

مطالعه‌ای بر سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده

مجید خزعلی^{۱*}، عبدالرزاق کعبی نژادیان^۲^۱ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*مسئول مکاتبات: majid.khazali@srbiau.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

ذخیره‌سازی هوای فشرده
ذخیره‌سازی حرارتی
سیستم انرژی ترکیبی

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۶/۲۳
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

افزایش استفاده و به‌کارگیری سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر به دلیل مداوم‌نبودن دسترسی به منابع تجدیدپذیر، نیازمند ذخیره‌سازی انرژی است. سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده یکی از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی است که به علت مزایای متعدد آن در سال‌های اخیر بیش‌تر موردتوجه قرار گرفته است. در مقاله حاضر، ابتدا اهمیت و جایگاه سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده در مقایسه با دیگر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی بررسی و سپس خلاصه‌ای از تاریخچه این سیستم بیان شد. در ادامه، انواع سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده دسته‌بندی شد و برخی خصوصیات، مزایا و معایب آن بررسی گردید. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده از نظر استفاده از حرارت به سه دسته معمولی، آدیباتیک (بی‌دررو) و ایزوترمال (هم‌دما) تقسیم می‌شوند. همچنین می‌توان این سیستم‌ها را از نظر ظرفیت آن‌ها به سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ مقیاس تقسیم کرد. در این بین، سیستم‌های کوچک مقیاس به دلیل مزیت‌های فنی و اقتصادی، مانند کنترل بهتر اتلاف حرارت و کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای و تعمیر و نگهداری، موردتوجه بیش‌تری قرار گرفته است. همچنین به‌منظور تحلیل انرژی سیستم، یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده دیاباتیک، مدل‌سازی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری شد و مورد بررسی قرار گرفت.

۱ مقدمه

در میان تمام سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، CAES به‌عنوان سیستمی که به بلوغ فنی رسیده، موردتوجه قرار گرفته است. CAES یک تکنولوژی ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ با بیش از ۴۰ سال کاربرد عملی است [۷]. اصل کارکرد این سیستم بر اساس ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی به‌صورت مکانیکی (فشرده‌سازی هوا) است. باتوجه به پیشرفت‌های تکنولوژی و ترمودینامیکی اخیر، این سیستم پتانسیل لازم برای رسیدن به بازدهی و هزینه‌های سرمایه‌ای مقایسه‌ای سیستم تلمبه‌ذخیره‌ای را دارد [۸]. در حال حاضر فناوری تلمبه‌ذخیره‌ای دارای بیش‌ترین مورد نصب شده در جهان است یعنی حدود ۹۹٪ ظرفیت سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی نصب‌شده [۹]. از سوی دیگر، CAES در بین فناوری‌های ESS منحصر به فرد است؛ این سیستم امکان ساخت در مقیاس‌های مختلف را دارد و قابل حمل و نقل است، به‌آسانی با کاربردهای تولید هم‌زمان وفق می‌پذیرد و در مدیریت انبوه قدرت و کاربردهای پشتیبانی شبکه انعطاف‌پذیر است [۱۰].

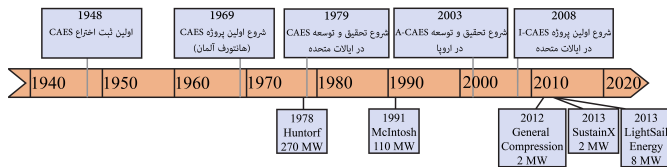
در مقاله حاضر ابتدا خلاصه‌ای از تاریخچه سیستم‌های CAES و اهمیت آن مطرح شده سپس انواع آن به‌طور کلی از نظر فنی و ابعاد، دسته‌بندی و بررسی شده است.

ایده اصلی ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی به‌وسیله فشرده‌سازی هوا به اوایل دهه ۴۰ میلادی باز می‌گردد [۱۱]، اما اولین گواهی ثبت اختراع در این زمینه مربوط به سال ۱۹۴۸ در ایالات متحده است [۱۲]. با این حال به دلیل عدم

رشد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر^۱ (RE) یکی از راه‌حل‌های کلیدی برای نگرانی‌های زیست‌محیطی مربوط به تأمین انرژی جهان است [۱]. به علت طبیعت پراکنده و متناوب بسیاری از آن‌ها به‌خصوص خورشیدی و بادی، بهره‌برداری کارآمد و اقتصادی مداوم از انرژی‌های تجدیدپذیر، وابسته به سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی^۲ (ESS) است [۲، ۳]. استفاده از ESS به‌همراه RE می‌تواند مزایای متعددی از نظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی فراهم کند [۴]. همچنین با ذخیره‌سازی انرژی می‌توان بین تولید و مصرف ایجاد توازن کرد و مدیریت و قابلیت اطمینان سیستم را بهبود بخشید [۵]. با استفاده از ESS می‌توان فرکانس و ولتاژ سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر را بهتر کنترل کرد و با تأمین پایدار انرژی، سبب افزایش به‌کارگیری برق تجدیدپذیر شد. انواع مختلف روش‌های ذخیره‌سازی، بر اساس اصول مختلف فیزیکی، از لحاظ نظری و عملیاتی برای اصلاح نوسانات RE و تطابق با کاربرد، در دسترس هستند. هر کدام از این فناوری‌ها برای محدوده توان و قدرت خاصی به‌خوبی سازگار است. چرخ‌طیار^۳ (FES)، ذخیره‌سازی هیدروژن، تلمبه‌ذخیره‌ای^۴ (PHS)، ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده^۵ (CAES)، خازن‌ها، باتری‌ها و ابررسانای ذخیره‌کننده انرژی مغناطیسی^۶ (SMES)، برخی از سیستم‌های ذخیره‌سازی موجود هستند [۶].

¹Renewable Energy ²Energy Storage System ³Flywheel Energy Storage ⁴Pumped hydroelectric Storage ⁵Compressed Air Energy Storage ⁶Superconducting Magnetic Energy Storage

به صورت پایلوت و در مقیاس‌های آزمایشی ساخته شده‌اند مانند پروژه AA-CAES ۱۰ مگاواتی چین [۲۸] و یا سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده هم‌دمای ۱۶ (I-CAES) که نمونه‌های متعددی از آن‌ها در مقیاس‌های کوچک ساخته شده، مانند دو پروژه ۲ مگاواتی و یک سیستم ۸ مگاواتی در ایالات متحده [۲۹-۳۱]. تاریخچه بیان‌شده در این بخش، به‌طور مختصر در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱: تحقیق و توسعه سیستم CAES در گذر زمان.

سه پروژه که بعد از سال ۲۰۱۰ در شکل ۱ نشان داده شده از نوع I-CAES هستند. عملیاتی شدن پروژه‌های بزرگ نقش به‌سازایی در سرعت‌بخشیدن و موردتوجه قرارگرفتن سیستم CAES داشته است؛ بعد از ساخت نیروگاه هانتورف این سیستم در آمریکا نیز موردتوجه قرار گرفت و بعد از راه‌اندازی نیروگاه مکینتاش تحقیقات بسیار بیشتری برای بهبود آن انجام شد. تنها پروژه‌هایی که به‌صورت کامل راه‌اندازی شده‌اند در شکل ۱ قرار گرفته، به‌رحال باید توجه داشت که این یک تحقیقات جامع نیست. بررسی انواع سیستم CAES در بخش‌های بعد انجام شده است.

۲ اهمیت و جایگاه سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده

در سال‌های گذشته پژوهش‌ها در زمینه ESS و احداث سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی به‌خصوص ذخیره‌سازی انبوه انرژی، بیش‌تر با هدف پیکسایبی انجام شده است اما با افزایش استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر نیاز به یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی مناسب بیش‌ازپیش احساس شد. این نیاز به‌علل ناپایداری منابع انرژی تجدیدپذیر و ایجاد نوسان در شبکه، عدم وجود منابع انرژی تجدیدپذیر در همه ساعات روز و پیش‌بینی نامطمئن و یا قابل پیش‌بینی نبودن پایداری این منابع وجود دارد و بدین‌سان استفاده از این سیستم‌ها به‌صورت متصل به شبکه را با مشکلاتی همراه می‌سازد. همچنین کاربرد سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر به‌صورت منفصل از شبکه بدون سیستم ذخیره‌سازی تقریباً ناممکن است. به‌علاوه، گسترش ریزشکبه‌ها و شبکه‌های هوشمند نیازمند ESS است و این سیستم‌ها بدون سیستم ذخیره‌سازی انرژی مانند رایانه بدون حافظه سخت^{۱۷} برای ذخیره‌سازی اطلاعات هستند. گسترش ریزشکبه‌ها^{۱۸} و شبکه‌های هوشمند^{۱۹} با توجه به مزیت‌های فنی و اقتصادی آن‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است چراکه کارکرد سیستم‌های تولید پراکنده^{۲۰} مبتنی بر مدیریت تولید انرژی باتوجه‌به نیاز است و این‌امر بدون ذخیره‌سازی انرژی به‌عنوان پشتیبان تولید امکان‌پذیر نیست [۳۲، ۳۳]. همچنین این شبکه‌ها از نظر پدافند غیرعامل نیز دارای جایگاه

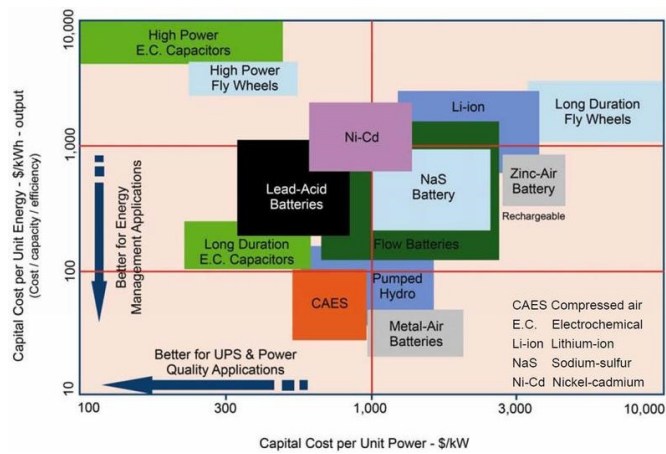
احساس نیاز به سیستم ذخیره‌سازی متصل به شبکه، تا سال ۱۹۶۹ سیستم CAES نه در علم و نه در صنعت مورد استقبال قرار نگرفت اما با افزایش ظرفیت پایه تولید شبکه به‌وسیله نیروگاه‌های بزرگ این نیاز احساس شد [۱۳]. نیروگاه‌های تلمبه‌ذخیره‌ای از نظر حجم و ساعات ذخیره‌سازی دارای ظرفیت مناسبی هستند اما احداث آن‌ها فقط در مناطقی با جغرافیای خاص امکان‌پذیر است لذا در اواسط دهه ۷۰ میلادی، بعد از شبیه‌سازی پروژه هانتورف^۷ آلمان، علاقه اصلی برای استفاده از تکنولوژی CAES شکل گرفت [۱۱]. پروژه هانتورف با ظرفیت ۲۷۰ مگاوات، در سال ۱۹۷۸ به‌انجام رسید. در نتیجه، دپارتمان انرژی ایالات متحده هماهنگ با PNNL^۸ کار تحقیق و توسعه در این زمینه را، با تمرکز بر دو موضوع ذخیره‌سازی طولانی‌مدت انرژی و سیستم‌های CAES آدیاباتیک با هدف کاهش مصرف سوخت فسیلی، قبل از پایان دهه ۸۰ میلادی به پایان رساند [۱۴، ۱۵]. ادامه این برنامه تحقیقاتی به صنایع EPRI^۹ واگذار شد.

توسعه نسل دوم CAES، اعم از آدیاباتیک (بی‌دررو) و ایزوترمال (هم‌دم)، به عملیاتی‌شدن موفقیت‌آمیز نسل اول CAES در ایالات متحده واگذار شد [۱۶]. صنایع EPRI ساخت یک نیروگاه CAES ترکیبی با ذخیره‌سازی انرژی حرارتی^{۱۰} (TES) تک‌مرحله‌ای را مطرح کرد و در نتیجه قراردادی با شرکت SPC^{۱۱} برای ساخت یک نیروگاه CAES دیاباتیک (معمولی) با ظرفیت ۲۲۰ مگاوات به‌همراه یک واحد بازیابی حرارت منعقد شد [۱۷]. اما به‌مرحله اجرا نرسید و ساخت اولین نمونه تا سال ۱۹۹۱ در شهر مکینتاش ایالت آلاباما با ظرفیت ۱۱۰ مگاوات به‌تعویق افتاد [۱۸]. این نیروگاه سبب شد تا توجه بیشتری به این تکنولوژی جلب شود، بعد از آن بود که تحقیقات آکادمیک و صنعتی در زمینه CAES گسترش یافت. در همین راستا پروژه‌های بزرگی در حال احداث هستند؛ نورتون^{۱۲} در شمال اوهایو با ظرفیت ۲۷۰۰ مگاوات و PG&E کالیفرنیا با ظرفیت ۳۰۰ مگاوات که در سال ۲۰۲۱ وارد مدار خواهد شد [۱۹، ۲۰].

همچنین پروژه‌های متعدد دیگری در حال آماده‌سازی یا احداث هستند، از جمله دو نیروگاه در تگزاس [۲۱]، یک نیروگاه کوچک ۱۰ مگاواتی در نیویورک [۲۲]، امکان‌سنجی و تجزیه‌وتحلیل برای یک CAES کوچک مقیاس ۵۰-۱۵ مگاواتی به‌منظور یکپارچه‌سازی با یک مزرعه بادی در ساکرامنتو [۲۳]، پروژه‌ای ۱۰۰ تا ۳۰۰ مگاواتی در داکوتا [۲۴]، نیروگاهی ۳۳۰ مگاواتی در ایرلند شمالی و مکان‌یابی پروژه‌های متعدد دیگر در اروپا از جمله انگلستان، آلمان، دانمارک و هلند [۲۵]. تمامی این پروژه‌ها از نوع سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده دیاباتیک (D-CAES) یا همان سیستم‌های متداول هستند اما پروژه‌هایی از نسل دوم CAES نیز وجود دارد مانند پروژه تحقیقاتی سیستم آدیاباتیک پیشرفته ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده^{۱۳} (AA-CAES) اروپا که در سال ۲۰۰۳ آغاز شد و نتیجه آن شد مدل مفهومی یک نیروگاه AA-CAES ۳۰۰ مگاواتی با راندمان ۷۰٪ که در مقایسه با CAES متداول بسیار بیش‌تر است [۲۶]. همچنین پروژه آدل^{۱۴} آلمان با توان ۳۶۰ مگاوات که قرار است در سال ۲۰۲۰ افتتاح شود [۱۹، ۲۷] و پروژه جیانسو^{۱۵} چین با ظرفیت ۵۰ مگاوات که از این نوع است. البته پروژه‌هایی

⁷Huntorf ⁸Pacific Northwest National Laboratory ⁹Electric Power Research Institute ¹⁰thermal energy storage ¹¹Soyland Power Cooperative ¹²Norton ¹³Advanced Adiabatic CAES ¹⁴ADELE ¹⁵Jiansu ¹⁶Isothermal CAES ¹⁷Hard Disk ¹⁸Micro Grid ¹⁹Smart Grid ²⁰distributed generation

ویژه‌های هستند. در دو دهه اخیر تحقیقات در زمینه ذخیره‌سازی انرژی گسترش چشمگیری داشته و پیوسته سیستم‌های نوین و یا ترکیبی مختلفی ارائه می‌شود که فقط بعضی از آن‌ها در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از نظر فنی می‌توان سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی را بر اساس تکنولوژی مورد استفاده به پنج دسته شیمیایی، الکترو شیمیایی، الکترونیک و مکانیکی و حرارتی تقسیم کرد، شکل ۲.



شکل ۴: هزینه سرمایه‌ای برای سیستم‌های ذخیره‌سازی مختلف به ازای واحد ظرفیت ذخیره‌سازی و توان عملیاتی [۳۷].

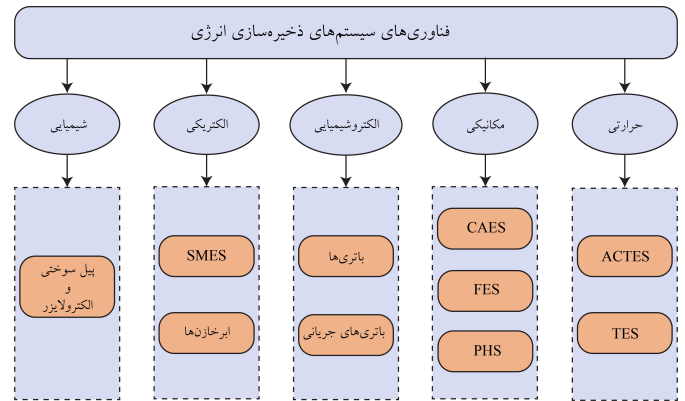
در این میان، شاخص عملکرد سیستم ذخیره‌سازی انرژی مطرح شده است که نشان می‌دهد سیستم CAES برتری قابل توجهی در به‌کارگیری با سیستم‌های انرژی ترکیبی و تجدیدپذیر نسبت به سایر سیستم‌ها، حتی PHS، دارد. این شاخص بر اساس تجزیه و تحلیل انتقادی از همه ویژگی‌های فنی و اقتصادی (برای مثال، هزینه، راندمان، سادگی، عمر مفید، بلوغ فنی، تخلیه خودبه‌خودی انرژی، قابلیت اطمینان، اثرات زیست‌محیطی، محدودیت‌های عملکرد، ظرفیت انرژی و توان، کمک به کاهش مصرف سوخت و غیره) فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی موجود تهیه شده است [۳۸]، شکل ۵.



شکل ۵: شاخص عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مختلف [۳۸].

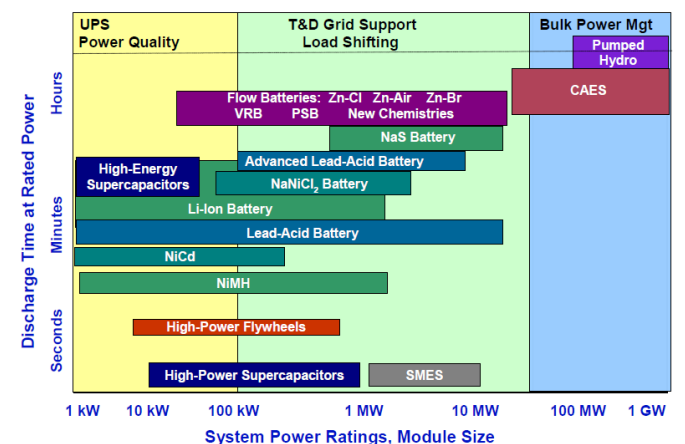
با وجود اینکه سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده متداول که در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای راندمان پایین‌تری نسبت به بعضی از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هستند (حدود ۵۰٪) اما به دلیل برتری‌های متعدد این سیستم، چه از نظر فنی و چه اقتصادی، همواره تحقیق و توسعه آن مدنظر پژوهشگران بوده است [۱۸].

شکل ۲: انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی بر اساس تکنولوژی مورد استفاده در آن‌ها.



شکل ۲: انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی بر اساس تکنولوژی مورد استفاده در آن‌ها.

منظور از ACTES²¹ در شکل ۲، ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در سیستم‌های تهویه مطبوع است. در میان سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، PHS و CAES، که جزء سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی الکترونیک به‌صورت مکانیکی هستند، بالاترین توان ذخیره‌سازی را دارند که بدین‌وسیله قادرند ساعت‌ها انرژی را ذخیره کنند تا در زمان مناسب بازیابی شود. این موضوع سبب می‌شود که دو سیستم CAES و PHS از نظر فنی، به‌خصوص از نظر حجم انبوه ذخیره‌سازی، بهترین گزینه برای مدیریت انرژی در شبکه سراسری و یا ریز شبکه‌ها باشند، شکل ۳.



شکل ۳: مشخصات سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی از منظر ساعات و توان ذخیره‌سازی [۳۴].

به‌علاوه، CAES از نظر اقتصادی نیز نسبت به سایر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی برتری نسبی دارد، شکل ۴. با توجه به شکل ۴ می‌توان گفت CAES یکی از به‌صرفه‌ترین سیستم‌ها، هم برای پشتیبانی توان و افزایش کیفیت تولید انرژی و هم به‌منظور مدیریت انرژی (در ریز شبکه‌ها و

²¹Air Conditioning Thermal Energy Storage ²²Energy Storage Association

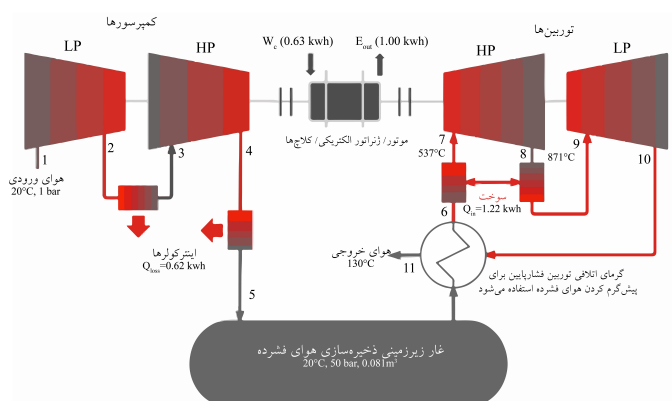
به سیستم) از طریق تکنیک‌های گوناگون تبادل حرارت، یک فرآیند هم‌دم را به‌انجام برساند. خانواده سوم یک سیستم ترکیبی است؛ سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده با ژنراتور دیزل و نیروگاه‌های بادی که به‌منظور تأمین برق مناطق دورافتاده استفاده شده است. در ادامه، مشخصات و نحوه کارکرد این سیستم‌ها بررسی شده است.

۱.۳ سیستم CAES متداول یا ذخیره‌سازی دیاباتیک انرژی هوای فشرده (D-CAES)

روند کار یک نیروگاه CAES بزرگ مقیاس می‌تواند مانند یک نیروگاه توربین گازی بررسی شود، با این تفاوت که فرآیند فشرده‌سازی و انبساط در CAES در دو بازه زمانی متفاوت اتفاق می‌افتد. جداسازی فرآیندهای فشرده‌سازی و انبساط به نیروگاه CAES این امکان را می‌دهد که با افزایش فشار عملیاتی سیستم، تا سه برابر تولید انرژی بیشتری نسبت به چرخه ساده نیروگاه گاز طبیعی با همان کیفیت سوخت داشته باشد. هر دو نیروگاه هانتورف و مکی‌تاش^{۲۵} با استفاده از فناوری CAES معمولی ساخته شده‌اند.

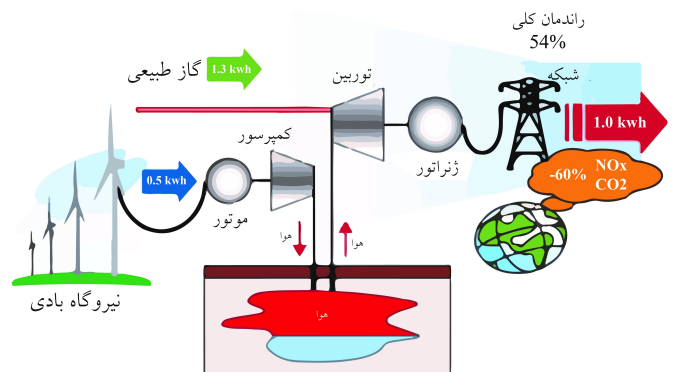
انرژی ارزان‌قیمت در ساعات کم‌باری برق و یا از خروجی RE برای فشرده‌سازی هوا تا فشار ۴۴-۷۰ بار استفاده می‌شود [۳۹]. این فشرده‌سازی معمولاً به‌وسیله دو کمپرسور فشاربالا و فشارپایین صورت می‌پذیرد. سپس، هوای فشرده تا نزدیکی دمای محیط خنک شده و در غارهای زیرزمینی با گنجایش تقریبی ۱۰۰۰۰ مترمکعب در عمق ۶۰۰-۴۰۰ متری ذخیره می‌شود [۴۰]. در زمان پیک بار (فاز تولید) یا برای پشتیبانی تولید RE متناوب، هوای پیش‌فشرده از غار ذخیره‌سازی به‌وسیله رکوپراتور پیش‌گرم شده و پس از مخلوط‌شدن با گاز طبیعی یا سوخت فسیلی در محفظه احتراق می‌سوزد ($\approx 550^{\circ}\text{C}$) و سپس از طریق یک توربین-ژنراتور کوپل‌شده چندمرحله‌ای انبساط می‌یابد.

نمای شماتیک فرآیند و جریان انرژی نیروگاه مکی‌تاش برای ۱ کیلووات ساعت توان خروجی در شکل ۷ نمایش داده شده است. راندمان این نیروگاه حدود ۵۴ درصد است [۳۹]، که به‌دلیل استفاده از سیستم‌های بازیابی حرارت از نمونه آلمانی آن (هانتورف) حدود ۱۲ درصد بیش‌تر است.



شکل ۷: نمای شماتیک و جریان انرژی سیستم D-CAES، نیروگاه مکی‌تاش در آلاباما، آمریکا [۳۹].

D-CAES^{۲۳} یا همان سیستم‌های CAES متداول با وجود استفاده از سوخت‌های فسیلی برای استحصال انرژی، در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مؤثرند، شکل ۶. این کاهش انتشار گازهای آلاینده به‌دلیل جلوگیری از هدررفت انرژی است.



شکل ۶: عملکرد و میزان بازدهی یک D-CAES بزرگ‌مقیاس در به‌کارگیری با نیروگاه بادی [۳۸].

محدودیت‌های D-CAES سبب شده تحقیقات متعددی درباره سیستم‌های نوین CAES انجام شود که در بخش ۳ انواع این سیستم‌ها و خصوصیات آن‌ها بررسی شده است.

۳ انواع سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده

سیستم‌های CAES متداول نیاز به غارهایی زیرزمینی (مثلاً معادن نمک تخلیه‌شده) برای ذخیره‌سازی هوا دارند یعنی احداث آن‌ها نیازمند شرایط خاص جغرافیایی است و به همین علت محدودیت‌های متعددی از نظر حداقل و حداکثر ظرفیت برای آن‌ها وجود دارد. با پیشرفت تکنولوژی و صرف هزینه بیشتر با استفاده از مخازن صلب بر روی سطح زمین می‌توان بر محدودیت طراحی و جغرافیایی محل احداث فائق آمد اما D-CAES برای فرآیند تولید انرژی نیازمند احتراق سوخت فسیلی (گاز طبیعی) است چراکه فرآیند استحصال انرژی در این سیستم در واقع با استفاده از یک سیکل برایتون است.

استفاده از سوخت فسیلی علاوه بر انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای، هزینه نیروگاه را (چه از نظر هزینه سوخت و چه از نظر هزینه تولید کربن) بالا می‌برد. بنابراین راه‌حل‌های متعددی برای ساخت سیستم‌های CAES جدید بدون نیاز به سوخت و یا با مصرف سوخت کم‌تر ارائه شده است که اصلی‌ترین آن‌ها ذخیره‌سازی حرارت مازاد سیستم است. درحالی‌که CAES متداول از احتراق برای رسیدن به شرایط عملکرد توربین استفاده می‌کند، این سیستم‌های جدیدتر نیاز به یک قدرت حرارتی دائمی برای ثابت نگه‌داشتن دمای تجهیزات ذخیره‌ساز گرما دارند. چندین نوع از این تکنولوژی تاکنون توسعه یافته است. مشخصه اصلی اولین نوع آن، ذخیره حرارت فشرده‌سازی در یک واحد ذخیره گرمایی جداگانه مانند سیستم آدیاباتیک پیشرفته ذخیره‌سازی هوای فشرده (AA-CAES) یا در مخزن فشاربالای تجمیع‌شده با هوای فشرده است یعنی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده سردنشده^{۲۴}. خانواده دوم سعی دارد تا با بیرون‌راندن گرمای فشرده‌سازی به محیط اطراف (و سپس واردکردن آن

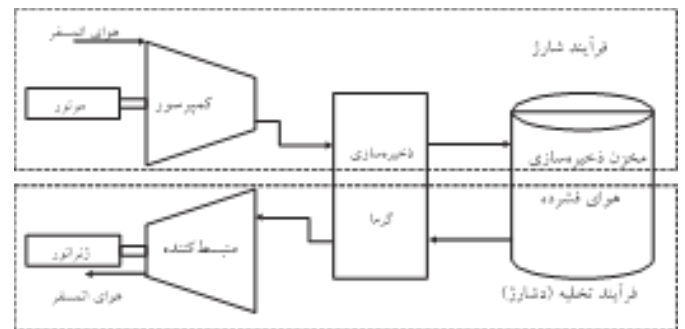
²³Diabatic CAES ²⁴Uncooled CAES ²⁵McIntosh

۲.۳ سیستم‌های ترکیبی ذخیره‌سازی گرما و هوای فشرده

به دلیل جلوگیری از تولید گازهای گلخانه‌ای و وابستگی CAES کلاسیک به سوخت فسیلی، جایگزین آن یعنی سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده بدون مصرف سوخت موردبررسی قرار گرفت. ایده اصلی این سیستم، ذخیره‌سازی گرمای تولیدی در هنگام تراکم و سپس استفاده آن برای بازگرمایش هوای فشار بالا پیش از انبساط است. راه‌های ممکن زیادی برای ذخیره‌سازی گرمای موردنیاز فرآیند انبساط وجود دارد که به سیستم‌های متفاوت ترکیبی گرمایی و ذخیره‌سازی هوای فشرده سوق پیدا می‌کند. این سیستم‌های ترکیبی در بخش حاضر بررسی شده است.

۱.۲.۳ سیستم پیشرفته آدیاباتیکی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده (AA-CAES)

ایده اصلی مفهوم CAES آدیاباتیکی از ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در المان مرکزی نیروگاه نشأت می‌گیرد. این بدان معنی است که گرمای موردنیاز در فرآیند انبساط از گرمای تراکم و ذخیره‌شده در یک واحد ذخیره‌سازی انرژی گرمایی (TES) برای بازه زمانی چرخه شارژ-دشارژ بازیابی شده است. این کار نیاز به احتراق را کاهش داده و یا به کلی از بین می‌برد. در طول فرآیند شارژ، هوای فشرده باید به اندازه دمای ورودی غار سرد شود که برای غارهای نمک حدود 50°C است. هنگام تخلیه، هوای فشرده به‌طور تقریبی به اندازه دمای خروجی کمپرسور در نرخ‌های استخراج گرمایی بالا گرم می‌شود. برای رسیدن به فشار بالا با دمای مناسب، سیستم‌های فشرده‌سازی و ذخیره‌سازی گرما می‌تواند به دو یا چند مرحله بیشتر تقسیم شود. نمای شماتیک این سیستم در شکل ۸ نمایش داده شده است.



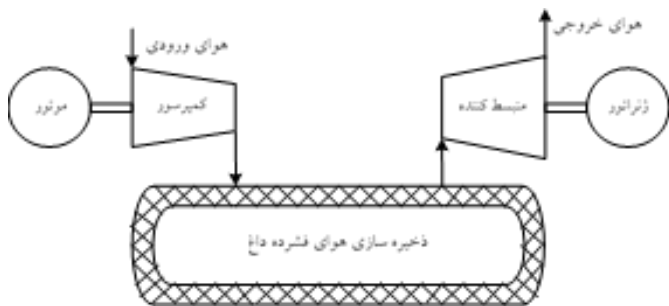
شکل ۸: آرایش یک مرحله‌ای سیستم AA-CAES [۴۱].

برخی از چالش‌های فنی پیشروی سیستم AA-CAES برای توسعه بیشتر شامل طراحی مقرون‌به‌صرفه ذخیره‌سازی انرژی گرمایی با حداقل میزان تلفات حرارتی در دمای بالاتر از 600°C و طراحی‌های جدید کمپرسور فشار بالا^{۲۶} (HP) که بتواند دماهای فشرده‌سازی بالا را تحمل کند، است.

۲.۲.۳ سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده سردنشده

به‌منظور اجتناب از مشکلات عملی احداث یک واحد ذخیره‌سازی انرژی گرمایی ارزان‌قیمت با کارایی بالا، نیاز به سیستم‌های ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و گرمای دیگری است. در دانشگاه فنی کلاوستال^{۲۷}

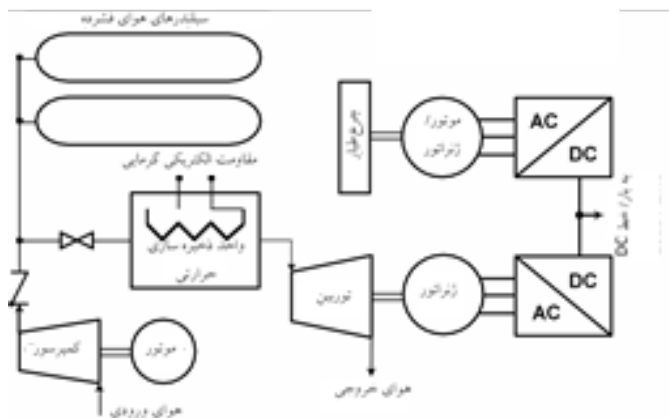
آلمان یک سیستم که در آن حرارت همراه با هوای فشرده در یک مخزن ایزوله ذخیره می‌شود، موردبررسی قرار گرفته است [۴۲]. اگر سیستمی وجود داشت که می‌توانست به‌واقع به فرآیندهای آدیاباتیکی دست‌یابد، راندمان ترمودینامیکی انرژی به ۱۰۰٪ می‌رسید. تلفات حرارتی اجتناب‌ناپذیر ناشی از عایق‌کاری‌های غیرایده‌آل، زمان ذخیره‌سازی مخزن را محدود می‌کند بنابراین این فناوری به‌طور عمده می‌تواند مختص کاربردهای ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت باشد. به‌علاوه، برای کارکرد سیستم در محدوده تغییرات وسیع دمایی ناشی از فرآیندهای آدیاباتیکی، نیاز به موتورهای هوا و کمپرسورهای گران‌قیمت با طراحی ویژه است. فشار نیز باید در محدوده خیلی پایین باقی بماند تا بتوان دمای ماکزیمم را محدود کرد. قاعده کلی چنین سیستمی در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: نمای شماتیک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده سردنشده [۴۲].

۲.۲.۳ سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و گرما (TACAS)^{۲۸}

این سیستم به‌طور اساسی یک نوع مستقل و کوچک‌تر CAES کلاسیک است، TACAS از سیلندرهای متداول فشار بالا برای ذخیره‌سازی هوای فشرده استفاده می‌کند. بنابراین دارای دو مزیت نسبت به CAES متداول است؛ کاهش محدودیت طراحی برای حداقل و حداکثر ظرفیت سیستم چراکه ظرفیت سیستم‌های متداول به ابعاد و نوع غار ذخیره‌سازی وابسته است و همچنین محدودیت جغرافیایی خاصی برای ساخت این سیستم وجود ندارد. نمای شماتیک این سیستم در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.



شکل ۱۰: قاعده کلی سیستم ترکیبی گرمایی و CAES (TACAS) [۴۲].

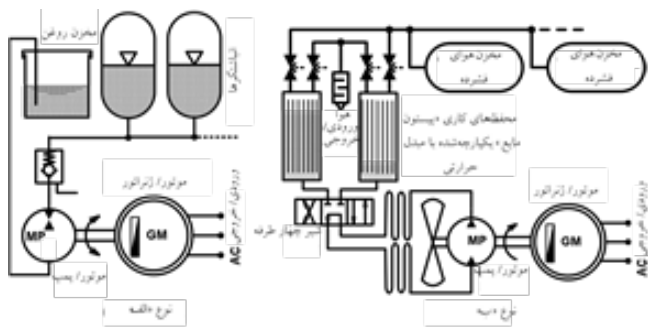
TACAS دارای خصوصیات زیر است:

²⁶High Pressure ²⁷Clausthal ²⁸Thermal And compressed Air Storage

محدودیت مکانی ندارد، گستره عمر طولانی تر و پتانسیل قیمت تولید کم تر نسبت به باتری ها دارد، می تواند با منابع سرد و گرم در یک کاربرد تولید همزمان یکپارچه شود و می تواند خدمات حمایت محلی اضافه را پشتیبانی کند، مانند تصحیح VAR^{۳۲}. دو نوع از S-CAES در بخش های زیر بررسی شده است: سیستم ذخیره سازی انرژی هایدرونیوماتیک^{۳۳} و سیستم ترکیبی هوای فشرده با توربین بادی و ژنراتور دیزل.

۱.۳.۳ سیستم های ذخیره سازی انرژی هایدرونیوماتیک

مقادیر راندمان سیستم نیوماتیک به علت مشکلات انجام تبادل گرما در محفظه های تراکم-انبساط و تلفات تأثیرگذار و اصطکاک ناشی از طبیعت گازی هوا، پایین باقی مانده است. استفاده از ماشین آلات با روغن هیدرولیک این مشکلات را دور زده است، آن ها کم تر دچار چنین مشکلاتی هستند و بنابراین راندمان بالاتری دارند. چالش اصلی در استفاده از این نوع دستگاه ها رابط روغن و هوا است. دو راه مختلف برای واسط این دو سیال در فرآیند شبه هم دما امکان پذیر است که به دو سیستم ذخیره سازی هایدرونیوماتیک منجر شده است. این سیستم ها تحت اختصار BOP^{۳۴} توصیف شده که مخفف باتری با روغن-هیدرولیک و نیوماتیک است. شکل ۱۲ این دو سیستم را نشان می دهد.



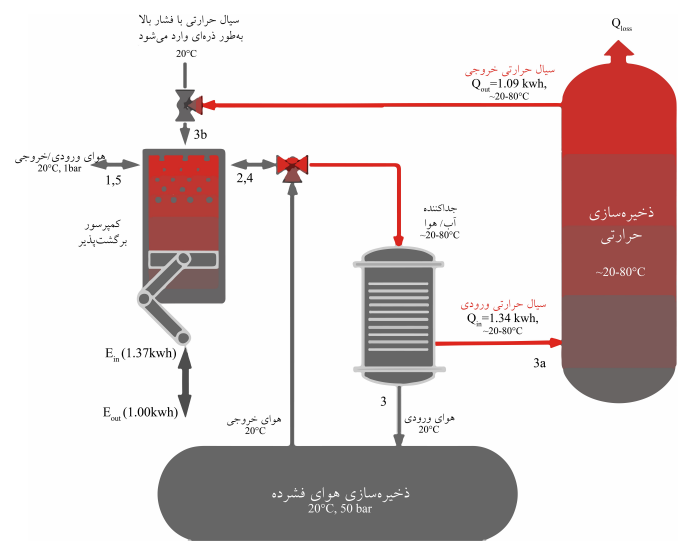
شکل ۱۲: دیاگرام شماتیک سیستم ذخیره سازی هایدرونیوماتیک [۴۳].

اصل کارکرد این سیستم ها بر اساس فشرده سازی هوا به وسیله پمپاژ روغن (مرحله ذخیره سازی انرژی) است. برای تخلیه انرژی نیز جریان روغن به وسیله فشار هوا توربین را به حرکت درمی آورد و ژنراتور کوپل شده با آن تولید توان می کند. اولین سیستم، نوع الف است که به صورت ساده یک نوع از باتری هایی است که به عنوان هایدرونیوماتیک صنعتی به خوبی شناخته شده است و نوع پیشرفته آن برای کاربردهای ظرفیت بالای صنعتی استفاده می شود. در این دستگاه ها یک جدایی فیزیکی بین هوا و روغن وجود دارد که می تواند بسته به نوع باتری یک پیستون، یک کیسه و یا یک غشاء باشد. ایراد اصلی سیستم نوع الف این است که به علت ثابت بودن مقدار گاز و نیاز به مخزن خارجی برای ذخیره روغن فشرده سازی در مرحله تخلیه، چگالی انرژی پایین است. سیستم دوم نوع ب است که در ارتباط هوا و روغن بهتر است چون از یک کاهنده مقدار روغن کارکننده در یک چرخه بسته، برای فشرده کردن هوای تازه از بیرون، استفاده می کند. با این حال نیاز به یک رابط روغن به هوا وجود دارد که اساس آن رابطه سیال-پیستون است و تحقق آن دشوار است.

گرمای مورد نیاز انبساط توسط یک واحد فولاد ذخیره سازی حرارتی^{۲۹} (TSU) فراهم می شود [۴۲]. TSU گرمای مورد نیاز عملکرد کامل را به وسیله مقاومت های الکتریکی صنعتی فراهم می کند که با بخشی از برق مفید ارزان قیمت ذخیره شده، تغذیه می شود. سیستم TACAS از یک چرخ طیار ارزان قیمت برای حفظ کیفیت توان تولیدی و همچنین جبران تاخیر چندثانیه ای برای اتصال توان در هنگام عملکرد سیستم، استفاده می کند.

۴.۲.۳ سیستم ذخیره سازی انرژی هوای فشرده هم دما (I-CAES)

CAES هم دما سعی می کند تا فشرده سازی را به صورت نزدیک به تک دما در محل انجام دهد، بنابراین از هرگونه تبادل حرارت خارجی در تراکم یا انبساط جلوگیری می کند. حاصل این کار بهبود بخشیدن راندمان (حدود ۸۰٪-۷۰٪)، فراهم سازی کارکرد بدون سوخت و کاهش تنش حرارتی بر تجهیزات است. فناوری های I-CAES ثبت شده شامل این مراحل هستند: تزریق مایع (آب یا روغن) به یک سیلندر-پیستون رفت و برگشتی در هنگام فشرده سازی هوا یا دمیدن هوا از میان مایع، جداسازی و جمع آوری آن مایع واسط به یک مخزن TES و تزریق دوباره مایع گرم به داخل سیلندر هنگام انبساط. در روش های کنونی I-CAES یک کمپرسور-منبسط کننده سه مرحله ای برگشت پذیر، با تحقق یافتن نرخ فشرده سازی ۳۰ : ۱ برای هر سیلندر و فشار کلی تا ۴۰۰ بار به کار گرفته می شود [۱۹]. نمای شماتیک این سیستم در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱۱: نمای شماتیک و جریان انرژی یک سیستم ذخیره سازی انرژی هوای فشرده هم دما [۳۹].

۳.۳ ذخیره سازی انرژی هوای فشرده مقیاس کوچک (S-CAES)

کاربردهای تولید پراکنده نظیر ریز شبکه و شبکه هوشمند، سیستم های منفصل از شبکه و کاربردهای UPS^{۳۱} از مواردی هستند که CAES به عنوان جایگزین برای باتری ذخیره الکتروشمیایی پیشنهاد می شود. مزایای سیستم ذخیره سازی انرژی هوای فشرده مقیاس کوچک (S-CAES) عبارتند از:

²⁹Thermal Storage Unit ³⁰Small Scale Compressed Air Energy Storage ³¹Uninterruptible Power Supply ³²Volt-Ampere Reactive ³³Hydropneumatic ³⁴Batteries with Oil-hydraulics and Pneumatics

ترکیبی هوای فشرده با بادی-دیزلی^{۳۵} (WDCAS) توسعه یافته است [۱۹]:

- WDCAS مقیاس متوسط^{۳۶} (MSWDCAS)
- WDCAS مقیاس کوچک^{۳۷} (SSWDCAS)

سیستم مقیاس متوسط هوای فشرده که با موتور دیزل سوپرشارژر و نیروگاه بادی ترکیب شده است (MSWDCAS)، استفاده از انرژی بادی را افزایش خواهد داد. سوپرشارژینگ فرآیندی است که شامل فشرده سازی مقدماتی با هدف افزایش چگالی هوای ورودی موتور است تا اینکه توان ویژه افزایش یابد. در طول دوره باد قوی یعنی زمانی که نرخ نفوذ باد^{۳۸} (WPPR) که به صورت خارج قسمت بین تولید قدرت باد و شارژ تعریف شده، بزرگتر از ۱ باشد ($WPPR > 1$) مازاد انرژی باد برای فشرده کردن هوا از طریق کمپرسور و ذخیره آن در مخزن، استفاده شده است. هوای فشرده به عنوان توربوشارژر استفاده می شود که قدرت موتور دیزل را تا دو برابر افزایش داده و مصرف سوخت آن را کاهش می دهد. ژنراتور دیزل در زمان هایی که سرعت باد کم است کار می کند، مثل زمانی که قدرت باد برای تأمین بار مصرفی کافی نیست. پروژه تکنوستریولین^{۳۹} (گسپی^{۴۰}، کانادا) که توسط سیستم CAES بهینه شده، مدتی است به اتمام رسیده و به تازگی یک سایت آزمایشی در ریویآرنارد^{۴۱} به عنوان تنها ریزشبهه موجود که بر اساس MSWDCAS طراحی شده، استقرار یافته است [۱۹]. نمای شماتیک این سیستم در شکل ۱۳ و تصاویر نمونه اجرایی شده آن در شکل ۱۴ قابل مشاهده است.

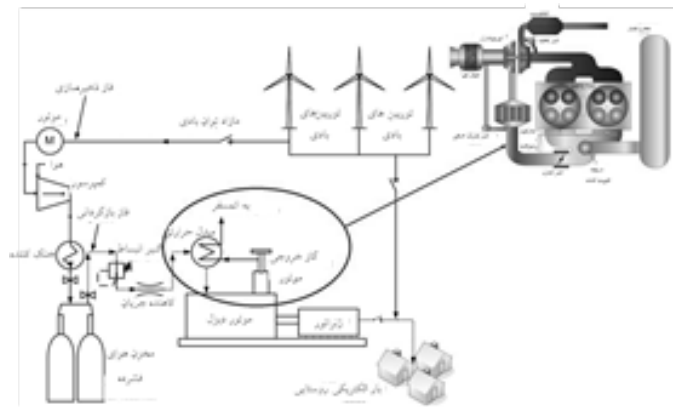
سیستم بادی-دیزلی-هوای فشرده در مقیاس های کوچک تر هم قابل استفاده است، به عنوان مثال برای تأمین برق زیرساخت های مخابراتی که برای به حداکثر رساندن کاربرد، قدرت سیگنال و پوشش تلفن همراه نیاز به تأمین برق مداوم و انرژی پشتیبانی دارند. تفاوت بین MSWDCAS و SSWDCAS در روش استفاده از هوای فشرده ذخیره شده است. در SSWDCAS دوره هایی که سرعت باد کم است ($WPPR < 1$) هوای فشرده در یک موتور نیوماتیک و بدون مصرف سوخت، انبساط می یابد. در این مرحله، ژنراتور دیزل خاموش است و فقط زمانی که نه سرعت باد کافی باشد و نه هوای فشرده کافی موجود باشد شروع به کار می کند و وظیفه آن تنها پشتیبانی است. نمای شماتیک این سیستم در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

۴ تحلیل جریان انرژی سیستم CAES

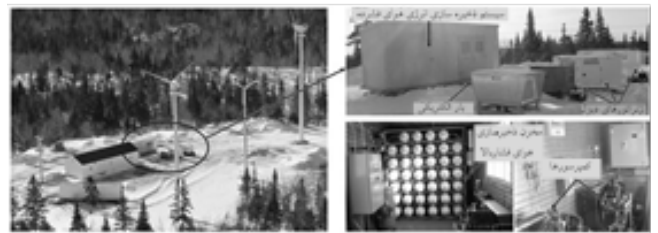
به منظور بررسی جریان انرژی سیستم ذخیره سازی انرژی هوای فشرده نیاز به مدل سازی سیستم است. در این پژوهش برای این کار یک سیستم CAES دیاباتیکی مدل شده است. در ادامه مراحل ساخت مدل تشریح شده و نتایج شبیه سازی تحلیل و بررسی شده است.

۱.۴ مدل ریاضی سیستم

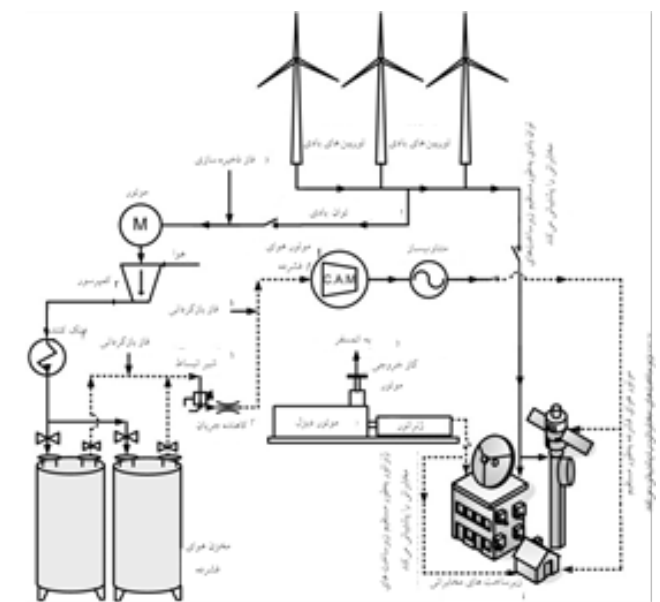
برای مدل سازی سیستم ابتدا باید مدل ریاضی آن تشکیل شود تا بتوان این مدل ریاضی را در نرم افزار توسعه داد و با استفاده از داده های ورودی به شبیه سازی سیکل نیروگاه CAES پرداخت. در پژوهش حاضر از نرم افزار متلب^{۴۲} برای



شکل ۱۳: نمای شماتیک سیستم هوای فشرده-دیزلی-بادی مقیاس متوسط [۱۹].



شکل ۱۴: ریزشبهه تکنوستریولین، نمونه اجرایی شده MSWDCAS [۱۹].



شکل ۱۵: نمای شماتیک سیستم هوای فشرده-دیزلی-بادی مقیاس کوچک [۳۵].

۲.۳.۳ سیستم های ترکیبی هوای فشرده با توربین بادی و ژنراتور دیزل

باتوجه به مزایای ثابت شده فنی، اقتصادی و انرژی سیستم های CAES بزرگ مقیاس در آمریکا و آلمان، از سیستم ترکیبی CAES و بادی-دیزلی برای کاربردهای مقیاس متوسط و کوچک (مناطق دورافتاده) استفاده شده است تا بهره برداری از ژنراتور دیزل در این سایت ها بهبود یابد. در واقع استفاده از هوای فشرده به عنوان یک عامل ذخیره سازی انرژی در هر دو گروه دیزل و نیروگاه بادی به خوبی عملیاتی شده است. دو توپولوژی برای سیستم

³⁵Wind Diesel Compressed Air Storage ³⁶Medium scale wind-diesel-compressed air system ³⁷Small scale wind-diesel-compressed air system

³⁸wind power penetration rate ³⁹TechnoCentreéolien ⁴⁰Gaspé ⁴¹Rivière-au-Renard ⁴²MATLAB

این کار استفاده شده است.

۲.۱.۴ مخزن ذخیره‌سازی هوا با حجم ثابت

برای مدل‌سازی مخزن ذخیره‌سازی هوا می‌توان از قانون گاز ایده‌آل استفاده کرد.

$$PV = mRT \quad (۵)$$

که در آن، P فشار، V حجم، m جرم، T دما و R ثابت گاز است. این معادله می‌تواند به صورت زیر تغییر یابد.

$$P = \frac{1}{V} mRT \quad (۶)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dm}{dt} RT \quad (۷)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{V} \dot{m} RT \quad (۸)$$

میزان کل هوای ذخیره‌شده از اختلاف دبی جرمی ورودی و خروجی قابل محاسبه است. پس برای محاسبه فشار هوای مخزن داریم:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{V} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) RT \quad (۹)$$

$$P = \int_0^t \left[\frac{1}{V} (\dot{m}_{in} T_{storage} - \dot{m}_{out} T_{storage}) R \right] dt \quad (۱۰)$$

در معادلات بالا t زمان و $T_{storage}$ دمای ذخیره‌سازی است. بدین ترتیب زیر جرمی هوای ذخیره‌شده و کل جرم هوای ذخیره‌شده به ترتیب به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\frac{dm_{stored}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (۱۱)$$

$$m_{stored} = \int_0^t (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) dt \quad (۱۲)$$

۳.۱.۴ توربین گاز

توربین گازی مورد استفاده در سیستم‌های CAES عملیاتی شده مانند نیروگاه هانتورف، دومرحله‌ای است. انرژی تولیدی توسط مجموعه این توربین‌ها به‌طور زیر قابل محاسبه است.

$$E_{GEN} = \eta_M \eta_G C_p T_2 \left(1 + \frac{\dot{m}_{in, fuel}}{\dot{m}_{in, air}} \right) \int_0^t \dot{m}_{in, air} \times \left(\frac{C_p T_1}{C_p T_2} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n_1}} \right] + 1 - \left(\frac{p_b}{p_2} \right)^{\frac{n_2-1}{n_2}} \right) dt \quad (۱۳)$$

که در آن، η_M راندمان مکانیکی، η_G راندمان الکتریکی، C_p ظرفیت گرمایی ویژه هوا، p_1 فشار ورودی مرحله اول، p_2 فشار ورودی مرحله دوم، p_b فشار اتمسفر، T_1 دمای ورودی مرحله اول، T_2 دمای ورودی مرحله دوم، $\dot{m}_{in, fuel}$ دبی جرمی سوخت ورودی، $\dot{m}_{in, air}$ دبی جرمی هوای ورودی و E_{GEN} انرژی تولیدی است.

از دوطرف معادله (۱۳) با فرض ثابت بودن نسبت سوخت به هوا، دیفرانسیل می‌گیریم.

$$\frac{dE_{GEN}}{dT} = \eta_M \eta_G C_p T_2 \left(1 + \frac{\dot{m}_{in, fuel}}{\dot{m}_{in, air}} \right) \frac{d}{dt} \int_0^t \dot{m}_{in, air} \times \left(\frac{C_p T_1}{C_p T_2} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n_1-1}{n_1}} \right] + 1 - \left(\frac{p_b}{p_2} \right)^{\frac{n_2-1}{n_2}} \right) dt \quad (۱۴)$$

۱.۱.۴ کمپرسور

امروزه از کمپرسورهای مختلفی در صنعت استفاده می‌شود. کمپرسورهای گریز از مرکز و جریان محوری از انواع رایج مورد استفاده هستند که هر دو در دسته کمپرسورهای دینامیک قرار می‌گیرند. ترکیبی از کمپرسورهای جریان محوری و گریز از مرکز برای دو نیروگاه CAES هانتورف و مکینتاش استفاده شده است. این نوع کمپرسورها را می‌توان در مدل‌سازی به صورت آدیاباتیک ارزیابی کرد.

فرآیند فشرده‌سازی آدیاباتیک را می‌توان با معادله زیر ارزیابی کرد که مبتنی بر توان ورودی و دبی جرمی است.

$$P_c = \dot{W} = \frac{1}{\eta_c} \dot{m} C_p T_{in} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (۱)$$

که در آن، P_c توان ورودی به کمپرسور، η_c راندمان کلی کمپرسور، \dot{m} دبی جرمی هوا، p_2 فشار خروجی کمپرسور، p_1 فشار ورودی کمپرسور، C_p گرمای ویژه در فشار ثابت و n ضریب پلی‌تروپیک است. برای محاسبه دبی جرمی کمپرسور، معادله (۱) به فرم زیر بازنویسی می‌شود.

$$\dot{m} = \frac{P_c}{C_p T_{in} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]} \eta_c \quad (۲)$$

بدین منظور باید توان ورودی کمپرسور مشخص باشد، مقدار n نیز بسته به ایزوترمال، پلی‌تروپیک یا آدیاباتیک بودن فرآیند مقادیر ۱ تا ۱/۴ را می‌تواند داشته باشد.

راندمان کلی کمپرسور بستگی به ابعاد و طراحی آن دارد، همچنین راندمان موتور متصل به کمپرسور نیز بر آن اثر دارد. به‌طور معمول کمپرسورها در سطوح مختلف به یکدیگر متصل شده یا به اصطلاح کوپل می‌شوند. نیروگاه‌های عملیاتی شده CAES، مانند هانتورف و مکینتاش که در بخش ۳ در مورد آن‌ها بحث شد، از فشرده‌سازی چندمرحله‌ای هوا بهره می‌برند. با توجه به معادله (۲)، برای محاسبه دبی جرمی کمپرسور دومرحله‌ای از معادله زیر استفاده می‌شود.

$$\dot{m} = \frac{P_c}{C_p T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_{in}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + C_p T_2 \left[\left(\frac{p_{out}}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]} \eta_c \quad (۳)$$

که در آن، p_{in} فشار هوای وارد شده به کمپرسور اول، p_{out} فشار هوای خروجی از کمپرسور اول، T_1 دمای هوای ورودی به کمپرسور اول و T_2 دمای هوای ورودی به کمپرسور دوم است. منظور از دبی جرمی در این عبارات نرخ هوای ورودی به سیستم است بنابراین می‌توان آن را با \dot{m}_{in} نیز نشان داد. برای محاسبه راندمان کلی کمپرسورها، معادله (۳) به فرم زیر تغییر می‌یابد.

$$\eta_c = \frac{\dot{m} (C_p T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_{in}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + C_p T_2 \left[\left(\frac{p_{out}}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right])}{P_c} \quad (۴)$$

و انرژی ذخیره شده در سیستم به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$E_{\text{stored}} = D.D \times P_{\text{rated}} \quad (22)$$

برای CAES در حجم ثابت، به دلیل اینکه باید مقداری هوا جهت حفظ فشار حداقلی در سیستم باقی بماند، معادله (۲۰) نیاز به باز نویسی دارد. بدین منظور برای محاسبه جرم هوای قابل استفاده داریم:

$$m_{\text{usable}} = m_{\text{stored}} - m_{\text{min}} \quad (23)$$

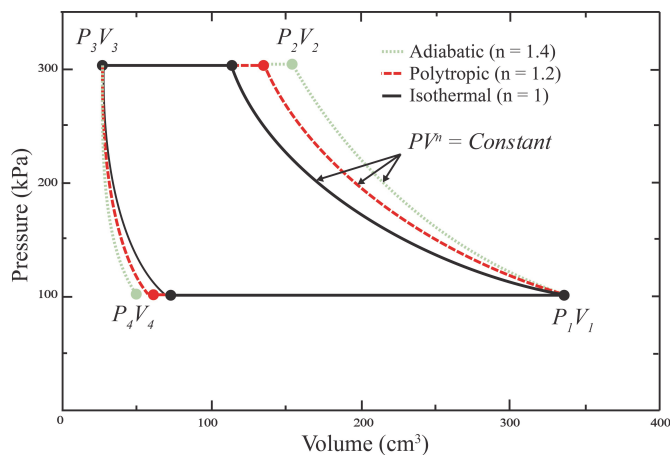
که در آن، m_{min} حداقل جرمی است که باید در سیستم باقی بماند و m_{stored} جرم هوای ذخیره شده است. با توجه به معادله فوق، معادله (۲۱) به صورت زیر بازنویسی می شود.

$$D.D = \frac{m_{\text{stored}} - m_{\text{min}}}{\dot{m}_{\text{out}}} \quad (24)$$

مقدار m_{min} از طریق معادله گاز ایده آل (معادله (۵)) قابل محاسبه است. بدین منظور باید مقادیر حداقلی دما و فشار در آن جایگذاری شود تا حداقل جرمی که باید در سیستم باقی بماند، به دست آید.

۲.۴ داده های ورودی سیستم

به منظور مدل سازی سیستم ذخیره سازی انرژی هوای فشرده، ابتدا باید نوع فرآیند در هر مرحله مشخص شود. مقدار ضریب پلی تروپیک در محاسبات، بستگی به نوع فرآیند دارد. این مقدر برای فرآیند هم دما برابر ۱ است. یعنی دمای هوا در ورودی و خروجی کمپرسور ثابت باقی می ماند و تمام گرمای فرآیند به محیط داده می شود. در طی فرآیند فشرده سازی آدیاباتیکی، هیچ گرمایی هدر نمی رود، بنابراین دمای هوا در خروجی کمپرسور افزایش می یابد. مقدار ضریب پلی تروپیک برای فرآیند آدیاباتیکی برابر نسبت گرمای ویژه و یا ۱/۴ است. اما در فرآیند فشرده سازی پلی تروپیک فقط بخشی از گرما به محیط داده می شود، پس علاوه بر هدررفت حرارت، افزایش دمای هوای خروجی نیز اتفاق می افتد. در اینجا برای نمایش بهتر تفاوت این سه فرآیند، مقدار ضریب پلی تروپیک ۱/۲ در نظر گرفته شده است (شکل ۱۶).



شکل ۱۶: تأثیر ضریب پلی تروپیک در فرآیندهای مختلف.

از آنجایی که مشتق انرژی برابر توان است به معادله زیر می رسیم.

$$P_{\text{GEN}} = \eta_M \eta_G \left(1 + \frac{\dot{m}_{\text{in, fuel}}}{\dot{m}_{\text{in, air}}} \right) \dot{m}_{\text{in, air}} \left(C_p T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] + C_p T_2 \left[1 - \left(\frac{p_b}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right) \quad (15)$$

که در آن، P_{GEN} توان تولیدی توربین است. برای به دست آوردن دبی جرمی هوا، معادله بالا به صورت زیر بازنویسی می شود.

$$\dot{m}_{\text{in, air}} = P_{\text{GEN}} \left\{ \eta_M \eta_G \left(1 + \frac{\dot{m}_{\text{in, fuel}}}{\dot{m}_{\text{in, air}}} \right) \left(C_p T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] + C_p T_2 \left[1 - \left(\frac{p_b}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right) \right\}^{-1} \quad (16)$$

و همان طور که گفته شد مقدار نسبت دبی سوخت به هوا ثابت فرض می شود، پس داریم:

$$\frac{\dot{m}_{\text{in, fuel}}}{\dot{m}_{\text{in, air}}} = \text{ثابت} = \dot{m}_{\text{ratio}} \quad (17)$$

از معادله (۱۶) برای محاسبه دبی جرمی هوای مورد نیاز جهت تأمین توان درخواستی استفاده می شود، بنابراین دبی جرمی خروجی توربین (\dot{m}_{out}) نیز از همین معادله حاصل می شود. در اصل، برای تخمین دبی جرمی هوا برای هر مرحله و راندمان، می توان از این معادله استفاده کرد. سپس از دبی جرمی با استفاده از معادله (۱۰) به فشار جدید رسید. راندمان توربین گاز نیز در هر مرحله و سطح بار مصرفی با استفاده از بازنویسی معادله (۱۵) به فرم زیر به دست می آید.

$$\eta_G = P_{\text{GEN}} \left\{ \eta_M \dot{m}_{\text{in, air}} \left(1 + \dot{m}_{\text{ratio}} \right) \left(C_p T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] + C_p T_2 \left[1 - \left(\frac{p_b}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right) \right\}^{-1} \quad (18)$$

۴.۱.۴ انرژی ذخیره شده

انرژی ذخیره شده در سیستم از طریق جرم ذخیره شده و توان نامی سیستم قابل محاسبه است. بدین منظور برای محاسبه دبی جرمی خروجی سیستم داریم:

$$\dot{m}_{\text{out}} = P_{\text{rated}} \left\{ \eta_M \eta_G \left(1 + \dot{m}_{\text{ratio}} \right) \left(C_p T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] + C_p T_2 \left[1 - \left(\frac{p_b}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right) \right\}^{-1} \quad (19)$$

که در آن P_{rated} توان نامی سیستم است. با محاسبه دبی جرمی خروجی سیستم می توان جرم هوای ذخیره شده در مخزن را محاسبه کرد.

$$m_{\text{stored}} = \int_0^t (\dot{m}_{\text{in}} - \dot{m}_{\text{out}}) dt \quad (20)$$

مدت زمان تخلیه^{۴۳} (D.D) هوای سیستم از طریق عبارت زیر به دست می آید.

$$D.D = \frac{m_{\text{stored}}}{\dot{m}_{\text{out}}} \quad (21)$$

⁴³Discharge Duration

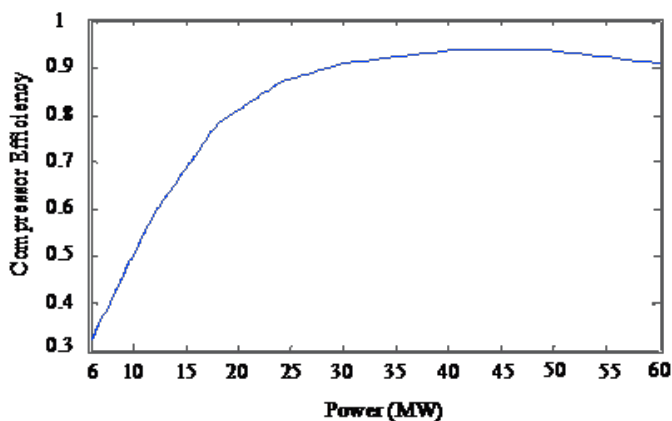
مقدار نرخ تغییرات توان برای موتور و ژنراتور در جدول ۱ به صورت مگاوات بر دقیقه داده شده که باید به کیلووات بر ثانیه تبدیل شود، پس داریم:

$$\frac{88 \text{ MW}}{\text{min}} = \frac{88000 \text{ kW}}{60 \text{ sec}} = 1466.7 \text{ kWsec}$$

همچنین برای توان ورودی به کمپرسور و توان خروجی توربین نیز حداقل مقداری در نظر گرفته شده که برابر است با ۲۹/۶ مگاوات. به دلیل داده نشدن راندمان مکانیکی توربین گاز، مقدار آن ۹۵ درصد فرض شده است.

۳.۴ نتایج و بحث

حداقل توان ورودی به کمپرسور، ۲۹/۶ مگاوات است که این توان حداقلی در حدود ۵۴۰ ثانیه زمان لازم دارد تا به کمپرسور اعمال شود. هرچه توان ورودی بیشتر شود راندمان کمپرسور افزایش می‌یابد، این افزایش توان با شیب ۱۴۶۶/۷ کیلووات بر ثانیه اتفاق می‌افتد. مقدار بیشینه راندمان کمپرسور در توان ۴۹/۲ مگاوات و برابر ۹۴ درصد است و با رسیدن توان ورودی به مقدار نامی ۶۰ مگاوات راندمان به ۹۱ درصد کاهش می‌یابد. تغییرات راندمان کمپرسور نسبت به توان ورودی، در شکل ۱۷ قابل مشاهده است.



شکل ۱۷: تغییرات راندمان کمپرسور نسبت به توان ورودی.

حداقل توان ورودی به توربین گاز نیز برابر ۲۹/۶ مگاوات است. این توان در مدت زمان ۶۶۰ ثانیه به توربین اعمال می‌شود. میزان توان ورودی به توربین، باتوجه به توان موردنیاز یا بار مصرفی، توسط اپراتور واسط به توربین اعمال می‌شود. پس عامل تعیین‌کننده برای توان تولیدی توربین گاز، بار مصرفی است که با آن رابطه مستقیم دارد. توان تولیدی توربین با شیب ۱۴۶۶/۷ کیلووات بر ثانیه افزایش می‌یابد، با افزایش بار مصرفی و به دنبال آن افزایش توان تولیدی توربین، راندمان توربین گاز افزایش می‌یابد. بیش‌ترین راندمان توربین در توان نامی آن، یعنی ۲۹۰ مگاوات اتفاق می‌افتد که ۸۶ درصد است. تغییرات راندمان توربین گاز نسبت به توان، در شکل ۱۸ قابل مشاهده است.

مطابق نتایج شبیه‌سازی، کمپرسور برای افزایش فشار مخزن ذخیره‌سازی هوای فشرده از ۴۶ بار به ۶۶ بار، حدود ۱۶/۲ ساعت کار می‌کند. در طول فشرده‌سازی هوا، دبی جرمی از ۱۱۸/۸ کیلوگرم بر ثانیه در ابتدای فرآیند به ۱۰۴/۴ کیلوگرم بر ثانیه کاهش می‌یابد. علت این کاهش این است که با افزایش فشار مخزن ذخیره‌سازی هوا، دبی جرمی با مقاومت مخزن به ورود

باتوجه به تلفات پایین حرارتی کمپرسور، فرآیند فشرده‌سازی آدیباتیک فرض می‌شود. بنابراین مقدار ضریب پلی‌تروپیک ۱/۴ است. علاوه‌براین فرآیند تخلیه نیز به صورت آدیباتیک فرض شده است. دمای هوا در مخزن ذخیره‌سازی از ۱۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. به دلیل تأثیر ناچیز این مقدار تغییرات دما بر میزان انرژی ذخیره‌شده، دمای ذخیره‌سازی مقدار ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد فرض می‌شود. برای شبیه‌سازی سیستم به داده‌های عملیاتی نیروگاه نیاز است که از گزارش منتشرشده نیروگاه هانتورف در سال ۲۰۰۱ [۴۴]، استخراج شده است. این داده‌ها به همراه سایر داده‌های مفروض، در جدول ۱ آمده است. از دیگر مفروضات شبیه‌سازی، ثابت بودن نسبت فشار در هر دو مرحله کمپرسور، ثابت بودن نسبت فشار در هر دو مرحله توربین، تخلیه کامل هوای فشرده ذخیره‌شده در پایان روز و برابر بودن داده‌های خروجی کمپرسور با ورودی مخزن حتی زمان یکسان شدن فشار خروجی کمپرسور دوم با مخزن است.

جدول ۱: داده‌های ورودی سیستم CAES.

مقدار و واحد	پارامتر
۲۹۰ MW	توان خروجی توربین
۶۰ MW	توان ورودی کمپرسور
۴۲۵ kg/s	دبی جرمی هوای توربین
۱۰۸ kg/s	دبی جرمی کمپرسور
۱/۴	نسبت دبی ورودی به خروجی
۱۱ kg/s	دبی جرمی گاز طبیعی
۳۰۰۰۰۰ m ^۳	حجم مخزن ذخیره‌سازی
۴۶ – ۶۶ bar	فشار هوا در مخزن ذخیره‌سازی
۱۰ bar/h	نرخ کاهش فشار
۱ bar	فشار ورودی کمپرسور
۴۴ – ۶۶ bar	فشار خروجی کمپرسور
۴۱ bar	فشار ورودی توربین ۱
۱۱ bar	فشار ورودی توربین ۲
۵۵ °C	دمای ورودی توربین ۱
۸۲۵ °C	دمای ورودی توربین ۲
۱۶ °C	دمای ورودی کمپرسور ۱
۳۰ °C	دمای ورودی کمپرسور ۲
۲۰ °C	دمای ذخیره‌سازی هوا
۵۰ °C	دمای ورودی مخزن ذخیره‌سازی
۰/۲۸۷ kJ/kg · K	ثابت گاز ایده‌آل برای هوا
۱/۰۰۵ kJ/kg · K	ظرفیت گرمای ویژه هوا
۱ – ۱/۴	ضریب پلی‌تروپیک
۱۱ min	زمان راه‌اندازی توربین
۸۸ MW/min	نرخ تغییرات توان موتور/ژنراتور
۹ min	زمان راه‌اندازی کمپرسور

با استفاده از داده‌های جدول ۱، نسبت دبی سوخت به هوا به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{m}_{\text{ratio}} = \frac{\dot{m}_{\text{in, fuel}}}{\dot{m}_{\text{in, air}}} = \frac{11}{425} = 0.0259$$

همانطور که پیش‌تر گفته شد، این یک مقدار ثابت است. همچنین مقدار حداقل جرمی که باید در سیستم باقی بماند با استفاده از داده‌های جدول ۱ برابر است با:

$$m_{\text{min}} = \frac{PV}{RT} = \frac{46 \times 3 \times 10^5}{287 \times 10^{-5} \times 293} = 1.6411 \times 10^7 \text{ kg}$$

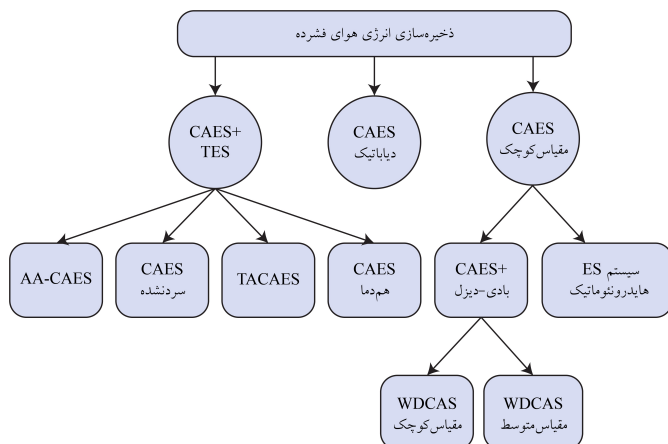
هوای بیش‌تر مواجه می‌شود. زمانی که کمپرسور به توان نامی خود می‌رسد کمتر از ۱ دقیقه است.

شبیه‌سازی را تأیید می‌کند.

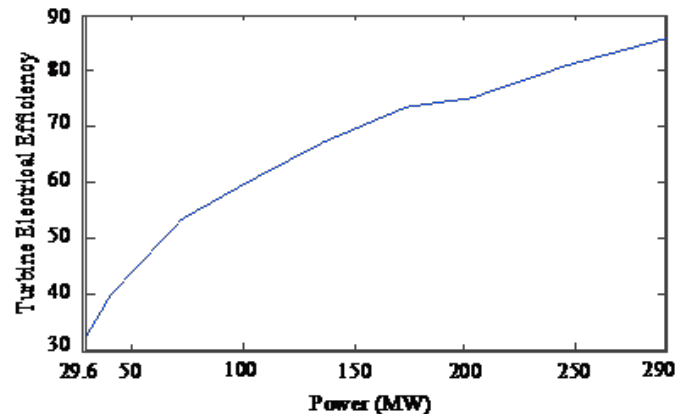
۵ نتیجه‌گیری

با وجود انتظارات گسترده و تلاش‌هایی که در زمینه تحقیق و توسعه سیستم CAES صورت گرفته اما این سیستم همچنان به‌صورت گسترده استفاده نمی‌شود. ترکیبی از مسائل فنی و اقتصادی مسبب این امر است، پروژه‌های متعددی سال‌ها به دلیل عدم توانایی برای تأمین تجهیزات مورد نیاز و یا مکان‌یابی نامناسب متوقف شده‌اند و بعد از تأمین تجهیزات نیز به علت مسائل مربوط به اقتصاد پروژه و بازگشت سرمایه، با شکست مواجه شده‌اند. طراحی‌های متعددی نیز با صرف هزینه و تغییرات طراحی برای موقعیت مکانی دیگری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استفاده گسترده از RE به صورت متصل به شبکه سبب می‌شود تفاوت قیمت برق در ساعات پیک و غیرپیک مصرف کاهش یابد و این امر بر هدف اولیه استفاده از سیستم‌های CAES، یعنی پیکسای، تأثیر منفی می‌گذارد. به‌رحال استفاده از CAES با هدف پیکسای مانند گذشته در اولویت نیست، هدف اصلی در تحقیقات دهه اخیر پوشش مشکلات و ضعف‌های سیستم‌های RE بوده است. با توجه به مزیت‌های متعدد فنی و اقتصادی سیستم‌های تولید پراکنده و ریزشبکه‌ها، سیستم‌های CAES مقیاس کوچک مورد توجه قرار گرفته‌اند. از طرفی، برتری سیستم‌های نسل دوم CAES نظیر سیستم‌های AA-CAES و I-CAES، سبب افزایش تحقیق و توسعه بر روی آن‌ها شده است. اما نسل دوم سیستم‌های CAES نیاز به تحقیقات بیش‌تری دارد، یکی از چالش‌های این سیستم‌ها ارتباط با حرارت و عدم تحمل دماهای بالا است. با این حال همچنان تلاش‌های متعددی برای افزایش راندمان این سیستم‌ها در حال انجام است.

هرچند در مقاله حاضر سیستم‌های مقیاس کوچک در دسته‌بندی جداگانه‌ای قرار گرفته‌اند اما در عمل تنها محدودیت‌های فنی و اقتصادی است که ابعاد این سیستم‌ها را تعیین می‌کند. کم‌اینکه محدودیت‌های کم‌تری برای ساخت یک سیستم AA-CAES مقیاس کوچک در مقایسه با یک سیستم WDCAS مقیاس بزرگ (بیش‌تر از ۱۰ مگاوات) وجود دارد، همچنین غلبه بر موانع اقتصادی در مقیاس‌های متوسط و کوچک راحت‌تر است. دسته‌بندی سیستم‌های CAES بیان‌شده در این مقاله در شکل ۲۰ قابل مشاهده است.

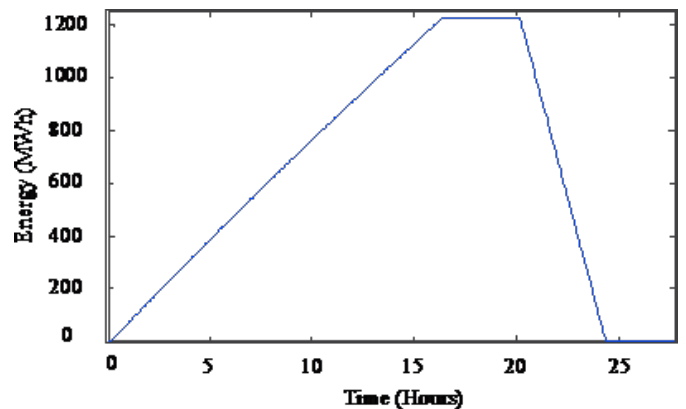


شکل ۲۰: دسته‌بندی سیستم‌های CAES مطرح‌شده در مقاله حاضر.



شکل ۱۸: تغییرات راندمان توربین نسبت به توان خروجی.

توربین گاز در ساعت ۲۰ که پیک بار مصرفی است شروع به کار می‌کند. پس از راه‌اندازی، زمانی که توربین به توان نامی خود می‌رسد حدود ۴ دقیقه است. دبی جرمی کمپرسور ۴۲۹ کیلوگرم بر ثانیه است که با این دبی حدود ۴/۵ ساعت طول می‌کشد فشار مخزن به حداقل مقدار ممکن، که ۴۴ بار است، برسد. مدت زمانی که هوای فشرده با فشار بیشینه ۶۶ بار در مخزن باقی می‌ماند حدود ۳/۲ ساعت است. نتایج نهایی شبیه‌سازی برای فشرده‌سازی هوا، نگهداری هوای فشرده در مخزن و تولید انرژی نسبت به زمان، در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۱۹: تغییرات انرژی سیستم نسبت به زمان در طی شبیه‌سازی.

دبی جرمی در مرحله آخر فشرده‌سازی نیروگاه هانتورف ۱۰۸ کیلوگرم بر ثانیه است که این مقدار ۳/۶ کیلوگرم بر ثانیه از نتیجه شبیه‌سازی بیش‌تر است. همچنین مدت زمان فرآیند شارژ نیروگاه، ۱۶ ساعت بیان شده که ۰/۳ ساعت از نتیجه شبیه‌سازی کمتر است. دبی جرمی نیروگاه برای توان نامی ثابت ۲۹۰ مگاوات، برابر ۴۲۵ کیلوگرم بر ثانیه است که از مقدار شبیه‌سازی شده حدود ۴ کیلوگرم بر ثانیه کمتر است. مطابق داده‌های نیروگاه هانتورف، این نیروگاه می‌تواند ۱۱۶۰ مگاوات ساعت انرژی را ذخیره کند، اما نتایج شبیه‌سازی نشان داد بیشینه انرژی ذخیره‌شده ۱۲۲۷ مگاوات ساعت است. دلیل این اختلاف‌های اندک، خطای محاسباتی ناشی از ساده‌سازی‌ها و برخی تلفات است که به علت اندک بودن اختلاف، داده‌های عملیاتی نتایج

مراجع

- [1] Quaschnig, Volker V. *Renewable Energy and Climate Change*. Wiley-Blackwell, Hoboken, New Jersey, 2nd edition ed. , 2019.
- [2] Child, Michael, Kemfert, Claudia, Bogdanov, Dmitrii, and Breyer, Christian. Flexible electricity generation, grid exchange and storage for the transition to a 100 *Renewable Energy*, 139:80-101, 2019.
- [3] Creutzig, Felix, Breyer, Christian, Hilaire, Jérôme, Minx, Jan, Peters, Glen P., and Socolow, Robert. The mutual dependence of negative emission technologies and energy systems. *Energy & Environmental Science*, 12(6):1805-1817, 2019.
- [4] Letcher, Trevor M. *Storing electrical energy*, pp. 365-377. Academic Press, 2018.
- [5] Denholm, Paul and Mai, Trieu. Timescales of energy storage needed for reducing renewable energy curtailment. *Renewable Energy*, 130:388-399, 2019.
- [6] Zakeri, Behnam and Syri, Sanna. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42:569-596, 2015.
- [7] Amirlatifi, Amin, Vahedifard, Farshid, Degtyareva, Maria, Turner, Richard N., Sullivan, Brian, Santra, Ritabrata, and Esposito, Richard A. Reusing abandoned natural gas storage sites for compressed air energy storage. *Environmental Geotechnics*, pp. 1-14, 2019.
- [8] Li, Yaowang, Miao, Shihong, Yin, Binxin, Yang, Weichen, Zhang, Shixu, Luo, Xing, and Wang, Jihong. A real-time dispatch model of caes with considering the part-load characteristics and the power regulation uncertainty. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 105(July 2018):179-190, 2019.
- [9] Akinyele, D. O. and Rayudu, R. K. Review of energy storage technologies for sustainable power networks. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 8:74-91, 2014.
- [10] Malekan, Mohammad, Khosravi, Ali, and Zhao, Xiaowei. The influence of magnetic field on heat transfer of magnetic nanofluid in a double pipe heat exchanger proposed in a small-scale caes system. *Applied Thermal Engineering*, 146:146-159, 2019.
- [11] Kalhammer, F. R. and Schneider, T. R. Energy storage. *Annual Review of Energy*, 1(1):311-343, 1976.
- [12] Gay, F.W. Means for storing fluids for power generation, 1948.
- [13] Mattick, W. and Haddenhorst, O. Weber. Huntorf: the world's first 290-mw gas turbine air-storage peaking plant..
- [14] Allen, R. D., Doherty, T. J., and Kannberg, L. D. Summary for policymakers. Report 9788578110796, U.S. Department of Energy, 1985.
- [15] Glendenning, I., Chew, P. E., Grant, R., Glanville, R., and Moye, M. H. Technical and economic assessment of advanced compressed air storage (acas) concepts. Report, U.S. Department of Energy, 1979.

می‌توان سیستم‌های CAES را از نظر استفاده از حرارت، به سه دسته دیاباتیک، آدیاباتیک و ایزوترمال (هم‌دما) تقسیم‌بندی کرد. همچنین دستهبندی‌های متعدد دیگری نیز قابل انجام است مانند فشارثابت یا فشارمتغییر بودن سیستم در فرآیند تخلیه، نوع مخزن (زیرزمینی، زیرآبی و یا مخزن صلب)، نوع استحصال (توربوژنراتور، موتور نیوماتیک، توربین گاز و...) و یا نوع ذخیره‌سازی انرژی (پمپ، کمپرسور الکتریکی، کمپرسور هیدرولیک و...). همچنین می‌توان این سیستم‌ها را بر اساس کاربرد تقسیم‌بندی کرد.

مدل‌سازی و شبیه‌سازی ارائه‌شده در مقاله حاضر برای یک سیستم دیاباتیک با حجم مخزن ثابت است که فشار آن در طی فرآیند تغییر می‌کند، هرچند فرآیندهای شارژ و تخلیه سیستم آدیاباتیک فرض شده است اما اختلاف نتایج شبیه‌سازی با داده‌های عملیاتی نیروگاه ناچیز است. نوع مخزن ذخیره‌سازی، که زیرزمینی است می‌تواند در نگه‌داشت بهتر انرژی نقش داشته باشد. مسأله اساسی در این نوع سیستم و سایر انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، جلوگیری از هدررفت حرارت است که در سیستم مدل‌سازی شده از احتراق گاز طبیعی برای جبران گرمای هدررفته استفاده می‌شود. بنابراین ذخیره‌سازی حرارتی می‌تواند نیاز به احتراق سوخت‌های فسیلی را حذف کند یا مقدار آن را کاهش دهد.

در این مقاله، خلاصه‌ای از تاریخچه و روند پیشرفت سیستم‌های CAES، اهمیت و جایگاه این سیستم‌ها در مقایسه با دیگر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، انواع CAES و برخی از ویژگی‌ها، نقاط قوت و ضعف آن‌ها موردبررسی قرار گرفت. می‌توان اهمیت سرمایه‌گذاری برای پروژه‌های جدید و ساخت نمونه عملیاتی آن‌ها را در تأثیرگذاری بر پیشرفت تحقیق و توسعه این سیستم‌ها مشاهده کرد اما باید در نظر داشت پژوهش حاضر نه از نظر تاریخچه و پروژه‌های انجام‌شده و نه از نظر انواع سیستم‌های CAES نوین، یک مطالعه جامع نیست و نباید تنها به این مقاله اکتفا کرد.

نمادها و نشانه‌ها

\dot{W}	توان، MW
P_c	توان کمپرسور، MW
P_{GEN}	توان تولیدی، MW
P_{rated}	توان نامی، MW
η_c	راندمان کمپرسور
η_M	راندمان مکانیکی
η_G	راندمان الکتریکی
E_{GEN}	انرژی تولیدی، MWh
C_p	گرمای ویژه، $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
T	دما، $^{\circ}\text{C}$
p	فشار، bar
V	حجم، m^3
\dot{m}	دبی جرمی، kg/s
m	جرم، kg
t	زمان، s
D.D	مدت زمان تخلیه، s
n	ضریب پلی‌تروپیک
R	ثابت گازها، $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$

- [32] Siano, Pierluigi. Demand response and smart grids - a survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30:461-478, 2014.
- [33] Vytelingum, Perukrishnen, Voice, Thomas D., Ramchurn, Sarvapali D., Rogers, Alex, and Jennings, Nicholas R. Agent-based micro-storage management for the smart grid. *Analysis*, 1(Aamas):39-46, 2010.
- [34] Akhil, Abbas A., Huff, Georgianne, Currier, Aileen B., Kaun, Benjamin C., Rastler, Dan M., Chen, Stella Bingqing, Cotter, Andrew L., Bradshaw, Dale T., and Gauntlett, William D. Doe / epr 2013 electricity storage handbook in collaboration with nreca. Report, Sandia National Laboratories, 2013.
- [35] Ibrahim, Hussein and Perron, Jean. Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés : rapport interne laboratoire de recherche en Énergie Éolienne. Report, LREE (UQAR), LIMA (UQAC), 2008.
- [36] Esa reports | energy storage association. Online.
- [37] Kema. Market evaluation for energy storage in the united states. Report, Copper Development Association, 2012.
- [38] Ibrahim, Hussein and Ilinc, Adrian. *Contribution of the Compressed Air Energy Storage in the Reduction of GHG - Case Study: Application on the Remote Area Power Supply System*, pp. 337-364. InTech, London, 2012.
- [39] Rogers, A., Henderson, A., Wang, X., and Negnevitsky, M. Compressed air energy storage: Thermodynamic and economic review. *2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition*, pp. 1-5, 2014.
- [40] Kaabi Nejadian, Abdolrazzagh. *Energy Storage Technology*. Tehran, 2013.
- [41] He, Yang, Chen, Haisheng, Xu, Yujie, and Deng, Jianqiang. Compression performance optimization considering variable charge pressure in an adiabatic compressed air energy storage system. *Energy*, 165:349-359, 2018.
- [42] Lemofoue, Sylvain. *Investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors*. Thesis, 2006.
- [43] Rufer, A. and Lemofouet, S. A hybrid energy storage system based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking (mept). *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(4):1105-1115, 2006.
- [44] Crotogino, Fritz, Mohmeyer, Klausuwe, and Scharf, Roland. Huntorf caes: More than 20 years of successful operation. *Solution Mining Research Institute (SMRI) Spring Meeting*, (April):351-357, 2001.
- [16] Zaloudek, F. R. and Reilly, R. W. An assessment of second-generation compressed-air energy-storage concepts. Report PNL-3978; Other: ON: DE82019513, U.S. Department of Energy, 1982.
- [17] McGrail, B. P., Cabe, J., Davidson, C., Knudsen, F. S., Bacon, D., Bearden, M., Chamness, M., Horner, J., Reidel, S., Schaef, T., Spane, F., and Thorne, P. Compressed air energy storage : Grid-scale technology for renewables integration in the pacific northwest. Report, Pacific Northwest National Laboratory, 2013.
- [18] Goodson, J. O. History of first us compressed air energy storage (caes) plant (110-mw-26 h) volume 1: Early caes development. Report, Electric Power Research Institute, 1992.
- [19] Ibrahim, Hussein, Belmokhtar, Karim, and Ghandour, Mazen. Investigation of usage of compressed air energy storage for power generation system improving - application in a microgrid integrating wind energy. *Energy Procedia*, 73:305-316, 2015.
- [20] Unknown. Seneca compressed air energy storage (caes) project. Report, National Energy Technology Laboratory, 2012.
- [21] Ch2Mhill. revention of significant deterioration: greenhouse gas permit application. Report, 2012.
- [22] Li, Kou. Energy storage activities at new york power authority. New York Power Authority.
- [23] Smud. Smud 2014 ten-year transmission assessment plan. Report, 2014.
- [24] Press, The Associated. Nppd to test underground air storage. *lincoln journal star* 2012. Online, 2012.
- [25] Gaelectric Energy Storage, Ltd. Report no. spire20150630 provided by gaelectric energy storage ltd to university of ulster. Report, 2015.
- [26] Jakiel, Christoph, Zunft, Stefan, and Nowi, Andreas. Adiabatic compressed air energy storage plants for efficient peak load power supply from wind energy: the european project aa-caes. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 5(3):296-306, 2007.
- [27] AG, Rheinisch Westfälisches Elektrizitätswerk. Adele-adiabatic compressed-air energy storage for electricity supply. Report, 2010.
- [28] Wang, Jidai, Lu, Kunpeng, Ma, Lan, Wang, Jihong, Dooner, Mark, Miao, Shihong, Li, Jian, and Wang, Dan. Overview of compressed air energy storage and technology development. *Energies*, 10(7):991-991, 2017.
- [29] Fong, Danielle A., Crane, Stephen E., Berlin Jr., Edwin P., Pourmousa Abkenar, Amirhossein, Mahalatkar, Kartikeya, Hou, Yongxi, and Bowers, Todd. Compressed air energy storage system utilizing two-phase flow to facilitate heat exchange, 2010.
- [30] Bollinger, B R. System and method for rapid isothermal gas expansion and compression for energy storage, 2010.
- [31] Ingersoll, Eric, Aborn, Justin, and Chomyszak, Stephen. Compressor and/or expander device, 2010.