خرداد

۱۳۹۵

وزارت نیرو – معاونت امور برق و انرژی - دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی - گروه توسعهٔ فناوری های نوین برق و انرژی

سیستم های ذخیره ساز انرژی برای کاربرد در بخش برق

اختصارات

ATES : Aquifer thermal energy storage
BTES : Borehole thermal energy storage
CAES : Compressed air energy storage
EIA : Energy Information Administration
ECES : Energy Conservation through Energy Storage
EV : Electric vehicle
ETP : Energy Technology Perspectives
EDLC : Electricdouble layer capacitor
ERCOT : Electric Reliability Council of Texas
ETS : Electric Thermal Storage
HSS : Hydrogen Storage System
LCOE : Levellised cost of energy
NDRC : National Development and Reform Commission
NETL : National Energy Technology Laboratory
NREL : National Renewable Energy Laboratories
PCS : Power Conditioning System
PSH : Pumped storage
PUCT : Public Utility Commission of Texas
PCM : Phase-change material
RD&D : Research, development and demonstration
REEs : Rare earth elements
RE Futures : Renewable Electricity Futures Study
SMES : Superconducting magnetic energy storage
SCPC : Supercritical pulverized coal
SGERI : State Grid's Energy Research Institute
T&D : Transmission and distribution
TES : Thermal energy storage
UHV : Ultra High Voltage
UTES : Underground thermal energy storage (ذخیره سازی انرژی حرارتی زیرزمینی)
TEES : high temperature thermoelectric energy storage systems

فهرست مطالب

مقدمه ۵
ظرفیت نصب شده در جهان ۶
کاربردهای ذخیره سازهای انرژی ۸
طبقه بندی ذخیره سازهای انرژی ۱۷
انواع فناوری های ذخیره ساز در زنجیره عرضه تا مصرف انرژی الکتریکی ۱۹
فناوری های ذخیره ساز به روش الکتریکی ۲۲
ذخیره ساز ابر خازن ۲۲
ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانا ۲۷
روش ذخیره سازی مکانیکی ۳۲
تلمبه ذخیره ای ۳۲
ذخیره سازی هوای فشرده ۳۶
ذخیره ساز چرخ طیار ۳۹
روش ذخیره سازی حرارتی ۴۷
سیستم های ذخیره سازی انرژی حرارتی دما بالا ۴۷
سیستم های ذخیره سازی انرژی حرارتی محسوس ۴۸
سیستم های ذخیره سازی انرژی حرارتی ناپیدا ۵۱
روش ذخیره سازی شیمیایی ۵۲
سیستم های ذخیره سازهای شیمیایی با ذخیره سازی داخلی ۵۲
سیستم های ذخیره سازهای شیمیایی با ذخیره سازی خارجی ۵۸
وضعیت فناوری های ذخیره ساز انرژی ۶۸
هزینه های ذخیره سازها ۷۰
معیارهای تعیین فناوری های مناسب ذخیره سازی انرژی ۷۲

مراجع ٧٥
فهرست شکل ها ٧٦
فهرست جداول ٧٨

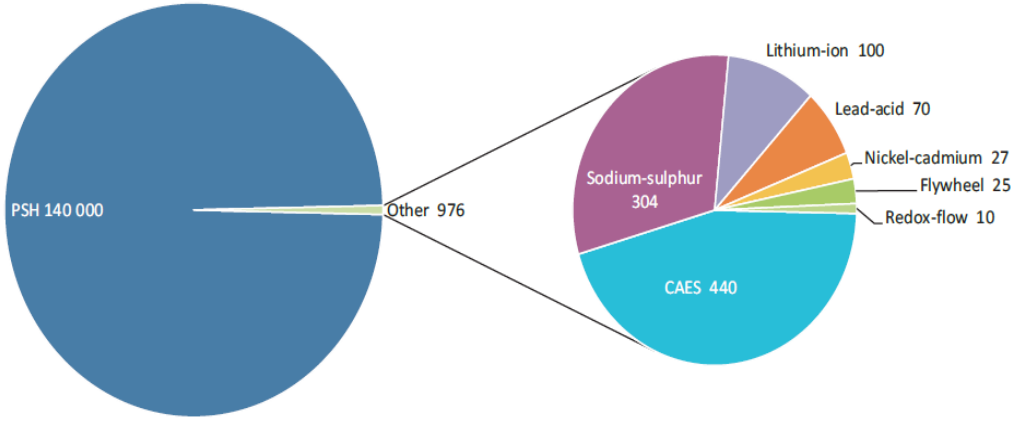
مقدمه

یکی از مسائلی که امروزه در سیستم های قدرت به ویژه شبکه قدرت ایران بسیار مورد توجه برنامه ریزان و بهره برداران سیستم قرار دارد، تغییرات زیاد و عدم یکنواخت بودن منحنی بار در ساعات مختلف شبانه روز است. این موضوع باعث شده است تا فقط در ساعات پیک بار از تمامی ظرفیت نصب شده تولید کشور استفاده شود و در ساعات کم باری و میان باری مقدار زیادی از ظرفیت نصب شده خارج از مدار باشد که این مطلب به معنای خواب سرمایه است. این مشکل کمابیش در شبکه های قدرت دنیا که دارای منحنی های بار با تغییرات زیاد هستند مشاهده می شود. این موضوع محققان را برآن داشته است تا با نگاهی به تجربیات بشر و پیش زمینه ذخیره سازی از دیرباز، در اندیشه ذخیره کردن انرژی الکتریکی باشند. از آنجا که هزینه تولید برق و قیمت فروش آن در ساعات مختلف شبانه روز با توجه به راه افتادن بازار برق، تفاوت های چشمگیری دارد، بنابراین ایده ذخیره سازی برق در ساعات غیر پیک (برق ارزان) و استفاده از آن در ساعات پیک (برق گران) مطرح شد. سیستم های ذخیره ساز انرژی به عنوان یک راه حل برای چالش فوق از طریق تسهیل در افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر، تسطیح منحنی بار، کمک به کنترل فرکانس، به تعویق انداختن توسعه خطوط انتقال، کاهش نوسانات ولتاژ، افزایش کیفیت توان و قابلیت اطمینان می باشند. انواع سیستم ها ی ذخیره ساز انرژی که در ادامه به تفصیل به آن ها می پردازیم عبارتند از: ذخیره ساز هوای فشرده، ذخیره سازی چرخ طیار(فلایویل)، ذخیره ساز حرارتی، ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانا و ذخیره ساز ابرخازن.

ظرفیت نصب شده در جهان

در حال حاضر حداقل ۱٤۰ گیگاوات (GW) ذخیره سازی انرژی در مقیاس بزرگ در شبکه های برق سراسر جهان نصب شده است. اکثریت قریب به اتفاق (۹۹٪) این ظرفیت شامل فناوری های تلمبه ذخیره ای(PSH) است. ۱٪ دیگر شامل ترکیبی از فناوری های باطری، ذخیره ساز هوای فشرده (CAES)، چرخ طیاره(flywheels) و ذخیره ساز هیدروژن می باشد.

شکل ۱: ظرفیت ذخیره ساز الکتریکی متصل به شبکه که در جهان نصب شده است (MW)[۱]



بیشترین تکولوژی از نوع ذخیره ساز انرژی حرارتی، که امروزه در جهان نصب شده است، مخازن آب گرم منازل است. دیگر تکنولوژی ها از قبیل ذخیره سازی یخ و آب سرد در چند کشور استرالیا، ایالات متحده آمریکا، چین و ژاپن نقش مهمی را در پیک سایی و کاهش صورتحساب برق مشترکین برق ایفا نموده است. سیستم های ذخیره ساز انرژی حرارتی زیرزمینی(UTES) به وفوردر کانادا، آلمان و دیگر کشورهای اروپایی یافت می شوند.

جدول ۱ : برخی از فناوری های ذخیره ساز انرژی و نمونه پروژه های مربوطه[۱]

فناوری	محل	خروجی	راندمان (٪)	هزینه سرمایه گذاری اولیه (USD/kW)	کاربرد اولیه	نمونه پروژه
PSH	Supply	Electricity	50 - 85	500 - 4600	Long-term storage	**Goldisthal Project (Germany), Okinawa Yanbaru Seawater PSH Facility (Japan), Pedreira PSH Station (Brazil)**
UTES	Supply	Thermal	50 - 90	3400 - 4500	Long-term storage	**Drake Landing Solar Community (Canada), Akershus University Hospital and Nydalen Industrial Park (Norway)**
CAES	Supply	Electricity	27-70	500-5001	Long-term storage, arbitrage	**McIntosh (Alabama, United States), Huntorf (Germany)**
Pit storage	Supply	Thermal	50 - 90	100 - 300	Medium temperature applications	**Marstal district heating system (Denmark)**
Molten salts	Supply	Thermal	40 - 93	400 - 700	High-temperature applications	**Gemasolar CSP Plant (Spain)**
Thermochemical	Supply, demand	Thermal	80 - 99	1000 - 3000	Low,medium & high-temp applications	**TCS for Concentrated Solar Power Plants (R&D)**
Chemical-hydrogen storage	Supply, demand	Electricity	22 - 50	500 - 750	Long-term storage	**Utsira Hydrogen Project (Norway), Energy Complementary Systems H2Herten (Germany)**
Flywheels	T&D	Electricity	90 - 95	130 - 500	Short-term storage	**PJM Project (United States)**
Supercapacitors	T&D	Electricity	90 - 95	130 - 515	Short-term storage	**Hybrid electric vehicles (R&D phase)**
Superconductin magnetic energy storage (SMES)	T&D	Electricity	90 - 95	130 - 515	Short-term storage	**D-SMES (United States)**
Solid media storage	Demand	Thermal	50 - 90	500 - 3000	Medium temperature applications	**Residential electric thermal storage (USA)**
Ice storage	Demand	Thermal	75 - 90	6000 - 15000	Low-temp applications	**Denki University (Tokyo, Japan) , China Pavilion project (China)**
Hot water storage (residential)	Demand	Thermal	50 - 90	**	Medium temp.applications	**Peak demand reduction (France), TCES (United States)**
Cold-water storage	Demand	Thermal	50 - 90	300 - 600	Low-temp applications	**Shanghai Pudong International Airport (China)**

Batteries	Supply, demand	Electricity	75 - 95	300 - 3500	Distributed/ off-grid storage, short-term storage	**NaS batteries (Presidio, Texas, United States and Rokkasho Futamata Project, Japan), Vanadium redox flow (Sumimtomo's Densetsu Office, Japan), Lead-acid (Notrees Wind Storage Demonstration Project, United States), Li-ion (AES Laurel Mountain, United States), Lithium Polymer (Autolib, France)**

کاربردهای ذخیره سازهای انرژی

ارزش فن آوری ذخیره سازی انرژی به خدماتی است که در مکان های مختلف سیستم انرژی ارائه می دهند. این تکنولوژی ها می توانند در سراسر شبکه برق، در مجموعه های گرمایش و سرمایش و نیز سیستم های توزیع و کاربردهای خارج از شبکه برق استفاده شوند. از این گذشته آنها می توانند خدمات پشتیبانی زیربنایی را در سراسر بخش های عرضه، انتقال و توزیع، و مصرف سیستم انرژی ارایه دهند.

تکنولوژی های ذخیره سازی انرژی الکتریکی در مقیاس بزرگ کاربردهای زیادی دارند. این کاربردها طیف وسیعی شامل کیفیت توان سریع برای بهبود قابلیت اطمینان تا کاربردهای مدیریت انرژی بلند مدت به منظور بهبود بهره وری را شامل می شوند.

در جدول ۲ کاربرد فناوری های پیشرفته ذخیره ساز مانندCAES، پمپ های آبی، چرخ لنگر ها، باطری اسید سرب(Lead Acid)پیشرفته،NaS، باطریLi-ion، باطری های جریانی به تفکیک ارائه شده است.

جدول ۲: کاربرد فناوری های پیشرفته به تفکیک[۵]

کاربرد	توضیحات	CAES	پمپ های آبی	چرخ لنگر ها	باطری Lead Acid پیشرفته	باطری NaS	باطری Li-ion	باطری های جریان
انتقال زمانی متناوب پیک و غیر پیک	شارژ درغیر پیک تجدید پذیر و یامنابع انرژی با دسترسی متناوب، تخلیه انرژی به شبکه در پیک							
هموار کردن انرژی متناوب در پیک	شارژ / تخلیه ثانیه تا چند دقیقه برای صاف کردن تولید متناوب و یا شارژ / تخلیه دقیقه به ساعت برای شکل دادن به مولفه های (profile)انرژی							
تامین خدمات جانبی	ارائه خدمات جانبی در بازار روز انه و پاسخ در زمان واقعی به سیگنالینگ ISO							
تامین راه اندازی مجدد	زمانی ظرفیت شروع سیاه مورد نیاز است که واحد کاملا شارژ تخلیه شود							
ساختار انتقال	استفاده از ذخیره ساز برای به تعویق انداختن ارتقاءسیتم انتقال							
ساختار توزیع	استفاده از ذخیره ساز برای به تعویق انداختن ارتقاءسیتم توزیع							
کاستن سطح قطعی توزیع قابل انتقال[1]	استفاده از یک واحد ذخیره سازی قابل انتقال به منظور تامین قدرت مکمل برای مصرف کنندهٔ نهایی در هنگام قطع در وضعیت اضافه بار کوتاه مدت							

[1] **Transportable distribution level outage mitigation**

کاربرد	توضیحات	CAES	پمپ های آبی	چرخ لنگر ها	باطری Lead Acid پیشرفته	باطری NaS	باطری Li-ion	باطری های جریان
انتقال بار پیک با پایین دست سیستم توزیع	شارژ در زمان غیر پیک پایین دست سیستم توزیع (زیر ترانسفورماتور ثانویه)؛تخلیه در ۲-۴ ساعت در پیک روزانه	○	○	○	●	●	●	●
یک پارچه سازی تولید توزیع شدهٔ متناوب	شارژ و تخلیهٔ دستگاه برای برقراری توازن مصرف محلی انرژی و تولید ارتقاء ساختار توزیع با قرار گرفتن دستگاه بین انرژی تولید و توزیع شده و شبکهٔ توزیع، به تعویق می افتد	○	○	○	●	◐	◐	◐
بهینه سازی نرخ زمان مصرف مصرف کنندهٔ نهایی	شارژ دستگاه زمانی که قیمت خرده فروشی TOU کم است و تخلیه زمانی که قیمت بالا هستند	◐	◐	○	◐	◐	◐	◐
منبع تغذیه اضطراری	ذخیره سازی برای بهبود کیفیت توان توسط مصرف کنندهٔ نهایی یا ارائه انرژی ذخیره شده در زمان قطع برق	○	○	◐	●	●	●	●
تشکیل ریز شبکه	ذخیره سازها با ترکیب تولید کنندگان محلی جداگانه و شبکه تشکیل جزیره های ریز شبکه را می دهند	○	○	○	●	●	●	●

● مناسب برای استفاده ○ نامناسب برای استفاده ◐ احتمالا قابل استفاده

برای کاربردهای توان بالا همانند کیفیت توان و منبع قدرت اضطراری نیاز به تخلیه انرژی در کسری از ثانیه و برای کاربردهای ثبات شبکه های قدرت همانند ذخیره گردان نیاز به تخلیه انرژی در حد دقیقه می باشد. برای کاربردهای انرژی بالا همانند مدیریت انرژی شامل تسطیح منحنی بار، پیک سایی، وآربیتراژ[۲]، نیاز به تخلیه انرژی در حدود ساعت است.

کاربردهای کلیدی ذخیره سازها را به صورت زیر می توان دسته بندی نمود.

- **ذخیره ساز فصلی (Seasonal storage)**

توانایی ذخیره انرژی برای مدت زمان روز، هفته، ماه برای جبران نقصان در عرضه طولانی مدت برق و یا تغییر پذیری فصلی در سمت عرضه و تقاضا سیستم انرژی (به عنوان مثال ذخیره سازی گرما در تابستان برای استفاده در زمستان از طریق سیستم های ذخیره سازی انرژی حرارتی زیرزمینی).

- **تجارت انرژی / آربیتراژ (Arbitrage/Storage trades)**

در این حالت انرژی ارزان در طول دوره ای که تقاضا کم است ذخیره و سپس در زمانی که تقاضای برق بالا است به فروش می رسد. بطور کلی اشاره به این نوع از تجارت انرژی بین دو بازار انرژی گفته می شود.

- **تنظیم فرکانس (Frequency regulation)**

تنظیم فرکانس، متعادل سازی مداوم جابجایی عرضه و تقاضا تحت شرایط عادی است که به طور خودکار متناوباً در بازه های زمانی دقیقه به دقیقه یا حتی کوتاه تر انجام می شود.

[۲] به کسب سود از طریق اختلاف قیمت در دو بازار مختلف آربیتراژ می‌گویند. این اختلاف می‌تواند از لحاظ زمانی باشد مثل بازار نقد و آتی، و هم از نظر مکانی مثل تفاوت نرخ در دو بازار در مکان‌های جغرافیایی متفاوت باشد.

- **پخش بار (Load following)**

پخش بار شبکه دومین راهکاری است که بطور مداوم برای متعادل سازی برق در شرایط عادی بهره برداری مورد استفاده قرار می گیرد. پخش کردن بار، مدیریت نوسانات سیستم در یک چارچوب زمانی از ۱۵ دقیقه تا ۲٤ ساعت است و از طریق کنترل خودکار و یا دستی تولید انجام شود.

- **پشتیبانی ولتاژ (Voltage support)**

پشتیبانی از ولتاژ، تزریق یا جذب توان راکتیو برای حفظ سطوح ولتاژ سیستم انتقال و توزیع در شرایط عادی است .

- **راه اندازی مجدد (Black start)**

در حالت های نادری که فروپاشی سیستم قدرت اتفاق می افتد و تمام راهکار های مد نظر راهگشا نیستند، قابلیت راه اندازی مجدد، این امکان را فراهم می نماید تا بدون استفاده از برق شبکه، منابع عرضه انرژی دوباره راه اندازی شوند.

- **تعویق سرمایه گذاری در زیرساخت انتقال و توزیع (deferral T&D infrastructure investment)**

فنآوری ذخیره سازی انرژی به منظور از بین بردن نقاط تراکم در انتقال و توزیع (T & D) و یا به تعویق انداختن نیاز به سرمایه گذاری بزرگ در زیرساخت های شبکه های انتقال و توزیع استفاده می شوند.

- **پیک سایی و جابجایی زمانی مصرف (Demand shifting and peak reduction)**

به منظور مطابقت تقاضا و عرضه برق و برای کمک به یکپارچه سازی منابع گوناگون عرضه، زمان تقاضای انرژی را می توان منتقل و جابجا نمود. این جابجایی با تغییر زمانی انجام فعالیت های خاص (به عنوان مثال گرمایش آب و یا فضا) تسهیل می شود.

- **خارج از شبکه (Off-grid)**

غالباً مصرف کنندگان انرژی خارج از شبکه، منابع فسیلی یا تجدید پذیر (انواع گوناگون انرژی های تجدیدپذیر) را برای گرما و الکتریسیته بکار می برند. برای افزایش قابلت اعتماد به عرضه های انرژی خارج از شبکه انرژی و حمایت از افزایش سطح استفاده منابع محلی، می توان برای پر کردن شکاف بین منابع عرضه متنوع و تقاضا از ذخیره سازی انرژی بهره گرفت. جایابی بهینه و همزمان واحدهای تولید پراکنده بادی و خورشیدی و ذخیره سازهای انرژی در سیستم های توزیع یکی از مهم ترین مباحث مرتبط با انرژی های تجدید پذیر است که در سالیان اخیر مورد توجه فراوانی قرار گرفته است.

- **یکپارچه سازی منابع عرضه متغیر (Variable supply resource integration)**

کاربرد یکپارچه سازی منابع عرضه متغیر، استفاده از ذخیره سازی انرژی برای تغییر و بهینه سازی خروجی از منابع عرضه متغیر (به عنوان مثال بادی و خورشیدی)، کاهش تغییرات خروجی سریع و فصلی، و فاصله جغرافیایی و زمانی بین هر دو عرضه و تقاضا به منظور افزایش کیفیت و مقدار عرضه است.

- **بهره برداری از اتلاف حرارت (Waste heat utilisation)**

استفاده از فنآوری ذخیره سازی انرژی برای جداسازی جغرافیایی تامین حرارت (به عنوان مثال بخش CHP، نیروگاه های حرارتی) و تقاضا (به عنوان مثال برای گرمایش یا سرمایش ساختمان ها) به منظور استفاده از حرارتی که قبلاً هدر رفته است.

- **تولید همزمان برق و حرارت (Combined heat and power)**

ذخیره سازی برق و انرژی حرارتی را می توان در تاسیسات که ترکیبی از برق و حرارت (CHP) می باشند به منظور برطرف کردن شکاف موقت بین تقاضا برق و حرارت به کار برد.

- **ذخیره غیر چرخان (Non-spinning reserve)**

ظرفیت ذخیره در تامین برق، به منظور جبران سریع و نگه داشتن تعادل سیستم در شرایط از دست رفتن غیر منتظره منابع تولید می باشد. این ظرفیت، با توجه به زمان پاسخ به عنوان چرخان (زمان پاسخ کمتر از ۱۵ دقیقه) و غیر چرخان (زمان پاسخ بیش از ۱۵ دقیقه) دسته بندی می گردند. به طور کلی زمان های پاسخ سریع تر برای سیستم های با ارزش تر می باشد. در برخی از مناطق ظرفیت ذخیره به عنوان "ذخیره مهار فرکانس" نیز نامیده می شود.

در ادامه برخی از کاربردهای فناوری ذخیره ساز انرژی در سیستم انرژی امروزی و مشخصات کلیدی آنها شامل نوع خروجی، مقیاس ذخیره ساز، مدت زمان تخلیه (دشارژ)، دوره و زمان پاسخ دهی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ : مشخصات کلیدی سیستم های ذخیره ساز برای کاربردهای خاص در سیستم انرژی امروزی[۱]

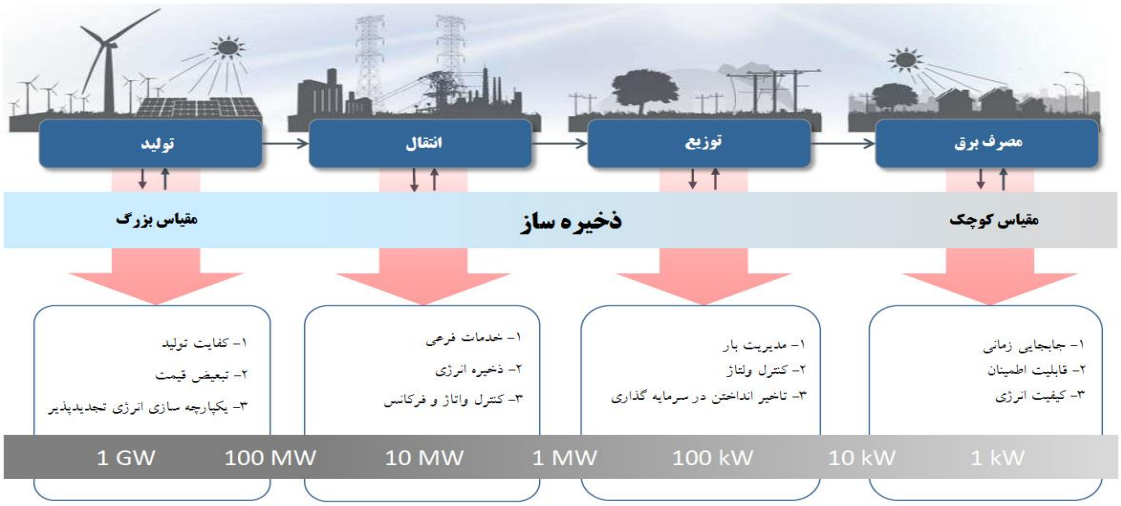
کاربرد	خروجی(برق، حرارت)	اندازه (MW)	مدت دشارژ	دوره (نوعی)	زمان پاسخ دهی
ذخیره ساز فصلی (Seasonal storage)	برق ، حرارت	۵۰۰ تا ۲۰۰۰	روز تا ماه ها	۱ تا ۵ بار در سال	روز
تجارت انرژی (Arbitrage)	برق	۱۰۰ تا ۲۰۰۰	۸ تا ۲٤ ساعت	۰,۲۵ تا ۱ بار در روز	بیشتر از ۱ ساعت
تنظیم فرکانس (Frequency regulation)	برق	۱ تا ۲۰۰۰	۱ تا ۱۵ دقیقه	۲۰ تا ٤۰ بار در روز	۱ دقیقه
پخش بار (Load following)	برق ، حرارت	۱ تا ۲۰۰۰	۱۵ دقیقه تا ۱ روز	۱ تا ۲۹ بار در روز	کمتر از ۱۵ دقیقه

کاربرد	خروجی(برق، حرارت)	اندازه (MW)	مدت دشارژ	دوره (نوعی)	زمان پاسخ دهی
پشتیبانی ولتاژ (Voltage support)	برق	۱ تا ٤٠	۱ ثانیه تا ۱ دقیقه	۱۰ تا ۱۰۰ بار در روز	میلی ثانیه تا ثانیه
راه اندازی مجدد (Black start)	برق	۰,۱ تا ٤۰۰	۱ تا ٤ ساعت	کمتر از یک بار در روز	کمتر از ۱ ساعت
جلوگیری از تراکم انتقال و توزیع (congestion)	برق ، حرارت	۱۰ تا ۵۰۰	۲ تا ٤ ساعت	۰,۱٤ تا ۱,۲۵ بار در روز	بیشتر از یک ساعت
خارج از شبکه (Off-grid)	برق ، حرارت	۰,۰۱ تا ۰,۰۰۱	۳ تا ۵ ساعت	۰,۷۵ تا ۱,۵ بار در روز	کمتر از ۱ ساعت
تعویق سرمایه گذاری زیرساخت انتقال و توزیع (T&D infrastructure (investment deferral	برق ، حرارت	۱ تا ۵۰۰	۲ تا ۵ ساعت	۰,۷۵ تا ۱,۲۵ بار در روز	بیشتر از ۱ ساعت
پیک سایی و جابجایی زمانی مصرف (Demand shifting and (peak reduction	برق ، حرارت	۱ تا ۰,۰۰۱	دقیقه تا ساعت ها	۱ تا ۲۹ بار در روز	کمتر از ۱۵ دقیقه
یکپارچه سازی منابع عرضه متغیر(Variable supply (resource integration	برق ، حرارت	۱ تا ٤۰۰	۱ دقیقه تا ساعت ها	۰,۵ تا ۲ بار در روز	کمتر از ۱۵ دقیقه
بهره برداری از اتلاف حرارت (Waste heat utilisation)	حرارت	۱ تا ۱۰	۱ ساعت تا ۱ روز	۱ تا ۲۰ بار در روز	کمتر از ۱۰ دقیقه
ترکیب برق و حرارت (Combined heat and (power	حرارت	۱ تا ۵	دقیقه ها تا ساعت ها	۱ تا ۱۰ بار در روز	کمتر از ۱۵ دقیقه
ذخیره چرخان(Spinning (reserve	برق	۱۰ تا ۲۰۰۰	۱۵ دقیقه تا ۲ ساعت	۰,۵ تا ۲ بار در روز	کمتر از ۱۵ دقیقه
ذخیره غیر چرخان(-Non spinning (reserve	برق	۱۰ تا ۲۰۰۰	۱۵ دقیقه تا ۲ ساعت	۰,۵ تا ۲ بار در روز	کمتر از ۱۵ دقیقه

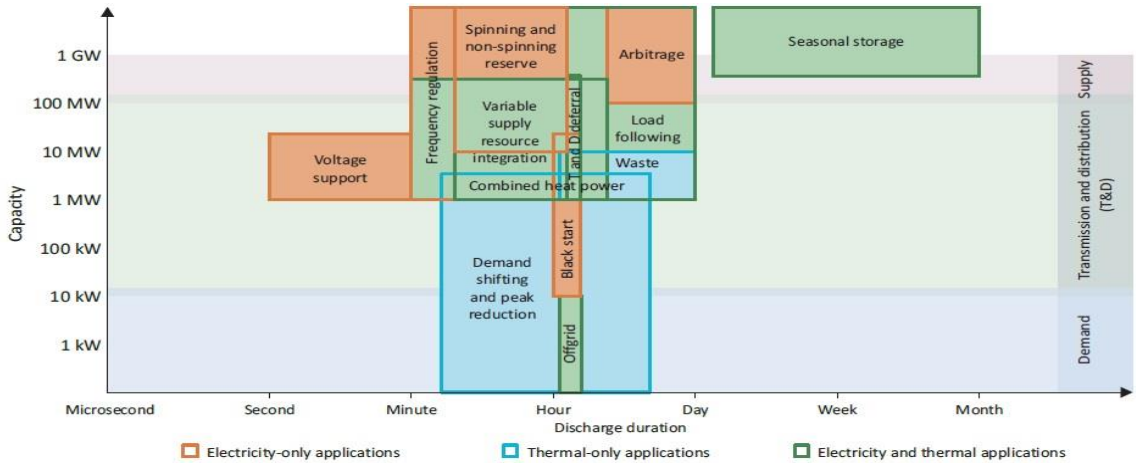
نکته حائزاهمیت در اینجا، تفاوت بین ذخیره سازها برای کاربردهای انرژی و برق است. در کاربردهای برقی دوره زمانی کوتاه مدت در حدود چند ثانیه تا چند دقیقه می باشد ولی در کاربردهای انرژی، دوره زمانی در حدود چند دقیقه تا چند ساعت می باشد.

در شکل های ۲و۳ به ترتیب کاربرد ذخیره سازهای متصل به شبکه درطول زنجیره ارزش برق و توان مورد نیاز و مدت زمان تخلیه برای برخی از کاربردها نشان داده شده است.

شکل ۲ : ذخیره سازی متصل به شبکه درطول زنجیره ارزش برق[۳]



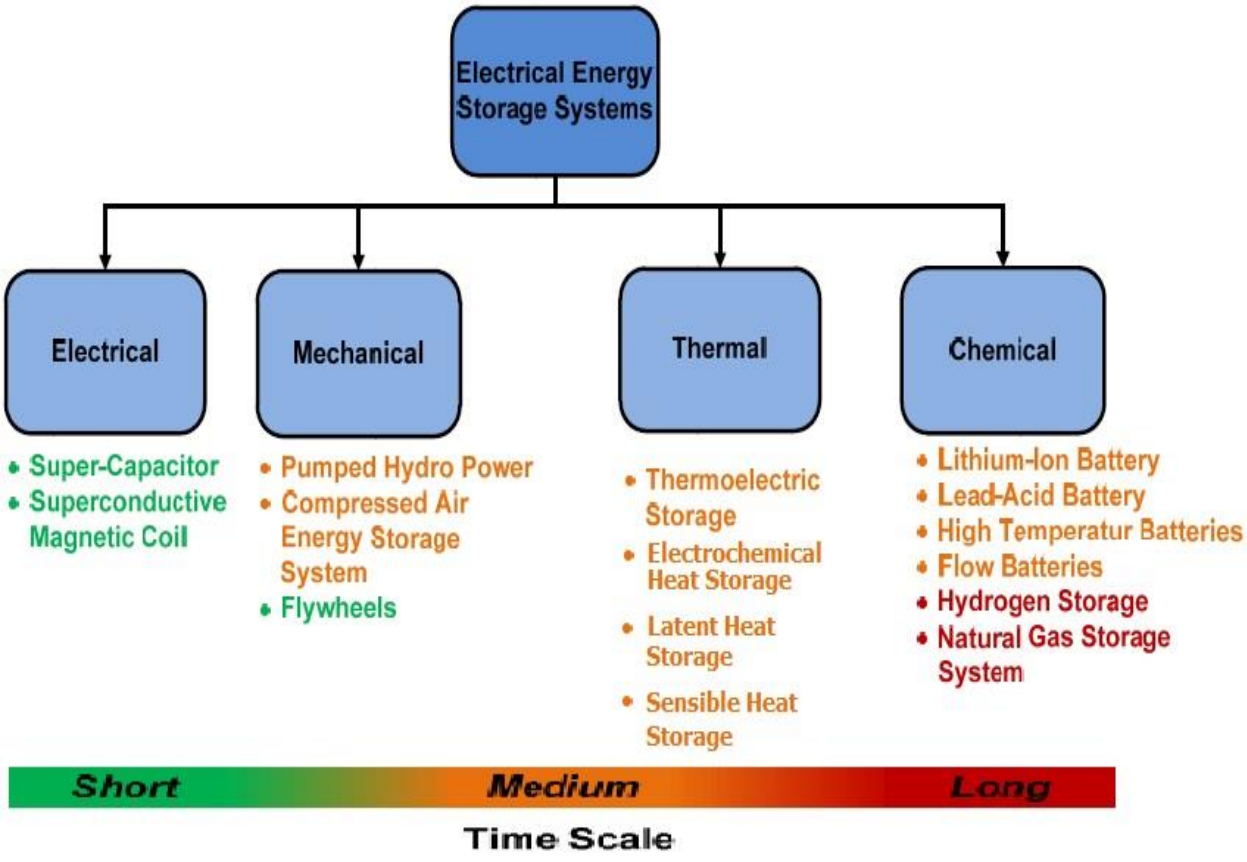
شکل ۳ : توان مورد نیاز و مدت زمان تخلیه برای برخی از کاربردها در سیستم انرژی امروزی[۱]



طبقه بندی ذخیره سازهای انرژی

مشکلات وسیع در ذخیره سازی برق موجب شکل دهی فناوری سیستم های قدرت به صورت امروزی شده است. روش های گوناگونی برای ذخیره سازی انرژی در ابعاد بزرگ وجود دارد. به هر حال هر نوع ذخیره سازی گران است و محاسبات اقتصادی را الزام آور می نماید. ذخیره سازی انرژی الکتریکی از طریق چهار روش شیمیایی، حرارتی، مکانیکی و الکتریکی انجام می شود. در شکل ٤ طبقه بندی روش ها و فناوری های مختص به هر روش مشاهده می شود.

شکل ٤ : طبقه بندی سیستم های ذخیره ساز انرژی (EES)[٤و١٦]



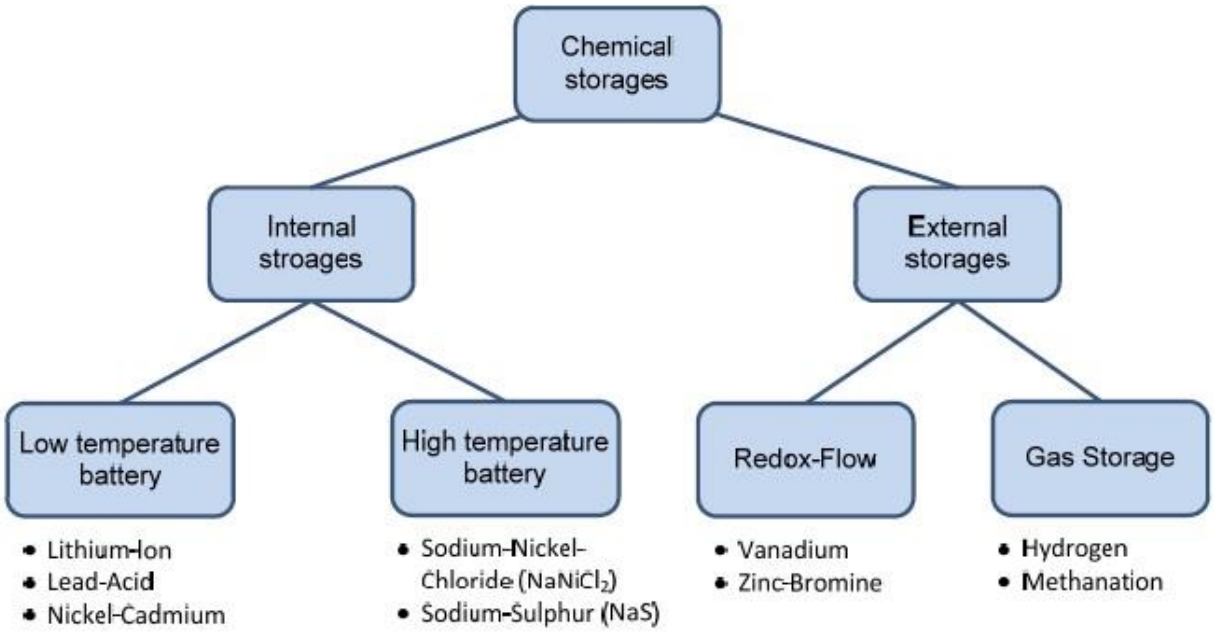
در جدول ٤ چگالی انرژی فناوری ها ارائه شده است.

جدول ٤: چگالی انرژی فناوری ها به تفکیک سیستم ذخیره سازها[٤و١٦]

	Technology	Energy Density e in kWh/ m^3
Mechanical Energy Storage	potential energy (e.g. pumped hydro with 360 m height difference) (electrical energy)	1
	kinetic energy (e.g. flywheels) (electrical energy)	10
Electrical Energy Storage[6]	Electrostatic fields (Capacitors) (electrical energy)	10
	Electromagnetic fields (Coils) (electrical energy)	10
Electrochemical storage systems	Lead-acid battery (electrical energy)	100
	Lithium-ion battery (electrical energy)	500
Thermal Energy Storage	Sensible heat (e.g. Water ΔT = 100 K) (thermal energy)	116
	Phase changes (e.g. water to steam) (thermal energy)	636
Chemical Energy Storage	Liquid hydrogen (thermal energy)	2.400
	Gasoline (thermal energy)	8.500

ذخیره سازهای شیمیایی نیز می توانند به صورت زیر دسته بندی گردند:

شکل ٥: طبقه بندی سیستم های ذخیره سازهای شیمیایی[١٦]



سیستم های ذخیره سازهای شیمیایی برحسب روش نگهداری مواد حامل انرژی مولد توان(بعنوان مثال هیدروژن و متان) به دو نوع ذخیره داخلی(یکپارچه) و خارجی(مستقل) تقسیم می شوند. سیستم های ذخیره ساز با قابلیت ذخیره خارجی این مزیت را دارند که دو بخش محفظه ذخیره مواد انرژی و بخش تولید توان الکتریکی از هم جدا طراحی می شوند. از نمونه های مهم این نوع ذخیره ساز می توانیم ذخیره سازهای هیدروژن و متان همانند باطری های redox flow را نام ببریم.

سیستم های ذخیره ساز با قابلیت ذخیره داخلی همانند باطری های لیتیوم-یون، هر دو بخش نگهداری مواد انرژی و تولید توان در یک محفظه باهم قرار دارند. مواد حامل انرژی و ظرفیت تولید توان به یکدیگر بستگی دارند بدین معنی که اگر مقدار مواد حامل انرژی بیشتر باشد، ظرفیت توان نیز بالاتر است. این خاصیت باعث متمایز شدن باطری های با درجه حرارت بالا و پایین می شود. باطری دما پایین در حدود دمای اتاق کار می کنند در حالی که باطری دما بالا در حرارت حدود ۳۰۰ درجه سانتی گراد به کار می روند.

انواع فناوری های ذخیره ساز در زنجیره عرضه تا مصرف انرژی الکتریکی

سیستم ذخیره انرژی الکتریکی، سیستمی است که در آن انرژی الکتریکی به نوعی از انرژی (شیمیایی، حرارتی، مغناطیسی و ...) تبدیل می شود که قابلیت ذخیره شدن را داشته باشد تا در صورت نیاز مجدداً به انرژی الکتریکی تبدیل شود. جدول ۵ انواع فن آوری پیشرفته ذخیره ساز انرژی الکتریکی، کاربرد اولیه، اطلاعات موجود و چالش آنها را نشان می دهد.

جدول ۵: انواع فن آوری پیشرفته ذخیره سازی انرژی الکتریکی[۵]

فناوری	کاربرد اولیه	اطلاعات موجود	چالشها
CAES	• مدیریت انرژی • ذخیره پشتیبان و دوره ای • یکپارچه سازی تجدید پذیرها	• نرخ افزایش سریع برق(ramp) بهتر از توربین گازی دارد[۳] • از سال ۱۹۷۰ تجاری شده است	• محدودیت جغرافیایی • بهره وری پایین تر به دلیل تبدیل رفت و برگشت • زمان پاسخ کندتر از فلایویل یا باطری • اثرات زیست محیطی
پمپ های آبی	• مدیریت انرژی • ذخیره پشتیبان و دوره ای • تنظیم خدمات از طریق دسترسی به پمپ های سرعت متغیر	• تکنولوژی توسعه یافته و بالغ • نرخ افزایش سریع برق(ramp) بسیار بالا • هم اکنون مقرون به صرفه ترین فرم ذخیره سازی	• محدودیت جغرافیایی • محل نیروگاه • اثرات زیست محیطی • هزینهٔ بسیار بالای پروژه
چرخ طیارها[۴]	• تسطیح بار • تنظیم فرکانس • پیک سایی و ذخیره سازی غیر پیک • پایایی گذرا	• تکنولوژی ماجول[۵] • پتانسیل ارتقاء به هر اندازه را دارد[۶] • چرخه عمر طولانی • توان بالا و بدون نگرانی از گرم شدن • پاسخ سریع • بهره وری بالای round-trip انرژی[۷]	• محدودیت ها ی استحکام کششی روتور • زمان ذخیره سازی انرژی محدود بعلت تلفات اصطکاکی بالا
اسید سرب پیشرفته[۸]	• تسطیح و تنظیم بار • پایداری شبکه[۹]	• فن آوری بالغ • کم هزینه • قابل بازیافت • عمر خوب	• محدودیت تخلیه • چگالی پایین تر انرژی • ردپای بزرگ(ناشر آلاینده) • محدودیت خوردگی در عمر مفید
NaS	• کیفیت توان • رفع تراکم[۱۰]	• شدت بالای انرژی • چرخه تخلیه طولانی	• دمای عملیاتی مورد نیاز ۲۵۰ تا ۳۰۰ C ° • مسایل آلودگی مایع (الکترودها)

[3] Better ramp rates than gas turbine plants
[4] Flywheels
[5] Modular technology
[6] Proven growth potential to utility scale
[7] High round trip energy efficiency
[8] Advanced Lead Acid
[9] Grid stabilization
[10] Congestion relief

فناوری	کاربرد اولیه	اطلاعات موجود	چالشها
	• یکپارچه سازی تجدیدپذیرها	• پاسخگویی سریع • عمر طولانی ومقیاس پذیر خوب[11]	
Li-ion	• کیفیت توان • تنظیم فرکانس	• چگالی بالاتر انرژی • چرخه عمر خوب • بهره وری بالای شارژ/ تخلیه	• هزینه بالای تولید- مقیاس پذیری • بسیار حساس به دمای بالا، شارژ بیش از حد و فشار داخلی • عدم توانایی دشارژ عمیق (deep discharge)
باطری های جریانی	• افزایش سریع برق (Ramping) • پیک سایی • جابجایی زمان • تنظیم فرکانس • کیفیت توان	• توانایی انجام تعداد بالای چرخه تخلیه • بهره وری پایینتر شارژ/ تخلیه • عمر خیلی زیاد	• فناوری در حال توسعه و نا بالغ برای تجاری سازی • طراحی پیچیده • چگالی پایین تر انرژی
SMES	• کیفیت توان • تنظیم فرکانس	• بالاترین بهره وری round-trip از تخلیه	• چگالی پایین انرژی • گران بودن هرینه مواد اولیه و ساخت
خازن الکتروشیمیایی	• کیفیت توان • تنظیم فرکانس	• عمر خیلی زیاد • قابلیت برگشت بسیار زیاد و تخلیه سریع	• هزینهٔ جاری سنگین
ذخیره ساز حرارتی انرژی	• تنظیم و تسطیح بار • پایداری شبکه	• چگالی انرژی بسیار بالا	• هزینهٔ جاری سنگین

برای انتخاب یک سیستم ذخیره انرژی الکتریکی می بایست به مقادیر نرخ توان و انرژی مورد نیاز، سرعت شارژ و دشارژ، درجه حرارت، حجم و وزن آن توجه گردد. انواع مختلف فناوری های مختص به هر روش ذخیره سازی انرژی الکتریکی (شیمیایی، حرارتی، مکانیکی و الکتریکی) در ادامه معرفی می گردند.

[11] Good scaling potential

فناوری های ذخیره ساز به روش الکتریکی

ذخیره ساز ابر خازن

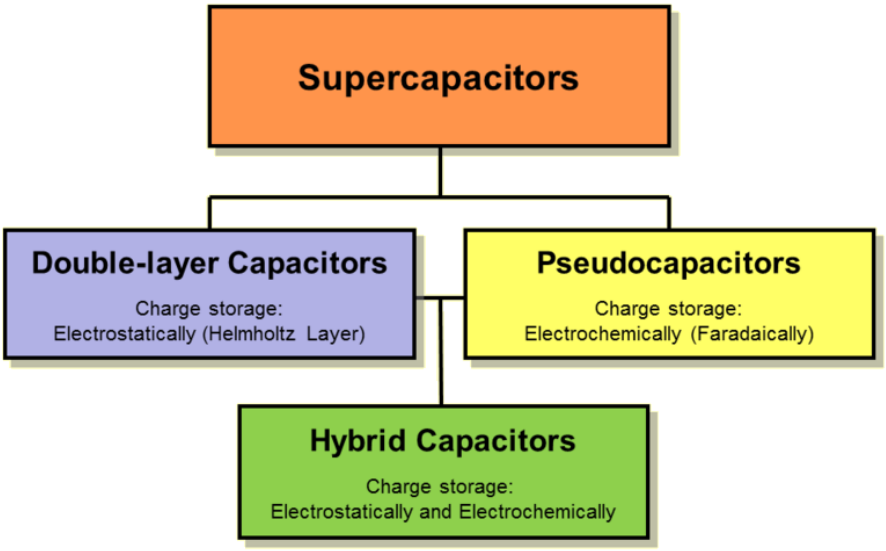
ابر خازن [۱۲] یک نوع خازن الکتروشیمیایی است که در مقایسه با خازن های معمولی ظرفیت ذخیره سازی به مراتب بالایی دارد. این نوع خازن، انرژی را در میدان الکتریکی مابین دو دی الکتریک ذخیره می سازد. ابرخازن می تواند حجم هزاران برابر بزرگ تر از یک خازن الکتریکی داشته باشد. از ابر خازن های بزرگ تر که دارای ظرفیتی بالاتر از ۵۰۰۰ فاراد هستند به عنوان باطری استفاده می کنند و در مقایسه با خازن های معمولی دارای چگالی انرژی بیشتری هستند. بزرگترین ابر خازن، چگالی انرژی برابر ۳۰ وات ساعت بر کیلوگرم دارد که این مقدار کمتر از چگالی باطری های لیتیم تیتاناتی(سریع شارژ شونده)است. این خازن ها دارای تراوایی(Permeability) بالا و الکترودهای بسیار نزدیک به هم می باشند. از گونه های رایج ابرخازن ها می توان به خازن های الکتریکی دولایه EDLC اشاره کرد که چگالی توان بسیار بالا و راندمانی بیش از ۹۵ درصد داشته و نیز بسیار گران می باشند. برخی از کاربردهای انواع طیف ابرخازن ها عبارتند از:

- تجهیزات نظامی ولیزرهای نظامی
- توربین های بادی
- تجهیزات پزشکی
- راه انداز شیر سلونوئید
- بک آپ منابع تغذیه
- محرک موتورهای الکترومغناطیسی
- واحدهای کنترل از راه دور سولار
- سیستم های سولار

[12] **Ultra-capacitor یا Super Capacitor (SC)**

- درایور LED های بزرگ
- تجهیزات اندازه گیری و کنترل و ابزار دقیق
- مایکروویو
- وسایل نقلیه الکتریکی و هایبرید

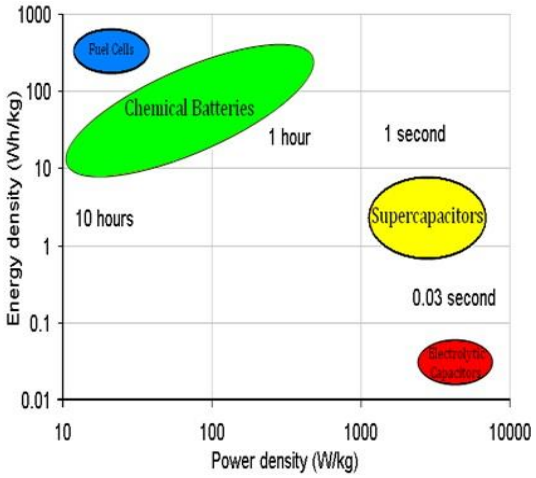
شکل ٦: دسته بندی انواع ابرخازن ها[۱۱]



ابر خازن ها نسبت به باطری های معمولی قابل شارژ با مزیت هایی مانند زمان شارژ حدود چند ثانیه نسبت به شارژ حدود چند ساعته و نیز میلیونها بار چرخهٔ شارژ و دشارژ نسبت به ۱۰۰۰ بار شارژ و دشارژ ، عمری طولانی تر دارند. علت آن این است که در ابر خازن ها هیچ تغییر شیمیایی بر روی الکترودها در حالت عادی رخ نمی دهد و انرژی به طور فیزیکی ذخیره می شود همچنین ابر خازن ها دارای مقاومت داخلی بسیار کم و راندمان زیاد هستند.

شکل ۷: مقایسه ذخیره سازهای ابرخازن، باطری و ابررسانا [۱۱]

Function	Electronic capacitor	Super capacitor	Battery
Charge time	μs – ms	ms-min	Hours
Discharge time	μs – ms	ms-days	1-900 min
Energy density	<.01 Wh/L	0.5-5 Wh/L	50-300 Wh/L
Power density	$>10^4$ W/L	10^3-3x10^3	<500 W/L
Cycle life	10^6-10^8	10^6-10^8	200-1,000



تحقیقات اخیر مبنی بر استفاده از گرافن(Graphene)، وعده ابر خازن‌هایی را می‌دهد که می‌توانند ظرف ١٦ ثانیه شارژ و بیش از ۱۰ هزار مرتبه شارژ و دشارژ شوند. لازم به ذکر است، که بهترین ابر خازن‌ها می‌توانند چگالی انرژیی معادل باطری‌های لیتیوم-یون متداول داشته باشند.

شکل ۸: مقایسه کارایی ابرخازن با باطری لیتیوم-یون [۱۱]

Function	Supercapacitor	Lithium-ion (general)
Charge time	1–10 seconds	10–60 minutes
Cycle life	1 million or 30,000h	500 and higher
Cell voltage	2.3 to 2.75V	3.6 to 3.7V
Specific energy (Wh/kg)	5 (typical)	100–200
Specific power (W/kg)	Up to 10,000	1,000 to 3,000
Cost per Wh	$20(typical)	$2 (typical)
Service life (in vehicle)	10 to 15 years	5 to 10 years
Charge temperature	–40 to 65°C (–40 to 149°F)	0 to 45°C (32° to 113°F)
Discharge temperature	–40 to 65°C (–40 to 149°F)	–20 to 60°C (–4 to 140°F)

ابرخازن ها در مقیاس هـای کوچـک بـرای ذخیـره انـرژی بهـره بـرداری مـی شـوند و در صـورت پیشـرفت در افزایش چگالی انرژی آنها می توان انتظار داشت جای باطری های الکتروشیمیایی را بگیرند.

شکل ۹: یک نمونه ذخیره ساز ابرخازن

در ابر خازن هـا الکترودهـا بـه وسـیله ی واکـنش هـای شـیمیایی پیونـد نخـورده انـد و ایـن موضـوع نشـان دهنده ی این است که آنها می تواننـد بـه طـور کامـل دشـارژ شـود. ایـن مسـئله بـه عنـوان تـابعی از حالـت بار، منجـر بـه نوسـان هـای بیشـتر ولتـاژ مـی شـود. بـه هـین دلیـل ابـر خـازن بـه طـور کامـل نمـی توانـد جایگزین باطری شودو فقـط سیسـتم هـای بـاطری ابرخـازن مـی تواننـد کـارایی ذخیـره سـازی را بـالا بـرده و عمر مفید باطری را افزایش دهنـد. ایـن سیسـتم ذخیـره سـازی انـرژی مـی توانـد بـرای وسـایل الکتریکـی و کاربردهای انرژی بـادی مفیـد باشـد. از کاربردهـای دیگـر آن حفـظ فرکـانس ثابـت و تعـدیل افـت ولتـاژ در نیروگاه های غیر متمرکز بـرق مـی باشـد. ظرفیـت ذخیـره انـرژی فـوق العـاده زیـاد SCهـا موجـب شـده است تـا هـر وسـیله ای کـه از بـاطری بـه عنـوان منبـع تـامین انـرژی اسـتفاده میکنـد، کاندیـدای اسـتفاده از ابرخازن هم باشند. خازن های اولیه بـر خـلاف باطریهـا کـه قـادر بـه نگهـداری انـرژی زیـاد بـا قـدرت کـم بودند, میتوانستند انرژی ای بـا قـدرت بـالا درخـود ذخیـره کننـد امـا ایـن انـرژی زود بـه پایـان مـی رسـید. ابرخازن ها با ترکیب ذخیـره انـرژی بـا قـدرت زیـاد و همچنـین میـزان زیـادی از انـرژی، ایـن مشـکل را تـا حدودی رفع کردند.

این منبع ذخیره انـرژی در حـال حاضـر از گزینـه هـای پرطرفـدار بـرای اسـتفاده در وسـایل نقلیـه برقـی یـا دوگانـه سـوز بـه شـمار مـی آیـد و مزایـای آن نسـبت بـه بـاطری باعـث شـده متخصصـین آن را بـرای جایگزینی باطری مناسـب بداننـد. ابرخـازن در ابتـدا بـرای مصـارف جنگـی توسـط ارتـش ایـالات متحـده و برای تامین نیروی محرکه مـورد نیـاز تانکهـا و زیردریـایی هـا مـورد اسـتفاده قـرار گرفـت. پـس از آن ناسـا بـه تحقیـق بـر روی پـروژه Hybrid Electric Bus Transit (HEBT) پرداخـت تـا از ایـن منبـع در حمـل و نقـل عمـومی اسـتفاده شـود. ایـن اتوبـوس از ۳۰ خـازن هـر یـک بـه وزن ۳۲ کیلـوگرم تشـکیل می شد و انرژی ای معادل ۵۰kj تولید میکرد که انرژی اتوبوس را تا ٤ مایل تامین می کرد.

بطور کلی مزایا و معایب این ذخیره ساز عبارت است از:

مزایـا : شـارژ تقریبـاً آنـی، طـول عمـر بسـیار طـولانی از نظـر تعـداد سـیکل شـارژ، قابلیـت بهـره‌گیـری بـه عنوان منبع انرژی در خودروهای برقی، دمای بهره برداری ۷۰ تا ٤۰- درجهٔ سانتیگراد

معایب : داشتن مدت زمان شارژ کوتاه بعلت چگالی پایین آن

جدول ٦: برخی تولید کنندگان ذخیره ساز ابرخازن[۱۲]

Sl.No.	Manufacturer	Specifications of Supercapacitors
1	Power Star China Make (single Unit)	50 F/2.7V, 300F/2.7V, 600F/2.7 V, ESR less than 1mΩ.
2	Panasonic Make (Single Unit)	0.022-70F, 2.1-5.5V, ESR 200 mΩ-350 Ω
3	Maxwell Make (Module)	63F/125V, 150A ESR 18 mΩ 94F/75 V, 50 A, ESR 15 mΩ
4	Vinatech Make	10-600F/2.3V, ESR 400 -20 mΩ, 3-350F/2.7, ESR 90-8 mΩ
5	Nesscap Make (module)	15V/33F, ESR 27 mΩ 340V/ 51F, ESR 19 mΩ

جدول ۷ : مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره سازی ابرخازن [۱۶]

Parameters for Super-Capacitors	All numbers are indications and my vary significantly among different products and installations	
	Today	2030
Round-trip efficiency	90 % to 94 %	No numbers available
Energy density	2 Wh/ l to 10 Wh/ l	
Power density	up to 15 kW/ l	
Cycle life	up to one million	
Calendar Life	15 years	
Depth of discharge	75 %	
Self-discharge	up to 25% in the first 48 hours, afterwards very low	
Power installation cost	10 €/ kW to 20 €/ kW	
Energy installation cost	10,000 €/ kWh to 20,000 €/ kWh	
Deployment time	< 10 ms	
Site requirements	None	
Main applications	Primary frequency control, voltage control, Peak shaving, UPS	

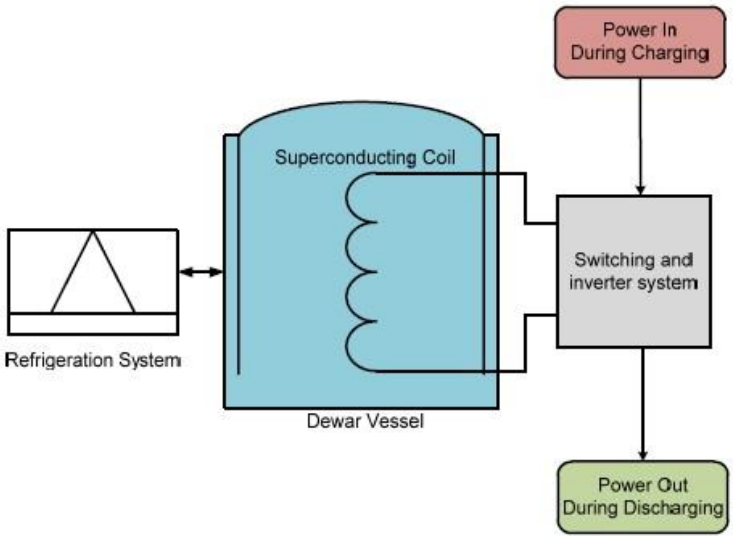
ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانا [۱۳]

اجسام ابررسانا ظرفیت ذخیره را افزایش داده و در دماهای پایین در مقابل عبور جریان از خود مقاومتی نشان نمی دهند. کاربرد ابرسانا ها توسط عواملی چون تغییر دما، میدان مغناطیسی بحرانی و چگالی جریان بحرانی محدود می شود. سیستم ذخیره ساز مغناطیسی ابررسانا از سه بخش اساسی سیم پیچ ابررسانا، سیستم اصلاح و بهبود توان، و سیستم خنک کننده تشکیل می شود. سیم پیچ ابررسانا به صورت یک سلف به کار می رود و در ساعات غیر پیک انرژی الکتریکی از طریق یک جریان مستقیم (DC) به صورت انرژی مغناطیسی در میدان سلف مذکور ذخیره می شود. اگر سیم پیچ از موادی مثل مس باشد انرژی مغناطیسی زیادی در سیم به خاطر مقاومت، تلف می شود و اگر سیم از جنس ابر رسانا باشد انرژی در حالت پایا و تا زمانی که لازم است، ذخیره می شود.

[13] Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

ابررسانا بودن سیم پیچ باعث تلفات بسیار ناچیز سیستم شده و جریان آن تقریباً بدون تغییر باقی می ماند.

شکل ۱۰: نحوه عملکرد سیستم ذخیره ساز مغناطیسی ابررسانا [۱۶]



ابررساناها در مقابل جریان DC مقاومت ندارند ولی در کابرد جریان الکتریکی AC تلفات دارند که این تلفات با طراحی مناسب کاهش پیدا کند.

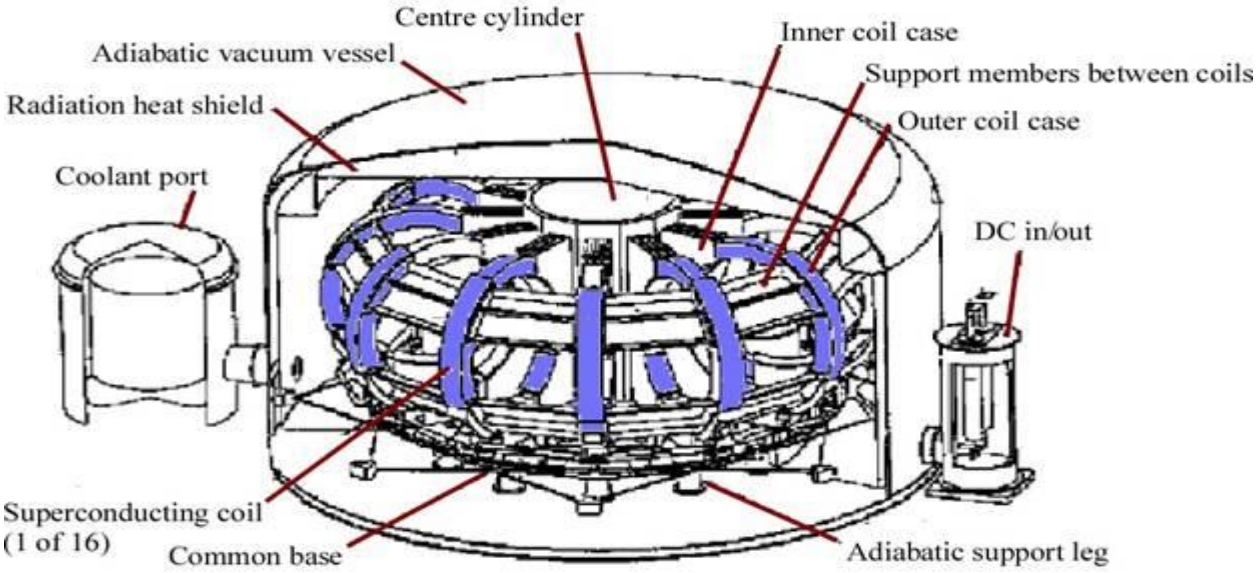
برای هر دوحالت کاری AC و DC انرژی زیادی ذخیره می شود. سیستم خنک کننده وظیفه کاهش دمای ابررسانا را به منظور حفظ خاصیت ابررسانایی برعهده دارد که بهترین دما برای دستگاه ها ۷۷-۵۰ درجهٔ کلوین است.

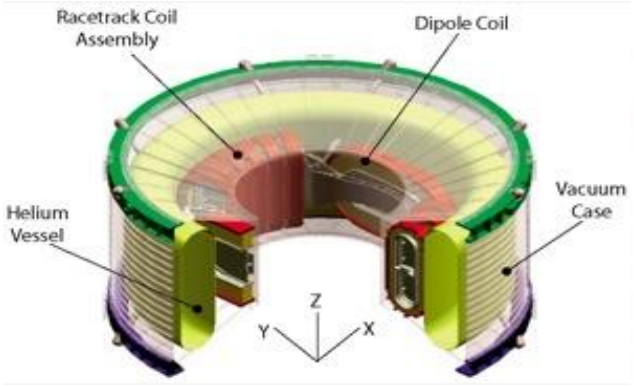
انرژی ذخیره شده قابلیت آزادسازی در شبکه از طریق تخلیه الکتریکی سیم پیچ را دارد. کاربرد سیستم مدیریت قدرت که همان سیستم اصلاح توان است، تبدیل جریان متناوب به مستقیم و مستقیم به متناوب به ترتیب در روال شارژ و دشارژ SMES، با استفاده از یک مبدل یکسوساز/ وارون ساز شامل دو مبدل AC/DC شش تریستور و یک ترانسفورماتور قدرت سه سیم پیچه کاهنده، برای تبدیل جریان متناوب(AC) به جریان مستقیم یا برعکس می باشد. دو سر سیم پیچ ابر

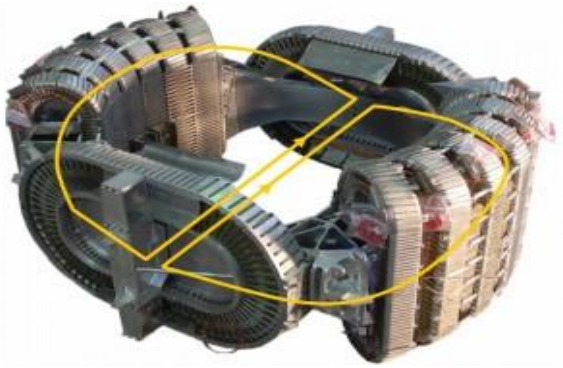
رسانا را می توان با کنترل زاویهٔ آتش تریستورها ولتاژ DC، به طور پیوسته در بازه ی وسیعی از مقادیر ولتاژهای مثبت ومنفی کنترل کرد.

سیستم SMES بسیار کارآمد، با راندمان شارژ و دشارژ بیشتر از ۹۵٪ و اتلافی کم تر از سایر ذخیره سازها در طول مراحل ذخیرهٔ انرژی است و در واقع مبدل یکسوساز/ وارون ساز موجب اتلاف ۲-۳ درصدی انرژی در هر مسیر می شود. البته با توجه به انرژی زیاد مورد نیاز برای خنک سازی و هزینه زیاد سیم های ابررسانا ، SMES ها در حال حاضر تنها برای ذخیرهٔ کوتاه مدت انرژی و بهبود کیفیت توان مورد استفاده قرار می گیرند.

شکل ۱۱: یک نمونه ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانا و اجزاء آن

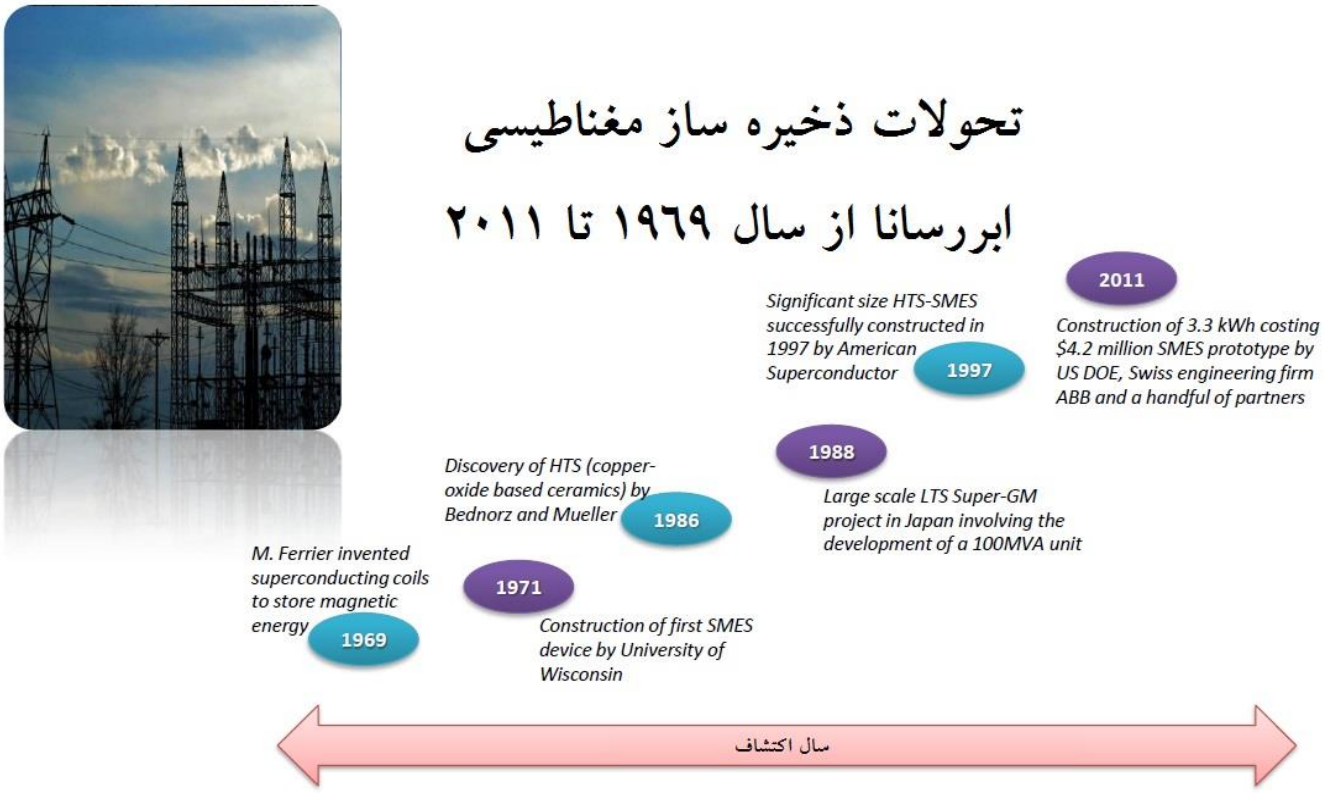




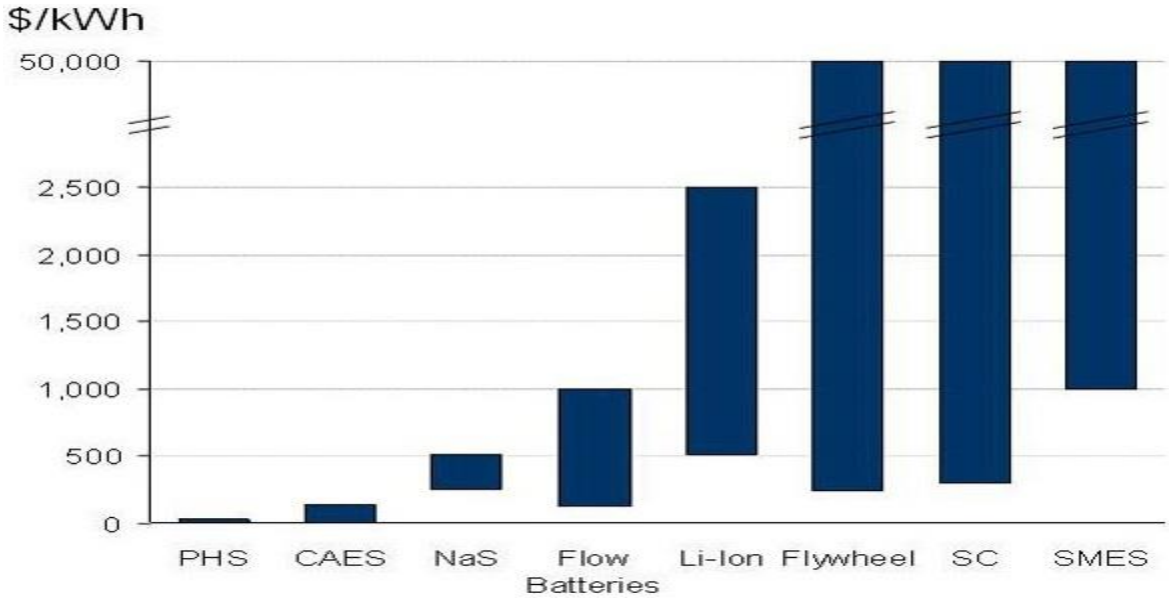


انرژی ذخیره شده به جریان عبوری از سیم پیچ ابررسانا و همچنین اندوکتانس سلف مورد نظر بستگی دارد. برای ذخیره انرژی زیاد از آنجا که اندوکتانس سلف تابع مشخصات ساختمانی آن است، ابعاد سلف مورد استفاده افزایش چشمگیری خواهد داشت و هزینه آن نیز متقابلاً بسیار زیاد خواهد شد.

شکل ۱۲: تحولات ذخیره ساز مغناطیسی



شکل ۱۳: هزینه سرمایه گذای برای ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانا [۱۰]



در ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانا سیستم اصلاح و بهبود توان ۷۰٪ از هزینه های کل تاسیسات را به خود اختصاص می دهد.

شکل ١٤: هزینه اجزاء مختلف ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانای ۱ مگاوات برحسب زمان دشارژ [۱۰]

	Discharge Time		
	1 sec	30 sec	60 sec
Cost per component for a 1 MW SMES unit [*1000]			
Cold comp	33	114	162
Refrigerator	232	374	472
PCS	600	900	1200
Cost of PCS [/kW]			
300 kW	750	1125	1500
500 kW	675	1013	1350
>1000 kW	600	900	1200
Estimated total cost for a 1 MW SMES unit [*1000]			
Today	865	1388	1834
1 year	382	715	943
5 year	224	403	540
10 year	178	344	464

در حال حاضر هزینه هر واحد ظرفیت این ذخیره ساز درحدود ۵۰۰۰۰ دلار به ازاء یک کیلووات می باشد که پیش بینی می شود این هزینه ها تا سال ۲۰۱۸ به ۳۵۰۰۰ دلار به ازاء یک کیلووات برسد. چشم انداز برای رقابتی شدن آن، کاهش تا ۱۰۰۰ دلار به ازاء یک کیلووات می باشد.

جدول ۸: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانا [۱۶]

Parameters for Superconductive Magnetic Energy Storage[17]	All numbers are indications and my vary significantly among different products and installations	
	Today	2030
Round-trip efficiency	80 % to 90 %	Technology development of superconductors uncertain.
Energy density	0.5 Wh/ l to 10 Wh/ l	
Power density	1 kW/ l to 4 kW/ l	
Cycle life	Not limiting	
Calendar Life	20 years	
Depth of discharge	n. a.	
Self-discharge	10 %/ day to 15 %/ day	
Power installation cost	n.a.	
Energy installation cost	n.a.	
Deployment time	about 1 ms to 10 ms	
Site requirements	Refrigeration, switching and inverter system	
Main applications	Primary frequency control, voltage control, Peak shaving, UPS	

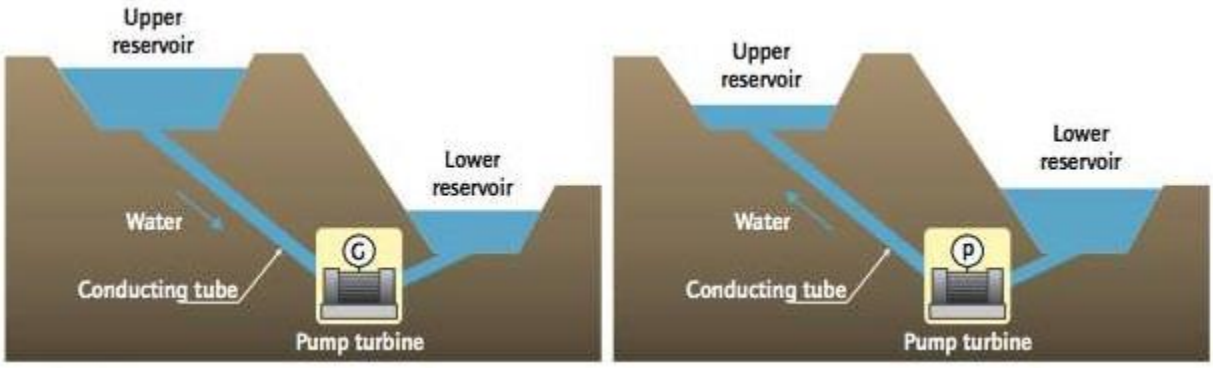
روش ذخیره سازی مکانیکی

تلمبه ذخیره ای[۱۴]

نیروگاه تلمبه ذخیره ای به منظور ذخیره پتانسیل آب موجود در مخزن سدها برای تولید انرژی برقابی در ساعات پرمصرف برق میباشد. در این روش آب از مخازن پایین دست به مخازن بالا دست پمپ میشود و با این کار انرژی الکتریکی به صورت انرژی پتانسیل در آب پمپ شده به ارتفاع بالاتر، ذخیره می شود.

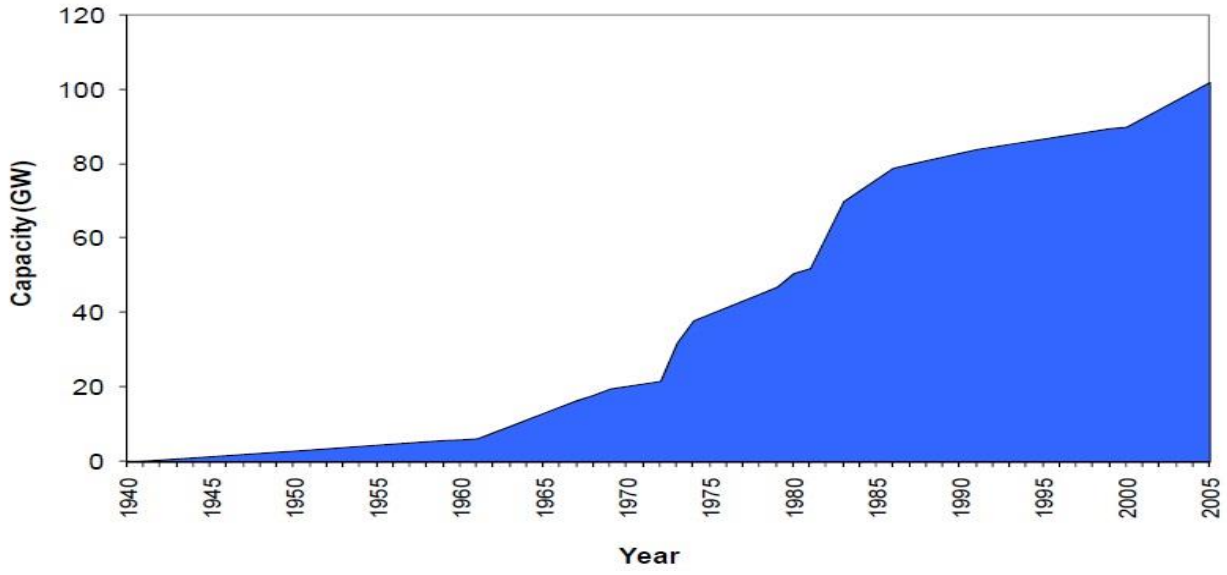
[14] **Pumped storage**

شکل ۱۵ : نحوه عملکرد سیستم ذخیره ساز تلمبه ذخیره ای



این روش توانایی افزایش ظرفیت آبی از طریق تلمبه کردن آب از یک مخزن پایین‌تر به یک مخزن بالاتر در مواقعی که تقاضای مصرف برق کم است (مثلاً هنگام شب) را می‌دهد. این آب در مواقعی که تقاضا زیاد است یا نیاز به برق ذخیره شده باشد به مخزن پایین برمی گردد تا توربین‌ها را چرخانده و در نهایت ژنراتور را به گردش درآورد.

شکل ١٦: ظرفیت نصب شده تلمبه ذخیره ای تا سال ۲۰۰۵[۱۳]



در دهه ۱۹۳۰ توربین برق آبی قابل برگشت ساخته و به بهره برداری رسید. این توربین ها توانایی عمل کردن به صورت توربین- ژنراتور و در جهت عکس به صورت پمپ های مجهز به موتور الکتریکی را داشتند. آخرین توربین ها در مقیاس بزرگ، فن آوری مهندسی توربین های دارای سرعت متغیر است که از راندمان بالاتری در حدود ۸۰ درصد برخوردار هستند. این توربین ها همزمان با فرکانس شبکه، برق تولید می کنند و مستقل از فرکانس شبکه به صورت موتور پمپ عمل می کنند.

با توجه به اینکه نیروگاه های تلمبه ذخیره‌ای نوسان‌های بار را در شبکه برق یکنواخت کرده و اجازه می‌دهند نیروگاه‌های حرارتی که برق بار پایه را تولید می‌کنند، با بازده پیک یا حداکثر به کار خود ادامه دهند. به عنوان مقرون به صرفه‌ترین وسیله ذخیره مقادیر زیاد انرژی الکتریکی بر اساس بهره‌برداری محسوب می‌شوند.

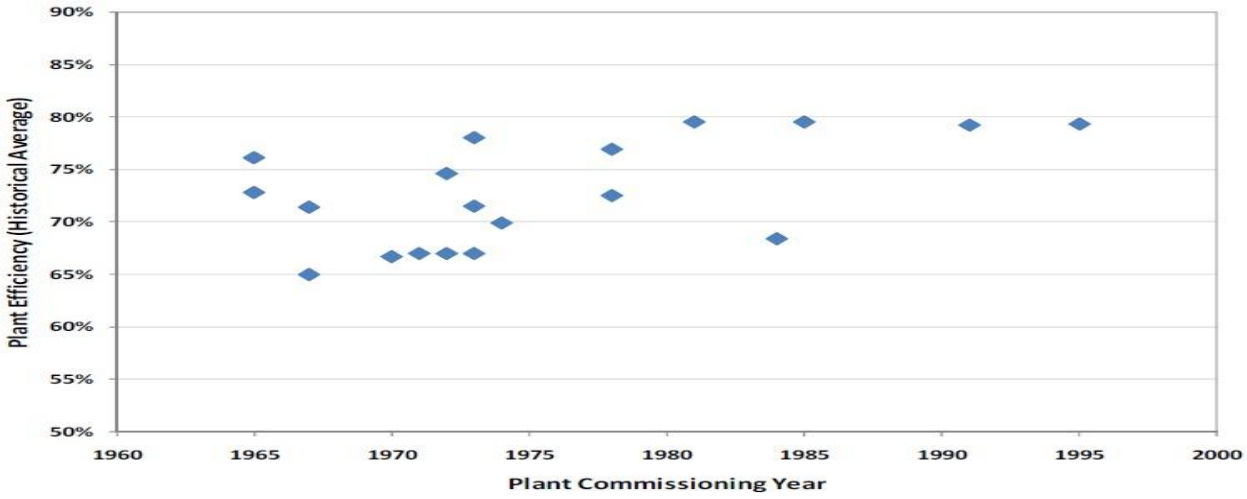
جدول ۹: فناوری ذخیره سازی تلمبه ذخیره ای در طول زمان[۱۰]

1849	James B. Francis. Developed inward flow reaction turbine
1873	First application of movable wicket gates
1880's	Swiss develop pump back and pump storage schemes
1910's	Pump storage plants constructed in Germany
	Vertical shaft Francis turbines manufactured
1929	Rocky River PS Project on the Housatonic River - first PS in US
	Development of wicket gates in conjunction with Francis pump – turbine
1956	TVA Hiwassee Unit 2 is a true reversible pump-turbine. Proves that a single runner can perform as a pump and turbine.
1960's	Develop adjustable frequency motor starting system – over comes the problem of pump motor starting
1980's	US Bureau of Reclamation experiment with adjustable speed machine
1990's	Japanese manufacturers develop adjustable speed machines
1985	World's largest PS project: Bath County VA; six unit 2,100 MW
1996	First 395 MVA adjustable speed machine at Ohkawachi PS project, Japan, enters commercial operation
1998	Chaira, Bulgaria; two units 864 MW; highest-head (2,400 feet), single-stage pump/turbines
1990's	Development of electricity markets. PS receives full compensation for ancillary services
1999	Yanbaru – Okinawa, Japan; One unit rated 30MW, first pumped storage plant to operate with sea water
2003	Goldisthal, Germany; four units (two single speed, two adjustable speed), 345 MVA each.
Late 2000's	Several adjustable speed projects (Avce, Nant de Drance, Linth-Limmern, Kozjak) are being built or planned in Europe

جدول ۱۰: برخی از پروژه های انجام شده در ارتباط با فناوری ذخیره سازی تلمبه ذخیره ای [۱۳]

Project	Initial Operation	Installed Capacity (MW)	Hours of Storage	Energy Storage (MWh)	Average Gross Head (Feet)	Water Conductor Length (Feet)	Length to Head Ratio L/H	No. of Existing Res./Lakes
Taum Sauk	1963	350	7.7	2,700	809	7,003	8.7	0
Yards Creek	1965	330	8.7	2,894	723	3,700	5.1	0
Muddy Run	1967	855	14.3	12,200	386	1,290	3.3	1
Cabin Creek	1967	280	5.8	1,635	1,159	4,340	3.7	0
Seneca	1969	380	11.2	3,920	736	2,520	3.4	1
Northfield	1972	1,000	10.1	10,100	772	6,790	8.8	1
Blenheim Gilboa	1973	1,030	11.6	12,000	1,099	4,355	4.0	0
Ludington	1973	1,888	9.0	15,000	337	1,252	3.7	1
Jocassee	1973	628	93.5	58,757	310	1,700	5.5	1
Bear Swamp	1974	540	5.6	3,019	725	2,000	2.8	0
Raccoon Mountain	1978	1,370	24.0	33,000	968	3,650	3.8	1
Fairfield	1978	512	8.1	4,096	163	2,120	13.0	0
Helms	1984	1,200	118.0	14,200	1,645	20,519	12.5	2
Bath County	1985	2,100	11.3	23,700	1,180	9,446	8.0	0

شکل ۱۷: راندمان نیروگاه های تلمبه ذخیره ای در آمریکا [۱۳]



برای این که چنین نیروگاهی مقرون به صرفه باشد باید اختلاف ارتفاع دو مخزن پایین‌دست و بالادست، لااقل ۳۰۰ متر باشد. در ایران نیروگاه تلمبه‌ای ذخیره‌ای سیاه‌بیشه با دو سد بلند اولین نوع از این نیروگاه است.

جدول ۱۱: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره ساز تلمبه ذخیره ای [۱۶]

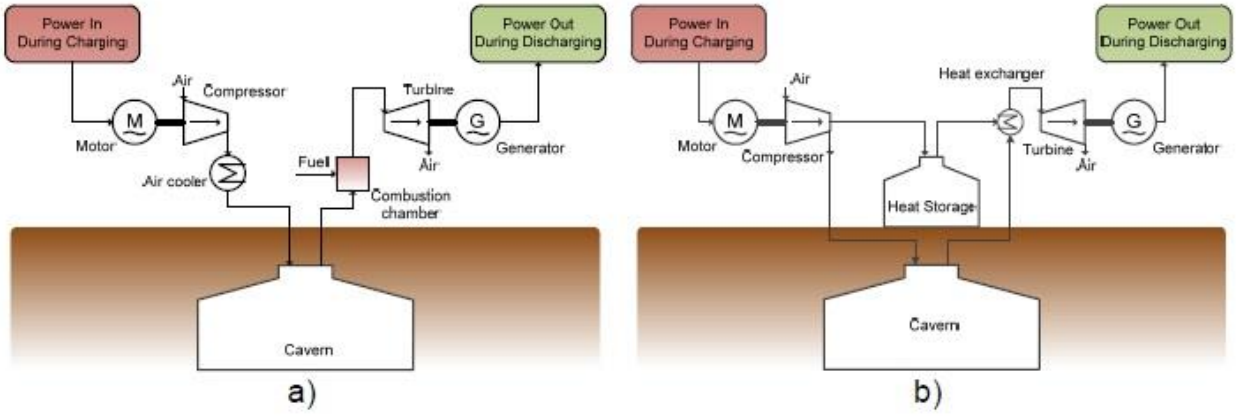
Parameters for Pumped Hydro Power[9]	All numbers are indications and my vary significantly among different products and installations	
	Today	2030[10]
Round-trip efficiency	75 % to 82 % (for new systems, existing older systems often have lower efficiency)	
Energy density	0.27 Wh/ l (head 100 m) to 1.5 Wh/ l (head 550m) (taking into account only the upper water basin)	
Power density	n. a.	
Cycle life	n. a.	
Calendar Life	80 years	
Depth of discharge	80 to100 % (between predefined min and max water levels, natural lakes will have relative high min levels to assure the functioning of the eco system)	
Self-discharge	0.005 %/ day to 0.02 %/ day[11]	
Power installation cost	500 €/ kW to 1,000 €/ kW (higher costs due to difficult geological conditions have been reported)	
Energy installation cost	5 €/ kWh to 20 €/ kWh	
Deployment time	about 3 min.[12]	
Site requirements	Two reservoirs located at different heights. Significant height difference.	
Main applications	Frequency control (secondary reserve, minute reserve), Voltage control, Peak shaving, Load leveling, Standing reserve, Black start	

ذخیره سازی هوای فشرده[۱۵]

اجزای اصلی یک سیستم CAES شامل: موتور، کمپرسور، محفظه ذخیره هوا، محفظه احتراق، توربین و ژنراتور است. نحوه عملکرد این سیستم به این صورت است که در ساعات غیر پیک برق را از شبکه می گیرد و به وسیله یک کمپرسور، هوا را تا حدود ۷۵ bar فشرده ساخته و در داخل محفظه ای زیرزمینی می دمد. البته برای استفادهٔ بهینه از فضا، هوا پیش از تزریق به داخل حفره خنک می شود.

[15] **Compressed Air Energy Storage (CAES)**

شکل ۱۸: مکانیزم عمل یک سیستم CAES a-دررو(diabatic) b-بی دررو(adiabatic) [۱۶]

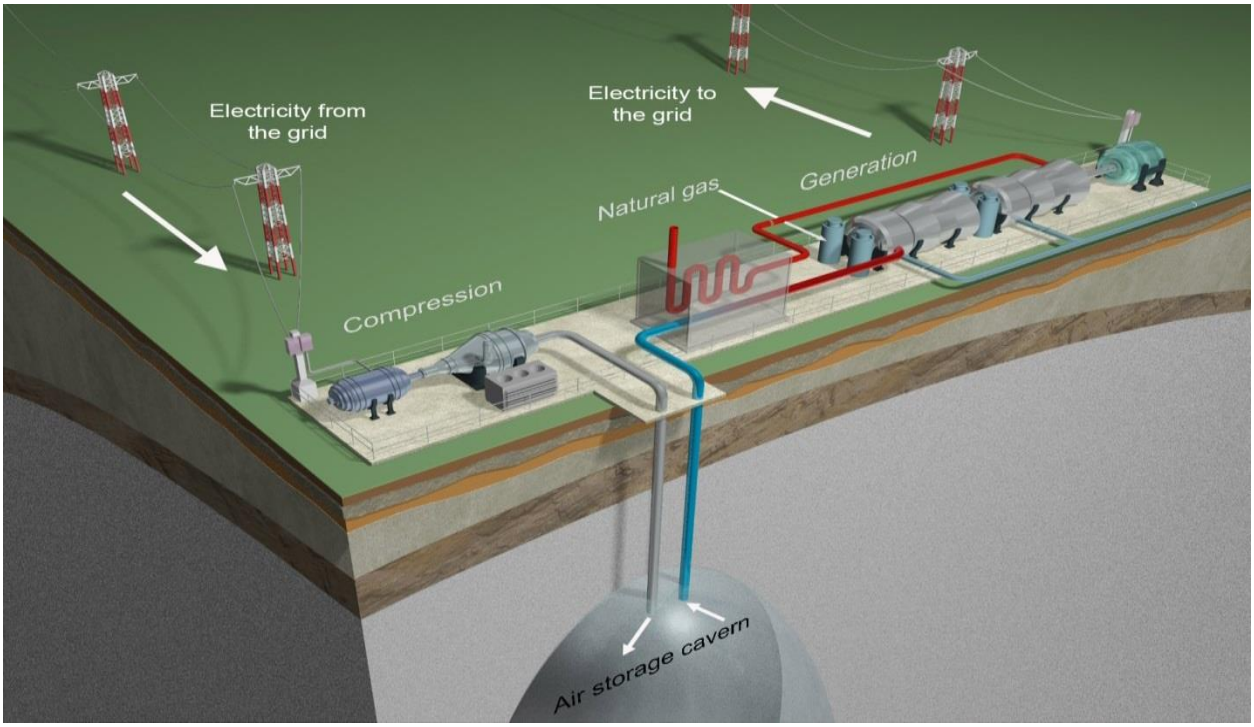


برای ایجاد محفظه زیرزمینی نگهداری هوا یا می توان آن رابه طور مصنوعی ساخت که هزینهٔ بسیار زیادی دارد و یا از سفره های آب زیرزمینی و یا معادن مختلف استفاده کرد.

هوای فشرده را می توان با تلفات بسیار اندک در محفظه نگهداری نمود و در مواقع لزوم، بعد از خروج، در اتاق احتراق با مقداری سوخت مخلوط و سپس به توربین گازی انتقال و در نهایت با استفاده از ژنراتور، از آن برق تولیدکرد.

روش ذخیره سازی CAES با استفاده از محفظه های طبیعی که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است و کاربردی معادل استفادهٔ کمپرسور در نیروگاه گازی بدون اینکه بیش از نیمی از ظرفیت تولید توربین های گازی برای چرخاندن کمپرسور صرف شود، منجر به مطرح شدن ایدهٔ ساخت نیروگاههای گازی در محل هایی که امکان استفاده از محفظه های زیرزمینی وجود دارد، شده است.

شکل ۱۹: شمای بهره برداری از یک سیستم ذخیره سازی CAES



در این صورت می توان در ساعات غیر پیک، کار کمپرسور نیروگاه را با استفاده از سیستم CAES انجام داد و در ساعات پیک کمپرسور نیروگاه را از مدار خارج کرد، بدین ترتیب قابلیت تولید را تقریباً دو برابر نمود. بعد از روش تلمبه ذخیره ای، سیستم CAES دارای بزرگترین ظرفیت بین دخیره سازها است.

ظرفیت های معمول سیستم های CAES در حدود ۵۰ تا ۳۰۰ مگاوات است و به دلیل کمی تلفات این سیستم، طول دوره ذخیره به یک سال هم می رسد. زمان راه اندازی سیستم CAES در حد ۱۰ دقیقه است که نسبت به زمان مشابه برای نیروگاههای گازی (۳۰-۲۰ دقیقه) کمتر است. چگالی انرژی معمولی هوای فشرده در حدود ۱۰۸٦ ژول بر گرم است . نمونه های سیستمCAES، شامل یک واحد ۲۹۰ مگاواتی در کشور آلمان و یک واحد ۱۱۰ مگاواتی در کشور آمریکا است.

جدول ۱۲: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره سازی CAES [۱۶]

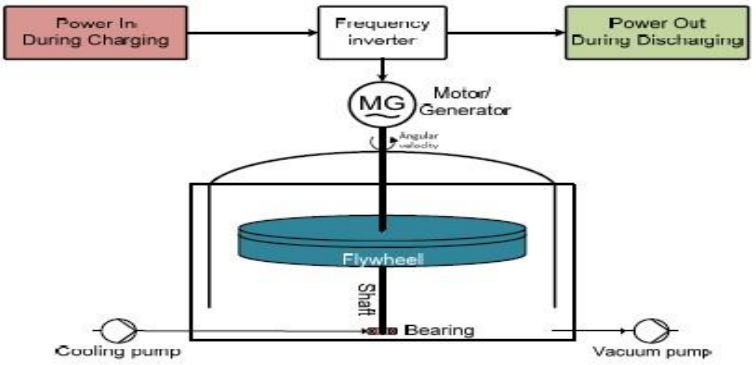
Parameters for Adiabatic Compressed Air Energy Storage[14]	All numbers are indications and my vary significantly among different products and installations	
	Today	2030
Round-trip efficiency	60 % to 70 %	
Energy density	3 Wh/ l (at 100 bar) to 6 Wh/ l (at 200bar)	
Power density	n. a.	
Cycle life	Not limiting	
Calendar Life	Ca. 25 years	
Depth of discharge	35 % to 50%	
Self-discharge incl. thermal storage	0.5 %/ day to 1 %/ day	
Power installation cost	1000 €/ kW	700 €/ kW
Energy installation cost incl. thermal storage	40 €/ kWh to 80 €/ kWh	
Deployment time	about 3 min. to 10 min.	
Site requirements	Possibility to build a cavern, e.g. salt cavern	
Main applications	Frequency control, Voltage control, Peak shaving, Load leveling, Standing reserve, Black start	

ذخیره ساز چرخ طیار[۱۶]

چرخ طیار (فلایویل) انرژی الکتریکی را از طریق تبدیل به انرژی جنبشی ذخیره می نماید. این عمل از طریق افزایش سرعت یک روتور و نگهداری انرژی به صورت انرژی چرخشی صورت می گیرد. سرعت روتور با گرفتن انرژی کاهش و با دادن انرژی افزایش می یابد. اجزای اصلی سیستم ذخیره ساز چرخ طیار شامل: موتور/ ژنراتور، چرخ طیار، یاتاقان ها، محفظه خلا و سیستم کنترل است.

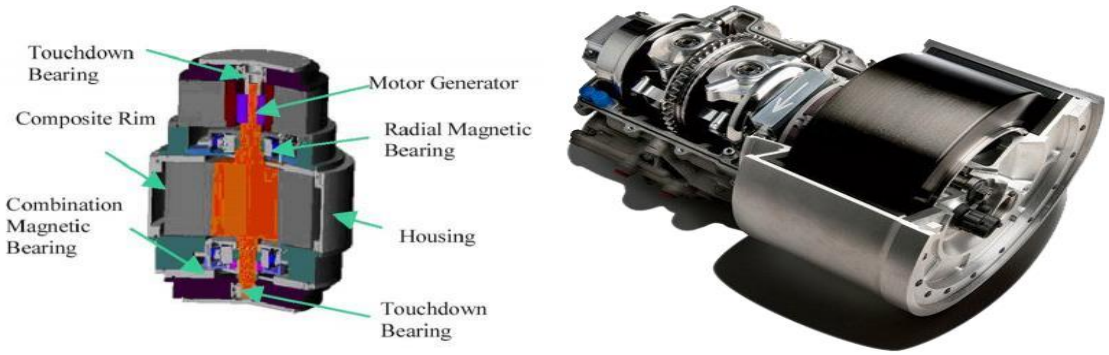
[16] **Flywheel Energy Storage (FES)**

شکل ۲۰: نحوه عملکرد سیستم ذخیره ساز چرخ طیار(فلایویل) [۱٦]



این سیستم، در ساعات غیر پیک انرژی را از شبکه گرفته و با استفاده از موتور خود، چرخ طیار را به گردش در می آورد و در ساعات پیک، شبکه این انرژی جنبشی را استفاده می نماید. از آنجا که انرژی ذخیره شده در داخل چرخ طیار با مربع سرعت دورانی آن رابطه مستقیم دارد، برای افزایش انرژی ذخیره شده در چرخ طیار باید سرعت دورانی آن را افزایش داد. انرژی ذخیره شده پس از مدتی به صورت اصطکاک تلف می شود و روتور از حرکت باز می ایستد و عملاً استفادهٔ از FES را مقدور نمی کند. منشاء این مشکل، به وجود آمدن تنش در چرخ بر اثر نیروها و اینرسی های دورانی می باشد. برای رفع آن روتورهای جدید ساخته شده از رشته های کربن – کامپوزیت با سرعت گردش حدود ۱۰ هزار تا ۲۰ هزار دور در دقیقه جایگزین روتورهای معمول فلزی با سرعتی دود ٤ هزار دور در دقیقه شدند و با توجه به اینکه چرخ های کامپوزیتی دارای وزن کمتری هستند در یک سرعت دورانی خاص تنش های کمتری در آنها ایجاد شد. علاوه براین، مواد کامپوزیتی جدید مقاوم تر از مواد قدیمی هستند. در مجموع چرخ طیارهای جدید در مقایسه با نوع قدیمی آن وزن کمتر، مقاومت بالاتر و قابلیت دوران در سرعت های بسیار بالا تر را دارند.

شکل ۲۱: یک نمونه ذخیره ساز چرخ طیار و اجزاء آن [۹]



از مزایا و معایب چرخ طیارها ی قدیمی می توان به موارد زیر اشاره کرد:

مزایا:

- جنس فولادی- ایمن – قابل پیش بینی
- سرعت های دورانی پایین که باعث ساده شدن طراحی می شود
- مواد اولیه ارزان قیمت که باعث کاهش هزینه تمام شده می شود

معایب:

- انرژی و قدرت پایین
- نیاز به چندین مجموعه یاتاقان
- استهلاک آیرودینامیکی و صدای بیشتر

برای رفع مشکل اصطکاک در چرخ طیار ها، از محفظه خلا و یاتاقان های مغناطیسی، استفاده می شود که تلفات آن تقریباً ناچیز است. در این روش، یاتاقان های مغناطیسی روتور را با استفاده از میدان مغناطیسی نگاه می دارند تا از تماس های مکانیکی ای که در یاتاقان های معمولی موجب تلفات زیاد می شود جلوگیری کنند. همچنین وجود خلا مانع از تلفات اصطکاک با هوا می شود.

سیستم مزبور برای بهبود کیفیت توان مورد استفاده قرار می گیرد و تا حدودی قابلیت پیک سایی را داراست.

از مزایا و معایب چرخ طیارها ی جدید می توان به موارد زیر اشاره کرد:

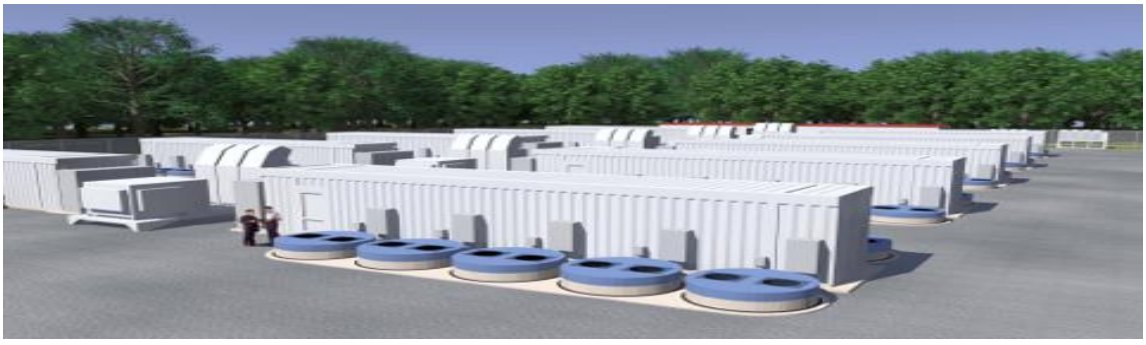
مزایا:

- فشردگی و حجم کم
- کارایی بالا
- تعمیر و نگه داری کم و ناچیز
- عدم وجود صدا و نویز

معایب:

- ملاحظات ایمنی
- هزینه بالای مواد اولیه
- قیمت بالای یاتاقان های مغناطیسی
- تنش زیاد وارد شده بر روتور در سرعت های زیاد و احتمال پاشیده شدن آن به صورت انفجاری است.

شکل ۲۲: محوطه ای شامل مجموعه ای از ذخیره سازهای چرخ طیار[۹]



یکی از کاربردهای فناوری چرخ طیار (فلایویل)، استفاده از سیستم ذخیره ساز انرژی چرخ طیار جهت ایجاد اینرسی مجازی در شبکه های مستقل با اینرسی کم است.

استفاده از شبکه های مستقل با تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر انرژی، یکی از گزینه ها برای تامین انرژی الکتریکی در برخی مناطق دورافتاده و با فاصله زیاد از شبکه سراسری برق است. با توجه به عدم کنترل و نوسان توان در منابع تجدیدپذیر، توان تولیدی از این منابع نیز دارای نوسان خواهند بود. بنابراین بایستی توان تولیدی ژنراتورهای منابع تجدیدپذیر توسط مبدل های الکترونیک قدرت به شبکه وارد شوند.

از آن جایی که ژنراتورهای تولید توان از منابع تجدیدپذیر دارای اینرسی کمی هستند به گونه ای که برخی منابع تجدیدپذیر (مانند سلول های خورشیدی) ذاتاً بدون اینرسی اند. لذا این نوع شبکه ها، شبکه با اینرسی کم نیز نامیده می شود. شبکه با اینرسی کم در برابر تغییرات ناگهانی توان آسیب پذیر بوده و امکان ناپایداری آنها در اثر اختلال های فرکانسی معمولی نیز وجود دارد. برای حفظ پایداری شبکه و کنترل فرکانس در صورت بروز اغتشاش در شبکه های مستقل، معمولاً یا بارزدایی صورت می گیرد یا بخشی از ظرفیت تولید از مدارخارج می شود. در حالی که با تزریق یا جذب توان لحظه ای به موقع در شبکه توسط یک ذخیره ساز چرخ طیار می توان پایداری شبکه را بدون وقفه در تامین بار حفظ نمود که این روش ایجاد اینرسی مجازی در شبکه با اینرسی کم نامیده می شود.

بطور کلی کاربر این فناوری را می توان به شکل زیر بیان نمود:

- ایجاد پایداری و میرایی در سیستم (System stability and damping)

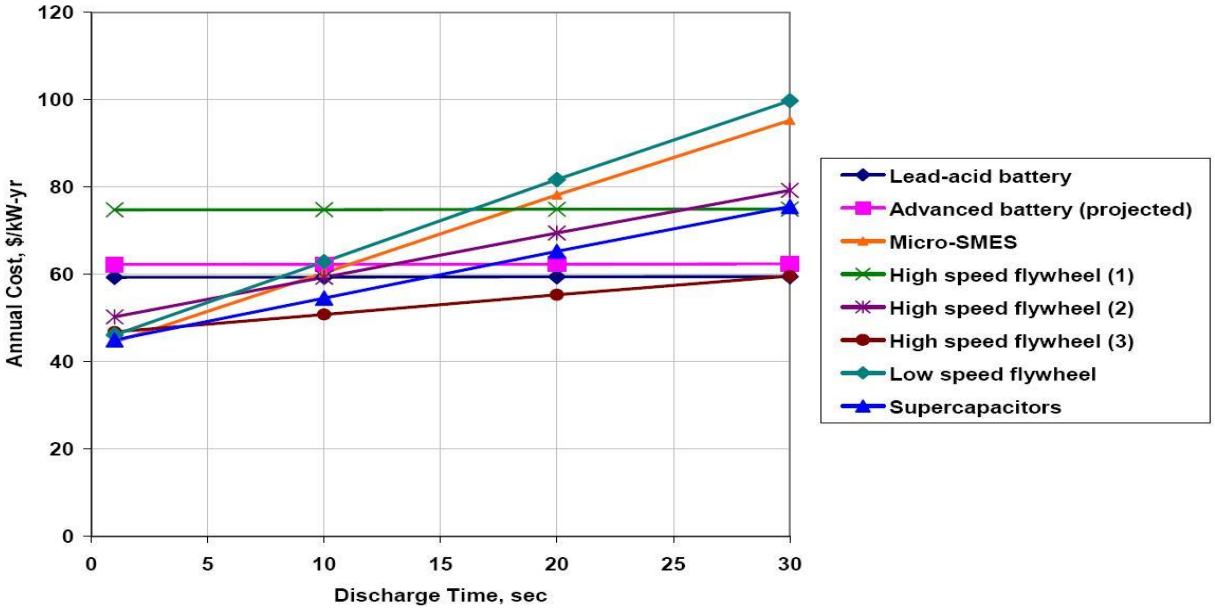
- کیفیت توان (Power quality)
- تسطیح بار (Load levelling)

در مقایسه با باطری های سرب- اسید(Lead-Acid)، چرخ طیار ها سرعت تخلیهٔ بالاتری، طول عمر بیشتر، کم خطرتر و احتیاج بسیار کمی به تعمیرات و نگهداری دارند و برای کاربردهای پیشرفته مناسب می باشند. اما درحال حاضر نسبتاً گران بوده و ظرفیت ذخیره سازی آنها در مقایسه با سایر ذخیره سازها پایین است. با تولید تجاری انواع جدید آن و پیشرفت تکنیک های ساخت، انتظار می رود که این ذخیره سازها در آینده توانایی رقابت بیشتری با سایر ادوات راداشته باشند.

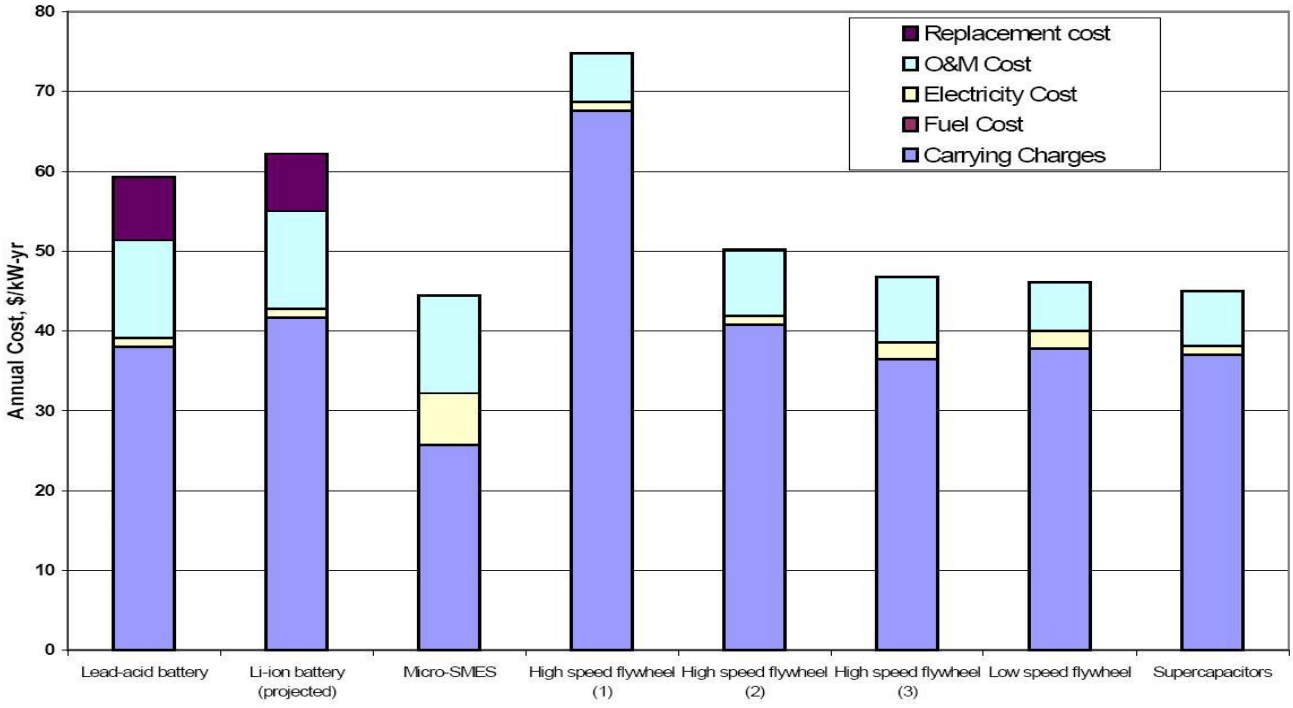
جدول ۱۳: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره سازی چرخ طیار[١٦]

Parameters for Flywheels	All numbers are indications and my vary significantly among different products and installations	
	Today	2030
Round-trip efficiency	80 % - 95 %	No numbers available
Energy density	80 Wh/ l to 200 Wh/ l[15]	
Power density	10 kW/ l[16]	
Cycle life	several millions	
Calendar Life	15 years	
Depth of discharge	75 %	
Self-discharge	5 to 15%/hour	
Power installation cost	300 €/ kW	
Energy installation cost (high speed flywheel)	1,000 €/ kWh	
Deployment time	about 10 ms	
Site requirements	None	
Main applications	Primary frequency control, voltage control, Peak shaving, UPS	

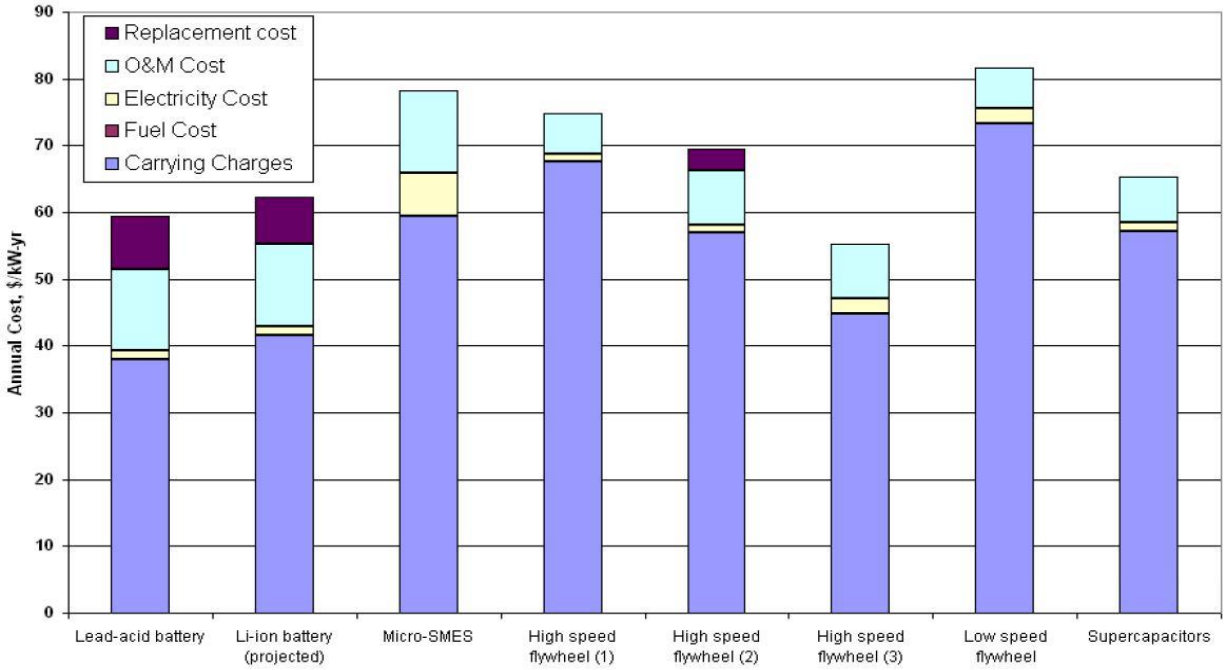
شکل ۲۳: مقایسه هزینه سه نوع چرخ طیار (زمان دشارژ متفاوت) با فناوری های دیگر ذخیره ساز برای کاربرد کیفیت توان[۹]



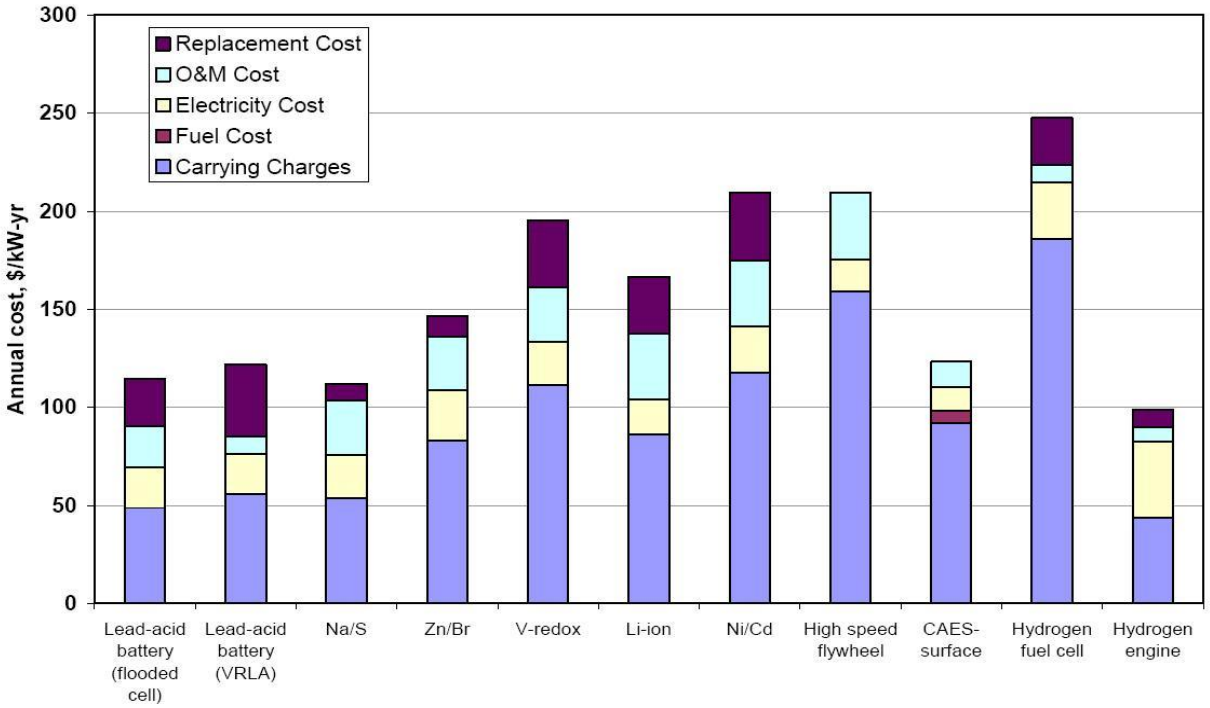
شکل ۲٤: مقایسه هزینه سه نوع چرخ طیار(زمان دشارژ متفاوت) با فناوری های دیگر ذخیره ساز برای کاربرد کیفیت توان برای ۱ ثانیه دشارژ [۹]



شکل ۲۵: مقایسه هزینه سه نوع چرخ طیار (زمان دشارژ متفاوت) با فناوری های دیگر ذخیره ساز برای کاربرد کیفیت توان برای ۲۰ ثانیه دشارژ [۹]



شکل ۲٦: مقایسه هزینه سه نوع چرخ طیار (زمان دشارژ متفاوت) با فناوری های دیگر ذخیره ساز برای کاربرد کیفیت توان برای ۱ ساعت دشارژ [۹]

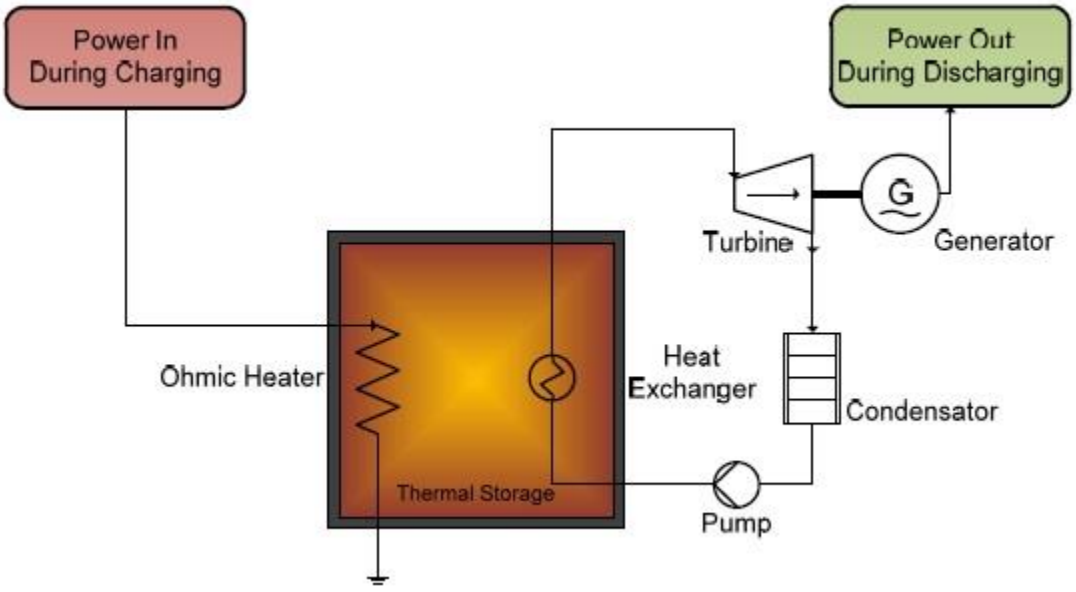


روش ذخیره سازی حرارتی

سیستم های ذخیره سازی انرژی حرارتی دما بالا[17]

از کاربردهای سیستم های ذخیره ساز انرژی ترموالکتریک دما بالا (TEES) ذخیره سازی انرژی الکتریکی است. در این سیستم طی فرآیند شارژ، حرارتی حدود ۵۰۰ درجه سانتی گراد توسط گرمکن ایجاد شده و در خشت های اکسید منیزیوم (این روش به نام ETS معروف می باشد) و یا نمک مذاب ذخیره می شوند ودر فرآیند دشارژ، حرارت از سیستم ذخیره ساز خارج شده و با تولید بخار توربین را به حرکت درمی آورد. استفاده از پمپ ها در این سیستم امکان پذیر است ولی باعث پیچیدگی آن می شود.

شکل ۲۷ : نحوه عملکرد سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی دما بالا [١٦]



[17] **High Temperature Thermal Energy Storage Systems**

شیوه کار سیستم های TEES، مشابه سیستم های تلمبه ذخیره ای و CAES است با این تفاوت که برای کاربردهای میان مدت مناسب است.

این فناوری هم اکنون در حال تحقیق است و ظرف ۵ تا ۱۰ سال آینده به بازار معرفی شود. برای این فناوری اطلاعاتی درخصوص پارامترها و محدوده آن ها در دسترس نیست ولی پیش بینی می شود در ظرفیت های مگاواتی مقرون به صرفه باشد.

جدول ١٤: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی دما بالا [١٦]

Parameters for Thermoelectric Storage[19]	All numbers are indications and my vary significantly among different products and installations	
	Today	2030
Round-trip efficiency	Not available, as technology is in concept phase	
Energy density		
Power density		
Cycle life		
Calendar Life		
Depth of discharge		
Self-discharge		
Power installation cost		
Energy installation cost		
Deployment time		
Site requirements		
Main applications	Frequency control, Voltage control, Peak shaving, Load leveling, Standing reserve, Black start (expected)	

سیستم های ذخیره سازی انرژی حرارتی محسوس[18]

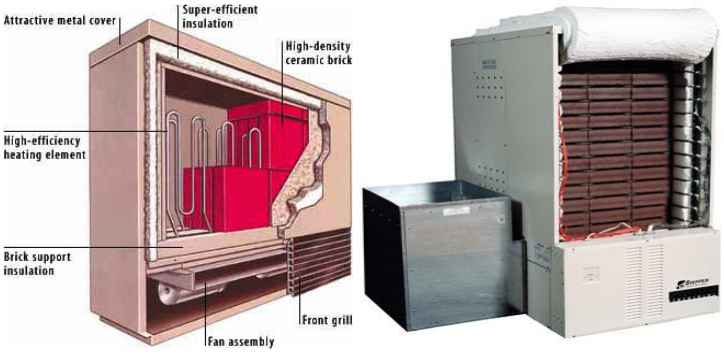
در این روش که به عنوان یکی از روش های ETS[19] شناخته می شود، انرژی ذخیره شده برای هر دو منظور سرمایش و گرمایش استفاده شود. این سیستم در ساعات غیر پیک انرژی الکتریکی را از

[18] Sensible Heat Storage

شبکه دریافت کرده و ذخیره می کند و در ساعات پیک مصرف به عنوان سیستم تهویه مورد استفاده قرار می گیرد. این سیستم باعث شیفت پیک بار الکتریکی به مدت چند دقیقه تا چند ساعت می شود. در ساعات غیر پیک با توجه به نیاز مصرف که ممکن است گرمایش و یا سرمایش باشد، ماده واسط گرم و یا سرد می شود و در ساعت پیک تنها با دمیدن هوا از روی ماده واسط، گرما یا سرمای مطلوب به دست می آید. واسط ذخیر ه ساز انرژی حرارتی، می تواند آب ذخیره شده در تانک، لایه های زیرزمینی و یا فونداسیون بتنی ساختمان ها باشد. این نوع ETS ها دارای به طور متوسط چگالی حجمی انرژی به میزان ۲۵ کیلووات ساعت بر متر مکعب هستند و ایراد آنها دمای متغیر در هنگام دشارژ است.از مزایای این سیستم می توان به موارد زیر اشاره کرد:

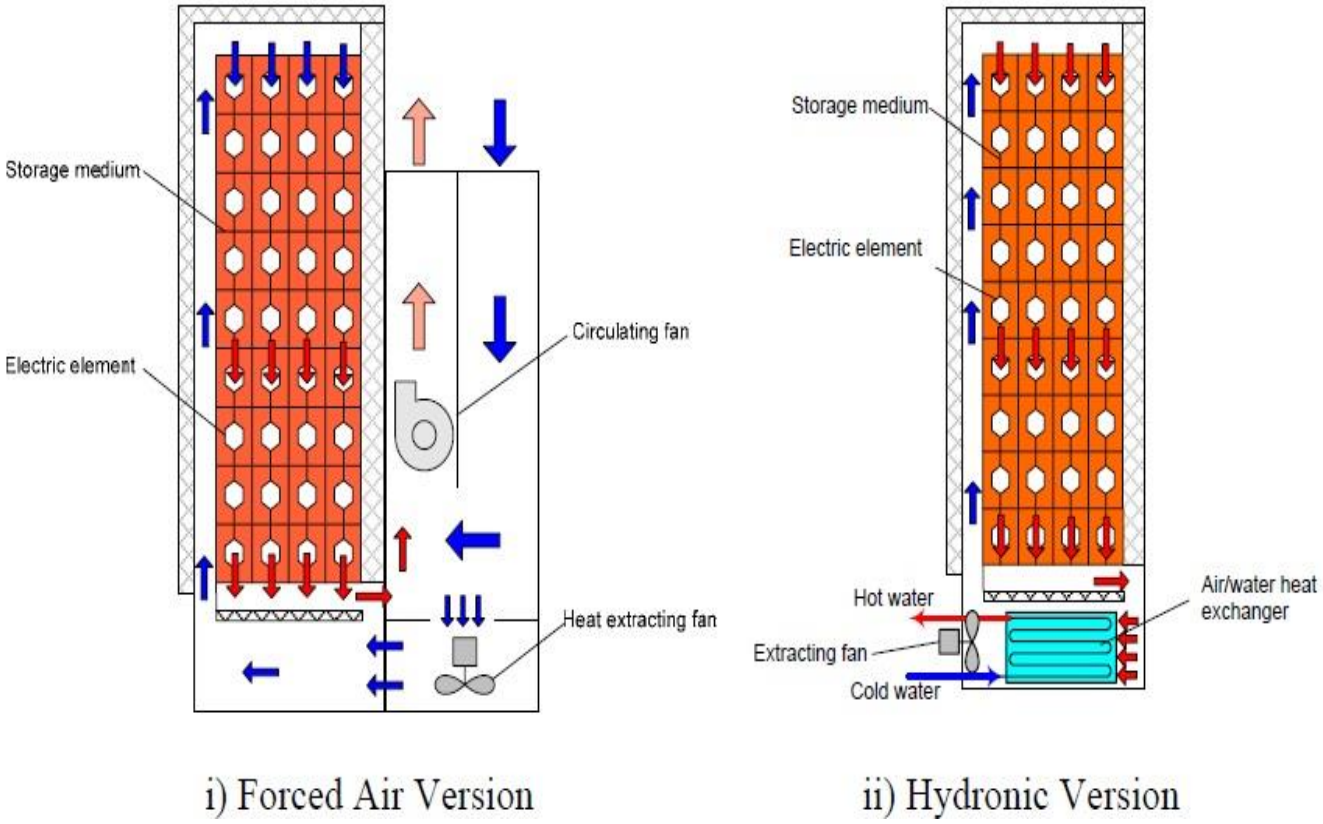
- عدم نوسانات بالا در خروجی
- گرمایش و سرمایش تمیز و قابل اعتماد است
- برای نگهداری فقط تعویض روتین فیلتر هوا لازم است
- عدم ایجاد آلاینده مثل مونوکسید کربن
- عدم نیاز به پرکردن مخزن سوخت و کنترل آن

شکل ۲۸: ساختمان داخلی و یک نمونه ذخیره ساز حرارتی برق

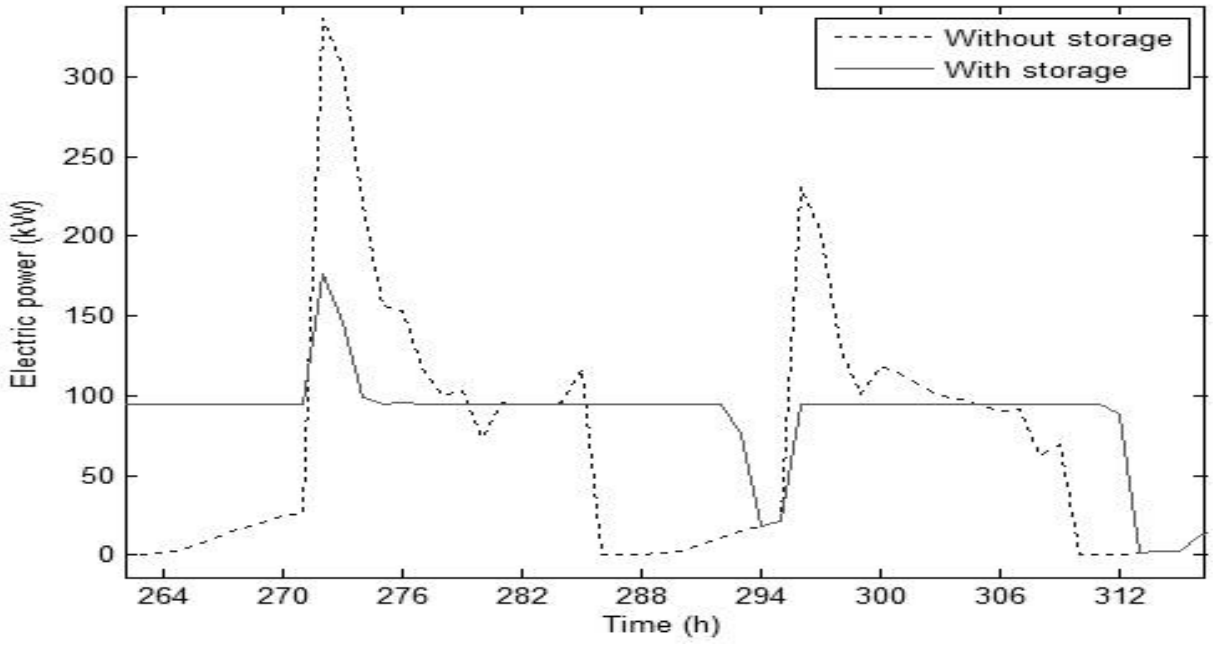


[19] Energy Thermal Storage

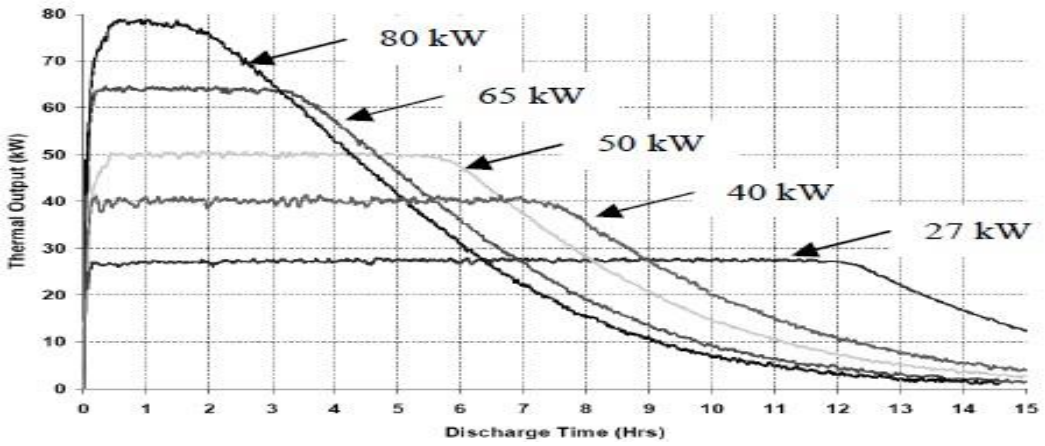
شکل ۲۹: دو مدل از ذخیره سازهای حرارتی برق[۷]



شکل ۳۰: منحنی تقاضای بخش ساختمان های تجاری در ماه دسامبر با و بدون این نوع ذخیره ساز[٦]



شکل ۳۱: منحنی تامین بار گرمایش در تقاضاهای متفاوت گرما و مدت زمان دشارژ آن[٦]



سیستم های ذخیره سازی انرژی حرارتی ناپیدا[۲۰]

در این روش که به عنوان یکی از روش های ETS شناخته می شود، همانند سیستم های ذخیره سازی انرژی حرارتی محسوس در ساعات غیر پیک انرژی الکتریکی از شبکه گرفته می شود و با توجه به نوع مصرف گرمایش یا سرمایش به شکل حرارتی ذخیره می گردد و سپس در ساعات پیک مصرف به عنوان سیستم تهویه مورد استفاده قرار می دهد. مزایای این روش نیز همانند روش قبلی است با این تفاوت که در اینجا از ماده واسطی که در هنگام شارژ و دشارژ قابلیت تغییر فاز (Phase changes) دارد، استفاده می شود.

به عنوان مثال اگر از آب به عنوان مادهٔ واسط استفاده شود، چگالی حجمی انرژی ۱۰۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب و اگر از پارافین استفاده شود تا حدود ۳۰۰ کیلووات ساعت بر متر مکعب قابل دسترسی است. با توجه به اینکه در حال تغییر فاز اختلاف دمایی در ماده واسط به وجود نمی آید،

[20] Latent Heat Storage

لذا دمای ثابت در هنگام دشارژ از مزایای این ذخیره ساز است. این سیستم برای مناطقی پیشنهاد می شود که روند تهویه مطبوع گرمایش آنها نیز مانند تهویه سرمایش با استفاده از انرژی الکتریکی صورت می گیرد.

از پروژه هایی که در آن از ETS استفاده شده است می توان به ذخیره ساز حرارتی برق کنتاکی در آمریکا اشاره نمود. شرکت برق جنوب کنتاکی برای مشترک هایی که با استفاده از ذخیره سازها (همانند همین نوع ذخیره ساز) به شیفت زمان مصرف برق کمک می نمایند، ٤٠٪ تخفیف در نرخ برق اختصاص داده است. مورد مشابه در Nova Scotia کانادا نیز وجود دارد.

روش ذخیره سازی شیمیایی

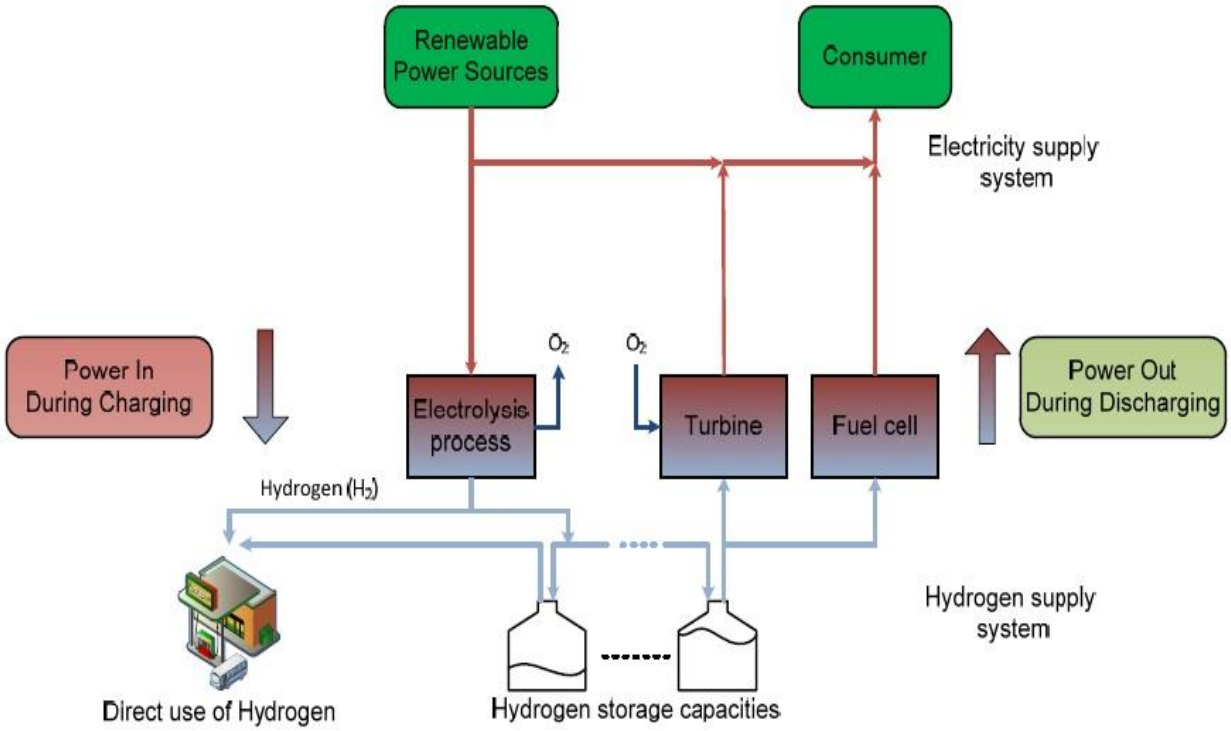
سیستم های ذخیره سازهای شیمیایی با ذخیره سازی داخلی

سیستم ذخیره سازی هیدروژن [۲۱]

هیدروژن مایع دارای چگالی انرژی کم تری از لحاظ حجم وگنجایش درمقایسه با سوخت هیدروکربن می‌باشد. فرایند شارژ توسط برق از طریق الکترولیز انجام می شود. هیدروژن تولیدی فشرده شده و به عنوان مثال در غار های نمکی و یا مخازن خاص ذخیره می شوند. هیدروژن پس از فرآیند دشارژ، در توربین های انبساطی و یا پیل های سوختی مورد استفاده قرار می گیرد. علاوه بر این برق تولیدی از هیدروژن به طور مستقیم در اتومبیل های هیدروژنی که با پیل های سوختی کار می کنند، موتورهای احتراق داخلی و یا تولید گرما استفاده می شود.

[21] Hydrogen Storage System (HSS)

شکل ۳۲: نحوه عملکرد سیستم ذخیره ساز هیدروژن[۱۶]



دانسیته کم هیدروژن در حالت گازی، کاربرد هیدروژن را بعنوان حامل انرژی با مشکل روبرو ساخته است .بدین معنی که نسبت به سوختهای مایع همچون بنزین یا متانول از محتوای انرژی کمی به ازاء هر واحد حجم برخوردار است)حدود ۱۲۰/۷ کیلوژول به ازاء هرکیلوگرم (و به این دلیل بعنوان سوخت موشک از آن استفاده می گردد.هیدروژن مایع بالاترین دانسیته انرژی را نسبت به کلیه سوختها داراست. ذخیره‌سازی هیدروژن مایع نیاز به برودت دارد زیرا هیدروژن در ۲۵۲/۸۸۲- درجه سانتی گراد یا ٤۲۳/۱۷- درجه فارنهایت به جوش می‌آید.

از این رو جهت رسیدن به حرارت مطلوب مستلزم مصرف انرژی زیاد است. به منظور جلوگیری از جوشش زیاد می‌بایست مخزن‌های مناسبی نصب شوند البته افزودن عایق هزینه‌های بالاتری را در پی دارد.

جدول ۱۵: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره سازی هیدروژن[۱۶]

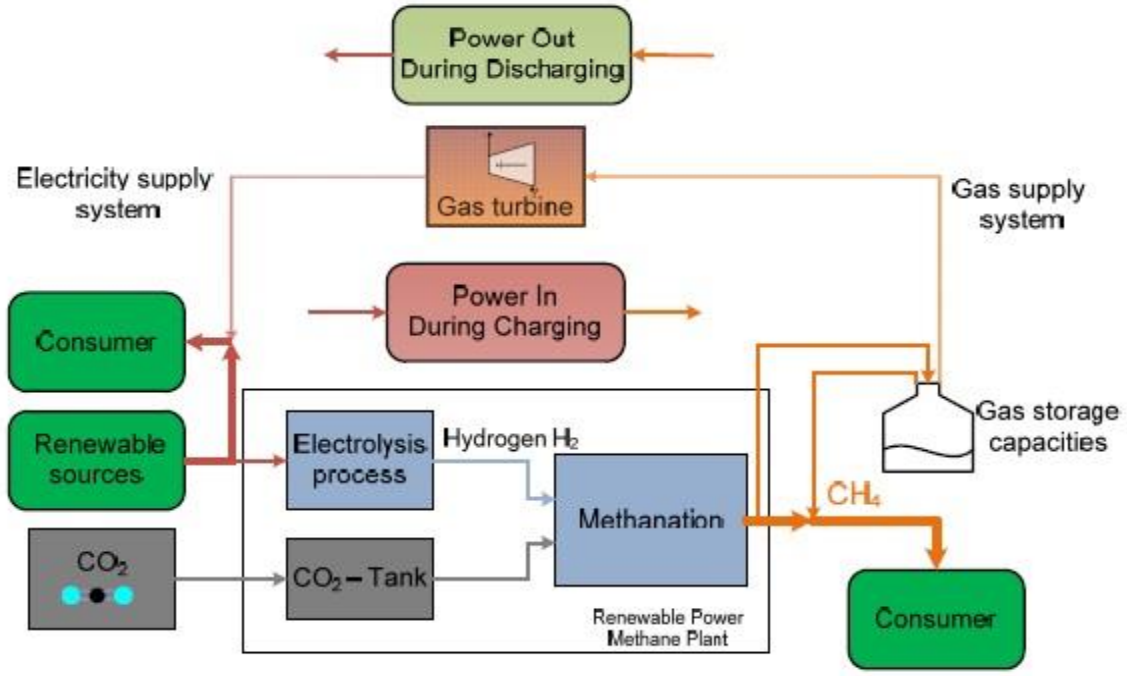
Parameters for Hydrogen Storage	All numbers are indications and my vary significantly among different products and installations	
	Today	2030
Round-trip efficiency	34 % to 40 %	40 % to 50 %
Energy density	3 Wh/l (at normal pressure), 750 Wh/l (at 250 bar), 2400 Wh/l (liquid)	
Power density	n. a.	
Cycle life	n. a.	
Calendar Life	n. a.	
Depth of discharge	40% to 60 %	
Self-discharge	0.03 %/ day to 0.003 %/ day	
Power installation cost	1,500 €/ kW to 2,000 €/ kW	500 €/ kW to 800 €/k W
Energy installation cost	0.3 €/ kWh to 0.6 €/ kWh (cavern)	
Deployment time	10 min.[20]	
Site requirements	Underground cavern, storage in tanks expensive	
Main applications	Seasonal storage, Island grid	

سیستم برق به گاز : متاناسیون / گاز طبیعی مصنوعی[۲۲]

ذخیره سازی گاز طبیعی مصنوعی یک جایگزین برای فناوری ذخیره سازی هیدروژن می باشد. متاناسیون "methanation" که یک واکنش حرارت زا است که به فرایند فیشر- تروپش شناخته شده ، فرآیندی است که گاز طبیعی مصنوعی را از هیدروژن و دی اکسید کربن تولید می کند. محصول نهایی آن متان است که تشکیل دهنده اصلی گاز طبیعی و در نتیجه به طور کامل با زیربنای گاز طبیعی سازگار است. بنابراین، می توان بدون محدودیت آن را به شبکه گاز طبیعی تزریق کرد. ظرفیت ذخیره سازی آن حدود ٤٠٠ تراوات ساعت (همانند شبکه گاز آلمان) است که می تواند برای اهداف ذخیره سازی میان مدت و بلند مدت استفاده شود.

[22] Power to Gas: Methanation / Synthectic Natural Gas (PG)

شکل ۳۳ : نحوه عملکرد سیستم ذخیره ساز برق به گاز [۱۶]



مزیت عمدهٔ متاناسیون استفاده مستقیم از هیدروژن است که دقیقاً با زنجیره ارزش موجود گاز طبیعی سازگاری کامل دارد. اشکال اصلی آن هم کاهش راندمان و افزایش هزینه می باشد.

به علاوه این فرآیند نیاز به منبع خارجی CO2 داشته و اتلاف حرارتی نیز دارد. اگر این گرما برای گرم کردن واحدهای مسکونی و یا فرآیندهای صنعتی مورد استفاده قرار نگیرد آنگاه راندمان کلی بیشتر کاهش خواهدیافت. نیروگاه متعارف و یا بیوگاز می توانند به عنوان منبع CO2، به کار گرفته شوند. عدم همزمانی دوره زمان برق اضافی برای متاناسیون و دوره زمانی تولید CO2 توسط نیروگاه، باعث عدم همزمانی فرآیند سوزاندن کربن برای تولید انرژی و استفاده از برق برای تولید متان می شود. به عبارت دیگر ذخیره سازی دی اکسید کربن، تحمیل هزینه اضافی به سیستم می باشد.

جدول ١٦ : مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره ساز برق به گاز [١٦]

Parameters for Power to Gas Storage	All numbers are indications and my vary significantly among different products and installations	
	Today	2030
Round-trip efficiency	30 % to 35 %	35 % to 40 %
Energy density	Approx. three times higher than hydrogen	
Power density	n. a.	
Cycle life	n. a.	
Calendar Life	n. a.	
Depth of discharge	40% to 60 %	
Self-discharge	0.03 %/ day to 0.003 %/ day	
Power installation cost	1,000 €/ kW to 2,000 €/ kW[21]	
Energy installation cost	No additional cost for storage in gas grid	
Deployment time	10 min.	
Site requirements	Underground cavern or gas grid access, external CO_2-source, heat demand	
Main applications	Seasonal storage, Island grid	

باطری های جریانی[٢٣]

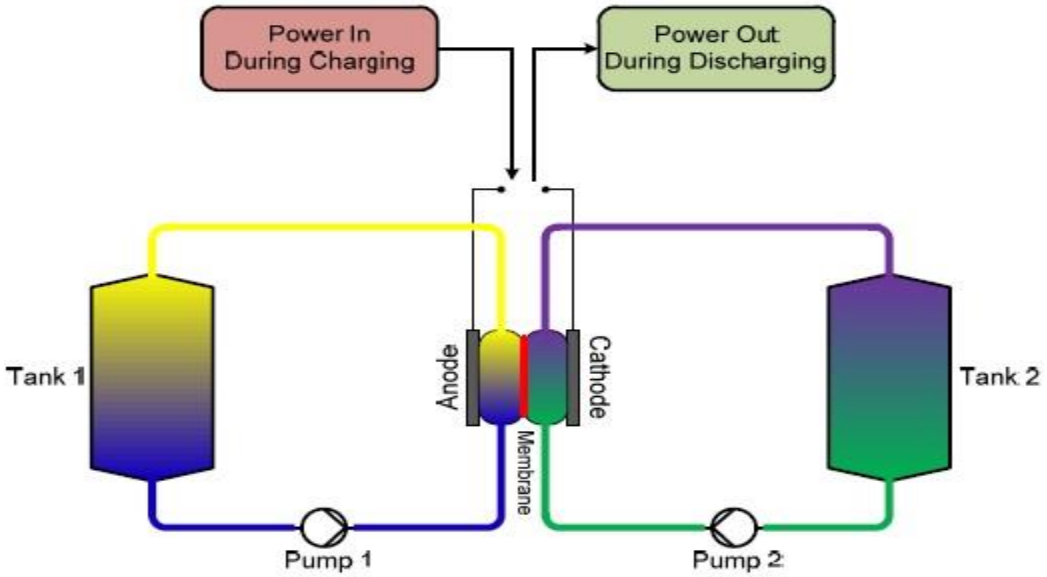
استفاده از باطری های جریانی، شیوه ای کم هزینه و در عین حال کارآمد برای ذخیره انرژی تولید شده در منابعی نظیر نیروگاه های خورشیدی و بادی هستند. این باطری ها دارای ساختاری شبیه به باطری های اسیدی هستند با این تفاوت که در آنها ماده ی الکترولیت در مخزنی خارجی نگه داری می شود.

باطری های جریانی نوعی باطری قابل شارژند که در آن دو مایع با بار الکتریکی متفاوت (که در اصطلاح الکترولیت نام دارد) با یکدیگر یون مبادله کرده و از این تبادل یون انرژی الکتریکی تولید می شود. الکترولیت ها توسط مادهٔ حائل به صورت مجزا از هم، درون دو محفظه بزرگ قرار دارد و الکترولیت برحسب نیاز به درون این محفظه‌ها پمپاژ می شود. به این ترتیب با تغییر میزان الکترولیت

[23] Flow Batteries

موجود می توان انـرژی الکتریکـی تولیـدی را کنتـرل کـرد و خروجـی ایـن بـاطری هـا را از چنـد کیلـووات تا چند مگاوات تغییر داد.

شکل ۳٤: نحوه عملکرد باطری جریانی [۱٦]



مزایا:

- بـدون ایـن کـه بـار الکتریکـی خـود را از دسـت دهـد مـدت زیـادی بـدون تولیـد بـرق در حالـت غیرفعال باقی می ماند
- زمان شارژ و دشارژ بسیار کوتاه
- کنترل انرژی الکتریکی تولیدی

معایب:

- پیچیده بودن ساختار
- نیاز به حسگرها و پمپ های ویژه
- خوردگی شدید ماده گرانقیمت حائل و در نتیجه کاهش شدید عمر مفید باطری و هزینه بالا
- چگالی انرژی کمتر از انواع لیتیوم یونی

جدول ۱۷ : مشخصات فنی و محدوده پارامترهای باطری جریانی [۱۶]

Parameters for Flow Batteries	All numbers are indications and my vary significantly among different products and installations	
	Today	2030
Round-trip efficiency	60 % to 70 % (depending on chemistry)	65 % to 80 % (depending on chemistry)
Energy density	20 Wh/ l to 70 Wh/ l (depending on chemistry)	> 100 Wh/l
Power density	n. a.	
Cycle life	> 10,000	
>Calendar Life	10 years to 15 years	15 years to 25 years
Depth of discharge	100 %	
Self-discharge	0.1 % to 0.4 % per day	0.05 % to 0.2 % per day
Power installation cost	1000 €/ kW to 1,500 €/ kW	600 €/ kW to 1,000 €/ kW
Energy installation cost	300 €/ kWh to 500 €/ kWh	70 €/ kWh to 150 €/ kWh
Deployment time	seconds[22]	
Site requirements	None	
Main applications	Secondary/Tertiary frequency control, Long-term storage, Island grids	

باطری جریانی طراحی شدهٔ جدید می تواند بیش از ۷۹۵ میلی وات به ازای هر سانتی مترمربع انرژی الکتریکی تولید کند که این میزان سه برابر دیگر شیوه های تولید برق بدون ماده حائل و ده برابر بیشتر باطری های لیتیوم یونی است. این نوع باطری ها از لحاظ جریان دهی بسیار پرقدرت می باشند و توان جریان دهی آنها با حجم مخزن الکترولیت رابطه ی مستقیم دارد .

سیستم های ذخیره سازهای شیمیایی با ذخیره سازی خارجی

سیستم های ذخیره ساز شیمیایی با ذخیره سازی خارجی عمدتاً شامل باطری ها می باشند. آنها تجهیزات الکترودینامیکی ای هستند که جهت ذخیره انرژی از منابع DC یا AC برای استفاده در آینده به کار می روند. این فناوری که بیش از ۱۵۰ سال قدمت دارد از رایج ترین ذخیره سازهایی است که گستردگی کاربرد آن در طول زنجیره عرضه تا مصرف انرژی الکتریکی به چشم می خورد و به خصوص برای نیروگاه های ترکیبی انرژی های تجدیدپذیر کاربرد مناسبی دارد. باطری ها در

زمانی که تقاضای بار پایین است یا منابع ریزشبکه توانایی تامین تقاضای بار را نداشته باشند به کار می روند.

باطری ها انواع مختلفی دارند که پر کاربردترین آنها لید–اسید (Lead-Acid) و لیتیوم– یون (Lithium-ion) می باشند. این نوع باطری ها نسبتاً ارزان بوده و به دوره زمانی بلوغ خود رسیده اند و محدودیت ها، نقص و ایرادات فنی و همچنین در صورت نیاز تعمیرات و نگهداری آنها به خوبی شناخته شده است. از این باطری ها برای اکثر کاربردها می توان استفاده کرد.

باطری ها از سه منظر قابل توجه می باشند:

- قابلیت اطمینان:

  باطری ها در هنگام بروز یک اختلال در سیستم به کمک منابع تولید آمده و کمبود توان ریزشبکه را تا برگشتن به وضعیت عادی جبران می کنند. در این وضعیت وظیفه حفظ فرکانس ریزشبکه در محدوده مجاز برعهده باطری ها می باشد.

- مدیریت بار:

  باطری ها با ذخیرهٔ توان در ساعات کم باری و ارائه انرژی در ساعات اوج بار باعث جلوگیری از تحت فشار قرار گرفتن واحدهای ریزشبکه خواهند شد.

- اقتصادی:

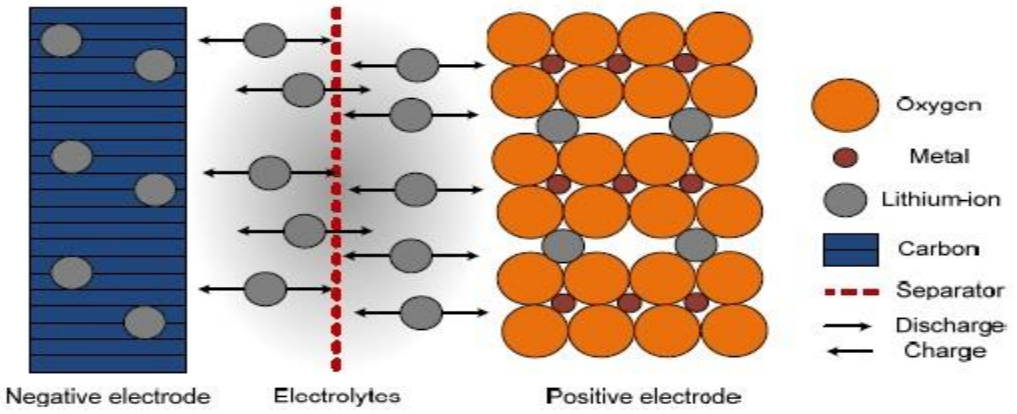
  باطری ها با خرید انرژی از شبکه اصلی در ساعاتی که قیمت انرژی پایین است و فروش انرژی ذخیره شده در ساعاتی که قیمت برق بالا می باشد، می توانند سود قابل توجهی را فراهم نمایند.

باتوجه به این کـه بـاطری هـا در کنـار سـایر منـابع از جملـه تـوربین هـای بـادی قرارمـی گیرنـد، در بیشـتر ساعات از انرژی مولدهای نزدیـک خـود بـرای شـارژ اسـتفاده مـی نماینـد و در هنگـام دشـارژ نیـز بارهـای مجاور خود را تغذیه می نمایند. ایـن موضـوع در حـد نـاچیزی میـزان تلفـات را افـزایش مـی دهـد ولـی بـه علـت ذخیـره انـرژی در سـاعات ارزان و تخلیـه آن در سـاعات اوج بـار شـبکه کـه قیمـت انـرژی در آن بالاست، باطری ها باعث کاهش قابل توجه مجموع هزینه های بهره برداری می شوند.

باطری لیتیم- یون [٢٤]

به طـور کلـی هـر بـاطری از سـه بخـش اصـلی الکتـرود مثبـت، الکتـرود منفـی و الکترولیـت تشـکیل شـده است. در باطری های لیتیم-یون، الکتـرود مثبـت یـا کاتـد از یـک ترکیـب لیتـیم ماننـد لیتـیم کبالـت اکسـید و الکترود منفی یا آند از کـربن سـاخته شـده و یـک لایـه جـدا کننـده در بـین آن هـا قـرار دارد. الکترولیـت در باطری هـای لیتیمـی نیـز از نمـک لیتـیم دریـک حـلال آلـی سـاخته شـده اسـت. اسـتفاده از حـلال آلـی در نقش الکترولیت به دلیل اشتعال زا بودن نیازمند انجام پاره ای از اقدامات ایمنی است.

شکل ٣٥ : نحوه عملکرد باطری لیتیم- یون [١٦]



[24] **Lithium-ion (Li-ion) Battery**

الکترولیت در ایـن بـاطری هـا از مجموعـه ای از مـواد تشـکیل شـده کـه هـر کـدام وظیفـه خـاص خـود را دارنـد. نقـص در عملکـرد هـر یـک از اجـزای الکترولیـت باعـث نقـص در عملکـرد کـل بـاطری مـی‌شـود. باطری های لیتیمی مجهـز بـه مـدارهای الکترونیکـی محـافظ و فیوزهـایی جهـت جلـوگیری از عکـس شـدن قطبیت، اعمال ولتاژ بیش از حد، گرم شدن بیش از حد و موارد ایمنی دیگر هستند.

جدول ۱۸: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای باطری لیتیم- یون[١٦]

Parameters for Lithium-Ion Batteries	All numbers are indications and my vary significantly among different products and installations	
	Today	2030
Round-trip efficiency	83 % to 86 %	85 % to 92 %
Energy density	200 Wh/ l to 350 Wh/ l	250 Wh/ l to 550 Wh/ l
Power density	100 W/ l to 3500 W/ l[23]	100 W/l to 5000 W/l
Cycle life	1,000 to 5,000 (full cycles)[24]	3,000 to 10,000 (full cycles)
Calendar Life	5 years to 20 years (depending on temperature and SOC)	10 years to 30 years (depending on temperature and SOC)
Depth of discharge	Up to 100 %	Up to 100 %
Self-discharge	5 % per month	1 % per month
Power installation cost (converter)	150 €/ kW to 200 €/ kW	35 €/ kW to 65 €/ kW
Energy installation cost	300 €/ kWh to 800 €/ kWh	150 €/ kWh to 300 €/ kWh
Deployment time	3 ms to 5 ms	
Site requirements	None	
Main applications	Frequency control, Voltage control, Peak shaving, Load leveling, Electromobility, Residential storage systems	

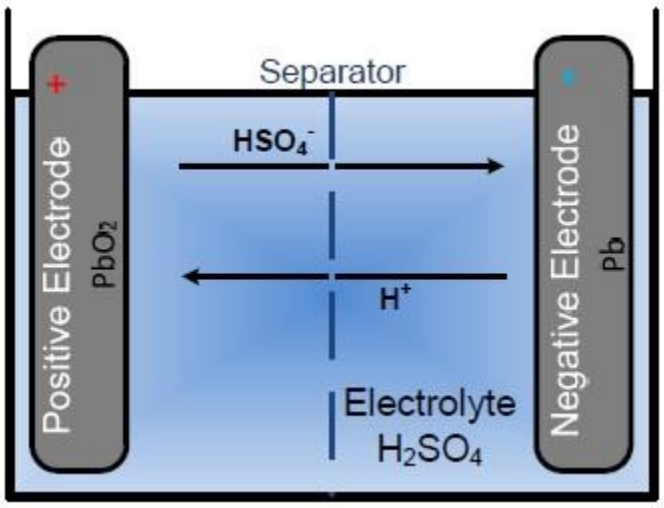
از آنجایی کـه بـاطری هـای لیتـیم- یـون نقـش اساسـی در توسـعهٔ وسـایل الکترونیکـی قابـل حمـل دارنـد، تحقیقات وسیعی برای توسعهٔ آن‌ها صورت گرفتـه اسـت. ایـن نـوع از بـاطری‌هـای قابـل شـارژ ماننـد دیگـر انـواع بـاطری‌هـا از پیـل‌هـای الکتروشـیمیایی تشـکیل شـده‌انـد. هـر پیـل نیـز بـه نوبـه خـود از دو الکتـرود تشکیل شده که به وسـیله الکترولیـت بـا یکـدیگر در ارتباطنـد هـر یـک از ایـن اجـزا دارای سـاختار ویـژه و

منحصر به فردی هستند. لازم به ذکر است ، که نانو موادها تحولات شگرفی را در بازده و طول عمر باطری‌های لیتیمی ایجاد نموده‌اند.

باطری لید- اسید[۲۵]

اگر دو عدد فلز غیر هم نام (الکترود) را در مایع اسید (الکترولیت) قرار دهیم بین دو الکترود جریان برقرار می شود. الکترود مثبت یون ها را به خود جذب کرده و با الکترون مثبت و یا همان اکسید سرب (Pbo۲)ترکیب می شود و باعث به وجود آمدن پتانسیل الکتریکی در دو سر قطب منفی و مثبت باطری می گردد. در زمان شارژ در قطب مثبت، سرلفات سرب با آب ترکیب و اکسید سرب و یون های هیدروژن را تولید می کند و هیدروژن تولید شده توسط الکترود مثبت با سولفات سرب وارد واکنش شده و یون HSO4 تولید می کند که دقیقاً این واکنش در زمان دشارژ به صورت برعکس انجام می گردد.

شکل ۳۶: نحوه عملکرد سیستم باطری لید – اسید [۱۶]



[25] Lead-Acid Battery

جدول ۱۹: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای باطری لید- اسید [۱۶]

Parameters for Lead-Acid Batteries	All numbers are indications and my vary significantly among different products and installations	
	Today	**2030**
Round-trip efficiency	75 % to 80 %	78 % to 85 %
Energy density	50 Wh/ l to 100 Wh/ l	50 Wh/l to 130 Wh/l
Power density	10 W/ l to 500 W/ l	10 W/l to 1000 W/l
Cycle life	500 to 2000	1500 to 5000
Calendar Life	5 years to 15 years (depending on temperature and SOC)	10 years to 20 years (depending on temperature and SOC)
Depth of discharge	70 %	80 %
Self-discharge	0.1 % per day to 0.4 % per day	0.05 % to 0.2 % per day
Power installation cost (converter)	150 €/ kW to 200 €/ kW	35 €/ kW to 65 €/ kW
Energy installation cost	100 €/ kWh to 250 €/ kWh	50 €/ kWh to 80 €/ kWh
Deployment time	3 ms to 5 ms	
Site requirements	Ventilation due to gassing	
Main applications	Frequency control, Peak shaving, Load leveling, Island grids, Residential storage systems, Uninterruptible power supply	

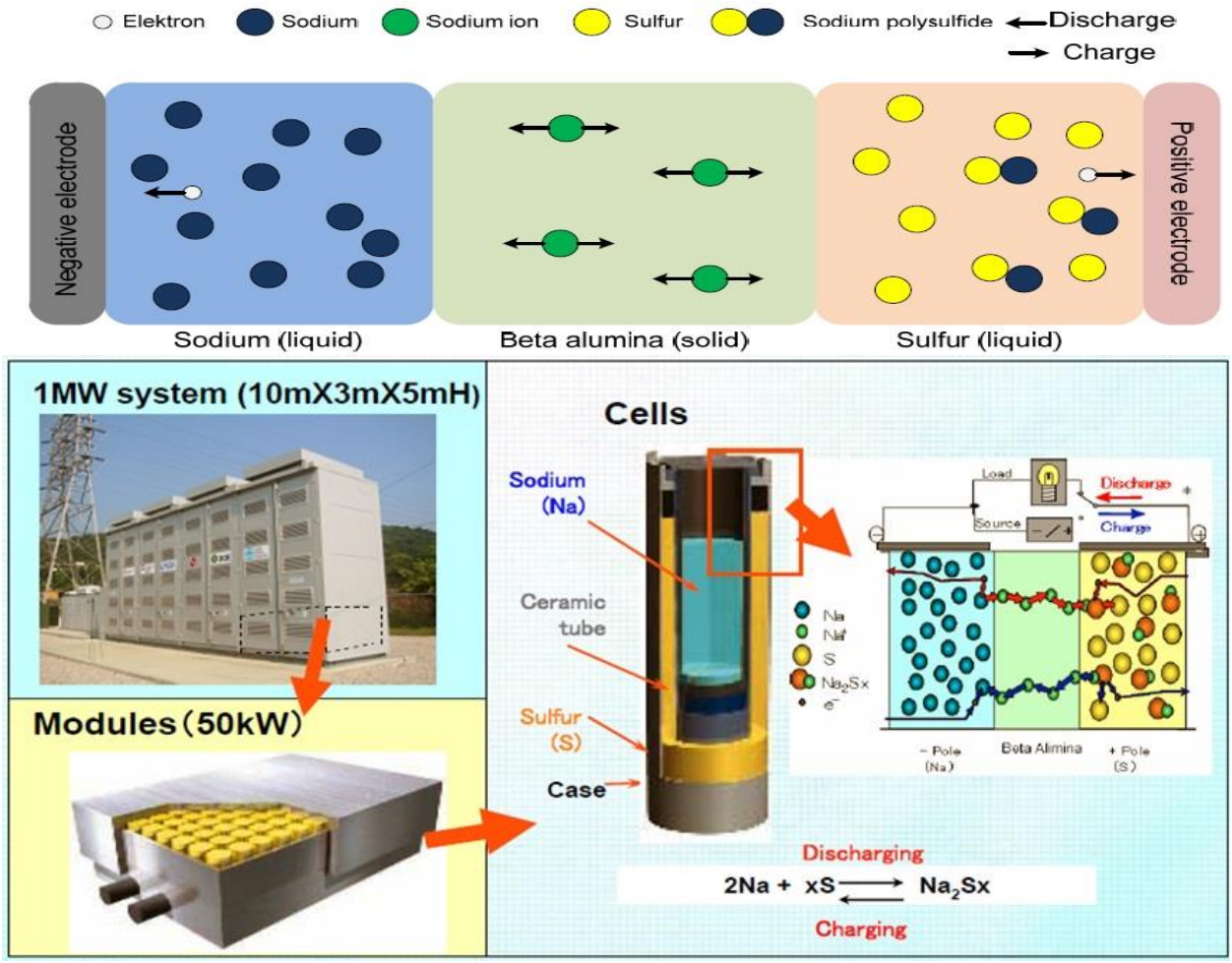
باطری های دما بالا (سولفور ـ سدیم)[۲۶]

این نوع باطری ها علاوه بر آن که می توانند جهت برآورده‌ساختن تقاضای انرژی در زمان های اوج مصرف و تحویل برق به مناطقی که قبلاً به علت محدودیت‌های انتقال و توزیع دارای کمبودهایی بوده‌اند، به کار برده شوند، به عنوان منبعی آماده برای حفاظت در مقابل اختلالات برق نیز عمل می کنند.

[26] High Temperature Battery (NaS)

چگالی انرژی آن ها سه برابر باطری‌های اسید و سرب معمولی است و می‌تواند در ۸ ساعت شارژ و انرژی الکتریکی ذخیره شده را در همان مدت پس داده و در صورت ثابت نگه داشتن دما در حدود ٦٠٠ درجه فارنهایت به طور نامحدود ذخیره کند.

شکل ۳۷: نحوه عملکرد باطری سولفور ـ سدیم [١٦]



استفاده از باطری‌های NAS، باعث تثبیت تقاضای برق که دارای نوسانات قابل ملاحظه‌ای بین ساعات روز و شب است می شود که یکی از نتایج آن کاهش هزینه برق مشتریان خواهد بود.

با شارژ کردن باطری در طول ساعات غیرپیک و استفاده از برق ذخیره شده در مواقع اوج مصرف، نیروگاه ها به نحوی کاراتر انرژی را عرضه می کنند. این فرآیند برای یک مشتری (مصرف‌کننده) هنگامی اقتصادی خواهد بود که بین هزینه برق در پیک و غیر پیک تفاوت زیادی وجود داشته باشد (کنتورهای دوتعرفه‌ای).

به عنوان مثال باطری سولفور ـ سدیم در کاربردهای متوازن سازی بار (Load Leveling) و نیز به عنوان یک منبع توان اضطراری و یا به عنوان واسطه (Suffer) برای خروجی ناپایدار منابع انرژی طبیعی از قبیل باد و انرژی خورشیدی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.از مزایای این نوع باطری ها می توان به مواردی مانند چگالی انرژی زیاد، کارایی بالا، طول عمر زیاد آنها اشاره کرد.

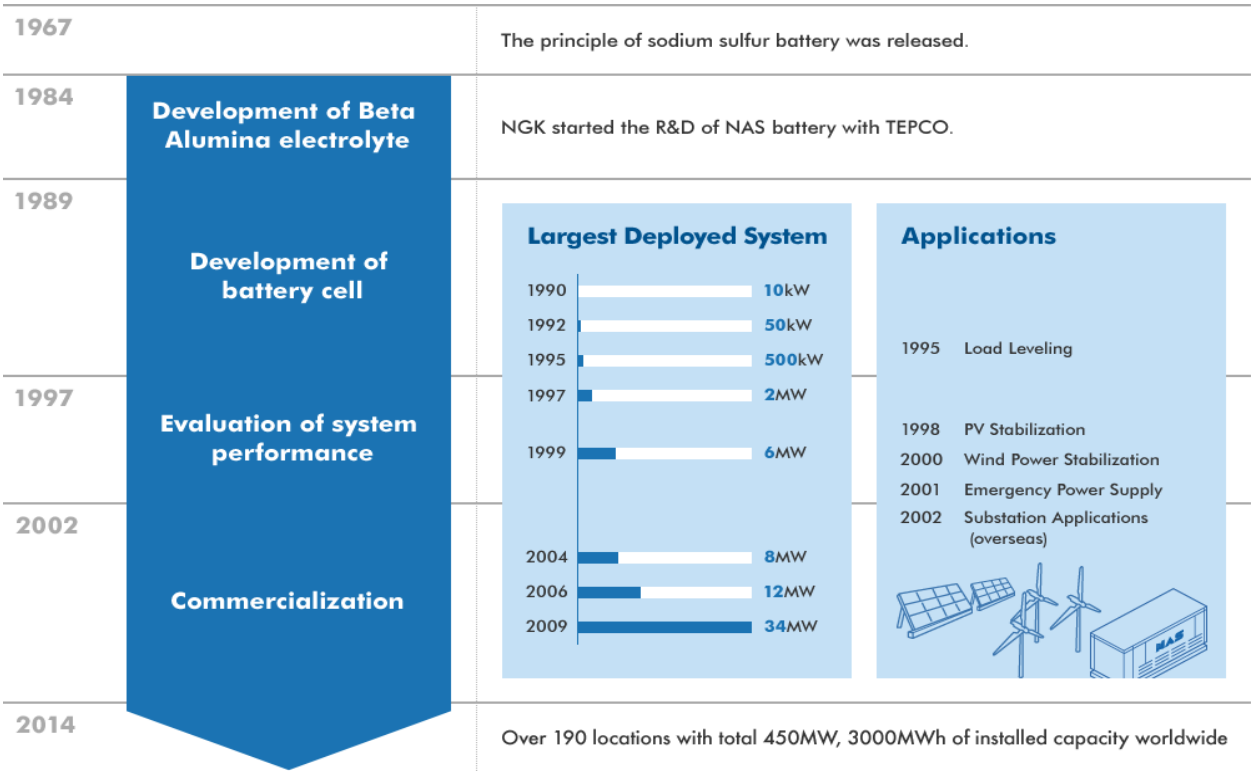
این باطری ها دارای مشخصه ای به نام NaS Pulse Factor می باشند که بر اساس آن می تواند با کمک تجهیزات الکترونیک قدرت مناسب، تا محدوده ای بین ۱ تا ۵ برابر توان اسمی خود به شبکه توان تزریق نماید. بر اساس این مشخصه در هفت ساعت با توان اسمی خود شارژ می شود و با همین زمان و توان می تواند به شبکه توان تزریق نماید. باطری های نصب شده در جهان تاکنون حدود ۳۱٦ مگاوات بوده که بیشتر آن ها در ژاپن است و توانایی تولید ۱۸۹٦ مگاوات ساعت را دارا می باشند.

به عنوان نمونه ای از فعالیت های انجام شده تا کنون می توان به نصب بیش از ۲۰ نمونه نمایشی از باطریهای مذکور از جمله دو واحد ٦ مگاواتی در نیروگاههای (TEPCO) در ژاپن و ۱۸ مگاوات که توسط شرکت های Xcel Energy ، PG&E و AEP در آمریکا اشاره نمود .

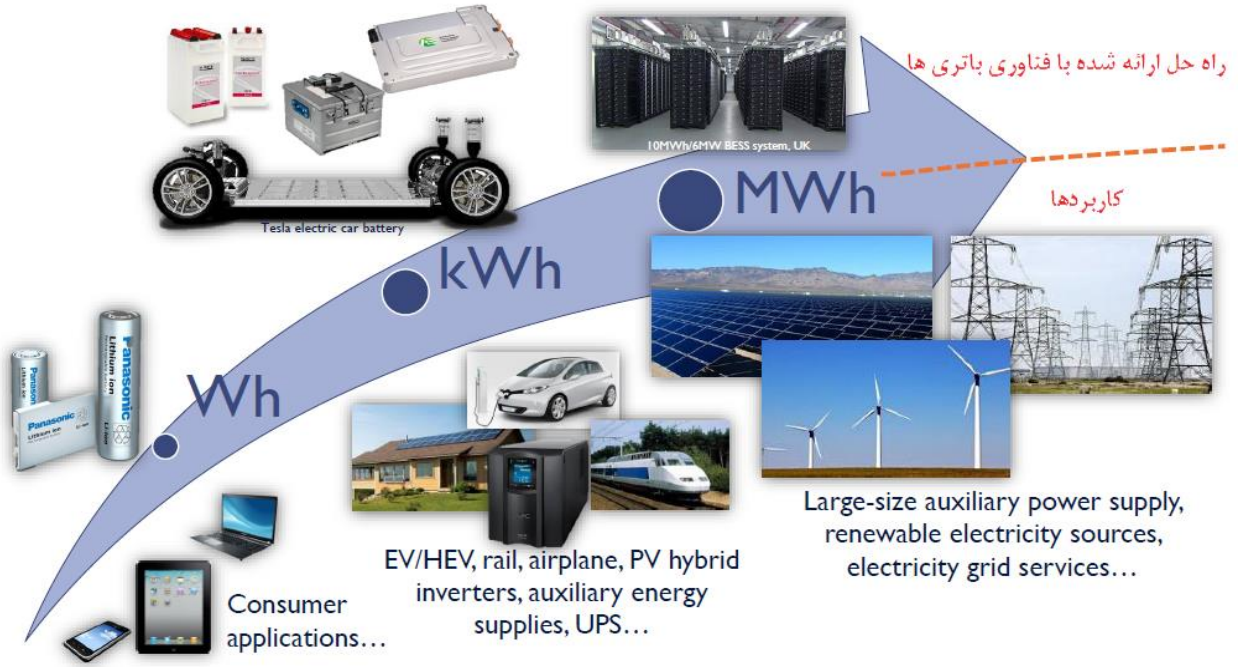
جدول ۲۰: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای باطری سولفور ـ سدیم [۱۶]

Parameters for High Temperature Batteries (NaS)	All numbers are indications and my vary significantly among different products and installations	
	Today	2030
Round-trip efficiency	75 % to 80 %	80 % to 90 %
Energy density	150 Wh/ l to 250 Wh/ l	n. a.
Power density	n. a.	n. a.
Cycle life	5,000 to 10,000	5,000 to 10,000
Calendar Life	15 years to 20 years	20 years to 30 years
Depth of discharge	100 %	
Self-discharge	10 % per day (without operation for small systems)	n. a.
Power installation cost (converter)	150 €/ kW to 200 €/ kW	35 €/ kW to 65 €/ kW
Energy installation cost	500 €/ kWh to 700 €/ kWh	80 €/ kW to 150 €/ kW
Deployment time	3 ms to 5 ms	
Site requirements	None	
Main applications	Frequency control, Peak shaving, Load leveling, Island grids, Electromobility (Zebra), Uninterruptible power supply	

شکل ۳۸: مراحل تحقیق و توسعه تا تجاری سازی باطری های سولفور ـ سدیم از سال ۱۹۶۷ تاکنون [۱۸]



شکل ۳۹: راه حل های فناورانه برای بکارگیری در کاربردهای مختلف و تاثیرات آن [٤]



Renewables:
- Solution for PV and wind intermittency
- Selfconsumption

Building:
- Grid independence
- Energy backup
- Better xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
- Smart building "center" (Electricity supply-Battery-Usage)

Grid:
- Grid stabilization services
- Alternative solutions to grid extension and reinforcement
- Alternative to xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

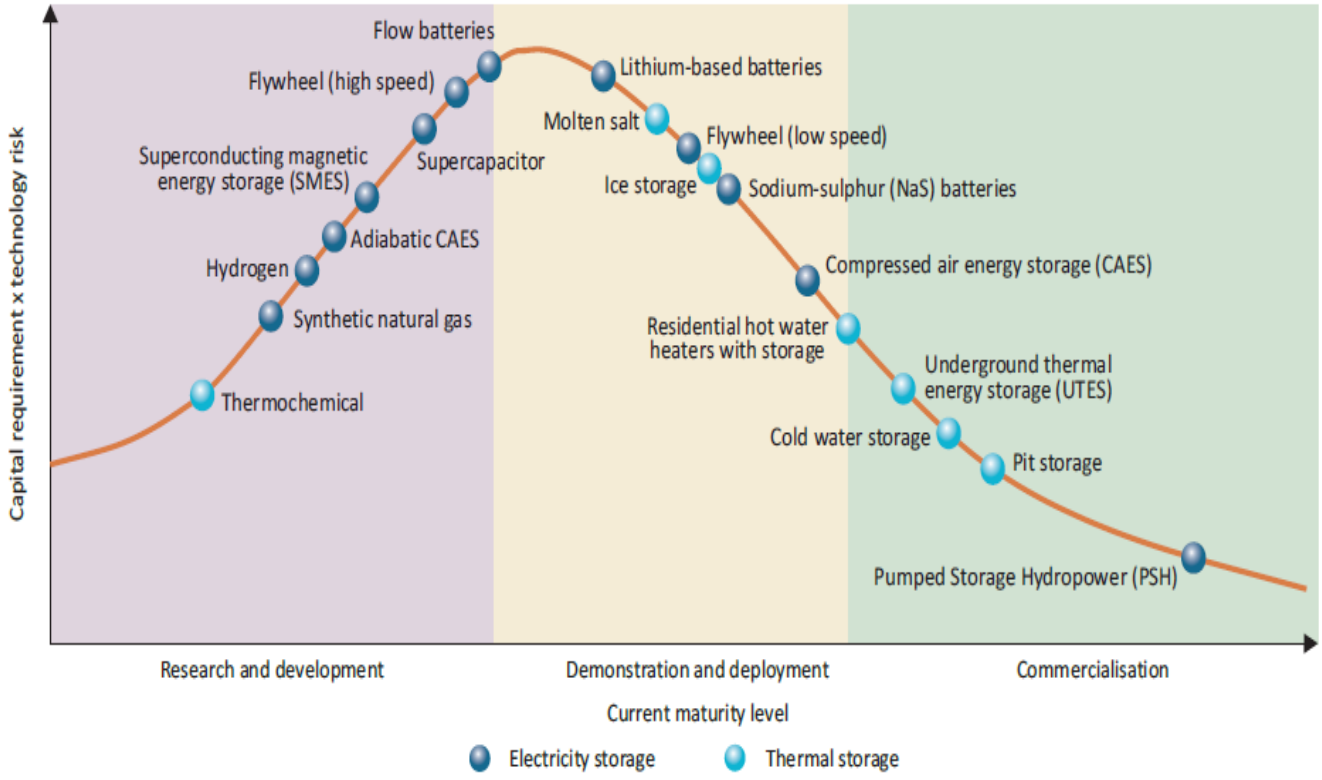
EV/HEV:
- Driving range / Vehicle cost

وضعیت فناوری های ذخیره ساز انرژی

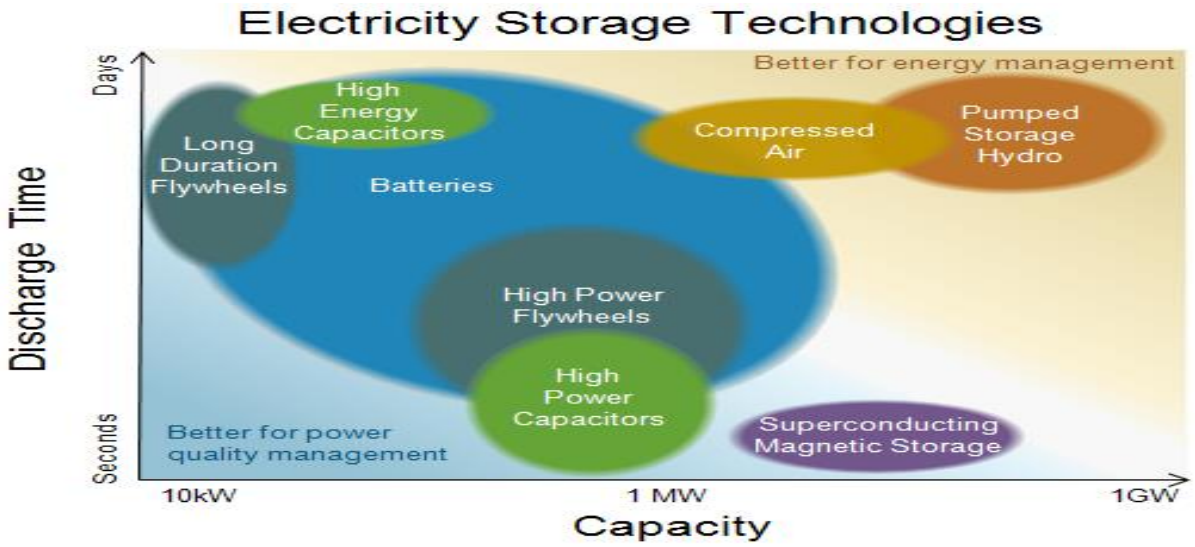
فناوری های ذخیره ساز الکتریکی و حرارتی (سرما یا گرما) از منظر توسعه، سطوح متفاوتی از مراحل اولیه تحقیق و توسعه (R&D)، بلوغ کامل و توسعه یافته گی را دارا می باشند.

در شکل زیر برخی از فنآوری های کلیدی با توجه به نیاز سرمایه گذاری اولیه و ریسک فناوری در قبال وضعیت کنونی آن (برای مثال قرار داشتن در مراحل تحقیق و توسعه(R&D)، نمونه سازی(demonstration) و توسعه(deployment)، یا تجاری سازی(commercialisation)) نشان داده شده است.

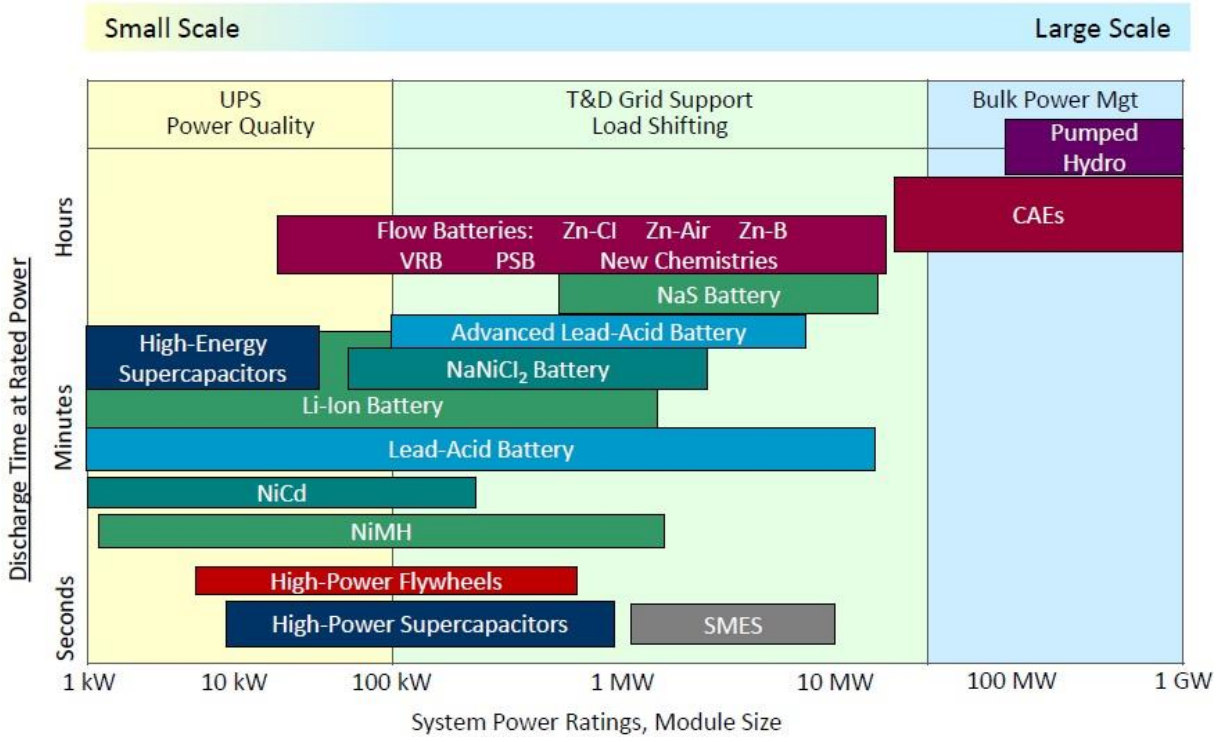
شکل ٤٠: فنآوری های کلیدی با توجه به نیاز سرمایه گذاری اولیه و ریسک فناوری[١]



شکل ٤١: مقایسه انواع فناوری های ذخیره ساز برحسب زمان نگهداری و قابلیت انرژی ذخیره سازی



شکل ٤٢: فناوری های ذخیره سازی برحسب زمان دشارژ و اندازه[٣]



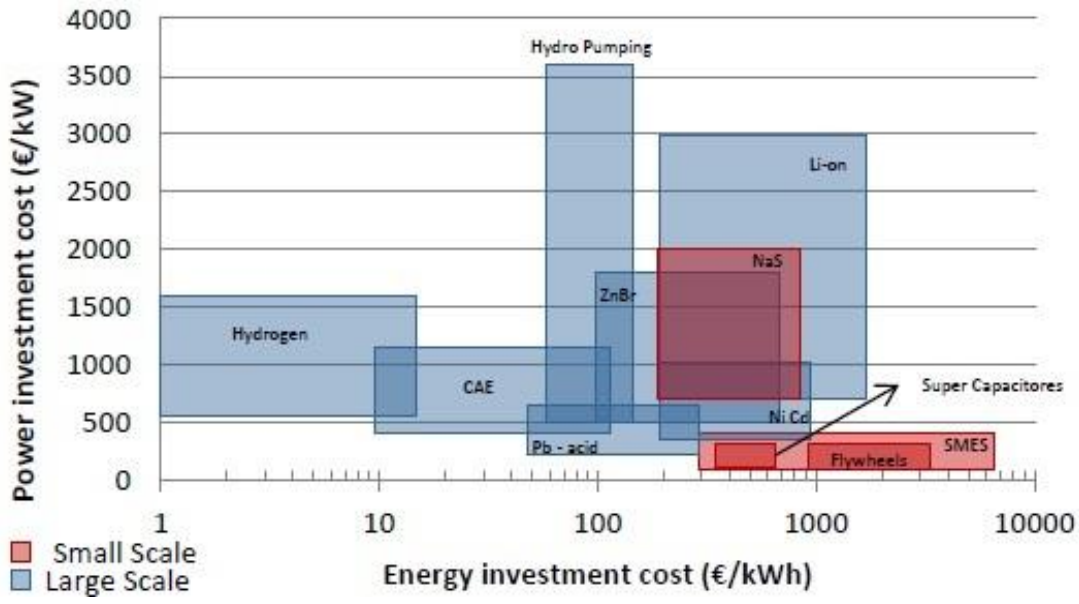
همانطور که در شکل ٤٣ نیز مشاهده می شود، ذخیره ساز های تلمبه ذخیره ای بهترین حالت را در زمان دشارژ و ظرفیت ذخیره سازی دارا می باشند.

شکل ٤٣ : انواع فناوری های ذخیره ساز انرژی و وضعیت چرخه عمر آن ها (هرچه دایره سبزتر باشد به مرحله تجاری شدن نزدیکتر است) [۳]

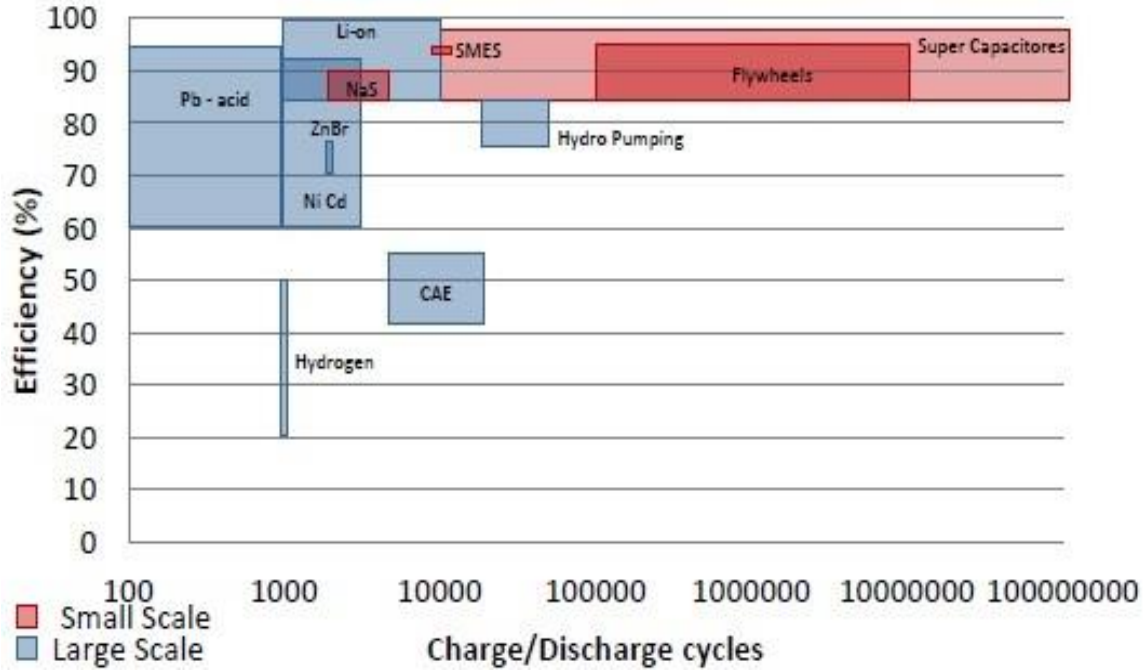
هزینه های ذخیره سازها

برای محاسبه هزینه ذخیره سازهای انرژی سه پارامتر راندمان، هزینه های سرمایه گذاری و چرخه عمر را می بایست در نظر گرفت. این سه پارامتر به ترتیب در اشکال ٤٥ و ٤٦ و ٤٧ مشاهده می شوند. [۳]

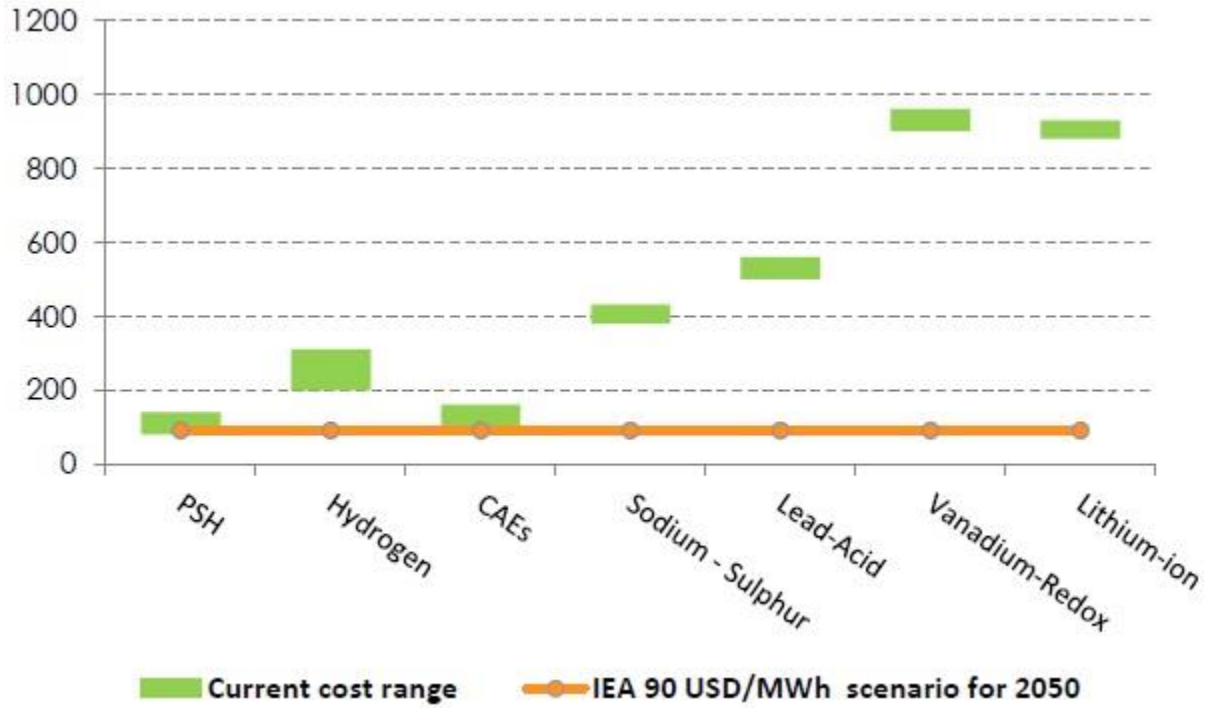
شکل ٤٤: مقایسه هزینه سرمایه گذاری ذخیره سازهای انرژی [۳]



شکل ٤٥: مقایسه راندمان ذخیره سازهای انرژی برحسب زمان شارژ و دشارژ آن ها[۳]



شکل ٤٦: مقایسه هزینه تمام شده ذخیره سازهای انرژی و پیش بینی آن ها تا سال ۲۰۵۰[۳]



معیارهای تعیین فناوری های مناسب ذخیره سازی انرژی

ذخیره سازی انرژی می تواند در سراسر بخش های سیستم انرژی شامل عرضه، انتقال و توزیع، و تقاضا (مصرف کننده نهایی) استفاده شوند. بهترین محل برای استقرار فن آوری ذخیره سازی بستگی به قابلیتی که از آن در فرآیند سیستم انرژی از عرضه تا مصرف انتظار می رود دارد. علاوه بر این، تحولات شبکه های هوشمند و دیگر فناوری های جدید در تعیین مکان بهینه این ذخیره سازها تاثیر گذار خواهند بود.

قبل از انتخاب یک فناوری ذخیره ساز انرژی، به مجموعه ای از معیارهای واضح و روشن به منظور کمک به اتخاذ تصمیمات صحیح نیاز است. هر یک از این معیارها بسته به کاربردشان باید اولویت بندی شوند. جدول۲۱ لیستی از این معیارها ارائه شده است.

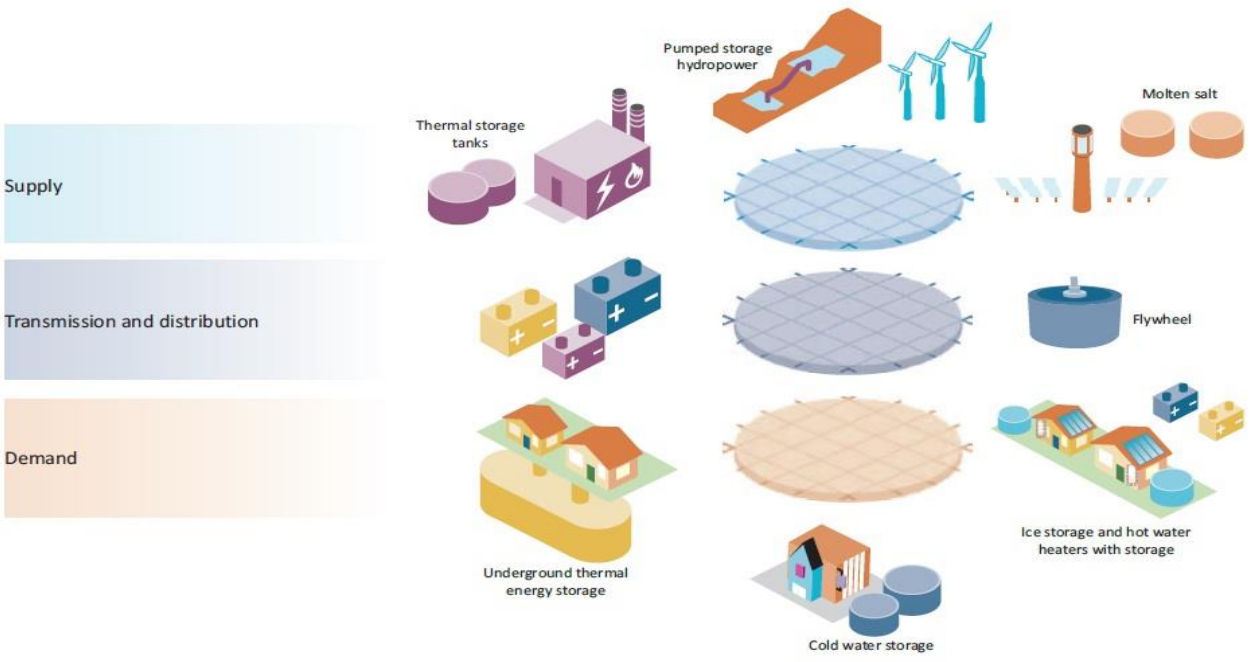
جدول ۲۱ : معیارهای تعیین فناوری های مناسب ذخیره سازی انرژی برای دستیابی کوتاه مدت[۱]

فناوری ذخیره ساز انرژی	نمونه های فناوری	در مدت کوتاهی امکان ارائه بیشترین مزایا را در مناطقی دارد که:
مقیاس زیاد برق	تلمبه ای ذخیره ای (PSH)، ذخیره سازی انرژی هوای فشرده (CAES)، چرخ طیار	شبکه های برق توسعه یافته ای که به راحتی می تواند منابع تامین انرژی متمرکز به آن ها متصل شوند
مقیاس زیاد حرارت	ذخیره سازی انرژی حرارتی زیر زمین(UTES)، نمک های مذاب	منابع انرژی حرارتی تلف شده قابل توجه، تقاضای گرمایش یا سرمایش متمرکز، یا مقادیر زیادی از نیروگاه های حرارتی-خورشیدی (CSP)

فنـــاوری ذخیـــره ســـاز انرژی	نمونه های فناوری	در مـدت کوتـاهی امکـان ارائـه بیشـــترین مزایـــا را در منـــاطقی دارد که:
مقیاس کم برق	باطری ها	جوامـــع دور افتـــاده و خـــارج از شـبکه و همچنـین کسـانی کـه بـه دنبال تنـوع بخشـیدن بـرای تقاضـا منابع سـوخت حمـل و نقـل خـود می باشند.
مقیاس کم حرارت	ذخیره سازی یـخ، مخـازن آب سـرد و آب گرم	تغییرپـــذیری تقاضـــای خیلـــی بیشتر(بعنوان مثال تقاضای)

شکل زیـر نشـان دهنـده طیـف وسـیعی از ذخیـره سـازها اسـتفاده شـده در طـول فرآینـد سیسـتم انـرژی از عرضه تا مصرف می باشد.

شکل ٤٧: طبقه بندی استفاده از ذخیره سازها در فرآیند سیستم انرژی[۱]

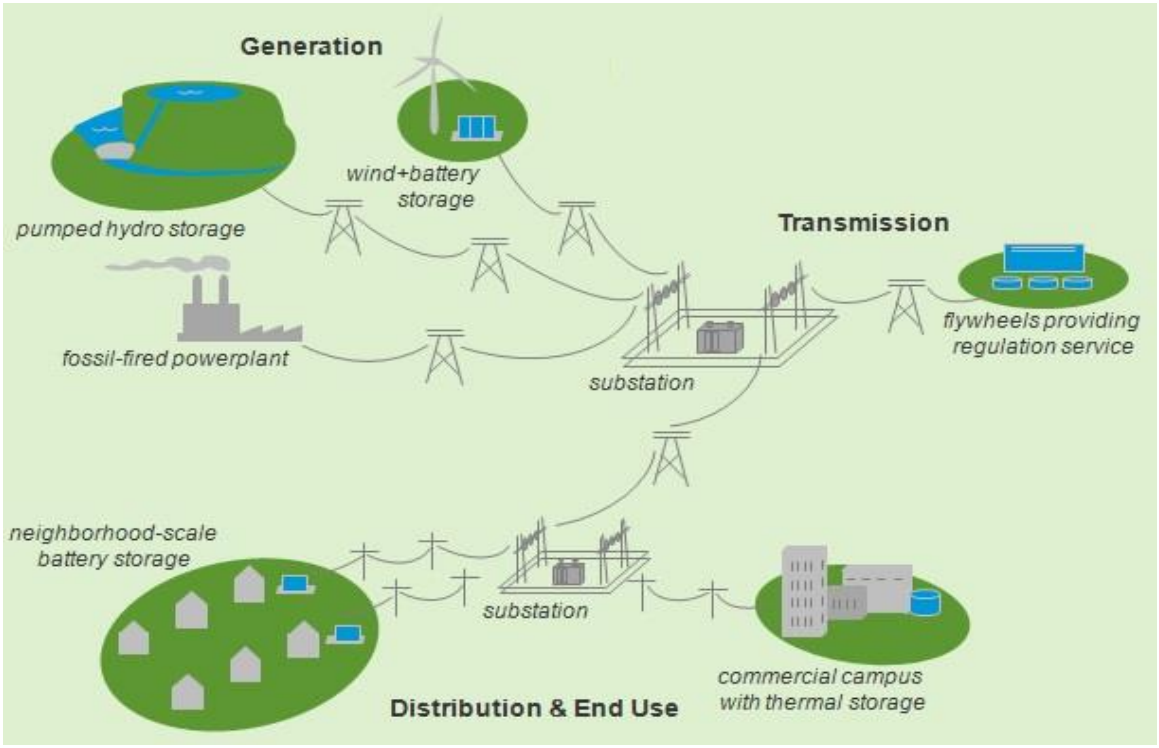


همانطور که از شکل مشاهده می شود برای بخش عرضه انرژی الکتریکی فناوری مناسب عبارت است از تلمبه ذخیره ای[۲۷]، مخازن ذخیره سازی حرارتی[۲۸] و نمک مذاب[۲۹].

در بخش انتقال و توزیع فناوری های مناسب عبارتند از باطری و چرخ طیار[۳۰]. البته گونه های متنوع و گسترده ای از باطری ها وجود دارند که در بخش مصرف نیز جهت ذخیره سازی به کار گرفته می شوند.

در بخش مصرف علاوه بر باطری ها، فناوری های ذخیره سازی انرژی حرارتی زیر زمینی[۳۱]، ذخیره سازی آب سرد[۳۲]، ذخیره ساز یخ و ذخیره ساز آب داغ با گرمکن ها[۳۳] مورد استفاده قرار می گیرند.

شکل ٤٨ : بکارگیری برخی از فناوری های گوناگون ذخیره سازی انرژی



[27] Pumped storage hydropower
[28] Thermal storage tanks
[29] Molten salt
[30] Flywheel
[31] underground thermal energy storage
[32] Cold water storage
[33] Ice storage and hot water heaters with storage

مراجع:

1. Technology Roadmap - Energy storage ,International Energy Agency , 2014
۲. روشهای ذخیره سازی برق در ایستگاههای قدرت
3. Large Scale Storage Market Opportunities
4. Energy management for smart grid, cities and buildings: Opportunities for battery electricity storage solutions
5. Grid Energy Storage , U.S. Department of Energy , December 2013
6. Electrical thermal storage optimization for demand side management
7. Managing the Heating Demand in Institutional Buildings with an Innovative Thermal Storage System
8. Initial Economic Analysis of Electric Thermal Storage in the Yukon
9. www.climatetechwiki.org/technology/jiqweb-es-fw
10. Superconducting Materials in Power grid - MT 5009 – Analyzing Hi-Technology Opportunities
11. en.wikipedia.org/wiki/User:Elcap/Supercapacitor
12. SUPERCAPACITOR As energy storage device
13. Technical Analysis of Pumped Storage and Integration with Wind Power in the Pacific Northwest

۱٤. جایابی بهینه و همزمان منابع تولیدپراکنده تجدیدپذیر و ذخیره سازهای انرژی در شبکه توزیع با استفاده از برنامه ریزی احتمالی

۱۵. ارزیابی کاربرد منابع ذخیره ساز انرژی الکتریکی بر کاهش تلفات خطوط انتقال و توزیع

16. Technology Overview on Electricity Storage
17. edu.nano.ir/index.php?actn=papers_view&id=62
18. www.ngk.co.jp/nas/why/history.html
19. Solar Barge , Garth Huckabee
20. cleantechnica.com/2013/08/17/radical-new-flow-battery-uses-bromine-instead-of-membrane/
21. http://www.edch.ir/?p=page_show&i=1&e=10&g=2

فهرست شکل ها

شکل ۱: ظرفیت ذخیره ساز الکتریکی متصل به شبکه که در جهان نصب شده است (MW)[۱] ۶
شکل ۲ : ذخیره سازی متصل به شبکه درطول زنجیره ارزش برق[۳] ۱۶
شکل ۳ : توان مورد نیاز و مدت زمان تخلیه برای برخی از کاربردها در سیستم انرژی امروزی[۱] ۱۶
شکل ٤ : طبقه بندی سیستم های ذخیره ساز انرژی (EES)[٤و١٦] ۱۷
شکل ٥: طبقه بندی سیستم های ذخیره سازهای شیمیایی[١٦] ۱۸
شکل ٦: دسته بندی انواع ابرخازن ها[۱۱] ۲۳
شکل ۷: مقایسه ذخیره سازهای ابرخازن، باطری و ابررسانا [۱۱] ۲۴
شکل ۸: مقایسه کارایی ابرخازن با باطری لیتیوم-یون [۱۱] ۲۴
شکل ۹: یک نمونه ذخیره ساز ابرخازن ۲۵
شکل ۱۰: نحوه عملکرد سیستم ذخیره ساز مغناطیسی ابررسانا [١٦] ۲۸
شکل ۱۱: یک نمونه ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانا و اجزاء آن ۲۹
شکل ۱۲: تحولات ذخیره ساز مغناطیسی ۳۰
شکل ۱۳: هزینه سرمایه گذای برای ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانا [۱۰] ۳۱
شکل ١٤: هزینه اجزاء مختلف ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانای ۱ مگاوات برحسب زمان دشارژ [۱۰] ۳۱
شکل ١٥ : نحوه عملکرد سیستم ذخیره ساز تلمبه ذخیره ای ۳۳
شکل ١٦: ظرفیت نصب شده تلمبه ذخیره ای تا سال ۲۰۰۵[۱۳] ۳۳
شکل ۱۷: راندمان نیروگاه های تلمبه ذخیره ای در آمریکا [۱۳] ۳۵
شکل ۱۸: مکانیزم عمل یک سیستم CAES A–دررو(DIABATIC) B–بی دررو(ADIABATIC) [١٦] ۳۷
شکل ۱۹: شمای بهره برداری از یک سیستم ذخیره سازی CAES ۳۸
شکل ۲۰: نحوه عملکرد سیستم ذخیره ساز چرخ طیار(فلایویل) [١٦] ۴۰
شکل ۲۱: یک نمونه ذخیره ساز چرخ طیاره و اجزاء آن [۹] ۴۱
شکل ۲۲: محوطه ای شامل مجموعه ای از ذخیره سازهای چرخ طیار[۹] ۴۲
شکل ۲۳: مقایسه هزینه سه نوع چرخ طیاره با فناوری های دیگر ذخیره ساز برای کاربرد کیفیت توان ۴۵
شکل ٢٤: مقایسه هزینه سه نوع چرخ طیار با فناوری های دیگر ذخیره ساز برای کاربرد کیفیت توان برای ۱ ثانیه دشارژ ۴۵
شکل ۲۵: مقایسه هزینه سه نوع چرخ طیار با فناوری های دیگر ذخیره ساز برای کاربرد کیفیت توان برای ۲۰ ثانیه دشارژ ۴۶
شکل ٢٦: مقایسه هزینه سه نوع چرخ طیار با فناوری های دیگر ذخیره ساز برای کاربرد کیفیت توان برای ۱ ساعت دشارژ ۴۶
شکل ۲۷ : نحوه عملکرد سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی دما بالا [١٦] ۴۷

شکل ۲۸: ساختمان داخلی و یک نمونه ذخیره ساز حرارتی برق ۴۹
شکل ۲۹: دو مدل از ذخیره سازهای حرارتی برق[۷] ۵۰
شکل ۳۰: منحنی تقاضای بخش ساختمان های تجاری در ماه دسامبر با و بدون این نوع ذخیره ساز[٦] ۵۰
شکل ۳۱: منحنی تامین بار گرمایش در تقاضاهای متفاوت گرما و مدت زمان دشارژ آن[٦] ۵۱
شکل ۳۲: نحوه عملکرد سیستم ذخیره ساز هیدروژن[١٦] ۵۳
شکل ۳۳ : نحوه عملکرد سیستم ذخیره ساز برق به گاز [١٦] ۵۵
شکل ۳٤: نحوه عملکرد باطری جریانی [١٦] ۵۷
شکل ۳۵ : نحوه عملکرد باطری لیتیم- یون [١٦] ۶۰
شکل ۳٦: نحوه عملکرد سیستم باطری لید – اسید [١٦] ۶۲
شکل ۳۷: نحوه عملکرد باطری سولفور ـ سدیم [١٦] ۶۴
شکل ۳۸: مراحل تحقیق و توسعه تا تجاری سازی باطری های سولفور ـ سدیم از سال ۱۹٦۷ تاکنون [۱۸] ۶۶
شکل ۳۹: راه حل های فناورانه برای بکارگیری در کاربردهای مختلف و تاثیرات آن [٤] ۶۷
شکل ٤۰: فنآوری های کلیدی با توجه به نیاز سرمایه گذاری اولیه و ریسک فناوری[۱] ۶۸
شکل ٤۱: مقایسه انواع فناوری های ذخیره ساز برحسب زمان نگهداری و قابلیت انرژی ذخیره سازی ۶۹
شکل ٤۲: فناوری های ذخیره سازی برحسب زمان دشارژ و اندازه[۳] ۶۹
شکل ٤۳ : انواع فناوری های ذخیره ساز انرژی و وضعیت چرخه عمر آن ها [۳] ۷۰
شکل ٤٤: مقایسه هزینه سرمایه گذاری ذخیره سازهای انرژی [۳] ۷۰
شکل ٤۵: مقایسه راندمان ذخیره سازهای انرژی برحسب زمان شارژ و دشارژ آن ها[۳] ۷۱
شکل ٤٦: مقایسه هزینه تمام شده ذخیره سازهای انرژی و پیش بینی آن ها تا سال ۲۰۵۰[۳] ۷۱
شکل ٤۷: طبقه بندی استفاده از ذخیره سازها در فرآیند سیستم انرژی[۱] ۷۳
شکل ٤۸ : بکارگیری برخی از فناوری های گوناگون ذخیره سازی انرژی ۷۴

فهرست جداول

جدول ۱ : برخی از فناوری های ذخیره ساز انرژی و نمونه پروژه های مربوطه[۱] ۷

جدول ۲: کاربرد فناوری های پیشرفته به تفکیک[۵] ۹

جدول ۳ : مشخصات کلیدی سیستم های ذخیره ساز برای کاربردهای خاص در سیستم انرژی امروزی[۱] ۱۴

جدول ٤: چگالی انرژی فناوری ها به تفکیک سیستم ذخیره سازها[٤و١٦] ۱۸

جدول ۵: انواع فن آوری پیشرفته ذخیره سازی انرژی [۵] ۲۰

جدول ٦: برخی تولید کنندگان ذخیره ساز ابرخازن[۱۲] ۲۶

جدول ۷ : مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره سازی ابرخازن [١٦] ۲۷

جدول ۸: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای ذخیره ساز مغناطیسی ابر رسانا [١٦] ۳۲

جدول ۹: فناوری ذخیره سازی تلمبه ذخیره ای در طول زمان[۱۰] ۳۴

جدول ۱۰: برخی از پروژه های انجام شده در ارتباط با فناوری ذخیره سازی تلمبه ذخیره ای [۱۳] ۳۵

جدول ۱۱: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره ساز تلمبه ذخیره ای [١٦] ۳۶

جدول ۱۲: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره سازی CAES [١٦] ۳۹

جدول ۱۳: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره سازی چرخ طیار[١٦] ۴۴

جدول ١٤: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی دما بالا [١٦] ۴۸

جدول ۱۵: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره سازی هیدروژن[١٦] ۵۴

جدول ١٦ : مشخصات فنی و محدوده پارامترهای سیستم ذخیره ساز برق به گاز [١٦] ۵۶

جدول ۱۷ : مشخصات فنی و محدوده پارامترهای باطری جریانی [١٦] ۵۸

جدول ۱۸: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای باطری لیتیم- یون[١٦] ۶۱

جدول ۱۹: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای باطری لید- اسید [١٦] ۶۳

جدول ۲۰: مشخصات فنی و محدوده پارامترهای باطری سولفور ـ سدیم [١٦] ۶۶

جدول ۲۱ : معیارهای تعیین فناوری های مناسب ذخیره سازی انرژی برای دستیابی کوتاه مدت[۱] ۷۲