



مروری بر انواع سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی

سبحان حرفت^۱، سارا محمودیان یونسی^۲، غزال سادات لواسانی^۳، ابوالقاسم مسیبی جیره‌نده^۴، محمدرضا پورصابر^۵، رقیه گوگ‌ساز قوچانی^۶، مجید زندی^{۷*}

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 ۲- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 ۳- کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 ۴- استادیار، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 ۵ و ۶- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 * تهران، صندوق پستی ۱۶۵۸۹۵۳۵۷۱، m_zandi@sbu.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، بحران محیط زیستی ناشی از انتشار فزاینده دی‌اکسیدکربن در حال گسترش است. به همین علت دنیا با سرعت قابل توجهی در حال چرخش به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر است. سامانه انرژی تجدیدپذیر، پتانسیل بسیار زیادی برای کربن‌زدایی محیط‌زیست را دارد؛ زیرا آن‌ها گازهای گل‌خانه‌ای یا آلاینده تولید نمی‌کنند. سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر، برای تولید انرژی به منابع طبیعی مانند نور خورشید، باد، آب و زمین‌گرما می‌توانند استفاده کنند. این منابع شامل عدم قطعیت است و به آب‌وهوا، فصل و سال بستگی دارد. برای در نظر گرفتن این تناوب‌ها، انرژی‌های تجدیدپذیر را می‌توان به کمک روش‌های گوناگون ذخیره کرد. سپس در صورت نیاز به شیوه‌ای ثابت و کنترل‌شده بکار گرفت. فناوری سامانه ذخیره‌سازی انرژی، امکان جذب، ذخیره و آزادسازی انرژی را برای کاربرد بعدی فراهم می‌کند. سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌توانند به تعادل عرضه و تقاضای برق، بهبود پایداری شبکه، کاهش انتشار کربن و تسهیل ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه برق کمک کنند. در این پژوهش انواع زیر مجموعه‌های سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مانند حرارتی، شیمیایی، الکتروشیمیایی، مکانیکی، الکتریکی و هیبریدی طبقه‌بندی شده سپس مزایا و معایب و اصول عملیاتی آن‌ها، با یکدیگر مقایسه و بررسی شده است. **کلیدواژه‌گان:** انرژی‌های تجدیدپذیر، گازهای گل‌خانه‌ای، عدم قطعیت، سامانه ذخیره‌سازی انرژی

An overview of all types of energy storage systems

Sobhan Herfat¹, Sara Mahmoudian Younesi², Ghazal Sadat Lavasani³, Abolghasem Mosayyebi Jirhandeh⁴, Mohammad Reza Poursaber⁵, Roghayeh Gavagsaz-Ghoachani⁶, Majid Zandi^{7*}

1, 2- Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
 3- M.Sc. Student, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
 4- M.Sc. Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
 5- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
 6, 7- Associate Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
 * P.O.B. 1658953571 Tehran, Iran, m_zandi@sbu.ac.ir

Received: 06 November 2023 Accepted: 18 March 2024

Abstract

In recent years, the environmental crisis caused by the increasing emission of carbon dioxide is expanding. For this reason, the world is turning towards renewable energies at a considerable speed. The renewable energy system has a great potential for decarbonizing the environment; because they do not produce greenhouse gases or pollutants. Renewable energy systems rely on natural resources such as sunlight, wind, water, and geothermal energy to produce energy. These sources include uncertainty and depend on weather, season, and year. To account for these periodicities, renewable energy can be stored using various methods. Then, if needed, it was used in a fixed and controlled manner. Energy storage system technology provides the possibility of absorbing, storing, and releasing energy for later use. Energy storage systems can help balance electricity supply and demand, improve grid stability, reduce carbon emissions, and facilitate the integration



of renewable energy sources into the grid. In this research, the types of energy storage systems subsets such as thermal, chemical, electrochemical, mechanical, electrical, and hybrid are classified and then their advantages and disadvantages and operating principles are compared and investigated.

Keywords: Renewable energy, greenhouse gases, uncertainty, energy storage system

به بهبود قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری سامانه قدرت شبکه کمک می‌کنند. افزایش قابلیت اطمینان شبکه به دلیل عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر، موضوع اساسی افزایش سطح نفوذ سامانه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه انرژی و توسعه ریزشکته‌های بر اساس انرژی‌های تجدیدپذیر است. راه‌حل اصلی عبور از این چالش، پویاسازی و هوشمندسازی شبکه و ریز شبکه انرژی است. از مهم‌ترین جنبه‌های شبکه‌های هوشمند، کنترل تولید و توزیع انرژی است. این کنترل در سایه ذخیره‌سازی انرژی قابل‌دستیابی است. به‌طور کلی مزایایی که ذخیره‌سازی انرژی برای شبکه یا ریزشکته به ارمغان می‌آورد شامل موارد زیر است [۳].

۱. ایجاد بایستگی در شبکه انرژی با بالا بردن قابلیت اطمینان
 ۲. افزایش بیشینه توان در دسترس از سامانه هیبریدی انرژی به کمک سامانه‌های ذخیره‌ساز
 ۳. کاهش نوسان توان در سامانه تولید انرژی
 ۴. جبران پیک بار، به‌خصوص در شرایط گذرا برای کاهش فشار بر سامانه تولید انرژی
 ۵. جبران پیک بار، به‌خصوص در شرایط گذرا برای کاهش فشار بر سامانه تولید انرژی
- به‌دلیل تنوع زیاد سامانه‌های ذخیره‌ساز موجود با کاربردهای گوناگون، در پژوهش‌ها، این سامانه‌ها را از زوایای گوناگون بررسی شده‌است. باین‌حال، این بررسی‌ها همه‌جانبه نبوده‌است. برای مثال، برخی ارزیابی‌ها بدون اشاره به سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی یا شیمیایی، فقط بر سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی تمرکز می‌کنند.
- در این پژوهش پس از مقدمه انواع سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی طبقه‌بندی شده و به‌دنبال آن تمامی سامانه‌ها معرفی و مزایا و معایب‌شان مورد بحث و بررسی قرار گرفته و در نهایت به مقایسه سامانه‌ها پرداخته می‌شود.

۲- طبقه‌بندی سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی

نیاز روزافزون به ذخیره انرژی، پژوهشگران را برای کشف روش‌های نوین ذخیره‌سازی انرژی با بازدهی بیش‌تر، ترغیب می‌کند. سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی را می‌توان بر اساس عمل‌کرد خاص، سرعت پاسخ، مدت‌زمان ذخیره‌سازی، نوع انرژی ذخیره‌شده و سایر موارد طبقه‌بندی کرد. در این پژوهش، طبقه‌بندی سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی بر اساس شکل انرژی ذخیره‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. انرژی را می‌توان به‌صورت انرژی مکانیکی، الکتروشیمیایی، شیمیایی، حرارتی و میدان‌های الکتریکی ذخیره کرد. همچنین می‌توان انرژی را به‌صورت ترکیبی از دو نوع گوناگون ذخیره کرد. شکل ۱ طبقه‌بندی انواع سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی موجود در این مقاله را نشان می‌دهد و به‌دنبال آن بحث‌های مفصل درباره هر مورد ارائه می‌شود.

۱- مقدمه

سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی به یک جزء مهم در چشم‌انداز انرژی تبدیل شده است. این سامانه‌ها به انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان شبکه‌های برق کمک می‌کنند. به‌علاوه، این سامانه‌ها انرژی اضافی را در زمان کم بودن تقاضا ذخیره و در ساعات اوج مصرف آزاد کرده و به تعادل شبکه و جلوگیری از خاموشی کمک می‌کنند. انواع گوناگونی از سامانه‌های ذخیره انرژی وجود دارد. این انواع گوناگون شامل ذخیره‌سازی باتری، ذخیره‌سازی هیدروپمپ و ذخیره‌سازی حرارتی است [۱].

سامانه‌های ذخیره‌سازی باتری به‌دلیل تطبیق‌پذیری و کاهش هزینه‌ها به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. باتری‌های لیتیوم یونی در حال حاضر رایج‌ترین نوع باتری به‌کاررفته در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی هستند، اما انواع دیگری مانند باتری‌های شارژی و باتری‌های سدیم یون نیز در حال توسعه هستند. بسیاری از شرکت‌ها از این سامانه‌ها برای ذخیره‌سازی انرژی باتری به‌کار می‌گیرند. برخی شرکت‌ها به این سامانه‌ها روی آورده‌اند تا هدف خود از انتشار صفر دی‌اکسید کربن در سال ۲۰۵۰ را تحقق بخشند. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر، سهم منابع تولید غیر سوخت فسیلی، بر اساس منابع انرژی تجدیدپذیر باید تا سال ۲۰۳۰ به ۵۷ درصد در سطح جهان افزایش یابد تا به هدف توافق پاریس برای حفظ میانگین افزایش دمای جهانی زیر ۲ درجه سانتی‌گراد برسد. سهم منابع تجدیدپذیر در ترکیب تولید برق در سال ۲۰۲۱ به بالاترین حد خود یعنی ۳۰ درصد رسیده بود [۲]. منابع انرژی تجدیدپذیر شامل عدم قطعیت هستند. به‌عنوان مثال، صفحه‌های خورشیدی ممکن است در هوای ابری و توربین‌های بادی در هوای آرام ناکارآمد باشند، منابع انرژی تجدیدپذیر گاهی انرژی اضافی تولید می‌کنند که باعث بارگیری بیش‌ازحد سامانه می‌شود؛ بنابراین با در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها و اطمینان از تعادل مناسب بین تولید و تقاضای انرژی، سامانه ذخیره‌سازی انرژی به‌عنوان واقعی‌ترین و موثرترین انتخاب در نظر گرفته می‌شوند.

سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی طیف وسیعی از کاربردها را در محیط‌های مسکونی و تجاری دارند. در خانه‌ها می‌توان از آن‌ها برای ذخیره انرژی خورشیدی اضافی تولیدشده در روز، برای شب یا هنگام قطع برق بکار گرفت. همچنین می‌توان از آن‌ها برای کاهش هزینه‌های پیک تقاضا و صرفه‌جویی در هزینه قبض برق بهره برد. در محیط‌های تجاری، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌توانند برای تامین برق پشتیبان در هنگام قطع، کاهش هزینه‌های پیک مصرف و ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه به‌کار گرفته شوند. همچنین می‌توان از سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی برای ارائه خدمات جانبی مانند تنظیم فرکانس و پشتیبانی ولتاژ بهره برد.

با ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه، فناوری‌های ذخیره‌ساز انرژی، اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کنند. سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی، با ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا، نیاز به احداث نیروگاه‌های گران‌قیمت را کاهش می‌دهد و

کامپوزیت: ترکیب مواد تغییر فاز با مواد دیگر می‌تواند خواص آن را بهبود بخشد.

۲-۱-۱-۴- کاربردهای مواد تغییر فاز دهنده

سامانه‌های گرمایشی و سرمایشی: مواد تغییر فاز می‌توانند برای ذخیره‌سازی گرما در طول روز و آزاد کردن آن در شب برای گرمایش خانه‌ها و ساختمان‌ها استفاده شوند.

ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی: مواد تغییر فاز برای ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی در طول روز و استفاده از آن در شب یا در مواقعی که خورشید در دسترس نیست، استفاده شوند.

صنایع غذایی: مواد تغییر فاز می‌توانند برای حفظ دمای مواد غذایی در طول حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی استفاده شوند [۶].

۲-۱-۲- فناوری ترموشیمیایی

ذخیره‌سازی ترموشیمیایی نوعی ذخیره انرژی حرارتی است که شامل به‌کارگیری از واکنش‌های شیمیایی برگشت‌پذیر برای ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی است. در این فرآیند، یک ماده شیمیایی گرم می‌شود، سپس تحت واکنشی قرار می‌گیرد که انرژی حرارتی را ذخیره کند. هنگامی که انرژی ذخیره‌شده موردنیاز است، ماده خنک، باعث می‌شود که واکنش معکوس انجام پذیرد تا انرژی ذخیره‌شده را آزاد کند. ذخیره‌سازی ترموشیمیایی دارای مزایای متعددی نسبت به انواع دیگر سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی است. به‌عنوان مثال، می‌تواند مقدار زیادی انرژی را در یک فضای کوچک ذخیره کند. علاوه بر این، ذخیره‌سازی ترموشیمیایی می‌تواند انرژی را برای مدت طولانی بدون تلفات قابل‌توجه ذخیره کند و برای کاربردهایی که نیاز به ذخیره انرژی برای روزها یا حتی هفته‌ها دارد، مناسب است [۷].

۲-۱-۳- فناوری جذب

فناوری جذب یکی دیگر از روش‌های ذخیره انرژی حرارتی است که به‌کمک مواد جاذب برای ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی است. جذب سطحی زمانی اتفاق می‌افتد که یک گاز یا مایع به سطح یک ماده جامد جذب و یک‌لایه نازک تشکیل می‌دهد. مواد جاذب پس از حذف گاز یا مایع می‌توانند انرژی ذخیره‌شده را آزاد کنند. یک نمونه از ذخیره انرژی حرارتی بر اساس جذب، به‌کمک کربن فعال به‌عنوان ماده جاذب است. هنگامی که کربن فعال در معرض گازی مانند بخار آب قرار می‌گیرد، می‌تواند گاز را روی سطح خود جذب و انرژی حرارتی را در این فرآیند ذخیره کند. هنگامی که کربن فعال گرم می‌شود، بخار آب آزاد می‌شود و انرژی ذخیره‌شده برای گرمایش یا سرمایش کاربرد دارد. ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بر اساس جذب، دارای چند مزیت نسبت به سایر سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی است. فرآیند جذب می‌تواند انرژی را در دماهای بالا ذخیره کند و چگالی انرژی بالایی دارد که امکان به‌کارگیری بهینه از فضا را فراهم می‌کند. علاوه بر این، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بر اساس این روش می‌توانند در کاربری‌های گوناگونی از جمله سامانه‌های گرمایش و سرمایش، سامانه‌های تبرید و تولید برق کاربرد دارد [۸].

به‌طور کلی، فرآیندهای شیمیایی نقش مهمی در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی ایفا می‌کنند و چگالی انرژی بالا و قابلیت‌های ذخیره‌سازی طولانی مدت را ارائه می‌کنند. با تحقیق و توسعه مداوم، روی مواد شیمیایی سامانه این پتانسیل را دارند که روش ذخیره و به‌کارگیری از انرژی حرارتی را متحول



شکل ۱ طبقه‌بندی سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی [۳]

۲-۱-۲- ذخیره‌سازی حرارتی

ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به‌منظور گرمایش یا سرمایش به‌کار گرفته می‌شود. فرآیندهای شیمیایی نقش مهمی در این نوع ذخیره‌سازی دارند، زیرا می‌توانند انرژی حرارتی را از طریق واکنش‌های شیمیایی ذخیره و آزاد کنند. در شکل ۲ چند نمونه از فرآیندهای به‌کارگیری در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نشان داده شده است [۴].



شکل ۲ دسته‌بندی ذخیره‌سازی انرژی حرارتی [۴]

۲-۱-۱-۱- فناوری مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده، موادی هستند که انرژی حرارتی را با تغییر فاز (به‌عنوان مثال جامد به مایع) در یک دمای خاص ذخیره می‌کنند. مواد تغییر فاز دهنده به‌طور معمول در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی کاربرد دارند، زیرا چگالی انرژی بالایی ارائه می‌دهند و قابلیت این را دارند که انرژی را برای مدت‌زمان طولانی ذخیره کنند [۵].

۲-۱-۱-۱-۱- مزایای مواد تغییر فاز دهنده

ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای بالا مواد تغییر فاز می‌تواند ۵ تا ۱۴ برابر آب گرما ذخیره کنند.

دمای ذوب ثابت مواد تغییر فاز در دمای مشخصی ذوب و منجمد می‌شوند. قابلیت بازیافت مواد تغییر فاز می‌تواند بارها ذوب و منجمد شوند بدون اینکه خواص خود را از دست بدهند.

۲-۱-۱-۲- خواص مواد تغییر فاز دهنده

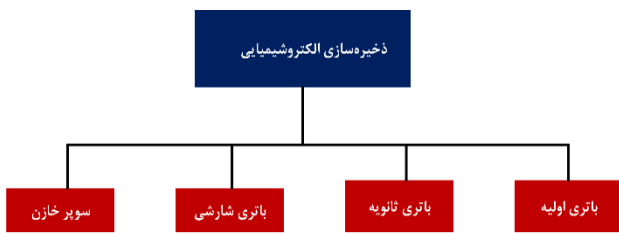
ظرفیت گرمای نهان: مقدار گرمایی که در هنگام تغییر فاز جذب یا آزاد شده و دمای ذوب که در آن ماده از جامد به مایع تبدیل می‌شود.

حلالیت: قابلیت حل شدن در مواد دیگر. پایداری شیمیایی: مقاومت در برابر تجزیه شیمیایی [۶].

۲-۱-۱-۳- استفاده از فناوری‌های جدید

نانو ذرات: استفاده از نانو ذرات مواد تغییر فاز می‌تواند باعث افزایش سرعت انتقال حرارت و راندمان ذخیره‌سازی گرما شود.

ذخیره‌سازی الکتروشیمیایی روشی است که در آن انرژی الکتریکی به صورت انرژی شیمیایی ذخیره می‌شود. هنگامی که انرژی ذخیره شده مورد نیاز است، سامانه انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. انواع گوناگونی از سامانه‌های ذخیره انرژی الکتروشیمیایی وجود دارد. باتری‌ها انرژی را به شکل شیمیایی ذخیره می‌کنند و در صورت نیاز آن را به عنوان انرژی الکتریکی آزاد می‌کنند. سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتروشیمیایی کاربردهای متعددی در وسایل نقلیه الکتریکی، سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر و دستگاه‌های الکترونیکی دارند. این ذخیره‌سازها هم‌چنین به عنوان سامانه‌های پشتیبان برق برای زیرساخت‌های حیاتی مانند بیمارستان‌ها و مراکز داده کاربرد دارد. در شکل ۴ طبقه‌بندی ذخیره‌سازهای الکتروشیمیایی نشان داده شده است [۹، ۱۱].



شکل ۴ طبقه‌بندی ذخیره‌سازی الکتروشیمیایی [۹، ۱۱]

۱-۳-۲- باتری اولیه

باتری اولیه به عنوان باتری غیرقابل شارژ نیز شناخته می‌شود. این باتری‌ها، پس از اتمام انرژی باید تعویض شود. باتری‌های اولیه به‌طور معمول در دستگاه‌هایی کاربرد دارند که به انرژی کم در مدت زمان طولانی (مانند اسباب‌بازی، سمعک و چراغ‌قوه) نیاز دارند. مزیت باتری‌های اولیه، نیاز به نگهداری ندارد، ارزان تر بودن نسبت به باتری‌های قابل شارژ و سادگی در کارکرد است [۹، ۱۱]. این نوع باتری‌ها دوستدار محیط‌زیست نیستند، زیرا باعث تولید ضایعات الکترونیکی می‌شوند.

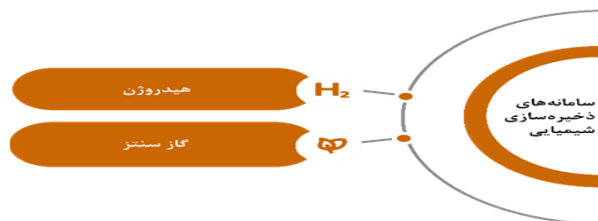
۲-۳-۲- باتری ثانویه

باتری ثانویه به عنوان باتری قابل شارژ نیز شناخته می‌شود. این نوع باتری‌ها پس از دشارژ، قابل شارژ مجدد هستند و واکنشی که در آن‌ها رخ می‌دهد، بازگشت پذیر است. انرژی مورد نیاز برای انجام واکنش در جهت خلاف به منظور شارژ مجدد باتری از طریق اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی و عبور جریان تامین می‌شود. چگالی انرژی باتری‌های ثانویه، به نسبت کمتر از باتری‌های اولیه است اما در مقابل، این باتری‌ها چگالی توان بالاتری دارند و اغلب گران تر از باتری‌های اولیه هستند. این نوع باتری‌ها نسبت به باتری‌های ثانویه دوستدار محیط‌زیست هستند [۹، ۱۱]. در شکل ۵ تعدادی از باتری‌های ثانویه نشان داده شده است.

کنند. با این حال، پمپ‌های حرارتی شیمیایی نیز دارای معایبی هستند. نصب و نگهداری آن‌ها ممکن است پرهزینه و مواد شیمیایی در سامانه در صورت کاربرد نادرست می‌تواند خطرناک باشد. علاوه بر این، کارایی این سامانه‌ها تحت اثر عامل‌های خارجی مانند رطوبت و نوسان دما است.

۲-۲- ذخیره‌سازی شیمیایی

سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی شیمیایی از واکنش‌های شیمیایی برای ذخیره و آزادسازی انرژی کمک می‌گیرد. از ویژگی این سامانه‌ها چگالی انرژی بالا است که انرژی را برای مدت زمان طولانی ذخیره می‌کند. با این حال، چگالی توان کمتری نسبت به سامانه‌های ذخیره‌سازی الکترواستاتیک دارند و شارژ و دشارژ آن‌ها بیشتر طول می‌کشد. در شکل ۳ طبقه‌بندی ذخیره‌سازی شیمیایی نشان داده شده است [۹، ۱۰].



شکل ۳ طبقه‌بندی ذخیره‌سازی شیمیایی [۹، ۱۰]

۱-۲-۲- هیدروژن

هیدروژن یک عنصر بسیار واکنش‌پذیر است که برای بسیاری از واکنش‌های شیمیایی ضروری است. به‌طور معمول از هیدروژن به عنوان سوخت در پیل‌های سوختی کاربرد دارد. هم‌چنین می‌توان هیدروژن را به شکل گاز در ترکیباتی مانند آمونیاک یا متانول ذخیره کرد. هیدروژن از طریق الکترولیز آب تولید و در طول چرخه شارژ در یک مخزن ذخیره می‌شود. در طول چرخه تخلیه، برق از هیدروژن ذخیره شده، با کمک از یک پیل سوختی تولید می‌شود [۹، ۱۰].

۲-۲-۲- گاز سنتز

در سامانه‌های ذخیره انرژی شیمیایی گاز سنتز، الکتریسیته اضافی تولید شده از منابع تجدیدپذیر برای تولید گاز سنتز از طریق الکترولیز یا روش‌های دیگر به کار گرفته می‌شود. سپس گاز سنتز تولید شده را می‌توان در مخازن یا خطوط لوله برای کاربرد بعدی ذخیره کرد. هنگامی که انرژی مورد نیاز است، گاز سنتز ذخیره شده را می‌توان از طریق احتراق یا پیل‌های سوختی به الکتریسیته تبدیل کرد. احتراق شامل سوزاندن گاز سنتز برای آزاد کردن گرما است که می‌تواند برای تولید بخار و به حرکت درآوردن توربین‌ها برای تولید برق به کار گرفته شود. از سوی دیگر، پیل‌های سوختی، گاز سنتز را به‌طور مستقیم با راندمان بالا به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. ذخیره‌سازی انرژی شیمیایی گاز سنتز چندین مزیت را ارائه می‌دهد. از جمله این مزیت‌ها این است که راهی برای ذخیره انرژی تجدیدپذیر اضافی و تبدیل آن به برق در صورت نیاز فراهم می‌کند. این به متعادل کردن ماهیت متناوب تولید انرژی تجدیدپذیر و تضمین یک منبع تغذیه قابل اعتماد کمک می‌کند.

۲-۲- ذخیره‌سازی الکتروشیمیایی

باتری‌ها پتانسیل این را دارند که جایگزین باتری‌های سرب-اسید شوند، زیرا نسبت انرژی و توان به جرم بالاتری نسبت به باتری‌های سرب-اسید دارند [۱۵].

➤ نیکل-هیدروژن

از مزایای باتری‌های نیکل-هیدروژن، چگالی انرژی بالای آن‌ها است که می‌تواند انرژی بیشتری نسبت به انواع دیگر باتری‌ها ذخیره کند. این نوع باتری‌ها دارای طول عمر طولانی هستند و برخی از آن‌ها تا ۲۰ سال عمر می‌کنند. علاوه بر این، به‌طور نسبی ایمن بوده و حاوی مواد سمی نیستند. تولید این نوع باتری‌ها ممکن است پرهزینه باشد و برای جلوگیری از آسیب به باتری، روش‌های نگهداری خاصی نیاز دارد. این نوع باتری‌ها همچنین به دماهای بالا حساس هستند و در صورت قرار گرفتن در معرض گرمای شدید عمل‌کردشان کاهش می‌یابد [۱۶].

➤ نیکل-فلز هیدرید

این باتری‌ها به‌جای کادمیم از آلیاژ جذب‌کننده هیدروژن با الکترودهای هیدروکسید نیکل اکسید و الکترولیت هیدروکسید پتاسیم به‌کار می‌گیرند. باتری‌های نیکل-فلز هیدرید نسبت نیکل-کادمیم چگالی انرژی بالاتری دارند [۱۷].

➤ لیتیوم یون

باتری‌های لیتیوم یون رایج‌ترین نوع باتری بر اساس لیتیوم است. این باتری دارای چگالی انرژی بالا، سرعت تخلیه کم و عمر چرخه طولانی است. باتری‌های لیتیوم یونی در طیف گسترده‌ای از کاربردها از جمله گوشی‌های هوشمند، لپ‌تاپ، خودروهای الکتریکی و سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی کاربرد دارند [۱۸].

➤ لیتیوم پلیمری

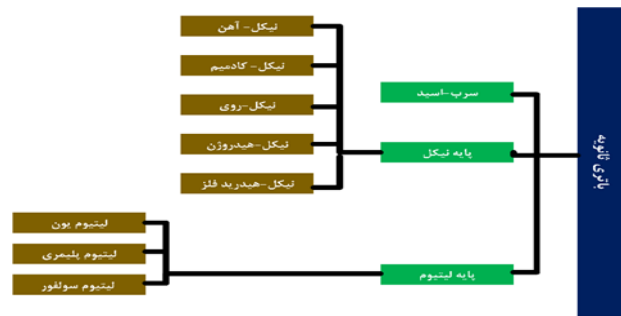
الکترولیت این نوع باتری پلیمری جامد به‌جای الکترولیت مایع است. چگالی انرژی بالاتری نسبت به باتری‌های لیتیوم یونی دارد و می‌توان آن را در اشکال و اندازه‌های گوناگون ساخت. باتری‌های لیتیوم پلیمری به‌طور معمول در دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل و اسباب‌بازی‌های کنترل از راه دور کاربرد دارد [۱۹].

➤ لیتیوم-سولفور

این نوع باتری‌ها چگالی انرژی بالایی دارند اما هنوز در دست توسعه هستند. این نوع باتری‌ها پتانسیل کارکرد در وسایل نقلیه الکتریکی و سامانه‌های ذخیره انرژی در مقیاس شبکه را دارد [۲۰].

۳-۲-۳- باتری شارژی

باتری‌های شارژی یک راه‌حل ایده‌آل برای ذخیره انرژی هستند، زیرا می‌توانند مقادیر زیادی انرژی را برای مدت‌زمان طولانی ذخیره کنند. الکترولیت این باتری در مخازن خارجی نگه می‌دارند، بسته به مقدار انرژی که باید ذخیره شود این مخازن می‌توانند کوچک یا بزرگ شوند که باتری‌های شارژی را به گزینه‌ای انعطاف‌پذیر برای کاربردهای گوناگون تبدیل کنند. در سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر، باتری‌های شارژی می‌توانند انرژی اضافی تولیدشده توسط پنل‌های خورشیدی یا توربین‌های بادی را در زمان‌هایی که تقاضا کم است، ذخیره کرده و در دوره‌های اوج تقاضا آزاد کنند. این موضوع به تعادل شبکه و کاهش نیاز به نیروگاه‌های بر اساس سوخت فسیلی کمک می‌کند. باتری‌های شارژی همچنین برای ذخیره‌سازی شبکه که شامل ذخیره انرژی در ساعات غیر اوج مصرف و رهاسازی آن در دوره‌های اوج تقاضا است، کاربرد دارند. این موضوع



شکل ۵ انواع باتری‌های ثانویه [۹، ۱۱]

➤ باتری سرب-اسید

باتری‌های سرب-اسید، محبوب‌ترین و پرکاربردترین نوع باتری‌های قابل شارژ هستند. این باتری‌ها اغلب در خودروها، قایق‌ها، برق اضطراری، وسایل نقلیه الکتریکی کاربرد دارد. الکترولیت رایج در این نوع باتری‌ها، اسیدسولفوریک است. هنگامی که جریانی از باتری عبور می‌کند، یک واکنش شیمیایی رخ می‌دهد که انرژی الکتریکی تولید می‌کند. باتری‌های سرب اسید به‌دلایلی از جمله هزینه کم، نگهداری آسان و عمل‌کرد بسیار خوب در ارائه سریع مقدار زیاد انرژی بسیار شناخته‌شده هستند. با این حال، از معایب این باتری‌ها می‌توان به وزن سنگین، کاربرد ضعیف در دمای پایین و توانایی نداشتن برای حفظ طول عمر خود از طریق کاربرد غیرمستقیم اشاره کرد. به همین دلیل برای اطمینان از عمل‌کرد مطلوب نیاز به تعمیر و نگهداری منظم دارند [۱۲].

➤ نیکل-آهن

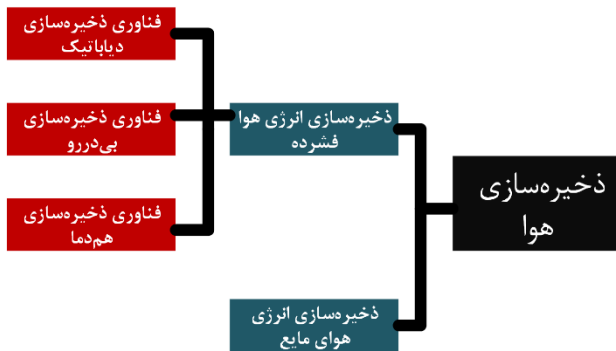
باتری‌های نیکل آهن، دارای الکتروکود مثبت اکسید-هیدروکسید نیکل و الکتروکود منفی آهن با الکترولیت هیدروکسید پتاسیم است. این نوع از باتری‌ها، در برابر شارژ بیش‌ازحد، تخلیه بیش‌ازحد و اتصال کوتاه مقاوم است. این نوع از باتری‌ها، برای سامانه‌های برق پشتیبان بسیار مناسب است و طول عمر بالایی خواهد داشت. به‌علاوه، این باتری‌ها، به‌دلیل دوام و قابلیت اطمینان خود شناخته‌شده‌است و اغلب در سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر و وسایل نقلیه الکتریکی کاربرد دارند. با توجه به انرژی ویژه کم، نگهداری شارژ ضعیف و هزینه بالای ساخت، انواع دیگر باتری‌های قابل شارژ در اکثر کاربردها جایگزین باتری نیکل-آهن شده‌اند [۱۳].

➤ نیکل-کادمیم

این باتری‌ها از هیدروکسید نیکل و کادمیم فلزی به‌عنوان الکتروکود با الکترولیت هیدروکسید پتاسیم به‌کار می‌گیرند. این نوع باتری‌ها دارای چگالی انرژی بالا هستند که عمر چرخه و عمل‌کرد خوبی را در دماهای پایین با ظرفیت مناسب ارائه می‌دهند، اما مزیت مهم آن‌ها توانایی ارائه ظرفیت نامی کامل خود در نرخ‌های تخلیه بالا (دشارژ در یک ساعت یا کمتر) است. با این حال، مواد موردنیاز برای ساخت این باتری‌ها گران‌تر از باتری‌های سرب-اسید است و نرخ خودتخلیه بالایی دارند که به‌طور معمول در دستگاه‌های قابل حمل، روشنائی اضطراری و برنامه‌های برق پشتیبان به‌کار گرفته می‌شوند [۱۴].

➤ نیکل-روی

این نوع باتری‌ها از الکترودهای روی و نیکل با الکترولیت هیدروکسید پتاسیم به‌کار می‌گیرند. آن‌ها ولتاژ بالاتری نسبت به باتری‌های نیکل کادمیم دارند، این نوع از باتری‌ها، در کاربردهایی با تخلیه جریان بالا عمل‌کرد خوبی دارند. این



شکل ۷ طبقه‌بندی روش‌های ذخیره‌سازی مکانیکی هوا [۲۳]

۱-۴-۲- ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده

این روش شامل فشرده‌سازی هوا و ذخیره آن در یک مخزن زیرزمینی، مانند یک میدان گاز طبیعی تخلیه‌شده یا یک غار نمکی است. هنگامی که برق موردنیاز است، هوای فشرده، آزاد می‌شود. این هوا برای تغذیه توربین کاربرد دارد و در نهایت برق تولید می‌شود. در طول چرخه شارژ، از برق شبکه برای تغذیه موتور به‌کارگیری می‌شود. این برق انرژی مکانیکی تولید و کمپرسور چندمرحله‌ای را به حرکت درمی‌آورد. هوای اطراف فشرده می‌شود سپس در غار زیرزمینی ذخیره‌شده و در ادامه هوای فشرده ذخیره‌شده در غار برای به حرکت درآوردن توربین‌های فشار به‌کارگیری می‌شود. این توربین‌ها، ژنراتور را برای تولید الکتریسیته موردنیاز در طول چرخه تخلیه هدایت می‌کند [۲۳].

➤ فناوری ذخیره‌سازی دیاباتیکی

روش ذخیره‌سازی مکانیکی هوای فشرده دیاباتیکی نوعی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده^۱ است که در آن هوای فشرده با به‌کارگیری از گاز طبیعی یا سایر سوخت‌ها قبل از آزاد شدن برای تغذیه توربین و تولید برق، گرم می‌شود. این روش در مقایسه با روش بی‌دررو، کارایی بیشتر و خروجی انرژی بالاتری را ممکن می‌سازد، اما باعث انتشار گازهای گل‌خانه‌ای ناشی از احتراق سوخت می‌شود. در طول چرخه شارژ، از برق شبکه برای تغذیه موتور به‌کارگرفته می‌شود. این برق انرژی مکانیکی تولید می‌کند و کمپرسور چندمرحله‌ای را به حرکت درمی‌آورد. سپس به کمک خنک‌کاری هوا برای کاهش دمای آن، هوای فشرده‌شده در غار زیرزمینی ذخیره می‌شود. پس از آن هوای خنک ذخیره‌شده در غار، در محفظه احتراق گرم و منبسط می‌شود تا انرژی موردنیاز در طول چرخه تخلیه آزاد شود [۲۳].

➤ فناوری ذخیره‌سازی بی‌دررو

روش ذخیره‌سازی مکانیکی هوای فشرده بی‌دررو نوعی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده است که در آن هوای فشرده در یک مخزن عایق ذخیره می‌شود و برای تغذیه توربین و تولید برق، بدون هیچ‌گونه گرمایش یا سرمایش خارجی آزاد می‌شود. این روش در مقایسه با ذخیره‌سازی هوای فشرده دیاباتیکی بازده و انرژی خروجی کمتری دارد، اما هیچ‌گونه انتشار گازهای گل‌خانه‌ای به همراه ندارد. در طول چرخه شارژ، از برق شبکه برای تغذیه موتور به‌کارگرفته می‌شود. این برق انرژی مکانیکی تولید کرده و کمپرسور چندمرحله‌ای را به حرکت درمی‌آورد. در طول این فرآیند هوای فشرده‌شده در غار ذخیره و گرمای ناشی از فشرده‌سازی هوا در کمپرسور، درون ذخیره‌ساز حرارتی ذخیره می‌شود. در

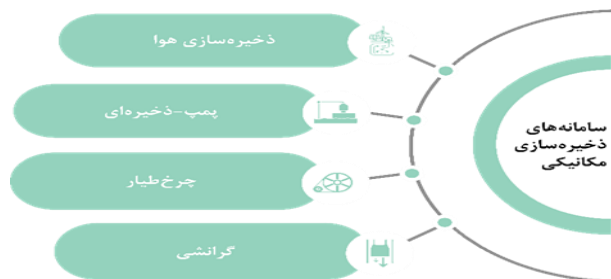
از خاموشی جلوگیری می‌کند. وسایل نقلیه الکتریکی می‌توانند از باتری‌های شارژی بهره‌مند شوند زیرا قابلیت این را دارند که برد طولانی‌تر و زمان شارژ سریع‌تری را ارائه دهند. باتری‌های شارژی را می‌توان به‌سادگی با جایگزینی الکترولیت تخلیه‌شده با الکترولیت تازه به‌سرعت شارژ کرد [۲۱].

۴-۳-۲- ذخیره‌سازی الکتریکی سوپر خازن

سامانه ذخیره انرژی سوپر خازن شبیه به یک خازن است، که به‌جای خازن‌های سنتی، سوپر خازن‌های کاربرد دارد. سوپر خازن‌ها چگالی انرژی بالاتری نسبت به خازن‌های سنتی دارند که امکان ذخیره‌سازی طولانی‌مدت انرژی را فراهم می‌کنند. به‌طور معمول کاربرد سوپر خازن زمانی است؛ که به توان خروجی بالا برای مدت‌زمان طولانی‌تری نیاز هست، مانند کاربرد در بخش صنعتی، حمل‌ونقل و صنعت نظامی که نیاز به ذخیره انرژی طولانی‌مدت دارند. یکی از مزایای سوپر خازن‌ها راندمان بالا، زمان شارژ و تخلیه سریع آن‌ها است. سوپر خازن‌ها طول عمر بیشتری نسبت به باتری‌ها دارند. باین‌حال، هزینه بالاتر و چگالی انرژی کمتر، کارکرد آن‌ها را در برخی کاربردها محدود می‌کند.

۴-۲- ذخیره‌سازی مکانیکی

سامانه ذخیره‌سازی انرژی مکانیکی نوعی سامانه ذخیره انرژی است که از ابزارهای مکانیکی برای ذخیره و آزادسازی انرژی بهره‌برداری می‌کند. این نوع سامانه اغلب برای ذخیره انرژی از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی باد و خورشید کاربرد دارد. این سامانه‌ها با رایج‌تر شدن منابع انرژی تجدیدپذیر اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است. این سامانه‌ها اجازه می‌دهند تا انرژی اضافی، ذخیره‌شده و در موقع پیک مصرف، به‌کارگرفته شود. در شکل ۶ طبقه‌بندی کلی ذخیره‌سازی مکانیکی نشان داده‌شده است [۲۲].



شکل ۶ طبقه‌بندی ذخیره‌سازی مکانیکی [۲۲]

۱-۴-۲- انواع روش‌های ذخیره‌سازی هوا

دو نوع روش کلی برای ذخیره مکانیکی هوا وجود دارد. این دو روش در شکل ۷ نشان داده‌شده است.

۲-۴-۲-۱- موقعیت مخزن

➤ بالای سطح زمین

در این نوع سامانه‌ها، هیدروپمپ و مخزن ذخیره در بالای سطح زمین قرار دارند. از جمله نمونه‌های ساخته‌شده در جهان، سامانه‌های ذخیره‌سازی پمپ-ذخیره‌ای نیروگاه اوکیناوا ژاپن و کروآچان اسکانلند است [۳].

➤ زیر سطح زمین

در این نوع سامانه‌ها، هیدروپمپ و مخزن ذخیره در زیر سطح زمین قرار دارند. این نوع سامانه به‌طور معمول در کاربردهای تجاری و صنعتی بزرگ‌تر که در آن فضا محدود است، کاربرد دارد. در این نوع سامانه‌های ذخیره‌سازی، آلودگی بصری وجود ندارد اما باید با روش‌هایی ویژه از آلودگی آب‌های زیرزمینی جلوگیری شود. مخازن به‌طور معمول در زیرزمین دفن می‌شوند و از طریق چاهک بازدید یا نقاط دسترسی، قابل دسترسی هستند [۳].

۲-۴-۲-۲- حلقه ذخیره‌سازی

➤ حلقه باز

در این روش از یک منبع آب طبیعی مانند رودخانه یا دریاچه به‌عنوان مخزن پایینی کمک گرفته می‌شود. آب از منبع طبیعی به مخزن بالایی در دوره‌هایی که تقاضای انرژی کم است، پمپ می‌شود. هنگامی که تقاضای انرژی افزایش می‌یابد، آب از مخزن بالایی از طریق توربین برای تولید برق آزاد می‌شود و سپس به منبع طبیعی تخلیه می‌شود [۳].

➤ حلقه بسته

این روش شامل دو مخزن در بلندی‌های گوناگون است که توسط یک خط لوله و یک پمپ-توربین به هم متصل می‌شوند. در دوره‌هایی که تقاضای انرژی کم است، الکتریسیته اضافی برای پمپاژ آب از مخزن پایینی به مخزن بالایی کاربرد دارد. هنگامی که تقاضای انرژی افزایش می‌یابد، آب از مخزن بالایی برای تولید برق آزاد می‌شود و از توربین عبور می‌کند [۳].

۲-۴-۳- چرخ طیار

ذخیره انرژی چرخ‌طیار^۱ یک سامانه ذخیره‌سازی مکانیکی است که شامل به‌کارگیری از یک جرم دوار برای ذخیره انرژی است. این سامانه از یک روتور، بلبرینگ و یک موتور/ژنراتور تشکیل شده است. هنگامی که انرژی ذخیره می‌شود، موتور، روتور را به‌سرعت بالایی شتاب می‌دهد و در صورت نیاز به انرژی، ژنراتور سرعت روتور را کاهش می‌دهد و انرژی جنبشی را دوباره به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. سامانه‌های ذخیره انرژی چرخ‌طیار دارای مزایای متعددی نسبت به سایر فناوری‌های ذخیره‌سازی هستند. این سامانه‌ها زمان پاسخ‌گویی بسیار سریع دارند که برای برنامه‌هایی که نیاز سریع به برق دارند، مانند تثبیت شبکه در هنگام قطع برق یا تامین برق پشتیبان برای تاسیسات حیاتی ایده‌آل است. سامانه‌های چرخ‌طیار دارای طول عمر بالایی هستند و برخی از سامانه‌ها تا ۲۵ سال عمر می‌کنند [۲۵].

در طول چرخه شارژ، برق شبکه برای چرخاندن سامانه چرخ‌طیار با کمک یک ماشین الکتریکی برگشت‌پذیر (که به‌عنوان یک موتور عمل می‌کند) کاربرد دارد. انرژی دورانی سیلندر در حال چرخش به‌صورت انرژی مکانیکی ذخیره می‌شود. در چرخه تخلیه، ماشین برگشت‌پذیر به‌عنوان یک ژنراتور عمل می‌کند و انرژی جنبشی ذخیره‌شده در چرخ‌طیار را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند.

طول چرخه تخلیه، هوای فشرده ذخیره‌شده و به کمک گرمای مازاد گرم، سپس برای آزادسازی انرژی موردنیاز منبسط می‌شود [۲۳].

➤ فناوری ذخیره‌سازی هم‌دما

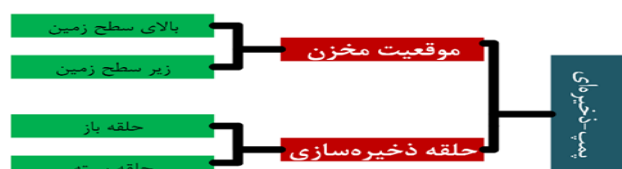
روش ذخیره‌سازی مکانیکی هوای فشرده هم‌دما نوعی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده است که در آن هوای فشرده در یک مخزن در دما و فشار ثابت با کمک از مبدل حرارتی برای حفظ دما در طول فشرده‌سازی و انبساط ذخیره می‌شود. این روش در مقایسه با ذخیره‌سازی هوای فشرده بی‌دررو، بازده و انرژی خروجی بالاتری دارد، اما برای فرآیند تبادل حرارتی به تجهیزات و انرژی اضافی نیاز دارد [۲۳].

۲-۴-۱-۲- ذخیره انرژی هوای مایع

این روش شامل خنک کردن هوا تا تبدیل شدن به مایع است. این هوای مایع در مخازن عایق‌بندی شده ذخیره می‌شود. هنگامی که برق موردنیاز است، هوای مایع گرم و منبسط می‌شود، سپس پره‌های توربین می‌چرخد و برق تولید می‌کند. ذخیره انرژی هوای مایع این مزیت را دارد که می‌تواند انرژی را برای مدت‌زمان طولانی‌تری نسبت به هوای فشرده ذخیره کند. در طول چرخه شارژ، از برق شبکه برای تغذیه موتور به‌کارگرفته می‌شود. این برق منجر به تولید انرژی مکانیکی می‌شود و در نهایت کمپرسور چندمرحله‌ای را به حرکت در می‌آورد. هوای فشرده اتمسفر به‌صورت مایع در دمای پایین در انبار هوای مایع ذخیره می‌شود. سپس هوای فشرده مایع ذخیره‌شده در دمای بالا در طول چرخه تخلیه به شکل گاز منبسط‌شده تا انرژی موردنیاز خارج شود [۲۳].

۲-۴-۲- روش پمپ-ذخیره‌ای

نمونه دیگری از سامانه ذخیره‌سازی انرژی مکانیکی، روش پمپ-ذخیره‌ای است. این سامانه از انرژی اضافی برای پمپاژ آب از مخزن در ارتفاع پایین‌تر به مخزن در ارتفاع بالاتر به‌کارگرفته می‌شود. هنگامی که انرژی موردنیاز است، آب آزاد و از طریق توربین‌ها به پایین جریان می‌یابد و برق تولید می‌کند. این روش یکی از کارآمدترین و مقرون به‌صرفه‌ترین سامانه‌های ذخیره انرژی موجود است که می‌تواند مقادیر زیادی انرژی را برای مدت‌زمان طولانی ذخیره کند و برای متعادل کردن شبکه در زمان پیک مصرف کاربرد دارد. انرژی پتانسیل با انتقال آب بین دو مخزن واقع در ارتفاع گوناگون ذخیره و خارج می‌شود. در طول چرخه شارژ، انرژی الکتریکی اضافی از شبکه یا منابع انرژی تجدیدپذیر به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. سپس این انرژی الکتریکی با پمپاژ و ذخیره آب از مخزن پایینی به مخزن بالاتر، به انرژی پتانسیل تبدیل می‌شود. آب ذخیره‌شده از مخزن بالاتر در طول چرخه تخلیه به مخزن پایینی رها می‌شود که توربین‌ها را به حرکت درمی‌آورد و از طریق ژنراتورها برق تولید می‌کند [۲۴]. سامانه‌های ذخیره‌سازی پمپ-ذخیره‌ای می‌توانند بر اساس شکل ۸ تقسیم‌بندی کرد.



شکل ۸ طبقه‌بندی روش پمپ-ذخیره‌ای [۳]

یاتاقان مغناطیسی هتروپولار نوعی یاتاقان مغناطیسی است که از دو نوع قطب مغناطیسی گوناگون برای ایجاد نیروی شناور پایدار کمک می‌گیرد. در این سامانه، یک مجموعه از آهن‌رباها در یک پیکربندی شمال-جنوب مرتب شده‌اند، درحالی‌که مجموعه دیگر در یک پیکربندی شرقی-غربی قرار دارد و نیروی شناور متعادل، این اجازه را می‌دهد تا روتور در هوا بدون تماس فیزیکی با استاتور معلق شود، سپس اصطکاک و سایش را کاهش دهد. این یاتاقان‌ها مزایای متعددی نسبت به یاتاقان‌های مکانیکی سنتی دارند. از جمله این مزایا کاهش اصطکاک، افزایش قابلیت اطمینان و طول عمر و بهبود کارایی است [۳۰].

➤ هموپولار

یاتاقان مغناطیسی هموپولار نوعی یاتاقان مغناطیسی است که تنها از یک نوع قطب مغناطیسی برای ایجاد نیروی شناور پایدار کمک می‌گیرد. در این سامانه، استاتور و روتور هر دو مجهز به آهن‌رباهایی هستند که در یک پیکربندی شمال-جنوب چیده شده‌است. قطب شمال آهن‌برای روتور به قطب جنوب آهن‌برای استاتور جذب می‌شود و بالعکس. این جذب، نیروی شناور پایدار و متعادلی ایجاد می‌کند و اجازه می‌دهد تا روتور در هوا بدون هیچ‌گونه تماس فیزیکی با استاتور معلق شود. این موضوع اصطکاک و سایش را کاهش می‌دهد. یاتاقان‌های مغناطیسی هموپولار به‌طور معمول در ماشین‌آلات دوار با سرعت بالا مانند موتورهای الکتریکی و ژنراتورها کاربرد دارد

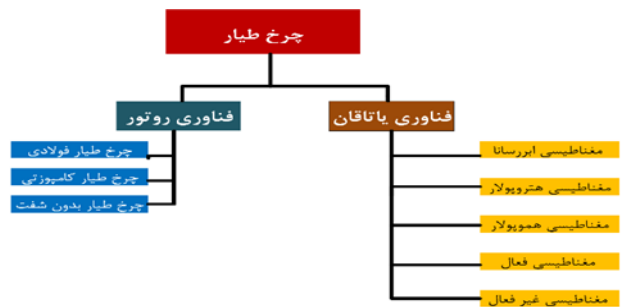
➤ یاتاقان مغناطیسی فعال

یاتاقان مغناطیسی فعال، از چندین آهن‌برای الکتریکی برای ایجاد نیروی شناور و کنترل فعال موقعیت روتور کمک می‌گیرد. این الکترومغناطیس‌ها توسط یک سامانه کنترل کامپیوتری کنترل می‌شوند که به‌طور مداوم موقعیت و حرکت روتور را کنترل می‌کند و میدان‌های مغناطیسی را برای حفظ ثبات تنظیم می‌کند. یاتاقان‌های مغناطیسی فعال مزایای بیشتری نسبت به یاتاقان‌های مغناطیسی هموپولار از جمله دقت و کنترل بالاتر و توانایی عمل‌کرد دارند. یاتاقان‌های مغناطیسی فعال گران‌تر هستند و به سامانه‌های کنترل پیچیده‌تری برای کارکرد موثر نیاز دارند. این یاتاقان‌ها برای نگهداری آهن‌رباهای الکتریکی به منبع تغذیه ثابتی نیاز دارند. بنابراین برای کاربردهایی که ممکن است قطع برق اتفاق بیفتد مناسب نیستند. به‌طور کلی، یاتاقان‌های مغناطیسی هموپولار و فعال مزایای قابل‌توجهی نسبت به یاتاقان‌های مکانیکی سنتی در کاربردهای خاص دارند، اما هزینه و پیچیدگی بالایی دارند. مزیت این یاتاقان‌ها، آن‌ها را برای کاربردهای با کارایی بالا و قابلیت اطمینان بالا مناسب‌تر می‌کند [۲۵].

➤ یاتاقان مغناطیسی غیرفعال

یاتاقان مغناطیسی غیرفعال از آهن‌رباهای دائمی که وظیفه پشتیبانی از روتور دارد، برای ایجاد میدان مغناطیسی کمک می‌گیرد. برخلاف یاتاقان‌های مغناطیسی فعال، یاتاقان‌های مغناطیسی غیرفعال برای کار کردن به منبع تغذیه یا سامانه کنترل نیاز ندارند. یاتاقان‌های مغناطیسی غیرفعال مزایایی نسبت به یاتاقان‌های مکانیکی سنتی دارند. از جمله این مزایا کاهش اصطکاک طول عمر بیشتر و توانایی کار در محیط‌های سخت است. با این حال، یاتاقان‌های مغناطیسی غیرفعال در مقایسه با یاتاقان‌های مغناطیسی فعال محدودیت‌هایی از نظر ظرفیت بار و پایداری دارند. به‌طور کلی، یاتاقان‌های مغناطیسی غیرفعال یک جایگزین مقرون‌به‌صرفه و قابل‌اعتماد برای یاتاقان‌های مکانیکی سنتی در کاربردهای خاص هستند [۲۵].

از مزایای چرخ‌طیار می‌توان به چگالی توان بالا، عمر چرخه بالا، پاسخ‌گویی بسیار سریع، راندمان چرخه بالا (حدود ۹۰ تا ۹۵ درصد) اشاره کرد. با این حال، سامانه‌های چرخ‌طیار نیز محدودیت‌هایی دارند. ظرفیت ذخیره‌سازی پایین، هزینه سرمایه‌گذاری بالا، مدت‌زمان تخلیه بسیار کوتاه از جمله این محدودیت‌ها است. چرخ‌طیارها، هم‌چنین برای کاهش اصطکاک و حفظ سرعت‌های بالای موردنیاز برای ذخیره انرژی نیاز به خلا یا یاتاقان‌های مغناطیسی دارند که می‌تواند به پیچیدگی و هزینه سامانه اضافه کند [۲۶]. تقسیم‌بندی چرخ‌طیار در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹ طبقه‌بندی روش چرخ‌طیار [۲۷]

۱-۳-۴-۲- فناوری روتور

➤ چرخ‌طیار فولادی

یکی رایج‌ترین چرخ‌طیارها، نوع فولادی آن است؛ که برای ذخیره انرژی مکانیکی کاربرد دارد. این نوع چرخ‌طیار، از فولاد با مقاومت بالا می‌شود و قادر به ذخیره مقادیر زیادی انرژی است. چرخ‌طیارهای فولادی به‌طور نسبی ارزان هستند و طول عمر بالایی دارند.

➤ چرخ‌طیار کامپوزیتی

این نوع از چرخ‌طیار، از ترکیب موادی مانند فیبر کربن و رزین اپوکسی ساخته می‌شود؛ که سبک‌تر از چرخ‌طیارهای فولادی است و انرژی بیشتری را در واحد وزن ذخیره می‌کند. با این حال، گران‌تر است و طول عمر کمتری دارند [۲۸].

➤ چرخ‌طیار بدون شفت

چرخ‌طیار بدون شفت توسط یاتاقان‌های مغناطیسی یا انواع دیگر فناوری شناور معلق، چرخانده می‌شود. این طراحی چرخ‌طیار، نیاز به شفت ندارد و این موضوع می‌تواند باعث کاهش اصطکاک و افزایش راندمان شود. انرژی در زمان چرخش با سرعت بالا ذخیره و سپس در صورت نیاز انرژی آزاد می‌شود. این نوع از چرخ‌طیار در برخی از کاربردهای حمل‌ونقل مانند اتوبوس‌ها و قطارهای هیبریدی، به‌کارگرفته می‌شود [۲۹].

۲-۳-۴-۲- فناوری یاتاقان

➤ یاتاقان مغناطیسی ابرسانا

به‌کارگیری از یاتاقان مغناطیسی ابرسانا در یک سامانه ذخیره انرژی چرخ‌طیار مزایای متعددی نسبت به یاتاقان‌های مکانیکی معمولی دارد. این از جمله این مزایا اصطکاک و سایش کمتر، کاهش نیاز به تعمیر و نگهداری، بهبود کارایی و قابلیت اطمینان است. با این حال، هزینه و پیچیدگی این سامانه، به‌ویژه برای کاربرد در مقیاس کوچک‌تر، می‌تواند یک اشکال قابل توجه باشد [۲۵].

➤ هتروپولار

➤ یاتاقان هیبریدی

ولتاژ موردنظر کاربرد دارد. مدار تخلیه برای آزادسازی انرژی ذخیره‌شده در صورت نیاز به‌کارگرفته می‌شود. سامانه کنترل، بر ولتاژ و جریان خازن‌ها نظارت می‌کند و مدارهای شارژ و دشارژ را بر این اساس کنترل می‌کند. خازن‌ها در سامانه‌هایی که به توان خروجی بالا برای مدت‌زمان کوتاه نیاز هست کاربرد دارند. هم‌چنین می‌توان از آن‌ها در سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر برای ذخیره انرژی کوتاه‌مدت و تثبیت توان خروجی به‌کار گرفت. یکی از مزیت‌های سامانه ذخیره‌سازی انرژی خازن راندمان بالای آن‌ها است. با توجه به چگالی انرژی کمتر خازن، در کاربردهایی که به ذخیره‌سازی طولانی‌مدت انرژی نیاز هست، محدودیت دارند. در نتیجه، این موضوع یک فناوری امیدوارکننده برای برنامه‌های کاربردی با توان بالا هستند که به زمان پاسخ سریع نیاز دارند.

۵-۲-۲- ذخیره‌سازی الکترومغناطیسی

یکی از انواع سامانه‌های ذخیره انرژی، سامانه ذخیره‌سازی انرژی الکترومغناطیسی است. این سامانه از میدان‌های مغناطیسی برای ذخیره انرژی بهره می‌برد. این سامانه از یک سیم‌پیچ به نام سلف و یک خازن تشکیل شده است. هنگامی که انرژی به سامانه عرضه می‌شود، خازن انرژی الکتریکی و سلف انرژی مغناطیسی را ذخیره می‌کند. انرژی ذخیره‌شده در سلف متناسب با مجذور جریان عبوری از آن است. این سامانه‌ها در وسایل نقلیه الکتریکی، که می‌توانند چگالی توان بالا و زمان شارژ سریع را ارائه دهند، کاربرد دارد. آن‌ها دارای چرخه طولانی هستند و قابلیت این را دارند که در ده‌های بالا کار کنند. با این حال، چگالی انرژی نسبی پایینی در مقایسه با سایر سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی دارند که به‌کارگیری از آن‌ها را در برخی کاربردها محدود می‌کند [۳۱].

۵-۲-۳- ذخیره‌سازی انرژی ابررسانا

نوع دیگری از سامانه ذخیره انرژی، ذخیره انرژی ابررسانا است. این سامانه از سیم‌پیچ‌های ابررسانا برای ذخیره انرژی در قالب یک میدان مغناطیسی بهره می‌برد. هنگامی که برق موردنیاز است، میدان مغناطیسی دوباره به برق تبدیل می‌شود. این ذخیره‌ساز دارای چندین مزیت نسبت به سایر سامانه‌های ذخیره انرژی است. این مزیت‌ها شامل راندمان بالا، زمان پاسخ‌گویی سریع و عمر چرخه طولانی است. با این حال، این سامانه‌ها گران است و نیاز به وسایل و نگهداری تخصصی دارد.

۶-۲- هیبریدی

مفهوم سامانه هیبریدی ترکیب ویژگی‌های مناسب چندین سامانه ذخیره‌ساز برای به‌دست آوردن عمل‌کرد لازم است. سامانه‌های ذخیره‌ساز به دو دسته تقسیم می‌شوند: سامانه‌های ذخیره‌سازی با چگالی توان بالا و سامانه‌های ذخیره‌سازی با چگالی انرژی بالا. سامانه‌های چگالی توان بالا به‌طورمعمول سامانه‌های پاسخ سریع هستند، به این معنی که انرژی را با نرخ‌های بالاتر اما برای دوره‌های زمانی کوتاه‌تر تحویل می‌دهند. از سوی دیگر، سامانه‌های با چگالی انرژی بالا، اغلب پاسخ آهسته‌تری دارند، اما می‌توانند انرژی را برای دوره‌های زمانی طولانی ذخیره کنند. یک سامانه هیبریدی اغلب با ادغام دو سامانه ذخیره‌سازی مکمل، یکی با چگالی انرژی بالا و دیگری با چگالی توان بالا ساخته می‌شود. هم‌چنین می‌توان سامانه‌های ذخیره‌سازی هیبریدی بر

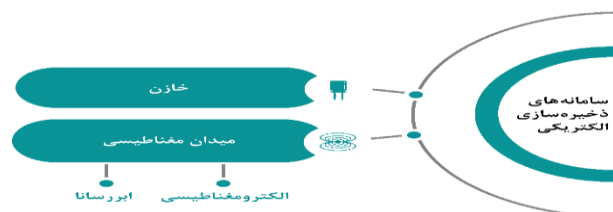
یاتاقان هیبریدی مزایای هر دو یاتاقان‌های مکانیکی و مغناطیسی را دارد. یاتاقان هیبریدی به‌طورمعمول از یک یاتاقان مکانیکی تشکیل شده است که توسط یاتاقان‌های مغناطیسی پشتیبانی می‌شود. یاتاقان‌های هیبریدی مزایای متعددی از جمله کاهش اصطکاک و سایش، بهبود ظرفیت بار، افزایش پایداری و توانایی کار در محیط‌های سخت را ارائه می‌کنند. این یاتاقان‌ها هم‌چنین امکان موقعیت‌یابی دقیق و عمل‌کرد با سرعت بالا را فراهم می‌کنند که آن‌ها برای طیف گسترده‌ای از کاربردها مناسب می‌کند. آن‌ها هم‌چنین برای کار کردن به منبع تغذیه و سامانه کنترل نیاز دارند که به هزینه و پیچیدگی آن‌ها می‌افزاید. به‌طورکلی، یاتاقان‌های هیبریدی انتخاب خوبی برای کاربردهایی هستند که به‌دقت بالا، سرعت بالا و نگهداری پایین (مانند ماشین‌ابزار، تجهیزات هوافضا و دستگاه‌های پزشکی) نیاز دارند.

۴-۲-۴- گرانشی

اصل کار سامانه ذخیره‌سازی گرانشی بدین‌صورت است که انرژی مازاد در طول چرخه شارژ با پمپاژ آب برای بالا بردن پیستون ذخیره می‌شود و انرژی اضافی در طول چرخه تخلیه با فشار دادن آب از طریق توربین آزاد می‌شود. این فرایند ژنراتور را می‌چرخاند و انرژی موردنیاز را تامین می‌کند. سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی گرانشی نسبت به انواع دیگر فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی مزایای متعددی دارند. این سامانه با راندمان تبدیل تا ۹۰ درصد بسیار کارآمد است. هم‌چنین این سامانه‌ها دارای طول عمر طولانی هستند و چندین دهه دوام می‌آورند. علاوه بر این، به هیچ‌گونه ماده سمی یا خطرناکی نیاز ندارند و دوست‌دار محیط‌زیست هستند [۲۷].

۵-۲-۵- ذخیره‌سازی الکتریکی

سامانه ذخیره انرژی الکتریکی سامانه‌ای است که انرژی الکتریکی را ذخیره می‌کند. با رواج بیشتر منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی و باد، ذخیره الکتریکی اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است. منابع انرژی تجدیدپذیر شامل عدم قطعیت هستند. سامانه ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی می‌تواند به هموارسازی نوسان‌ها در عرضه و تقاضا کمک کند و قابلیت اطمینان و پایداری شبکه برق را بهبود بخشد [۹]. تقسیم‌بندی سامانه ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

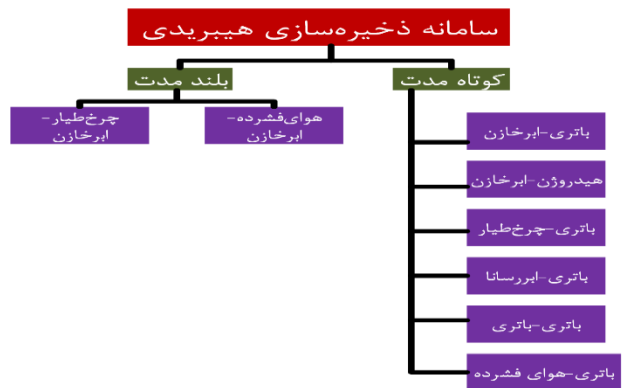


شکل ۱۰ طبقه‌بندی به روش الکتریکی

۵-۲-۱- ذخیره‌سازی الکتریکی خازن

سامانه ذخیره‌سازی انرژی خازن نوعی سامانه ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی است که از خازن‌ها برای ذخیره و آزادسازی انرژی الکتریکی بهره می‌برد. یک سامانه ذخیره انرژی خازن از یک یا چند خازن، یک مدار شارژ، یک مدار تخلیه و یک سامانه کنترل تشکیل شده است. مدار شارژ، برای شارژ خازن‌ها تا سطح

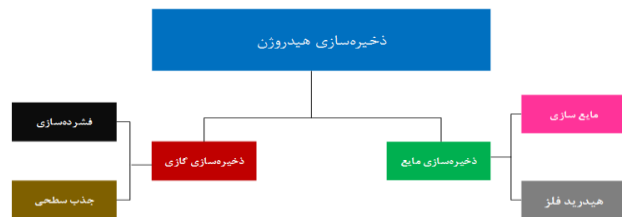
اساس طول مدت پشتیبانی از بار طبقه‌بندی کرد. این نوع طبقه‌بندی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱ تعدادی از ساختارهای سامانه هیبریدی ذخیره‌سازی انرژی [۳۲]

۲-۷-۲- ذخیره‌سازی هیدروژن

هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی پاک و پربازده، نیازمند روش‌های ایمن و کارآمد برای ذخیره‌سازی است. انتخاب روش مناسب به عوامل مختلفی مانند کاربرد نهایی، میزان هیدروژن موردنیاز، محدودیت‌های فضایی و هزینه‌ها بستگی دارد. در شکل ۱۲ طبقه‌بندی ذخیره‌سازی هیدروژن نشان داده شده است.



شکل ۱۲ انواع روش‌های ذخیره‌سازی هیدروژن [۳۳]

۲-۷-۱-۲- ذخیره‌سازی گازی

فشرده‌سازی: در این روش، هیدروژن در مخازن تحت فشار بالا (تا ۷۰۰ بار) ذخیره می‌شود. این روش به دلیل سادگی و هزینه نسبتاً پایین، رایج‌ترین روش ذخیره‌سازی هیدروژن است. با این حال، چگالی انرژی حجمی این روش پایین است و فضای زیادی را اشغال می‌کند [۳۳].

جذب سطحی: در این روش، هیدروژن بر روی سطح مواد جاذب مانند کربن فعال یا نانولوله‌های کربنی ذخیره می‌شود. این روش چگالی انرژی حجمی بالاتری نسبت به فشرده‌سازی دارد، اما هزینه آن نیز بیشتر است [۳۳].

۲-۷-۱-۱- مایع سازی

مایع سازی: در این روش، هیدروژن با خنک شدن تا دمای ۲۵۳- درجه سانتی‌گراد به مایع تبدیل می‌شود. این روش چگالی انرژی حجمی بسیار بالایی دارد، اما به دلیل نیاز به سامانه‌های خنک‌کننده پیچیده و پرمصرف، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست.

هیدرید فلز: در این روش، هیدروژن با فلزاتی مانند آهن، تیتانیوم یا منیزیم ترکیب شده و هیدرید فلز را تشکیل می‌دهد. این روش چگالی انرژی حجمی و وزنی بالایی دارد و می‌تواند در دمای محیط انجام شود. با این حال، هیدریدهای فلزی سنگین هستند و فرآیند شارژ و دشارژ آن‌ها کند است [۳۳]. انتخاب روش مناسب برای ذخیره‌سازی هیدروژن به عوامل مختلفی بستگی دارد. در حال حاضر، روش فشرده‌سازی رایج‌ترین روش ذخیره‌سازی هیدروژن است، اما روش‌های دیگر مانند ذخیره‌سازی در هیدریدهای فلزی پتانسیل بالایی برای کاربردهای آینده دارند.

۳- نتیجه‌گیری

سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی در دنیای امروز که انرژی‌های تجدیدپذیر نسبت به قبل بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است، اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده‌اند. توسعه و استقرار این سامانه‌ها پتانسیل ایجاد انقلابی در صنعت انرژی، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کمک به کاهش تغییر آب‌وهوا را دارد. با تحقیق و توسعه مداوم، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی از نظر کارایی، مقرون‌به‌صرفه بودن و مقیاس‌پذیری بهبود می‌یابند و به یک عامل مهم برای پایداری انرژی در آینده تبدیل خواهند شد. سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی برای کاربردهای گوناگون بهره‌برد که انتخاب آن‌ها به ویژگی‌های فنی، هزینه و انتشار گازهای گل‌خانه‌ای بستگی دارد. با در نظر گرفتن این معیارها، ذخیره‌سازی انرژی به روش پمپ-ذخیره‌ای، هوای فشرده، شیمیایی و انرژی حرارتی برای کاربردهایی مانند ذخیره‌سازی مقدار زیاد انرژی مناسب به نظر می‌رسد. اگرچه چرخ‌طیارها به دلیل اتلاف انرژی زیاد برای کاربردهای انرژی مناسب نیستند، اما می‌توان از آن‌ها برای تنظیم فرکانس کمک گرفت. مزایای ذخیره‌سازهای الکتروشیمیایی زمان پاسخ سریع و مدولار بودن آن‌ها است که بیشتر برای کاربردهای انرژی و توان مانند ذخیره‌سازی انرژی انبوه، تنظیم فرکانس و پشتیبانی از تنظیم ولتاژ مطلوب می‌کند. هم‌چنین ذخیره‌سازهای الکتروشیمیایی برای کاربردهای کیفیت توان و قابلیت اطمینان قدرت مناسب هستند. این مطالعه یک پایگاه داده برای پژوهش‌های آینده در مورد انواع سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی فراهم می‌کند.

۴- مراجع

- [1] I. Sarbu and C. Sebarchievici, A comprehensive review of thermal energy storage, *Sustainability*, vol. 10, no. 1, p. 191, 2018.
- [2] IRENA, World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway, *International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi, 2022.
- [3] M. Zandi, M. Bahrami, and H. R. Zandi, *Energy Storage*. Tehran: Danesh negar, 2023. (in persian)
- [4] V. Mathew, T. K. Hotta, H. M. Ali, and S. Sundaram, *Energy Storage Systems: Optimization and Applications*. Springer, 2022.
- [5] M. Sun et al., A review on thermal energy storage with eutectic phase change materials: Fundamentals and applications, *Journal of Energy Storage*, vol. 68, p. 107713, 2023.
- [6] V. P. Panchariya, A. Kuchimanchi, K. G. Kulkarni, and S. N. Havaladar, A review on phase change materials: Development, Types, and Applications, in *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, vol. 2426, no. 1, p. 012033: IOP Publishing.
- [7] T. M. Letcher, *Storing Energy*, Elsevier, pp. 651-683, 2022.
- [8] A. Mehari, Z. Xu, and R. Wang, Thermal energy storage using absorption cycle and system: A comprehensive review, *Energy Conversion and Management*, vol. 206, p. 112482, 2020.
- [9] M. Sterner and I. Stadler, *Handbook of energy storage: Demand, technologies, integration*. Springer, 2019.

- [10] A. Olabi, C. Onumaegbu, T. Wilberforce, M. Ramadan, M. A. Abdelkareem, and A. H. Al-Alami, Critical review of energy storage systems, *Energy*, vol. 214, p. 118987, 2021.
- [11] C. M. Hoff, *Energy Storage Technologies and Applications*. Artech House, 2022.
- [12] P. P. Lopes and V. R. Stamenkovic, Past, present, and future of lead-acid batteries, *Science*, vol. 369, no. 6506, pp. 923-924, 2020.
- [13] J. M. E. Abarro, J. N. L. Gavan, D. E. D. Loresca, M. A. A. Ortega, E. A. Esparcia Jr, and J. A. D. Paraggua, A Tale of Nickel-Iron Batteries: Its Resurgence in the Age of Modern Batteries, *Batteries*, vol. 9, no. 7, p. 383, 2023.
- [14] A. A.-H. Hussein and I. Batarseh, A review of charging algorithms for nickel and lithium battery chargers, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 3, pp. 830-838, 2011.
- [15] M. A. Nazri et al., Screen-Printed Nickel-Zinc Batteries: A Review of Additive Manufacturing and Evaluation Methods, *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 8, no. 3, pp. 176-192, 2021.
- [16] W. Chen, Y. Jin, J. Zhao, N. Liu, and Y. Cui, Nickel-hydrogen batteries for large-scale energy storage, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, no. 46, pp. 11694-11699, 2018.
- [17] K.-H. Young, Research in nickel/metal hydride batteries 2017, vol. 4, ed: MDPI, 2018.
- [18] T. Kim, W. Song, D.-Y. Son, L. K. Ono, and Y. Qi, Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies, *Journal of materials chemistry A*, vol. 7, no. 7, pp. 2942-2964, 2019.
- [19] L. Long, S. Wang, M. Xiao, and Y. Meng, Polymer electrolytes for lithium polymer batteries, *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 4, no. 26, pp. 10038-10069, 2016.
- [20] M. Zhao, B.-Q. Li, X.-Q. Zhang, J.-Q. Huang, and Q. Zhang, A perspective toward practical lithium-sulfur batteries, *ACS Central Science*, vol. 6, no. 7, pp. 1095-1104, 2020.
- [21] R. Ye et al., Redox flow batteries for energy storage: a technology review, *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, vol. 15, no. 1, p. 010801, 2018.
- [22] A. G. Ter-Gazarian, Energy Storage for Power Systems, *The Institution of Engineering and Technology*, pp. 81-127, 2020.
- [23] D. S. Ting and J. A. Stagner, *Compressed air energy storage: types, systems and applications*. IET, 2021.
- [24] F. A. Diawuo, E. O. Antwi, and R. T. Amanor, Characteristic features of pumped hydro energy storage systems, in *Pumped Hydro Energy Storage for Hybrid Systems*: Elsevier, 2023, pp. 43-59.
- [25] F. Faraji, A. Majazi, and K. Al-Haddad, A comprehensive review of flywheel energy storage system technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 477-490, 2017.
- [26] N. Khan, S. Dilshad, R. Khalid, A. R. Kalair, and N. Abas, Review of energy storage and transportation of energy, *Energy Storage*, vol. 1, no. 3, p. e49, 2019.
- [27] A. Arabkoohsar, *Future Grid-Scale Energy Storage Solutions: Mechanical and Chemical Technologies and Principles*, 2023.
- [28] J. K. Ratner, J. B. Chang, and D. A. Christopher, Composite flywheel rotor technology-a review, *ASTM Special Technical Publication*, vol. 1436, pp. 3-28, 2003.
- [29] B. Anvari, X. Li, H. A. Toliyat, and A. Palazzolo, A coreless permanent-magnet machine for a magnetically levitated shaft-less flywheel, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 5, pp. 4288-4296, 2018.
- [30] E. H. Maslen, G. Schweitzer, H. Bleuler, and M. Cole, *Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery*. Springer, 2009.
- [31] P. Breeze, Power System Energy Storage Technologies, *ACADEMIC PRESS*, 2018, pp. 47-52.
- [32] T. Bocklisch, Hybrid energy storage systems for renewable energy applications, *Energy Procedia*, vol. 73, pp. 103-111, 2015.
- [33] Iea, *Global Hydrogen*, paris2023.