

УДК 62-83: 531.3

Накопители электрической энергии для систем генерирования электрической энергии (аналитический обзор)*

С.П. ЧУДНОВЕЦ, С.А. ХАРИТОНОВ

Проводится аналитический обзор различных типов накопителей электрической энергии для применения в системах генерирования электрической энергии, а также в других областях их применения. Особый акцент делается на инерционных накопителях энергии как наиболее перспективных для использования в энергетических системах. Рассмотрены режимы работы инерционных накопителей и сформулированы ограничения, которые следует принимать во внимание при построении силовых преобразователей для подобного рода систем.

Ключевые слова: накопитель электрической энергии, система генерирования, накопитель со статической активной зоной, электромеханический накопитель, униполярная электрическая машина, полупроводниковый преобразователь.

ВВЕДЕНИЕ

Потребление различных видов энергии во всем мире, в том числе и в России, растет из года в год, что связано как с постоянным ростом промышленного производства, так и с еще более быстрым ростом потребления в быту и сфере услуг. Электроэнергия, в силу легкости ее преобразования в другие виды энергии и экологичности, является наиболее предпочтительным ее видом. С другой стороны вместе с ростом количественных показателей энергообеспеченности в разных отраслях, все большую роль приобретают показатели качества электроэнергии, из-за необходимости согласования параметров устройств на различных этапах ее преобразования. Вторым немаловажным вопросом является повышение энергоэффективности как оборудования потребителей, так и производителей электроэнергии. В настоящий момент, по различным оценкам в России, потенциал энергоэффективности составляет около 40 % потребляемой энергии (это модернизация предприятий, электрических сетей, генерирующих станций, транспорта). Рост доли энергии, вырабатываемой нетрадиционными источниками (ветроэнергетические установки, установки использующие энергию солнца, а также энергетические установки на попутном газе, которые начинают очень широко применяться нефтяными компаниями), усложняет процесс диспетчеризации дополнительно поставляемой энергии в сеть. Для решения вышеописанных задач в современной электроэнергетике, стационарной и автономной, значительное место начинает отводиться накопителям энергии, являющимся важным промежуточным звеном между системами генерирования, распределения и потребления энергии. Применение накопителей позволяет поддерживать излишнюю мощность генерации и сетевой инфраструктуры, повысить коэффициент использования установленной мощности, развязать производство и потребление энергии во времени, что приводит к повышению качества электроэнергии, повышению надежности электрооборудования и энергосистемы в целом.

Вопросы выбора накопителя электроэнергии является достаточно непростыми и определяется не только режимами работы (величиной максимальной мощности и энергии, перегру-

* *Статья получена 14 августа 2012 г.*

зочной способностью, временем восстановления заряда и др.), но и эксплуатационными затратами, сроком службы и условиями окружающей среды.

В данной работе приводится общий аналитический обзор различных типов накопителей электрической энергии и более детально рассматривается один из видов накопителей – электромеханический накопитель электрической энергии на базе маховиков, интерес к которым то возрастает, то угасает, по мере того как появляются материалы с высокими прочностными свойствами либо инновационные разработки в смежных областях.

1. ОБЗОР НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Все типы накопителей энергии имеют свои характерные энергетические показатели, режимы работы, особенности конструктивного и схемотехнического исполнения, определяющие область использования.

Накопители электрической энергии можно классифицировать на накопители со статической активной зоной – электрохимические, индуктивные, емкостные и с динамической активной зоной – электромеханические, т.е. устройства для накопления и хранения механической энергии с последующим ее преобразованием и отдачей в форме электрической энергии для дальнейшего использования.

Для оценки применимости накопителей для преобразования и накопления электрической энергии будем применять следующие показатели [4]:

$e_n = W_n / m$ – удельная энергоемкость накопителя энергии, т.е. накопленная энергия, приходящаяся на единицу массы накопителя.

$e_s = W_s / (M + m_g)$ – удельная энергоемкость системы накопления энергии в целом, отношение той части энергии накопителя, которая может быть использована в данном техническом решении к полной массе накопителя, включая внешние устройства (зарядное устройство, силовой преобразователь и др.) и массу m_g компонентов, требующихся для одного цикла работы системы (жидкость, газ, хладагент, электролит и др.).

$e_v = W_v / m$ – объемная удельная энергоемкость, т.е. отношение к объему аккумулятора.

$\eta_s = W_s / W_g$ – КПД накопителя, отношение той части энергии накопителя, которая может быть использована в данном техническом решении (энергия разряда) к энергии, необходимой для восстановления прежнего энергетического запаса системы накопления (энергия, затрачиваемая на заряд).

$p_s = P_s / M$ – удельная мощность, определяется как накопителем энергии, так и внешними устройствами, связанными с его работой.

Для оценки эффективности накопителей электрической энергии следует ввести (для более корректного сравнения) понятие удельной энергии системы накопления за полное число циклов заряда–разряда N , которое должен обеспечить накопитель в течение срока службы:

$$e_{fs} = N W_s / (M + N m_g).$$

Важным фактором для конструкторских решений также является относительная стоимость одного киловатт-часа энергии и величина мощности, необходимая для поддержания аккумулятора на постоянном уровне энергии без ее полезного использования.

Ряд накопителей **со статической активной зоной** очень широк, рассмотрим некоторые из них:

1. Индуктивные накопители на сверхпроводниках (СПИН).

СПИН позволяют получить предельные значения плотности тока в активной зоне и поэтому обладают наилучшими массогабаритными показателями, могут использоваться как в автономных, так и в крупных энергосистемах, так как способны сохранять энергию длительное время, обладают очень коротким временем отклика на изменение нагрузки и значительной удельной мощностью. Однако выигрыш в массе индуктивных накопителей при увеличении

плотности тока сопровождается значительным увеличением массы системы охлаждения и элементов конструкции; энергоемкость невелика (около 1 МВт·ч, дальнейшее наращивание ведет к определенным сложностям в размещении из-за огромных магнитных полей, что требует больших затрат на создание экранирующих систем) [1].

2. Суперконденсаторы (ионисторы).

Представляют собой импульсное электрохимическое устройство. От аккумуляторов различных типов отличаются существенно меньшей удельной энергоемкостью (до 4 Вт·ч/кг [2]) и повышенной удельной мощностью (до 10 кВт/кг). Если не превышать зарядных напряжений, то химических превращений веществ в процессе работы не происходит, поэтому ресурс системы достаточно велик и может достигать 1 000 000 циклов заряд–разряда, также к преимуществам можно отнести высокую эффективность (до 95 %), неполярность, простоту зарядного устройства, высокие скорости заряда и разряда. Недостатками являются значительный саморазряд (300 % в месяц), а также зависимость напряжения от степени заряженности.

3. Свинцово-кислотные аккумуляторы (СКА).

Данная электрохимическая система является одной из самых распространенных в силу хорошо отработанной технологии производства, большого опыта эксплуатации. Можно выделить стартерные, тяговые и буферные свинцово-кислотные аккумуляторы. Первые используются для запуска двигателей автомобилей, они рассчитаны на разряд относительно высокими токами, их удельная энергоемкость выше, чем у стационарных аккумуляторов. Стационарные аккумуляторы рассчитаны на длительный разряд более низкими токами, глубина разряда несколько выше, а массогабаритные показатели хуже. Тяговые аккумуляторы занимают промежуточное место и используются на электротранспорте.

Технология относительно дешева и позволяет легко реализовать накопитель энергоемкостью десятки мегаватт-часов для выравнивания нагрузки и стабилизации сети, аккумуляторы этого типа обладают высокой надежностью, большим сроком службы, хорошо подходят для быстрого заряда–разряда, имеют невысокий саморазряд (40 % в год), количество циклов – 200–1000 при 80 % разряде. К недостаткам можно отнести низкую удельную энергоемкость (30–40 Вт·ч/кг), невысокий КПД – 75 %, большие эксплуатационные затраты, жесткие требования по экологической безопасности при утилизации.

4. Серно-натриевые аккумуляторы (Na-S).

По сравнению с свинцово-кислотными аккумуляторами данный тип аккумуляторов имеет более чем вчетверо превышающую плотность энергии, большое число циклов заряда–разряда (до 5000 циклов при 90 % разряде) и быстроедействие, измеряемое миллисекундами с полным зарядом–разрядом. Они обладают хорошим потенциалом для целей регулирования напряжения и частоты в централизованной энергетике, т. е. повышения качества электроэнергии, совместно, например, с гидроаккумулирующими станциями, а также для стабилизации работы систем генерирования на базе возобновляемых источников энергии. Технология высокоэффективна (КПД – 92 %), нет саморазряда, требует минимального техобслуживания и имеет длительный срок службы – 15 лет. Серно-натриевые аккумуляторы изготавливаются из широко распространенных, низкостоимостных материалов, которые подходят для массового производства, возможно модульное производство, позволяющее наращивать мощность и энергоемкость накопителя, а также уменьшить время монтажа. Как и другие электрохимические аккумуляторы, состоят из двух электродов, разделенных электролитом. Анодом служит расплавленный натрий, катодом – сера в смеси с графитом, в качестве электролита используется алюминат натрия (твердый электролит). Для поддержания электродов в расплавленном состоянии оптимальная рабочая температура должна быть в пределах 250–300 °С. Для поддержания рабочей температуры расходуется часть запасенной энергии, что приводит к быстрому саморазряду, несмотря на то, что саморазряд самой ячейки равен нулю. Также к недостаткам относятся высокая рабочая температура, это накладывает определенные требования к конструкции модулей и ограничения при размещении.

Развитием серно-натриевых аккумуляторов стали так называемые ZEBRA аккумуляторы (Zeolite Battery Research Africa Project). В отличие от серно-натриевых аккумуляторов, в последних катод выполнен из пористой никель-хлоридной структуры, пропитанной расплавом

хлоралюминита натрия. Дополнительно была изменена конструкция – катод был размещен внутри анода, таким образом удалось снизить проблемы с коррозией. Данная технология была сфокусирована на создании аккумуляторов для специальных применений, таких как электрический автотранспорт и морской транспорт.

5. Никель-кадмиевые аккумуляторы (Ni-Cd).

Никель-кадмиевые аккумуляторы известны достаточно давно. Принцип действия основан на формировании гидроокиси кадмия на аноде и гидроокиси никеля на катоде. Их удельная энергоемкость почти в два раза выше, чем у СКА, они работоспособны при низких температурах, при этом допустимые токи заряда и разряда также существенно выше. Эти достоинства позволили никель-кадмиевым аккумуляторам найти широкое применение на транспорте, в авиации и стационарных системах. В то же время никель-кадмиевым аккумуляторам присущ такой недостаток как эффект памяти – их энергоемкость резко падает при неполном разряде или заряде, для ее восстановления требуются специальные алгоритмы заряда. Также они наиболее критичны из всех типов электрохимических аккумуляторов к точному соблюдению требований по правильной эксплуатации. Несмотря на эти недостатки, никель-кадмиевые аккумуляторы рассматривались как альтернатива СКА в электротранспортных применениях до появления более совершенных и менее требовательных в эксплуатации систем. Однако полностью вытеснить СКА им не удалось, прежде всего, в силу более высокой цены.

6. Никель-металл-гидридные аккумуляторы (Ni-MH).

Никель-металл-гидридные аккумуляторы являются разновидностью никель-кадмиевых аккумуляторов, в которых анодом служит водородный металлгидридный электрод, электролитом – гидроксид калия, катодом – оксид никеля. Им присущи многие достоинства никель-кадмиевых аккумуляторов, включая способность к глубокому разряду, в дополнение они имеют более высокую плотность энергии (примерно на 30 %), но несколько большее внутреннее сопротивление, а также в 1,5–2 раза выше саморазряд. Никель-металл-гидридные аккумуляторы практически избавлены от «эффекта памяти». Используются эти аккумуляторы в бытовой электронике, а в киловаттном диапазоне мощностей они нашли свое применение в гибридном электрическом транспорте.

7. Литий-ионные аккумуляторы (Li-Ion).

Для данного типа аккумуляторов характерны высокая удельная энергоемкость (90–180 Вт·ч/кг), глубокие циклы заряда разряда (70–80 %) и большое число циклов заряд-разряда (1000–7000), отсутствие «эффекта памяти», низкий саморазряд (3–5 % в месяц), способны держать достаточно высокие кратковременные токи нагрузки (до 65 от емкости аккумулятора в постоянном режиме и до 500 в импульсном), они практически не требуют обслуживания. Благодаря низкому саморазряду и большому количеству циклов заряда-разряда, литий-ионные аккумуляторы наиболее предпочтительны для применения в альтернативной энергетике. Ресурс и стоимость таких аккумуляторов зависят от типа электрохимических систем, температуры и режимов эксплуатации. Литий-ионные аккумуляторы применяются в комплексе с системой контроля и управления и специальным устройством заряда-разряда.

В настоящее время в массовом производстве литий-ионных аккумуляторов используются три класса катодных материалов: оксиды лития с кобальтом и твердые растворы на основе изоструктурного ему никелата лития, литий-марганцевая шпинель, литий-ферро-фосфат. Электрохимические схемы литий-ионных аккумуляторов: литий-кобальтовые и литий-железо-фосфатные. Ферро-фосфат лития оказался очень удачным материалом для создания аккумуляторов, он способен отдавать практически весь накопленный литий, оставаясь устойчивым. Благодаря возросшей многократно площади активной поверхности и улучшенной проводимости за счет наночастиц углерода, батареи с катодом из наноструктурированного ферро-фосфата лития превосходят кобальтовые по токам разряда, из-за ограниченной проводимости катодного материала литий-железо-фосфатные аккумуляторы (LiFePO_4) не взрываются при внутреннем коротком замыкании, они дешевле остальных типов литий-ионных аккумуляторов, имеют в 3–5 раз больший срок хранения (до 15 лет), но, к сожалению, имеют меньшую энергетическую плотность (90–130 Вт·ч/кг). Проходит тестовые испытания новый вид литий-ионных аккумуляторов – нанопроводниковый аккумулятор, традиционный графитовый анод

аккумулятора здесь заменен на анод из нержавеющей стали, покрытый кремниевым нанопроводником. Кремний, способный удерживать в десять раз больше лития, чем графит, позволяет создавать гораздо большую плотность энергии на аноде, снижая, таким образом, массу аккумулятора. В будущем увеличение площади поверхности анода позволит ускорить процесс зарядки и разрядки.

Литий-ионные источники энергии (батареи) с большим напряжением реализуются в виде последовательной цепочки аккумуляторов, сколько-нибудь мощные могут иметь последовательно-параллельное соединение. Безопасность эксплуатации таких батарей обязательно обеспечивается внешней электронной защитой от перезаряда и переразряда отдельных аккумуляторов, которая включает контроллеры, измеряющие напряжение каждого из них или блока из параллельно соединенных, и ключи для размыкания электрической цепи при достижении предельных величин напряжения. Устройство внешней защиты размещают обычно прямо на аккумуляторе. Системы электронной защиты батарей у разных производителей могут существенно различаться, а доступ к этой части изделия часто защищен. Система является необходимой частью аккумуляторных батарей, зачастую включая в себя систему охлаждения/подогрева.

8. Металло-воздушные аккумуляторы.

Принципиальным отличием данного типа аккумуляторов является высокая удельная энергоемкость, в несколько раз превышающая энергоемкость литий-ионных аккумуляторов. Широкому распространению препятствует короткий срок эксплуатации, связанный с высыханием электролита, сложность перезарядки, большинство типов аккумуляторов данного вида не перезаряжаются электрически, а требуют замены активных материалов.

В 2009 году министерством энергетики США был выделен грант компании «Fluidic Energy» на постройку прототипов долговечных металло-воздушных аккумуляторов с удельной емкостью на порядок превосходящей литий-ионные аккумуляторы. Первые опытные результаты показали возможность создания электрохимической ячейки с удельной энергоемкостью от 900 до 1600 Вт·ч/кг при себестоимости немногим больше свинцово-кислотных аккумуляторов. В качестве анода в этом аккумуляторе используется высокопористый электрод с размерами пор до 10 нанометров, который способен хорошо удерживать цинк и препятствует образованию дендритов, приводящих к короткому замыканию, электролитом служит не водный раствор, как в обычных металло-воздушных аккумуляторах, а ионная жидкость [3].

9. Поточные аккумуляторы.

В отличие от традиционных электрохимических аккумуляторов, поточные представляют собой аккумуляторы с постоянно заменяемым жидким электролитом. Электролит хранится отдельно от аккумулятора и прокачивается через него в процессе работы.

В поточных аккумуляторах на основе окислительно-восстановительных реакций (redox), таких как аккумуляторы на базе окисления-восстановления ванадия и аккумуляторы на основе бромида полисульфида, все химические компоненты, участвующие в процессе преобразования электрохимической энергии, растворены в электролите. Таким образом, нет необходимости накапливать химические компоненты в процессе заряда и разряда, энергоемкость определяется только размером емкости с электролитом, в то время как удельная мощность зависит от размеров аккумулятора и возможностей насосной установки. Такое разделение удельной мощности и удельной энергии является одним из главных преимуществ redox-аккумуляторов. Работа другой разновидности данного типа аккумуляторов – аккумуляторов на основе бромида цинка, наоборот, основана на накоплении химических материалов в процессе заряда-разряда внутри аккумулятора, поэтому упомянутое выше преимущество, свойственное redox-аккумуляторам, отсутствует.

Основными достоинствами поточных батарей являются долгий срок службы, высокое быстродействие и симметричная способность к заряду-разряду, большое количество циклов (до 10000), высокая удельная энергоемкость благодаря большому запасу электролита. К недостаткам можно отнести низкую плотность энергии (10–20 Вт·ч/кг, однако у аккумуляторов на основе бромида цинка (ZnBr) достигает 145 Вт·ч/кг) и невысокий КПД – 70–80 %.

На рис. 1 приведены зависимости максимального числа циклов заряда–разряда в течение срока службы для некоторых типов электрохимических накопителей.

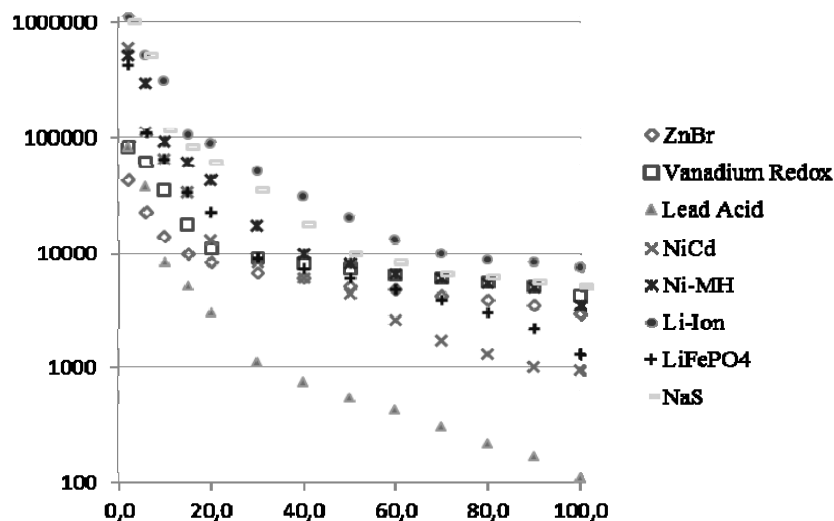


Рис. 1. Зависимости количества циклов заряда–разряда N (за срок службы) от глубины разряда (%) для некоторых типов электрохимических аккумуляторов

К **электрохимическим накопителям** относятся гидроаккумулирующие станции, системы аккумулирования с помощью сжатого воздуха и электрохимические системы в качестве накопителя, в которых используется инерционный накопитель (маховик). Первые два вида применяются для создания систем накопления энергии большой емкости ($> 0,5$ ГВт·ч). Данные технологии являются сильно инерционными и требуют специальных природных условий, что вносит большую неопределенность на стадии осуществления проекта из-за возможных дополнительных непредвиденных затрат и снижает конкурентоспособность данного типа накопителей по сравнению с инерционными накопителями.

В инерционных накопителях запасается, как правило, кинетическая энергия вращательного движения маховика. Несмотря на то, что данный тип накопителей энергии был известен еще с древних времен, до сравнительно недавнего времени они широко не использовались ввиду малой энергоемкости, при этом дальнейшее ее наращивание было ограничено прочностью материала маховика и могло привести к его разрыву, что при огромных энергиях было весьма небезопасным. Большая работа по исследованию и внедрению механических накопителей была проделана отечественными учеными, в результате этой работы маховик претерпел ряд конструктивных изменений, в частности была разработана конструкция супермаховика [5]. Конструктивно супермаховик представляет собой устройство цилиндрической формы, изготавливаемое, как правило, из высокопрочных композитных материалов. Конструкция такова, что в случае превышения максимальной допустимой скорости маховика на сверхугонных скоростях, начинает разрушаться внешний слой, приводя к его торможению трением о защитный кожух. Для применения в системах генерирования электрической энергии супермаховик объединяется с мотор-генератором. В конструкции, для исключения потерь на трение, применяется магнитный подвес движущейся части, в накопителях большой мощности используют электромагнитные подвесы, объединенные с системой возбуждения электрической машины, это позволяет уменьшить затраты энергии, необходимой для поддержания аккумулятора в заряженном состоянии. Использование силовых преобразователей позволяет существенно наращивать мощность и энергоемкость системы накопления путем параллельного и последовательного включения маломощных модулей. Безопасность системы в целом при этом растет, так как энергия каждой отдельной элементарной ячейки может быть снижена до приемлемого уровня, что дает возможность создавать мобильные электрохимические системы накопления электрической энергии.

Таким образом, электромеханические накопители с кинетическим звеном накопления энергии представляют собой конструктивно объединенные в одной установке механический инерционный накопитель (маховик), электрическую машину и силовой полупроводниковый преобразователь. Наибольший коэффициент формы при одинаковых параметрах материала и, как следствие, наибольшее значение удельной энергии имеет маховик с квадратично-экспоненциальным профилем [6]. В маховике такой формы возникают независимые от радиуса тангенциальные и радиальные механические напряжения. Изготовление супермаховиков с квадратично-экспоненциальным профилем технологически достаточно сложно, поэтому, как правило, они имеют форму цилиндра или обода.

Электрическая машина в составе накопителя может быть на основе машин переменного тока (синхронных и асинхронных) и машин постоянного тока, включая коллекторные, вентильные разноименнополосные и униполярные машины. При разряде электромеханического накопителя для генератора характерны два режима отбора мощности в нагрузку – относительно длительное (от единиц секунд до часа) динамическое торможение ротора электромагнитными силами в активной зоне электрической машины и кратковременный ($10^{-3} - 10^{-2}$ с) пиковый режим ударного разряда, сопровождающийся торможением ротора. В обоих случаях с учетом потерь (на трение, электрических и магнитных) в электроэнергию преобразуется часть запасенной кинетической энергии ротора, которая составляет для накопителя цилиндрического вида с изменяющейся по высоте геометрией:

$$W_s = \frac{\chi \pi \rho (\omega_1^2 - \omega_2^2) \sum_{i=0}^k h_{i+1} (R_{i+1}^4 - R_i^4)}{2} \text{ Дж.}$$

Здесь ρ – плотность материала маховика; ω_1 и ω_2 – начальное и конечное значение угловой скорости, определяются при проектировании накопителя, на основе технических ограничений и заданных условий работы; R_{i+1} и R_i – внешний и внутренний радиусы элементарных цилиндров, составляющих накопитель; h_i – высота элементарного цилиндра у оси; χ – коэффициент формы; σ – допустимое напряжение материала на разрыв с учетом коэффициента запаса прочности.

Предельная длительность режима динамического торможения определяется допустимым уровнем уменьшения угловой скорости, т. е. зависит от прочности материала маховика ($\omega \sim \sqrt{\sigma / \rho}$), а также конструкцией электрической машины. В случае, если маховик конструктивно не объединен с электрической машиной, а соединяется с ней посредством вала, следует учитывать тот факт, что в ударном режиме разряда, угловая скорость маховика практически не снижается, а его кинетическая энергия частично переходит в потенциальную энергию упругой крутильной деформации вала. Все вышеуказанные ограничения должны учитываться при проектировании силового преобразователя. Интересным видится использование униполярных машин в качестве электрической машины в накопителях данного типа, ввиду отсутствия обмоток на якоре (или вообще таковых, в случае малых энергий возможно использование постоянных магнитов), малого внутреннего сопротивления и низкой индуктивности, возможность существенно повышения уровня тока якоря и предельной мощности, высокая окружная скорость, допускаемая в условиях прочности якоря. При больших окружных скоростях характерное для этого типа электрических машин низкое напряжение якоря будет значительно выше (пропорционально скорости), а при использовании цилиндрической униполярной машины достаточным для эффективного применения совместно с полупроводниковыми силовыми преобразователями в качестве отдельного модуля (аккумулятора) при создании накопителей большой мощности. Характерной особенностью униполярных машин любого типа является отсутствие, при наличии круговой симметрии магнитного поля, потерь от вихревых токов и на гистерезис в стали якоря. Единственным недостатком такой машины является принципиальная невозможность бесконтактного исполнения, решение которого потребует механического отвода коммутатора в режиме хранения энергии, для уменьшения потерь на трение, что ухудшит быстродействие системы.

Сравнительные характеристики различных систем накопления электрической энергии представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики различных систем накопления энергии

Тип накопителя \ Параметр	Удельная энергоемкость накопителя (e_n), Вт·ч/кг	Удельная энергоемкость системы ⁽¹⁾ (e_s), Вт·ч/кг	Удельная мощность (P_s), Вт/кг	Вес ⁽¹⁾ , т/МВт·ч	Максимальный КПД (η_s), %	Саморазряд, % в месяц	Быстродействие, мс	Срок службы, лет	Количество циклов заряда-разряда (N)
СКА	40	25	18,6	40	75	4	10–20	15	300–1000
Поточный ZnBr	145	100	15	10	80	1	10–20	10	3000
Поточный Vanadium Redox	20	17	2,4	59	80	1	10–20	10	4500
NiCd	65	30	50	33	90	10	10–20	20	3000
Ni-MH	72	40	66	25	90	15	10–20	20	3500
Li-Ion	180	110	360	8,3	96	3	10–20	5	7500
LiFePO ₄	130	90	350	10	96	3	10–20	5	5000
NaS	300	110	330	9,1	92	– ⁽²⁾	10–20	15	5000
ZEBRA	350	120	288	8,3	92	– ⁽²⁾	10–20	15	4500
Ионисторы	4	2,28	500	250	95	300	10–20	40	10 ⁶
Инерционные накопители (маховики)	200	100	– ⁽³⁾	5	95	4	10–20	20	10 ⁶
Гидроаккумулирующие станции	0,1	– ⁽⁵⁾	– ⁽³⁾	10 ⁴	85	– ⁽⁴⁾	1–3 мин	40	35000
Сжатый воздух	600–800/м ³	– ⁽⁵⁾	– ⁽⁶⁾	1,6	70	0	5–12 мин	30	9000
СПИН	30	–	– ⁽⁵⁾	30	95	– ⁽⁷⁾	<100	20	30000

⁽¹⁾ Без учета силового преобразователя

⁽²⁾ Потери на поддержание рабочей температуры

⁽³⁾ Определяется электрической машиной

⁽⁴⁾ Потери связанные с испарением

⁽⁵⁾ Определяется конструкцией

⁽⁶⁾ Определяется системой преобразования

⁽⁷⁾ Потери на систему охлаждения

2. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В данном разделе приводится обзор основных областей применений накопителей электрической энергии в стационарных и автономных системах генерирования электрической энергии.

1. Накопители энергии для магистральных систем электроснабжения.

Гидроаккумулирующие станции и системы накопления энергии с помощью сжатого воздуха ввиду большой энергоемкости рассматриваются как накопители для магистральных систем электроснабжения. В отличие от них все остальные накопители электроэнергии более подходят для менее энергоемких применений, располагающихся вблизи распределительных

подстанций или электростанций на возобновляемых источниках энергии. Такое распределение накопителей, сгруппированных и действующих как единый многомегаваттный накопитель обладает рядом преимуществ: безопасность (меньшая концентрация энергии в одном месте), эксплуатационная надежность (резервирование мощности для конечного пользователя), повышает надежность оборудования (разнесение территориально), ведет к экономии затрат на обслуживание и наращивание электросетей, способствует снижению стоимости электроэнергии там, где используется многотарифная система оплаты за электроэнергию.

2. Применение для целей генерирования

- Повышение динамической стабильности частоты.

Системы накопления энергии хорошо подходят для первичного и вторичного регулирования частоты, поскольку обладают высоким быстродействием и ограниченным временем вывода на рабочий режим, в отличие от традиционных генераторных систем.

- Демпфирование колебания в энергосистемах.

Способность накопителей отдавать практически всю накопленную энергию мгновенно позволяет компенсировать недостающие мощности в моменты резкого возрастания нагрузки, таким образом сглаживая либо совсем исключая возникновение переходных процессов.

- Резервирование мощности для выравнивания графика работы (как правило, для систем генерирования на базе нетрадиционных источников энергии) и коммерциализация накопленной энергии.

Системы генерирования на базе возобновляемых источников энергии не обладают постоянством работы. Например, если изменение силы ветра для ветроэлектростанций носит регулярный характер (более сильный ветер ночью) или пик генерации приходится на время, когда используется более низкий тариф, накопители могут использоваться для накопления энергии во время пика генерации и сброса ее в сеть в моменты повышенного потребления.

- Резервирование мощности в моменты ограниченности пропускной способности сети.

В случае ограниченной пропускной способности линий электропередачи, системы накопления энергии могут применяться для снижения ограничения в генерации энергии.

3. Применение для передачи и распределения энергии.

- Резервирование мощности для сдвига ее передачи во времени.

Этот случай похож на предыдущий. Стоит отметить, что применение накопителей только для резервирования мощности на время ограниченной пропускной способности сети может быть экономически нецелесообразным.

- Уменьшение нагрузки на распределительную сеть.

Накопление энергии в моменты пониженного энергопотребления с последующим расходом в пиковые часы позволит снизить загрузку сетей, и, как следствие уменьшить потери и избежать возникновения аварий.

- Повышение качества электрической энергии (активная фильтрация).

Накопители могут использоваться в качестве активных фильтров для коррекции коэффициента мощности, а также, при необходимости, служить источником реактивной мощности.

4. Использование накопителей на стороне потребителя электроэнергии.

На стороне конечного пользователя системы накопления могут устанавливаться либо непосредственно у потребителя, либо быть частью распределительной подстанции.

- Повышение качества электроэнергии и надежность.

Системы накопления электроэнергии могут использоваться как источник резервного питания при пропадании напряжения в сети, для компенсации кратковременных провалов в электроснабжении, активной фильтрации, повышения динамической стабильности напряжения.

- Резервирование (хранение) при работе с нетрадиционными источниками энергии.

- Резервирование (хранение) при многотарифном стоимостном графике, а также сброс мощности в сеть во время действия повышенного тарифа.

5. Другие возможные применения.

- Арбитраж.

Накопление с целью последующей перепродажи: покупка электроэнергии в моменты более низкого тарифа, в часы низкого потребления электроэнергии и продажа в пиковые часы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последние годы в мире резко возрос интерес к применению накопителей электрической энергии в системах генерирования. Это объясняется как постоянным удорожанием энергоносителей и стремлением энергогенерирующих компаний к уменьшению затрат на выработку электроэнергии, тенденциями развития генерирующих мощностей, так и новыми технологиями производства некоторых типов накопителей энергии, позволяя создавать модульные структуры энергоемкостью от единиц до десятков МВт·ч, инвариантные к месту установки для наиболее эффективного их использовать в решении ряда системных задач, а также для стабилизации графиков выдачи мощности системами генерирования на базе нетрадиционных источников энергии. Системы накопления электроэнергии в самом скором времени будет рассматриваться не как инновация, а как ключевой элемент современных систем генерирования электрической энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 13G36.31.0010 от 22.10.2010 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Cheung K.Y. Large-Scale Energy Storage Systems / K.Y. Cheung and et al. – London: Imperial College, 2002.
- [2] Vivekchand S.R.C. Graphene-based electrochemical supercapacitors / S.R.C. Vivekchand and et al. – Indian Academy of Sciences 120, 2008. – P. 9–13.
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Fluidic_Energy (дата обращения: 20.07.2012).
- [4] Седов Л.И. Рулевое устройство судна / Л.И. Седов, И.М. Кирко // А/с 1439929, 22.07.1988.
- [5] Гулия Н.В. Супермаховики – из суперкарбона! / Н.В. Гулия // Изобретатель – рационализатор. – 2005. – № 12 (672).
- [6] Гулия Н.В. Маховичные двигатели / Н.В. Гулия. – М.: Машиностроение, 1976. – С. 130–140.

Харитонов Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной электроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований: силовая электроника, теория преобразования электрической энергии, системы генерирования электрической энергии для автономных объектов. Имеет более 230 публикаций, в том числе три монографии и 4 учебных пособия. E-mail: Kharit1@yandex.ru.

Чудновец Сергей Павлович, соискатель ученой степени кандидата технических наук, технический эксперт компании «Шлюмберже». Основное направление научных исследований: силовая электроника, теория преобразования электрической энергии, системы генерирования электрической энергии. E-mail: SChudnovets@slb.com

S.A. Kharitonov, S.P. Chudnovets

The analytical survey of energy storage devices for power generation systems

The analytical survey of different types of electrical energy storage devices for applications in the power generation systems is represented. Particular emphasis is placed on the flywheel energy storage application as a most promising for use in the power generation systems. The operation modes are considered and limitations are formulated for power converter design parameters used in flywheel energy storage device applications.

Key words: energy storage equipment, generation system, static storage device, flywheel, acyclic machine, power convertor.