

استراتژی پیشنهاددهی بهینه مشارکت یکپارچه ذخیره‌ساز هوای فشرده و تکنولوژی برق به گاز در بازار روز پیش تحت رویکرد ترکیبی تصادفی-مقاوم

آزین حسینی^۱، احمد صادقی یزدان خواه^۲، محمد همتی^۳، مهدی عباپور^۴ و بهنام محمدی ایواتلو^{۵*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۶	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹	
واژگان کلیدی:	
استراتژی قیمت دهی، بازار برق، هماهنگی شبکه برق و گاز، نیروگاه بادی، CAES، P2G، عدم قطعیت، بهینه‌سازی مقاوم.	افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر به ویژه منابع بادی با ماهیت احتمالاتی، شبکه‌های قدرت را با چالش‌های متعددی از نظر برنامه‌ریزی و بهره‌برداری مواجه نموده‌است. از سوی دیگر، گاز طبیعی به عنوان یک حامل انرژی ارزان و پاک، نقشی موثر در چشم‌اندازهای بلند مدت انرژی دارد. منابع انعطاف‌پذیر نوظهور و تکنولوژی‌های نوین هماهنگ شده، می‌توانند با شرکت در بازار برق و گاز روی قیمت برق تأثیرگذار باشند. بر این اساس، در این مقاله استراتژی پیشنهاددهی بهینه قیمت‌دهی برای یک سیستم ترکیبی متشکل از مزرعه بادی، ذخیره‌ساز هوای فشرده و تکنولوژی برق به گاز مورد بررسی قرار می‌گیرد. وجود عدم قطعیت‌های ناشی از توان بادی و قیمت بازار روز بعد موجب می‌شود که برنامه‌ریزی پیشنهادی تحت یک رویکرد احتمالاتی-مقاوم بهینه گردد. توان تولیدی مزرعه بادی با استفاده از رویکرد احتمالاتی مبتنی بر تولید سناریو مدل شده است، حال آنکه جهت سازی قیمت بازار روز بعد، یک چارچوب مقاوم ارائه گردیده است. مدل پیشنهادی جهت حداکثر سازی سود بر روی یک سیستم نمونه پیاده شده‌است که نتایج حاصل از شبیه سازی نشان‌دهنده افزایش سود مالک سیستم و استفاده حداکثر از ظرفیت نیروگاه بادی در حضور تکنولوژی برق به گاز و ذخیره‌ساز هوای فشرده است.

۱-مقدمه

۱-۱- کلیات موضوع پژوهش

نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر با ماهیت متغیر، چالش‌های متعددی را از نظر برنامه‌ریزی و بهره‌برداری برای سیستم قدرت به وجود آورده است [۱]. وجود عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی شبکه را بسیار سخت و پیچیده می‌کند. یکی از راه‌های کاهش نوسانات خروجی توان منابع انرژی تجدیدپذیر، استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی است. ذخیره‌سازهای

انرژی در طول دهه‌ها به‌منظور دادوستد انرژی بین زمان‌های غیرپیک و پیک برای کسب درآمد بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲].

به‌علاوه، استفاده از پتانسیل بالای سیستم‌های ذخیره انرژی به‌عنوان منابع انعطاف‌پذیر نوظهور، وابستگی شبکه برق به محدودیت‌های شبکه گاز طبیعی ناشی از هماهنگی و مشارکت بین شبکه‌ی برق و گاز را کاهش می‌دهد [۳، ۴].

یکی از انواع سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی در مقیاس

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mohammadi@ieee.org

۱. دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۳. دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشگاه تبریز

۴. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز

۵. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز

مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مرجع [۱۰]، استراتژی بهینه بهره‌برداری از واحدهای سوخت‌گازی و تکنولوژی P2G به کمک روش تصادفی با شرکت در بازار تنظیم ارائه شده است. نویسندگان در مرجع [۱۱]، ساختار بهینه کاربرد تکنولوژی P2G و برنامه پاسخگویی بار برای شبکه هماهنگ برق و گاز را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین در مرجع [۱۲]، یک پخش بار دوسویه به منظور نشان دادن مزایای اقتصادی به‌کارگیری P2G با استفاده از حداکثر ظرفیت توان بادی، ارائه شده است.

به‌کارگیری سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی از جمله سیستم CAES در شبکه قدرت نیز در مراجع مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است. در مراجع [۱۳، ۱۴] یک بازنگری کلی پیرامون مزایا و پیشرفت‌های سیستم CAES با هدف بهبود درک مفهوم و کاربردهای این ذخیره‌ساز ارائه شده است. سیستم CAES با حضور توربین بادی، سیستم خورشیدی، و برنامه پاسخگویی بار با هدف مسطح کردن منحنی بار و حداقل کردن هزینه بهره‌برداری سیستم مفروض در مرجع [۱۵] مطالعه شده است. بهره‌برداری بهینه از یک نیروگاه گازسوز هماهنگ‌شده با توربین بادی و سیستم CAES به منظور تأمین تقاضای بار با حداقل هزینه بهره‌برداری در مرجع [۱۶] مطالعه شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، استفاده از سیستم CAES موجب کاهش ۶/۷٪ کل هزینه بهره‌برداری شده است.

با توسعه بهره‌گیری از تکنولوژی‌های نوین نظیر سیستم‌های ذخیره‌ساز، بحث مشارکت این واحدها در بازارهای برق و ایجاد یک کسب‌وکار پرمنفعت از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود. این مهم، با توجه به وابستگی‌های متقابل بین شبکه‌های برق و گاز، و حضور تکنولوژی‌هایی نظیر P2G و CAES نیازمند مطالعات بیشتر است. در کنار این امر، وجود عدم قطعیت‌های ناشی از قیمت بازار و نوسانات آن موجب به‌کارگیری روش‌های مناسب بهینه‌سازی خواهد شد. در مسائل استراتژی پیشنهاددهی برای سیستم‌های ذخیره انرژی هماهنگ با منابع انعطاف‌پذیر نوظهور، به‌موجب عدم قطعیت‌هایی از جمله قیمت برق و نوسانات توان تولیدی باد، از روش‌های احتمالاتی از جمله بهینه‌سازی مقاوم، برنامه‌ریزی تصادفی، تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعات (IGDT^۳) استفاده می‌شود. برای مثال در

بزرگ و پربازده، ذخیره‌ساز هوای فشرده (CAES^۱) است که می‌تواند به‌خوبی قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری سیستم، و هماهنگی با منابع انرژی تجدیدپذیر را بهبود ببخشد. از سویی دیگر، استفاده از تکنولوژی نوظهور تبدیل توان به گاز (P2G^۲) به دلیل مزایای بی‌شمار اقتصادی و زیست محیطی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. ذخیره‌سازی برق در ساعات کم باری و تبدیل آن به گاز طبیعی طی یک فرآیند الکتروشیمیایی، به‌عنوان یک راهکار تأمین گاز طبیعی به شمار می‌رود [۵].

باین‌حال، تعیین استراتژی پیشنهاددهی بهینه در یک محیط رقابتی، جهت حداکثر سازی سود نهایی سیستم قدرت به دلیل عدم قطعیت‌های مرتبط با ساختار تصادفی انرژی‌های تجدیدپذیر و متغیرهای بازار برق از جمله قیمت انرژی، در کنار وابستگی‌های روزافزون بین شبکه‌های برق و گاز نیازمند مطالعات گسترده‌تر می‌باشد.

۱-۲- تاریخچه‌ای از کارهای مشابه

استفاده از تکنولوژی تبدیل توان به گاز در تحقیقات مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۶]، مروری بر نقش عمده P2G در سیستم‌های انرژی مختلف صورت گرفته است. در مرجع [۷]، تأثیر عملکرد P2G در بهره‌برداری اقتصادی از سیستم قدرت شبکه دانمارک تحلیل شده است، که در آن یک مدل زمان‌بندی چند دوره‌ای براساس چارچوب پخش بار مستقیم در نظر گرفته شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، تکنولوژی P2G موجب کاهش ۳٪ هزینه بهره‌برداری و کاهش ۲٪ قطعی توان باد شده است. در مرجع [۸]، کاربرد تکنولوژی P2G به‌عنوان یک منبع انعطاف‌پذیر نوظهور به منظور کاهش محدودیت‌های ظرفیت تولیدی سلول‌های خورشیدی و توان بادی، مورد مطالعه قرار گرفته است. هماهنگی و مشارکت بین شبکه‌ی برق و گاز سبب افزایش وابستگی شبکه برق به شبکه گاز طبیعی می‌شود و این امر چالش‌های جدیدی را در بحث دادوستد برق و گاز به وجود می‌آورد. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه هماهنگی شبکه برق و گاز با در نظر گرفتن P2G صورت گرفته است. برای مثال، یک مدل P2G هماهنگ شده با نیروگاه گازسوز در مرجع [۹] ارائه شده است. برنامه‌ریزی پیشنهادی باهدف تعیین پتانسیل سیستم مفروض برای کاهش میزان انتشار CO₂

³ Information gap decision theory

¹ Compressed air energy storage

² Power-to-gas

بزرگ‌مقیاس CAES-P2G در کنار مزارع بادی بررسی نشده‌است. از این رو در این مقاله، یک سیستم هماهنگ متشکل از تکنولوژی‌های CAES-P2G با حضور توان بادی به منظور دستیابی به استراتژی پیشنهاددهی بهینه باهدف حداکثر سازی سود، بررسی شده‌است. جهت مقابله با عدم قطعیت‌های مسئله از روش ترکیبی تصادفی- مقاوم استفاده شده‌است. عدم قطعیت توان تولیدی باد به کمک برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو و عدم قطعیت مربوط به قیمت برق در بازار روز بعد به روش بهینه‌سازی مقاوم بر اساس ارزیابی بدترین سناریوها مدل شده‌است. جهت آشکارسازی نوآوری‌ها و تفاوت‌های اصلی این مقاله، جدول ۱ یک مقایسه کلی مابین روش پیشنهادی و کارهای قبلی مشابه را ارائه می‌نماید.

براین اساس، اصلی‌ترین نوآوری‌های این مقاله عبارت‌اند از:

- در نظر گرفتن یک سیستم ذخیره‌ساز ترکیبی بزرگ مقیاس شامل CAES و تکنولوژی P2G در حضور توان تولیدی باد.

- ارائه یک روش بهینه‌سازی ترکیبی تصادفی-مقاوم برای ارزیابی عدم قطعیت‌های توان باد و قیمت انرژی در بازار روز بعد باهدف دستیابی به یک مدل واقعی.
- به‌کارگیری توان مازاد و تبدیل به گاز طبیعی توسط P2G برای شرکت در بازار گاز و کمک به کاهش قطع توان بادی.

مرجع [۱۷]، روش بهینه‌سازی مقاوم برای یک هاب انرژی جهت شرکت در بازار روز بعد ارائه شده‌است. هاب انرژی مفروض شامل نیروگاه گازی، مزرعه بادی، تکنولوژی P2G و ذخیره‌ساز گاز طبیعی می‌باشد. P2G به‌کاربرده شده با تبدیل توان مازاد به گاز طبیعی منجر به کاهش قطعی توان باد می‌گردد. در مرجع [۱۸]، استراتژی پیشنهاددهی بهینه برای سیستم یکپارچه متشکل از مزرعه بادی و CAES، برای شرکت در بازارهای روز بعد و بازار تعادل به کمک روش تصادفی ارائه شده‌است. همچنین در مرجع [۱۹]، یک چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی دوسطحی برای سیستم شامل نیروگاه حرارتی، CAES و توان بادی ارائه شده‌است. هدف از مدل مفروض حداکثر سازی سود حاصل از شرکت در بازار انرژی و ذخیره چرخان می‌باشد. مرجع [۲۰]، از روش IGDT برای برنامه‌ریزی یک سیستم CAES هماهنگ شده با مزرعه خورشیدی تحت دو حالت ریسک گریز و ریسک جو بهره گرفته‌است.

۱-۳- نوآوری

در مطالعات اخیر اهمیت استراتژی پیشنهاددهی بهینه برای سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی هماهنگ شده به دلیل وابستگی حامل‌های برق و گاز به همدیگر و نیز توسعه روزافزون منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌خوبی نشان داده شده‌است. بااین حال اتخاذ یک رویکرد بهینه‌سازی مناسب جهت بهره‌گیری از یک سیستم ترکیبی متشکل از دو تکنولوژی

جدول ۱- مقایسه مقاله با کارهای مشابه

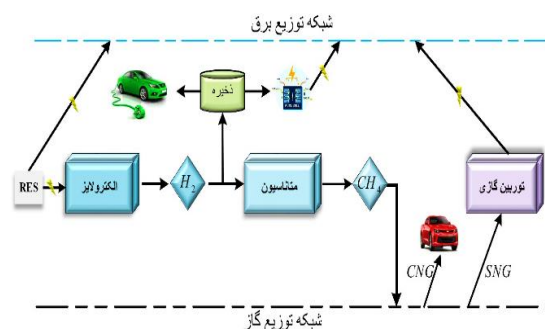
مراجعه	هماهنگی سیستم برق و گاز	استراتژی پیشنهاددهی	تکنولوژی‌ها			مدل سازی عدم قطعیت	
			CAES	P2G	مزرعه بادی	تصادفی	مقاوم
[۸]	x	x	x	✓	✓	x	x
[۱۲]	✓	x	x	✓	✓	x	x
[۲۱]	x	✓	✓	x	✓	✓	x
[۲۲]	x	✓	✓	✓	✓	✓	x
[۲۰]	x	x	✓	x	x	x	x
[۱۸]	x	✓	✓	x	✓	✓	x
[۱۹]	x	x	✓	x	✓	✓	x
[۲۳]	x	✓	✓	x	x	x	x
[۱۷]	✓	x	x	✓	x	x	✓
[۲۴]	x	x	x	✓	✓	✓	✓
[۲۵]	x	✓	✓	x	x	✓	✓
این مقاله	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

۴-۱- ساختار کلی مقاله

این مقاله در ۷ بخش تدوین شده است. در بخش دوم اصول و فرآیند تکنولوژی P2G بیان می‌گردد. در بخش سوم مسئله اصلی شرح داده می‌شود و در بخش چهارم مدل ریاضی شامل تابع هدف و قیود مربوط به آن معرفی خواهد شد. روش ترکیبی تصادفی-مقاوم برای مدل پیشنهادی در بخش پنجم ارائه شده است. در بخش ششم نتایج عددی روش پیشنهادی به تفصیل بیان می‌شود. در نهایت، نتیجه گیری و پیشنهادها برای مطالعات آینده در بخش هفتم ارائه می‌گردد.

۲- تکنولوژی P2G

تکنولوژی P2G به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوین تبدیل توان به گاز شناخته می‌شود. عمده فرآیند اصلی این تکنولوژی شامل دو مرحله واکنش شیمیایی است. طی این فرآیند، برق مازاد در ساعات کم‌باری به کمک فرایندهای الکترولیز (۱) و متانیزه (۲) به هیدروژن و متان تبدیل می‌شود. متان تولیدشده به‌عنوان سوخت گازی برای شرکت در بازار گاز و هماهنگی شبکه‌ی گاز با برق به کار گرفته می‌شود. از طرفی، هیدروژن به‌دست‌آمده نیز می‌تواند برای مواردی مانند پیل‌های سوختی و یا توربین‌های انبساطی کارآمد باشد. شکل (۱) نمای کلی از تکنولوژی توان به گاز را به‌خوبی نشان می‌دهد [۲۱].

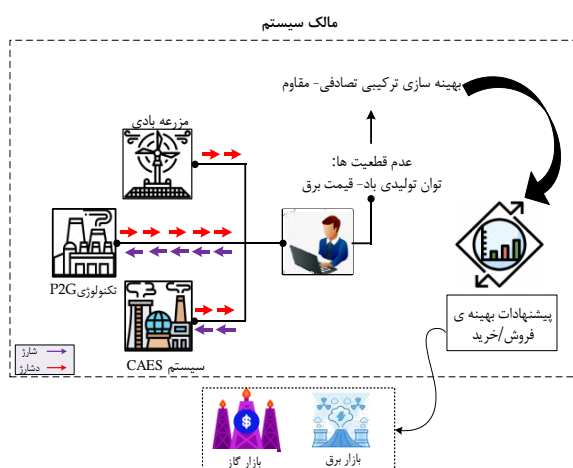


شکل ۱- شمای کلی تکنولوژی توان به گاز

۳- شرح مسئله

وابستگی انسان به انرژی در زندگی روزمره همواره در حال افزایش است که این امر لزوم بهره‌برداری صحیح از منابع انرژی و مصرف بهینه آن‌ها را بیش‌ازپیش نمایان می‌سازد. برای حل مشکل کمبود انرژی در آینده راهکارهای مختلفی،

از جمله تغییر رویکرد مصرف سوخت‌های فسیلی به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی باد، به کار گرفته شده است. با افزایش منابع انرژی تجدیدپذیر، استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی به‌عنوان منابع انعطاف‌پذیر نوظهور افزایش یافته است که می‌توانند نقش مهمی را در کاهش تأثیر عدم قطعیت‌ها روی عملکرد سیستم قدرت ایفا کنند. در این مقاله، یک استراتژی پیشنهاددهی بهینه جهت مشارکت تجهیزات CAES و تکنولوژی P2G با در نظر گرفتن انرژی باد ارائه می‌شود. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های موجود از روش محاسباتی ترکیبی تصادفی-مقاوم استفاده می‌شود. از آنجاکه هزینه تولید برق و قیمت فروش در ساعات مختلف شبانه‌روز با توجه به بازار برق، تفاوت‌های چشم‌گیری دارد، بنابراین ایده ذخیره‌سازی انرژی در ساعات غیر پیک و استفاده مجدد در ساعات پیک می‌تواند منافع متعددی را به همراه داشته باشد.



شکل ۲- ساختار کلی سیستم مفروض با اجزا مختلف

در نظر گرفتن تکنولوژی P2G و ذخیره‌ساز CAES به‌طور هم‌زمان علاوه بر کمک هرچه بیشتر به ادغام منابع بادی با شبکه، امکان مشارکت مالک در بازار برق را نیز مهیا می‌سازد. به‌عبارتی‌دیگر، مالک سیستم با مدیریت تکنولوژی‌های خود می‌تواند بسته به شرایط بازار برق و گاز با شبکه بالادستی تبادل توان و گاز داشته و سود روزانه خود را حداکثر سازد. مازاد انرژی باد می‌تواند با بازده بالا در اثر فرایندهای مذکور به گاز تبدیل شود. گاز تولیدی از فرآیند تبدیل P2G، هم می‌تواند در اختیار شبکه گاز قرار گیرد و هم می‌تواند به‌عنوان سوخت مصرفی به CAES تزریق شود. شمای کلی سیستم مفروض، در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، مالک سیستم با

اولیه و مقدار نهایی توان ذخیره شده سیستم بایستی با هم برابر باشد.

$$u_{t,s}^{ch} + u_{t,s}^{dis} \leq 1 \quad (۴)$$

$$OC_{t,s} = [P_{t,s}^{dis} (HR_d \times \pi_t^{NG} + VOM^{exp})] + [P_{t,s}^{ch} \times VOM^c] \quad (۵)$$

$$0 \leq P_{t,s}^{ch} \leq P_{max}^c \times u_{t,s}^{ch} \quad (۶)$$

$$0 \leq P_{t,s}^{dis} \leq P_{max}^{exp} \times u_{t,s}^{dis} \quad (۷)$$

$$E_{t+1,s} = E_{t,s} + P_{t,s}^{ch} - P_{t,s}^d \times ER \quad (۸)$$

$$E_{min} \leq E_{t,s} \leq E_{max} \quad (۹)$$

$$E_{t=0} = E_{t=24,s} \quad (۱۰)$$

• قیود P2G

محدودیت‌های مربوط P2G در روابط (۱۱)-(۱۶) بیان شده است [۱۰]. در رابطه (۱۱)، مقدار توان مصرفی سیستم P2G نشان داده شده است روابط (۱۲) و (۱۳) به ترتیب محدودیت‌های توان کل مصرفی و توان خریداری شده‌ی P2G را بیان می‌کنند. رابطه (۱۴) نشان دهنده‌ی مقدار گاز تولیدی در هر لحظه است. محدودیت‌های حداقل و حداکثر مقدار گاز ذخیره شده تولیدی توسط P2G در رابطه (۱۵) آمده است. بازده عملکرد P2G به ازای توان دریافتی نیز در رابطه (۱۶) ارائه شده است.

$$P_{t,s}^{P2G,cons} = P_{t,s}^{P2G,da} + P_{t,s}^{P2G,W} \quad (۱۱)$$

$$P_{min}^{P2G} \leq P_{t,s}^{P2G,cons} \leq P_{max}^{P2G} \quad (۱۲)$$

$$0 \leq P_{t,s}^{P2G,da} \leq P_{max}^{P2G} \quad (۱۳)$$

$$G_{min} \leq G_{t,s} \leq G_{max} \quad (۱۴)$$

$$G_{t,s} = G_{t-1,s} + G_{t,s}^{ch} - G_{t,s}^{dis} \quad (۱۵)$$

$$P_{t,s}^{P2G,gas} = P_{t,s}^{P2G,da} \times \eta_{P2G} \quad (۱۶)$$

• قیود مزرعه بادی

توان تولیدی توسط توربین بادی به سرعت باد و ماهیت احتمالاتی آن وابسته است. رابطه بین توان و سرعت باد در (۱۷) آورده شده است [۲۲]. قابل ذکر است که میزان قطعی توان در هر بازه و هر سناریو نباید از مقدار نامی توان بادی در دسترس بیشتر باشد که در رابطه (۱۸) لحاظ شده است.

$$P_{W,t,s} = \begin{cases} 0 & V_{t,s} < V_{cut-in} \vee V_{t,s} > V_{cut-out} \\ P_{wind, rated} \times \left(\frac{V_{t,s} - V_{cut-in}}{V_{rated} - V_{cut-in}} \right)^3 & V_{cut-in} \leq V_{t,s} \leq V_{rated} \\ P_{wind, rated} & V_{rated} \leq V_{t,s} \leq V_{cut-out} \end{cases} \quad (۱۷)$$

بررسی شرایط هر دو بازار برق و گاز، عملکرد سیستم ترکیبی را بهینه کرده و سود خود را تحت یک رویکرد مناسب بهینه‌سازی حداکثر می‌نماید.

۴- فرمول بندی مسئله

۴-۱- استراتژی پیشنهاددهی سیستم CAES-P2G

هماهنگ شده و باد

در این بخش مدل ریاضی استراتژی تعیین قیمت سیستم ترکیبی متشکل از سه تجهیز نامبرده تحت یک برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح (MILP^۱) ارائه می‌شود. تابع هدف سیستم باهدف حداکثر سازی سود نهایی در رابطه (۳) بیان شده است.

$$Z = MAX \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s \left[\sum_{t=1}^T \left[\underbrace{\left((P_{t,s}^{dis} - P_{t,s}^{ch}) \times \lambda_t^e - OC_{t,s} \right)}_{(I)} + \underbrace{\left(\pi_t^{NG} \times P_{t,s}^{P2G,gas} - \lambda_t^e \times P_{t,s}^{P2G,da} \right)}_{(II)} + \underbrace{\left(P_{t,s}^{W,da} \times \lambda_t^e \right)}_{(III)} - \underbrace{\left(C_t^{W,curr} \times P_{t,s}^{W,curr} \right)}_{(IV)} \right] \right] \quad (۳)$$

ترم اول رابطه (۳) مربوط به سود سیستم CAES شامل فروش توان در حالت دشارژ، خرید در حالت شارژ و همچنین هزینه‌های بهره‌برداری می‌باشد. سود حاصل از مشارکت P2G در بازار برق و گاز، در ترم دوم تابع هدف نشان داده شده است. جمله سوم تابع هدف سود حاصل از فروش توان تولیدی نیروگاه بادی به بازار روز بعد است. هزینه حاصل از قطع توان بادی در ترم چهارم تابع هدف بیان شده است. قیود مربوط به هریک از ذخیره‌سازها و مزرعه بادی در ادامه معرفی خواهند شد.

۴-۲- قیود مسئله

• قیود CAES

قیود سیستم CAES در روابط (۱۰)-(۴) بیان شده است. طبق رابطه (۴)، سیستم CAES در هر لحظه تنها می‌تواند در یکی از حالات شارژ یا دشارژ عمل کند. قید (۵) مربوط به هزینه بهره‌برداری واحد CAES است. روابط (۶) و (۷) محدوده شارژ/دشارژ CAES را نمایان می‌کند. رابطه (۸) میزان انرژی ذخیره شده در CAES را محدود می‌کند. همچنین این مقدار انرژی ذخیره شده در هر ساعت نیز توسط رابطه (۹) تعریف شده است. در نهایت، رابطه (۱۰) نشان می‌دهد که در پایان بازه زمانی مورد مطالعه مقدار

^۱ Mixed-integer linear programming

$$P_{t,s}^{W,curr} \leq P_{t,s}^W \quad (18)$$

۵- بهینه‌سازی ترکیبی تصادفی-مقاوم

روش برنامه‌ریزی مقاوم یک روش برنامه‌ریزی بدبینانه برای برخورد با مسائل بهینه‌سازی در حضور عدم قطعیت است که برای اولین بار در سال ۱۹۷۳ ارائه گردید [۲۶]. در این روش، تصمیم‌گیرنده سعی دارد که مسئله را در برابر عدم قطعیت‌های مسئله مقاوم کند و به عبارتی با برنامه‌ریزی برای بدترین سناریوی ممکن، تصمیم‌گیرنده در تلاش است سطح محافظه‌کاری خود در فرآیند تصمیم‌گیری را بسنجد. فرمولاسیون عمومی برای یک مدل بهینه‌سازی مقاوم به صورت زیر است:

$$\text{Minimize}_{x_j, \forall j} \sum_{j=1}^M e_j x_j \quad (19)$$

مقید به:

$$\sum_{j=1}^M a_{nj} x_j \leq b_n \quad n=1, \dots, N \quad (20)$$

$$x_j \geq 0 \quad j=1, \dots, M \quad (21)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \text{for some } j=1, \dots, M \quad (22)$$

در روابط بالا، e_j بیانگر ضریب تابع هدف که دارای مقادیر حداقل و حداکثر است، x_j متغیر تصمیم‌گیری و d_j میزان انحراف از ضریب نامی با محدوده‌ی $[e_j, e_j + d_j]$ است. بعلاوه، برای مسئله MILP مقاوم یک پارامتر کنترلی خطی Γ در بازه $[0, |J_0|]$ به شرط $d_j \geq 0$ در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس روابط (۱۹) تا (۲۲) می‌توانند به صورت زیر اصلاح شوند:

$$\text{Minimize}_{x_j, \forall j} \sum_{j=1}^M e_j x_j + z_0 q_0 + \sum_{j=1}^M q_j \quad (23)$$

مقید شده به:

$$z_0 + q_{0j} \geq d_j y_j \quad j \in J_0 \quad (24)$$

$$q_{0j} \geq 0, \quad j=1, \dots, M \quad (25)$$

$$y_j \geq 0, \quad j=1, \dots, M \quad (26)$$

$$z_0 \geq 0 \quad (27)$$

$$x_j \leq y_j, \quad j=1, \dots, M \quad (28)$$

که z_0 بیانگر متغیر کمکی و همچنین z_0 و q_0 متغیرهای دوگان مسئله مقاوم هستند. طبق فرمولاسیون ارائه‌شده و با لحاظ کردن روش ترکیبی تصادفی-مقاوم، تابع هدف مسئله پیشنهاددهی که در رابطه (۳) بیان گردید، به صورت

زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & \sum_{s=1}^N \pi_s \left[\sum_{t=1}^T [(P_{t,s}^{dis} - P_{t,s}^{ch}) \times \lambda_t^e - OC_{t,s} + \right. \\ & \left. (\pi_t^{NG} \times P_{t,s}^{P2G,gas} - \lambda_t^e \times P_{t,s}^{P2G,da}) \right. \\ & \left. + (P_{t,s}^{W,da} \times \lambda_t^e) - (C_t^{W,curr} \times P_{t,s}^{W,curr}) \right] + Z_0 \Gamma_0 + \sum_{t=1}^T q_{0t} \end{aligned} \quad (29)$$

حل تابع هدف (۲۹) به دلیل وجود روابط غیرخطی، پیچیده خواهد بود. از این رو، با استفاده از تکنیک دوگان تابع هدف (۲۹) به صورت رابطه (۳۰) اصلاح خواهد شد.

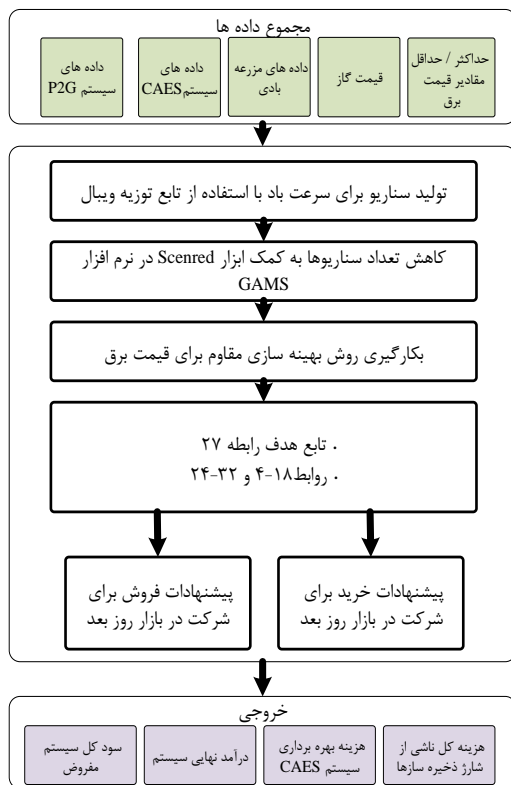
$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & -\sum_{s=1}^N \pi_s \left[\sum_{t=1}^T [(P_{t,s}^{dis} - P_{t,s}^{ch}) \times \lambda_t^e - OC_{t,s} + \right. \\ & \left. (\pi_t^{NG} \times P_{t,s}^{P2G,gas} - \lambda_t^e \times P_{t,s}^{P2G,da}) \right. \\ & \left. + (P_{t,s}^{W,da} \times \lambda_t^e) - (C_t^{W,curr} \times P_{t,s}^{W,curr}) \right] + Z_0 \Gamma_0 + \sum_{t=1}^T q_{0t} \end{aligned} \quad (30)$$

مقید شده به:

$$P_{t,s}^{ch} + P_{t,s}^{P2G,da} - P_{t,s}^{dis} - P_{t,s}^{W,da} \leq y_t \quad (31)$$

$$(31)-(34) \text{ و } (18)-(19) \quad (32)$$

الگوریتم کلی روش دوگانه تصادفی-مقاوم به کار گرفته شده برای سیستم CAES-P2G هماهنگ شده با انرژی باد در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ - الگوریتم روش ترکیبی تصادفی-مقاوم مفروض

۶- شبیه‌سازی و نتایج عددی

۶-۱- مطالعه موردی

استراتژی پیشنهاددهی برای سیستم ترکیبی متشکل از مزرعه بادی و دو سیستم ذخیره‌ساز بزرگ‌مقیاس بر روی سیستم هیبریدی ارائه شده در شکل (۲)، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سیستم تست موردنظر متشکل از یک نیروگاه بادی با

ظرفیت ۱۲۰ مگاوات، یک سیستم ذخیره‌ساز CAES و یک سیستم P2G است. نیروگاه بادی مورد نظر ضمن تأمین توان موردنیاز دو ذخیره‌ساز، می‌تواند در بازار روز بعد هم شرکت کند. مشخصات مربوط به ذخیره‌سازهای P2G و CAES به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. همچنین مقدار پیش‌بینی‌شده قیمت برق در بازار روز بعد و قیمت گاز در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات سیستم P2G مورد استفاده

P_{min}^{P2G}	P_{max}^{P2G}	G_{min}	G_{max}	η_{P2G}	$P_{max}^{P2G, str}$	$P_{max}^{P2G, est}$
۲	۲۰	۵	۵۰	۵۰	۵	۵

جدول ۳- مشخصات سیستم CAES مورد استفاده

HR_g (GJ/MWh)	VOM^{exp} (\$/MWh)	VOM^c (\$/MWh)	P_{max}^c (MW)	P_{max}^{exp} (MW)	E_{min} (MWh)	E_{max} (MWh)	ER
۴/۱۸۵	۰/۳۷۰	۰/۳۷۰	۵۰	۵۰	۰	۳۰۰۰	۰/۷۵

جدول ۴- قیمت‌های متغیر برق و گاز در بازار [۲۷]

زمان (h)	قیمت برق (\$/MWh)	قیمت گاز (\$/MWh)	زمان (h)	قیمت برق (\$/MWh)	قیمت گاز (\$/MWh)
۱	۲۲/۳	۲۹/۱۹۴	۱۳	۲۷/۱	۴۰/۲
۲	۲۱/۸۵	۲۱/۷۲	۱۴	۲۸/۹	۴۰/۷۱
۳	۲۳/۴	۲۱/۰۸	۱۵	۲۳/۸۵	۴۰/۵
۴	۲۳/۸	۲۱/۷۵	۱۶	۲۹/۴	۴۱/۱۱
۵	۱۷/۴۵	۲۱/۳	۱۷	۱۶/۸	۳۳/۲۸
۶	۲۲/۵	۲۱/۳۷	۱۸	۲۵	۲۹/۹
۷	۲۵/۳	۴۰/۱	۱۹	۲۵	۲۲/۹۵
۸	۲۹/۹	۳۹/۹	۲۰	۲۷/۶	۲۱/۵۵
۹	۱۸/۴	۴۰/۶	۲۱	۲۴/۵	۲۲/۵۹
۱۰	۲۸/۷	۳۹/۹	۲۲	۲۷	۲۲/۰۳
۱۱	۲۳/۱	۳۹/۰۳	۲۳	۲۵/۹۶	۲۲/۲
۱۲	۲۹/۶	۲۹/۹	۲۴	۲۳	۲۰/۲۵

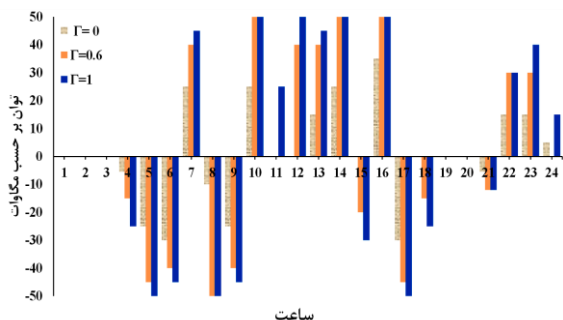
در نظر گرفته می‌شود. از این‌رو، جواب بهینه احتمالاتی بدون لحاظ کردن عدم قطعیت قیمت برق به دست آمده و از جواب حاصل برای مدل‌سازی روش مقاوم استفاده می‌شود.

۶-۲- نتایج شبیه‌سازی

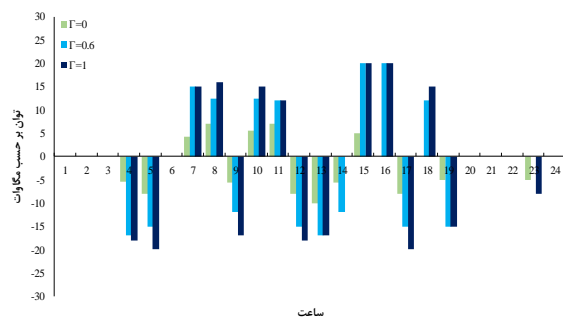
بهینه‌سازی مقاوم به منظور برخورد با عدم قطعیت قیمت برق استفاده شده است. پارامتر کنترلی Γ تأثیر بسزایی در عملکرد بهینه‌سازی مقاوم دارد. مقادیر Γ از صفر تا یک تغییر می‌کند که افزایش آن به معنای رسیدن به یک جواب بهینه با بیشترین رویکرد محافظه‌کارانه توسط مالک

برنامه‌ریزی پیشنهادی به صورت یک مسئله MILP در نرم‌افزار GAMS با استفاده از حل‌کننده DICOPT پیاده شده است. تعداد ۱۰۰۰ سناریو به کمک روش محاسباتی مونت‌کارلو تولید شده است. جهت کاهش مرز محاسباتی مسئله بهینه‌سازی تعداد سناریوها به کمک نرم‌افزار SCENRED به ۱۰ سناریو ممکن کاهش یافته است. توان تولیدی ۱۰ سناریو محتمل در شکل (۴) ارائه شده است. به منظور بررسی کارایی روش مقاوم، ابتدا مسئله به صورت احتمالاتی حل شده و میزان سود حاصل برای حالت $\Gamma = 0$

شبکه بالادست خریداری می‌کند و در ساعات پیک به شبکه توان می‌فروشد.



شکل ۷ - مقادیر شارژ و دشارژ CAES به ازای هر بازه زمانی

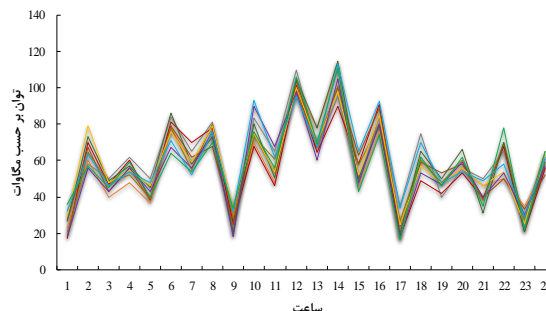


شکل ۸ - مقادیر شارژ و دشارژ P2G به ازای هر بازه زمانی

• **منحنی‌های پیشنهاد خرید/فروش**

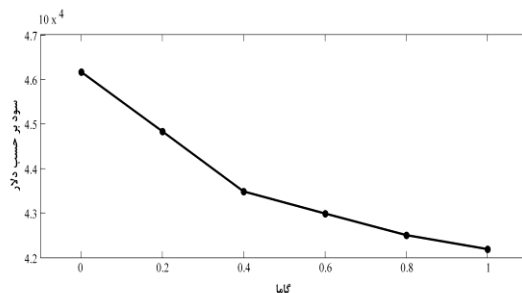
اساساً برای ساختن منحنی‌های پیشنهاد خرید و فروش، جفت نقاط شارژ/قیمت و همچنین دشارژ/قیمت استفاده می‌شود. منحنی‌های پیشنهاد خرید به ترتیب در شکل‌های (۹) تا (۱۱) برای ساعات ۵، ۹، و ۱۷ نشان داده شده است. در ساعت ۵ طبق شکل (۹) قیمت به ازای $\Gamma=0$ ، برابر $20/8 \text{ \$/MWh}$ و مقدار توان ۳۷ مگاوات است. لذا نقطه‌ی (۳۷، $20/8$) به‌عنوان پله اول منحنی پیشنهاد خرید و پله‌های بعدی به ترتیب نقاط (۴۵، $17/3$) و (۵۸، $16/6$) تعیین می‌شود. درواقع، هرچه قیمت برق کاهش پیدا می‌کند مقدار توان دریافتی از بازار افزایش می‌یابد. مابقی منحنی‌های پیشنهاددهی خرید نیز به همین ترتیب می‌باشد. منحنی‌های پیشنهاد فروش نیز به ترتیب در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) برای ساعات‌های ۱۰، ۱۴ و ۱۶ نشان داده‌شده است. برای ساعت ۱۰، طبق شکل (۱۲) به ازای $\Gamma=0$ قیمت $26/5$ دلار بر مگاوات و میزان توان ۱۱۵ مگاوات به‌دست‌آمده است. نقطه (۱۱۵، $26/5$) به‌عنوان پله اول منحنی پیشنهاد فروش انتخاب می‌شود. به همین ترتیب پله‌های دیگر (۱۳۲/۵، $28/6$) و (۱۴۰، $29/6$) هستند. سایر منحنی‌های فروش به همین ترتیب هستند.

سیستم است. مقدار سود سیستم برحسب پارامتر کنترلی Γ در شکل (۵) نشان داده شده است.

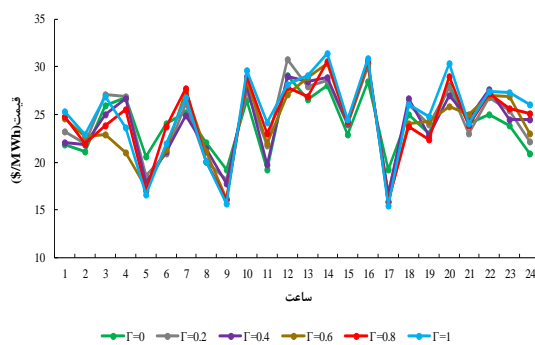


شکل ۴ - توان تولیدی باد به ازای سناریوهای مختلف

همان‌طور که مشاهده می‌شود، به ازای $\Gamma=0$ سود سیستم $46163/841$ دلار و به ازای $\Gamma=1$ سود سیستم برابر $42193/75$ دلار است که نشان‌دهنده ۸/۶ درصد کاهش در میزان سود سیستم است. شکل (۶) نیز قیمت به‌دست‌آمده مطابق با هر تکرار برای هر مقدار خاص Γ به ازای هر ساعت را نشان می‌دهد.

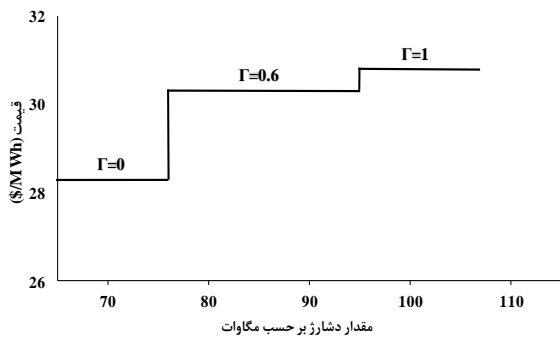


شکل ۵ - آنالیز حساسیت مقدار سود سیستم به ازای مقادیر مختلف Γ



شکل ۶ - نمودار قیمت به ازای مقادیر متفاوت Γ

مقادیر شارژ و دشارژ برای هریک از ذخیره‌سازها در شکل (۷) و (۸) برای سه مقدار مختلف Γ ارائه شده است. توان تولیدی به ازای مقادیر مثبت، و مقدار شارژ لازم برای ذخیره‌سازها با اعداد منفی بیان شده است. طبق برنامه‌ریزی به دست‌آمده، سیستم موردنظر در ساعات غیر پیک توان از



شکل ۱۴ - نمودار پیشنهاد فروش برای ساعت ۱۶

با به دست آمدن منحنی‌های پیشنهاد خرید و فروش، اپراتور در بازار شرکت کرده و میزان سود را در هر ساعت حداکثر می‌نماید. اعمال روش مقاوم پیشنهادی در هر ساعت منجر می‌شود که اپراتور با داشتن قابلیت اتخاذ یک رویکرد محافظه کارانه/ محافظه جویانه در هر ساعت، در بازار شرکت کند.

۳-۶- صحت‌سنجی نتایج

به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از آزمایش، زمان محاسباتی و سود نهایی سیستم مورد نظر به کمک روش مطرح شده با مراجع مشابه مقایسه شده است که در جدول ۵ نشان داده شده است.

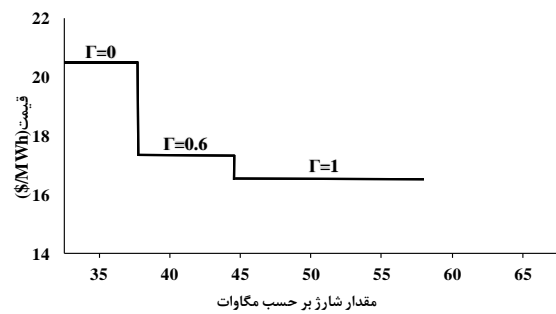
جدول ۵: مقایسه زمان محاسباتی مقاله اصلی و کارهای مشابه

مقاله اصلی	[۲۵]	[۱۷]	[۱۸]	کارهای مشابه
۷۲	۱۳۸	۵۳	۹۷	زمان محاسباتی (ثانیه)
۴۲۱۹۳	۴۳۵۸	۴۱۱۶	۴۲۰۸	سود نهایی (دلار)

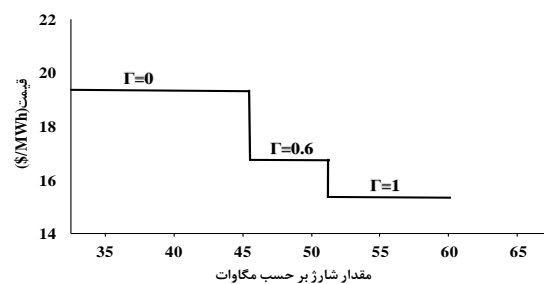
با مقایسه سود حاصل و زمان محاسباتی به دست آمده از آنالیز محاسبات صورت گرفته به کمک روش ترکیبی پیشنهادی با کارهای مشابه، قابل مشاهده است که استفاده از روش بهینه‌سازی ترکیبی تصادفی- مقاوم تحلیل مسائل تعیین استراتژی پیشنهاددهی بهینه را تسهیل بخشیده و همچنین شبیه‌سازی صورت گرفته عملکرد مناسب ذخیره‌سازهای انرژی هماهنگ شده برای کنترل نسبی انحرافات توان باد را نشان می‌دهد که سود نهایی به نسبت بیشتری را برای سیستم به همراه خواهد داشت.

۷- نتیجه‌گیری

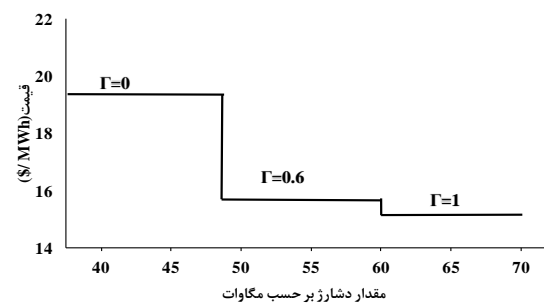
با توجه به افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه های قدرت، لزوم بهره‌گیری از منابع قابل انعطاف پربازده جهت کمک به ادغام این منابع پر نوسان در شبکه ضروری می‌باشد. تکنولوژی برق به گاز یکی از انواع پربازده



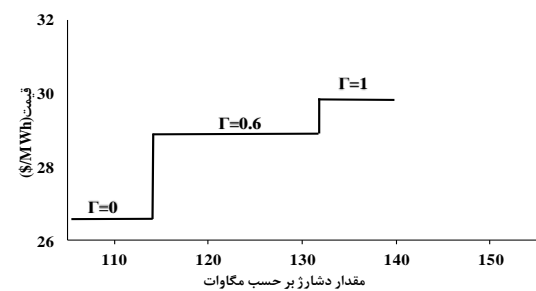
شکل ۹ - نمودار پیشنهاد خرید برای ساعت ۵



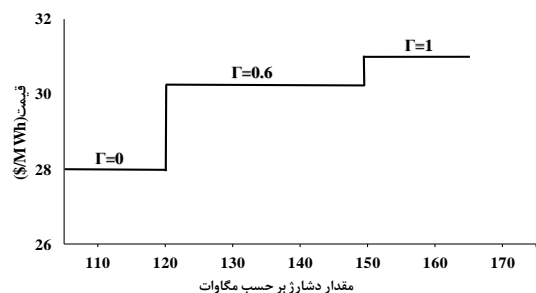
شکل ۱۰ - نمودار پیشنهاد خرید برای ساعت ۹



شکل ۱۱ - نمودار پیشنهاد خرید برای ساعت ۱۷



شکل ۱۲ - نمودار پیشنهاد فروش برای ساعت ۱۰



شکل ۱۳ - نمودار پیشنهاد فروش برای ساعت ۱۴

سود سیستم به ازای اتخاذ سطح محافظه‌کارانه‌تر در برابر عدم قطعیت قیمت برق می‌باشد.

- نمودارهای پیشنهادات خرید/فروش بهینه برای برنامه-ریزی شارژ/دشارژ سیستم‌های ذخیره انرژی و همچنین توان بادی به ازای Γ مختلف تعیین شده است. با افزایش Γ ، هر دو سیستم ذخیره‌ساز در ساعات کم‌قیمت برق بیشتر توسط بازار شارژ شده و در ساعات پیک قیمت مقدار دشارژ سیستم هماهنگ شده برای شرکت در بازارهای انرژی و گاز افزایش یافته است.

اندیسها

t اندیس مربوط به زمان

s اندیس مربوط به سناریو

ثابت‌ها

HR_d نرخ حرارتی CAES

VOM^C هزینه تعمیر و نگهداری منبسط کننده

CAES

VOM^{exp} هزینه تعمیر و نگهداری کمپرسور CAES

P_{max}^c حداکثر ظرفیت فشرده‌سازی کمپرسور

CAES

P_{max}^{exp} حداکثر ظرفیت تولید منبسط کننده

CAES

E_{min} حداقل مقدار ذخیره CAES

E_{max} حداکثر مقدار ذخیره CAES

E_{mi} مقدار اولیه‌ی ذخیره CAES

P_{min}^{P2G} حداقل توان بهره‌برداری از CAES

P_{max}^{P2G} حداکثر توان بهره‌برداری از CAES

G_{min} حداقل ذخیره مخزن مربوط به P2G

G_{max} حداکثر ذخیره مخزن مربوط به P2G

η_{P2G} بازده عملکرد P2G

π_t^{NG} قیمت گاز در زمان t

متغیرها

λ_t^e قیمت برق در زمان t

$P_{t,s}^{w,curt}$ توان تولیدی واحد بادی در زمان t به ازای

سناریو s ام

π_s احتمال هر سناریو

$P_{t,s}^{dis}$ توان دشارژ CAES در زمان t به ازای

سناریو s ام

$P_{t,s}^{ch}$ توان شارژ CAES در زمان t به ازای سناریو

s ام

$OC_{t,s}$ هزینه بهره‌برداری مربوط به CAES زمان t

به ازای سناریو s ام

$E_{t,s}$ مقدار انرژی ذخیره‌شده در CAES در

زمان t به ازای سناریو s ام

سیستم‌های ذخیره انرژی است که می‌تواند توان تولیدی از منابع بادی را به صورت حامل گاز طبیعی ذخیره کرده و به شبکه تحویل دهد. از این رو، در این مقاله یک استراتژی بهینه قیمت‌گذاری برای سیستم ترکیبی متشکل از مزارع بادی، ذخیره‌ساز برق به گاز و ذخیره‌ساز هوای فشرده تحت مالکیت مشترک پیشنهاد داده شد. با توجه به این مشارکت در بازار برق که توأم با عدم قطعیت ناشی از نوسانات قیمت برق است، یک استراتژی ترکیبی احتمالاتی-مقاوم به ترتیب برای مدل‌سازی توان بادی و قیمت برق ارائه شده است. مدل پیشنهادی بر روی یک سیستم هیبریدی پیاده و نتایج مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر کنترل مقاوم یک مقدار سود نهایی سیستم کاهش می‌یابد و در عوض اپراتور سیستم سطح محافظه‌کارانه‌ای را در برابر عدم قطعیت قیمت اتخاذ می‌کند. به طور کلی نتایج به دست آمده از این مقاله، به صورت خلاصه در ادامه آمده است:

- مشارکت و هماهنگی سیستم ترکیبی شامل P2G، CAES، و مزرعه بادی وابستگی بین بازارهای برق و گاز را افزایش داده و به اپراتور کمک می‌کند تا با شرکت در هر دو بازار سود نهایی سیستم هماهنگ شده را افزایش دهد.
- هماهنگی یکپارچه مزرعه بادی با دو منبع ذخیره انرژی مقیاس بزرگ با به کارگیری روش بهینه‌سازی ترکیبی تصادفی-مقاوم سبب کاهش محدودیت‌های توان بادی و هماهنگی هرچه بیشتر انرژی باد در سیستم قدرت می‌شود. به عبارت دیگر، کوپل شدن دو تکنولوژی برق به گاز و ذخیره‌ساز هوای فشرده در کنار مزرعه بادی تا حد زیادی به کنترل انحرافات توان باد کمک می‌کند.
- با افزایش پارامتر کنترلی (Γ) از صفر تا یک، سود سیستم بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش Γ که به معنای رسیدن به جواب بهینه با رویکرد محافظه‌کارانه بیشتر توسط مالک سیستم است، سود نهایی سیستم کاهش می‌یابد. طبق مقادیر سود به دست آمده برای سیستم مفروض به ازای Γ های مختلف، در $\Gamma = 0$ سود کلی سیستم برابر $46163/841$ دلار محاسبه شده است، در حالی که مقدار سود به ازای بیشترین رویکرد محافظه‌کارانه (یعنی $\Gamma = 1$) برابر 42193 دلار است که در واقع به معنی کاهش $8/5\%$

توان دریافتی از نیروگاه بادی برای شارژ P2G در زمان t به ازای سناریو S ام	$P_{t,s}^{P2G,w}$	مقدار گاز تولیدی توسط P2G در زمان t به ازای سناریو S ام	$P_{t,s}^{P2G, gas}$
توان فروخته شده به بازار توسط واحد بادی در زمان t به ازای سناریو S ام	$P_{t,s}^{w, da}$	توان خریداری شده از بازار برای P2G در زمان t به ازای سناریو S ام	$P_{t,s}^{P2G, da}$
متغیرهای باینری مربوط به CAES	$u_{t,s}^{ch}, u_{t,s}^{dis}$	توان مصرفی کلی P2G در زمان t به ازای سناریو S ام	$P_{t,s}^{P2G, con}$

مراجع

- [۱] محمد علیزاده، میثم جعفری نوکندی و یامین سلطان مرادی، "مدلسازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره‌ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخ‌گویی بار"، مدلسازی در مهندسی. شماره ۱۷، پاییز ۱۳۹۸، صفحه ۲۲۶-۲۱۵.
- [2] M. Hemmati, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Abapour, and A. Anvari-Moghaddam, "Optimal Chance-Constrained Scheduling of Reconfigurable Microgrids Considering Islanding Operation Constraints", IEEE Systems Journal, 2020.
- [3] Y. Xu, T. Ding, Q. Ming, and P. Du, "Adaptive dynamic programming based gas-power network constrained unit commitment to accommodate renewable energy with combined-cycle units", IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019. pp. 118-129.
- [۴] جمشید آقائی، امین رحیمی رضایی و محمد رضا کریمی، "هماهنگی نیروگاه‌های بادی و دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیستم قدرت در مسئله برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها با استفاده از بهینه‌سازی استوار"، مدل سازی در مهندسی. شماره ۱۶، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۲۲۰-۲۰۷.
- [5] Yang, Z., C. Gao, and M. Zhao, "The Optimal Investment Strategy of P2G Based on Real Option Theory", IEEE Access, Vol. 8, 2019, pp.127156-127166.
- [6] A. Lewandowska-Bernat, and U. Desideri, "Opportunities of power-to-gas technology in different energy systems architectures", Applied energy, Vol. 228, 2018, pp. 57-67.
- [7] V. Heinisch, "Effects of power-to-gas on power systems: A case study of Denmark", 2015 IEEE Eindhoven Power Tech, 2015.
- [8] B. Lyseng, T. Niet, J. English, V. Keller, K. Palmer-Wilson, B. Robertson, A. Rowe, and P. Wild, "System-level power-to-gas energy storage for high penetrations of variable renewables", international journal of hydrogen energy, Vol. 43, No. 4, 2018, pp. 1966-1979.
- [9] J. Yang, N. Zhang, Y. Cheng, Ch. Kang, and Q. Xia, "Modeling the Operation Mechanism of Combined P2G and Gas-Fired Plant With CO₂ Recycling", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No.1, 2018, pp. 1111-1121.
- [10] Y. Li, W. Liu, M. Shahidepour, F. Wen, K. Wang, and Y. Huang, "Optimal operation strategy for integrated natural gas generating unit and power-to-gas conversion facilities", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 9, No.4, 2018, pp. 1870-1879.
- [11] M. Nazari-Heris, M. A. Mirzaei, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Marzband, and S. Asadi, "Economic-environmental effect of power to gas technology in coupled electricity and gas systems with price-responsive shiftable loads", Journal of Cleaner Production, Vol. 244, 2020, pp. 118769.
- [12] X. Yu, G. Zhu, S. Wang, and Y. Ding, "Economic impact of power to gas in integrated electricity and gas system with high wind penetration", 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2018.
- [13] M. Budt, D. Wolf, R. Span, and J. Yan, "A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments", Applied energy, Vol. 170, 2016, pp. 250-268.
- [14] Cao, X., J. Wang, and B. Zeng, "Networked microgrids planning through chance constrained stochastic conic programming", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No.6, 2019, pp. 6619-6628.

- [15] A. N. Ghalelou, A. P. Fakhri, S. Nojavan, M. Majidi, and H. Hatami, "A stochastic self-scheduling program for compressed air energy storage (CAES) of renewable energy sources (RESs) based on a demand response mechanism", *Energy conversion and management*, Vol. 120, 2016, pp. 388-396.
- [16] M. Abbaspour, M. Satkin, B. Mohammadi-Ivatloo, F. H. Lotfi, and Y. Noorollahi, "Optimal operation scheduling of wind power integrated with compressed air energy storage (CAES)", *Renewable Energy*, Vol. 51, 2013, pp. 53-59.
- [17] C. He, T. Liu, L. Wu, and M. Shahidepour, "Robust coordination of interdependent electricity and natural gas systems in day-ahead scheduling for facilitating volatile renewable generations via power-to-gas technology", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 5, No. 3, 2017, pp. 375-388.
- [18] S. Ghavidel, M. J. Ghadi, A. Azizvahed, J. Aghaei, L. Li, and J. Zhang, "Risk-constrained bidding strategy for a joint operation of wind power and CAES aggregators", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 11, No.1, 2019, pp. 457-466.
- [19] E. Akbari, R. A. Hooshmand, M. Gholipour, and M. Parastegari, "Stochastic programming-based optimal bidding of compressed air energy storage with wind and thermal generation units in energy and reserve markets", *Energy*, Vol. 171, 2019, pp. 535-546.
- [20] Jadidbonab, M., H. Mousavi-Sarabi, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Risk-constrained scheduling of solar-based three state compressed air energy storage with waste thermal recovery unit in the thermal energy market environment", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 13, No. 6, 2018, pp. 920-929.
- [21] Mazza, A., E. Bompard, and G. Chicco, "Applications of power to gas technologies in emerging electrical systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 92, 2018, pp. 794-806.
- [22] M. Hemmati, B. Mohammadi-Ivatloo, S. Ghasemzadeh, and E. Reihani, "Risk-based optimal scheduling of reconfigurable smart renewable energy based microgrids", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 101, 2018, pp. 415-428.
- [۲۳] نیما امجدی، بهداد وطنی و حسین شریف زاده، "آرایش بهینه تصادفی تولید برای شرکتهای مولد با در نظر گرفتن بازار انرژی و قراردادهای دوجانبه"، *مدل سازی در مهندسی*، شماره ۹، زمستان ۱۳۹۰، صفحه ۲۸-۲۱.
- [24] C. Gu, C. Tang, Y. Xiang, and D. Xie, "Power-to-gas management using robust optimisation in integrated energy systems", *Applied Energy*, Vol. 236, 2019, pp. 681-689.
- [25] W. Cai, R. Mohammaditab, G. Fathi, K. Wakil, A. G. Ebadi, and N. Ghadimi, "Optimal bidding and offering strategies of compressed air energy storage: A hybrid robust-stochastic approach", *Renewable Energy*, Vol. 143, 2019, pp. 1-8.
- [26] Y. Zhou, Z. Wei, G. Sun, K. W. Cheung, H. Zang, and S. Chen, "A robust optimization approach for integrated community energy system in energy and ancillary service markets", *Energy*, Vol. 148, 2018, pp. 1-15.
- [27] www.energyonline.com.