DOI : 10.52547/jrenew.10.2.164

Review Article

Received: 09/14/22

Accepted: 02/25/23

Volume 10, Issue 2, Autumn & Winter 2023, p. p. 164-174

Journal of Renewable and New Energy

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

An overview of energy storage supercapacitor systems and their applications

Afsanehsadat Larimi[1*], Ali Akbar Asgharinezhad[2], Hossein Karami[3]

1-Assistant Professor, Chemistry and Process Research Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
2- Assistant professor, Chemistry and Process Research Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
3- Assistant professor, High Voltage Studies Research Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
* P.O.B. 14665517, Tehran, Iran, alarimi@nri.ac.ir

Received: 14 September 2022 Revised: 28 November 2022 Accepted: 25 February 2023

Abstract

The use of batteries is widespread in the industry, but they have various disadvantages, and in some applications, the need for less weight or volume, higher power density or a better response to transient events is felt. Due to the practical problems of batteries and with the advancement of technology, especially in materials science, supercapacitors were introduced. Supercapacitors are advanced high-capacity electrical energy storage devices in relatively small volumes. A supercapacitor consists of two thin, high-level electrodes (plates) separated by a dielectric, providing a high energy storage density. In addition, supercapacitors have advantages over other energy storage technologies such as less carbon footprint as well as lower cost of ownership and maintenance. Applications of supercapacitors can be to provide temporary load until the backup generator is fully offline and thus reduce the need for fossil fuel generators, oscillation and stabilization of frequency changes in power systems, smoothing solar and wind energy, support Short-term and reduce the risk of breakdown in important facilities and thus improve the quality of electricity supply. Supercapacitors are used in a wide range of applications, from the power grid to the transportation sector. This article provides an overview of supercapacitors, including concepts, applications, features, advantages, and limitations.

Keywords: Supercapacitor, Energy storage, Application, Electricity network, Transportation.

1. Introduction

Supercapacitors are fast-response, high-power energy storage devices that store electrical energy and can often be charged and discharged in a short time at high currents. Supercapacitors have a longer life than electrochemical storage systems such as lithium-ion batteries and lead-acid batteries. In addition, they have advantages such as faster charging and discharging speeds, need for less maintenance, higher return efficiency (rotation) and have a lighter mass and smaller dimensions. Supercapacitors do not contain harmful and toxic chemicals and produce less heat due to their low internal resistance, which eliminates the need for a cooling system. These equipments can work in the temperature range of -45 to +65 degrees of Celsius and can be used in combination with electrochemical storage devices (batteries) to increase the efficiency and life of their components. The main use of supercapacitors is to improve the quality of electricity and they are not used for long-term energy storage [1] .The main purpose of this article is to review the applications of supercapacitors in the world and to introduce some of its practical applications, especially in the electricity industry of developed countries.

2. Structure of the supercapacitor

Depending on the storage mechanism or cell configuration, supercapacitors are divided into three different types: double-layer electrical capacitors (EDLCs), quasi-capacitors, and hybrid capacitors [2]. It is classified in Figure 1 [3][4][5].

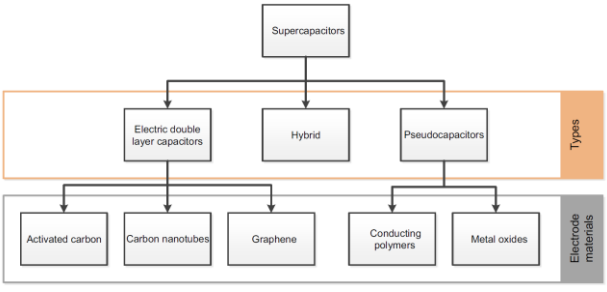


Figure 1. Classification of different types of supercapacitors

3. Applications

Supercapacitors are able to provide a cost-effective

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

strategy to network operators to meet the challenges of voltage, frequency and power quality. According to a 2010 US Department of Energy report, energy storage can be used in the power industry for decades [6], including: Temporary load supply until the backup generator is fully online, initial frequency response, voltage drop reduction, Application in microgrids, battery-supercapacitor hybrid systems, solar and wind smoothing and electric transport.

4. Examples of practical cases of using supercapacitors in the world

4.1. Power grid

In 2012, East Penn Manufacturing developed a 3-megawatt supercharger-ultra-capacitive hybrid system to regulate frequency and demand management. This hybrid system is now used by one of the well-known operators of the wholesale electricity market in the United States called PJM Interconnection to distribute the service storage system to the distribution company when electricity is not supplied to the wholesale market. Local Met-Ed offer. In 2020, to increase grid stability, an MW 5 supercapacitor made by the Spanish company Ingeteam was deployed in the UK National Grid. Also in Germany, Skeleton container supercapacitors are used alone or in combination to modify peak networks over MW 50. In general, supercapacitors can be used to consume reactive power in transmission or distribution lines, improve power factor and increase the overall efficiency of the power system.

4.2. Transportation

In hybrid capacitor-battery systems, supercapacitors are used to absorb power pulses, thus reducing battery degradation and increasing their lifespan. For example, ultra-high charge and discharge speeds in transportation systems make supercapacitors very suitable for regenerative braking applications, brake energy absorption, and propulsion support. This is very effective in transportation based on an electric system such as the subway. One of the cases in which supercapacitors are suitable for fast charging or discharging in their short intervals is in the electric vehicle to reduce current fluctuations and harmonic frequencies caused by charging.

Examples of large emerging markets for 0.1 kWh to 1 MWh supercapacitors in different parts of the network and transportation can be seen in Table 1 [7].

Table 1. Examples of large emerging markets for 0.1 kWh to 1 MWh supercapacitors

Type	Application	Voltag (V) e	Energy (kWh)	Supplier
Hybrid	On- and off-grid inverter battery replacement	-	1/7	Arvio
	Locomotives	500	60	Aowei
	Tram, marine charger, electricity compensator	500	5/9	Aowei
	City bus, mining locomotive, tunnel locomotive, port truck	500	32	Aowei
	Complete battery replacement in mild hybrid car, peak shave in full hybrid car	7/2	1/0	Shanghai Greentech
	Self-propelled mobile robots, power grids, electric vehicles, trains, elevators	32	1/1	Jianghai
EDLC	Emergency power supply, microgrid balancing	1300	235/0	Maxwell
	Photovoltaic smoothing and load shifting	-	8	Maxwell+partner
	Microgrid	-	150	Maxwell-Freqcon
	Hybrid buses, trams, trolleys, heavy duty transport, harbour cranes, in combination with energy storage systems	6/129	145/0	LS Ultracapacitor
	Hospital emergency power supply and peak shaving	62	900	Eaton
	Heavy transport	48	5/7	Dongguan Gonghe
	Large mining excavator	-	33/0	Integrator Oerlikon
	Rail gun	-	2/8	Office of Naval Research USA

5. Conclusions

Supercapacitors, due to their unique structure consisting of two thin, high-surface electrodes separated by a dielectric, provide very high capacitance in relatively small volumes, or in other words, high energy storage densities. In addition,

supercapacitors have advantages over other energy storage technologies such as less carbon footprint as well as lower cost of ownership and maintenance. Applications of supercapacitors can be to provide temporary load until the backup generator is fully offline and thus reduce the need for fossil fuel generators, oscillation and stabilization of frequency changes in power systems, smoothing solar and wind energy, support Short-term and reduce the risk of breakdown in important facilities and thus improve the quality of electricity supply. Selection of suitable materials for optimizing the life, power and energy density of supercapacitors, design and optimization of new cell configuration, development of supercapacitor-battery hybrid systems, etc. are among the important branches in future research on Are considered supercapacitors.

6. References

[1] *Skeleton Technologies*, Accessed 6 September 2021; https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1188159/blog-files/170530-SkelGrid-brochure.pdf?__hssc=107776733.2.1574249832478&__hstc=107776733.ad14bbb68814ea5ed17b59e2319b2746.1571834969938.1574015702801.1574249832478.5&__hsfp=2638997623&hsCtaTracking=ba7ded7a-a00f-48f.

[2] A. González, E. Goikolea, J. A. Barrena, R. Mysyk, Review on supercapacitors: Technologies and materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, pp. 1189–1206. 2016.

[3] S. S. Patil, T. S. Bhat, A. M. Teli, S. A. Beknalkar, S. B. Dhavale, M. M. Faras, M. M. Karanjkar, P. S. Patil, Hybrid Solid State Supercapacitors (HSSC's) for High Energy & Power Density: An Overview, *Engineered Science*, Vol. 12, pp. 38–51, 2020.

[4] R. B. Marichi, V. Sahu, R. K. Sharma, G. Singh, *Handbook of Ecomaterials*, pp. 1–26, Springer Cham, 2018.

[5] Y. Shao, M. F. El-Kady, J. Sun, Y. Li, Q. Zhang, M. Zhu, H. Wang, B. Dunn, R. B. Kaner, Design and Mechanisms of Asymmetric Supercapacitors, Chemical Reviews, Vol. 118, No. 18, pp. 9233–9280, 2018.

[6] T. Bowen, I. Chernyakhovskiy, K. Xu, K. Coney, *USAID Grid-Scale Energy Storage Technologies Primer*, Accessed 6 September 2021; https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76097.pdf.

[7] *P. Harrop, Supercapacitor Markets, Technology Roadmap, Opportunities 2021-2041*, Accessed 6 September 2021; www.IDTechEx.com/Supercaps.

سال دهم، شماره دوم، پاییز و زمستان 1402، ص ص 164- 174
فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
jrenew.ir
مقاله ترویجی
تاریخ دریافت: 01/06/23
تاریخ پذیرش: 01/12/06

مروری بر سیستم‌های ابرخازنی ذخیره‌ساز انرژی و کاربردهای آن‌ها

افسانه سادات لاریمی[1*]، علی اکبر اصغری‌نژاد [2]، حسین کرمی[3]

1- استادیار مهندسی شیمی، گروه پژوهشی شیمی و فرآیند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
2- استادیار شیمی تجزیه، گروه پژوهشی شیمی و فرآیند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
3- استادیار مهندسی برق، گروه پژوهشی مطالعات فشار قوی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
* تهران، صندوق پستی 14665517، alarimi@nri.ac.ir

چکیده

استفاده از باتری‌ها بطور گسترده در صنعت در حال افزایش است اما دارای معایب مختلفی هستند و در برخی از کاربردها، نیاز به وزن یا حجم کمتر، چگالی توان بیشتر و یا پاسخ بهتر به اتفاقات گذرا احساس می‌شود. با توجه به مشکلات کاربردی باتری و با پیشرفت تکنولوژی، علی الخصوص در علم مواد، ابرخازن‌ها معرفی شدند. ابرخازن‌ها دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی پیشرفته با ظرفیت بسیار بالا در حجم‌های نسبتاً کوچک هستند. ابرخازن از دو الکترود (صفحه) نازک با سطح بالا تشکیل شده است که توسط یک دی‌الکتریک از یکدیگر جدا شده‌اند و چگالی ذخیره انرژی بالایی را فراهم می‌سازد. افزون بر آن، ابرخازن‌ها در مقایسه با سایر تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی انرژی دارای مزایایی چون ردپای کربن کمتر و همچنین هزینه مالکیت و نگهداشت کمتر هستند. از جمله کاربردهای ابرخازن‌ها می‌توان به تامین موقت بار تا زمان برخط شدن کامل ژنراتور پشتیبان و در نتیجه کاهش نیاز به ژنراتورهای سوخت فسیلی، نوسان‌گیری و تثبیت تغییرات فرکانس در سیستم‌های قدرت، هموارسازی انرژی خورشیدی و باد، پشتیبانی کوتاه مدت و کاهش خطر خرابی در تاسیسات مهم و در نتیجه بهبود کیفیت تامین برق اشاره نمود. ابرخازن‌ها در طیف وسیعی از کاربردها از شبکه برق گرفته تا بخش حمل و نقل استفاده می‌شوند. این مقاله مروری مطالبی در خصوص ابرخازن‌ها از جمله مفهوم، کاربردها، ویژگی‌ها، مزیت‌ها و محدودیت‌ها ارائه می‌کند. در ابتدا به معرفی ساختار ابرخازن و تشریح تفاوت انواع آن پرداخته خواهد شد. سپس به کاربردهای آن در بخش‌های مختلف صنعت از جمله استفاده در شبکه قدرت و ریزشبکه، علی الخصوص مزایای آن‌ها در کنار سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های حمل و نقل پرداخته می‌شود. همچنین چند نمونه پیاده‌سازی در دنیا و مزایای به‌دست آمده تشریح خواهد شد.

کلیدواژگان: ابرخازن، ذخیره‌سازی انرژی، کاربرد، شبکه برق، حمل و نقل

An overview of energy storage supercapacitor systems and their applications

Afsanehsadat Larimi[1*], Ali Akbar Asgharinezhad[2], Hossein Karami[3]

1-Assistant Professor, Chemistry and Process Research Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
2- Assistant professor, Chemistry and Process Research Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
3- Assistant professor, High Voltage Studies Research Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
* P.O.B. 14665517, Tehran, Iran, alarimi@nri.ac.ir

Received: 14 September 2022 Accepted: 25 February 2023

Abstract

The use of batteries is widespread in the industry, but they have various disadvantages, and in some applications, the need for less weight or volume, higher power density or a better response to transient events is felt. Due to the practical problems of batteries and with the advancement of technology, especially in materials science, supercapacitors were introduced. Supercapacitors are advanced high-capacity electrical energy storage devices in relatively small volumes. A supercapacitor consists of two thin, high-level electrodes (plates) separated by a dielectric, providing a high energy storage density. In addition, supercapacitors have advantages over other energy storage technologies such as less carbon footprint as well as lower cost of ownership and maintenance. Applications of supercapacitors can be to provide

مالکیت معنوی این مقاله تحت گواهی بین المللی تخصیص 4 کریتیو کامنز محفوظ است

temporary load until the backup generator is fully offline and thus reduce the need for fossil fuel generators, oscillation and stabilization of frequency changes in power systems, smoothing solar and wind energy, support Short-term and reduce the risk of breakdown in important facilities and thus improve the quality of electricity supply. Supercapacitors are used in a wide range of applications, from the power grid to the transportation sector. This article provides an overview of supercapacitors, including concepts, applications, features, advantages, and limitations. Then, their applications in different sectors of the industry, including use in the power grid and microgrid, especially their benefits in combination with renewable energy and transportation systems, are discussed. Moreover, some examples of universal implementation of supercapacitors and the benefits obtained will be explained.
Keywords: Supercapacitor, Energy storage, Application, Electricity network, Transportation.

1- مقدمه

ابرخازن‌ها[1] دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی با پاسخ سریع[2] و توان بالا[3] هستند که انرژی الکتریکی را ذخیره کرده و اغلب می‌توانند در مدت زمان کوتاه و در جریان‌های بالا شارژ و دشارژ شوند (شکل 1). ذخیره‌سازها را می‌توان از نظر جهات مختلف فنی دسته‌بندی کرد. میزان انرژی ذخیره‌سازی شده، توان خروجی در زمان تخلیه ، زمان تخلیه، کاربردهای مختلف در حوزه تولید، انتقال و توزیع و .... تقسیم‌بندی نمود. از آن‌جا که کاربردهای ذخیره‌سازها در حوزه شبکه برق به توان آن‌ها و زمان تخلیه مربوط می‌شود، لذا بهترین دسته‌بندی فنی را می‌توان از این منظر بررسی کرد (شکل 1). از نظر توان می‌توان ذخیره‌سازها را در سه سطح دسته بندی کرد [1]:

سطح اول (توان بالاتر از 50 مگاوات): این توان به طور معمول در ذخیره‌سازهای مجتمع با ظرفیت انرژی قابل تأمین است. (پمپ هیدرو و هوای فشرده)

سطح دوم (توان بین 50 مگاوات تا 100 کیلووات): این توان بیشترین کاربرد را در شبکه‌های برق دارد.

سطح سوم: توان کمتر از 100 کیلووات: این توان بیشتر در مصرف‌کننده‌های نهایی (تجاری- خانگی- صنعتی) قابل استفاده است.

از نظر زمان دشارژ نیز ذخیره‌سازها را می‌توان در سه سطح تقسیم‌بندی نمود:

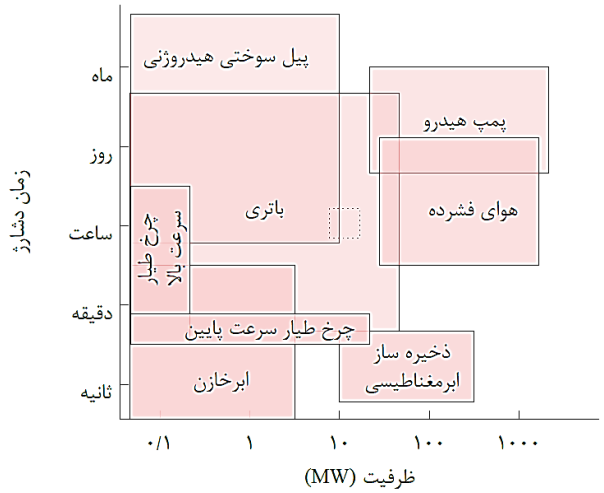
سطح اول؛ بالای 1 ساعت: این زمان تخلیه برای ذخیره‌سازهای با کاربرد های انرژی محور نیاز است. کاربردهای انرژی محور، کاربردهایی هستند که بیشتر بحث تأمین انرژی و کمیت آن مطرح است تا کیفیت. این ذخیره‌سازها بیشتر در حوزه تولید و تأمین دسته‌بندی می‌شوند [1].

سطح دوم؛ کمتر از 1 ساعت و بیشتر از 2 دقیقه: این سطح در کاربردهای خدمات جانبی بسیار کاربرد داشته و در حوزه‌های انتقال و توزیع مطرح هستند.

سطح سوم؛ کمتر از 2 دقیقه: این سطح بیشتر برای مباحث کیفیت توان مطرح است.

ابرخازن‌ها می‌توانند با ولتاژ نسبتاً کم، شارژ بسیار بالایی را نگه دارند، یا به عبارت دیگر با صرف کار کمتر برای شارژ شدن، انرژی بیشتری را نگه دارند و نیز در بازه‌های زمانی نسبتاً کوتاه توان قابل توجهی را تخلیه کنند [2].

براساس آنچه ذکر شد، ابرخازن‌ها در دسته سوم به لحاظ زمان دشارژ و در دسته دوم به لحاظ توان تقسیم بندی می‌شوند [1].



شکل 1 زمان دشارژ تکنولوژی‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی

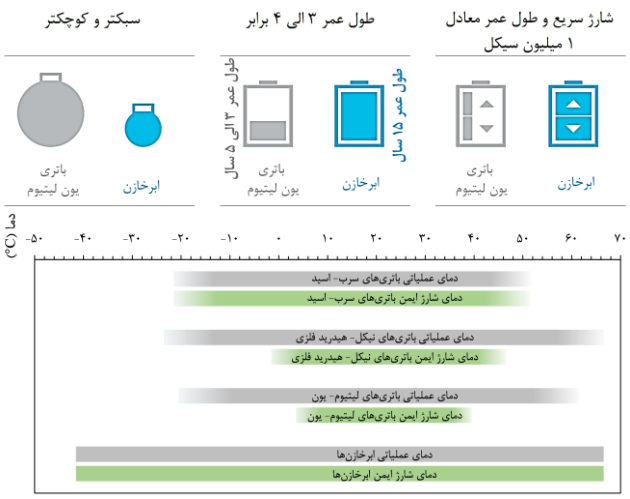
همان‌طور که در شکل 2 نمایش داده شده است، ابرخازن‌ها عمر طولانی‌تری نسبت به سیستم‌های ذخیره‌سازی الکتروشیمیایی مانند باتری‌های یون-لیتیوم و باتری‌های سرب-اسید دارند. افزون بر این، ابرخازن‌ها دارای مزایایی نظیر سرعت بیشتر شارژ و دشارژ، نیاز به تعمیر و نگه‌داری کمتر، بازده رفت و برگشتی (چرخشی) بالاتر و جرم سبک‌تر و ابعاد کوچک‌تر هستند. ابرخازن‌ها مواد شیمیایی مضر و سمی ندارند و به دلیل مقاومت داخلی پایین، تولید گرمای کمتری دارند که این خصوصیت منجر به عدم نیاز به سیستم خنک‌کننده می‌شود. این تجهیزات می‌توانند در بازه دمایی 45- الی 65+ درجه سانتی‌گراد کار کنند و قابلیت کاربرد ترکیبی با ذخیره‌سازهای الکتروشیمیایی (باتری) را به منظور افزایش کارایی و طول عمر قطعات آن‌ها دارا هستند. شایان ذکر است که کاربرد اصلی ابرخازن‌ها ارتقای کیفیت برق است و از آن‌ها برای ذخیره طولانی مدت انرژی استفاده نمی‌شود [3]. از معایب عمده ابرخازن‌ها نسبت به باتری‌ها می‌توان به دانسیته انرژی پایین، نیاز به تنظیم توان برای تحویل نیروی یکنواخت و پایا و هزینه بالا بر واحد انرژی شاره نمود [4].

هدف اصلی در این مقاله، مروری بر کاربردهای ابرخازن در دنیا و معرفی چند کاربرد عملی آن علی الخصوص در صنعت برق کشورهای پیشرفته است. تاکنون مقالات متعددی با موضوع ابرخازن با هدف معرفی مزایای آن نسبت به باتری یا در کاربرد ترکیبی با آن [5–9]، روش‌های مختلف مدل‌سازی و مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها [10–13]، کمک به افزایش قابلیت اطمینان در سیستم قدرت [14,15]، و یا کاربرد آن در انرژی‌های تجدیدپذیر [16] به چاپ رسیده است. اما دیدگاه ارائه شده در این مقاله، نگاه عملیاتی بیشتری

1. Supercapacitor or Ultracapacitor
2. Rapid-response
3. High power

داشته و از این جنبه تحقیقات انجام شده دنیا را نیز بررسی می‌کند. ساختار کلی مقاله به شرح زیر است:

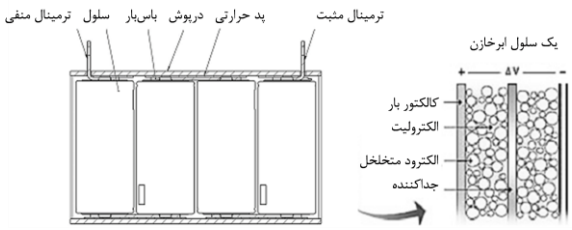
در ابتدا به معرفی ساختار ابرخازن و تشریح تفاوت انواع آن پرداخته خواهد شد. سپس به کاربردهای آن در بخش‌های مختلف صنعت از جمله استفاده در شبکه قدرت و ریزشبکه، علی الخصوص مزایای آن‌ها در کنار سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های حمل و نقل پرداخته می‌شود. همچنین چند نمونه پیاده‌سازی در دنیا و مزایای به‌دست آمده تشریح خواهد شد. در نتیجه می‌توان با مطالب ارائه شده در این مقاله، چشم‌انداز بهتری نسبت به کاربرد ابرخازن در صنعت پیدا داد.



شکل 2 مزایای ابرخازن نسبت به باتری‌های یون-لیتیوم، نیکل-هیدرید فلزی و سرب-اسید

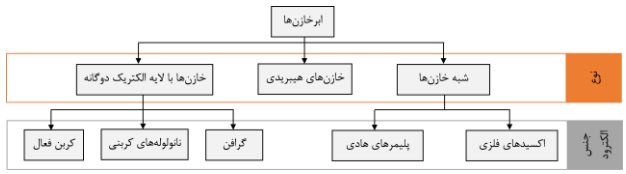
2- ساختار ابرخازن

ماژول ابرخازن شامل چهار سلول سری همراه با نمای داخلی یک سلول ابرخازن در شکل 3 قابل مشاهده است. ساختار کلی ماژول ابرخازن به طور معمول مشخص و ثابت است و عمده تحقیقات بر بهبود اجزای سلول انجام می‌شود که متشکل از کالکتور بار، الکترولیت و جداکننده است [17,18].



شکل 3 نمایی از یک ماژول ابرخازن شامل چهار سلول سری و ساختار داخلی یک سلول آن

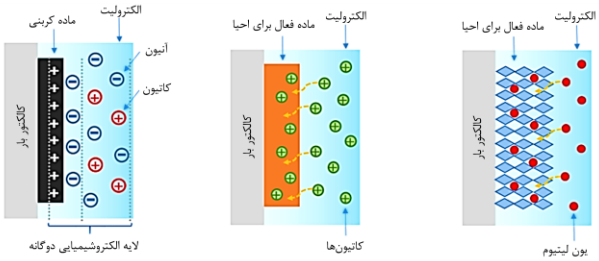
بسته به مکانیسم ذخیره‌سازی یا پیکربندی سلول، ابرخازن‌ها به 3 نوع مختلف تقسیم می‌شوند: خازن‌های دو لایه الکتریکی [1]، شبه خازن‌ها و خازن‌های ترکیبی [19]. خازن‌های دو لایه الکتریکی بر اساس مواد ریز حفره با سطح ویژه بالا (بیش از 1000 مترمربع بر گرم) به عنوان مواد الکترود فعال ساخته می‌شوند و ظرفیت بسیار بالایی نسبت به خازن‌های الکترواستاتیک دارند. الکترودها معمولاً از مواد کربنی متخلخل، نظیر گرافن، نانولوله‌های کربنی و کربن مزوحفره، ساخته می‌شوند [20]. شبه خازن‌ها با استفاده از الکترودهای رسانای پلیمری، نظیر پلی‌آمیدهای آروماتیک و کامپوزیت‌های پلی‌پیرول/پلی‌ایمید، یا اکسید فلزی، نظیر اکسید روتنیوم و اکسید منگنز، و گاهی کربن متخلخل عامل‌دار شده ساخته می‌شوند و عملکرد آن‌ها بر اساس ترکیبی از مکانیسم‌های ذخیره بار الکترواستاتیک و شبه‌خازنی[2] است. این مواد می‌توانند ظرفیت ذخیره بسیار بالاتری در مقایسه با خازن‌های دو لایه الکتریکی داشته باشند، زیرا مکانیسم ذخیره بار شبه‌خازن‌ها متکی به واکنش‌های اکسیداسیون و احیای سریع روی سطح الکترود است. درست بر خلاف باتری‌ها که واکنش‌های اکسیداسیون و احیا در توده (بالک [3]) رخ می‌دهد. با این حال، همانند باتری‌ها، واکنش‌های اکسیداسیون و احیا در خازن‌ها نیز می‌تواند منجر به تغییرات مکانیکی نظیر متورم شدن و کوچک شدن الکترودها شده و لذا شبه‌خازن‌ها دارای پایداری مکانیکی ضعیف و در نتیجه طول عمر کوتاه هستند. در نتیجه، چرخه عمر پایین یک نقص مهم در مواد شبه‌خازنی است. خازن‌های ترکیبی از الکترود خازن دو لایه الکتریکی و الکترود شبه‌خازنی یا باتری تشکیل شده‌اند و ترکیبی از ویژگی‌های هر دو سیستم را دارا هستند. یک مثال خوب از چنین سیستمی خازن یون لیتیوم[4] است. انواع مختلف ابرخازن‌ها و شمای ساختاری آن‌ها به ترتیب در شکل‌های 4 و 5 طبقه‌بندی شده‌اند [21–23]. خط اصلی تحقیقاتی بر انواع مواد قابل استفاده به عنوان الکترود استوار است. الکترولیت‌ها نیز نقش مهمی در عملکرد ابرخازن‌ها ایفا می‌کنند و مقاومت سری معادل [5] ابرخازن‌ها به شدت وابسته به نوع الکترولیت انتخابی است. الکترولیت‌ها می‌توانند مایعات یونی و یا مایعات آلی، نظیر استونیتریل و پروپیلن کربنات، و یا آب باشند. انتخاب مناسب مواد باید با در نظر گرفتن الزامات کاربرد نهایی مانند عمر چرخه، انرژی و توان مورد نیاز، چگالی انرژی و توان و عمر تقویمی صورت پذیرد. جدای از نیاز به مواد مناسب برای الکترود و الکترولیت، طراحی و بهینه‌سازی پیکربندی سلول‌های جدید زمینه رو به رشدی برای توسعه سیستم‌های ترکیبی ابرخازن-باتری است. چنین سیستم‌هایی در مواردی که ابرخازن یا باتری به تنهایی نیازهای خاصی مانند چگالی انرژی، عمر چرخه و توان را برآورده نمی‌کنند، بسیار مورد تقاضا است. الکترودها و نحوه مونتاژ سلول‌ها نیز بسیار مهم است که باید برای به حداکثر رساندن عملکرد بهینه‌سازی شود [24,25].



شکل 4 طبقه بندی انواع مختلف ابرخازن‌ها براساس جنس الکترود

1. Electric double-layer capacitors (EDLCs)

2. Pseudocapacitive
3. Bulk
4. LiC
5. Equivalent series resistance (ESR)



شکل 5 شمای ساختاری انواع مختلف ابرخازن‌ها

3- کاربردها

ابرخازن‌ها قادرند در راستای رفع چالش‌های مربوط به ولتاژ، فرکانس و کیفیت توان، یک استراتژی مقرون به صرفه را به اپراتورهای شبکه ارائه کنند. بر اساس گزارش منتشر شده در وزارت انرژی ایالات متحده آمریکا در سال 2010، ذخیره‌ساز انرژی در صنعت برق می‌تواند دهها کاربرد داشته باشد [26]. در ادامه به چند نمونه از موارد استفاده از ابرخازن‌ها در شبکه برق اشاره شده است.

3-1- تامین موقت بار تا زمان برخط شدن کامل مولد پشتیبان

بطور معمول مولدهای برق در حالت آماده باش[1] هستند تا بسته به افزایش و کاهش تقاضا بتوانند توان خود را افزایش یا کاهش دهند. سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی ابرخازنی می‌توانند به صورت پشتیبان برای مولدهای برق عمل کنند و فاصله زمانی موجود بین ایجاد تقاضا و برخط کردن یک منبع تولید جایگزین را پوشش دهد. به عبارت دیگر تا زمانی که مولد دیگر به قدرت کامل برسد آن را پشتیبانی می‌نماید. لذا ابرخازن‌ها نیاز به مولدهای سوخت فسیلی را کاهش خواهند داد.

3-2- پاسخ فرکانس اولیه

شبکه‌های مدرن برای دست‌یابی به ثبات به راه‌های جدیدی نیاز دارند، زیرا منابع سنتی تولید برق مانند سوخت‌های فسیلی می‌بایست به تدریج کنار گذاشته شده و جای خود را به منابع تجدیدپذیر مانند انرژی‌های بادی و خورشیدی بدهند. از آنجا که این منابع تجدیدپذیر نوسان فراوان در انرژی تولیدی خود دارند، اینرسی سیستم قدرت را کاهش داده و در نتیجه نیازمند ادواتی با پاسخ سریع جهت تنظیم فرکانس خواهیم بود. سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی ابرخازنی با توجه به ویژگی تزریق و جذب سریع انرژی در سیستم قدرت، نوسانات را گرفته و به تثبیت تغییرات فرکانس کمک می‌کنند.

3-3- کاهش افت ولتاژ

افت ولتاژ[2] یکی از مشکلات مربوط به کیفیت برق به ویژه در تاسیسات صنعتی است. خسارت ناشی از افت ولتاژ در کشورهای توسعه‌یافته در اروپا و آمریکا به میلیون‌ها دلار در سال می‌رسد. ابرخازن‌ها با تزریق قدرت برای پشتیبانی کوتاه مدت و کاهش خطر خرابی در تاسیسات مهم، به بهبود کیفیت تامین برق کمک می‌کنند. همچنین این تجهیز می‌تواند در راه‌اندازی موتورهای القایی تحت بار مخصوصا در ابعاد صنعتی کمک‌کننده باشد. از دیدگاه محیط زیستی نیز در مقایسه با باتری‌ها و چرخ‌های طیار[3]، ابرخازن‌ها دارای رد پای کربن کمتر هستند. همچنین هزینه مالکیت[4] و نگهداشت[5] آن‌ها کمتر است.

3-4- کاربرد در ریزشبکه‌ها[6]

ریزشبکه‌ها در پایگاه‌های نظامی، پردیس‌های دانشگاهی، سایت‌های تجاری و صنعتی و مناطق دور افتاده از شبکه اصلی برق وجود دارد. از آنجا که ریزشبکه‌ها متکی به خود[7] هستند، حفظ کیفیت و ثبات برق در آن‌ها بسیار مهم است. سیستم‌های ابرخازنی می‌توانند انواع خدمات کوتاه مدت مانند پشتیبانی از ولتاژ و فرکانس، افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های انرژی خورشیدی و بادی و تامین موقت بار تا زمان برخط شدن کامل مولد پشتیبان را ارائه دهند. اگر چه این خدمات در شبکه‌های برق نیز کاربرد دارد اما نیاز به ادوات با پاسخ سریع در ریزشبکه‌ها بیشتر احساس می‌شود.

3-5-سیستم‌های هیبریدی باتری-ابرخازن

ابرخازن‌ها در سیستم‌های هیبریدی باتری-ابرخازن با کاهش نرخ شارژ و دشارژ باتری‌ها، کمک شایانی به افزایش طول عمر باتری می‌کنند. توپولوژی تک مرحله‌ای سیستم ذخیره‌سازی هیبریدی ابرخازن-باتری در شکل 6-الف قابل مشاهده است. شکل 6-ب نمای سیستم تبدیل انرژی بادی با ذخیره‌ساز هیبریدی ابرخازن-باتری را نشان می‌دهد. یک سیستم تبدیل انرژی خورشیدی با ردیابی نقطه حداکثر توان[8] دارای سیستم ذخیره‌سازی ترکیبی باتری و ابرخازن نیز در شکل 6-ج قابل مشاهده است [27,28].

3-6- هموارسازی[9] انرژی خورشیدی و باد

تغییرات شدت وزش باد و تابش خورشید منجر به عدم ثبات در تولید برق توسط توربین بادی و پنل خورشیدی می‌شود. اپراتورهای شبکه می‌توانند از قدرت بالا و سرعت پاسخ سریع ابرخازن‌ها (در حد میلی ثانیه و ثانیه) برای هموارسازی نوسانات منابع تجدیدپذیر استفاده کنند. همچنین گاهی عدم وزش باد و یا ابری بودن و تاریک شدن هوا منجر به عدم تولید برق از این انرژی‌های تجدیدپذیر می‌شود که در این زمان نیز انرژی مازاد ذخیره شده از این تجهیزات در زمان تولید، کمک‌کننده بوده و از افت دسترسی به انرژی ارزان قیمت تجدیدپذیر بکاهد [29].

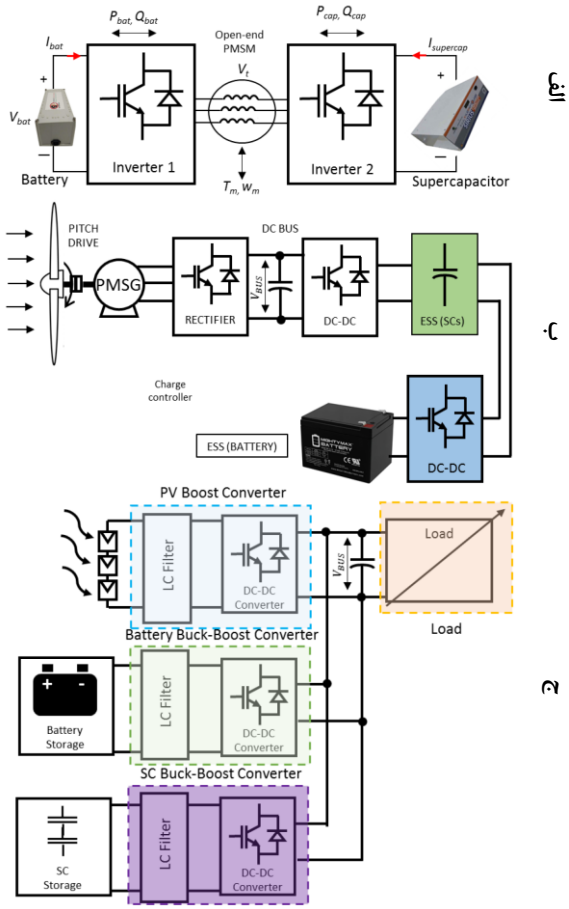
3-7- حمل و نقل برقی

همانطور که مشخص است در خودرو برقی به دلیل نیاز به شارژ و دشارژ انرژی، نیاز است یک ذخیره‌ساز با مشخصات خاص مانند شارژ با جریان و سرعت بالا وجود داشته باشد. علاوه بر اهمیت میزان انرژی قابل ذخیره در ذخیره‌ساز این خودروها، وزن و ابعاد مطلوب نیز از نکات بسیار با اهمیتی هستند که کاربرد ابرخازن‌ها راه حل مناسبی برای آن است. با توجه به این‌که ناگزیر صنعت خودروسازی کشور نیز باید به این سمت حرکت کند، نقش ذخیره‌ساز انرژی و لزوم پژوهش آن بسیار اهمیت می‌یابد. از سوی دیگر، در شارژ این خودروها باید نوسانات ایجاد شده در سمت شبکه و هارمونیک‌های

1. Standby
2. Voltage sag

3. Flywheels
4. Ownership
5. Maintenance
6. Microgrids
7. Self-reliant
8. Maximum power point tracking (MPPT)
9. Smoothing

تولید شده هنگام شارژ را هم در نظر گرفت که این امر نیز به کمک ابرخازن‌ها بهبود می‌یابد. استفاده از ذخیره‌ساز انرژی نه تنها در خودروهای برقی اهمیت می‌یابد بلکه در خودرو سوختی نیز می‌تواند در هنگام احتراق اولیه و روشن شدن خودرو به بهبود عملکرد و عمر موتور خودرو کمک کند. نقش دیگر ابرخازن‌ها در حمل و نقل برقی در خطوط مترو خود نمایان می‌شود. یکی از مشکلات اساسی در سیستم برقی مترو و حتی اتصال آن به شبکه سراسری وجود نوسانات است که در این زمینه نیز سرعت شارژ و دشارژ و عمر سیستم ذخیره‌ساز اهمیت ویژه می‌یابد. همچنین در بخش احیاکردن انرژی هنگام ترمز واگن مترو، که ناگزیر باید در کشور بر روی این موضوع هم تمرکز و در آینده نه چندان دور عملیاتی گردد، نقش ابرخازن بیشتر به چشم می‌خورد. احیاگر انرژی در هنگام ترمز وسیله نقلیه برقی بسیار در دنیا مورد توجه بوده و در کشورهایی مانند فرانسه، سویس و بلژیک به استفاده عملی از ابرخازن به این مقصود روی آورده شده است.



شکل 6 الف - توپولوژی تک مرحله‌ای سیستم ذخیره‌سازی هیبریدی ابرخازن-باتری ، ب – سیستم تبدیل انرژی بادی با ذخیره‌ساز هیبریدی ابرخازن-باتری و ج- سیستم تبدیل انرژی خورشیدی با ذخیره‌ساز هیبریدی ابرخازن-باتری [27,28]

4- مثال‌هایی از موارد عملی استفاده از ابرخازن‌ها در دنیا

4-1- شبکه برق

در سال 2012 شرکت East Penn Manufacturing یک سیستم هیبریدی ابرخازن-اولترا‌باتری به ظرفیت 3 مگاوات به منظور تنظیم فرکانس و مدیریت تقاضا را ابداع نمود. هم اکنون این سیستم ترکیبی توسط یکی از اپراتورهای شناخته شده بازار عمده فروشی برق در آمریکا به نام PJM Interconnection به کار گرفته شد تا در مواقعی که برق به بازار عمده‌فروشی عرضه نمی‌گردد، سیستم ذخیره‌سازی خدمات را به شرکت توزیع محلی Met-Ed ارائه دهد. ابعاد این سیستم ذخیره‌سازی انرژی شامل چند واحد کانتینر است که در صورت تغییر شرایط سیستم برق محلی می‌توان چیدمان آن‌ها را تغییر داد و یا حتی جابجا کرد. در ارزیابی که از عملکرد این سیستم ذخیره‌سازی در 3 سال ابتدایی راه‌اندازی‌اش به عمل آمد، مشخص گردید که 53 درصد از خدمات جانبی مورد نیاز در بازار تنظیمات محلی را پوشش داده است و میانگین بازده AC-AC آن 81 درصد بوده است. در سال 2020 به منظور افزایش پایداری شبکه، یک ابرخازن 5 MW ساخت شرکت اسپانیایی Ingeteam در شبکه ملی برق انگلستان به کار گرفته شد. همچنین در آلمان از ابرخازن‌های کانتینری شرکت Skeleton (شکل 7) به صورت تنها و یا ترکیبی برای اصلاح پیک[1] شبکه‌های بیش از 50 MW استفاده می‌شود.

شکل 7 ابرخازن‌های کانتینری شرکت Skeleton [3]

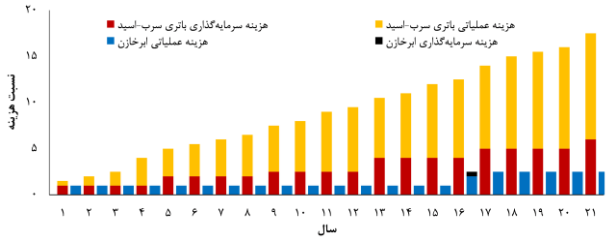
در یک مطالعه موردی دیگر، بر روی یک توربین بادی 2/5 MW که در آن ابرخازن‌ها جایگزین باتری‌های سرب-اسید شدند، برتری ابرخازن نسبت به باتری سرب-اسید به شرح جدول 1 مشخص گردید. همچنین هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و نگه‌داری هنگامی که سیستم ذخیره‌ساز انرژی در توربین بادی از باتری سرب-اسید به ابرخازن تغییر می‌یابد در شکل 8 قابل مشاهده است. بطور کلی از ابرخازن‌ها می‌توان برای مصرف توان راکتیو در خطوط انتقال یا توزیع، بهبود ضریب توان و افزایش کارایی کلی سیستم قدرت استفاده کرد. چند مورد از شرکت‌های تولیدکننده ابرخازن در مقیاس شبکه[2] در جدول 2 آورده شده است.

جدول 1 مزایای ابرخازن نسبت به باتری سرب-اسید برای یک توربین بادی 2/5 MW

ابرخازن	باتری سرب - اسید

1. Peak shaving
2. Grid-scale

نیاز به تعویض باتری برای اولین بار پس از 15 سال (فقط 4 ساعت مدت زمان خاموشی توربین)	نیاز به تعویض باتری هر 4 سال یکبار (هزینه‌های تعویض و خاموشی توربین)
هزینه نگهداری ندارد	هزینه نگهداری معادل 2640 یورو در سال
افزایش ایمنی، قابلیت اطمینان و کارکرد توربین	
فرکانس عملیات pitch کاهش می‌یابد	
شرایط میرایی نوسان تیغه فعال هیچ تاثیری ندارد	



شکل 8 هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری برای تعویض سیستم ذخیره‌ساز انرژی در توربین بادی 2/5 MW

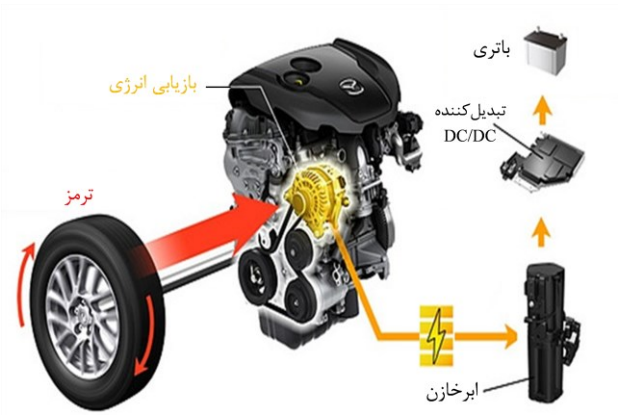
جدول 2 تعدادی از شرکت‌های تولیدکننده ابرخازن در مقیاس شبکه

نام شرکت سازنده	کشور
Tokin Electronics	تایلند
Seiko Instruments Inc.	ژاپن
LS Ultracapacitor	کره جنوبی
CAP-XX	استرالیا
Skeleton Technologies	آلمان
Maxwell Technologies	آمریکا
Eaton	آمریکا
Ioxus	آمریکا
IOXUS Smart Power	آمریکا

4-2- بخش حمل و نقل

بر اساس اطلاعات پایگاه داده ذخیره انرژی جهانی[1] در وزارت انرژی ایالات متحده[2]، بیش از 35 پروژه مبتنی بر ابرخازن‌ها و یا ترکیب آن‌ها با باتری‌ها تا زمستان 2018 اجرا شده است. در سیستم‌های ترکیبی ابرخازن-باتری، از ابرخازن‌ها برای جذب پالس قدرت استفاده می‌شود تا به این ترتیب میزان تخریب باتری‌ها کاهش یافته و طول عمر آن‌ها افزایش یابد. به عنوان مثال سرعت شارژ و دشارژ فوق‌العاده بالا در سیستم‌های حمل و نقل سبب می‌گردد که ابرخازن‌ها برای برنامه‌های ترمز احیاکننده، جذب انرژی ترمز و پشتیبانی پیشرانه بسیار مناسب باشند. این موضوع در حمل و نقل مبتنی بر سیستم برقی مانند مترو بسیار تاثیرگذار است. یکی از مواردی که ابرخازن‌ها با توجه به شارژ یا دشارژ سریع در بازه‌های زمانی کوتاه خود مناسب هستند در خودرو برقی جهت کاهش نوسانات جریان و فرکانس‌های هارمونیک ناشی از شارژ است. در شکل 9 سیستم ترمز احیا شونده خودروی مزدا مشاهده می‌شود. موارد مذکور می‌تواند منجر به نوسانات قابل توجه ولتاژ در کل سیستم‌های قدرت در زمان شارژ این نوع خودروها شود. از ابرخازن‌ها می توان برای کاهش این نوسانات در راستای بهبود کیفیت برق استفاده کرد و اطمینان حاصل کرد که مشکلات مرتبط با بارهای منحصر به فرد به بقیه سیستم قدرت انتشار پیدا نخواهد کرد. مثال‌هایی از بازارهای نوظهور بزرگ برای ابرخازن‌های 0/1 kWh الی 1 MWh در بخش‌های مختلف شبکه و حمل و نقل در جدول 3 قابل مشاهده است [30].

شکل 10 تحقیقات انجام شده در حوزه ابرخازن‌ها در ده سال گذشته را به تفکیک موضوع نشان می‌دهد. نیمی از تحقیقات در حوزه کاربرد ابرخازن در موارد اتصال به شبکه برق و تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم‌های قدرت اتوماتیک و سایر کاربردها در حوزه حمل و نقل است.



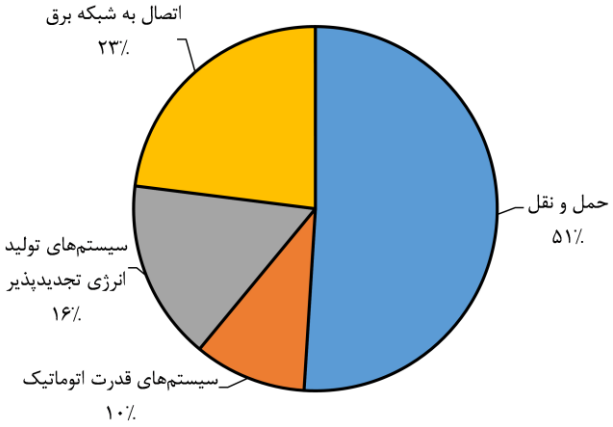
شکل 9 سیستم ترمز احیا شونده خودروی مزدا.

جدول 3 مثال‌هایی از بازارهای نوظهور بزرگ برای ابرخازن‌های 0/1 kWh الی 1 MWh [30]

شرکت تامین کننده	انرژی (kWh)	ولتاژ (V)	کاربرد	نوع
Arvio	7/1	-	جایگزین شدن بجای باتری اینورتر روی شبکه و خارج از شبکه	هیبرید
Aowei	60	500	لوکوموتیوها	هیبرید
Aowei	9/5	500	تراموا، شارژر در دریانوردی، جبران کننده برق	هیبرید
Aowei	32	500	اتوبوس شهری، لوکوموتیو معدن، لوکوموتیو تونلی، کامیون بندری	هیبرید
Shanghai Greentech	0/1	2/7	جایگزینی کامل بجای باتری در خودروی هیبریدی، اصلاح بار در خودروی هیبریدی	هیبرید

1. Global Energy Storage Database
2. U.S. Department of Energy

Jianghai	1/1	32	روبات متحرک هدایت شونده خودکار، شبکه برق، وسایل نقلیه الکتریکی، قطار، آسانسور	هیبرید
Maxwell	0/235	1300	منبع تغذیه اضطراری، ریزشبکه	EDLC
Maxwell+شریک	8	-	فتوولتائیک و جابجایی بار	EDLC
Maxwell-Freqcon	150	-	ریزشبکه	EDLC
LS Ultracapacitor	0/145	129/6	اتوبوس هیبریدی، تراموا، واگن برقی، حمل و نقل سنگین، جرثقیل بندری، در ترکیب با سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی	EDLC
Eaton	900	62	منبع تغذیه اضطراری بیمارستانی و اصلاح پیک	EDLC
Dongguan Gonghe	7/5	48	حمل و نقل سنگین	EDLC
Integrator Oerlikon	0/33	-	بیل مکانیکی بزرگ	EDLC
Office of Naval Research USA	8/2	-	تفنگ ریلی	EDLC



شکل 10 دسته‌بندی تحقیقات انجام شده در حوزه ابرخازن‌ها در ده سال گذشته

5- نتیجه گیری کلی

ابرخازن‌ها به واسطه ساختار منحصر بفرد متشکل از دو الکترود نازک با سطح بالا که توسط یک دی‌الکتریک از یکدیگر جدا شده‌اند، ظرفیت بسیار بالا در حجم‌های نسبتاً کوچک و یا به عبارتی دیگر چگالی ذخیره انرژی بالایی را فراهم می‌سازد. افزون بر آن، ابرخازن‌ها در مقایسه با سایر تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی انرژی دارای مزایایی چون ردپای کربن کمتر و همچنین هزینه مالکیت و نگه‌داری کمتر هستند. از جمله کاربردهای ابرخازن‌ها می‌توان به تامین موقت بار تا زمان برخط شدن کامل ژنراتور پشتیبان و در نتیجه کاهش نیاز به ژنراتورهای سوخت فسیلی، نوسان‌گیری و تثبیت تغییرات فرکانس در سیستم‌های قدرت، هموارسازی انرژی خورشیدی و باد، پشتیبانی کوتاه مدت و کاهش خطر خرابی در تاسیسات مهم و در نتیجه بهبود کیفیت تامین برق اشاره نمود. انتخاب مواد مناسب برای بهینه‌سازی طول عمر، توان و چگالی انرژی ابرخازن‌ها، طراحی و بهینه‌سازی پیکربندی سلول‌های جدید، توسعه سیستم‌های ترکیبی ابرخازن-باتری و غیره از جمله شاخه‌های مهم در آینده تحقیقات بر روی ابرخازن‌ها محسوب می‌گردد.

6- مراجع

[1] D. M. Rastler, Electricity energy storage technology options: a white paper primer on applications, costs and benefits, *Electric Power Research Institute*, 2010.

[2] P. Skoglund, *Grid connected large-scale energy storage - Literature review regarding present technology and application, with a complementary case study that investigates the profitability of storage within a wind farm*, MSc Thesis, Umeå University, Sweden, 2017.

[3] *Skeleton Technologies*, Accessed 6 September 2021; https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1188159/blog-files/170530-SkelGrid-brochure.pdf?__hssc=107776733.2.1574249832478&__hstc=107776733.ad14bbb68814ea5ed17b59e2319b2746.1571834969938.1574015702801.1574249832478.5&__hsfp=2638997623&hsCtaTracking=ba7ded7a-a00f-48f.

[4] S. Shiraishi, Electric double layer capacitors, *Carbon Alloys*, pp. 447-457, Elsevier Science, 2003.

[5] I. Chotia, S. Chowdhury, Battery storage and hybrid battery supercapacitor storage systems: A comparative critical review, *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, Bangkok, Thailand: IEEE, pp. 1–6, 2015.

[6] M. Khalid, A Review on the Selected Applications of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Microgrids, *Energies*, Vol. 12, No. 23, pp. 4459-4492, 2019.

[7] S. R. Raman, X. D. Xue, K. W. E. Cheng, Review of charge equalization schemes for Li-ion battery and super-capacitor energy storage systems, *2014 International Conference on Advances in Electronics Computers and Communications*, Bangalore, India: IEEE, pp. 1–6, 2014.

[8] G. Gautham Prasad, N. Shetty, S. Thakur, Rakshitha, K. B. Bommegowda, Supercapacitor technology and its applications: a review, *First International Conference on Materials Science and Manufacturing Technology*, Tamil Nadu, India: IOPScience, pp. 12105–12115, 2019.

[9] H. Xu, M. Shen, The control of lithium-ion batteries and supercapacitors in hybrid energy storage systems for electric vehicles: A review, *International Journal of Energy Research*, Vol. 15, No. 45, pp. 20524–20544, 2021.

[10] L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, F. Sun, D. G. Dorrell, A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, No. 2, pp. 1868–1878, 2018.

[11] A. Muzaffar, M. B. Ahamed, K. Deshmukh, J. Thirumalai, A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 101 pp. 123–145, 2019.

[12] Z. S. Iro, A Brief Review on Electrode Materials for Supercapacitor, *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 11, pp. 10628–10643, 2016.

[13] Y. Gao, Graphene and Polymer Composites for Supercapacitor Applications: a Review, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 12, No. 387, pp. 1–17, 2017.

[14] H. Yang, A Review of Supercapacitor-based Energy Storage Systems for Microgrid Applications, *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Portland, OR, USA: IEEE, pp. 1–5, 2018.

[15] S. Liu, L. Wei, H. Wang, Review on reliability of supercapacitors in energy storage applications, *Applied Energy*, Vol. 278, pp. 115436–115448, 2020.

[16] R. Hemmati, H. Saboori, Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications – A review,

Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 65, pp. 11–23, 2016.
[17] *SkelCap User Manual*, Accessed 6 September 2021; https://www.skeletontech.com/hubfs/02-SkelCap_Manual-170510-1.pdf?hsLang=en.
[18] V. Shah, J. A. Joshi, R. Maheshwari, R. Roy, Review of ultracapacitor technology and its applications, *Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC)*, Indian Institute of Technology Bombay, Bombay, India, pp. 142–147, 2008.
[19] A. González, E. Goikolea, J. A. Barrena, R. Mysyk, Review on supercapacitors: Technologies and materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, pp. 1189–1206. 2016.
[20] K. Jayaramulu, M. Horn, A. Schneemann, H. Saini, A. Bakandritsos, V. Ranc, M. Petr, V. Stavila, C. Narayana, B. Scheibe, Š. Kment, M. Otyepka, N. Motta, D. Dubal, R. Zbořil, R. A. Fischer, Covalent Graphene-MOF Hybrids for High-Performance Asymmetric Supercapacitors, *Advanced Materials*, Vol. 33, No. 4, pp. 2004560, 2021.
[21] S. S. Patil, T. S. Bhat, A. M. Teli, S. A. Beknalkar, S. B. Dhavale, M. M. Faras, M. M. Karanjkar, P. S. Patil, Hybrid Solid State Supercapacitors (HSSC's) for High Energy & Power Density: An Overview, *Engineered Science*, Vol. 12, pp. 38–51, 2020.
[22] R. B. Marichi, V. Sahu, R. K. Sharma, G. Singh, *Handbook of Ecomaterials*, pp. 1–26, Springer Cham, 2018.
[23] Y. Shao, M. F. El-Kady, J. Sun, Y. Li, Q. Zhang, M. Zhu, H. Wang, B. Dunn, R. B. Kaner, Design and Mechanisms of Asymmetric Supercapacitors, *Chemical Reviews*, Vol. 118, No. 18, pp. 9233–9280, 2018.
[24] S. Y. Attia, S. G. Mohamed, Y. F. Barakat, H. H. Hassan, W. Al Zoubi, Supercapacitor electrode materials: Addressing challenges in mechanism and charge storage, *Reviews in Inorganic Chemistry*, Vol. 42, No. 1, pp. 1–36, 2021.
[25] S. Ferreira, W. Baca, T. Hund, *Life Cycle Testing and Evaluation of Energy Storage Devices*, Accessed 6 September 2021; https://www.energy.gov/sites/default/files/ESS%202012%20Peer%20Review%20%20Life%20Cycle%20Testing%20and%20Evaluation%20of%20Energy%20Storage%20Devices%20%20Summer%20Ferreira%2C%20SNL.pdf.
[26] T. Bowen, I. Chernyakhovskiy, K. Xu, K. Coney, *USAID Grid-Scale Energy Storage Technologies Primer*, Accessed 6 September 2021; https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76097.pdf.
[27] G. Navarro, J. Torres, M. Blanco, J. Nájera, M. Santos-Herran, M. Lafoz, Present and future of supercapacitor technology applied to powertrains, renewable generation and grid connection applications, *Energies*, Vol. 14, No.11, pp.3060–3088, 2021.
[28] Y. Sahri, Y. Belkhier, S. Tamalouzt, N. Ullah, R. N. Shaw, M. S. Chowdhury, K. Techato, Energy management system for hybrid PV/wind/battery/fuel cell in microgrid-based hydrogen and economical hybrid battery/super capacitor energy storage, *Energies*, Vol. 14, No. 18, pp. 5722–5752, 2021.
[29] M. D. Keshavarz, M. H. Ali, Dynamic Performance Enhancement of Power Grids by Operating Solar Photovoltaic (PV) System as Supercapacitor Energy Storage, *Energies,* Vol. 14, No. 14, pp. 4277–4300, 2021.
[30] *P. Harrop, Supercapacitor Markets, Technology Roadmap, Opportunities 2021-2041*, Accessed 6 September 2021; www.IDTechEx.com/Supercaps.