

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2024

ТЕХНИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА СЪОРЪЖЕНИЯТА ЗА СЪХРАНЯВАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ (ССЕЕ)

Антоанета Календерова, Ясен Тодоров

TECHNICAL ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGY STORAGE SYSTEMS (ESS)

Antoaneta Kalenderova, Yassen Todorov

Storage technologies are expected to play a key role in balancing energy supply and demand. Logically, new financial opportunities will also be created for the participants of the electricity market, who will be able to buy and store energy when the network is under load and sell it, respectively, at a higher rate when there is a high demand. Large-scale energy storage in batteries will be included in an essential part of the future smart grid

ВЪВЕДЕНИЕ

Съоръженията за съхранение на електрическа енергия (ССЕЕ) могат да предложат на електроенергийната система многобройни услуги. Повечето от тях включват участие в пазара на електроенергия, спомагателни услуги или балансиране на мощността.

На мрежово ниво ССЕЕ доставят услуги, които са специфични за географското местоположение на мястото на присъединяване на ССЕЕ. Съоръженията за съхранение на електрическа енергия могат да бъдат свързани към преносната или към разпределителната мрежа и могат да:

- участват в управлението на претоварването на преносната система;
- спомогнат за отлагане на инвестиции в мрежова инфраструктура;
- помагат да се изпълнят критериите за стабилност на системата;
- компенсират напрежението и реактивната мощност
- се използват при „черни стартове“;

- намалят техническите загуби в мрежата.

ССЕС предоставя на оператора на преносната мрежа услугите автоматичен резерв за възстановяване на честотата (aFRR) и ръчен резерв за възстановяване на честотата (mFRR), като вторично и третично регулиране на честотата, както и на операторите на електроразпределителните мрежи услугата управление на претоварването (congestion management).

Най-разпространената технология за съхранение на излишната електрическа енергия е чрез помпено-акумулиращи водоелектрически централи (ПАВЕЦ). Те имат висока ефективност на преобразуване на енергията AC-to-AC (около 70-85%) и продължителност на живота между 40 и 60 години.

В доклада са разгледани навлизащите с бързи темпове електрохимични, механични и топлинни технологии за съхраняване на електрическа енергия. Тези иновативни технологии ще насърчат проникването на енергията от възобновяеми източници в енергийния микс, съгласно целите на ЕС за чиста енергия до 2050 г. по устойчив, икономически ефективен и надежден начин.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗА СЪХРАНЕНИЕ НА ЕНЕРГИЯ И ВИДОВЕ СЪХРАНЕНИЕ НА ЕНЕРГИЯ

Общ преглед на енергийното съхранение

Вид технология	Описание	Пример
Електрохимична	Преобразува химическата енергия, съдържаща се в активните материали, в електрическа чрез електрохимична обратна реакция на окисление-редукция.	Литиево-йонни батерии, проточни ванадиеви батерии, натриево-серни батерии.
Механична	Използва кинетични или гравитационни сили за	Маховици, помпено съхранение на

	съхраняване на вложената енергия.	хидроенергия, съхранение на енергия чрез сгъстен въздух.
Топлинна	Съхранява излишната топлинна енергия (може да бъде за отопление или охлаждане). В приложенията на енергийните системи топлината се преобразува в електроенергия.	Съхранение на чувствителна топлина (разтопена сол), съхранение на латентна топлина (съхранение на лед), съхранение на слънчева енергия.

Електрохимични системи за съхранение на енергия. Универсални компоненти на батерийните системи за съхранение на енергия.

Батерия

- Състои се от клетките, в които протичат електрохимични реакции за зареждане или разреждане на енергия.

Система за управление на батериите (BMS)

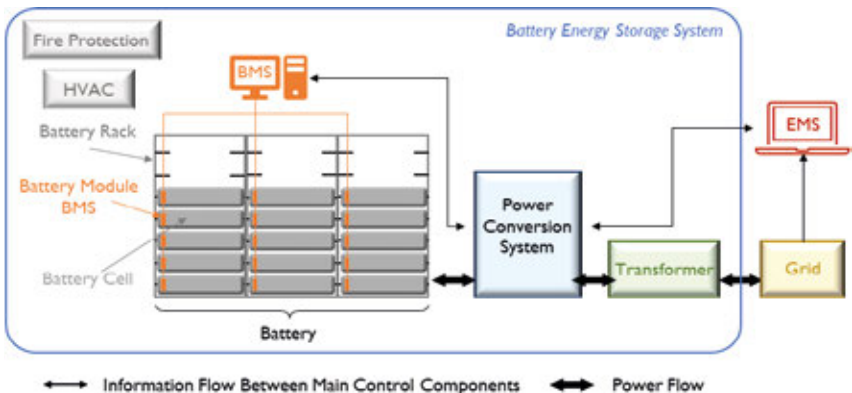
- Осигурява работата на батерията в рамките на диапазона за състоянието на заряд, напрежение, ток и температура; и
- Следи електрическите параметри, нивата на електролита, температурата на вътрешните клетки и температурата на околната среда в корпуса на батерията и балансира (активно или в пасивен режим) състояние на заряд на батерията, за да поддържа жизнения цикъл.

Система за преобразуване на енергия (PCS)

- Свързва батерията с енергийната система чрез двупосочен преобразувател AC-DC/DC-AC;
- Може да подава и абсорбира реална и реактивна енергия;
- Трябва да осигурява стабилен синусоидален изход, да се синхронизира с мрежата и да се изключва при извънредни ситуации; и
- Може да бъде следваща или формираща мрежата.

Системи за управление на енергия (EMS)

- Управява контрола и координацията на дейностите по разпределение на батерийната система за съхранение на енергията (разреждане и зареждане).



Фиг. 1. Батерийна система за съхранение на електрическа енергия

Различни видове електрохимични системи за съхранение на енергия

Технология	Ефективност на преобразуване на енергията AC-to-AC (%)	Плътност на енергията (Wh/L)	Плътност на мощността (Wh/L)	Работна температура (°C)	Жизнен цикъл (80% дълбочина на разреждане)	Саморазряд (%/месец)	Общ и разходи за проекта 2018 - 2025 (\$/kWh)
Li-ion	80-90	210-325	4000-6500	-40-65	3500	0,1-0,36	469-362
NaS	77-80	150-240	120-160	300-350	4000	0,05-1	907-669
Оловно-киселинини	75-85	30-50	30-50	18-45	900	0,1-0,4	549-464

Редокс проточни	65-70	10-50	0,5-2	5-45	1000 0	0,1	858- 650
-----------------	-------	-------	-------	------	-----------	-----	-------------

Литиево-йонните и проточните батерии доминират в енергийните системи и съвременните приложения на батерийните системи за съхранение на електрическа енергия.

1. Литиево - йонни батерии

Предимства	Недостатъци
Изискват минимална поддръжка;	Разпад при високи и при ниски температури;
По-висока ефективност (~85%)	Регламенти за транспортиране и превоз
Възможност за високоскоростно разреждане;	Риск от пожар
Разполагат с редица химически конфигурации, които отговарят на различни изисквания;	Изхвърляне на опасни материали по време на извеждането от експлоатация.
Съставляват > 90 % от световния пазар на БССЕ за комунални цели.	

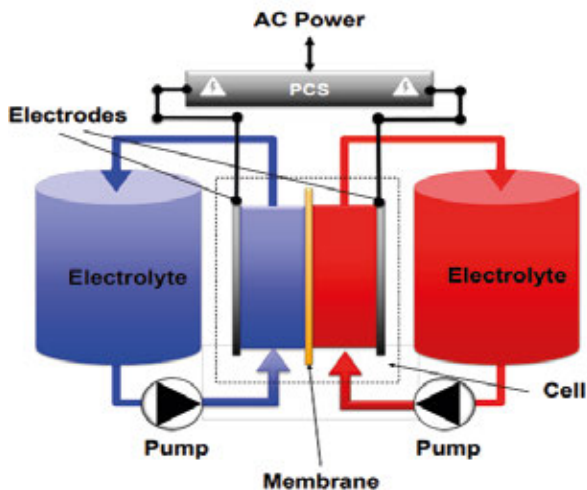
Литиево-йонните батерии имат няколко вида химически състав и всеки състав има различни показатели за ефективност.

- Литиево-никелово-манганово-кобалтова (NMC) – широко използвана за стационарни приложения поради високата си плътност на мощността, сравнителните разходи и продължителността на цикъла;
- Литиево-желязо-фосфатна (LFP) – по-ниска плътност на енергията от NMC; въпреки това има намален риск от пожар (т.е. добра топлинна стабилност), висок номинален ток, дълъг жизнен цикъл и повишена безопасност; и
- Литиево-никелово-кобалтово-алуминиева (NCA) – по-висока плътност на мощността от NMC, но подобна плътност на енергията; въпреки по-ниската си цена, тя има

недостатъци, тъй като при работа с по-високо напрежение води до по-бърза деградация и по-ниска производителност от NMC.

Технология	Плътност на енергията (Wh/L)	Плътност на мощността (Wh/L)	Работна температура в Целзий (°C)	Жизнен цикъл (80% дълбочина на разреждане)	Саморазряд (%/ден)	Разходи за енергийна инсталация (\$/kWh)
NMC	325	6500	-20-+55	~1200	1%	245-470
LFP	220-250	4500	-20-+60	~2000	<1%	245-574
NCA	210-600	4000 – 5000	-20-+60	>1000	2% - 10%	245-350

2. Проточни електрохимични системи за съхранение



Фиг. 2

Два вида: редокс проточни батерии и хибридни проточни батерии. Те са по-рядко срещани поради по-високите им първоначални разходи и ранния етап на търговско развитие. Въпреки слабото си присъствие на пазара в момента, експертите смятат, че проточните батерии са обещаваща технология поради лесно мащабируемата си енергийна плътност.

Предимства	Недостатъци
Възможност за работа при температура, близка до тази на околната среда;	По-високи разходи за ремонт и поддръжка;
Независимо мащабиране на енергията и мощността	По-ниска ефективност и енергийна плътност
Продължителност на жизнения цикъл над 10 000 пълни цикъла	Несигурна работа поради потенциално изтичане на киселинни разтвори
Евтини суровини	По-голям физически размер
Дълбоко разреждане, без това да се отразява на общия жизнен цикъл	
Минимални изисквания за безопасност.	

Сравнение на проточните батерии:

Ванадий редокс проточни батерии	Цинк-бромна проточна батерия (ZBFB)
<ul style="list-style-type: none"> • Понастоящем доминира на пазара на проточни батерии и е най-изследваният комерсиализиран вид проточна батерия; • Активните елементи поддържат течно състояние, а батерията съхранява активните елементи в отделни клетки; • Предимствата включват неограничен брой цикли, дълъг живот, голяма продължителност, повишена безопасност и гъвкав дизайн в 	<ul style="list-style-type: none"> • Хибридна система, която съдържа един разтвор на електролит в течно състояние и един компонент, отложен върху твърда повърхност; • Възможност за гъвкаво проектиране според нуждите на приложението; • Предимствата включват сравнително ниски разходи, висока енергийна плътност и високи възможности за дълбочина на разреждане; и

зависимост от нуждите на приложението; и	<ul style="list-style-type: none"> • Недостатъците включват ниска енергийна ефективност и продължителност на цикъла, помощни системи за циркулация и контрол на температурата, висока степен на саморазряд и корозионни свойства.
<ul style="list-style-type: none"> • Недостатъците включват сравнително висока цена и ниска енергийна плътност. 	

Технология	Ефективност на преобразуване на енергията AC-to-AC (%)	Плътност на енергията (Wh/L)	Диапазони на капацитет на проекта (MW)	Жизнен цикъл (80%, дълбочина на разреждане) (80% , DoD)	Продължителност на живота (години)	Общи разходи за проекта 2018 - 2025 (\$/kWh)
Ванадий редокс	55-75%	50-70	50 kW-500 MW	~10 000	>20	858-650
ZBFB	75%	90-150	300 kW to 5 MW	~1 500	10-20	551-433

Механични системи за съхранение на енергия. Съхранение на енергия под формата на компресиран въздух

Инсталациите със състен въздух (compressed-air energy storage - CAES) са алтернативен метод за съхранение на излишната електроенергия от фотоволтаични и други ВЕИ системи. Използваната за състения въздух енергия в следствие се възвръща чрез турбини, задвижвани при изпускането на въздуха. Обикновено компресираният въздух се съхранява под земята и нуждата от локация с подземен резервоар е основната причина технологията да не е широко разпространена. Някои компании вече предлагат ефективен начин за съхраняване на състения въздух и в надземни резервоари. Друга нова разработка включва замяната на турбините с бутала за генериране на енергия от състения въздух. Буталата могат да работят при по-широки граници като параметри и поради това въздухът може да бъде съгъстен повече и, съответно, така може да се съхранява повече енергия, твърдят иноваторите. Също така буталата могат да работят, когато налягането в резервоара вече е паднало под

необходимото за задвижване на турбината при конвенционалните системи.

- Ефективност на преобразуване на енергията AC-to-AC между 40- 70%;
- Продължителност на живота между 20 и 40 години;
- Голям диапазон на номиналната мощност и времето за разреждане при съхранение;
- Сравнително ниска цена;
- Зряла концепция, ограничено търговско приложение;
- Изисква специфични геоложки формации за изграждане под земята, което ограничава потенциалните местоположения; и
- Необходимост от допълнително (изкопаемо) гориво за подгриване.

Топлинни системи за съхранение на електрическа енергия: Помпена система за съхранение на топлинна енергия (PTES)

PTES е решение за дълготрайно съхранение на енергия, което използва термодинамични цикли за преобразуване на енергията в електричество и топлина и може да работи както в режим на зареждане, така и в режим на генериране, като използва усъвършенствана технология за топлина от свръхкритичен въглероден диоксид (CO₂).

- Сравнително ниски усреднени разходи за съхранение (LCOS);
- Липса на географски зависимости, за разлика от ПАВЕЦ;
- Разчита на изцяло вътрешна верига за доставки;
- Възможност за осигуряване на мрежова инерция и други спомагателни услуги;
- Продължителност на съхранението от няколко часа, която е между продължителността на литиево-йонните системи и ПАВЕЦ и запълва празнината за средносрочно съхранение на енергия; и
- Голям технически живот и лесно извеждане от експлоатация в края на експлоатационния период.

Сравнение на съоръженията за съхранение на електрическа енергия. Технически спецификации за съхранение на енергия

Категория	Технология	Етап на разработване за приложение в мрежата за комунални услуги	Типична продължителност на разреждане при номинален капацитет на захранване	Време за реакция	Ефективност на преобразуване на енергията в АС *	Живот
Електрохимични (батерии)	Литиево-йонни	Широко комерсиализирани	0,3 – 8 часа	20 мс – с	86-88%	10 год.
	Оловно-киселинни	Широко комерсиализирани	1 – 1,6 часа	5 мс – с	79-85%	12 год.
	Проточни	Първоначална комерсиализация	0,3 – 20 часа	Подсекунда до секунди	65%– 70%	15 год.
	Натриево-серни	Първоначална комерсиализация	1 – 7 часа	1 мс – сек	77%– 83%	15 год.
Механична	ПАВЕЦ	Широко комерсиализирани	1 ч – 40 дни	Сек – 2 мин (зависи от избора на технология)	80%	40 год.
	Маховици	Широко комерсиализирани	0,3 – 1 часа	4 мс – 1 с	86%– 96%	20 год.
	CAES	Първоначална комерсиализация	0,5 – 26 часа	1 мин – 15 мин	52%	30 год.
Топлинна	Съхранение на топлинна енергия	Първоначална комерсиализация	2 – 48 часа	Няколко минути	90%	30 год.

Оперативни и капиталови разходи (OPEX и CAPEX)

Технология	Типичен OPEX (€/kW)	Типичен CAPEX (€/kW)	Прогнозен CAPEX към 2030 г. (€/kWh)
Li-Ion	1 – 2% от разходите	362 - 858	240
NaS	6,5 – 11,5	80 – 450	80-450
Оловно-киселинни	1 – 2,5% от проектните разходи	1000	800
Редокс проточни (ванадий)	1 – 2% от проектните разходи	300 – 464	100 – 400
ПАВЕЦ*	28	470	470
Адиабатни CAES	10 – 15	450	450

*За по-стари технологии за ПАВЕЦ; диапазонът на разходите за този вид технологии също затруднява сравнението.

Услуги в подкрепа на преносната инфраструктура

Технология	Отлагане на инвестициите в пренос	Стабилност на ъгловата скорост	Подкрепа за преноса
Li-Ion	X	X	X
NaS	X	X	X
Оловно-киселинни	X	X	X
Редокс проточни	X		X
ПАВЕЦ	X	X	X
Адиабатни CAES	X		X

Услуги в подкрепа на разпределителната инфраструктура

Технология	Отлагане на осъвременяването на разпределението	Динамичен контрол на локалното напрежение	Компенсация на реактивната мощност	Поддръжка на мрежата при непредвидени обстоятелства	Преднамерено изключване на мрежата
Li-Ion	X	X	X	X	X
NaS	X	X	X	X	X
Оловно-киселинни	X	X	X	X	X
Редокс проточни	X	X	X	X	X
ПАВЕЦ		X	X	X	
Адиабатни CAES		X			

Спомагателни услуги

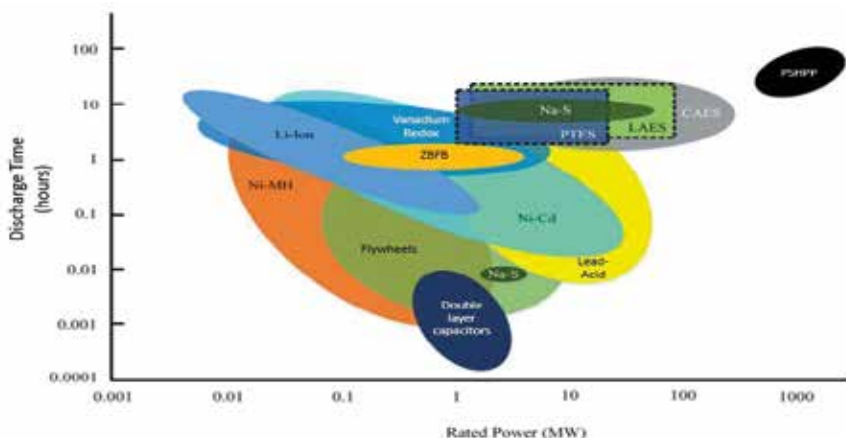
Технология	Резерви за първично регулиране на честотата (РПРЧ)	Автоматичен резерв за вторично регулиране на честотата (аРВРЧ)	Ръчен резерв за вторично регулиране на честотата (рРВРЧ)	Минутен резерв (MP)	Следене на натоварването	Пускане без външно захранване	Поддържане на напрежението
Li-Ion	X	X	X	X	X	X	X
NaS	X	X	X	X	X	X	X
Оловно-киселинни	X	X	X	X	X	X	X
Редокс проточни	X	X	X	X	X	X	X
ПАВЕЦ	X	X	X	X	X	X	X
Адиабатни CAES	X	X	X	X	X	X	

Сравнение на технологиите за съхранение на електрическа енергия

ПАВЕЦ предлага висока мощност и голяма продължителност, докато литиево-йонните БССЕ и РТЕS се позиционират в различни сегменти в диапазона на средната мощност и средното време на разреждане;

ПАВЕЦ и литиево-йонната батерия се допълват взаимно - разходите и ефективността на двете технологии трябва да се разглеждат заедно, а не като конкуренти.

Тъй като производството и динамиката на системата се променят с интегрирането на нови непостоянни ресурси от ВЕИ, следва да се проучат варианти на ССЕС със средно време на разряд и средна мощност, тъй като те осигуряват по-голяма гъвкавост при работата на системата.



Фиг. 3. Сравнение на случаите на използване на ESS технологията

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всяка нова технология има свои съществени характеристики и ограничения, дори когато основната ѝ цел е да преосмисли или регенерира съществуващата система. Няколко параметъра са критични за разбирането на инвестициите в ССЕС. Това включва капацитет за съхранение, както и диапазон на изходна мощност. Капацитетът за съхранение на енергия е количеството заряд или енергия, което устройството за съхранение на енергия може да

достави при едно разреждане. Освен това продължителността на живота е важен фактор, както и енергийната ефективност, която може да бъде определена по различни начини в зависимост от техниката на съхранение. Времето за изплащане, надеждността и продължителността на живота на активите остават важни показатели, които инвеститорите трябва да вземат предвид. Постоянното развитие на съоръженията за съхранение не позволява да се прогнозира кое от тях ще се наложи в дългосрочен план, но за момента основни претенденти за челното място са батериите.

ЛИТЕРАТУРА

1. NREL, *Utility-Scale Vanadium Redox Flow Battery for Distribution Grid Support: System Dynamics and Efficiencies*, 2019, <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/74248.pdf>
2. DOE <https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower>
3. Pacific Northwest National Laboratory <https://caes.pnnl.gov/>
4. “Westinghouse Expands Global Energy Storage Technology,” *BusinessWire*, May 5, 2022, <https://www.businesswire.com/news/home/20220505006134/en/Westinghouse-Expands-Global-Energy-Storage-Technology>.
5. Simply the БССЕ: The Role of Software Technology in БССЕ Integration, <https://www.copadata.com>

АВТОРИ

маг. инж. Антоанета Календерова – Директор “Стратегическо планиране и развитие на мрежата“ ЕРМ Запад ЕАД
д-р инж. Ясен Тодоров – Директор “Управление на мрежата“ ЕРМ Запад ЕАД