе и, соответственно, высокой стоимости. Это не позволяет сегодня создать конкурентоспособные промышленные образцы массового применения.

Существуют технологии изготовления объемных сверхпроводников на основе ВТСП, свойства которых отличаются от пленочных сверхпроводников. Значительные магнитные поля «магнитные вихри» до 10-20 Тл при температуре 45 К могут захватываться и «вмораживаться» в ВТСП, что значительно больше, чем в обычных постоянных магнитах и поэтому является перспективным свойством для технических применений [15].

Однако технологии конструкционных материалов на основе объемных сверхпроводников пока уделяется мало внимания по сравнению с пленочными технологиями. Свойство объемных сверхпроводников можно положить в основу работы многих электромагнитных преобразователей, электрических машин, в частности, накопителей электрической энергии. Однако сегодня этому направлению уделяется мало внимания.

СМОЛЕНЦЕВ Н. И.

Объемный сверхпроводник при охлаждении в магнитном поле источника электрической энергии может играть роль преобразователя электрической энергии в энергию «вмороженного» магнитного потока и сохраняет ее пока температура сверхпроводника ниже критической температуры сверхпроводящего перехода.

Обратное преобразование магнитной энергии в электрическую принципиально возможно разными способами [16].

В затратном соотношении технология изготовления массивных сверхпроводников значительно ниже стоимости проводного материала, технология охлаждения при температуре жидкого азота в десятки и сотни раз дешевле охлаждения при температуре жидкого гелия, сам азот в жидком и газовом состоянии инертный газ и отличный диэлектрик.

Принципиально возможно создание относительно дешевого промышленного накопителя с большой удельной электроемкостью для локальных электрических сетей, работающих от ВИЭ.

При улучшении механических свойств массивного сверхпроводника как конструкционного материала, новые конструкции электромагнитных машин (генераторов, двигателей, преобразователей, накопителей энергии) позволят улучшить технические и экономические характеристики локальных электрических сетей, сделав их компактнее, дешевле и доступнее для массового потребителя электрической энергии. В целом решение данной проблемы позволит снизить стоимость альтернативной электрической энергии и сделать ее дешевле, чем выработанная на углеводородном топливе.

Таблица 1 – Сравнительные данные накопителей энергии

| Накопитель энергии             | Характеристика возможной реализации накопителя   | Запасенная энергия, кДж | Удельная запасенная энергия, кДж/кг | Максимальное время работы на нагрузку 100 Вт, минут | Срок службы, лет |
|--------------------------------|--|-------------------------|-------------------------------------|---|------------------|
| Конденсаторный                 | Батарея емкостью 1 Ф, напряжением 250 В, масса 120 кг  | 31.25                   | 0.26                                | 5.2   | до 20            |
| Маховик                        | Стальной маховик массой 100 кг, диаметр 0,4 м, толщина 0,1 м   | 1000                    | 10                                  | 167   | более 20         |
| Свинцово-кислотный аккумулятор | Емкость 190 А · час, выходное напряжение 12 В, масса аккумулятора 70 кг                                  | 3900                    | 56                                  | 650   | 3 ... 5          |
| Пневматический                 | Стальной резервуар объемом 1 м <sup>3</sup> , массой 250 кг со сжатым воздухом под давлением 50 атмосфер | 20000                   | 80                                  | 3300  | более 20         |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid // Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. – М. : ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
2. Смоленцев, Н. И. Локальная электроэнергетическая сеть в технологической платформе Smart Grid / Н. И. Смоленцев и др. // Электрика. – 2011. – № 8. – С. 25–28.
3. Кудрин, Б. Электроснабжение промышленных предприятий : учебник / Б. Кудрин. – М. : Интернет Инжиниринг, 2005.
4. Четошникова, Л. М. Процесс управления мощностью в распределенной интеллектуальной сети / Л. М. Четошникова, Н. И. Смоленцев, С. А. Четошников // Электрика. – 2012. – № 7. – С. 6–9.

5. Четошникова, Л. М. Снижение колебаний энергии в локальных сетях с распределенной энергией / Л. М. Четошникова, Н. И. Смоленцев, С. А. Четошников, А. Н. Смоленцев // Электрика. – 2013. – № 5. – С. 37–39.
6. «Smart Grid Policy», [Docket No, PL09-4-000], Federal Energy Regulatory Commission, USA, July 16, 2009.
7. «Title X111-Smart Grid, Sec. 1301, Statement of Policy on Modernization of Electricity Grid», Energy Independence and Security Act of 2007 (EISA), USA.
8. National institute of Standards and Technology (NIST), «NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards», Release 1,0, Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability, USA, January, 2010.
9. Алексеев, Б. А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике / Б. А. Алексеев // Электр. – 2005. – № 1. – С. 42–46.

## НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ В ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

10. Бушуев, В. В. Энергоэффективность и экономика России в рамках Энергетической стратегии / В. В. Бушуев // ЭКО. – 2005. – № 11. – С. 52–66.

11. Гинзбург, В. В. Сверхпроводимость / В. В. Гинзбург, Е. А. Андрушин. – М. : Альфа-М, 2006. – 112 с.

12. Носков, В. Н. К вопросу использования сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии в железнодорожной тяге / В. Н. Носков // Вестник РГУПС. – 2008. – № 3. – С. 54–59.

13. Данилевич, Я. Б. и др. Перспективные электротехнические преобразователи энергии на основе новых материалов / Я. Б. Данилевич // Электротехника. – № 9, – 2010, – С. 2–9.

14. Ковалёв И. А. Оценка возможности создания подводной ВТСП линии электропередачи постоянного тока мощностью 1 ГВА с рабочим напряжением 500 кВ / И. А. Ковалёв, С. А. Лелехов, Н. А. Черноплёков и др. / Сборник трудов «Российский электротехнический конгресс», секция 9. – С. 16.

15. Романов, Е. П. Низкотемпературные и высокотемпературные сверхпроводники и композиты на их основе / Е. П. Романов, С. В. Сударева, Е. Н. Попова, Т. П. Криницина. Екатеринбург : УрО РАН, 2009, – ISBN 5-7691-2012-6.

16. Смоленцев, Н. И. Накопитель энергии на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) для нетрадиционной энергетики // Н. И. Смоленцев, Л. М. Четошникова // Электрика. – № 5. – 2011. – С. 38–41.

**Смоленцев Н. И.**, к.т.н., доцент; E-mail: [sn1@m.susu.ru](mailto:sn1@m.susu.ru), Россия, Челябинская область, г. Миасс, Филиал ФБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ) в г. Миассе, кафедра «Автоматика».