علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره هجدهم، شماره چهار، زمستان ۹۵

تعیین استراتژی عملیاتی بهینه جهت راه‌اندازی سیستم CAES در بازار برق نوسانی-ساعتی دارای نفوذ بالای قدرت تجدیدپذیر بادی

(مطالعه موردی: شرکت برق منطقه‌ای خراسان)

مهدی قائمی اصل[1*]
m.ghaemi84@gmail.com
مصطفی سلیمی‌فر[2]
مصطفی رجبی مشهدی[3]
محمدحسین مهدوی عادلی[4]

تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۲ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۲۶

چکیده

زمینه و هدف: با ورود انرژی پایدار و تجدیدپذیر با سهم بالایی از نفوذ به سیستم تولید، سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده[5] (CAES) را می‌توان برای ایجاد یک سیستم تولید انرژی الکتریکی برخوردار از کفایت[6] و صافی[7] قابل قبول مورد استفاده قرار داد. این سیستم با ذخیره‌سازی انرژی در قیمت‌های پایین بازار برق و تولید برق در قیمت‌های بالای بازار راه‌اندازی می‌شود. شرط اساسی سودآوری سیستم هیبرید برخوردار از سیستم CAES، به‌کارگیری استراتژی مناسب برای خرید و فروش انرژی در سیستم CAES است. این مطالعه با هدف تعیین استراتژی عملیاتی بهینه جهت راه‌اندازی سیستم CAES در بازار برق نوسانی-ساعتی دارای نفوذ بالای قدرت تجدیدپذیر بادی به انجام رسیده است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش با شبیه‌سازی سیستم تولید نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان، استراتژی‌های به‌کارگیری سیستم CAES در سیستم هیبرید بادی-فسیلی مورد بررسی قرار گرفته است که در این میان، استراتژی بهینه تئوریک در واقع فراهم-

۱- استادیار گروه اقتصاد و بانکداری اسلامی، دانشکده اقتصاد، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران *(مسوول مکاتبات)
۲- استاد گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳- استایار دانشکده مهندسی برق و مهندسی پزشکی دانشگاه صنعتی سجاد و معاون راهبری شبکه برق ایران
۴- استاد گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد

5- Compressed air energy storage
6- Adequacy
7- Smooth

Archive of SID
www.SID.ir

کننده بالاترین درآمد خالص برای واحد ذخیره‌ساز است. اما از آن‌جایی که قیمت در ساعات آتی بازار ساعتی-نوسانی از پیش‌مشخص نیست، دو استراتژی کاربردی-عملیاتی پیش‌رویدادی[1] و پس‌رویدادی[2] برای راه‌اندازی واحد ذخیره‌ساز به‌کار گرفته شده‌اند.

یافته‌ها: نتایج پژوهش نشان می‌دهد که استراتژی پیش‌رویدادی کاربردی و پس‌رویدادی کاربردی، به ترتیب به طور متوسط ۹۳ درصد و ۸۹ درصد خالص درآمد استراتژی بهینه تئوریک سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده را در تمامی ظرفیت‌های شش‌گانه (۵۰ تا ۳۰۰ مگاواتی) برای واحد ذخیره‌ساز فراهم می‌کند.

بحث و نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج این پژوهش، لازم است از ذخیره‌سازی قدرت برای افزایش پایداری شبکه[3] و قابلیت اطمینان[4] تولید در سیستم‌های هیبرید با نفوذ بالای قدرت تجدیدپذیر استفاده نمود. زیرا برای شرایط احتمالی Black-Out، لازم است که واحدی به عنوان Black-Start در شبکه آماده باشد که بتواند درکمترین زمان ممکن، بار شبکه را تامین کند. استفاده از سیستم CAES می‌تواند راه‌کار بسیار مناسبی باشد که نه تنها قابلیت اطمینان تولید و پایداری شبکه در مواقع اضطراری را تضمین می‌کند، بلکه از لحاظ اقتصادی امکان‌پذیر بوده و از سود عملیاتی مناسبی نیز برخوردار است.

واژه های کلیدی: شبیه‌سازی سیستم قدرت، تولید هیبرید بادی-فسیلی، سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده، استراتژی بهینه.

Archive of SID

1- Prognostic
2- Historical
3- Grid Stability
4- Reliability

www.SID.ir

J.Env. Sci. Tech., Vol 18, No.4, winter 2017

Determination of Optimal Operation Strategy for CAES in Fluctuating-Hourly Electricity Market with High Renewable Wind Power Penetration (Case Study: Khorasan Regional Electricity Co.)

Mahdi Ghaemi Asl[1*]

m.ghaemi84@gmail.com

Mostafa Salimifar[2]

Mostafa Rajabi Mashhadi[3]

Mohammad Hossien Mahdavi Adeli[4]

Abstract

Background and Purpose: With influx of sustainable and renewable energy with high penetration into the production system, Compressed Air Energy Storage (CAES) could be used for creation of an acceptable adequate and smooth Electricity production system. CAES plants operate on electricity markets by storing energy when electricity prices are low and producing electricity when prices are high. An essential condition for the profitability of the CAES in hybrid systems is appropriate strategy for CAES operation about the sale and purchase of energy. This study aimed to determine optimal operating strategy for CAES systems fluctuating-hourly electricity market with high penetration of renewable wind power.

Method: In this study, with simulation of production system of Khorasan Regional Electricity Company power plants which among all, the theoretical optimal strategy provides the highest net income for the storage unit. But since the market price of the upcoming hourly-fluctuating market is not pre-determined, two prognostic and historical practical-operational strategies have used for Setting up compressed air energy storage system.

Findings: The results show that prognostic and historical practical-operational strategies, on average have 93% and 89% of theoretical optimal strategy s' net income, respectively, in all six simulated capacities for compressed air energy storage system.

Discussion and Counclusion: Based on the results, it is necessary to use power storage in order to increase grid stability and reliability of production in hybrid systems with high renewable power penetration; because a Black-Start must be ready in grid for Possible Black-Out situations which could provide load of grid in the least possible time. Use a CAES could be a great way that not only

1- Assistant Professor, Economics and Islamic Banking Department, Faculty of Economics, Kharazmi University, Tehran, Iran * (Corresponding Author).

2- Professor, Faculty of Economics Management & Economic Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

3- Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering, Sadjad University of technology, Mashhad, Iran.

4- Professor, Faculty of Economics, Management & Economic Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Archive of SID

www.SID.ir

guarantees reliability and stability of grid in emergencies, but also is economically feasible and have operational suitable profit.

Keywords: Simulation of Power System, Wind-Fossil Hybrid Production, Compressed Air Energy Storage System, Optimal Strategy.

Archive of SID

www.SID.ir

مقدمه

عدم قطعیت در مورد آینده یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های دنیای انرژی‌های پایان‌پذیر است. گرچه در دو قرن اخیر راه‌هایی برای استفاده بهتر و پیدانمودن منابع جدید انرژی با استعانت از فناوری پیشرفته پیدا شده است، اما همیشه پیشرفت تکنولوژی و دستیابی به ذخایری که تاکنون کشف نشده است، از لحاظ زمانی پس از دوره‌هایی بوده است که نگرانی در مورد کمبود انرژی وجود داشته است. یعنی نااطمینانی از متغیرهای اصلی بازار انرژی‌های پایان‌پذیر است (۱). از سوی دیگر استفاده از منابع تجدیدپذیر می‌تواند امنیت عرضه انرژی در بلندمدت را تامین کند، زیرا منابع تامین برق تجدیدپذیر، به صورت طبیعی و اقلیمی در اختیار بشر قرار می‌گیرند و معمولا تا افق‌های طولانی نمی‌توان تغییرات اقلیمی را برای مناطق مختلف در نظر گرفت (۲).

با این حال یکی از چالش‌های بزرگ منابع تجدیدپذیر، ماهیت غیرقابل‌پیش‌بینی این منابع است که در برخی منابع به ویژه خورشید و باد، برحسب تغییرات آب‌وهوا، توان خروجی متغیری دارند (۳). در سیستم خورشیدی، با ابری شدن هوا، خروجی منبع کاهش می‌یابد، یا در طول شب، منبع خورشیدی، هیچ برقی تولید نمی‌کند. برای منبع بادی، هیچ قانون خاصی وجود ندارد که بیان کند در یک‌لحظه خاص (مثلاً لحظه پیک‌بار)، باد با چه سرعتی می‌وزد و ژنراتور بادی چه مقدار برق می‌تواند تولید کند. درواقع سیستم‌هایی که به صورت منفرد و منحصر از یک منبع تجدیدپذیر استفاده می‌کنند (مثل سیستم‌های صرفا برخوردار از باد یا سیستم‌های صرفا برخوردار از خورشید یا هر منبع تجدیدپذیر انحصاری)، به هیچ‌وجه قادر به تامین بار پیوسته قابل‌اطمینان نیستند (۴). به‌عبارت‌دیگر در تأمین یک‌بار، حتماً در طی روز چندین بار خاموشی خواهند داشت که باعث کاهش شدید پایداری شبکه تولید می‌شود. برای رفع بخشی از مشکل نااطمینانی خروجی منابع تجدید پذیر، سه روش پیشنهادشده است که عبارت‌اند از (۱): ۱- استفاده از منابع تجدیدپذیر در ظرفیت‌های بزرگ،۲- استفاده از روش‌های ذخیره‌سازی و تجهیزات مبدل ذخیره‌ساز و ۳- استفاده از سیستم انرژی تجدیدپذیر یک‌پارچه[1] (IRES) (سیستم‌های انرژی هیبرید). در حقیقت از آن‌جایی که هزینه تولید برق و قیمت فروش آن در ساعات مختلف شبانه روز با توجه به راه افتادن بازار برق، تفاوت‌های چشم‌گیری دارد، ایده ذخیره سازی برق در ساعات غیر پیک (برق ارزان) و استفاده از آن در ساعات پیک (برق گران) در سیستم‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده مطرح شده است. بنابراین می‌توان برای مقابله با ماهیت نوسان-پذیر تولید برق تجدیدپذیر بادی، از سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده برای استارت و راه‌اندازی در حالت اضطراری استفاده نمود تا قابلیت اطمینان شبکه تولید فراهم شود و شبکه‌ای پایدار فراهم گردد.

در این میان سوال اساسی این است که کدام استراتژی جهت راه‌اندازی سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده در بازار نوسانی-ساعتیِ دارای نفوذ بالای قدرت تجدیدپذیر بادی از لحاظ عملیاتی-کاربردی، بهینه خواهد بود؟ بر این اساس در پژوهش فوق برای پاسخ به این سوال و ارایه راه‌کار کاربردی، ابتدا به ذکر مبانی نظری استراتژی‌های عملیاتی راه‌اندازی سیستم CAES پرداخته شده است و در ادامه ، ادبیات پژوهش و مدل و داده‌های پژوهش جهت شبیه‌سازی سیستم تولید قدرت در محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (به عنوان مطالعه موردی پژوهش) ارایه شده‌اند. در نهایت نتایج شبیه‌سازی و مدل پژوهش ارایه شده و بخش نهایی نیز به نتیجه‌گیری، دلالت‌های پژوهش اختصاص پیدا کرده است.

مبانی نظری

برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی لازم است که استراتژی اقتصادی-تجاری[2] به منظور بهینه‌سازی سود خالص خرید و فروش برق مدنظر قرار گیرد. بدین منظور بر مبنای نوسانات قیمتی بازار و هزینه‌های عملیاتی ذخیره‌سازی که شامل هزینه

1- Integrated Renewable Energy System
2- business-economic strategy

Archive of SID

www.SID.ir

سوخت نیز می‌شود، ظرفیت بهینه ذخیره‌سازی تعیین می‌شود[۱]. اصل اساسی برای مشخص نمودن استراتژی بهینه سودآور راه‌اندازی واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده، بالاتر بودن قیمت فروش به بازار (P_{sell}) از هزینه نهایی تولید (MC_p) است (رابطه (۱)) (۵):

$$MC_p < P_{sell} \qquad (۱)$$

هزینه نهایی تولید عبارت است از مجموع اقلام هزینه‌ای و سرمایه‌ای توربین و کمپرسور، قیمت گاز طبیعی (P_{Ngas}) و قیمت خرید انرژی الکتریکی برای کمپرسور (P_{buy}). بر این اساس رابطه هزینه نهایی تولید (MC_{prod}) را می‌توان با رابطه (۲) مشخص نمود (۵):

$$MC_{prod} = MC_{turbin} + (P_{Ngas} * \varphi_{CAES}) + \left[\frac{P_{buy} + MC_{compressor}}{\alpha_{compressor} + \mu_{turbin}}\right] \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، $\alpha_{compressor}$ کارایی کمپرسور و μ_{turbin} کارایی توربین است که خروجی انرژی الکتریکی به ازای هر واحد ورودی هر واحد انرژی ذخیره‌شده را نشان می‌دهد، φ_{CAES} نسبت سوخت ورودی به میزان انرژی الکتریکی خروجی از واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده است. هم‌چنین MC_{turbin} و $MC_{compressor}$ به ترتیب نشان‌دهنده هزینه نهایی به کارگیری توربین و کمپرسور در سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده هستند.

هدف اصلی استراتژی بهینه به کارگیری واحد ذخیره‌ساز، دستیابی به حداکثر درآمد ممکن با توجه به قیود تکنولوژیکی-اقتصادی است. الگوریتم تکرارشونده بهینه‌یابی استراتژی واحد ذخیره‌ساز را می‌توان در ۷ گام طراحی نمود (۵):

گام اول) مشخص نمودن ساعتی که بیش‌ترین قیمت انرژی الکتریکی[۲] (Max_{hour}) را در بازار لحظه‌ای-ساعتی به خود اختصاص داده است. اولویت عملکرد سیستم ذخیره‌ساز در چنین ساعتی، به کارگیری توربین است.

گام دوم) مشخص نمودن مرزهای ذخیره‌سازیِ اطراف Max_{hour}. راه‌اندازی توربین در Max_{hour} را باید با استفاده از کمپرسور جبران نمود، به نحوی که مرزهای ذخیره‌سازی در محدوده زمانی به کارگیری کمپرسور قرار نگیرند. در این گام ساعت قبل و بعد از Max_{hour} مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و در ساعات پس از Max_{hour}، ذخیره‌سازی باید پیش از خالی شدن مخزن ذخیره‌سازی، انجام شود و به طور مشابه، در ساعات پیش از Max_{hour}، مخزن ذخیره‌سازی باید تا رسیدن به حداکثر ظرفیت شارژ شود. در نتیجه در این گام، دوره زمانی مابین آخرین ساعت ذخیره‌سازی تا حداکثر ظرفیت پیش از Max_{hour} و اولین ساعت خالی شدن مخزن ذخیره‌سازی بعد از Max_{hour}، مشخص می‌شود. این محدوده زمانی، دوره‌ای است که درآن شارژ و خالی شدن مخزن ذخیره‌سازی ممکن است که به آن مرزهای ذخیره‌سازیِ اطراف Max_{hour} اطلاق می‌شود.

گام سوم) مشخص نمودن حداقل قیمت انرژی الکتریکی[۳] در مرزهای ذخیره‌سازیِ اطراف Max_{hour}. ساعتی که کم‌ترین قیمت انرژی الکتریکی را در محدوده مرزهای ذخیره‌سازیِ اطراف Max_{hour} به خود اختصاص داده است، نشان دهنده دوره زمانی بهینه برای راه‌اندازی کمپرسور است.

گام چهارم) محاسبه هزینه نهایی تولید[۴] (MC_{prod}) بر اساس حداقل قیمت خرید (P_{buy}) مشخص شده در گام سوم. هزینه نهایی تولید بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود. اگر حداکثر قیمت مشخص شده در گام اول بالاتر از هزینه نهایی تولید (MC_{prod}) باشد، بر اساس برنامه‌ریزی آنالیزی[۵] واحد ذخیره‌سازی هوای فشرده، مرحله پنجم الگوریتم بهینه‌یابی به جریان خواهد افتاد.

۱- در واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده، کمپرسور (Compressor) مبدل انرژی الکتریکی به انرژی پتانسیل است و توربین (Turbine) وظیفه تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی الکتریکی را بر عهده دارد.

2- Maximum Electricity Price

3- Minimum Electricity Price

4- Marginal Production Cost

5- Analytical programming

Archive of SID

www.SID.ir

گام پنجم) تعیین تنگناهای عملیاتی[1] در محدوده حداقل و حداکثر قیمت. اگر این فرض محتمل در نظر گرفته شود که یک ساعت راه‌اندازی کمپرسور را بتوان دقیقا با به کارگیری یک ساعته توربین در سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده جبران نمود، آن‌گاه در محدوده حداقل و حداکثر قیمت، هیچ تنگنای عملیاتی وجود نخواهد داشت. در غیر این صورت توربین و کمپرسور ممکن است به نحوی عمل کنند که تنگناهایی برای سیستم هوای فشرده ایجاد شود که می‌توان دلیل ایجاد این تنگناها را در این موارد چهارگانه خلاصه نمود: الف) ظرفیت قابل بهره‌برداری توربین در ساعت برخوردار از بالاترین قیمت، ب) ظرفیت قابل بهره‌برداری کمپرسور در ساعت برخوردار از پایین‌ترین قیمت، ج) حداقل گنجایش آزاد ذخیره‌سازی در شرایطی که به دلایل تکنولوژیکی-اقتصادی، راه‌اندازی کمپرسور پیش از به کارگیری توربین در شبکه برنامه‌ریزی شود و د) حداقل گنجایش ذخیره‌سازی در شرایطی که راه-اندازی کمپرسور بتواند جوابگوی به کارگیری توربین در سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده باشد.

گام ششم) راه‌اندازی توربین[2] در ساعت حداکثر قیمت و بکارگیری کمپرسور[3] در ساعت حداقل قیمت با قید ظرفیت مشخص‌شده در گام پنجم و به روزرسانی گنجایش ذخیره-سازی[4] به صورت لحظه‌ای-ساعتی. در شرایطی که توربین یا کمپرسور به حداکثر ظرفیت خود رسیدند، عملیات به روزرسانی متوقف خواهد شد.

گام هفتم) اجرای دوره گام اول برای بررسی تمام ساعات ممکن برای برنامه‌ریزی آنالیزی سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده. برای مشخص کردن دوره‌های زمانی-ساعتی که باید از جهت نوسانات قیمتی مورد بررسی قرار گیرند، می‌توان استراتژی‌های چهارگانه زیر را در نظر گرفت:

۷- الف: استراتژی پس‌رویدادی کاربردی[5]: در این استراتژی تصمیمات خرید و فروش برق بر اساس برخورداری از دانش کامل در مورد قیمت متوسط در طول یک دوره مشخص زمانی و نیز دوره‌های آتی آن اتخاذ می‌شود. برای مثال اگر در استراتژی پس‌رویدادی کاربردی، متوسط دوره زمانی[6] ۲۵ قرار داده شود، در برنامه‌ریزی آنالیزی راه‌اندازی سیستم ذخیره‌ساز از داده های ۱۲ ساعت اولیه ($t-12$ تا $t-1$) به صورت پس‌رویدادی و برای شبیه‌سازی استفاده می‌گردد، ساعت جاری (t) به عنوان مبدا مقایسه و ۱۲ ساعت پس از دوره جاری ($t+1$ تا $t+12$) به عنوان دوره آتی در نظر گرفته می‌شود.

۷- ب: استراتژی پیش‌رویدادی کاربردی[7]: در این استراتژی تصمیمات خرید و فروش برق بر اساس پیش‌بینی قیمت متوسط در طول دوره‌های آتی اتخاذ می‌شود و در چنین شرایطی باید الگوی پیش‌بینی مناسبی برای قیمت‌های آتی در نظر گرفته شود. این الگو براساس مفهوم پیشنهادات قیمتی به بازار بر پایه قیمت متوسط در دوره‌های آتی طراحی می‌شود و این پیشنهادت به عنوان جایگزین اطلاعاتی دوره آتی عمل خواهند کرد.

۷-ج: استراتژی بهینه[8]: این استراتژی نوعی از استراتژی پس-رویدادی کاربردی است که بر اساس آن داده‌های کل دوره یک‌ساله به صورت یک سری ۸۷۸۴ داده‌ای در اختیار کاربر قرار دارد و می‌توان برنامه‌ریزی آنالیزی را به صورت قطعی انجام داد.

۷-د: استراتژی بهینه ۲۴ ساعته[9]: این استراتژی نوعی از استراتژی پس‌رویدادی کاربردی است که بر اساس آن داده‌های دوره ۲۴ ساعته آتی به صورت سری‌زمانی در اختیار کاربر قرار دارد.

۷- ه: استراتژی کاربرمحور[10]: در این استراتژی همانند استراتژی پس‌رویدادی کاربردی عمل می‌شود، با این تفاوت که

1- Operation Bottlenecks
2- Turbine Operation
3- Compressor Operation
4- Update The Storage Content
5- Practical historical strategy
6- Average Period
7- Practical prognostic strategy
8- Optimal Strategy
9- Optimal Strategy 24 Hours
10- User-defined Strategy

Archive of SID

www.SID.ir

تعیین دوره‌های پیش و پس از دوره جاری، به صورت اختیاری و از سوی برنامه‌ریز آنالیزی انجام خواهد شد.

ادبیات پژوهش

به دلیل وجود مطالعات متعددی که در زمینه سیستم‌های هیبرید فسیلی-تجدیدپذیر انجام شده است، در این بخش به ترتیب به ۴ و ۶ مورد از جدیدترین و مهم‌ترین مطالعات داخلی و خارجی اشاره شده است:

ادریسیان و همکاران الگوی جدیدی برای هیبرید هوای فشرده در مزارع بادی ارایه کرده‌اند. در این مقاله ضمن پرداختن به چالش‌های موجود در تولیدات مزارع بادی و مدیریت مصرف شبکه با معرفی اجمالی روش ذخیره سازی هوای فشرده یک سیستم هیبرید بر مبنای ذخیره سازی هوای فشرده برای تفکیک زمانی تولید و مصرف مزارع بادی ارایه شده است (۶).

هادی و حقیقی خوشخو با طراحی مفهومی سیستم ذخیره-سازی انرژی هوای فشرده در مقیاس کوچک (Micro CAES) به همراه توربین بادی آن را برای تامین برق یک واحد مسکونی در منطقه روستای کهک مورد استفاده قرار داده و نتایج مربوط به تولید و جریان شارژ را محاسبه نموده‌اند (۷).

مـرادی و هنرمند استفاده از نیروگاه‌هـــای بادی به همراه سیستم های ذخیره ساز انرژی و بحث اقتصادی تولید موثر در ساعات پیک را به طور ویژه مورد تاکید قرار داده اند و در ادامه روش فشرده سازی هوا در کنار نیروگاه بادی را به عنوان یکی از موضوعات جدید و پراهمیت بوده بررسی کرده‌اند. در نهایت نیز ضمن مقایسه روش‌های ذخیره‌سازی، به بررسی این روش-ها به منظور استفاده در زمان پیک پرداخته‌اند (۸)

ارشادی عباس‌آباد و همکاران سیستم هیبریدی باد- دیسل-ذخیره هوای فشرده را بر مبنای الگوریتم ژنتیک بهینه نموده-اند. به منظور بهینه سازی عملکرد سیستم و کاهش هزینه های مصرفی، راه های فنی قابل دسترس سوپرشارژ کردن موتور دیزل در سیستم باد - دیزل با نفوذ بالا به همراه استفاده از سیستم ذخیره سازی انرژی هوای فشرده (WDCAS) مورد مطالعه قرار گرفته است که نتایج حاصل از بهینه سازی نشان می دهد که استفاده از سیستم هوای فشرده کاهش مصرف سوخت را تا ۵۰ درصد در پی دارد (۹).

سلیک[1] و سلیک روشی برای بهینه‌سازی اقتصادی- فنی سیستم خورشیدی- بادی ارایه کرده‌اند و هم‌چنین این سیستم را با سیستم خورشیدی انفرادی و سیستم بادی انفرادی مقایسه نموده‌اند. سلیک در سال ۲۰۰۳ با استفاده از داده‌های ماهانه تابش خورشید و سرعت باد، در سیستم‌هایبرید خورشید- باد- باتری سطح چرخش بهینه توربین باد و سطح بهینه سلول خورشیدی را با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی و قابلیت‌اطمینانی تعیین نموده است (۱۰ و۱۱).

کوترولیس[2] روشی برای بهینه‌سازی ظرفیت ارایه کرده است که تعداد و نوع واحدها در سیستم هیبرید خورشید- باد-باتری را تعیین می‌کند تا هزینه‌ی کل سیستم در طول مدت بیست سال حداقل شود و هم‌چنین انرژی موردنیاز بار به‌طور کامل تأمین گردد و به‌عبارت‌دیگر هیچ‌گونه قطع باری در شبکه وجود نداشته باشد (۱۲).

اکرن و اکرن[3] یک روش بهینه‌سازی ظرفیت برای سیستم هیبرید مستقل باد-خورشید- باتری ارایه کرده و هزینه فعلی خالص[4] (NPV) سیستم هیبرید مستقل بهینه‌شده را با هزینه حال حاضر توسعه شبکه برق برای مورد خاصی مقایسه نموده و به این نتیجه رسیده‌اند که برای مکانی در فاصله بیش‌تر از ۸/۴ کیلومتر از شبکه قدرت، سیستم انرژی هیبرید نسبت به توسعه شبکه برق به‌صرفه‌تر خواهد بود (۱۳).

کاناسه‌پتیل و همکاران با مـدلی بهینه از اجتماع منابع تجدید پذیر[5] (IREOM)، انرژی موردنیاز برای پخت‌وپز و انرژی الکتریسیته تعدادی از روستاهای دورافتاده در هند را شبیه‌سازی کرده است. در این مدل بهینه، اندازه منـابع در دستـــرس در آن منطقـــه (مثـل نیـروگاه آبـــی کوچک[6] (MHP)، سیستـــم زیست‌تـــوده[7]، سیستم

1- Celik
2- Koutroulis
3- Ekren and Ekren
4- Net Present Cost
5- Integrated Renewable Energy System
6- Micro Hydro Power
7- Biomass

Archive of SID

www.SID.ir

بیوگاز[1]، سیستم بادی و سیستم خورشیدی) به‌گونه‌ای تعیین می‌شود تا یک ترکیب بهینه برای منطقه موردمطالعه به دست آید. در این ترکیب بهینه، هزینه انرژی تولیدی در یک مقدار قابلیت‌اطمینان معلوم، برای هر چهار پروفایل بار فصلی کمینه شده است (۳).

تاسیکاراوغلو و همکاران[2] روش بهینه‌سازی ظرفیت سیستم انرژی هیبرید توربین بادی-سلول سوختی[3] (FC)-باتری را مورد بررسی قرار داده‌اند که هدف اصلی آن بهینه کردن هیدروژن استفاده‌شده در سیستم است و درعین‌حال تضمین این‌که بار به‌طور کامل تأمین می‌شود. هم‌چنین این پژوهش برای بهینه کردن هیدروژن استفاده‌شده، یک کنترل‌گر تخمین قدرت باد ارایه داده است که متناسب با قدرت تولیدی باد و بار موردنیاز، توان تولیدی سلول سوختی را تعیین می‌کند (۱۴).

در پژوهش تاکاگی و همکاران[4]، سیستم خورشیدی که از باتری‌های خودروهای الکتریکی برای ذخیره انرژی تولیدی اضافه منبع خورشیدی استفاده می‌کند، از نظر اقتصادی بررسی شده و مقدار باتری خودروهای الکتریکی و اینورتر موردنیاز در صورت داشتن یک منبع خورشیدی محاسبه نموده و عدم قطعیت خودروهای الکتریکی نیز مدل‌سازی شده است (۱۵).

عباس‌پور و همکاران[5]، در پژوهش خود عملکرد توربین‌های گازی متعارف را با حالت ترکیب این نیروگاه‌ها با توربین‌های بادی و سیستم هوای فشرده، مقایسه نموده‌اند و بدین منظور از روش برنامه‌ریزی MINLP برای بهینه‌یابی مساله ورود تعدیل تکنولوژی بادی و واحد CAES استفاده نموده‌اند. پس از در نظر گرفتن قیود فنی و اقتصادی ترکیب این سه‌گانه تولید قدرت هیبرید، توابع هدف حداکثرسازی سود و حداقل-سازی هزینه، در مورد مساله پژوهش مدل‌سازی شده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که چنان‌چه هزینه‌های سرمایه-گذاری را در نظر نگیریم، استفاده از سیستم CAES می‌تواند ۴۳ درصد سود عملیاتی را افزایش دهد و در مقابل ۶/۷ درصد، هزینه‌ها را کاهش دهد (۱۶).

مواد و روش‌ها

به دلیل ماهیت کاربردی و عملیاتی استراتژی بهینه، باید شبیه‌سازی در مورد منطقه‌ای انجام شود که نفوذ قدرت بادی در آن قابل‌توجه باشد. خراسان بزرگ از لحاظ موقعیت خاص جغرافیایی، دارای پتانسیل خوبی برای نصب توربین‌های بادی است. بر اساس مطالعات و پتانسیل‌سنجی ماهواره‌ای انجام گرفته در شرکت برق منطقه‌ای خراسان، خراسان بزرگ دارای ۱۴ میلیون هکتار زمین با شدت وزش مناسب باد است و با فرض تخصیص ۲۰ هکتار زمین برای هر مگاوات توربین و با حفظ حریم توربین‌ها، این منطقه پتانسیل نصب ۷ هزار مگاوات توربین بادی را داراست (۱۷ و ۱۸).

لازم به ذکر است که منطقه خواف در خراسان بزرگ با قرارگیری در مسیر بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، یکی از مناطق کشور است که از شدت وزش بالای باد برخوردار می‌باشد. متوسط شدت وزش باد در این منطقه حدود ۹ متر بر ثانیه است. در این سرعت بیش‌تر توربین‌های بادی دارای بازدهی بیش از ۸۰ درصد خواهند بود. نیروگاه ۱۰۰ مگاواتی خواف که در بهار سال ۱۳۹۱ عملیات اجرایی آن آغاز شده است، اولین واحد نیروگاهی در این منطقه می‌باشد. در کنار هدف اصلی این پروژه که افزایش بهره‌گیری از انرژی‌های نو در سبد برق کشور است، انتقال تکنولوژی ساخت قطعات نیز از اهداف این سرمایه‌گذاری محسوب می‌شود. ظرفیت هر توربین بادی ۱/۵ مگاوات است. میزان مصرف برق خواف در سال ۱۳۹۱ حدود ۲۱۴ هزار مگاوات ساعت بوده است. با فرض ضریب بهره-برداری ۲۰ درصدی برای توربین‌های بادی می‌توان گفت نصب ۱۰۰ مگاوات توربین در خواف، این منطقه را از برق فسیلی بی‌نیاز خواهد کرد (۱۷).

علاوه بر پروژه‌هایی که هم‌اکنون در مرحله احداث است، تعداد قابل توجهی پروژه در منطقه خراسان وجود دارد که مجوز احداث آن توسط مراجع ذی‌صلاح صادر شده است. بخش عمده این پروژه‌ها در مناطق بادخیر منطقه، مانند خواف،

1- Biogas
2- Tascikaraoglu et al.
3- Fuel Cell
4- Takagi et al.
5- Abbaspour et al.

Archive of SID

www.SID.ir

بینالود و فریمان تعریف شده است. در منطقه خراسان بزرگ، برای ۲۴۸۰ مگاوات توربین بادی، مجوز نصب صادر شده است. این میزان ظرفیت حدود ۵۰ درصد ظرفیت تولید برق خراسان در حال حاضر است. جدول زیر مجوزهای صادرشده برای نصب توربین‌های بادی را در منطقه نشان می‌دهد. برای برخی از این پروژه‌ها نیز زمین موردنیاز از سوی سازمان منابع طبیعی تخصیص یافته است (۱۷). در جدول (۱) فهرست این پروژه‌ها، محل احداث و ظرفیت آن‌ها مشخص شده است.

جدول ۱- پروژه‌های دارای مجوز نصب توربین بادی در منطقه خراسان بزرگ

Table 1 - Licensed wind turbine installation projects in the great Khorasan

ردیف	شرکت	محل احداث	ظرفیت (مگاوات)
۱	متاتک	دیزباد	۱۰
۲	رویان	بینالود	۱۰۰
۳	فجر سدید	نهبندان	۱۰
۴	تیزباد نیرو	خواف	۱۰۰
۵	نیروگاه‌های زنجیره‌ای قائم	بینالود	۱۰۰
۶	توان باد (صبانیرو)	خواف	۱۰۰
۷	سازمان توسعه برق ایران	دیزباد بینالود	۵۰۰
۸	بهین ارتباط مهر	خواف	۳۰۰
۹	کنکاش نگاه نوین	بینالود و خواف	۲۰۰
۱۰	سرمایه‌گذاری نیرو	داشلی قلعه غلامان	۱۰
۱۱	سرو نیرو	خواف	۱۰۰
۱۲	نیبا (وابسته به وزارت دفاع)	خواف	۵۰۰
۱۳	مپنا	بینالود	۱۰۰
۱۴	مپنا	فریمان	۱۵۰
۱۵	مپنا	خواف	۱۰۰
۱۶	فراب	بینالود	۱۰۰

منبع: (۱۷)

در این پژوهش به منظور انجام یک مطالعه عملیاتی و کاربردی، دو ظرفیت ۲۴۸۰ مگاواتی و ۷۰۰۰ مگاواتی تولید برق بادی که به ترتیب ظرفیت خطوط دارای مجوز نصب و حداکثر پتانسیل بادی منطقه خراسان بزرگ هستند، در سیستم تولید پایه (شرایط جاری تولید نیروگاهی) شبیه‌سازی می‌شوند. برای شبیه‌سازی سیستم تولید از روش برنامه‌ریزی آنالیزی[1] با رویکرد رویکرد توأم توصیفی-تجویزی[2] استفاده شده است. برنامه‌ریزی آنالیزی یکی از روش‌های نوین بهینه‌یابی عددی است که مبانی آن اولین بار توسط زلینکا[3] ارایه شد (۱۹-۲۱). در برنامه‌ریزی آنالیزی، مجموعه‌ای از توابع، عمل‌گرها و بسترها تعریف می‌شوند و امکان تغییرپذیری یا ثابت بودن در طول زمان برای تمامی متغیرها وجود دارد. می‌توان با استفاده از توابع، عمل-

1- Analytical programming

2- Descriptive-Prescriptive

3- Zelinka

Archive of SID

www.SID.ir

گرها و بستارهای موجود، برنامه‌ریزی آنالیزی را تحت یک مجموعه از مسایل تعریف نمود که پژوهش‌گر به دنبال یافتن راه‌حلی مناسب برای این مسایل است. به دلیل ماهیت تغیرپذیرِ مجموعه مسایل، از اصطلاح مجموعه تابعیِ عمومی[۱] (GFS) برای نام‌گذاری آن استفاده می‌شود. در برنامه‌ریزی آنالیزی پاسخ‌هایی مناسب شناخته خواهند شد که نگاشت[۲] اعضای مجموعه تابعی به مجموعه‌ای از برنامه‌های احتمالی و عملیاتی باشند. به علاوه در مجموعه تابعی عمومی، زیرمجموعه‌هایی حضور دارند که هر یک دربردارنده تعدادی تابع هستند. تعداد توابع موجود در هر زیر مجموعه نیز، کوچک‌تر یا مساوی تعداد اجزای زیرمجموعه است. به دست آوردن نگاشت اعضای مجموعه تابعی از یک فرآیندی دو بخشی تبعیت می‌کند: بخش اول ارزیابی مجموعه گسسته[۳] (DSH) و بخش دوم طراحی فرآیندهای تضمین‌کننده است. فرآیند ارزیابی مجموعه گسسته توسط زلینکا و همکاران در ایجاد یک شاخص گسسته مورد استفاده قرار گرفت که در یک فرآیند تکاملی همانند ارزیابی افراد جایگزین در ساختار لانه‌ای[۴] به خوبی می‌تواند راه‌حل مناسب را ارایه کند. از این رو می‌توان برنامه‌ریزی آنالیزی را در مورد مسایل دقیقِ ریاضی، شبیه‌سازی‌های سیستمی و برنامه‌ریزی‌های انرژی بخشی مورد استفاده قرار داد (۲۱). اتکای اصلی برنامه‌ریزی آنالیزی این پژوهش بر رویکرد داده-ستاده در مدل‌سازی پایین- بالای سیستم تولید هیبرید قرار دارد که ماژول‌های شبیه‌سازی سیستم‌های هیبرید انرژی بر اساس مدل‌های پیشرفته[۵] EnergyPLAN نسخه ۱۱/۴ و energyPRO نسخه ۶/۳، طراحی شده‌اند[۶]. به علاوه از آن-جایی که امکان ایجاد یک تبادل منبع باز در مدل‌های رایج وجود دارد، ارتباط و تبادل نرم‌افزاری و خروجی‌های مدل‌های فوق با استفاده از بستر نرم‌افزاری اوسیموسیس[۷] (OSEMOSYS) انجام شده است.

داده‌های توان، تولید، تقاضا و هزینه نیروگاه‌های فسیلی و تجدیدپذیر محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان بر اساس اطلاعات و آمار سال پایه ۱۳۹۱ در سیستم شبیه‌سازی وارد شده‌اند. داده‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی سیستم در سناریوی اولیه سال پایه، در جداول (۲ تا ۵) گزارش شده‌اند. برای محاسبه قیمت تمام‌شده تولید - که بر اساس مجموع هزینه نهایی تولید در لحظه t محاسبه می‌شود - از روش هزینه‌های هم‌ترازسازی شده تولید استفاده شده است. اقلام هزینه‌ای تولید شامل هزینه‌های عملیاتی (متغیر و ثابت) و هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌باشند. مراجع کسب اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی سیستم، دفتر بودجه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، دفتر بازار برق، دفتر فنی نظارت بر تولیدِ معاونت بهره‌برداری شرکت برق منطقه‌ای خراسان، دفتر اطلاعات و آمار شرکت برق منطقه‌ای خراسان، شرکت مدیریت تولید نیروی برق خراسان (نیروگاه‌ها) و دفتر پشتیبانی فنی و برنامه ریزی تولید شرکت توانیر هستند[۸].

1- General Functional Set
2- Mapping
3- Discrete Set Handling
4- Nested structure

۵- نسخه جدید از مدل EnergyPLAN در تاریخ ۲۴ می سال ۲۰۱۴ منتشر و در دسترس کاربران قرار گرفته است.

۶- مدل‌های پیشرفته EnergyPLAN و energyPRO با همکاری گروه تحقیقاتی برنامه‌ریزی انرژی پایدار دانشگاه آلبورگ و گروه *PlanEnergi* دانشگاه بیرمنگام طراحی شده‌اند.

7- OSEMOSYS: the Open Source Energy Modeling System

۸- بر نویسندگان پژوهش لازم است که کمال تشکر و قدردانی خود را از همکاری و مساعدت تمامی کارشناسان و مدیران صنعت برق و شرکت برق منطقه‌ای خراسان که کوچک ترین گامی در جهت بهبود کیفی و تسهیل فرآیند تدوین این پژوهش برداشته‌اند، به عمل آورند.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲- ویژگی‌های فنی-اقتصادی نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش اول)

Table 2 - Technical-economic characteristics of Khorasan Regional Electricity Company power plants (Part I)

نام نیروگاه / شرح	توس	مشهد	شریعتی	سیکل شیروان	سیکل کاوه
قدرت اسمی - مگاوات	۶۰۰	۳۲۵	۴۹۶	۹۵۴	۶۳۶
متوسط قدرت عملی- مگاوات	۶۰۰	۳۰۰	۴۲۰	۸۰۲	۵۰۳
تولید ناخالص - مگاوات ساعت	۳۹۹۲۹۰۶	۱۳۴۴۵۷۹	۲۱۸۴۷۴۷	۲۷۴۷۵۵۷	۲۴۹۵۶۱۳
درصد از کل تولید - درصد	۱۸/۸	۶/۳	۱۰/۳	۱۲/۹	۱۱/۷
مصرف داخلی - مگاوات ساعت	۲۹۰۱۰۷	۷۹۱۳۸	۳۷۷۲۷	۲۵۴۴۴	۲۴۸۶۰
تولید خالص - مگاوات ساعت	۳۷۰۲۷۹۹	۱۲۶۵۴۴۱	۲۱۴۷۰۲۰	۲۷۲۲۱۱۳	۲۴۷۰۷۵۳
حداکثر بار تولیدی - مگاوات	۵۷۴	۱۹۶	۴۱۳	۸۶۴	۵۵۱
ضریب بار - درصد	۷۹/۴	۷۸/۳	۶۰/۴	۶۳/۳	۵۱/۷
ضریب بهره برداری - درصد	۷۶	۵۲/۲	۵۹/۴	۳۹/۱	۵۶/۶
سوخت گاز - هزار متر مکعب	۳۵۶۱۶۶	۴۸۲۵۲۲	۴۴۶۶۲۳	۸۳۱۷۹۶	۷۳۳۲۹۳
سوخت مازوت - هزار لیتر	۷۲۲۱۹۷	۰	۰	۰	۰
سوخت گازوییل - هزار لیتر	۳۲۲	۱۳۸۱	۶۶۰۷۸	۷۹۴۹۷	۷۸۵۶۶
راندمان - درصد	۳۶/۴	۲۹/۵	۴۴/۹	۳۱/۹	۳۲/۵

جدول ۳- ویژگی‌های فنی-اقتصادی نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش دوم)

Table 3 - Technical-economic characteristics of Khorasan Regional Electricity Company power plants (Part II)

نام نیروگاه / شرح	قاین	نیشابور	فردوسی	بادی	جمع منطقه
قدرت اسمی - مگاوات	۷۵	۱۰۳۸	۹۵۴	۲۸	۵۱۰۶
متوسط قدرت عملی- مگاوات	۵۶	۸۷۵	۷۹۲	۸	۴۳۵۶
تولید ناخالص - مگاوات ساعت	۲۵۵۲۸	۵۹۴۵۷۷۳	۲۵۱۱۸۰۰	۴۶۷۹۴	۲۱۲۹۵۲۹۷
درصد از کل تولید - درصد	۰/۱	۲۷/۹	۱۱/۸	۰/۲	۱۰۰
مصرف داخلی - مگاوات ساعت	۱۰۲۶	۱۲۳۲۰۱	۱۲۰۶۹	۶۰	۵۹۳۶۳۲
تولید خالص - مگاوات ساعت	۲۴۵۰۲	۵۸۲۲۵۷۲	۲۴۹۹۷۳۱	۴۶۷۳۴	۲۰۷۰۱۶۶۵
حداکثر بار تولیدی - مگاوات	۵۹	۸۸۷	۸۱۹	۲۸	۴۳۹۱
ضریب بار - درصد	۴/۹	۷۶/۵	۳۵	۱۸/۸	۶۲/۷
ضریب بهره برداری - درصد	۵/۲	۷۷/۶	۳۶/۲	۶۶/۸	-
سوخت گاز - هزار متر مکعب	۷۱۳۵	۱۱۴۵۷۱۷	۷۶۱۲۵۳	۰	۴۷۶۴۵۰۵
سوخت مازوت - هزار لیتر	۰	۰	۰	۰	۷۲۲۱۹۷
سوخت گازوییل - هزار لیتر	۳۶۵۳	۱۸۴۰۱۱	۸۶۵۷۴	۰	۵۰۰۰۸۲
راندمان - درصد	۲۴/۶	۴۷/۱	۳۱/۳	-	۳۷/۱

www.SID.ir

جدول ۴- داده‌های هزینه تولید نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش اول)

Table 4 - Khorasan Regional Electricity Company power plant production cost data (Part I)

نیروگاه	حقوق و دستمزد و سایر (میلیون ریال)	مواد و مصالح شیمی (میلیون ریال)	مواد و مصالح غیر شیمی ارزی (میلیون ریال)	مواد و مصالح غیر شیمی ریالی (میلیون ریال)
نیروگاه (۱)*	۲۰۴۱۰۴	۶۸۱۸	۸۰۱۹	۳۶۶۵
نیروگاه (۲)	۱۳۲۹۸۳	۳۰۳۶	۳۱۵۶	۲۲۵۵
نیروگاه (۳)	۱۰۳۲۴۵	۱۸۷۷	۴۷۳۷	۸۲۸
نیروگاه (۴)	۲۷۴۱۳	۰	۸۶۶۵	۸۶۰
نیروگاه (۵)	۲۴۸۹۹	۰	۷۸۷۱	۶۹۰
نیروگاه (۶)	۱۸۵۷۵	۰	۶۳۱	۴۲۲۶
نیروگاه (۷)	۸۶۳۲۷	۴۰۹۵	۱۰۴۲۵	۳۰۵۸
نیروگاه (۸)	۲۵۰۶۰	۰	۸۴۲۲	۷۱۲
نیروگاه (۹)	۱۴۰۴۸	۰	۱۱۵۶	۳۲۴۶

* به جهت حفظ امانت در گزارش‌دهی اطلاعات طبقه‌بندی‌شده نیروگاه‌های خصوصی و دولتی، نام نیروگاه‌ها ذکر نشده است.

جدول ۵- داده‌های هزینه تولید نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان (بخش دوم)

Table 5 - Khorasan Regional Electricity Company power plant production cost data (Part II)

نیروگاه	کنترل فرکانس (میلیون ریال)	کنترل مگاوار (میلیون ریال)	تعمیرات اساسی (میلیون ریال)	بهینه سازی/ استهلاک (میلیون ریال)
نیروگاه (۱)*	۲۶۶۳	۱۸۶۴	۳۸۵۰۰	۳۰۰۰۰
نیروگاه (۲)	۷۷۸	۵۴۴	۹۰۶۹۶	۳۴۹۲۸
نیروگاه (۳)	۱۵۷۰	۱۰۹۹	۴۲۵۰۰	۱۲۲۰۰
نیروگاه (۴)	۱۵۳۳	۱۰۷۳	۱۵۱۲۵	۱۸۴۷
نیروگاه (۵)	۱۳۹۳	۹۷۵	۲۴,۰۰۰	۱۰۰۰
نیروگاه (۶)	۱۰۹	۷۶	۵۵۰۰	۲۱۰۰
نیروگاه (۷)	۴۰۵۸	۲۸۴۰	۱۰۰۷۰۰	۱۶۵۰۰
نیروگاه (۸)	۱۴۰۲	۱۰۲۱	۲۱۵۰۰	۹۰۰۰
نیروگاه (۹)	۱۹۹	۱۳۹	۴۱۰۰۰	۵۰۰۰

* به جهت حفظ امانت در گزارش‌دهی اطلاعات طبقه‌بندی‌شده نیروگاه‌های خصوصی و دولتی، نام نیروگاه‌ها ذکر نشده است.

مجموع ولتاژ نامی پست‌های انتقال شرکت‌های برق منطقه‌ای مجاور (سمنان، سیستان، یزد و مازندران) و خطوط انتقال بین-المللی سرخس-شاتلیق و تربت جام-هرات، ۱۹۶۲ کیلوولت است که ظرفیت ترانسی معادل ۲۵۲۵۵۵ مگاولت آمپر را در اختیار پست‌های انتقال قرار می‌دهد. علاوه بر قیود خطوط انتقال، یکی از قیود اصلی در سیستم‌های هیبرید تجدیذیر و تجدیدناپذیر تولید قدرت، تامین قابلیت اطمینان سیستم تولید است که بر اساس آن، باید درصد معینی از تولید کل انرژی

Archive of SID

www.SID.ir

الکتریکی شبکه از واحدهای تولیدی پایدارساز شبکه تامین گردد که در اکثر مطالعات ۳۰ درصد تعیین شده است. نیروگاه-های فسیلی (گازی، بخاری و سیکل ترکیبی) در کنار نیروگاه-های زمین‌گرمایی و هسته‌ای از جمله تکنولوژی‌های تولیدی هستند که توانایی پایدارسازی شبکه را دارند (۵). از این رو در پژوهش حاضر نیز حداقل سهم واحدهای تولیدی پایدارساز در شبکه تولید، ۳۰ درصد تعیین شده است.

بر اساس دسترسی به داده‌های معتبر، سال ۲۰۱۲ نیز به عنوان سال پایه شبیه‌سازی داده‌های ورودی هزینه تولید در نظر گرفته شده است. هزینه تاسیس یک واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده با تکنولوژی سال ۲۰۱۰ و بر اساس ارقام پیشنهادی لابراتوار ملی انرژی تجدیدپذیر[1] و آژانس انرژی دانمارک[2]، برای بازار آسیا-اقیانوسیه برای دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۵ محاسبه شده است (۲۳ و ۲۴). بر همین اساس عمر مفید واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده نیز ۳۰ سال در نظر گرفته شده است. برای پوشش خطر تغییرات قیمتی نیز ارقام قرار گرفته در گروه قیمتی بالا در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نرخ تسعیر دلار و یورو بر اساس آمار بازار مبادلات رسمی منتشر شده در خلاصه تحولات اقتصادی کشور، به ترتیب ۲۴۷۵۲ و ۳۲۴۳۶ ریال است. داده‌های هزینه‌ای تاسیس واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده در جدول ۶ ارایه شده است (۲۵).

جدول ۶- هزینه تاسیس واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده

Table 6 - The establishment cost of CAES

ردیف	اقلام هزینه‌ای	رقم هزینه (ریال)	واحد انرژی/توان
۱	هزینه سرمایه‌گذاری	۲۲۲۷۶۸۰۰	کیلووات
۲	هزینه متغیر عملیات و نگه‌داشت	۳۸۳۶۵/۶	کیلووات ساعت
۳	هزینه ثابت عملیات و نگه‌داشت	۲۸۷۱۲۳/۲	کیلووات-سال

منبع: ۲۲،۲۳ و محاسبات تحقیق.

1- National Renewable Energy Laboratory
2- Danish Energy Agency

بر اساس اطلاعات دفتر بودجه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، هزینه سوخت گاز طبیعی برای نیروگاه‌های محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان، ۷۰۰ ریال در هر مترمکعب در نظر گرفته شده است که این سوخت با نرخ تضمین شده در اختیار نیروگاه‌های گازی نیز قرار گرفته است. نرخ تنزیل سالانه سرمایه نیز بر اساس مطالعه طاهری فرد و شهاب و مطالعه رستمی و همکاران در مورد پروژه‌های نیروگاهی وزارت نیرو و نیز بر اساس مطالعات امکان‌سنجی دفتر بودجه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، به طور میانگین، ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است (۲۶ و ۲۷). از طرفی در مورد هزینه تولید برق تجدیدپذیر بادی نیز از اطلاعات دفتر بودجه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان استفاده شده است که بر اساس جداول آماری این دفتر، هزینه سرمایه‌گذاری برق بادی در هر کیلووات توان ۳۹/۷۵ میلیون ریال و هزینه ثابت و متغیر عملیات و نگه‌داشت برق بادی در هر مگاوات ساعت ۱۵۶۸۹۷ ریال محاسبه شده است. لازم به ذکر است که این آمار بر اساس تجهیزات قابل دسترسی برای شرکت برق منطقه‌ای خراسان و متناسب با شرایط اقلیمی-تجاری شرکت برق منطقه‌ای خراسان محاسبه شده است و آمار بین‌المللی یا ملی (در سایر مناطق کشور) می‌تواند تفاوت‌هایی با این آمار داشته باشد.

میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی در سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده ۵۶/۹ کیلوگرم در هر گیگاژول و مالیات انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی نیز ۴۹۳۰۲۷/۲ ریال در هر تن محاسبه شده است. ارقام مربوط به میزان انتشار آلاینده و مالیات بر انتشار از آژانس انرژی دانمارک[3] استخراج شده است (۲۸). در این پژوهش برای شاخص‌گذاری تغییرات انتشار آلاینده زیست‌محیطی، از آلاینده کربن‌دی اکسید (CO_2) استفاده شده است.

ویژگی‌های تکنولوژیکی بر اساس مطالعات فنی آژانس انرژی دانمارک[4] و مطالعه سوکار و ویلیامز[5] محاسبه شده‌اند (۲۳ و۲۸)

3- Danish Energy Agency (2011)
4- Danish Energy Agency (2012)
5- Succar and Williams

Archive of SID

www.SID.ir

و براین اساس، نسبت سوخت به طور متوسط ۱/۵ و میانگین کارایی سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده، ۳۹ درصد در نظر گرفته شده است[۱]. در حقیقت تعدیل ذخیره‌سازی در این پژوهش با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده نسل اول (نظیر نیروگاه هانتورف در آلمان) انجام شده است. به منظور بررسی سناریوهای مختلفِ ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده، این سیستم با ظرفیت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ مگاواتی و ظرفیت‌های ذخیره‌سازی (به ترتیب)، ۰/۲۴، ۰/۴۹، ۰/۷۴، ۰/۹۸، ۱/۲۳ و ۱/۴۸ گیگاوات ساعتی وارد شبکه شبیه‌سازی شده برق منطقه‌ای خراسان می‌شود[۲]. فرآیند محاسبات پژوهش بدین نحو است که ابتدا سیستم اولیه تولید بر اساس داده‌های ورودی اولیه، شبیه‌سازی می‌شود و در مرحله اول، صرفا نیروگاه‌های فعال در محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان، در سیستم شبیه‌سازی وارد می‌شوند. در این بخش بر اساس کمترین هزینه نهایی تولید محاسبه شده در شیوه‌های مختلف تولید و با در نظر گرفتن قیود فنی-اقتصادی سیستم تولید، نیروگاه‌ها با تکنولوژی‌های مختلف وارد سیستم تولید می‌شوند تا پایداری شبکه و قابلیت اطمینان هدف برآورده شود. در ادامه تعدیل ظرفیت‌های ۲۴۸۰ و ۷۰۰۰ مگاواتی از توان تولید برق تجدیدپذیر بادی به سیستم تولید اضافه می‌شوند و سپس با در نظر گرفتن قیود فنی-اقتصادی راه‌اندازی سیستم ذخیره‌ساز (شامل قیمت بازار برق و هزینه تمام شده تولید توربین و مصرف کمپرسور در سیستم CAES)، که در مبانی نظری پژوهش بدان اشاره شد، امکان ورود سیستم CAES در ظرفیت‌های ۵۰ تا ۳۰۰ مگاواتی به سیستم تولید ارزیابی خواهد شد. سپس با مقایسه میان میزان کاهش قیمت، میزان رشد انتشار آلاینده زیست‌محیطی و میزان رشد درآمد خالص مربوط به دامنه افزایش ظرفیت، توان بهینه سیستم CAES مشخص خواهد شد و در نهایت بر اساس درآمد خالص استراتژی‌های عملیاتی، به کارگیری سیستم CAES و مقایسه آن با استراتژی بهینه تئوریک، استراتژی کاربردی-عملیاتی راه‌اندازی واحد ذخیره‌ساز مشخص می‌شود.

یافته‌های پژوهش

بر اساس نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید با تعدیل اضافه شدن ظرفیت ۲۴۸۰ مگاواتی برق بادی، در هیچ یک از ظرفیت‌های ۵۰ تا ۳۰۰ مگاواتی سیستم CAES، امکان تولید برای سیستم CAES فراهم نمی‌شود، زیرا با اضافه شدن این ظرفیت از انرژی بادی به سیستم تولید، قیمت تمام شده تولید به محدوده ۶۷۷۵۱۹/۹۰۷۴ ریال در مگاوات ساعت می‌رسد که بر اساس قیود فنی-اقتصادی راه‌اندازی سیستم (شامل قیمت بازار برق و هزینه تمام شده تولید توربین و مصرف کمپرسور در سیستم CAES)، که در مبانی نظری پژوهش بدان اشاره شد، راه-اندازی این سیستم سودآور نخواهد بود. به همین دلیل در جدول ۷، تنها نتایج حاصل از ورود ظرفیت ۷۰۰۰ مگاواتی به سیستم تولید پایه ارایه شده است.

۱- برای کسب اطلاعات فنی و محاسباتی بیشتر در خصوص محاسبه نسبت سوخت ر.ک.:

EPRI-DOE, "Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications," Palo Alto, CA, Washington, DC 2003.

P. Zaugg, "Air-Storage Power Generating Plants," Brown Boveri Review, vol. 62, pp. 338-347, 1975.

E. Macchi and G. Lozza, "Study Of Thermodynamic Performance Of and compressed air energy storage Plants, Including Unsteady Effects," in Gas Turbine Conference and Exhibition, Anaheim, CA, USA, 1987, p. 10.

برای کسب اطلاعات فنی و محاسباتی بیشتر در خصوص محاسبه کارایی سیستم ر.ک.:

I. Arsie, V. Marano, G. Nappi, and G. Rizzo, "A model of a hybrid power plant
with wind turbines and compressed air energy storage," in 2005 ASME Power
Conference, Chicago, IL, United States, 2005, pp. 987-1000.

۲- سناریونویسی ظرفیت‌های مختلف سیستم و ذخیره‌سازی نیز بر اساس مطالعه سوکار و ویلیامز (۲۰۰۸) طراحی شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۷- نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید پایه و سیستم تولید هیبرید فسیلی-بادی

Table 7 - The simulation results of base production systems and fossil-wind hybrid system

سناریو / شاخص	مدل پایه[1] (شرایط اولیه سیستم تولید)	سناریوی سبد تولید هیبرید فسیلی-بادی[2]
متوسط قیمت (ریال بر مگاوات ساعت)	۵۸۴۸۸۵/۲۷	۹۵۹۷۳۱/۳۰
انتشار آلاینده زیست‌محیطی (میلیون تن)	۲۳/۱۳	۲۳/۱۳
تولید بهینه برق تجدیدپذیر(میلیون مگاوات ساعت)	۰/۰۴	۱۵
تولید بهینه برق فسیلی (میلیون مگاوات ساعت)	۳۶/۹۲	۳۶/۹۲
سهم برق تجدیدپذیر در پوشش تقاضا[3] (درصد)	۰/۲	۱۳/۱
حجم بهینه صادراتی[4] (میلیون مگاوات ساعت)	۱۶/۳	۳۱/۲۶
شاخص پایداری شبکه[5] (درصد)	۱۰۶	۹۸

منبع: محاسبات تحق

Archive of SID

۱- در مدل پایه صرفا ظرفیت فسیلی و ظرفیت عملی ۸ مگاواتی نیروگاه بادی بینالود وارد شده است

۲- در این سناریو، حداکثر پتانسیل تولید برق بادی به مدل پایه اضافه شده است

۳- مابقی تولید برق تجدیدپذیر، به دلیل لزوم برقرار قیود قابلیت اطمینان تولید و پایداری شبکه، وارد شبکه مصرف برق منطقه‌ای نمی‌شود و با اهداف صادراتی تولید می‌شود؛ زیرا در صورت بالا رفتن ضریب نفوذ برق نوسان‌پذیر تجدیدپذیر در شبکه قدرت، قابلیت اطمینان تولید و احتمال بروز خاموشی افزایش پیدا می‌کند و قیود قابلیت اطمینان سیستم تولید، اجازه تولیدِ فراتر از محدوده مشخصی را که تامین‌کننده پایداری سیستم باشد و به اطمینان سیستم تولید خدشه‌ای وارد نکند، نخواهد داد.

۴- این حجم بهینه با توجه به برآورده شدن قیود انتقال بین‌منطقه‌ای و بین المللی تعیین شده است. به عبارت دیگر با توجه به ضریب بهره‌برداری ۲۵ درصدی نیروگاه‌های بادی در محدوده خراسان بزرگ که توسط شرکت برق منطقه‌ای خراسان برآورد شده است، پتانسیل ۷۰۰۰ مگاواتی برق بادی در خراسان بزرگ، تولیدی معادل ۱۵ میلیون مگاوات ساعت را در سال فراهم خواهند نمود که در این شرایط، صادرات برق مازاد بر نیاز شبکه، کاملا بستگی به میزان محدودیت‌های پست‌های انتقال دارد.

۵- در محاسبه این شاخص از روش پژوهش (۵) صفحات ۸۶-۸۸ استفاده شده است. برای اطلاعات بیشتر ر.ک:

Lund, H. (2014) Advanced Energy Systems Analysis Computer Model, Documentation Version 11.4, Aalborg University, Denmark

Holttinen H, Hirvonen R, Power System Requirements for Wind Power, Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons Ltd., 2005, pp. 144-167.

www.SID.ir

بر اساس نتایج جدول ۶، در سناریوی سبد تولید هیبرید فسیلی-بادی، علی‌رغم این‌که انتشارآلاینده زیست‌محیطی افزایشی را نشان نمی‌دهد، ولی تولید برق تجدیدپذیر در سیستم تولید، حدود ۱۵ درصد افزایش می‌یابد که به دلیل ضریب نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر در این سناریو، نتیجه-ای دور از انتظار نیست. در چنین شرایطی به دلیل برخورداری از تولید مازاد بر نیاز شبکه، حجم صادراتی بهینه نیز در سبد تولید هیبرید فسیلی- بادی با افزایشی معادل ۱۴/۹۶ تراوات ساعت مواجه خواهد بود. اما چالش بزرگ سناریوی سبد تولید هیبرید فسیلی-بادی، افزایش ۶۴ درصد قیمت تمام شده این سبد تولید نسبت به مدل پایه (شرایط اولیه سیستم تولید) است، دلیل این قیمت بالا را باید در هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالای تولید برق بادی جستجو کرد، زیرا بر اساس اطلاعات بودجه‌ای شرکت برق منطقه‌ای خراسان برای سال ۱۳۹۱، هزینه سرمایه‌گذاری ایجاد ظرفیت یک مگاواتی بخاری، گازی و سیکل ترکیبی به ترتیب ۲۰۱۰۲ ، ۱۸۲۰۰ و ۲۲۶۳۰ میلیون ریال می‌باشد و این در حالی است که هزینه سرمایه‌گذاری ایجاد ظرفیت یک مگاواتی بادی در منطقه خراسان ۳۹۷۵۰ میلیون ریال است. چالش دیگری که ورود ۷۰۰۰ مگاوات برق تجدیدپذیر نوسانی به سیستم تولید، برای شبکه ایجاد می‌کند، کاهش شاخص پایداری شبکه از ۱۰۶ به ۹۸ درصد است. هم‌چنین بر اساس نتایج شبیه‌سازی سیستم پژوهش، در سناریوی هیبرید فسیلی- بادی ۱۳ درصد برق تولیدی در سیستم تولید با بهره‌گیری از تکنولوژی تجدیدپذیر بادی انجام می‌شود. اما این میزان تولید برق تجدیدپذیر در کنار تولید برق فسیلی به عنوان واحدهای پایدارساز و فراهم‌کننده قابلیت اطمینان تولید در شبکه، تولیدی فراتر از تقاضای منطقه‌ای برق را به همراه خواهد داشت که مازاد تقاضا به خارج از منطقه (به مقصد مناطق همسایه شرکت برق منطقه‌ای خراسان و یا مقاصد بین‌المللی) صادر خواهد شد. ولی محدودیت خطوط انتقال می‌تواند، مانع بزرگی بر سر راه دستیابی به اهداف صادراتی باشد. در چنین شرایطی، میزان صادرات به محدودیت‌های خطوط انتقال محدود می‌شود و چنان‌چه تولید مازاد بر تقاضای شبکه قدرت، فراتر از محدوده مجاز خطوط انتقال باشد، آن‌گاه تولید برق در واحدهای با بیش‌ترین هزینه نهایی تولید، تا اندازه‌ای کاهش می‌یابند که مازاد بحرانی شبکه مرتفع گردد[1]. در چنین شرایطی، ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی نیز راه‌کاری کارگشا برای ارتقاء امنیت سیستم و ایجاد یک سیستم تولید پایدار و قابل اطمینان برای پاسخ‌گویی به تغییرات پیش‌بینی‌نشده بار شبکه و خروج ناگهانی نیروگاه‌های تجدیدپذیر یا فسیلی از مدار خواهد بود. نتایج اضافه شدن تعدیل ظرفیت‌های مختلف CAES به سبد تولید هیبرید فسیلی-بادی نیز در جدول (۸) گزارش شده است. این نتایج با در نظر گرفتن فرآیند پیاپی و تکراری ۸۷۸۴ مرتبه‌ای برای رسیدن به هم‌گرایی فنی-اقتصادی محاسبه شده است.

۱- مازاد بحرانی تولید انرژی الکتریکی (Critical Excess Electricity Production) عبارت است از میزان انرژی الکتریکی مازاد تولیدشده فراتر از ظرفیت خطوط انتقال. در حقیقت در برنامه-ریزی آنالیزی یک شبکه هوشمند، نباید به شبکه یک‌پارچه تولید این مجوز داده شود که تولیدی فراتر از مجموع تقاضای داخلی و حداکثر ظرفیت خطوط انتقال برق را در سیستم تولید، عرضه نماید.به همین دلیل به هنگام بروز مازاد بحرانی تولید انرژی الکتریکی، لازم است که سیستم تولید تصحیح شود. راه‌کار عمومی مقابله با این مازاد بحرانی، کاهش تولید در خطوط تولید تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر است، به نحوی که در نهایت کاهش انفرادی یا ترکیبی تولید در نیروگاه‌ها، منجر به تراز میان عرضه و تقاضای کلی داخلی و خارجی گردد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۸- نتایج شبیه‌سازی تعدیل ظرفیت‌های مختلف CAES به سبد تولید هیبرید فسیلی-بادی

Table 8 - simulation results of CASE capacity adjustment to fossil-wind hybrid production basket

سناریو / شاخص	سناریوی ورود تعدیل ظرفیت ۵۰ مگاواتی	سناریوی ورود تعدیل ظرفیت ۱۰۰ مگاواتی	سناریوی ورود تعدیل ظرفیت ۱۵۰ مگاواتی	سناریوی ورود تعدیل ظرفیت ۲۰۰ مگاواتی	سناریوی ورود تعدیل ظرفیت ۲۵۰ مگاواتی	سناریوی ورود تعدیل ظرفیت ۳۰۰ مگاواتی
متوسط قیمت (ریال بر مگاوات ساعت)	۹۵۲۶۸۳/۱۲	۹۴۹۹۲۳/۰۸	۹۴۱۵۱۲/۲۲	۹۳۸۸۳۷/۷۵	۹۳۴۹۲۲/۰۳	۹۳۲۶۳۴/۸۲
انتشار آلاینده زیست‌محیطی (میلیون تن)	۲۳/۱۳	۲۳/۱۸	۲۳/۲۰	۲۳/۲۹	۲۳/۳۶	۲۳/۴۳
تولید بهینه برق تجدیدپذیر (میلیون مگاوات ساعت)	۱۵/۰۱	۱۵/۰۳	۱۵/۰۶	۱۵/۰۸	۱۵/۱۱	۱۵/۱۲
تولید بهینه برق فسیلی (میلیون مگاوات ساعت)	۳۶/۹۲	۳۶/۹۲	۳۶/۹۲	۳۶/۹۲	۳۶/۹۲	۳۶/۹۲
تولید خالص سیستم CAES (میلیون مگاوات ساعت)	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۸
درآمد ناخالص سیستم CAES (میلیون ریال)	۱۴۷/۳۰	۲۴۴/۶۱	۴۴۷/۶۳	۵۷۷/۴۵	۷۲۱/۸۱	۸۰۱/۲۱
میزان رشد متوسط قیمت (درصد)	-	- ۰/۲	-۰/۸۸	- ۰/۲۸	- ۰/۴۱	- ۰/۰۲
میزان رشد انتشار آلاینده زیست‌محیطی (درصد)	-	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۳۸	۰/۳۰	۰/۲۹
میزان رشد درآمد خالص(درصد)[1]	-	۶۵	۸۳	۲۹	۲۵	۱۱
شاخص پایداری شبکه (درصد) [2]	۱۰۴	۱۰۴	۱۰۴	۱۰۴	۱۰۴	۱۰۴

منبع: محاسبات تحقیق.

۱- از آن‌جایی که در هر سناریو، یکسانی (۵۰ مگاوات) به ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز هوا فشرده اضافه می‌شود، می‌توان درصد رشد به ازای گام‌های مشابه افزایش ظرفیت سیستم را محاسبه نمود.

۲- در محاسبه این شاخص از روش لوند (۲۰۱۴) صفحات ۸۶-۸۸ استفاده شده است. برای اطلاعات بیشتر ر.ک:

Lund, H. (2014) Advanced Energy Systems Analysis Computer Model, Documentation Version 11.4, Aalborg University, Denmark

Holttinen H, Hirvonen R, Power System Requirements for Wind Power, Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons Ltd., 2005, pp. 144-167.

Archive of SID

www.SID.ir

نتایج شبیه‌سازی ورود تعدیل ظرفیت‌های مختلف CAES به سبد تولید هیبرید فسیلی-بادی که در جدول ۷ ارایه شده است، نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت واحد ذخیره‌ساز از ۵۰ تا ۳۰۰ مگاوات، قیمت روند کاهشی، انتشار آلاینده زیست-محیطی و درآمد خالص روند افزایشی خواهند داشت. به علاوه تولید خالص سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده نیز از ۰/۰۱ تراوات ساعت در ظرفیت ۵۰ مگاواتی به ۰/۰۸ تراوات ساعت در ظرفیت ۳۰۰ مگاواتی می‌رسد. ارتقاء پایداری شبکه از ۹۸ درصد به ۱۰۴ درصد نیز از دستاوردهای مهم اضافه شدن سیستم ذخیره‌ساز است. اما در این میان بیش‌ترین میزان کاهش قیمت، کم‌ترین میزان رشد انتشار آلاینده زیست-محیطی و بیش‌ترین مقدار رشد درآمد خالص مربوط به دامنه افزایش ظرفیت از ۱۰۰ به ۱۵۰ مگاوات است. بنابراین سناریوی ورود تعدیل ظرفیت ۱۵۰ مگاواتی نسبت به سایر ظرفیت‌ها، کمترین میزان رشد انتشار آلاینده زیست‌محیطی و بیش‌ترین میزان رشد درآمد خالص واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده را به خود اختصاص داده است. بنابراین بر اساس هر سه معیار قیمتی، زیست‌محیطی و درآمدی، ظرفیت ۱۵۰ مگاواتی واحد ذخیره‌ساز هوای فشرده، ظرفیت بهینه خواهد بود. با این حال برای مشخص نمودن درآمد خالص استراتژی‌های مختلف به-کارگیری سیستم CAES، از تمامی ظرفیت‌های دامنه ۵۰ تا ۳۰۰ مگاوات استفاده شده است تا استراتژی کاربردی برتر بر اساس تجمیع نتایج تمامی ظرفیت‌های ممکن، مشخص گردد. نتیجه محاسبه درآمد خالص استراتژی‌های سه‌گانه به‌کارگیری سیستم CAES که با در نظر گرفتن فرآیند پیاپی و تکراری ۸۷۸۴ مرتبه‌ای برای رسیدن به هم‌گرایی فنی-اقتصادی و بر اساس حداکثر دامنه زمانی ممکن ساعتی انجام شده، در جدول (۹) ارایه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که استراتژی پیش‌رویدادی کاربردی CAES، به طور متوسط ۹۳ درصد خالص درآمد استراتژی بهینه تئوریک سیستم CAES را در تمامی ظرفیت‌های ۶گانه برای واحد ذخیره‌ساز فراهم می‌کند. این در حالی است که استراتژی پس‌رویدادی کاربردی، به طور متوسط ۸۹ درصد خالص درآمد استراتژی بهینه تئوریک سیستم CAES را در تمامی ظرفیت‌های ۶گانه برای واحد ذخیره‌ساز فراهم می‌آوَرد.

جدول ۹- درآمد خالص استراتژی‌های سه‌گانه به‌کارگیری سیستم CAES

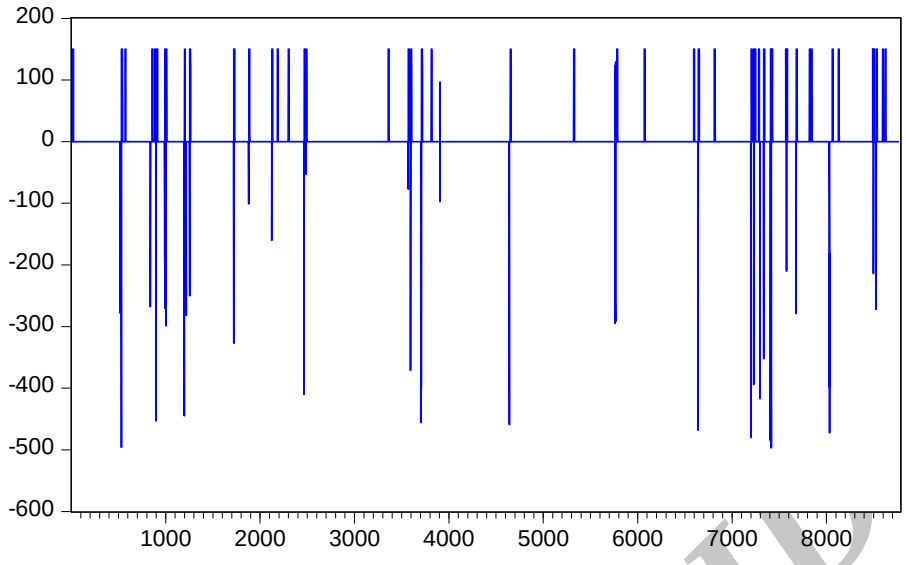
Table 9 - Net income of three strategies of using CAES

استراتژی / سناریو	خالص درآمد استراتژی بهینه تئوریک CAES (میلیون ریال)	خالص درآمد استراتژی پس-رویدادی کاربردی CAES (میلیون ریال)	خالص درآمد استراتژی پیش-رویدادی کاربردی CAES (میلیون ریال)
تعدیل ظرفیت ۵۰ مگاواتی	۱۰۹/۱۸	۹۶/۱۷	۱۰۰/۵۳
تعدیل ظرفیت ۱۰۰ مگاواتی	۲۱۸/۳۶	۱۹۵/۳۴	۲۰۴/۰۷
تعدیل ظرفیت ۱۵۰ مگاواتی	۴۵۷/۶۲	۴۰۶/۲۸	۴۲۴/۵۸
تعدیل ظرفیت ۲۰۰ مگاواتی	۴۳۶/۷۳	۳۸۹/۶۸	۴۰۷/۱۵
تعدیل ظرفیت ۲۵۰ مگاواتی	۵۴۵/۹۱	۴۸۶/۸۵	۵۰۸/۶۹
تعدیل ظرفیت ۳۰۰ مگاواتی	۶۵۵/۰۹	۵۸۴/۰۳	۶۰۸/۲۳

منبع: محاسبات تحقیق

Archive of SID

www.SID.ir



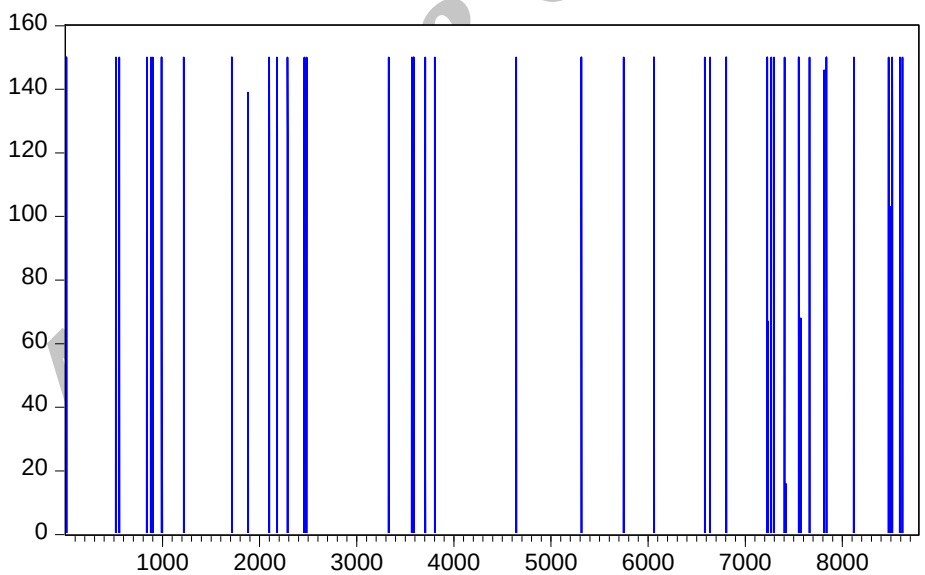
نمودار ۱- تولید لحظه‌ای-ساعتی توربین در سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده با ظرفیت ۱۵۰ مگاواتی

(محور عمودی، تولید (مگاوات ساعت) و محور افقی لحظه-ساعت را نشان می‌دهد[۱])

Chart 1 - Spot-Hourly turbines production with 150 MW capacity for CAES

(Vertical axis shows production (MWh) and the horizontal axis shows the spot-hours)

منبع: محاسبات تحقیق.



نمودار ۲- مصرف لحظه‌ای-ساعتی کمپرسور در سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده با ظرفیت ۱۵۰ مگاواتی

(محور عمودی، تولید (مگاوات ساعت) و محور افقی لحظه-ساعت را نشان می‌دهد)

Chart 2 - Spot-Hourly compressor production with 150 MW capacity for CAES

(Vertical axis shows production (MWh) and the horizontal axis shows the spot-hours)

منبع: محاسبات تحقیق.

۱- از آن‌جایی که شبیه‌سازی بر اساس تقویم میلادی انجام شده است، روز آغازین یک ژانویه (۱۱ دی) و روز پایانی ۳۰ دسامبر است.

www.SID.ir

نتیجه‌گیری و دلالت‌های پژوهش

بر اساس نتایج این پژوهش، در صورت استفاده از سیستم انرژی تجدیدپذیر با ظرفیت بزرگ به صورت یک‌پارچه با برق فسیلی، لازم است از روش‌های ذخیره‌سازی نیز برای افزایش پایداری شبکه[1] و قابلیت اطمینان[2] سیستم تولید در سیستم‌های تولید هیبریدی استفاده نمود، زیرا در شرایط احتمالی Black-Out، لازم است که واحدی به عنوان Black-Start در شبکه آماده باشد که به صورت فوری و درکم‌ترین زمان ممکن بار شبکه را تامین کند و شبکه را دوباره به حالت نرمال باز گرداند. از این رو استفاده از سیستم هوای فشرده می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی باشد که قابلیت اطمینان تولید و پایداری شبکه را در مواقع اضطراری تضمین می‌کند[3]، زیرا سیستم هوای فشرده بدون نیاز به محرک خارجی و صرفا با به‌کارگیری انرژی پتانسیل هوای فشرده قابل بهره‌برداری است[4]. هم‌چنین نتایج امکان‌سنجی استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هوای فشرده نشان می‌دهد که به‌کارگیری این سیستم نه تنها به لحاظ فنی و اقتصادی، امکان‌پذیر و موثر است، بلکه از سود مناسبی نیز برخوردار می‌باشد و با در نظر گرفتن طول عمر مفید ۳۰ ساله یک واحد ذخیره‌ساز ۱۵۰ مگاواتی و شاخص‌سازی و هم-ترازسازی هزینه‌ها و درآمدهای آتی، حداقل سودی معادل ۱۳۷۲۸/۶ میلیون ریال را در دوره بهره‌برداری به همراه خواهد داشت. این در حالی است که اکثر سیستم‌های تولید برق در شرکت‌های برق منطقه‌ای که ماهیت دولتی دارند، با هدف ایجاد شبکه پایدار تولید و ایجاد قابلیت اطمینان در سیستم تولید برق طراحی شده‌اند و سودمحوری را نمی‌توان به عنوان هدف اصلی شرکت‌های برق منطقه‌ای تلقی نمود. با این حال حتی با در نظر گرفتن بالاترین هزینه‌های سرمایه‌گذاری تامین تکنولوژی هوای فشرده برای ایران و عدم وجود هر گونه حمایت مالی از سوی دولت نیز، این سیستم از قابلیت اجراء و راه‌اندازی استاندارد در محدوده شرکت برق منطقه‌ای خراسان برخوردار بوده و از قابلیت سوددهی نیز تا محدوده مشخصی برخوردار است[5]. در چنین شرایطی استفاده از استراتژی‌های عملیاتی-کاربردی در بکارگیری CAES، می‌تواند سود عملیاتی را تضمین نماید که بر اساس نتایج پژوهش استراتژی پیش-رویدادی کاربردی CAES، به طور متوسط ۹۳ درصد خالص درآمد استراتژی بهینه تئوریک سیستم CAES را در تمامی ظرفیت‌های ۶گانه برای واحد ذخیره‌ساز فراهم می‌کند که ۴ درصد بیش‌تر از سودی است که استراتژی پس‌رویدادی کاربردی برای واحد ذخیره‌ساز فراهم می‌آورد.

1- Grid Stability
2- Reliability
۳- لازم به ذکر است که زمان لازم برای راه‌اندازی توربین‌های گازی دارای قابلیت استارت سریع، به طور متوسط ۲۰-۳۰ دقیقه است. این در حالی است که زمان لازم برای راه‌اندازی سیستم هوای فشرده، کمتر از ۱۰ دقیقه می‌باشد (۲۸).
۴- در سیستم‌های هیبرید، قابلیت اطمینان به معنای ایجاد و حفظ تراز میان عرضه و تقاضای برق شبکه به هنگام مواجهه با اختلالات ناگهانی ناشی از تغییرات عرضه و تقاضا است. برای تامین چنین قابلیتی در سیستم لازم است که سیستم به نحوی طراحی شود که بتواند فورا به اختلالات احتمالی واکنش نشان دهد و پس از برطرف شدن این اختلالات، مجددا به فرآیند نرمال بازگردد (۳). در حقیقت سیستم هوای فشرده را می‌توان برای افزایش کیفیت توان، پایداری شبکه و ارتقاء قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار داد. کیفیت توان به وجود نوسانات ولتاژ، قطع موقتی برق و به‌سازی شبکه مربوط می‌شود که سیستم ذخیره هوای فشرده را می‌توان به عنوان یک واحد توان برای کاهش میزان نوسانات و اختلالات شبکه در محدوده یک استاندارد مورد استفاده قرار داد.

۵- با این حال یکی از مهم‌ترین چالش‌های سیستم‌های هیبرید فسیلی- تجدیدپذیر، افزایش قیمت تمام‌شده سیستم تولید به هنگام ورود برق بادی به سیستم تولید است که با توجه به نوپا بودن انرژی-های تجدیدپذیر در کشور، باید حمایت ویژه‌ای از سوی دولت برای تقویت و تامین مالی این پروژه‌ها صورت گیرد.

منابع

1. Van Notten, W. F., Sleegersb, and A.M. and van Asselt, M.B.A., 2005, the future shocks: On discontinuity and scenario development; Technological Forecasting and Social Change, Volume 72, Issue 2, February 2005, Pages 175–194.

Archive of SID

www.SID.ir

2. Jaffe, A. B. and Stavins R. N. ,1994, The energy-efficiency gap, What does it mean?, Energy Policy 1994, 22 (10), pp 804-810
3. Kanase Patil, A. B., R. P. Saini, M. P. Sharma, 2011, Sizing of integrated renewable energy system based on load profiles and reliability index for the state of Uttarakhand in India, Renewable Energy, vol. 36, pp. 2809-2821.
4. Tanrioven, M., 2005, Reliability and cost-benefits of adding alternate power sources to an independent micro-grid community, Journal of Power Source, vol. 150, pp. 136–149.
5. Lund, H., 2014, Advanced Energy Systems Analysis Computer Model, Documentation Version 11.4, Aalborg University, Denmark.

۶. ادریسیان. اشکان، سامانی. حمید و ناصح. مجیدرضا، ۱۳۹۱، الگوی جدید هایبرید هوای فشرده برای تولید پایدار در مزارع بادی، دومین همایش ملی انرژی باد و خورشید، هم اندیشان انرژی کیمیا، تهران.

۷. هادی. حمید و حقیقی خوشخو. رامین، ۱۳۹۳، طراحی مفهومی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده در مقیاس کوچک (Micro CAES) به همراه توربین بادی برای تامین برق یک واحد مسکونی، بیست و هشتمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران.

۸. مرادی، شهرام و هنرمند، محمداسماعیل، ۱۳۸۸، بررسی استفاده از نیروگاه‌های بادی به همراه سیستم های ذخیره ساز انرژی، نخستین کنفرانس انرژی های تجدید پذیر و تولید پراکنده ایران، بیرجند، دانشگاه بیرجند.

۹. ارشادی عباس آباد. سالار، میرزایی ضیاپور. بهروز و عتابی. فریده، ۱۳۹۲، بهینه سازی عددی سیستم هیبریدی باد- دیسل- ذخیره انرشی هوای فشرده بر مبنای الگوریتم ژنتیک، اولین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، تهران، موسسه آموزش عالی مهر اروند، گروه ترویجی دوستداران محیط زیست.

10. Celik, A. N., 2003, Techno-economic analysis of autonomous PV-wind hybrid energy systems using different sizing methods, Energy Conversion Management, vol. 44, pp. 1951–1968,
11. Celik, A. N., 2002, Optimisation and techno-economic analysis of autonomous photovoltaic–wind hybrid energy systems in comparison to single photovoltaic and wind systems, Energy Conversion Management, vol. 43, pp. 2453–2468.
12. Koutroulis, E. ,D. Kolokotsa, A. Potirakis, K. Kalaitzakis, 2006, Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms, *Solar Energy*, vol. 80, pp. 1072–88.
13. Ekren, B. Y. and O. Ekren, 2009, Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions, *Applied Energy*, vol. 86, pp. 1387–94.
14. Tascikaraoglu, A. M. Uzunoglu, B. Vural, 2012, The assessment of the contribution of short-term wind power predictions to the efficiency of stand-alone hybrid systems, *Applied Energy*, vol. 94, pp. 156-165.
15. Takagi, M. and Y. Iwafune, K. Yamaji, H. Yamamoto, K. Okano, R. Hiwatari, T. Ikeya, 2013, Economic

Archive of SID

www.SID.ir

value of PV energy storage using batteries of battery-switch stations, IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 4164-73.

16. Abbaspour, M., Satkin, M., Mohammadi-Ivatloo, B., Hoseinzadeh Lotfi, F. and Noorollahi, Y., 2013, Optimal operation scheduling of wind power integrated with compressed air energy storage (CAES), Renewable Energy, 51 (2013) pp53-59.

۱۷. شرکت برق منطقه‌ای خراسان، ۱۳۹۱، گزارش اقدامات شرکت برق منطقه‌ای خراسان در زمینه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، مشهد.

۱۸. شرکت مشاوره مدیریت آریانا، ۱۳۹۱، تدوین نقشه راه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر صنعت برق خراسان، پژوهش‌گاه نیرو، مرکز رشد برق، واحد تحقیقات برق شرکت مشاوره مدیریت آریانا، تهران.

19. Zelinka, I., 2001, Analytic programming by means of new evolutionary algorithms, Proceedings of 1st International Conference on New Trends in Physics'01, Brno, Czech Republic, pp. 210–214.

20. Zelinka, I., 2002a, Analytic programming by means of soma algorithm, Proceedings of First International Conference on Intelligent Computing and Information Systems, Cairo, Egypt, pp. 148–154.

21. Zelinka, I., 2002b, Analytic programming by means of soma algorithm, Proc. 8th International Conference on Soft Computing, VUT Brno, Mendel'02 Czech Republic, pp. 93–101.

22. Zelinka, I., Oplatkova, Z. & Nolle, L., 2005, Analytic programming - symbolic regression by means of arbitrary evolutionary algorithms, In: Special Issue on Inteligent Systems of International Journal of Simulation, Systems, Science and Technology Vol.6 (No.9): 44–55.

23. National Renewable Energy Laboratory, 2012, Cost and Performance Data for Power Generation Technologies, Golden, Colorado, United States, February 2012.

24. Danish Energy Agency, 2012, Energinet.dk. Technology Data for Energy Plants, Danish Energy Agency.

۲۵. خلاصه تحولات اقتصادی کشور ،۱۳۹۱، بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، تهران.

۲۶. رستمی. ثریا، حق پرست کاشانی. آرش و لاری. حمیدرضا، ۱۳۹۲، مطالعه و برآورد قیمت برق تولیدی از نیروگاه های بادی، خورشیدی و بیوگاز، نخستین کنفرانس ملی انجمن انرژی ایران، تهران، پژوهش‌گاه نیرو.

۲۷. طاهری فرد. علی و شهاب. سمیه، ۱۳۸۹، بررسی جنبه های فنی و اقتصادی تولید برق زمین گرمایی، اقتصاد انرژی، شماره ۱۲۵.

28. Danish Energy Agency, 2011, Assumptions for socio-economic analysis on energy, Danish Energy Agency.

29. Succar, S. and Williams, R.H., 2008, Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, And Applications for Wind Power, published for the Princeton Environmental Institute, April 2008.

Archive of SID

www.SID.ir