POLYM PART
مرجع پلیمر در بازار ایران

ذخیره‌سازی انرژی هوای مایع: مروری بر تکنولوژی روز دنیا، مسیرهای یکپارچه‌سازیو چشم‌اندازهای آینده

چکیده

مسیرهای کربن‌زدایی سیستم انرژی تا حد قابل توجهی به ذخیره برق برای کاهش نوسانات انرژی‌های تجدیدپذیر و تضمین سطوح بالای انعطاف‌پذیری در شبکه‌های برق آینده متکی است. با این اوصاف، ذخیره‌سازی انرژی هوای مایع[1] (LAES) اخیراً به‌عنوان راه‌حلی امکان‌پذیر برای ارائه توان خروجی 10-100 مگاوات و ظرفیت ذخیره‌سازی گیگاوات‌ساعت مطرح شده است. چگالی انرژی بالا و سهولت استقرار و راه‌اندازی، تنها دو مورد از بسیاری از ویژگی‌های مطلوب LAES در مقایسه با فناوری‌های ذخیره‌سازی فعلی هستند که باعث انتقال LAES از یک مفهوم پیشنهادی در سال 1977 به یک گزینه واقعی و عملی می‌گردند. دو نیروگاه (350 کیلووات و 5 مگاوات) با موفقیت توسط های‌ویوپاور[2] ساخته و به نمایش گذاشته شده است و یک نیروگاه تجاری 50 مگاوات/250 مگاوات‌ساعت اکنون در دست ساخت است. علاوه بر استقرار و راه‌اندازی تجاری، مجموعه مقالات روزافزون با این عنوان نشان‌دهنده علاقه آکادمیک به LAES است. با این حال، عدم پیوستگی و عدم هماهنگی در مفاهیم بررسی شده و طراحی‌های نیروگاه، روش‌های[3] کاری و دامنه مطالعه مقالات، در حال حاضر تفسیر نتایج را پیچیده می‌نماید. مقالات اندکی برای توجیه این چشم‌انداز تلاش نموده‌اند، اما همین مقالات هم عملا به برخی از حوزه‌های کلیدی مانند یکپارچه‌سازی LAES بی‌توجهی کرده‌اند. هدف مقاله حاضر، پر نمودن این شکاف‌ها و ارائه بررسی جامعی از رشد و توسعه LAES است. در این بررسی منحصرا به موارد زیر پرداخته می‌شود: الف) ما روش جدیدی برای مقایسه متقابل نتایج حاصل از مقالات پیشنهاد می‌نماییم و از آن برای هماهنگ نمودن یافته‌های فنی-اقتصادی استفاده می‌نماییم، ب) کارهایی را که در آن، عملکرد LAES در سیستم انرژی در نظر گرفته شده است را مرور می‌گردد و پ) مسیرهای امیدوارکننده یکپارچه‌سازی LAES و مسیرهای تحقیقاتی آینده را مورد تأکید قرار می‌دهیم. بیش از 120 مرجع در مورد LAES طبق روش کار، پردازش گردیده‌اند. نتایج یک بار برای همیشه، شامل پیشرفته‌ترین عملکرد فنی-اقتصادی LAES، در تمامی مفاهیم پیشنهاد شده و گام‌های لازم برای پیش‌برد

[1] Liquid air energy storage

[2] م. Highview Power: شرکت پیشگام که در ذخیره‌سازی انرژی برودتی تخصص دارد. این شرکت در انگلستان و قبلاً ایالات متحده مستقر است.

[3] م. روش‌شناسی: تحلیل نظری و اصولی روش‌های به کار رفته در یک پژوهش [رشته تحصیلی] است.

POLYM PART
مرجع پلیمر در بازار ایران

بیشتر تحقیقات LAES را پیشنهاد می‌نماید. نیاز به مدل‌های واقعی‌تر LAES برای مطالعات یکپارچه‌سازی و تمرکز گسترده‌تر بر قابلیت‌های LAES فراتر از خروجی برق، به‌ویژه برای مفاهیم ترکیبی، مورد تأکید قرار می‌گیرد.

6. نتیجه‌گیری و چشم انداز

با توجه به چگالی انرژی بالا، انعطاف‌پذیری در طراحی و عدم وجود محدودیت‌های جغرافیایی، ذخیره‌سازی انرژی هوای مایع (LAES) یک راه‌حل ذخیره‌سازی حرارتی مکانیکی بسیار امیدوار کننده است که در حال حاضر در آستانه استقرار و راه‌اندازی صنعتی است. بررسی حال حاضر با هدف بهبود درک پیرامون LAES بر روی موارد زیر متمرکز شده است: الف) هماهنگ کردن یافته‌های تحقیقاتی که از روش‌های کاری و مفاهیم نیروگاه مختلف نشأت می‌گیرد. ب) بحث در مورد فرصت‌های اتصال LAES با سایر فرآیندها و پ) برجسته نمودن شکاف‌های تحقیقاتی فعلی و روندهای امیدوار کننده برای یکپارچه‌سازی LAES در سیستم انرژی. بیش از 120 اثر براساس سه حوزه اصلی بررسی و ارائه شده است: LAES مستقل، هیبریداسیون[۴] LAES با فرآیندها و/یا منابع انرژی دیگر، یکپارچه‌سازی LAES در سیستم انرژی گسترده‌تر. نتایج کلیدی در بخش‌های فرعی زیر خلاصه گردیده است.

6.1. آخرین پیشرفت‌های علمی

برای LAES مستقل، راندمان انرژی و اکسرژی[۵] بین ٪50 تا ٪60 است، در حالی که هزینه سرمایه‌گذاری از 1/3 تا 2/2 k€/kW (300-600 €/kWh) متغیر است. چنین ارزش‌های اقتصادی برای بیشترین وضعیت ذخیره‌سازی در مقیاس شبکه، در شکل‌های با کیفیت قرار دارند [1]. برای اطمینان از عملکرد مد نظر نیروگاه، بازیافت سرد و گرم موثر بسیار مهم است و هنگامی که تمام سرمای با درجه بالا ناشی از تبخیر هوا باید از مایع شدن هوا پشتیبانی کند، گرمای تراکم، بیشتر از نیاز داخلی تولید می‌گردد.

LAES هیبریدی می‌تواند از چنین گرمای مازادی به طور کامل استفاده نماید، یا از ثمره‌ی سوخت‌های دیگر و جریان‌های حرارتی برای بهبود عملکرد LAES استفاده کند. بیش از 15 طرح هیبریدی پیشنهاد شده است که رایج‌ترین آنها شامل ادامه[۶] ORC[۷] ، LAES همراه با ترمینال‌های LNG، احتراق سوخت یا استفاده از گرمای

---

[4] م. ترکیبی که طی آن خروجی به دست آمده دارای ویژگی و مشخصات متمایز از هر جزء ترکیب شده است.

[5] م. اصطلاحی ترمودینامیکی است و به بیشینه کار مفیدی گفته می‌شود که در یک فرایندِ رسیدن به تبادل ترمودینامیکی می‌توان از سامانه دریافت کرد. تعریف ساده ولی غیر علمی: اکسرژی به آن بخشی از کل نیرو گفته می‌شود که به مصرف مفید می‌رسد، مثلاً برای حرکت خودرو. بخش هدر رفته انرژی آنرژی نام دارد.

[6] م. سوخت اولیه انرژی حرارتی با دمای بالا تولید می‌کند و گرمای دفع شده از فرآیند برای تولید برق از طریق دیگ بازیابی و ژنراتور توربین استفاده می شود.

[7] Organic Rankine cycle

POLYM PART
مرجع پلیمر در بازار ایران

اتلاف شده‌ی فرآیندهای همجوار است. LAES هیبریدی می‌تواند بازده کارایی را تا ٪65 و راندمان الکتریکی بالای 1 را به دست آورد، به این معنی که پتانسیل بیشتری برای متعادل کردن شبکه دارد. ارزیابی‌های فنی-اقتصادی نشان می‌دهد که هیبریداسیون LAES می‌تواند استقرار و راه‌اندازی فوری را ترویج دهد، اما تحلیل حاضر ارزش آن را به‌عنوان مکمل، نه جایگزین، برای بازیافت داخلی جریان‌های گرم و سرد موجود، مورد تأکید قرار می‌دهد. دو پروژه برای 50 مگاوات LAES مستقل توسط های‌ویو پاور اعلام شده است. این پروژه‌ها در سال‌های آینده راه‌اندازی خواهند شد و نماینده اولین نیروگاه‌های LAES متصل به شبکه را در سراسر جهان خواهند بود.

6.2. مسیرهای یکپارچه‌سازی LAES

یکپارچه‌سازی سیستم انرژی، نشان‌دهنده گامی مهم به سمت راه‌اندازی تجاری LAES است که مسلماً تاکنون توجه کافی به آن نشده است. مسیرهای یکپارچه‌سازی کلیدی برای LAES، همانطور که از یافته‌های موجود در مقالات مشخص شده، در جدول 1، به شکل تحلیل SWOT[8] گزارش شده است.

جدول 1

Pathway	Strengths	Weaknesses	Opportunities	Threats
Multi-market EES	Inexpensive Higher participation to grid stability	Off-design Exclusive services	High revenue, low risk Business cases Hybrid concepts	Market regulation needed Response times
Retrofit to existing systems (e.g. power plants, ASU)	Power modulation Low marginal cost Many functionalities	Reduced operation as EES	CO_2 capture Underutilised ASU Oxy-fuel combustion	System complexity Modifications to the existing plant
EES + waste heat/cold recovery	Higher efficiency Larger power output Lower system losses	Resource availability Variable operation	Flexible operation Co-designed systems Low-carbon clusters	Co-location needed Scheduling Case-dependent
Multi-vector – EES + heating and/or cooling	Unique of thermo-mechanical storage TES capability Vector-coupling	Lower electrical efficiency Competing nature of outputs	Microgrid and local integrated systems Low-carbon clusters Waste heat/cold recovery Rising cooling demand	Output scheduling Missing assessments Temperature levels System complexity

در مورد کاربردهای شبکه، تعادل برق در بازار روز آینده باید با تعادل روزانه و/یا ارائه خدمات رزرو، مکمل یکدیگر شوند تا منجر به ایجاد انگیزه‌های تجاری مطلوب برای LAES گردد.

تنظیم بازار و طرح‌های اولویت‌بندی مناسب برای چنین خدماتی ارزش LAES را به‌عنوان یک دارائی مهم در ذخیره‌سازی انرژی تا حد زیادی افزایش می‌دهد. در مقیاس محلی[9]، پشتیبانی از نفوذ بالاتر منابع انرژی تجدیدپذیر

[8] Strengths Weaknesses Opportunities Threats

[9] م. مقیاس محلی یک مکان خاص با ویژگی‌های فیزیکی منحصر به فرد مانند آب و هوا، توپوگرافی و پوشش گیاهی است. با این حال، مناطق به طور قابل توجهی از نظر اندازه متفاوت هستند. آنها معمولاً بزرگتر از یک مکان هستند، مانند یک شهر یا شهر، و ممکن است شامل چندین شهر یا چندین ایالت یا استان باشد.

POLYM PART
مرجع پلیمر در بازار ایران

و پایایی[10] پیشرفته، می‌تواند از کاربردهای اولیه LAES باشد. علاوه بر این، LAES می‌تواند برای مقاوم‌سازی نیروگاه‌های موجود یا واحد جداسازی هوای کمتر استفاده شده، افزودن قابلیت‌های ذخیره‌سازی انرژی و مدولاسیون خروجی، در کنار سایر قابلیت‌های کاربردی مانند گیر انداختن[11] کربن‌دی‌اکسید به روش برودتی استفاده گردد. درکنار عملیات سنتی ذخیره‌سازی برق، استفاده هوشمندانه از LAES برای بازیابی گرما/سرمای هدررفته و تأمین چندمنظوره، تنها به‌طور مبحثی حاشیه‌ای در مقالات مورد توجه قرار گرفته است. یکپارچه‌سازی گرمای هدررفته در دمای 150 تا 200 درجه سانتیگراد و بازیابی سرمای خارجی می‌تواند علاوه بر کاهش تلفات سیستم، امکان‌سنجی اقتصادی فوری را برای LAES در پی داشته باشد. تامین انعطاف‌پذیر گرمایش، سرمایش و برق از LAES نیز ممکن است برای تعداد فزاینده‌ای از ایستگاه‌ها-به‌ویژه سرمایش-به دلیل افزایش نیازهای سرمایشی و قیمت مربوطه، مناسب باشد. با توجه به تاکید بر کربن‌زدایی بخش‌های گرمایش، سرمایش و برق، عملیات چند منظوره به‌طور بالقوه جالب‌ترین مسیر یکپارچه‌سازی است که باید با LAES پیگیری گردد و نیازمند تحقیقات بیشتری در این راستا است.

6.3. شکاف‌های پژوهشی و چشم‌اندازهای آینده

برای نتیجه‌گیری، ما شکاف‌های تحقیقاتی زیر را برجسته نمودیم و توصیه می‌نماییم این حوزه‌ها برای پیشرفت بیشتر تحقیقات در مورد LAES بررسی شوند:

• **ارزیابی مقایسه ای LAES با سایر راه‌حل‌های ذخیره‌سازی وجود ندارد:** شبیه‌سازی‌های جامع در سطح سیستم مانند آنچه در مرجع [2] وجود دارد، مورد نیاز است. تجزیه و تحلیل باید شامل LAES با سایر فن‌آوری‌های ذخیره‌سازی و تولید و همچنین سنجش‌های انعطاف‌پذیری باشد و عاری از فرضیات مربوط به عملکرد ذخیره‌سازی یا دوره‌ی‌کاری[12] باشد. مقایسه متقابل نتایج باید برای برجسته کردن نقاط قوت و ضعف LAES با توجه به گزینه‌های جایگزین استفاده شود.

• **مدل‌های LAES بیش از حد ساده شده، محدودیت‌های تکنولوژیکی مهم را برای یکپارچه‌سازی سیستم را نادیده می‌گیرند:** مدل‌های ذخیره‌سازی پیشرفته از جمله عملکرد خارج از شرایط طراحی، محدودیت‌های فنی برای عملکرد LAES مانند نواحی مدولاسیون توان قابل اجرا، نرخ افزایش توان و سایر موارد

---

[10] م. پایایی یا قابلیت اطمینان (Reliability) به میزان ثبات و پایداری یک ابزار سنجش اشاره دارد. اگر بتوان در شرایط مشابه، با استفاده از روش‌های مشابه، به نتیجه‌ای نتیجه‌ای مشابه رسید، ابزار سنجش پایا است.

[11] م. یک نوع فرآین شیمیایی است.

[12] م. به نسبت زمان کاری ماشین به کل بازه زمانی گفته می‌شود.

غیر ایده‌آل، همراه با چارچوب‌هایی برای گنجاندن این مدل‌های LAES در ارزیابی سطح سیستم، ضروری هستند. این امر به ویژه برای تنوع زیاد نقطه تنظیم[۱۳] LAES در موارد نیروگاه‌های هیبریدی، ارائه خدمات چندگانه و تامین انرژی چندگانه مناسب است.

• تعداد محدودی از مطالعات یکپارچه‌سازی موجود است که بسیار وابسته به مورد مطالعه شده هستند: مطالعات بیشتر باید بر روی موارد زیر متمرکز گردد: الف) سناریوهای آینده با سطوح بالای نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر، برق‌رسانی و غیره. ب) ربط دادن نتایج به مقیاس یکپارچه‌سازی خاص در نظر گرفته شده، پ) کمّی نمودن فرصت‌ها و موانع برای مشارکت LAES در خدمات رزرو پاسخ سریع در بازارهای مختلف برق و ت) مقایسه ثبات مالی LAES هیبریدی با LAES مستقل در موارد کاربردی واقعی.

• استراتژی‌های واضح برای استفاده کامل از پتانسیل LAES ذکر شده در بالا برای ذخیره‌سازی برق وجود ندارد: ارزیابی‌های مطالعه موردی بیشتر باید بر بازیابی گرما/سرمای هدررفته از LAES، عملکرد دو منظوره LAES یا تأمین خارجیِ قابلیت‌های اضافه شده، تمرکز نمایند. شواهد اولیه مورد بحث در بخش 6 نشان می‌دهد که، به ویژه در مناطق کم‌کربن با افزایش یکپارچه‌سازی بخش، چشم‌انداز LAES فراتر از ذخیره‌سازی برق، می‌تواند چندین فرصت استقرار و راه‌اندازی را ایجاد نماید.

تحقیقات بیشتر در مورد موضوعات فوق برای شناسایی ارزش آتی LAES است و به ذینفعان اطلاع می‌دهد که تا چه حد درک LAES می‌تواند در تحقق اهداف کربن‌زدایی شبکه در آینده نقش داشته باشد.

کلیدواژه‌ها

ذخیره‌سازی انرژی هوای مایع، ذخیره‌سازی مکانیکی گرمایی انرژی، ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، سرمازایی، یکپارچه‌سازی سیستم انرژی، کربن‌زدایی

Liquid air energy storage, Thermo-mechanical energy storage, Thermal energy storage, Cryogenics, Energy system integration, Decarbonisation.

مرجع اصلی

A. Vecchi, Y. Li, Y. Ding, P. Mancarella, A. Sciacovelli, “Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives”, Advances in Applied Energy, 2021, Vol. 3.

[13] م. نقطه تنظیم مقدار انتخاب شده‌ای که کنترل‌کننده خوکار باید به آن برسد ، نقطه تنظیم و مرجع

POLYM PART
مرجع پلیمر در بازار ایران

Doi: 10.1016/j.adapen.2021.100047

مرجع

[1] A. Ahmad, R. Al-Dadah, S. Mahmoud, “Air conditioning and power generation for residential applications using liquid nitrogen”, Applied Energy, 2016, Vol. 184, P.p 630-640.
[2] S. Georgiou, M. Aunedi, G. Strbac, CN. Markides, “On the value of liquid-air and pumped-thermal electricity storage systems in low-carbon electricity systems”, Energy, 2020, Vol. 193.