نشریه علمی- پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران
Iranian Electric Industry Journal
Of Quality And Productivity

سال سوم شماره پنجم بهار و تابستان ۱۳۹۳
Vol 3 –No.5 Spring and Summer

استراتژی نوین پیشنهاددهی واحدهای بادی و تلمبه ذخیره‌ای بر مبنای روش بهینه‌سازی مقاوم

یوسف پرزیوند، کارشناسی ارشد، وحید وحیدی‌نسب*، استادیار

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- پردیس فنی و منهدسی شهید عباسپور دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران

*v_vahidinasab@sbu.ac.ir

چکیده: **این مقاله، روشی نوین برای تدوین استراتژی پیشنهاددهی مالک یک نیروگاه تجدیدپذیرِ بادی و تلمبه ذخیره‌ای را ارائه می‌نماید. تولیدکننده مذکور از نوع قیمت‌پذیر بوده و در بازار انرژی از نوع حوضچه توان شرکت می‌نماید. مدل ارائه شده قادر است تا به طور هم‌زمان سه عدم‌قطعیت تأثیرگذار بر پیشنهاددهی، یعنی عدم‌قطعیت‌های مربوط به قیمت برق، توان تولیدی واحدهای بادی و نیز دسترس‌پذیری واحدها را در نظر بگیرد. ویژگی بارز مدل ارائه شده این است که در این روش دیگر نیازی به پیش‌بینی متغیرها و پارامترهای دارای عدم‌قطعیت نمی‌باشد؛ بلکه به‌جای آن برای پارامترهای نامعین یک بازه موسوم به «بازه مطمئن» تعریف می‌شود. سپس، این بازه‌ها به طور متوالی به بازه‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شوند، به‌طوری که امکان تعریف و نیز حل ساده‌تر مجموعه‌ای از مسائل برنامه‌ریزی مقاوم عدد صحیح فراهم گردد. ویژگی دیگر روش بهینه‌سازی مقاوم به‌دست آوردن جواب‌های ممکن و بهینه به ازای رخداد بدترین حالت ممکن برای پارامترهای دارای عدم‌قطعیت در بازه عدم‌قطعیت تعریف شده برای آن‌ها می‌باشد. مدل ارائه شده در این مقاله به گونه‌ای است که با حل آن، به طور مستقیم اطلاعات کافی برای ساختن منحنی‌های پیشنهاددهی ساعتی واحدها ایجاد می‌شود. به منظور آزمایش مدل پیشنهادی، از یک شبکه نمونه استفاده شده و نتایج حاصل از آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.**

واژه‌های کلیدی: **مزرعه بادی، واحد آبی تلمبه ذخیره‌ای، بهینه‌سازی مقاوم، منحنی پیشنهاد تولید، بازار برق.**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۳/۰۴/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر وحید وحیدی‌نسب

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران– تهرانپارس – دانشگاه شهید بهشتی – پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

Archive of SID

www.SID.ir

فهرست علائم و اختصارات

الف) شاخص‌ها

H	شاخص شمارنده ساعت در افق برنامه‌ریزی.
K	شاخص شمارنده گام‌های جاروب بازه قیمت.
pp	شاخص شمارنده گام‌های جاروب بازه توان بادی.
ff	شاخص گام‌های جاروب دسترس‌پذیری واحدها.

ب) پارامترها

π_h	قیمت بازار لحظه‌ای در ساعت h [$].
w	ضریب جریمه عدم تعادل تولید.
η	بازده نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای.
$\underline{v}^u, \overline{v}^u$	حداکثر و حداقل ظرفیت منبع بالادستی [MW].
$\underline{v}^l, \overline{v}^l$	حداکثر و حداقل ظرفیت منبع پایین‌دستی [MW].
vf^l, vf^u	میزان انرژی در منبع بالادستی و پایین‌دستی در پایان افق برنامه‌ریزی [MWh].
$\underline{d}^p, \overline{d}^p$	حداقل و حداکثر مصرف واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای در حالت پمپی [MW].
c^{sd}, c^{su}	هزینه راه‌اندازی و خاموش کردن واحدهای آبی [$].
g^p	حداکثر تولید واحدها در حالت ژنراتوری [MW].
N	تعداد واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای.
A_h	تعداد واحدهای در دسترس نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای.
d_h	پله‌های تغییر قیمت در بازه نامعینی [$].
Δ_h	پله‌های تغییر توان بادی در بازه نامعینی [MW].
$\Gamma_2, \Gamma_1, \Gamma_0$	به ترتیب بودجه عدم‌قطعیت قیمت، توان باد و دسترس‌پذیری واحدها.
J_2, J_1, J_0	مجموعه شامل ساعات عدم‌قطعیت قیمت، توان بادی و دسترس‌پذیری واحدها.

پ) متغیرها

g_h^w	تولید مزرعه بادی در ساعت h [MW].
x_h^w	پیشنهاد تولید مزرعه بادی به در ساعت h [MW].
g_h^p	تولید تلمبه‌ذخیره‌ای در ساعت h [MW].
d_h^p	مصرف تلمبه‌ذخیره‌ای در ساعت h [MW].
y_h	تعداد واحدهای تلمبه‌ذخیره ای روشن‌شده ساعت h.
z_h	تعداد واحدهای خاموش‌شده در ساعت h.
x_h^p	پیشنهاد تولید تلمبه‌ذخیره‌ای در ساعت h [MWh].
x_h^{wp}	پیشنهاد تولید هم‌زمان دو نیروگاه [MW].
v_h^l, v_h^u	انرژی منبع بالا و پایین‌دستی در ساعت h [MWh].
u_h	تعداد واحدهای روشن در ساعت h.
t_h	متغیر باینری برای تعیین حالت‌کاری تلمبه‌ذخیره‌ای.
s_h	متغیر باینری برای عدم‌قطعیت ساعتی توان بادی.
$liny_h$	متغیر باینری کمکی
ss_h	متغیر باینری برای عدم‌قطعیت واحدهای پمپی.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، تمایل به استفاده از انرژی باد به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر، ارزان و بزرگ مقیاس به سرعت در حال گسترش است. اما افزایش نفوذ نیروگاه‌های بادی در سیستم قدرت، با توجه به ماهیت نوسانی توان خروجی این نیروگاه‌ها امر بهره‌برداری ایمن و اقتصادی از شبکه‌های قدرت را با مشکل روبه‌رو کرده است. از این رو، تلاش‌های بسیاری از سوی محققان برای پیدا کردن راه‌کاری به منظور کاهش اثر نوسان توان نیروگاه‌های بادی بر روی سیستم قدرت صورت گرفته است. در این راستا، راه‌کارهایی مانند افزایش دقت پیش‌بینی توان تولیدی واحدهای بادی، استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی و حتی تغییر رژیم بهره‌برداری سیستم قدرت در حضور مولدهای بادی پیشنهاد شده است.

به طور معمول، مرسوم است که مالکین نیروگاه‌های بادی از نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای به دلیل سرعت پاسخ‌گویی مناسب و نیز به عنوان یک ذخیره‌ساز مقیاس بزرگ، برای جبران نوسان تولید توان مزرعه بادی و در واقع به جهت کاهش خطرپذیری مالی خود استفاده نمایند. در واقع، مالک مجموعه اشاره شده باید برای فروش انرژی تولیدی خود در بازار برق حاضر شود، که حضور تلفیقی این دو مجموعه، کمک خواهد کرد تا بتواند استراتژی مناسبی برای جبران هزینه‌های ناشی از عدم‌تعادل ناشی از تغییر تولید واحدهای بادی اتخاذ نماید و به این ترتیب حاشیه سود مطلوبی را برای خود تأمین نماید.

در کنار ماهیت نوسانی تولید واحدهای بادی که نوعی از عدم-قطعیت در تصمیم‌گیری را ایجاد می‌کند، عدم اطلاع از قیمت بازار روزِ بعد و نیز خروج‌های اضطراری و بدون برنامه واحدها نیز از منابع دیگر عدم‌قطعیت در تصمیم‌گیری به حساب می‌آیند که بر میزان سود مالک مجموعه نیروگاهی بادی-تلمبه ذخیره‌ای تأثیر دارند. لذا توجه ویژه به این عدم‌قطعیت‌ها در تدوین استراتژی بهینه سرمایه‌گذار حائز اهمیت اساسی می‌باشد [۱].

در ادامه مقاله و در بخش دوم، به مرور منابع و مراجع مرتبط با حوزه مطالعه پرداخته خواهدشد. در بخش سوم، مدل‌سازی مسئله پیشنهاددهی استراتژیک به همراه مدل پیشنهادی این مقاله آورده شده است. شبیه‌سازی مدل پیشنهادی و ارائه و تحلیل نتایج حاصل از آن موضوع بخش چهارم این مقاله بوده و نتیجه‌گیری مقاله در بخش پنجم ارائه شده است.

۲- مروری بر منابع و مراجع

در مرجع [۲]، با استفاده از روش تصادفی سناریو-محور به مطالعه هماهنگی بین نیروگاه‌های بادی و تلمبه ذخیره‌ای در بازار انرژی

Archive of SID

www.SID.ir

پرداخته شده است. مدل سناریو-محور ارائه شده به گونه‌ای است که نیاز به تخمین تابع توزیع متغیر دارای عدم‌قطعیت می‌باشد. ضمناً، در این مرجع قابلیت‌اطمینان واحدها در مدل ارائه شده در نظر گرفته نشده است. مراجع [۱] و [۳] به تدوین استراتژی بهینه واحدهای حرارتی مرسوم با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت قیمت بازار پرداخته و براساس یک مدل چندهدفه، به دنبال حصول مصالحه‌ای بین خطرپذیری و سود بوده‌اند. مسئله بهینه‌سازی معرفی شده در این مراجع نیز به صورت برنامه‌ریزی تصادفی سناریو-محور بوده که از جمله مشکلات این روش زمان‌بر بودن حل مسئله می‌باشد. در مراجع [۴] و [۵] نیز به ارزیابی خطرپذیری واحدهای تولیدی در یک سیستم قدرت تجدیدساختاریافته پرداخته شده است. ابزارهای معرفی شده برای اندازه‌گیری خطرپذیری VaR و $CVaR$ می‌باشد. روش‌های مورد اشاره برای مدل‌سازی خطرپذیری و تدوین استراتژی پیشنهاد بهینه، از جمله روش‌های سناریو- محور بوده که علاوه بر نیاز به تخمین توزیع عدم‌قطعیت‌ها، از لحاظ اجرای مسئله نیز بسیار زمان‌بر هستند.

به منظور مواجهه با اشکال یاد شده، مرجع [۶] از جمله اولین مقالاتی است که کاربرد روش بهینه‌سازی مقاوم، به عنوان ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی تحت شرایط وجود عدم‌قطعیت، را در حوزه مطالعات بهره‌برداری سیستم‌های قدرت را مورد توجه قرار داده است. دلیل برتری روش بهینه‌سازی مقاوم در مقابل سایر روش‌های بهینه‌سازی در شرایط وجود عدم‌قطعیت، مدل‌سازی آسان، عدم نیاز به دانستن توزیع احتمالی عدم‌قطعیت‌ها و همچنین زمان بسیار کم برای حل مسئله می‌باشد.

در مرجع [۶]، از روش بهینه‌سازی مقاوم برای مدل‌سازی مسئله پیشنهاددهی آن هم برای واحدهای حرارتی استفاده شده است. مدل پیشنهاددهی تولید در بازار روزِ بعد معرفی شده در این مرجع برای واحدهای حرارتی کوچکِ قیمت‌پذیر مناسب بوده و برای مواجهه با منابع دارای تولید متغیر و نوسانی مانند منابع انرژی تجدیدپذیری همچون واحدهای بادی و تلمبه ذخیره‌ای مناسب نمی‌باشد. نویسندگان این مرجع تنها عدم‌قطعیت قیمت برق را در نظر گرفته و به سایر عدم‌قطعیت‌های تأثیرگذار اشاره نکرده‌اند. این در حالیست که عمده مقالات ارائه شده در حوزه کاربرد بهینه‌سازی مقاوم در سیستم‌های متشکل از واحدهای بادی و تلمبه ذخیره‌ای، این موضوع را از دید بهره‌بردار سیستم قدرت و برای برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن سیستم‌های متشکل از این واحدها بررسی نموده‌اند [۶]-[۱۵].

از جمله، مرجع [۷] روشی مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم را برای حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی از منظر بهره‌بردار سیستم و با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت تولید واحدهای بادی پیشنهاد می‌دهد. در این مقاله، تابع هدف مسئله به صورت حداقل‌سازی هزینه کل سیستم بود و مسئله با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت مربوط به توان خروجی واحدهای حاضر در مزرعه بادی مورد بررسی قرار گرفته است. مسئله حاصل با استفاده از اصول مربوط به بهینه‌سازی مقاوم مدل‌سازی و حل شده است. در این شبکه، برای کاهش اثر نوسان توان از واحدهای آبی برای هماهنگی با مزرعه بادی استفاده شده است.

مرجع [۸] از روش مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم برای تصمیم‌گیری بهینه در زمینه مشارکت واحدها از دید بهره‌بردار سیستم استفاده کرده و در این راستا، عدم‌قطعیت تولید مزارع بادی و نیز تغییرات کشسانی تقاضا نسبت به قیمت بازار نیز مور توجه قرار گرفته است. مرجع [۹] نیز یکی دیگر از مقالاتی است که از روش بهینه‌سازی مقاوم برای حداقل‌سازی میزان پشیمانی ناشی از برآورده نشدن انتظارات حاصل از مشارکت واحدها در حضور واحدهای بادی استفاده نموده است. به طور مشابه، مراجع [۱۰]-[۱۵] نیز کاربردهای دیگری از روش بهینه‌سازی مقاوم در حل مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها را در شرایط حضور و یا عدم حضور واحدهای بادی را گزارش نموده‌اند. عدم‌قطعیت در نظر گرفته شده در این مراجع عموماً شامل عدم‌قطعیت قیمت، بار الکتریکی و توان خروجی مزرعه بادی بوده است.

مطابق با مطالعه صورت گرفته در این حوزه و بر اساس مراجع بررسی شده، مهم‌ترین نوآوری این مقاله نسبت به سایر مراجع مرتبط در این زمینه، مدل‌سازی مسئله پیشنهاددهی استراتژیک مالک یک نیروگاه تلفیقی بادی و تلمبه ذخیره‌ای به صورت بهره‌برداری هم‌زمان و در قالب یک مسئله بهینه‌سازی مقاوم می‌باشد. ویژگی جدید و بارز دیگر مدل ارائه شده، امکان در نظر گرفتن توأم سه عدم‌قطعیت تأثیرگذار بر پیشنهاددهی یعنی عدم‌قطعیت‌های مربوط به قیمت برق، تولید توان واحدهای بادی و نیز قابلیت‌اطمینان واحدها از منظر دسترس‌پذیری در یک مدل واحد است.

۳- مدل‌سازی مسئله

امروزه، عدم‌قطعیت جزء جدایی‌ناپذیر و تأثیرگذار بسیاری از مسائل و تصمیم‌گیری‌های انجام شده در سیستم‌های واقعی است. این عدم‌قطعیت‌ها عمدتاً به دلایلی از جمله خطای پیش‌بینی مقادیر آینده یک پارامتر و یا به دلیل خطای ناشی از اندازه‌گیری حاصل می‌شوند.

از جمله روش‌های کلاسیک مرسوم برای مواجهه با عدم‌قطعیت‌ها، تحلیل حساسیت[۱] و بهینه‌سازی تصادفی[۲] می‌باشند. در روش اول، اثر عدم‌قطعیت در مدل نادیده گرفته شده و پس از آن، تحلیل حساسیت برای رسیدن به جواب اجرا می‌شود. روش تحلیل حساسیت فقط شاخصی برای آزمایش خوب بودن جواب است و لذا برای تولید جواب‌هایی که نسبت به تغییرات پارامتر مقاوم هستند، مفید نیست. همچنین، تحلیل حساسیت در مدل‌های با تعداد پارامتر غیرقطعی زیاد غیرممکن است.

اما در روش بهینه‌سازی تصادفی، برای بیان ممکن بودن جواب از قیود احتمالاتی استفاده می‌کنیم. در این دسته از مدل‌ها فرض می‌شود که توزیع احتمالی پارامترهای غیرقطعی در اختیار است. اگرچه این مدل، مدل نسبتاً کاملی است ولی چند مشکل اساسی دارد [۱۶]: (الف) به ندرت می‌توان توزیع احتمالی دقیق پارامتر غیرقطعی را

Archive of SID

www.SID.ir

به‌دست آورد؛ (ب) حتی اگر توزیع احتمالی پارامتر موردنظر نیز در اختیار باشد، از نظر حجم محاسبات و زمان حل قیود احتمالاتی چالشی بزرگ وجود دارد؛ (ج) قیود احتمالاتی تحدب مسئله را از بین می‌برند و طبیعی است که باعث پیچیده‌تر شدن مسئله می‌شوند.

اما از جمله راه‌کارهای نوین برای رفع موانع و مشکلات یاد شده در روش‌های کلاسیک حل مسائل دارای پارامتر غیرقطعی، روش بهینه‌سازی مقاوم[۳] می‌باشد [۱۶] که در ادامه تشریح می‌شود.

۳-۱- بهینه‌سازی مقاوم

بهینه‌سازی مقاوم روش متفاوتی را برای حل مسائل شامل پارامترهای غیرقطعی ارائه می‌کند. چنان‌که توضیح داده شد، در مسئله بهینه‌سازی مقاوم دیگر نیازی به دانستن تابع توزیع پارامترهای غیرقطعی نبوده و تنها کافی‌ست محدوده تغییرات این پارامترها را داشته باشیم. در طراحی این روش دو ضابطه مهم در نظر گرفته شده است:

الف) امکان‌پذیری محاسبات: از نقطه نظر تئوری، مطلوب است اگر مسئله اصلی در زمانی معقول و ممکن قابل حل باشد، مسئله مقاوم نظیر آن هم این ویژگی را داشته باشد.

ب) کران‌های احتمالاتی: از نظر احتمالی، هنگامی که پارامترهای غیرقطعی از توزیع‌های احتمالی عمومی پیروی می‌کنند، بتوان تضمین کرد که جواب مسئله ممکن و دست‌یافتنی است.

به طور معمول، ساختار کلی مسائل بهینه‌سازی خطی به صورت زیر می‌باشد [۱۷]:

$$\begin{aligned} &Maximize \quad C^T x \\ &\text{subject to:} \\ &a_i x \le b_i, \qquad \forall i \in I, \forall a_i \in A,\ \forall b_i \in B. \end{aligned} \tag{۱}$$

در رابطه (۱)، فرض بر این است که فقط عناصر ماتریس A دارای عدم‌قطعیت هستند. بدون از دست دادن جامعیت مسئله، فرض بر این است که بردار ضرایب تابع هدف، یعنی بردار C، عدم‌قطعیت ندارد. اگرچه با وجود عدم‌قطعیت در ضرایب تابع هدف نیز می‌توان از جایگزینی تابع هدف با بهینه‌سازی یک متغیر کمکی مانند Z استفاده نموده و در عوض قید $Z - C^T x \le 0$ را به مسئله اضافه کرد.

حال، سطر i از ماتریس ضرایب A را در نظر بگیرید و فرض کنید مجموعه J_i شامل ضرایب سطر i باشد که در معرض عدم‌قطعیت قرار دارند. هر عنصر (المان) مثل a_{ij} که در آن j از مجموعه J_i انتخاب شده به صورت یک متغیر متقارن و کران‌دار تصادفی $\tilde{a}_{ij}$ مدل می‌شود. این متغیر مقداری عددی در بازه $\left[a_{ij} - \dot{a}_{ij}, a_{ij} + \dot{a}_{ij}\right]$ را اختیار می‌کند.

۳-۱-۱- روش سویستِر[۴]

برای مسئله بهینه‌سازی دارای عدم‌قطعیت تعریف شده در رابطه (۱)، بیان ریاضی روش سویستِر به صورت زیر است [۱۶]:

$$Maximize \quad C^T x \tag{۲}$$

subject to:

$$\sum_j a_{ij} x_j + \sum_{j \grave{o} J_i} \dot{a}_{ij} y_j \le b_i, \qquad \forall i \tag{۳}$$

$$y_j \le x_j \le y_j \qquad \forall j \tag{۴}$$

$$y \ge ۰ \tag{۵}$$

اگر فرض شود x^* جواب بهینه روابط بالا باشد، در بهینگی جواب، $y_j = \left|x_j^*\right|$ خواهد بود، بنابراین داریم:

$$\sum_j a_{ij} x_j^* + \sum_{j \in J_i} \dot{a}_{ij} \left|x_j^*\right| \le b_i \quad ,\forall i \tag{۶}$$

بنابراین، برای هر مقدار داده غیرقطعی $\tilde{a}_{ij}$، جواب مسئله ممکن و دست‌یافتنی خواهد ماند، که این جواب مقاوم می‌باشد؛ طوری که رابطه (۷) ممکن و دست‌یافتنی بودن جواب را برای هر رخداد پارامتر غیرقطعی نشان می‌دهد:

$$\begin{aligned} &\sum_j \tilde{a}_{ij} x_j^* = \sum_j a_{ij} x_j^* + \sum_{j \in J_i} \eta_{ij} \dot{a}_{ij} x_j^* \le \\ &\le \sum_j a_{ij} x_j^* + \sum_{j \in J_i} \dot{a}_{ij} \left|x_j^*\right| \le b_i \qquad \forall i \end{aligned} \tag{۷}$$

مدل‌سازی فوق برای بهینه‌سازی مقاوم، به روش سویستِر معروف است. ایراد اصلی این روش عدم امکان کنترل تعداد ضرایب نامعین است.

۳-۱-۲- روش بِن-تال[۵] و نِمیرُفسکی[۶]

مدل بهینه‌سازی مقاوم پیشنهادی بِن-تال و نِمیرُفسکی، مدلی خطی می‌باشد و ضمن فراهم‌سازی امکان کنترل تعداد ضرایب نامعین، برای بهینه‌سازی مقاوم مسائل دارای متغیر گسسته نیز مناسب می‌باشد.

برای آن که مدل بهینه‌سازی مقاوم را بر اساس این روش پیاده‌سازی کنیم، لازم است پارامتر $\Gamma_۱$ را به عنوان بودجه عدم‌قطعیت تعریف کنیم. این پارامتر تعداد پارامترهایی که عدم‌قطعیت دارند را مشخص می‌کند. به طور مثال، مسئله بهینه‌سازی خطی رابطه (۱)، فرض این است که عناصر ماتریس C دارای عدم‌قطعیت باشند، لذا در اینجا بودجه عدم‌قطعیت تعداد عناصر دارای عدم‌قطعیت ماتریس C است و مقداری را از بازه $\left[۰, |J_۱|\right]$ برمی‌گزیند که $J_۱ = \left\{j \,\middle|\, d_j > ۰\right\}$.

بودجه عدم‌قطعیت در واقع سطح مقاوم بودن مسئله را کنترل می‌کند. اگر $\Gamma_۱ = ۰$ باشد، تأثیر عدم‌قطعیت پارامترهای نامعین مسئله در نظر گرفته نمی‌شود. اگر $\Gamma_۱ = |J_۱|$ باشد، در این صورت تأثیر عدم‌قطعیت تمامی پارامترهای نامعین مسئله در نظر گرفته می‌شود.

حال می‌توان مسئله بهینه‌سازی مقاوم را به صورت زیر تعریف کرد [۱۸]:

$$Maximize \quad \sum_j c_j x_j - z_۱ \Gamma_۱ - \sum_{j \in J_۱} q_{۱j} \tag{۸}$$

subject to:

$$z_۱ + q_{۱j} \ge d_j y_j \qquad \forall j \in J_۱ \tag{۹}$$

Archive of SID

www.SID.ir

$$x_j \le y_j \qquad \forall j \qquad (۱۰)$$

$$q_{۱} \ge ۰ \qquad \forall j \in j_{۱} \qquad (۱۱)$$

$$y_j \ge ۰ \qquad \forall j \qquad (۱۲)$$

$$z_{۱} > ۰ \qquad (۱۳)$$

$$a_i x \le b_i \qquad \forall i \in I \qquad (۱۴)$$

قیدهای اضافه شده به مدل بالا با استفاده از تئوری دوگان و نیز با خطی‌سازی به‌دست آمده است. در مدل بهینه‌سازی مقاوم بالا فرض شده که پارامتر c_j دارای عدم‌قطعیت است و این پارامترها مقداری از بازه $[c_j\,,\ c_j + d_j]$ اختیار می‌کند. متغیرهای $z_{۱}$، $q_{۱j}$ و y_j به ترتیب متغیرهای دوگان و کمکی هستند تا پارامتر دارای نامعینی، بدترین مقدارها را برگزینند.

۳-۲- مدل مبتنی بر بهینه‌سازی مقاومِ مزرعه بادی

با توجه به مدل‌های ارائه شده در بخش (۳-۱)، اکنون می‌توان مدل تعیین استراتژی پیشنهاددهی نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای با رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم را تعریف کرد. در این راستا، در این بخش و بخش بعد، مدل بهینه‌سازی مقاوم مسئله مذکور برای هر یک از نیروگاه‌های بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای در دو حالت بهره‌برداری مجزا و بهره‌برداری هم‌زمان اشاره شده در مرجع [۱۹] ارائه خواهد شد.

همان‌طورکه در بخش‌های قبل اشاره شد، مسئله تدوین استراتژی پیشنهاددهی مالک مزرعه بادی در بازار روزِ بعد، با عدم‌قطعیت‌های قیمت انرژی (ناشی از خطای پیش‌بینی)، توان تولیدی نیروگاه بادی (ناشی از عدم‌قطعیت سرعت باد و به دنبال آن خطای پیش‌بینی) و نیز دسترس‌پذیری واحدهای بادی مواجه است. وجود این عدم‌قطعیت‌ها، استراتژی پیشنهاددهی را تحت تأثیر قرار خواهد داد و لذا برای مواجهه با آن، در ادامه مدل مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم برنامه‌ریزی واحدهای بادی ارائه خواهد شد. در این‌جا باید اشاره شود که در این مقاله در مسئله برنامه‌ریزی مزرعه بادی از توان خروجی به جای سرعت باد استفاده شده است. مدل ریاضی مسئله به صورت زیر می‌باشد:

$$Maximize \quad \sum_{h\in H}\left[\pi_h g_h^w - w\pi_h\left|g_h^w - x_h^w\right|\right] - z_0\Gamma_0 - \sum_{h\in J_0}^{H} q_{0h} \qquad (۱۵)$$

subject to :

$$۰ \le x_h^w \le \overline{g}^w, \qquad \forall h \in H \qquad (۱۶)$$

$$z_o + q_{oh} \ge d_h.yau_h, \qquad \forall h \in J_o \qquad (۱۷)$$

$$q_{oh} \ge ۰, \qquad \forall h \in J_o \qquad (۱۸)$$

$$z_o \ge ۰ \qquad (۱۹)$$

$$yau_h \ge ۰, \qquad \forall h \in H \qquad (۲۰)$$

$$g_h^w - w.\left|g_h^w - x_h^w\right| \le yau_h, \qquad \forall h \in H \qquad (۲۱)$$

$$۰ \le g_h^w \le \underline{g}_h^{w\,max} - s_h.\Delta_h, \qquad \forall h \in J_{۱} \qquad (۲۲)$$

$$\sum_{h\in H} s_h \le \Gamma_{۱} \qquad (۲۳)$$

$$۰ \le s_h \le ۱, \qquad \forall h \in H \qquad (۲۴)$$

در اینجا، پارامتر Γ_o بودجه عدم‌قطعیت قیمت و یا به عبارتی ساده‌تر تعداد ساعت‌هایی که قیمت عدم‌قطعیت دارد را نشان می‌دهد. پارامتر d_h نیز در ادامه در الگوریتم تشریح و نحوه مقداردهی آن مشخص می‌شود. در روابط اخیر، قیدهای (۱۷) تا (۲۱) مربوط به مدل‌سازی عدم‌قطعیت قیمت و متناظر با مسئله بهینه‌سازی مقاوم می‌باشد. قیدهای (۲۲) تا (۲۴) نیز متناظر با مدل‌سازی عدم‌قطعیت در توان باد و مسئله بهینه‌سازی مقاوم متناظر با آن می‌باشد.

همچنین در این روابط، $\Gamma_{۱}$ بودجه عدم‌قطعیت توان تولیدی واحد بادی بوده و به عبارت بهتر، تعداد ساعت‌هایی که تولید واحد بادی عدم‌قطعیت دارد را نشان می‌دهد. همچنین، $\underline{g}_h^{w\,min}$ حداقل توان باد را در هر ساعت نشان می‌دهد و از جمله اطلاعات ورودی می‌باشد. متغیر باینری s_h ساعتی که توان باد عدم قطعیت دارد را نشان می‌دهد. این متغیر باینری با استفاده از قید (۲۵) خطی می‌شود و می‌توان آن را به صورت یک متغیر پیوسته تعریف کرد. قید (۲۴) بیانگر این است که تعداد ساعت‌هایی که توان بادی عدم‌قطعیت دارد باید همواره کوچک‌تر یا مساوی بودجه عدم‌قطعیت نظیر آن باشد.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، هدف مسئله بهینه‌سازی مقاوم به‌دست آوردن جواب‌های ممکن و بهینه به ازای رخداد بدترین حالت ممکن برای پارامتر نامعین در بازه نامعینی تعریف شده برای آن می‌باشد. اما در عالم واقعی ممکن است برای آن پارامتر نامعین هر مقداری از بازه تعریف شده رخ دهد. بنابراین، برای آن که بتوان متناسب با رخداد مقادیر مختلف در بازه تعریف شده برای پارامتر دارای عدم‌قطعیت پیشنهاد تولید بهینه نیروگاه را به دست آورد، الگوریتم تدوین پیشنهاد استراتژیک ذیل استفاده شده که در ادامه تشریح خواهد شد.

نحوه عملکرد الگوریتم به این صورت است که بازه نامعینی پارامتر نامعین در هر تکرار به بازه کوچک‌تر تقسیم می‌شود و سپس دوباره مسئله بهینه‌سازی مقاوم بار دیگر حل می‌شود. این روند تا هنگامی که نقطه ابتدای بازه برسد، ادامه می‌یابد. برای آن که بتوان منحنی پیشنهاد قیمت ساعتی را متناسب با عدم‌قطعیت‌های موجود در مسئله تشکیل داد، الگوریتم زیر پیشنهاد می‌شود:

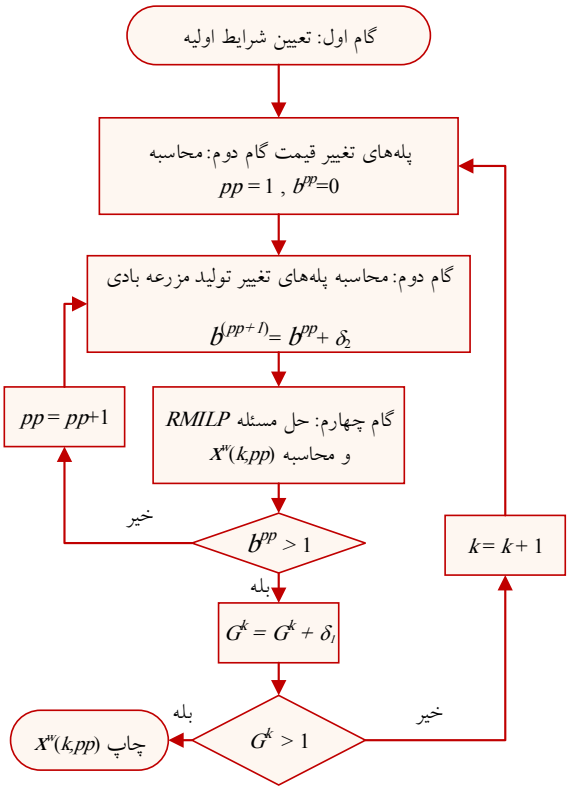
- گام اول: مقدار قیمت‌ها را $\pi_h = \pi_h^{Max}$ و $\Gamma_0 = N_T$ قرار دهید. همچنین، مقدار حداقل توان تولیدی بادی در پارامتر $\underline{g}_h^{w\,min}$، $\Gamma_{۱} = N_{T۲}$ و $G^k = ۰$ قرار داده شود.
- گام دوم: قرار دهید $d_h^k = G^k.\left(\pi_h^{max} - \pi_h^{min}\right)$. که در این رابطه G^k ضریبی است که مقدار افزایشی از ۰ تا ۱ می‌گیرد. ضمناً، k شمارنده پله‌های افزایش G^k می‌باشد. اکنون، مقدار $b^{pp} = ۰$ را در نظر بگیرید.

Archive of SID

www.SID.ir

- گام سوم: قرار دهید $\nabla_h^{pp} = b^{pp}.\left(\bar{g}_h^{w\,max} - \underline{g}_h^{w\,min}\right)$. که در این رابطه b^{pp} ضریبی است که مقدار افزایشی از ۰ تا ۱ می‌گیرد. در اینجا، pp نیز شمارنده پله‌های افزایش b^{pp} می‌باشد.
- گام چهارم: مسئله بهینه‌سازی مقاوم ارائه شده در روابط (۱۵) تا (۲۴) حل شود تا تولید ساعتی در تکرار (k, pp) حاصل شود.
- گام پنجم: گام سوم و چهارم با شمارنده pp تکرار شود تا زمانی که کل b^{pp} پوشانده شود. ضمناً، b^{pp} با گام δ_2 افزایش می‌یابد.
- گام ششم: مقدار G^k با گام δ_1 به‌روز شود. اگر $G^k > 1$ بود به گام هفتم و در غیر این صورت به گام دوم بر می‌گردید.
- گام هفتم: حل مسئله به پایان رسیده است.

به منظور نمایش بهتر الگوریتم ذکر شده، شکل (۱) روندنمای الگورینم پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این مقاله فرض شده است که تغییرات قیمت در هر ساعت در بازه $[\pi^{min}, \pi^{max}]$ و تغییرات توان نیروگاه بادی در بازه $[gwf^{min}, gwf^{max}]$ می‌باشد. با توجه به شکل (۱) مشخص است که با هر پله تغییر قیمت، توان بادی در ساعت‌هایی که عدم‌قطعیت دارد کل بازه در نظر گرفته شده خود را جاروب می‌کند.



شکل (۱) روندنمای تدوین استراتژی پیشنهاددهی مزرعه بادی.

۳-۳- مدل مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای

پیشنهاددهی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در بازارهای انرژی تحت تأثیر عدم‌قطعیت‌های قیمت و دسترس‌پذیری واحدهای آن است. برای مواجهه با این عدم‌قطعیت‌ها، در این قسمت مدل مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم برنامه‌ریزی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای پیشنهاد شده است.

نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در نظر گرفته شده از دو منبع بالادستی و پایین‌دستی با توربین‌های آبی برگشت‌پذیر که امکان کار در هر دو حالت ژنراتوری و یا موتوری را دارند، تشکیل شده است. نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در زمان‌های غیرپیک شبکه با مصرف توان، انرژی را به منبع بالادستی پمپاژ کرده و در زمان‌های پیک (اوج مصرف) با عملکرد ژنراتوری توربین آبی تولید انرژی الکتریکی انجام شده و آب از منبع بالادستی به منبع پایین‌دستی منتقل می‌شود.

این چرخه از نظر اقتصادی با صرفه می‌باشد زیرا در زمان‌های غیرپیک قیمت برق پایین و در زمان‌های پیک، قیمت برق بالا می‌باشد، به‌طوری که درآمد حاصل از فروش انرژی، هزینه ناشی از خرید انرژی و تلفات سیستم را جبران می‌نماید.

در این مقاله جریان آب ورودی به منبع بالادستی در نظر گرفته نشده و حجم آب منابع بالادستی و پایین‌دستی به صورت انرژی در نظر گرفته شده است. از طرفی، حجم انرژی هر یک از منابع به یک مقدار حداقل و یا حداکثر محدود شده است [۴].

مدل مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در حالت بهره‌برداری به صورت مستقل از مزرعه بادی به صورت زیر می‌باشد:

$$maximize \sum_{h\in H}\left[\begin{array}{l}\pi_h(g_h^p - d_h^p) - c^{su}y_h - c^{sd}z_h \\ -w\pi_h\left|g_h^p - d_h^p - x_h^p\right|\end{array}\right] - z_o\Gamma_o - \sum_{h\in J_o}^{H} q_{oh} \quad (۲۵)$$

subject to:

$$v_h^u = v_{h-1}^u + \eta d_h^p - g_h^p\,, \quad \forall h\in H \quad (۲۶)$$

$$v_h^l = v_{h-1}^l + g_h^p - \eta d_h^p\,, \quad \forall h\in H \quad (۲۷)$$

$$\underline{v}^u \le v_h^u \le \bar{v}^u\,, \quad \forall h\in H \quad (۲۸)$$

$$\underline{v}^l \le v_h^l \le \bar{v}^l\,, \quad \forall h\in H \quad (۲۹)$$

$$v_h^u = vf^u\,,\ v_h^l = vf^l\,, \quad \forall h = ۲۴ \quad (۳۰)$$

$$u_{h+1} = u_h + y_h - z_h\,, \quad \forall h\in H \quad (۳۱)$$

$$\underline{d}^p u_h \le d_h^p \le \bar{d}^p u_h\,, \quad \forall h\in H \quad (۳۲)$$

$$0 \le g_h^p \le \bar{g}^p\left(t_h\ FORA_h - UA_h\ liny_h\right), \quad \forall h\in H \quad (۳۳)$$

$$liny_h \le t_h\,, \quad \forall h\in H \quad (۳۴)$$

$$liny_h \le ss_h\,, \quad \forall h\in H \quad (۳۵)$$

$$liny_h \le t_h + ss_h - 1\,, \quad \forall h\in H \quad (۳۶)$$

$$t_h \le 1 - \frac{1}{N}u_h\,, \quad \forall h\in H \quad (۳۷)$$

Archive of SID

www.SID.ir

$$-\underline{d}^p N \le x_h^p \le \overline{g}^p N, \quad \forall h \in H \qquad (۳۸)$$

$$u_h, y_h, z_{sh} \in \{۰,۱,۲,\ldots,N\} \qquad (۳۹)$$

$$t_h, ss_h \in \{۰,۱\} \qquad (۴۰)$$

$$q_{oh} \ge ۰, \quad \forall h \in J_o \qquad (۴۱)$$

$$z_o \ge ۰ \qquad (۴۲)$$

$$yau_h \ge ۰, \quad \forall h \in H \qquad (۴۳)$$

$$\{(g_h^w + g_h^p - d_h^p) - w.\left|g_h^w + g_h^p - d_h^p - x_h^p\right|\} \le yau_h, \quad \forall h \in H \qquad (۴۴)$$

$$u_h \le FORA_h - ss_h\ UA_h, \quad \forall h \in J_۲ \qquad (۴۵)$$

$$\sum_{h \in H} ss_h \le \Gamma_۲ \qquad (۴۶)$$

$$۰ \le ss_h \le ۱, \quad \forall h \in H \qquad (۴۷)$$

در این روابط، ($\overline{v}^u, \overline{v}^L$) حجم حداکثر و ($\underline{v}^u, \underline{v}^L$) حجم حداقل حوضچه‌های بالادستی و پایین‌دستی هستند؛ یعنی ظرفیت دو حوضچه برابر فرض شده است.

معادله (۲۵) تابع هدف نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای است که در آن جمله اول درآمد حاصل از فروش انرژی، جمله دوم و سوم به ترتیب هزینه تحمیلی به نیروگاه در اثر روشن و خاموش شدن و جمله چهارم هزینه ناشی از عدم‌تعادل در تولید یا مصرف انرژی را نشان می‌دهند. روابط (۲۶) و (۲۷) به ترتیب نشان‌دهنده قید سطح آب منابع بالادست و پایین‌دست هستند. روابط (۲۸) تا (۳۰) قید مربوط به ظرفیت حوضچه‌ها و روابط (۳۱) و (۳۲) به ترتیب تعداد واحدهای روشن در حالت پمپی و محدودیت ظرفیت واحدهای تلمبه ذخیره‌ای در هر ساعت را مدل می‌کنند. سایر روابط، قیود نظیر مدل‌سازی عدم‌قطعیت در مسئله بهینه‌سازی مقاوم بوده که در ادامه بررسی می‌شوند.

مدل‌سازی عدم‌قطعیت قیمت در این حالت نیز عیناً مشابه بخش (۳-۲) بوده و برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت ناشی از دسترس‌پذیری واحدها نیز از روشی که در ادامه تشریح گردیده، استفاده شده است.

برای تبیین دقیق چگونگی مدل‌سازی عدم‌قطعیت مربوط به دسترس‌پذیری واحدها، یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای متشکل از دو واحد توربین آبی (هیدروتوربین) در نظر گرفته می‌شود. در این صورت در هر ساعت از افق برنامه‌ریزی امکان در دسترس بودن صفر، یک و یا دو واحد از واحدهای توربین آبی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در دسترس خواهند بود. در این مقاله، برای مدل‌سازی دسترس‌پذیری واحدهای تلمبه ذخیره‌ای در رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم، روشی مشابه با روش مدل‌سازی عدم‌قطعیت تولید مزرعه بادی استفاده شده است؛ با این تفاوت که به جای بازه عددی پیوسته تعریف شده برای تولید واحدهای بادی، برای دسترس‌پذیری واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای مجموعه‌ای گسسته به شکل {۰،۱،۲} در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، این امکان وجود دارد که نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای متناسب با مقدار بودجه عدم‌قطعیت تعریف شده برای مدل‌سازی دسترس‌پذیری واحدها (که در این مقاله یک عدد صحیح بین صفر تا ۲۴ ساعت در نظر گرفته می‌شود)، تعداد صفر، یک و یا دو واحد از واحدهای توربین آبی خود را در اختیار نداشته باشد.

حال برای آن که بتوان منحنی‌های پیشنهاد تولید را تولید نمود مطابق با الگوریتم ارائه شده در روندنمای شکل (۲) مقاله عمل خواهد شد. یعنی برای مدل‌سازی دسترس‌پذیری واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای، در هر گام فرض می‌شود که تعداد مشخصی از واحدهای توربین آبی در ساعت‌های دارای عدم‌قطعیت که برابر با بودجه عدم‌قطعیت می‌باشد، در دسترس هستند.

در این روابط $FORA_h$ تعداد واحدهای در دسترس را بدون در نظر گرفتن دسترس‌پذیری واحدها در هر ساعت نشان می‌دهد. طبیعی است که این پارامتر در هر ساعت مقدار ۲، برابر تعداد واحدهای نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای اتخاذ کند. متغیر باینری ss_h ساعت‌هایی که در آن عدم‌قطعیت دسترس‌پذیری واحدها وجود دارد را نشان می‌دهد. بودجه عدم‌قطعیت با $\Gamma_۲$ نمایش داده شده است، که بیان‌گر تعداد ساعت‌هایی است که واحدها عدم‌قطعیت دسترس‌پذیری دارند. با مقایسه روابط اخیر نسبت به روابط نیروگاه بادی مشخص می‌شود که قید مندرج در رابطه (۳۳) تغییر کرده است. این تغییر به این دلیل می‌باشد که دسترس‌پذیری بر میزان تولید نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در حالت ژنراتوری نیز تأثیر می‌گذارد. اما مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی مقاوم در این قید مستلزم ضرب دو متغیر باینری بود که خود منجر به غیرخطی‌شدن مسئله می‌گشت. به همین جهت، برای رفع این مشکل متغیر باینری $liny_h$ و سه قید (۳۴) تا (۳۶) برای خطی‌سازی قید غیرخطی مذکور تعریف شده است.

در روابط اخیر، پارامتر UA_h از طریق الگوریتم تعریف شده برای تدوین استراتژی پیشنهاددهی، مقداردهی می‌شود؛ در واقع این پارامتر بازه عدم‌قطعیت دسترس‌پذیری واحدها را، در ساعاتی که عدم‌قطعیت وجود دارد، جاروب می‌کند. این پارامتر می‌تواند در سه گام، مقادیر ۰، ۱ و یا ۲ را اتخاذ کند. الگوریتم تدوین استراتژی پیشنهاددهی مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم برای نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای بسیار مشابه الگوریتم تعریف شده برای نیروگاه بادی در بخش (۲-۳) می‌باشد؛ تنها گام سوم این الگوریتم باید تغییر می‌کند، که به صورت زیر اصلاح می‌شود:

- گام سوم: قرار دهید $UA_h = ff - ۱$. در این رابطه ff عددی صحیح است که مقدار افزایشی از ۱ تا ۳ می‌گیرد.

۳-۴- مدل بهره‌برداری هم‌زمان دو نیروگاه با رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم

در بهره‌برداری هم‌زمان نیروگاه بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای سه پارامتر غیرقطعی قیمت برق، توان بادی و دسترس‌پذیری واحدها وجود دارد که مستقیم بر مسئله پیشنهادی تولید این نیروگاه‌ها در بازارهای انرژی تأثیر می‌گذارد. در این قسمت الگوریتمی برای پیشنهاد تولید این نیروگاه‌ها در حالت بهره‌برداری هم‌زمان با رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم ارائه خواهد شد. به‌طوری که هر سه پارامتر همراه با

Archive of SID

www.SID.ir

عدم‌قطعیت در مسئله بهینه‌سازی مقاوم مدل‌سازی شوند. مدل ریاضی مسئله خطی آمیخته با عدد صحیح می‌باشد؛ زیرا تنها جمله غیرخطی موجود در مدل، تابع قدر مطلق می‌باشد که به سادگی می‌توان آن را با تعریف دو متغیر حقیقی مثبت خطی نمود. در این حالت تنها دو قید مربوط به خطی‌سازی تابع قدر مطلق به مسئله اضافه می‌شود. مدل ریاضی مسئله برنامه‌ریزی دو نیروگاه به‌طور هم‌زمان با رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم به صورت زیر می‌باشد:

$$Maximize \sum_{h\in H}\begin{bmatrix}\pi_h.(g_h^w+g_h^p-d_h^p)-c^{su}.y_h-c^{sd}.z_h\\ -w.\pi_h.\left|g_h^w+g_h^p-d_h^p-x_h^{wp}\right|\end{bmatrix} - z_o.\Gamma_o-\sum_{h\in J_o}^{H} q_{oh} \quad (۴۸)$$

$$-\underline{d}^p.N \le x_h^{wp} \le \left(\overline{g}^p.N+\overline{g}^w\right), \qquad \forall h\in H \quad (۴۹)$$

قیدهای (۱۷) تا (۲۴) (۵۰)

قیدهای (۲۶) الی (۴۷) به غیر از قید (۳۸) (۵۱)

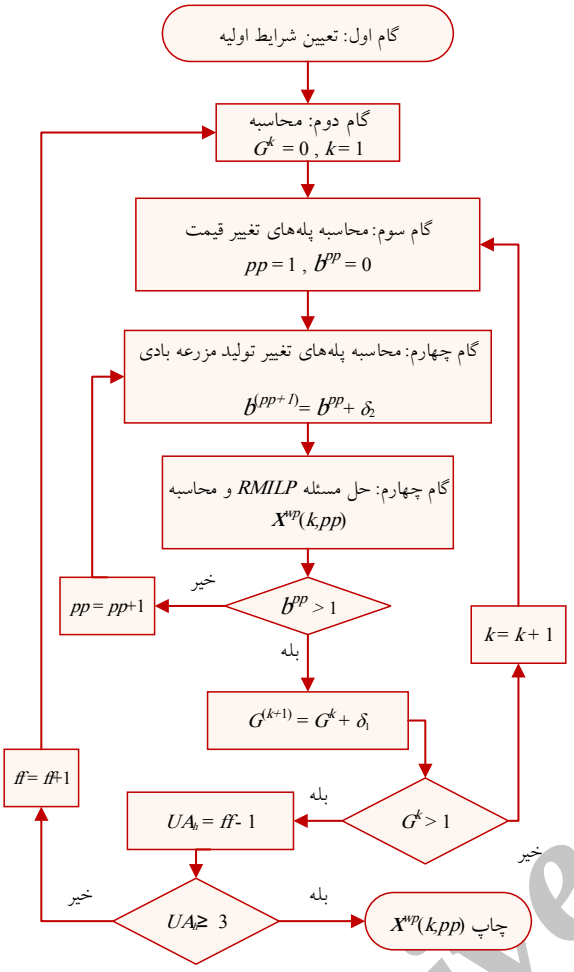
یادآوری می‌شود که Γ_o بودجه عدم‌قطعیت قیمت، Γ_1 بودجه عدم‌قطعیت تولید بادی و Γ_2 بودجه عدم‌قطعیت دسترس‌پذیری واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای را نشان می‌دهد. حال برای آن که بتوان منحنی پیشنهاد قیمت در هر ساعت را متناسب با عدم‌قطعیت‌های موجود در مسئله بهینه‌سازی تشکیل داد، الگوریتمی مشابه بخش (۳-۲) پیشنهاد شده است. این الگوریتم مشابه الگوریتم نیروگاه بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای می‌باشد و تنها در چند گام با آن‌ها اختلاف دارد. برای پرهیز از تکرار موضوع، در ادامه فقط گام‌های تغییر یافته الگوریتم تدوین استراتژی پیشنهاددهی تشریح می‌شود.

- گام هفتم: مقدار G^k با گام δ_1 به‌روز شود. اگر $G^k > 1$ به گام هفتم در غیر این صورت به گام سوم برگردید.
- گام هشتم: مقدار UA_h به‌روز شود. اگر $UA_h \ge 3$ به گام هشتم و در غیر این صورت به گام دوم برگردید.
- گام نهم: حل مسئله به پایان رسیده است.

شکل (۲) روندنمای الگوریتم تولید منحنی‌های پیشنهاد تولید در حالت بهره‌برداری هم‌زمان از دو نیروگاه را نشان می‌دهد.

۴- شبیه‌سازی و ارائه نتایج

در این مقاله از سیستم آزمایش مشابه مرجع [۲] استفاده شده است. به این ترتیب، ظرفیت نیروگاه بادی ۳۰ مگاوات و ظرفیت نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای ۱۰ مگاوات (شامل دو واحد ۵ مگاواتی) است. ظرفیت حداکثر و حداقل حوضچه‌های بالادستی و پایین‌دستی به ترتیب برابر ۸۰ و صفر مگاوات در نظرگرفته شده است.



شکل (۲) روندنمای تدوین استراتژی پیشنهاددهی مالک دو نیروگاه بادی و تلمبه ذخیره‌ای در حالت بهره‌برداری هم‌زمان.

همچنین بازدهی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای ۸۰٪ در نظر گرفته شده است. در پایان افق برنامه‌ریزی هم به ترتیب مقادیر ۱۵ و ۲۵ مگاوات‌ساعت محدودیت برای انرژی موجود در منابع بالادستی و پایین‌دستی فرض شده است. باید این نکته را نیز متذکر شد که هر واحد تلمبه‌ذخیره‌ای در حالت پمپی با ظرفیت کامل وارد مدار می‌شود؛ یعنی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در حالت پمپی ۵ تا ۱۰ مگاوات‌ساعت انرژی مصرف می‌کند.

فرض شده است مقدار میانگین قیمت و توان بادی را در هر ساعت مطابق اطلاعات جدول (۱) باشد. برای آن که مدل بهینه‌سازی مقاوم پیاده‌سازی شود، لازم است حدود تغییرات پارامترهای دارای عدم‌قطعیت تعیین شود. برای تعریف کران‌های بالا و پایین این پارامترها در هر ساعت از مقدار میانگین در آن ساعت به عنوان میانگین بازه استفاده می‌شود. سپس مقدار ۱/۴ برابر این مقدار میانگین به عنوان کران بالا و ۰/۶ برابر مقدار همین میانگین به عنوان کران پایین بازه در نظر گرفته شده است [۲۱،۲۰].

Archive of SID

www.SID.ir

جدول (۱) مقادیر میانگین قیمت انرژی و توان تولیدی واحد بادی.

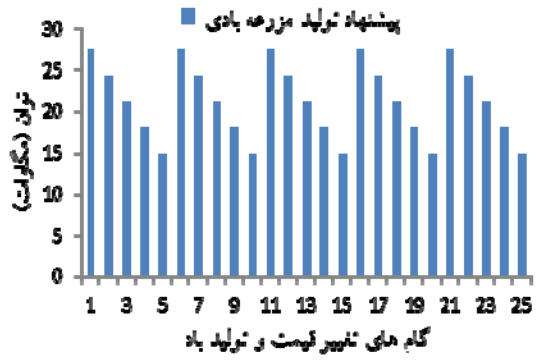
ساعت	قیمت	توان باد	ساعت	قیمت	توان باد
۱	۶۵	۱۹/۶	۱۳	۴۲	۸/۶
۲	۵۰	۱۸/۶	۱۴	۴۱	۸/۰
۳	۴۴	۱۷/۴	۱۵	۴۰	۸/۱
۴	۴۳	۱۴/۹	۱۶	۳۸	۷/۱
۵	۴۲	۱۴/۲	۱۷	۳۳	۷/۴
۶	۴۲	۱۲/۹	۱۸	۳۸	۶/۶
۷	۴۰	۱۱/۶	۱۹	۴۵	۶/۳
۸	۳۷	۱۱/۱	۲۰	۵۰	۶/۲
۹	۳۷	۱۰	۲۱	۵۴	۵/۳
۱۰	۳۷	۹/۱	۲۲	۷۴	۶/۶
۱۱	۴۲	۹/۳	۲۳	۷۴	۵/۴
۱۲	۴۰	۸/۷	۲۴	۷۹	۵/۸

الف) نتایج در حالت بهره‌برداری مجزای واحدهای بادی و تلمبه ذخیره‌ای

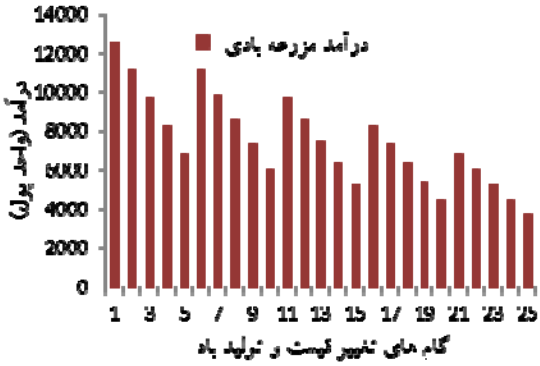
در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته روی سیستم آزمایش ارائه می‌شود. در این الگوریتم پیشنهاددهی برای آن که کل بازه تغییرات قیمت و تولید واحد بادی به طور مناسبی جاروب شود، به ترتیب دو پارامتر δ_1 و δ_2 تعریف شدند که در این‌جا مقدار عددی ۰/۲۵ برای هر دو پارامتر در نظر گرفته شده است. به این ترتیب، با توجه به این که دو پارامتر G^k و b^{pp} مقدار افزایشی بین صفر و یک را با گام‌های δ_1 و δ_2 اختیار می‌کنند؛ بنابراین می‌توان انتظار داشت که برای جاروب کردن کاملِ بازه مربوط به هر یک از پارامترهای همراه با عدم‌قطعیت، ۵ گام لازم می‌باشد. پس در مجموع از آن‌جا که برای هر گام تغییر قیمت باید هر ۵ گام تغییر تولید بادی رخ دهد، بنابراین تعداد کل گام‌های مسئله پیشنهاددهی مزرعه بادی با رویکرد بهینه‌سازی مقاوم، ۲۵ گام خواهد بود.

شکل (۳)، پیشنهاد تولید مزرعه بادی را در شرایطی بیان می‌کند که تولید بادی و قیمت بازار در هر ۲۴ ساعت دوره تحت مطالعه دارای عدم‌قطعیت هستند. مطابق با این شکل، پیشنهاد تولید مزرعه بادی مستقل از تغییرات قیمت است و صرفاً تابع توان تولیدی واحد بادی است. این موضوع کاملاً منطبق بر واقعیت مسئله است؛ چرا که تولید توان در یک نیروگاه بادی تقریباً بدون هزینه است. این نتیجه به نوعی معتبر و صحیح بودن مدل ارائه شده در شرایط مختلف را نیز تأیید می‌کند. در نتیجه با وجود هر قیمتی، از فروش انرژی تولیدی نیروگاه بادی در بازار منفعت حاصل خواهد شد.

برای مطالعه دقیق‌تر، در شکل (۴) تغییرات درآمد مزرعه بادی به ازای تغییرات قیمت و توان تولیدی واحد بادی نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در شکل (۴) نیز نشان می‌دهد که اگرچه پیشنهاد تولید مزرعه بادی مستقل از قیمت است، اما درآمد حاصل از شرکت در بازار کاملاً به مقدار عددی قیمت وابسته است.



شکل (۳) پیشنهاد تولید بهینه مزرعه بادی در ساعت t=۱ .



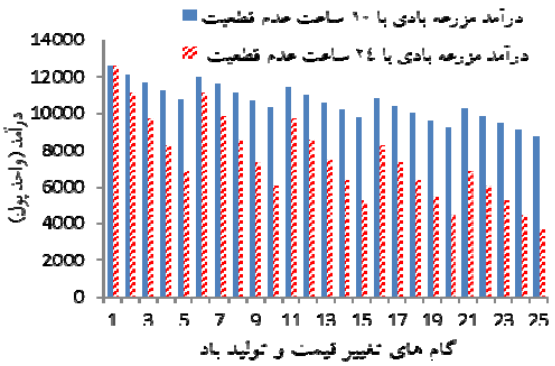
شکل (۴) تغییرات درآمد مالک مزرعه بادی.

در حالت قبل فرض بر این بود که هر ۲۴ ساعت عدم‌قطعیت دارند و در واقع بودجه عدم‌قطعیت برابر ۲۴ در نظر گرفته شده بود. اکنون به منظور بررسی بهتر و صحت‌سنجی مدل ارائه شده در اثر تغییر در بودجه عدم‌قطعیت، حالت دیگری که در آن تنها چند ساعت از دوره تحت مطالعه دارای عدم‌قطعیت است، بررسی می‌شود. در این حالت که با بودجه عدم‌قطعیتی معادل ۱۰ ساعت شبیه‌سازی شده، پیشنهاد تولید مزرعه بادی در ساعتی که عدم‌قطعیت تولید نداریم دست‌خوش تغییر نشده ولی در ساعاتی که عدم‌قطعیت وجود دارد، تغییرات در درآمد از الگوی شکل (۵) پیروی می‌کند. به علاوه، در مورد سود حاصل از شرکت در بازار، در این حالت می‌توان گفت میزان کاهش سود در ازای تغییر پارامترهای غیرقطعی در ساعت‌هایی که عدم‌قطعیت ندارند، کم‌تر خواهد بود؛ به‌عبارتی دیگر زمانی که تعداد ساعت‌های دارای عدم‌قطعیت کم‌تر باشد، میزان سود حاصل از مشارکت در بازار بیش‌تر خواهد بود.

البته باید به این نکته نیز توجه داشت که در این‌جا فرض شده که پارامترهایی که عدم‌قطعیت ندارند، مقداری برابر با کران بالای بازه تعریف شده خود دارند. در پایان مجدداً یادآوری می‌شود که نتایج اخیر، همگی برای حالتی است که نیروگاه بادی به صورت مجزا مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

Archive of SID

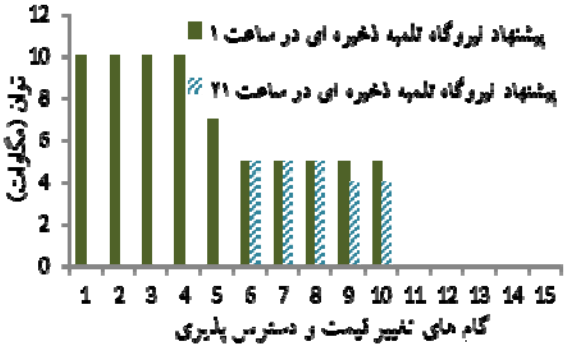
www.SID.ir



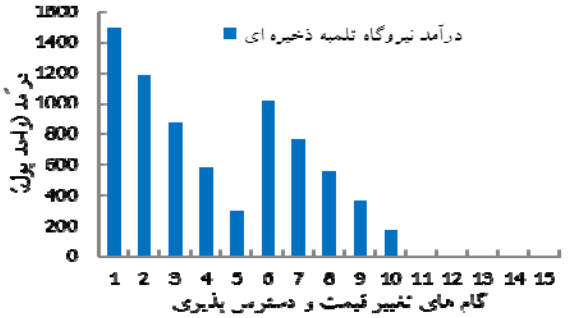
شکل (۵) مقایسه درآمد مزرعه بادی با دو بودجه عدم‌قطعیت مختلف.

در ادامه، به بررسی نتایج شبیه‌سازی مدل پیشنهادی در حالت عملکرد مجزای نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای پرداخته می‌شود. در این‌جا نیز نحوه مدل‌سازی عدم‌قطعیت قیمت بازار مشابه حالت قبل بوده و برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت دسترس‌پذیری واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای، از الگوریتم بخش (۳-۳) استفاده شده است.

با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که پیشنهاد نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای علاوه بر دسترس‌پذیری، به تغییرات قیمت نیز حساس است. به عنوان مثال، در ساعت یک، در گام پنجم تغییر قیمت، توان تولیدی پیشنهادی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای با توجه به روند نزولی قیمت، کاهش یافته است. این نتایج با توجه به اینکه تولید نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای با هزینه همراه است، کاملاً منطقی به نظر می‌رسد.



شکل (۶) پیشنهاد تولید نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در ۲ ساعت مختلف.



شکل (۷) تغییرات درآمد نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای.

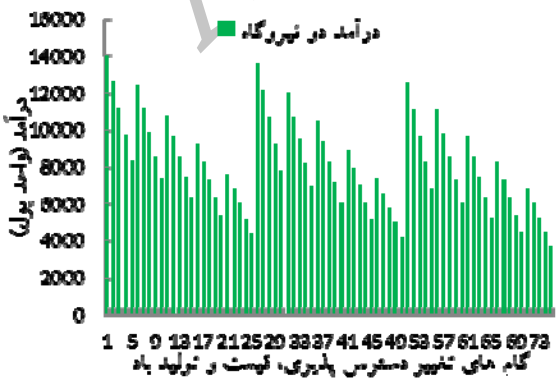
برای آن که تأثیر عدم‌قطعیت‌های مؤثر بر برنامه‌ریزی مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای مشخص گردد، فرض شده که دسترس‌پذیری واحدها و قیمت بازار در هر ۲۴ ساعت دارای عدم‌قطعیت هستند و در هر ساعت مقداری عددی را از بازه‌های تعریف شده برای این پارامترهای غیرقطعی اختیار می‌کنند. طبق الگوی تعریف شده در بخش (۳)، برای آن که کل بازه غیرقطعی جاروب شود، برای عدم‌قطعیت قیمت و دسترس‌پذیری واحدها به ترتیب ۵ و ۳ گام تعریف شده است. با توجه به شرایط گفته شده، شکل (۷) تغییرات درآمدی نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای در اثر عدم‌قطعیت‌ها را نشان می‌دهد.

چنان‌چه در شکل (۷) مشاهده می‌شود، با تغییر نزولی قیمت و یا کاهش واحدهای در دسترس، درآمد نیروگاه نیز کاهش یافته است. به‌طوری که از گام یازدهم به بعد که تعداد واحدهای در دسترس صفر شده، مقدار درآمد نیز صفر گردیده است.

ب) نتایج در حالت بهره‌برداری هم‌زمان

در ادامه نتایج حاصل از بهره‌برداری هم‌زمان از دو نیروگاه با رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم ارائه خواهد شد. در مدل برنامه‌ریزی هم‌زمان واحدهای بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای با رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم، عدم‌قطعیت‌های تأثیرگذار قیمت برق در بازار روزِ بعد، توان تولیدی واحد بادی و دسترس‌پذیری واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای هستند. شکل (۸)، درآمد مجموعه دو نیروگاه بادی و تلمبه ذخیره‌ای در حضور عدم‌قطعیت‌های ذکر شده را به تصویر کشیده است. مشاهده می‌شود که درآمد دو نیروگاه در حالت بهره‌برداری هم‌زمان به عدم‌قطعیت در هر سه پارامتر قیمت، توان باد و دسترس‌پذیری واحدهای تلمبه‌ذخیره‌ای حساس می‌باشد و رفتار منحنی مطابق با انتظارات واقعی و کاملاً معتبر است.

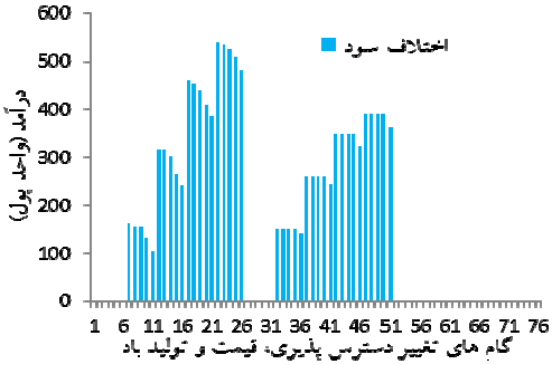
در نهایت، شکل (۹) تفاضل میزان سود مالک نیروگاه در دو حالت بهره‌برداری هم‌زمان و مجزا را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج، در بعضی از گام‌ها میزان تفاضل سود صفر و در برخی دیگر از گام‌ها مقدار عددی مثبتی است. این نتایج تأیید و تأکید می‌کند که بهره‌برداری هم‌زمان دو نیروگاه می‌تواند استراتژی مناسبی برای کسب سود بیش‌تر باشد.



شکل (۸) تأثیر عدم‌قطعیت‌ها بر میزان درآمد دو نیروگاه در حالت بهره‌برداری هم‌زمان.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل (۹) اختلاف سود در دو حالت بهره‌برداری هم‌زمان و مجزا.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، رویکردی مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم برای پیشنهاددهی استراتژیک مالک یک نیروگاه تجدیدپذیر تلفیقی بادی و تلمبه ذخیره‌ای ارائه گردید که با استفاده از آن امکان در نظر گرفتن تمامی عدم‌قطعیت‌های تأثیرگذار بر مسئله فراهم شده است. به طور مشخص، ساختاری برای مدل‌سازی برنامه‌ریزی دو نیروگاه چه به صورت بهره‌برداری مجزا و چه به صورت بهره‌برداری هم‌زمان ارائه گردیده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، می‌توان اذعان داشت که برای حصول سود بیش‌تر، بهتر است دو نیروگاه بادی و تلمبه‌ذخیره‌ای به طور هم‌زمان مورد بهره‌برداری قرار گیرند. در این حالت اثر نوسانی توان تولیدی نیروگاه بادی بر سیستم قدرت کم‌تر شده و در نتیجه هزینه ناشی از عدم‌تعادل در تولید حقیقی و پیشنهاد تولید حداقل می‌گردد و به این شکل متناسب با آن درآمد حاصل از مشارکت در بازار انرژی برای دو نیروگاه حداکثر می‌شود. با توجه به مطالعات انجام شده و نتایج حاصل از این مقاله، رویکرد آتی برای تکمیل این موضوع، می‌تواند تلفیق مدل مقاوم پیشنهادی با مدل‌های جدید ارزیابی خطرپذیری باشد.

مراجع

[1] V. Vahidinasab and S. Jadid, "Stochastic Multiobjective Self-Scheduling of a Power Producer in Joint Energy and Reserves Markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 760-769, 2010.

[2] J. G. González, d. l. Muela, L. M. Santos, and A. M. González, "Stochastic Joint Optimization of Wind Generation and Pumped-Storage Units in an Electricity Market," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, pp. 456-461, May 2008.

[3] N. Amjady and V. Vahidinasab, "Security-Constrained Self-Scheduling of Generation Companies in Day-Ahead Electricity Markets Considering Financial Risk," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 164-172, 2013.

[4] L. Wu, M. Shahidehpour, and T. Li, "Stochastic security-constrained unit commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 800-811, 2007.

[5] J. Conejo, and M. Carrión, "Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets". *Springer*, June 2010.

[6] L. Baringo and A. J. Conejo, "Offering Strategy Via Robust Optimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 1418-1425, 2011.

[7] J. Ruiwei, W. Jianhui, "Robust Unit Commitment with Wind Power and Pumped Storage Hydro," *IEEE Trans on Power Syst*, vol. 27, pp. 80-90, 2012.

[8] Z. Chaoyue, W. Jianhui, J. P. Watson, and G. Yongpei, "Multi-Stage Robust Unit Commitment Considering Wind and Demand Response Uncertainties," *IEEE Trans on Power Systems*, vol. 28, pp. 2708-2717, 2013.

[9] J. Ruiwei, W. Jianhui, Z. Muhong, and G. Yongpei, "Two-Stage Minimax Regret Robust Unit Commitment," *IEEE Trans on Power Syst*, vol. 28, pp.2271-2282, 2013.

[10] D. Bertsimas, E. Litvinov, X. A. Sun, Z. Jinye, and Z. Tongxin, "Adaptive Robust Optimization for the Security Constrained Unit Commitment Problem," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 52-63, 2013.

[11] Z. Chaoyue and G. Yongpei, "Unified Stochastic and Robust Unit Commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 3353-3361, 2013.

[12] C. Haoyong, L. Hao, Y. Rong, and L. Bo, "Robust Scheduling of Power System with Significant Wind Power Penetration," *IEEE Power syst,* 2012.

[13] A. Soroudi, "Robust Optimization based Self-Scheduling of Hydro-Thermal GENCO in Smart Grids," *Energy*, vol. 61, pp. 262-271, 2013.

[14] A. Street, F. Oliveira, and J. M. Arroyo, "Contingency-Constrained Unit Commitment with Security Criterion: A Robust Optimization Approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 1581-1590, 2011.

[15] C. Zhi, W. Lei, and F. Yong, "Real-Time Price-Based Demand Response Management for Residential Appliances via Stochastic Optimization and Robust Optimization," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 1822-1831, 2012.

[16] M. Sim, "Robust Optimization," PhD Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Massachusetts Institute of Technology, June 2004.

[17] R. A. Jabr, "Robust Self-Scheduling Under Price Uncertainty Using Conditional Value-at-Risk," *IEEE Trans on Power Syst*, vol. 20, no. 4, November 2005.

[18] Ben-Tal and A. Nemirovski, "Robust Solutions of Linear Programming Problems Contaminated with Uncertain Data," *Mathematical Programming*, pp. 411-424, 2008.

[19] R. Karki, P. Hu, and R. Billinton, "Reliability Evaluation Considering Wind and Hydro Power Coordination," *IEEE Trans on Power Syst*, vol. 25, pp. 685-693, May 2010.

[20] J. Morales, A. J. Conejo, and J. Pérez-Ruiz, "Short-Term Trading for a Wind Power Producer," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 554-564, Feb 2010.

[21] T. Jonsson, P. Pinson, H. A. Nielsen, H. Madsen, and T. S. Nielsen, "Forecasting Electricity Spot Prices Accounting for Wind Power Predictions," *IEEE Trans on Sustainable Energy*, vol. 4, pp. 210-218, 2013.

زیرنویس‌ها

[1] Sensitivity analysis
[2] Stochastic optimization
[3] Robust optimization
[4] Soyster
[5] Ben-Tal
[6] Nemirovski

Archive of SID

www.SID.ir