نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

سال یازدهم، شماره بیست و سوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۲، صفحه ۵-۱۹
www.ier.basu.ac.ir

ISSN: 2345-2269

DOI: https://dx.doi.org/10.22084/IER.2024.5562

مدل‌سازی مسأله استراتژی پیشنهاددهی استوار شرکت‌های تولید قیمت‌ساز برق در بازار روزبعد در شرایط عدم قطعیت رفتار رقبا

امیر جلیلوندنژاد*

استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت ۱۴۰۲/۳/۳۱
پذیرش ۱۴۰۲/۷/۱۱
(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:
بازار روزبعد
استراتژی پیشنهاددهی
بهینه‌سازی استوار
همبستگی

خلاصه

بازار روزبعد برق یکی از رایج‌ترین بازارهای فروش برق در شبکه‌های تجدیدساختاریافته برق هستند. شرکت‌های تولید برق برای مشارکت در این بازار نیازمند ارائه یک پیشنهاد هستند. این پیشنهاد شامل یک پلکان پیشنهادی خروجی-قیمت است که میزان تمایل شرکت‌های تولید به سطوح مختلف تولید را نشان می‌دهد. مسأله استراتژی پیشنهاددهی به این نیاز تولیدکنندگان پاسخ می‌دهد. در این مقاله مسأله استراتژی پیشنهاددهی از نگاه شرکت‌های تولید قیمت‌ساز و با بررسی عدم‌قطعیت موجود در برآورد پیشنهادهای رقبا مورد مطالعه قرار گرفته است. براین اساس از بهینه‌سازی استوار به‌عنوان ابزار مواجهه با عدم‌قطعیت در یک مسأله برنامه‌ریزی دوسطحی استفاده شده است که سطح یک شامل یک مسأله خودبرنامه‌ریزی از نگاه تولیدکننده و سطح دو شامل یک مسأله تسویه بازار از نگاه بهره‌بردار بازار است. باتوجه به لزوم تاثیرگذاری عدم‌قطعیت موجود در سطح دوم مسأله بر مسأله سطح اول، ابتدا مسأله به‌عنوان یک مدل یکپارچه تک‌سطحی بازنویسی شده است و سپس از یک رویکرد بهینه‌سازی استوار که همبستگی بین عوامل عدم‌قطعیت را درنظر بگیرد استفاده شده است. درنهایت، عملکرد مدل استوار پیشنهادی طی یک فرآیند شبیه‌سازی مونت-کارلو مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد اگرچه تابع هدف مدل استوار نسبت به مدل قطعی مقدار کمتری را نشان می‌دهد، اما باتوجه به افزایش احتمال پذیرش جواب استوار در فرآیند تسویه بازار در مقابل جواب مدل قطعی، منجربه افزایش سود شرکت‌های تولید استراتژیک در بلندمدت می‌گردد.

علائم

مجموعه‌ها

Ψ_n	مجموعه واحدهای مستقر در گره n
Φ_n	مجموعه بارهای مستقر در گره n
I^S	مجموعه واحدهای شرکت‌های تولید استراتژیک
I^R	مجموعه واحدهای شرکت‌های تولید رقبا
F^i	مجموعه پله‌های پیشنهادی واحد تولیدی (ژنراتور) iام
Ω	مجموعه سناریوهای قیمتی رقبا

اندیس‌ها

t	اندیس واحد زمان از ۱ تا ۲۴
i	اندیس شماره واحد تولیدی (ژنراتور)
r	اندیس گره در شبکه قدرت
l	اندیس شماره بلوک در تابع شکسته خطی هزینه‌های سوخت و نگه‌داری و تعمیرات بین ۱ تا Nl
f	اندیس شماره پله پیشنهادی
s	اندیس سناریوی قیمتی رقبا

* نویسندهٔ مسئول: امیر جلیلوندنژاد
تلفن: ۰۲۳-۳۱۹۳۰۳۳۵؛ پست الکترونیکی: a.jalilvandnejad@gmail.com

پارامترها

λ_{rt}	برآورد قیمت تسویه بازار در گره r و ساعت t ($/MWh)
$cost^{Fix}$	هزینه ثابت عملیاتی کل
$cost^{Fuel}$	هزینه سوخت کل
$cost^{mtn}$	هزینه نگهداری و تعمیرات (نت) کل
$cost^{SU}$	هزینه راه‌اندازی واحد کل
$cost^{SD}$	هزینه توقف واحد کل
p_{ift}	قیمت پیشنهادی پله fام از واحد iام در ساعت tام
q_{ift}	خروجی پله fام از واحد iام در ساعت tام
Q_{ift}	بیشینه مقدار q_{ift}
Q_i^{max}	بیشینه توان تولیدی واحد i
u_{it}	متغیر باینری نشان‌دهنده روشن/خاموش بودن واحد iام در ساعت tام
y_{it}	متغیر باینری که درصورت استارت واحد iام در ساعت tام برابر ۱ خواهد بود
z_{it}	متغیر باینری که درصورت خاموش شدن واحد iام در ساعت tام برابر ۱ خواهد بود
$\mu_{lt}^{min}, \mu_{lt}^{max}$	متغیرهای دوگان مربوط به حدود بالا و پایین جریان در خط l در ساعت tام
$\pi_{ift}^{min}, \pi_{ift}^{max}$	متغیرهای دوگان مرتبط با حدود بالا و پایین تولید واحد iام در پله fام در ساعت tام
Fl_{mn}^{max}	ظرفیت خط انتقال بین باس m و باس n بر حسب MW
L_{dt}	تقاضای بار d در ساعت t بر حسب MW
η_s	احتمال انتخاب سناریوی قیمتی s توسط رقبا
ω	جریمه عدم‌استواری مدل
δ_{sift}	میزان تخطی مدل در تعیین قیمت تسویه تحت سناریو s و ناشی از پیشنهاد قیمتی پله f از واحد i در ساعت t

۱. مقدمه

تولیدکنندگان انرژی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اعضای شبکه تولید و توزیع برق هستند. در کشورهایی که بازار تجدیدساختاریافته برق در آن‌ها شکل گرفته است، مشارکت تولیدکنندگان در شبکه تولید و توزیع قدرت در قالب بازار رقابتی برق صورت می‌گیرد. تولیدکنندگان برق برای فروش انرژی تولیدی خود در این بازارها که شکل مناقصه فروش انرژی را دارند باید با بررسی محیط شامل تقاضا، شبکه انتقال و توانمندی رقبا و همچنین ارزیابی دقیق از توانمندی‌های رقابتی خود، اقدام به برنامه‌ریزی و ارائه پیشنهاد برای شرکت در بازار نمایند. همانند یک مناقصه فروش خدمات، در بازار رقابتی برق نیز پیشنهادهای بیش‌از اندازه گران‌قیمت می‌تواند منجربه عدم موفقیت در بازار و پیشنهادهای بیش‌از اندازه ارزان‌قیمت منجربه سود ازدست رفته گردند. براین اساس شرکت‌های تولید برق[1] که ما بعد از این به‌اختصار به آن‌ها تولیدکنندگان می‌گوییم، با یک مسأله بهینه‌سازی با عنوان مسأله استراتژی پیشنهاددهی مواجه هستند که با حل آن در تلاش برای بیشینه کردن سهم خود از بازار رقابتی برق هستند. از طرف دیگر بازار رقابتی برق مملو از عوامل غیرقطعی است که تصمیم شرکت‌کنندگان را با مخاطره همراه می‌کند. تصمیم‌گیری در چنین محیط غیرقطعی‌ای مسأله تولیدکننده مورد بحث را به یک مسأله استراتژی پیشنهاددهی در شرایط عدم‌قطعیت تبدیل می‌کند و تولیدکننده ناچار به اتخاذ رویکردی برای مواجهه با این عدم‌قطعیت خواهد بود.

تولیدکنندگان برق در بازارهای تجدیدساختاریافته به دو دسته قیمت‌ساز[2] و قیمت‌پذیر[3] تقسیم می‌شوند. تولیدکنندگانی که حجم تولید آن‌ها در شبکه قابل توجه است و در نتیجه قیمت ارائه شده از طرف آن‌ها به بازار در تعیین قیمت تسویه بازار نقش قابل توجهی دارد قیمت‌ساز هستند. درخصوص تولیدکنندگان قیمت‌پذیر اثرگذاری چندانی بر قیمت تسویه ندارند و از این‌رو قیمت تسویه بازار مستقل از میزان و نحوه مشارکت آن‌ها در بازار فرض می‌گردد.

در این مقاله مسأله استراتژی پیشنهاددهی از دیدگاه تولیدکننده قیمت‌ساز و با درنظر گرفتن عدم قطعیت در پیشنهادهای رقبا مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بیشتر بازارهای روزبعد، قیمت خرید برق از تولیدکنندگان، برابر با بالاترین قیمت‌پذیرفته شده در بازار است که این قیمت، قیمت تسویه نامیده می‌شود و در بخش بعدی بیشتر معرفی می‌گردد. تولیدکنندگان قیمت‌پذیر، با برآورد این قیمت، پیشنهادهای خود را برای ارائه به بازار تنظیم می‌نمایند، اما درخصوص تولیدکنندگان قیمت‌ساز، باتوجه به اینکه حجم بالایی از تقاضای برق را تأمین می‌کنند، پیشنهاد ارائه شده از طرف آن‌ها بر قیمت تسویه بازار تاثیرگذار است [۱]. براین اساس برخلاف تولیدکنندگان قیمت‌پذیر، برنامه‌ریزی و ارائه پیشنهاد برای این دسته از تولیدکنندگان نمی‌تواند مبتنی‌بر پیش‌بینی قیمت تسویه بازار به‌عنوان یک عامل مستقل باشد چراکه مقدار قیمت تسویه متأثر از تصمیمات تولیدکننده خواهد بود. در عوض در مدل‌سازی این‌گونه مسائل لازم است عوامل تاثیرگذار بر قیمت تسویه یعنی پیشنهادهای رقبا و محدودیت‌های مؤثر بر قیمت تسویه همچون خصوصیات شبکه انتقال به صراحت مورد بررسی قرار گیرند. عدم وجود اطلاعات دقیق درخصوص رقبا به‌ویژه پیشنهادهای ارائه شده از طرف آن‌ها مهم‌ترین عامل ورود عدم‌قطعیت به این دسته از مسائل بهینه‌سازی است. همچنین تغییرات پیش‌بینی نشده در ساختار شبکه همچون قطعی خطوط یا خروج واحدهای دیگر از شبکه و نقش آن در توزیع بار عوامل دیگری هستند که مسأله استراتژی پیشنهاددهی برای تولیدکننده قیمت‌ساز را بیشتر دستخوش عوامل غیرقطعی می‌نماید [۲].

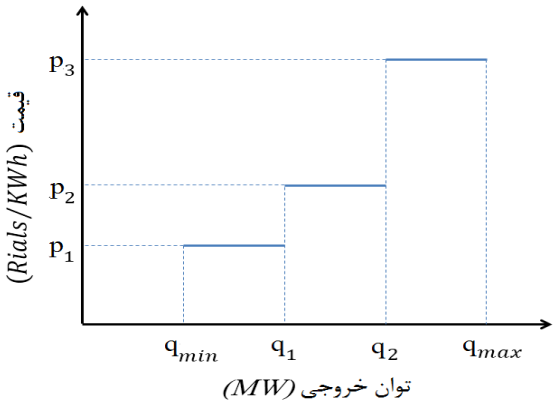
در این مقاله ابتدا مفاهیم بازار برق و مسأله استراتژی پیشنهاددهی به‌صورت مختصر معرفی می‌شود، سپس یک مدل بهینه‌سازی قطعی

1. Genco (Generation Company)
2. Price-Maker
3. Price-Taker

برای تولیدکننده قیمت‌ساز معرفی می‌شود. در ادامه رویکرد مواجهه با عدم‌قطعیت در این پژوهش تشریح شده و یک مدل استراتژی پیشنهاددهی استوار برای این مسأله ارائه می‌شود. برای آزمون مدل ارائه شده، شبکه استاندارد IEEE-RTS-96 مورد استفاده قرار گرفته و نتایج ارائه می‌گردد.

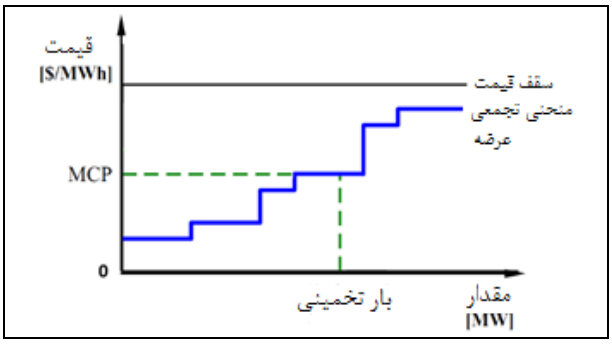
۲. پیش زمینه: مسأله استراتژی پیشنهاددهی

بازار روزبعد یکی از بازارهای متعارف در ساختارهای جدید فروش برق است که برای خرید و فروش انرژی در بازه ۲۴ ساعته روزبعد شکل گرفته است. بازار روزبعد به‌شکل یک مناقصه بین تولیدکنندگان اجرا می‌گردد و تولیدکنندگان برای شرکت در آن می‌بایست پیشنهاد تولید خود را در ۲۴ بازه یک ساعته روز آتی به بهره‌بردار بازار ارائه کنند و بهره‌بردار با بررسی پیشنهادهای رسیده نسبت به تعیین میزان تولید مجاز هر تولیدکننده اقدام می‌نماید [۱]. شکل (۱) ساختار پیشنهاد قابل ارائه از طرف تولیدکننده را نشان می‌دهد. متغیرهای پیشنهادی در این پروتکل زوج (Q_j, p_j) به‌عنوان مقدار انرژی و قیمت پیشنهادی برای پله jام تولید خواهد بود که تولیدکننده باید مقدار آن را تنظیم نماید. انتخاب پیشنهادهای برنده برعهده بهره‌بردار بازار است. بهره‌بردار براساس پیشنهادهای دریافتی و همچنین برآورد پارامترهایی مثل بارهای پیش‌بینی شده روی هر گره در هر ساعت و محدودیت‌های خطوط انتقال نیرو، توان قابل تولید توسط هر تولیدکننده را تعیین و اعلام می‌کند. همچنین توان ذخیره برای مواقعی که شبکه با قطعی خطوط یا خرابی یکی از واحدها مواجه می‌شود، درنظر گرفته می‌شود. شکل (۲) منحنی عرضه حاصل از تجمیع و مرتب‌سازی صعودی پیشنهادهای کلیه تولیدکنندگان و تقاطع آن با نقطه تقاضا را نشان می‌دهد.



شکل (۱). پروتکل پیشنهاد بلوکی

محل برخورد منحنی‌های عرضه و تقاضای بازار، نقطه تعادل را نشان می‌دهد. قیمتی که نقطه تعادل نشان می‌دهد، قیمت تسویه بازار[1] نامیده می‌شود. همه پیشنهادهای فروشی که قیمتی کمتر از قیمت تسویه را پیشنهاد داده باشند پذیرفته می‌شوند و شرکت‌های تولید براساس پیشنهادهای پذیرفته شده اقدام به تولید در بازه مذکور می‌کنند.



شکل(۲). منحنی تجمعی عرضه و تقاطع با تقاضای تخمینی [۱]

۳. پیشینه پژوهش

پیشنهاد یک تولیدکننده قیمت‌ساز به بازار، بر قیمت تسویه اثرگذار است. بنابراین یک تولیدکننده قیمت‌ساز نمی‌تواند پیش‌از تصمیم‌گیری، پیش‌بینی صحیحی از قیمت تسویه بازار ارائه دهد. براین اساس مدل‌های استراتژی پیشنهاددهی ارائه شده برای تولیدکنندگان قیمت‌ساز، شامل پیشنهادهای تمام رقبا در قالب (q_{ij}, p_{ij}) به‌عنوان حجم و قیمت پیشنهادی رقیب iام در پله پیشنهادی jام می‌باشد. مطالعاتی همچون [۳-۶] پیشنهادهای رقبا را که به‌شکل بلوکی به بهره‌بردار پیشنهاد می‌شود، به‌عنوان متغیرهای تصادفی در مدل لحاظ کرده‌اند و بر پایه سابقه پیشنهادهای رقبا در گذشته تابع توزیع احتمالی برای آن تخمین زده‌اند. [۷] با فرض کردن پیشنهادهای رقبا به‌شکل مجموعه‌ای از توابع خطی که به‌شکل (α_j, β_j) به‌عنوان عرض از مبدأ و شیب تابع قطعه jام ارائه می‌شود، از تابع توزیع توأم α_j و β_j در مدل استفاده کرده‌اند. [۸] نیز از تابع توزیع توام برای پیشنهاد رقیب iام و پیشنهاد تولیدکننده، برای پیش‌بینی رفتار رقبا استفاده کرده‌اند.

از بعد شیوه مدل‌سازی مسأله، پژوهشگران در حوزه مسأله استراتژی پیشنهاددهی برای تولیدکنندگان قیمت‌ساز، عمدتاً از دو رویکرد نظریه بازی‌ها و همچنین برنامه‌ریزی تصادفی تقریباً به یک نسبت استفاده کرده‌اند. [۶,۹] از تئوری بازی‌ها برای مدل‌سازی عملکرد تولیدکننده استراتژیک در مقابل رقبا استفاده کرده‌اند. همچنین [۱۰,۱۱] نیز از تئوری بازی‌ها برای مقابله با عدم قطعیت مسأله استفاده کرده‌اند با این تفاوت که آن‌ها علاوه‌بر پیشنهادهای رقبا، پیش‌بینی بار را هم به‌عنوان یک عامل عدم قطعیت در مدل وارد کرده‌اند.

در مقابل [۱۲,۱۳] و پژوهشگران متعدد دیگری از مدل برنامه‌ریزی تصادفی ریسک‌گریز برای رسیدن به یک استراتژی پیشنهاددهی استفاده کرده است. این پژوهش‌ها عمدتاً معیارهای متفاوتی را به‌عنوان معیار ارزیابی ریسک در مدل خود استفاده کرده‌اند.

1. Market Clearing Price (MCP)

به‌عنوان مثال [۱۴،۱۵]، احتمال وقوع زیان را در مدل خود وارد کرده‌اند. محققین در [۱۶] برمبنای ترجیحات تولیدکننده یک تابع مطلوبیت برای او تعریف کرده‌اند که ریسک تولیدکننده را نیز دربر می‌گیرد. [۱۷] در مدل برنامه‌ریزی تصادفی مسأله خود از معیار VaR برای ارزیابی ریسک در تابع هدف استفاده کردند. [۴] همچون [۱۸] در مدل‌سازی مسأله خود برای مواجهه با ریسک عدم قطعیت از معیار CVaR استفاده کردند. البته [۱۸] باتوجه به آنکه به‌دنبال مدل‌سازی استراتژی پیشنهاددهی برای نیروگاه‌های بادی بوده‌اند، علاوه‌بر پیشنهادهای رقبا، عدم قطعیت خروجی واحد و همچنین تقاضا را هم در مدل خود وارد کرده‌اند.

بهینه‌سازی استوار یکی از رویکردهای مهم در مواجهه با عدم قطعیت است که در مدل‌سازی سیستم‌های تولیدی در شرایط عدم‌قطعیت همچون [۱۹،۲۰] کارایی خوبی داشته است. روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی در شرایط عدم قطعیت جواب‌هایی با امید ریاضی بهتر برای تابع هدف پیدا می‌کنند. در مقابل، روش‌های بهینه‌سازی استوار جواب‌هایی پیدا می‌کنند که در مواجهه با عدم قطعیت هم شدنی باقی بمانند و هم مقدار تابع هدف افت قابل توجهی نکند. به بیان دیگر در شرایط وجود عدم قطعیت در محدودیت‌ها، روش‌های بهینه‌سازی استوار توانایی حفظ موجه بودن جواب را دارند. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد مطالعاتی همچون [۲۴-۲۱] درخصوص استراتژی پیشنهاددهی تولیدکنندگان قیمت‌پذیر از مدل‌های بهینه‌سازی استوار استفاده کرده‌اند اما درخصوص تولیدکننده‌های قیمت‌ساز، طبق اطلاع نویسنده هنوز از بهینه‌سازی استوار استفاده نشده است.

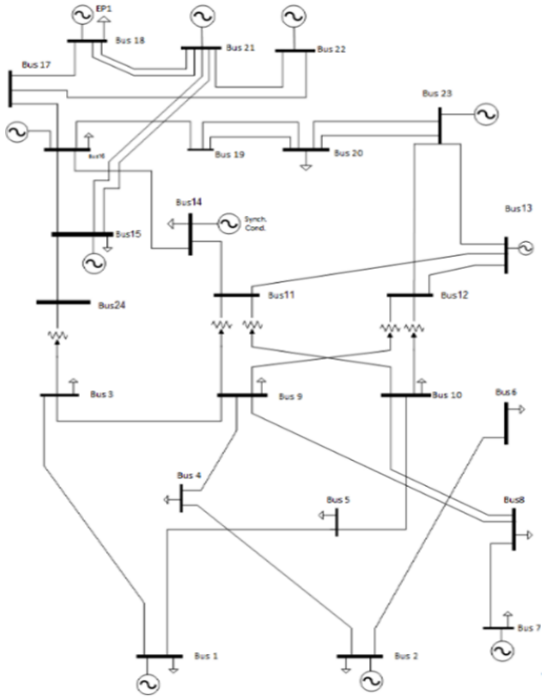
موضوع قابل توجه دیگر این است که در مسأله استراتژی پیشنهاددهی، بین ضرایب غیرقطعی (قیمت‌های پیشنهادی رقبا در ساعات مختلف) همبستگی قوی وجود دارد. به‌عنوان مثال افزایش دمای هوا منجربه افزایش تقاضا در تمام ساعات شبانه‌روز شده و درنتیجه قیمت‌های پیشنهادی تمام رقبا در تمام ۲۴ ساعت روزبعد افزایش می‌یابد. بنابراین درصورت بروز عدم‌قطعیت در داده‌ها، همه آن‌ها با رفتار کم‌وبیش یکسان تغییر می‌کنند. توجه به این موضوع باعث می‌شود مدل حاصل تنها در برابر وقوع عدم قطعیت‌های همبسته استوار باشد و با گرفتار شدن در دام بیش محافظه‌کاری، کیفیت تابع هدف افت نکند. همان‌طور که جدول (۱) نشان می‌دهد، بررسی مطالعات پیشین نشان داد تنها مرجع [۲۱] که البته تولیدکنندگان قیمت‌پذیر را مورد مطالعه قرارداده است، مدلی استوار متناسب با وجود همبستگی بین قیمت‌های تسویه بازار ارائه کرده‌اند.

جدول (۱). پیشینه پژوهش

شماره مرجع	نوع تولیدکننده	نوع مدل ریاضی	بررسی همبستگی در مدل	توضیحات
[۶]	قیمت‌ساز	تئوری بازی‌ها	خیر	-
[۷]	قیمت‌ساز	تئوری بازی‌ها	خیر	-
[۸]	قیمت‌ساز	تئوری بازی‌ها	خیر	-
[۹]	قیمت‌ساز	تئوری بازی‌ها	خیر	-
[۱۰]	قیمت‌ساز	تئوری بازی‌ها	خیر	بررسی پیش‌بینی بار به‌عنوان عامل عدم قطعیت علاوه‌بر پیشنهادهای رقبا
[۱۱]	قیمت‌ساز	تئوری بازی‌ها	خیر	بررسی پیش‌بینی بار به‌عنوان عامل عدم قطعیت علاوه‌بر پیشنهادهای رقبا
[۱۲]	قیمت‌ساز	برنامه‌ریزی تصادفی	خیر	-
[۱۳]	قیمت‌ساز	برنامه‌ریزی تصادفی	خیر	-
[۱۴]	قیمت‌ساز	برنامه‌ریزی تصادفی	خیر	شاخص ریسک: احتمال وقوع زیان
[۱۵]	قیمت‌ساز	برنامه‌ریزی تصادفی	خیر	شاخص ریسک: احتمال وقوع زیان
[۱۶]	قیمت‌ساز	برنامه‌ریزی تصادفی	خیر	تعریف تابع مطلوبیت برمبنای ترجیحات تولیدکننده
[۱۷]	قیمت‌ساز	برنامه‌ریزی تصادفی	خیر	شاخص ریسک: VaR
[۱۸]	قیمت‌ساز	برنامه‌ریزی تصادفی	خیر	بررسی خروجی واحد به‌عنوان عامل عدم قطعیت شاخص ریسک: CVaR
[۲۱]	قیمت‌پذیر	بهینه‌سازی استوار	بله	استفاده از مدل بهینه‌سازی استوار همبسته
[۲۲]	قیمت‌پذیر	بهینه‌سازی استوار	خیر	-
[۲۳]	قیمت‌پذیر	بهینه‌سازی استوار	خیر	تلفیق نیروگاه بادی و ذخیره‌ساز
[۲۴]	قیمت‌پذیر	بهینه‌سازی استوار	خیر	ترکیب بازار روزبعد و رزرو

۴. معرفی مسأله

یک شبکه انتقال نیرو متشکل از مجموعه‌ای از گره‌ها به‌عنوان نقاط تزریق (تولید) و یا برداشت از شبکه (بار) و همچنین خطوط انتقال نیرو بین این گره‌ها است. تولیدکننده استراتژیک که هدف از حل مسأله حاضر تهیه بهترین پیشنهاد تولید برای او است، ممکن است چندین واحد تولیدی روی گره‌های مختلف از شبکه دراختیار داشته باشد. دسته دیگر، تولیدکنندگان رقیب هستند که هر یک می‌توانند یک یا چند واحد از سایر واحدهای تولیدی موجود در شبکه را دراختیار داشته باشند. شکل (۳) نمونه‌ای از یک شبکه قدرت شامل ۲۴ گره (۲۴-باس) را نشان می‌دهد.

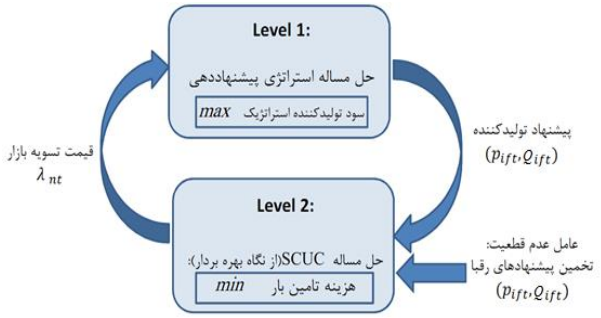


شکل (۳). شبکه استاندارد IEEE RTS-96 [۲۵]

مسأله استراتژی پیشنهاددهی برای تولیدکننده قیمت‌ساز به این شکل تعریف می‌شود: تولیدکننده استراتژیک باتوجه به ویژگی‌های واحدهای دراختیار خود و ساختار و ظرفیت خطوط انتقال شبکه و همچنین با پیش‌بینی بار برای هر گره از شبکه قصد دارد پیشنهادی به بهره‌بردار شبکه ارائه دهد که اولاً امکان تولید در بازار روزبعد را به‌دست آورد و ثانیاً حداکثر سودآوری را برای او به‌همراه داشته باشد. از طرف دیگر تولیدکننده استراتژیک می‌داند که بهره‌بردار شبکه باهدف کاهش هزینه کلی تأمین بار (که ممکن است با اهداف دیگری همچون کمینه کردن میزان آلایندگی همراه باشد) باید مسأله بهینه‌سازی دیگری را حل کند تا از بین پیشنهادهای رسیده ازبین کلیه تولیدکنندگان، بهترین برنامه تولید را برای تولیدکنندگان انتخاب نماید. بنابراین می‌توان مسأله اصلی را به‌شکل یک مسأله برنامه‌ریزی دوسطحی به‌شرح زیر مدل کرد.

مسأله سطح اول، مسأله موردنظر تولیدکننده استراتژیک است که مسأله خودبرنامه‌ریزی[1] نامیده می‌شود و طی آن تولیدکننده قدرت، خروجی مطلوب واحدهای خود را متناسب با قیمت تسویه بازار به‌عنوان یک عامل خارجی تنظیم می‌کند. برای تعیین مقادیر زوج‌های (Q_j, p_j) عموما p_j با مقادیر ازپیش تعیین شده متساوی‌الفاصله در طول بازه نوسانات معمول قیمت تسویه بازار مقداردهی می‌شود و مقدار متغیر Q_{ift}، از حل مسأله سطح ۱ به‌دست می‌آید.

زیرمسأله سطح دوم، مربوط به بهره‌بردار بازار می‌گردد که آن را مسأله تسویه بازار می‌نامیم. در این سطح، بهره‌بردار بازار با دریافت پیشنهادهای تولیدکنندگان و حل مسأله، میزان تولید مجاز هر تولیدکننده و نتیجتاً قیمت تسویه بازار را تعیین می‌نماید. شکل (۴) رابطه بین این دو مسأله را به‌خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، پیشنهادهای تولیدکننده حاصل از حل مسأله سطح ۱، به‌عنوان پارامتر به مسأله سطح ۲ وارد می‌شوند. در مسأله سطح ۲ متغیرهای λ_{nt} و q_{ift} متغیرهای تصمیم مسأله هستند که به‌ترتیب نشان‌دهنده قیمت تسویه بازار در هر نقطه از شبکه و همچنین مقدار تولید مجاز هر واحد در هر ساعت طبق تصمیم بهره‌بردار بازار هستند. متغیر λ_{nt} از مسأله سطح ۲، پارامتر مسأله سطح ۱ محسوب می‌شوند.



شکل (۴). مسأله استراتژی پیشنهاددهی به‌عنوان یک مسأله دوسطحی

۵. مدل‌سازی مسأله

در این بخش ابتدا مدل قطعی دوسطحی طبق آنچه در بخش قبل معرفی گردید برای مسأله پیشنهاد می‌گردد. سپس برای تسهیل در حل مسأله، مدل پیشنهادی به‌صورت مدل یکپارچه تک‌سطحی بازنویسی می‌گردد. در ادامه با اضافه کردن عوامل غیرقطعی مدل به مسأله، مدل بهینه‌سازی استوار مربوطه توسعه داده خواهد شد.

۵-۱. مدل بهینه‌سازی قطعی مسأله

زیرمسأله سطح ۱ (خودبرنامه‌ریزی تولیدکننده استراتژیک):

$$\max \sum_{i\in I^S, t\in T} \left[\lambda_{n_i t} . \sum_{f\in F^i} Q_{ift} - c_{it}\left(\sum_{f\in F^i} Q_{ift} \right) \right] \quad (۱)$$

$$Q \in S^Q \quad (۲)$$

1. Self-scheduling problem

مسأله فوق سطح اول مدل را تشکیل می‌دهد که هدف آن بیشینه کردن سود تولیدکننده استراتژیک است. در این مدل مجموعه واحدهای تولیدی در دست تولیدکننده استراتژیک با I^S و مجموعه واحدهای دراختیار تولیدکنندگان رقیب با I^R نمایش داده می‌شود. محدودیت (۲) بیانگر تمام قیود فنی تولیدکننده و قیود تعریف‌کننده هزینه‌های واحد است که به‌صورت کامل در [۲۱] معرفی شده است. تابع $c_{it}(.)$ که محاسبه‌کننده هزینه‌های واحد است توسط محدودیت زیر تعریف می‌گردد:

$$c_{it}(q_{it}) = \text{cost}_i^{fix} + \text{cost}_{it}^{fuel} + \text{cost}_{it}^{mt} + \text{cost}_{it}^{SU} + \text{cost}_{it}^{SD} \quad \forall i,t \tag{۳}$$

زیرمسأله سطح ۲(تسویه بازار):

$$min \sum_{i,f,t} p_{ift} \cdot q_{ift} \tag{۴}$$

Subject to:

$$0 \le q_{ift} \le Q_{ift} : \pi_{ift}^{min}, \pi_{ift}^{max} \quad \forall i,f,t \tag{۵}$$

$$\sum_{i,f} q_{ift} - \sum_{n} L_{nt} = 0 : \lambda_{rt} \quad \forall t \tag{۶}$$

$$-Fl_l^{max} \le \sum_n A_{nr}^l \cdot \left\{ \sum_{i \in \Psi_n, f} q_{ift} - \sum_n L_{nt} \right\} \le Fl_l^{max} : \mu_{lt}^{min}, \mu_{lt}^{max} \quad \forall l,t \tag{۷}$$

$$\lambda_{nt} = \lambda_{rt} - \sum_l A_{nr}^l \cdot (\mu_{lt}^{max} - \mu_{lt}^{min}) \quad \forall n,t \tag{۸}$$

سطح دوم مدل شامل مسأله تسویه بازار مربوط به بهره‌بردار شبکه است و مقید به محدودیت‌های انتقال است. معادله (۴) تابع هدف این سطح شامل کمینه کردن کل هزینه پرداختی به مجموعه تولیدکنندگان را نشان می‌دهد. محدودیت (۵) میزان تولید هر تولیدکننده را محدود به مقدار اعلام شده از طرف تولیدکننده می‌کند. متغیرهای $\pi_{ift}^{min}, \pi_{ift}^{max}$ متغیرهای دوگان متناظر این محدودیت به‌ازای حداقل و حداکثر مقدار تولید است. Q_{ift} توان پیشنهادی تولیدکننده و q_{ift} توان پذیرفته شده از طرف بهره‌بردار بازار را نشان می‌دهند.

سایر محدودیت‌های این مسأله توسط [۲۶] به‌عنوان مدل مبتنی‌بر ضریب توزیع انتقال توان، PTDF[1]، ارائه شده است. در مورد این ضریب در ادامه بیشتر توضیح داده می‌شود. محدودیت (۶) محدودیت تعادل بار در کل شبکه است و باعث می‌شود کل توان تولیدی تزریقی به شبکه برابر کل بار برداشت شده از آن باشد. متغیردوگان این محدودیت، λ_{rt}، قیمت سایه‌ای کل سیستم است به این معنی که هزینه تولید یک مگاوات اضافی در شبکه برابر λ_{rt} است. از آنجا که تأمین این توان اضافی توسط تولیدکننده مستقر در گره مرجع انجام می‌شود، λ_{rt}، معادل قیمت سایه‌ای گره مرجع نیز می‌باشد.

محدودیت (۷) محدودیت ظرفیت هر خط انتقال است که تضمین می‌کند جریان در هر خط انتقال از ظرفیت آن خط تجاوز نکند. متغیرهای دوگان این محدودیت‌ها، μ_{lt}^{max} و μ_{lt}^{min} قیمت سایه‌ای ظرفیت‌های انتقال خطوط را بیان می‌کند. محدودیت (۸) قیمت حاشیه‌ای محلی مربوط به هر گره n را در ساعت t برحسب متغیرهای دوگان مسله سطح دو محاسبه می‌کند.

ضریب توزیع انتقال توان حساسیت خطوط انتقال را در ازای انتقال توان مشخصی بین دو گره از شبکه نشان می‌دهد. هنگامی‌که مقدار مشخصی از توان از گره i به گره j منتقل می‌شود، A_{ij}^l بنا به تعریف، تغییر در جریان خط l را نشان می‌دهد [۲۷]. براین اساس ضریب توزیع انتقال توان به‌شکل زیر تعریف می‌شود:

$$A_{ij}^l = \frac{\Delta F_l}{\Delta P} \tag{۹}$$

که در معادله فوق i و j گره‌هایی هستند که توان به‌ترتیب در آن تزریق و برداشت می‌شود. ΔP توان انتقالی از گره i به گره j است و ΔF_l تغییر در جریان روی خط l است هنگامی‌که توان ΔP از گره i به گره j منتقل شود.

۵-۲. بازنویسی مدل یکپارچه تک‌سطحی

یک روش متداول برای حل مسائل بهینه‌سازی دوسطحی، حل متوالی دو سطح با استفاده از جواب‌های سطح دیگر تا رسیدن به همگرایی است. اما استفاده از این رویکرد با درنظر گرفتن عدم قطعیت در مسأله با چالش بزرگی همراه است. در مسأله استراتژی پیشنهاددهی غیرقطعی، مهم‌ترین عامل عدم‌قطعیت در مسأله، پیشنهادهای رقبا است. این پیشنهادها به‌عنوان ضرایب غیرقطعی به زیرمسأله سطح دو وارد می‌شوند و فضایی از عدم‌قطعیت را در این مسأله ایجاد می‌کنند. با این حال آنچه به‌عنوان جواب استوار برای چنین مسأله‌ای شناخته می‌شود، متغیرهای تصمیم زیرمسأله سطح یک یعنی پیشنهادهای تولیدکننده است. به بیان دیگر متغیرهای تصمیمی که به‌دنبال مقادیر استوار آن‌ها هستیم و ضرایب غیرقطعی در دو زیرمسأله متفاوت ظاهر شده‌اند حال آنکه جواب‌های استوار برای یک مسأله در برابر فضای عدم‌قطعیت حاصل از ضرایب غیرقطعی همان مسأله تعریف می‌شوند. از طرف دیگر تبدیل فضای عدم‌قطعیت زیرمسأله سطح دو به فضایی از عدم‌قطعیت برای زیرمسأله سطح یک هم امکان‌پذیر به‌نظر نمی‌رسد. بنابراین حل تناوبی دو سطح مسأله رویکرد مناسبی برای مواجهه با مسأله فوق نیست.

استفاده از شرایط کان-تاکر می‌تواند به تبدیل مسأله به مدل تک‌سطحی کمک کند. شرایط کان-تاکر به‌صورت عمومی شرط لازم برای بهینه بودن یک جواب شناخته می‌شود. با این حال درصورت وجود شرایطی خاص (مقعر بودن تابع هدف و محدب بون فضای شدنی مسأله برای یک مسأله بیشینه‌سازی) تبدیل به شرایط کافی برای بهینه بودن جواب می‌شود [۲۸]. بنابراین درصورت وجود این شرایط کافیست شرایط کان-تاکر برای مسأله سطح ۲ نوشته شده و به‌عنوان محدودیت به مسأله سطح ۱ افزوده شوند. در این صورت با یک‌بار حل مسأله

1. Power Transfer Distribution Factor

سطح بالا با محدودیت‌های جدید، جوابی به‌دست می‌آید که در شرایط کان-تاکر مسأله سطح پایین هم صدق می‌کند. بنابراین جواب حاصل باتوجه به صادق بودن در شرایط کان-تاکر، جواب بهینه مسأله سطح پایین نیز می‌باشد. با نوشتن شرایط کان-تاکر برای مسأله تسویه بازار (مسأله سطح ۲) و اضافه کردن آن به مسأله سطح یک، می‌توان مدل یکپارچه تک‌سطحی مسأله استراتژی پیشنهاددهی را به‌شرح زیر تشکیل داد:

$$\max \sum_{i\in I^S,t\in T}\left[\lambda_{n_i t}\cdot\sum_{f\in F^i}Q_{ift}-c_{it}\left(\sum_{f\in F^i}Q_{ift}\right)\right] \quad (۱۰)$$

$$\lambda_{rt}-\pi^{max}_{ift}+\pi^{min}_{ift}-\sum_{l}A^{l}_{n_i r}\cdot\left(\mu^{max}_{lt}-\mu^{min}_{lt}\right)-p_{ift}=0 \qquad \forall i,f,t \quad (۱۱)$$

$$\sum_{l,f}q_{ift}-\sum_{n}L_{nt}=0 \qquad \forall t \quad (۱۲)$$

$$0\le q_{ift}\perp \pi^{max}_{ift}\ge 0 \qquad \forall i,f,t \quad (۱۳)$$

$$0\le Q_{ift}-q_{ift}\perp \pi^{max}_{ift}\ge 0 \qquad \forall i,f,t \quad (۱۴)$$

$$0\le Fl^{max}_{l}-\sum_{n}\left\{A^{l}_{nr}\cdot\left\{\sum_{i\in\Psi_n,f}q_{ift}-\sum_{n}L_{nt}\right\}\right\}\perp\mu^{max}_{lt}\ge 0 \qquad \forall l,t \quad (۱۵)$$

$$0\le Fl^{max}_{l}+\sum_{n}\left\{A^{l}_{nr}\cdot\left\{\sum_{i\in\Psi_n,f}q_{ift}-\sum_{n}L_{nt}\right\}\right\}\perp\mu^{max}_{lt}\ge 0 \qquad \forall l,t \quad (۱۶)$$

$$\lambda_{nt}=\lambda_{rt}-\sum_{l}A^{l}_{nr}\cdot\left(\mu^{max}_{lt}-\mu^{min}_{lt}\right) \qquad \forall n,t \quad (۱۷)$$

$$Q\in S^{Q}$$

۵-۲-۱. خطی‌سازی تابع هدف

طبق قضیه قوی دوگان، در یک مسأله بهینه‌سازی، به‌ازای جواب بهینه، مقدار تابع هدف برای مسأله اولیه و مسأله دوگان برابر است. براین اساس برای مسأله تسویه بازار (۸)-(۴) می‌توان معادله زیر را استنتاج نمود:

$$\sum_{i,f,t}p_{ift}\cdot q_{ift}=-\sum_{i,f,t}\pi^{max}_{ift}\cdot Q_{ift}-\sum_{l,t}\mu^{max}_{lt}\cdot\left(Fl^{max}_{l}+\sum_{n}A^{l}_{nr}\cdot L_{nt}\right)-\sum_{l,t}\mu^{min}_{lt}\cdot\left(Fl^{max}_{l}-\sum_{n}A^{l}_{nr}\cdot L_{nt}\right)+\sum_{n}\lambda_{rt}\cdot L_{nt} \quad (۱۸)$$

همچنین اگر دوطرف محدودیت (۱۱) در q_{ift} ضرب شود و روی اندیس‌های i و f و t هم جمع بسته شود می‌توان محدودیت زیر را استخراج کرد:

$$\sum_{i\in I^S,f,t}p_{ift}\cdot q_{ift}=\sum_{i\in I^S,f,t}\lambda_{rt}\cdot q_{ift}-\sum_{i\in I^S,f,t}\left(\pi^{max}_{ift}-\pi^{min}_{ift}\right)\cdot q_{ift}-\sum_{l,t}\left\{\left(\mu^{max}_{lt}-\mu^{min}_{lt}\right).\sum_{i\in I^S,f}A^{l}_{nr}\cdot q_{ift}\right\} \quad (۱۹)$$

با بازنویسی محدودیت‌های متعامد (۱۳) و (۱۴) و استفاده از آن‌ها در محدودیت (۱۹) می‌توان نوشت:

$$\sum_{i\in I^S,f,t}p_{ift}\cdot q_{ift}=\sum_{i\in I^S,f,t}\lambda_{rt}\cdot q_{ift}-\sum_{i\in I^S,f,t}\pi^{max}_{ift}\cdot Q_{ift}-\sum_{l,t}\left\{\left(\mu^{max}_{lt}-\mu^{min}_{lt}\right).\sum_{i\in I^S,f}A^{l}_{nr}\cdot q_{ift}\right\} \quad (۲۰)$$

مقایسه محدودیت‌های (۱۸) و (۲۰) نتیجه می‌دهد:

$$\sum_{i\in I^S,f,t}\lambda_{rt}\cdot q_{ift}=-\sum_{i\in I^R,f,t}p_{ift}q_{ift}-\sum_{i\in I^R,f,t}\pi^{max}_{ift}\cdot Q_{ift}-\sum_{l,t}\mu^{max}_{lt}\cdot Fl^{max}_{l}-\sum_{l,t}\mu^{min}_{lt}\cdot Fl^{max}_{l}-\sum_{l,t}\left\{\left(\mu^{max}_{lt}-\mu^{min}_{lt}\right).\sum_{n}A^{l}_{nr}\cdot L_{nt}\right\}+\sum_{l,t}\left\{\left(\mu^{max}_{lt}-\mu^{min}_{lt}\right).\sum_{i\in I^S,f}A^{l}_{nr}\cdot q_{ift}\right\}+\sum_{n}\lambda_{rt}\cdot L_{nt} \quad (۲۱)$$

نهایتاً با تلفیق معادله (۱۷) با معادله (۲۱) که λ_{rt} را برحسب قیمت در گره مرجع تعریف می‌کند، معادله نهایی زیر به‌دست می‌آید:

$$\sum_{i\in I^S,f}\lambda_{n_i t}\cdot q_{ift}=-\sum_{i\in I^R,f}p_{ift}\cdot q_{ift}-\sum_{i\in I^R,f}\pi^{max}_{ift}\cdot Q_{ift}-\sum_{l}\mu^{max}_{lt}\cdot Fl^{max}_{l}-\sum_{l}\mu^{min}_{lt}\cdot Fl^{max}_{l}+\sum_{n}\lambda_{nt}\cdot L_{nt} \qquad \forall t\in T \quad (۲۲)$$

۵-۲-۲. استخراج مدل تک‌سطحی

محدودیت‌های (۱۳) تا (۱۶) را می‌توان به‌شکل زیر به محدودیت‌های خطی تبدیل کرد:

$$q_{ift}\ge 0 \qquad \forall i,f,t \quad (۲۳)$$

$$\pi^{min}_{ift}\ge 0 \qquad \forall i,f,t \quad (۲۴)$$

$$q_{ift}\le\left(1-v^{min}_{ift}\right).M^{Q} \qquad \forall i,f,t \quad (۲۵)$$

$$\pi^{min}_{ift}\le v^{min}_{ift}.M^{\pi} \qquad \forall i,f,t \quad (۲۶)$$

$$Q_{ift} - q_{ift} \geq 0 \qquad \forall i,f,t \qquad (۲۷)$$
$$\pi_{ift}^{max} \geq 0 \qquad \forall i,f,t \qquad (۲۸)$$
$$Q_{ift} - q_{ift} \leq \left(1 - \nu_{ift}^{max}\right).M^{Q} \qquad \forall i,f,t \qquad (۲۹)$$
$$\pi_{ift}^{max} \leq \nu_{ift}^{max}.M^{\pi} \qquad \forall i,f,t \qquad (۳۰)$$
$$\sum_{n}\left\{A_{nr}^{l}.\left\{\sum_{i\in\Psi_{n},f} q_{ift} - \sum_{n} L_{nt}\right\}\right\} + Fl_{l}^{max} \geq 0 \qquad \forall l,t \qquad (۳۱)$$
$$\mu_{lt}^{min} \geq 0 \qquad \forall\, l,t \qquad (۳۲)$$
$$\sum_{n}\left\{A_{nr}^{l}.\left\{\sum_{i\in\Psi_{n},f} q_{ift} - \sum_{n} L_{nt}\right\}\right\} + Fl_{l}^{max} \leq \left(1 - \nu_{lt}^{Lmin}\right).M^{L} \qquad \forall\, l,t \qquad (۳۳)$$
$$\mu_{lt}^{min} \leq \nu_{lt}^{Lmin}.M^{L\mu} \qquad \forall\, l,t \qquad (۳۴)$$
$$\sum_{n}\left\{A_{nr}^{\ell}.\left\{\sum_{i\in\Psi_{n},f} q_{ift} - \sum_{n} L_{nt}\right\}\right\} - Fl_{l}^{max} \leq 0 \qquad \forall\, l,t \qquad (۳۵)$$
$$\mu_{lt}^{max} \geq 0 \qquad \forall\, l,t \qquad (۳۶)$$
$$-\sum_{n}\left\{A_{nr}^{\ell}.\left\{\sum_{i\in\Psi_{n},f} q_{ift} - \sum_{n} L_{nt}\right\}\right\} + Fl_{l}^{max} \leq \left(1 - \nu_{lt}^{Lmax}\right).M^{L} \qquad \forall\, l,t \qquad (۳۷)$$
$$\mu_{lt}^{max} \leq \nu_{lt}^{Lmax}.M^{L\mu} \qquad \forall\, l,t \qquad (۳۸)$$
$$\nu_{lt}^{Lmax}, \nu_{lt}^{Lmin}, \nu_{ift}^{min}, \nu_{ift}^{max} \in \{0,1\}$$

باتوجه به تغییرات ایجاد شده در مدل ناشی از تبدیل مدل دوسطحی به مدل تک‌سطحی و خطی کردن آن می‌توان فرمول‌بندی نهایی زیر را برای مدل ارائه نمود:

$$\begin{aligned}\max \text{profit} = &-\left(\sum_{i\in I^{R},f,t} p_{ift}.Q_{ift}\right) \\ &- \sum_{i\in I^{R},f,t} \pi_{ift}^{\max} Q_{ift} \\ &- \sum_{l,t} \mu_{lt}^{max} Fl_{l}^{max} \\ &- \sum_{l,t} \mu_{lt}^{min} Fl_{l}^{max} + \sum_{n,t} \lambda_{nt} L_{nt} \\ &- \sum_{i\in I^{S},t}\left[c_{it}\left(\sum_{f\in F^{i}} Q_{ift}\right)\right]\end{aligned} \qquad (۳۹)$$

محدودیت‌های (۸)، (۱۱) و (۱۲)

محدودیت‌های (۲۳) تا (۳۸)

$Q \in S^{Q}$

۶. مسأله استراتژی پیشنهاددهی غیرقطعی

همان‌طور که قبلاً بیان شده هر تولیدکننده پیشنهاد خود را در قالب پلکانی متشکل از چندین زوج توان تولیدی-قیمت به بهره‌بردار ارائه می‌دهد. اگر توان و قیمت پیشنهادی تولیدکننده به‌ترتیب توسط متغیرهای Q_{ift} و p_{ift} نمایش داده شود، یک پیشنهاد را می‌توان به‌کمک زوج‌های (Q_{ift}, p_{ift}) نمایش داد. از آنجا که حدس زدن توان تولیدی هر پله از پیشنهاد رقیب باتوجه به شناسایی بازه خروجی واحدهای تولیدی او و همچنین داده‌های گذشته چندان پیچیده نیست، می‌توان از دو جز پیشنهادی رقبا تنها قیمت را به‌عنوان پارامتر غیرقطعی در مدل‌سازی وارد کرد. براین اساس لازم است برای هر یک از تولیدکنندگان رقیب، Q_{ift} به‌عنوان پارامتر قطعی و p_{ift} به‌صورت غیرقطعی به مدل معرفی شود.

تنها پارامتر غیرقطعی مسأله در تابع هدف و همچنین در محدودیت (۱۱) ظاهر شده است. بنابراین می‌توان مدل غیرقطعی را برای این مسأله به‌شرح زیر تشکیل داد:

$$\begin{aligned}\max \text{profit} = &-\left(\sum_{i\in I^{R},f,t} \tilde{p}_{ift}.Q_{ift}\right) \\ &- \sum_{i\in I^{R},f,t} \pi_{ift}^{\max} Q_{ift} \\ &- \sum_{l,t} \mu_{lt}^{max} Fl_{l}^{max} \\ &- \sum_{l,t} \mu_{lt}^{min} Fl_{l}^{max} + \sum_{n,t} \lambda_{nt} L_{nt} \\ &- \sum_{i\in I^{S},t}\left[c_{it}\left(\sum_{f\in F^{i}} Q_{ift}\right)\right]\end{aligned} \qquad (۴۰)$$

$$\lambda_{rt} - \pi_{ift}^{max} + \pi_{ift}^{min} - \sum_{l} A_{n_i r}^{l}.\left(\mu_{lt}^{max} - \mu_{lt}^{min}\right) - \tilde{p}_{ift} = 0 \qquad \forall i,f,t \qquad (۴۱)$$

محدودیت‌های ۸ و ۱۲

محدودیت‌های ۲۳ تا ۲۸

$Q \in S^{Q}$

که در مدل فوق $\tilde{p}_{ift}$ قیمت غیرقطعی پیشنهادی رقیب است و در بازه زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{p}_{ift} \in \left(p_{ift} - \hat{p}_{ift}, p_{ift} + \hat{p}_{ift}\right) \qquad (۴۲)$$

که p_{ift} مقدار اسمی و $\hat{p}_{ift}$ مقدار حداکثر انحراف برای پارامتر $\tilde{p}_{ift}$ هستند.

۷. مسأله استراتژی پیشنهاددهی استوار

از ویژگی‌های عدم‌قطعیت موجود در بازار روزبعد، وجود همبستگی بین ضرایب غیرقطعی است [۲۱]. قیمت‌های پیشنهادی رقبا (ضرایب غیرقطعی مسأله) در ۲۴ ساعت شبانه‌روز عموماً با یکدیگر همبستگی قابل توجهی دارند و یک تولیدکننده بسته به برآوردش از بازار روزبعد، قیمت پیشنهادی تمام ساعت‌های روز آتی را در یک سطح بالا یا پایین تنظیم می‌کند.

از ویژگی‌های مدل ارائه شده توسط مولوی و همکاران [۲۹]، همبستگی بین اختلال‌ها در تمام ضرایب غیرقطعی است. در مدل مذکور به‌ازای هر سناریو، مقادیری برای تمام ضرایب غیرقطعی تعریف می‌شود و وقوع هر سناریو، مقادیر تمام ضرایب را به‌طور همزمان

دستخوش تغییر می‌کند. براین اساس با درنظر گرفتن اختلال‌های مشابه برای ضرایب مختلف به‌ازای هر سناریو، می‌توان در مدل فرض وجود همبستگی بین اختلال‌ها را درنظر گرفت.

در مدل‌سازی استوار مولوی و همکاران [۲۷]، فرم کلی تابع هدف متشکل از دو بخش ارزش انتظاری و تابع جریمه تعریف می‌گردد:

$$\min \quad \sigma(.) + \omega\rho(.) \tag{۴۳}$$

که در آن $\sigma(.)$ عبارتی متشکل از تابع هدف اصلی به‌ازای سناریوهای $s \in \Omega$ مانند ارزش انتظاری تابع هدف اصلی است و $\rho(.)$ تابع جریمه‌ای است که برای جریمه کردن جواب‌های نشدنی استفاده می‌شود. در حقیقت جمله دوم معیار استواری مدل است. جریمه ω توازن بین این دو شکل استواری را تنظیم می‌کند.

۷-۱. مدل استراتژی پیشنهاددهی سناریو محور

فرض کنید سود تولیدکننده برای سناریوی $s \in \Omega$ به‌شکل زیر که معادل تابع هدف (۴۰) است تعریف شود:

$$prft_s = income_s - cost_s \tag{۴۴}$$

$$\begin{aligned} income_s = &- \sum_{i\in I^R,f,t} p_{sift}.Q_{ift} - \sum_{i\in I^R,f,t} \pi_{ift}^{\max} Q_{ift} \\ &- \sum_{l,t} \mu_{lt}^{max} \mathrm{Fl}_l^{max} \\ &- \sum_{l,t} \mu_{lt}^{min} \mathrm{Fl}_l^{\max} + \sum_{n,t} \lambda_{nt} L_{nt} \end{aligned} \tag{۴۵}$$

$$cost_s = \sum_{i\in I^s,t} \left[c_{it} \left(\sum_{f\in F^i} Q_{ift} \right) \right] \tag{۴۶}$$

که $prft_s$، $income_s$ و $cost_s$ به‌ترتیب سود، درآمد و هزینه به‌ازای وقوع سناریوی s را نشان می‌دهند. مقادیر این متغیرها متأثر از مقدار پارامتر غیرقطعی p_{sift}، تعیین می‌شود که با اضافه شدن اندیس s به‌ازای هر سناریو مقدار متفاوتی می‌گیرد. اگر احتمال وقوع هر یک از سناریوهای $s \in \Omega$ با η_s نمایش داده شود، در این صورت ارزش انتظاری متغیر $prft_s$ به ازای سناریوهای مختلف می‌تواند به‌شکل زیر محاسبه شود:

$$\sigma(prft_s) = \sum_s prft_s.\eta_s \tag{۴۷}$$

در مسأله مورد بررسی ما عدم‌قطعیت (یعنی $\tilde{p}_{ift}$) هم در تابع هدف و هم در محدودیت ظاهر شده است. بنابراین برای محافظت از جواب مدل در برابر اختلال‌ها نیاز است هر دو شکل استواری یعنی استواری جواب و استواری مدل (طبق تعریف مولوی و همکاران [۲۹]) در مسأله اعمال گردد. برای این منظور جمله $\rho(.)$ در معادله (۴۳) باید جریمه‌ای در برابر هر دو شکل نااستواری را درخود داشته باشد. رحمانی و همکاران در [۳۰] برای مدل‌سازی یک مسأله برنامه‌ریزی تولید استوار با شرایط مشابهی مواجه بوده‌اند و حاصل‌جمع دو عبارت متوسط انحراف در ارزش انتظاری سود و متوسط تخطی در محدودیت را به‌عنوان جمله $\rho(.)$ برای اندازه‌گیری مقدار نااستواری انتخاب کردند. برای مسأله مورد بررسی در این مطالعه نیز می‌توان از مجموع این دو عبارت به‌جای جمله $\rho(.)$ استفاده کرد:

$$\rho(prft_s) = \sum_s \left(\eta_s \left| prft_s - \sum_{s'} \eta_{s'} prft_{s'} \right| \right) + \sum_{s,i,f,t} \left(\eta_s |\delta_{sift}| \right) \tag{۴۸}$$

جمله اول در سمت راست معادله فوق متوسط انحراف از ارزش انتظاری سود تولیدکننده و جمله دوم متوسط تخطی در محدودیت شامل عدم‌قطعیت را اندازه‌گیری می‌کند. متغیر δ_{sift} مقدار تخطی را در معادله (۴۱) محاسبه می‌کند. براین اساس مدل استراتژی پیشنهاددهی استوار سناریو محور را می‌توان به‌شکل زیر تعریف کرد:

$$\begin{aligned} \max \sum_s \eta_s prft_s - \omega \Bigg[&\sum_s \left(\eta_s \left| prft_s - \sum_{s'} \eta_{s'} prft_{s'} \right| \right) \\ &+ \sum_{s,i,f,t} \left(\eta_s |\delta_{sift}| \right) \Bigg] \end{aligned} \tag{۴۹}$$

$$\lambda_{rst} - p_{sift} - \pi_{ift}^{max} + \pi_{ift}^{min} - \sum_l A_{n_i r}^l \left(\mu_{lt}^{max} - \mu_{lt}^{min} \right) + \delta_{sift} = 0 \qquad \forall s,i,f,t \tag{۵۰}$$

محدودیت‌های ۴۳ تا ۴۵ برای تعریف $prft_s$

محدودیت‌های ۸ و ۱۲

محدودیت‌های ۲۳ تا ۲۸

$q \in S^q$

تابع هدف مدل فوق به‌دلیل وجود قدرمطلق و حاصل‌ضرب متغیرها غیرخطی هستند. این مدل را می‌توان با تعریف و اضافه کردن متغیرهای کمکی τ_s^1 و τ_s^2 به‌شرح زیر به مدل خطی تبدیل کرد:

$$\begin{aligned} \max \sum_s \eta_s prft_s \\ -\omega \Bigg[\sum_s \eta_s \left(\left(prft_s - \sum_{s'} \eta_{s'} prft_{s'} \right) + 2\tau_s^1 \right) \\ + \sum_{s,i,f,t} \eta_s (\delta_{sift} + 2\,\tau_s^2) \Bigg] \end{aligned} \tag{۵۱}$$

$$prft_s - \sum_{s'} \eta_{s'} prft_{s'} + \tau_s^1 \geq 0 \qquad \forall s \tag{۵۲}$$

$$\delta_{s,i,f,t} + \tau_s^2 \geq 0 \qquad \forall s,i,f,t \tag{۵۳}$$

$$\tau_s^1 + \tau_s^2 \geq 0 \qquad \forall s \tag{۵۴}$$

محدودیت ۵۰

محدودیتهای ۴۴ تا ۴۶ برای تعریف $prft_s$

محدودیتهای ۸ و ۱۲

محدودیتهای ۲۳ تا ۲۸

$q \in S^q$

۸. مطالعه موردی

برای آزمون مدل‌های ارائه شده در این مطالعه لازم است یک شبکه استاندارد انتقال نیرو انتخاب شود و داده‌های این شبکه به‌عنوان پارامترهای مسأله مورد استفاده قرار گیرند. برای این منظور در این

مطالعه از شبکه استاندارد IEEE RTS-96[1] که توسط کمیته روش‌های کاربرد احتمال موسسه مهندسین برق و الکترونیک[2] آمریکا تدوین شده، استفاده شده است [۲۵]. این شبکه که در شکل (۳) نمایش داده شده است شامل ۳۳ واحد نیروگاهی است که روی ۲۴ گره (باس) با ۳۸ خط انتقال قرار گرفته‌اند. تمامی داده‌های مربوط به ساختار شبکه، ظرفیت و مشخصات واحدهای نیروگاهی، بارها و ظرفیت خطوط انتقال از مقاله چاپ شده این کمیته برداشت شده است [۲۵]. همچنین هزینه‌های سوخت برمبنای قیمت حامل‌های انرژی برای بخش نیروگاهی آمریکا محاسبه شده است که از وب‌سایت اداره اطلاعات انرژی آمریکا دریافت شده است.

همچنین برای محاسبه فاکتور توزیع انتقال بار برمبنای داده‌های شبکه از فرمول زیر استفاده شده است [۲۵]:

$$A_{sr}^{l}=\frac{1}{x_l}\left((X_{is}-X_{ir})-(X_{js}-X_{jr})\right) \qquad (۵۵)$$

در فرمول فوق $X_{..}$ قسمت موهومی درایه‌های ماتریس امپدانس شبکه (ماتریس Z_{bus}) است و x_l راکتانس خط انتقال l را نمایندگی می‌کند.

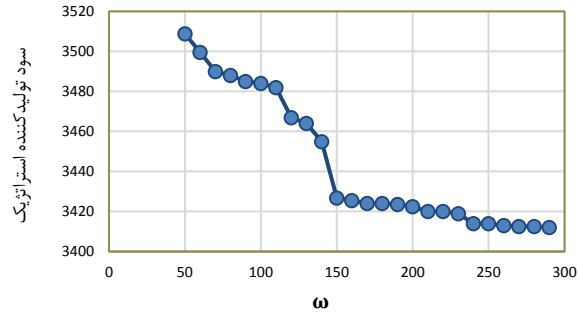
برای آزمون مدل استراتژی پیشنهاددهی استوار ارائه شده در این فصل، هر دو مدل قطعی و استوار پیشنهاد شده در نرم افزار GAMS کدنویسی شدند و در قالب یک فرآیند شبیه‌سازی بازار روزبعد، برای یک بازه ۱۰۰۰ روزه مورد آزمون قرار گرفتند. الگوریتم مورد استفاده در این شبیه‌سازی در شکل (۶) تشریح گردیده است. ۵ سناریو قیمتی برای پیشنهادهای رقبا به‌عنوان عامل عدم‌قطعیت درنظر گرفته شد. برای سادگی بیشتر ۵ سناریوی قیمتی برای تمام رقبا در ساعات مختلف شبانه‌روز ثابت فرض شد. این قیمت‌ها در جدول (۲) خلاصه شده اند.

جدول (۲). سناریوهای قیمتی رقبا

سناریو	قیمت‌های پیشنهادی رقبا ($/MWh)			
	پله اول	پله دوم	پله سوم	پله چهارم
s1	۲۶	۳۰	۳۲	۳۴
s2	۲۷	۳۱	۳۳	۳۵
s3	۲۸	۳۲	۳۴	۳۶
s4	۲۹	۳۳	۳۵	۳۷
s5	۳۰	۳۴	۳۶	۳۸

سطح استواری مدل استوار ارائه شده در بخش ۷-۱ به‌وسیله پارامتر ω قابل تنظیم است. برای دستیابی به جواب‌هایی با سطوح مختلف استواری مدل پیشنهادی به‌ازای مقادیر مختلف ω حل شد. شکل(۵) نتایج حاصل را در قالب نمودار نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش مقدار پارامتر ω و در نتیجه افزایش سطح استواری جواب، طبق انتظار از مقدار تابع هدف کاسته می‌شود. برای سادگی ازاین‌پس مدل استراتژی پیشنهاددهی قطعی ارائه شده را مدل BSM[3] و مدل استوار متناظر را RBSM[4] می‌نامیم.

1. IEEE Reliability Test System -1996
2. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)



شکل(۵). جواب‌های مدل پیشنهادی به‌ازای مقادیر مختلف پارامتر ω در تابع هدف

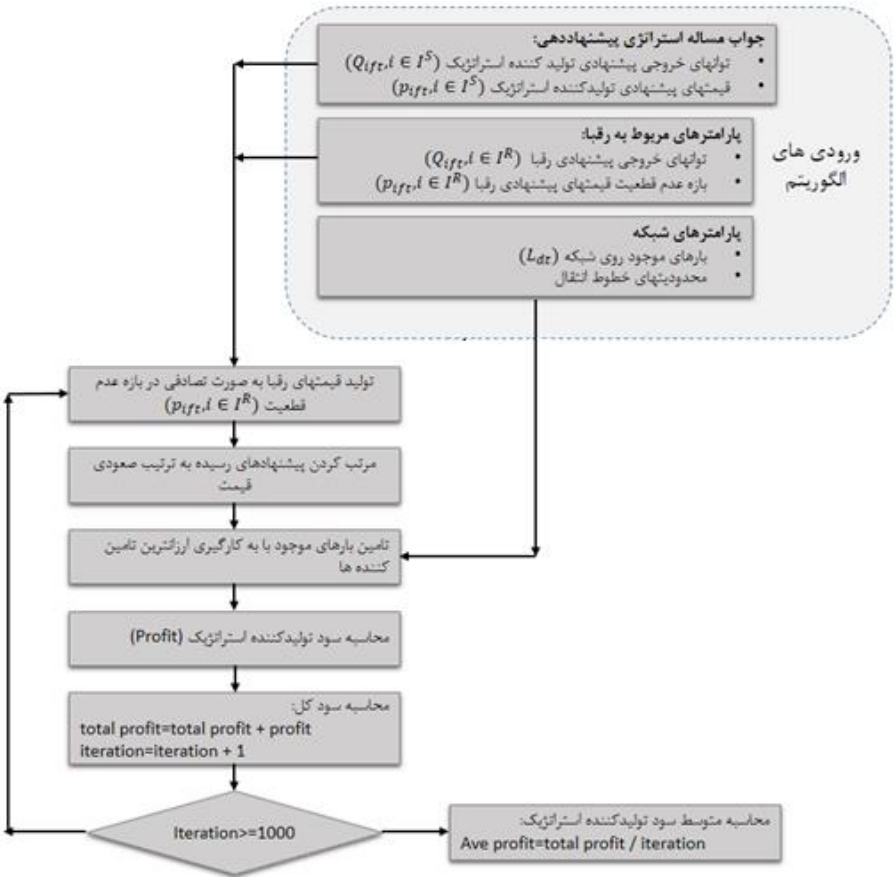
جواب مدل BSM و سه جواب از مدل RBSM با سه سطح استواری مختلف شامل $\omega=50$، $\omega=100$ و $\omega=150$ به‌کمک الگوریتم شکل (۶) در فرآیند تسویه بازار شرکت داده شدند. فرآیند تسویه بازار ۱۰۰۰ بار به‌ازای هر جواب اجرا شد و در هربار اجرا یکی از سناریوهای قیمتی برای رقبا به تصادف انتخاب گردید.

جدول (۳) و شکل (۷) عملکرد جواب‌های مدل‌های پیشنهادی را به‌ازای سناریوهای مختلف قیمتی رقبا نشان می‌دهد. سطر اول مربوط به جواب حاصل از حل مدل‌های مختلف و برگرفته از شکل (۵) است. واضح است که مدل BSM جواب‌هایی با مقدار تابع هدف بیشتر نسبت به مدل‌های استوار RBSM ارائه می‌دهد. اعداد سطرهای احتمال پذیرش در جدول (۳)، نسبت تعداد دفعاتی که پیشنهاد تولیدکننده در فرآیند شبیه‌سازی از طرف بهره‌بردار پذیرفته شده است را نسبت به تعداد دفعات شبیه‌سازی (۱۰۰۰ بار) نشان می‌دهند. همان‌طور که انتظار می‌رود، در هر سطح قیمتی، با افزایش سطح استواری، احتمال پذیرش جواب توسط بهره‌بردار افزایش می‌یابد.

همان‌طور که دیده می‌شود، زمانی که رقبا قیمت‌های پایین‌تر را انتخاب می‌کنند، یک جواب استوار اگرچه سود کمتری دارد، ولی شانس پذیرش بسیار بالاتری نسبت به جواب مدل قطعی دارد. به‌همین دلیل سود تولیدکننده استراتژیک با استفاده از جواب مدل استوار بسیار بالاتر است. درصورتی‌که رقبا از قیمت‌های میانه استفاده کنند، فاصله بین جواب‌های استوار و جواب مدل قطعی کمتر می‌شود. همان‌طور که شکل (۷) نشان می‌دهد در این سناریو انتخاب مقدار $\omega=150$ موجب می‌شود سود تولیدکننده کمتر از سود حاصل از دیگر جواب‌های استوار با سطح محافظت کمتر باشد، اگرچه هنوز هم این جواب سودی بیشتر از جواب مدل قطعی دارد.

شکل (۷) نشان می‌دهد، درصورتی‌که رقبا سناریوی قیمتی بالا را انتخاب کنند جواب‌های استوار کمینه عملکرد خود را نسبت به جواب مدل قطعی خواهد داشت. به‌ویژه افزایش مقدار ω منجربه افت کیفیت جواب حتی نسبت به جواب قطعی خواهد شد. با این حال سطر آخر جدول (۳) نشان می‌دهد در مجموع استفاده از مدل‌های استوار در بلندمدت سود بالاتری را برای تولیدکننده استراتژیک خواهد داشت.

3. Bidding Strategy Model
4. Robust Bidding Strategy Model

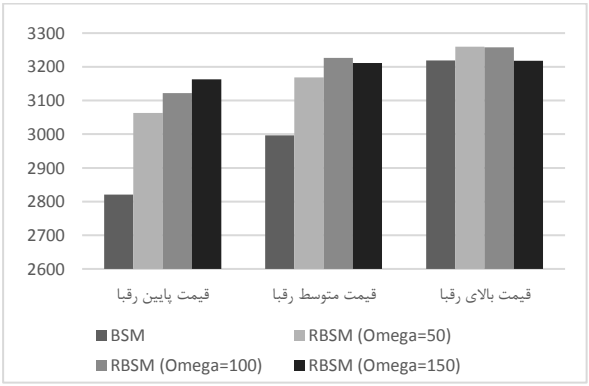


شکل(۶). الگوریتم شبیه‌سازی فرآیند تسویه

جدول (۳). نتایج شبیه‌سازی مدل BSM و RBSM

سناریو قیمتی رقبا		BSM	RBSM		
			$\omega = 50$	$\omega = 100$	$\omega = 150$
	سود*	۳۵۲۱/۵	۳۵۰۸/۸	۳۴۸۴/۱	۳۴۲۶/۸
قیمت پایین	احتمال پذیرش	۸۰/۱%	۸۷/۳%	۸۹/۶%	۹۲/۳%
	متوسط سود	۲۸۲۱	۳۰۶۳	۳۱۲۲	۳۱۶۳
قیمت متوسط	احتمال پذیرش	۸۵/۱%	۹۰/۳%	۹۲/۶%	۹۳/۷%
	متوسط سود	۲۹۹۷	۳۱۶۸	۳۲۲۶	۳۲۱۱
قیمت بالا	احتمال پذیرش	۹۱%	۹۲/۹%	۹۳/۵%	۹۳/۹%
	متوسط سود	۳۲۱۸	۳۲۵۹	۳۲۵۷	۳۲۱۷
متوسط سود کل		۳۰۱۵/۱	۳۱۶۲/۸	۳۱۹۶/۹	۳۱۹۴/۴

*سود تولیدکننده درصورتی‌که پیشنهادش مورد پذیرش قرار گیرد



شکل (۷). نتایج شبیه‌سازی مدل‌های BSM و RBSM

۹. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله مسأله استراتژی پیشنهاددهی برای تولیدکننده قیمت‌ساز مورد بررسی قرار گرفت. در چنین مسأله‌ای مهم‌ترین عامل عدم‌قطعیت پیشنهادهای رقبا است که برخلاف مسأله مربوط به تولیدکننده قیمت‌پذیر، این عامل عدم‌قطعیت قابل تجمیع روی قیمت تسویه بازار نیست. در این مقاله برای این مسأله یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی توسعه داده شد که برای حل، تبدیل به یک مدل تک‌سطحی خطی گردید. باتوجه به وجود همزمان عامل عدم‌قطعیت در محدودیت‌ها و تابع هدف، یک مدل استراتژی پیشنهاددهی استوار سناریو محور

توسعه داده شد. مدل پیشنهادی به‌همراه مدل قطعی با استفاده از داده‌های استاندارد مورد آزمون قرار گرفتند. شبیه‌سازی فرآیند تسویه بازار برای ۱۰۰۰ روز متوالی نشان داد جواب‌های ارائه شده توسط مدل استوار پیشنهادی در مقایسه با جواب‌های مدل قطعی، در شرایط وقوع عدم قطعیت در پیشنهادهای رقبا می‌توانند احتمال پذیرش پیشنهاد تولیدکننده استراتژیک را در فرآیند بازار افزایش دهند که به‌معنی دستیابی به جواب‌های استوار در برابر عدم‌قطعیت رفتار رقبا است. همچنین در نتیجه احتمال پذیرش بیشتر پیشنهاد تولیدکننده استراتژیک در بازار، سود بیشتری را در درازمدت برای تولیدکننده تأمین می‌نماید.

همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد، یکی از ویژگی‌های مدل بهینه‌سازی استوار استفاده شده در این مقاله، درنظر گرفتن همبستگی بین ضرایب غیرقطعی مسأله در ساعات مختلف است. آن‌گونه که [۲۱] نشان داده است، وقوع اختلال‌های غیرهمبسته بین قیمت‌های رقبا در بازار برق محتمل نیست. بنابراین، ویژگی ذکر شده سبب می‌گردد جواب مدل در برابر اختلال‌های غیرهمبسته که اساساً ممکن‌الوقوع نیستند، استوار نباشد و درنتیجه مقدار تابع هدف در اثر بیش محافظه‌کاری مدل افت نکند. هرچند نتایج حاصل از کاربرد مدل نشان از کارایی قابل قبول آن داشته و استدلال بالا را تأیید می‌کند، اما به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی استوار داده محور[1] در مطالعات بعدی می‌تواند جواب‌های مدل را کاملاً متناسب با فضای عدم قطعیت تنظیم کرده و استواری مدل را صرفاً به‌ازای سناریوهای ممکن از عدم قطعیت تضمین کرده و نتیجتاً سود تولیدکننده استراتژیک را بهبود بخشد.

مراجع

[1] Kirschen, D.S. and G. Strbac, Fundamentals of power system economics. 2018: John Wiley & Sons.

[2] Conejo, A.J., M. Carrión, and J.M. Morales, Decision making under uncertainty in electricity markets. Vol. 1. 2010: Springer.

[3] Ci-ling, Z. and X. Pei-yuan. Stochastic non-linear Nash Game in multi-zone electricity markets. in 2008 China International Conference on Electricity Distribution. 2008.

[4] Dai, T. and W. Qiao. Optimal bidding strategy of a strategic wind power producer in the short-term market. in 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). 2016. IEEE.

[5] Gountis, V.P. and A.G. Bakirtzis, Bidding strategies for electricity producers in a competitive electricity marketplace. IEEE Transactions on Power Systems, 2004. 19(1): p. 356-365.

[6] Mozdawar, A. and B. Khaki. Strategic bidding in pay as bid power market by combined probabilistic and game theory procedures. in 2009 IEEE Bucharest PowerTech. 2009. IEEE.

[7] Ma, X., et al., Towards the development of risk-constrained optimal bidding strategies for generation companies in electricity markets. Electric power systems research, 2005. 73(3): p. 305-312.

[8] Kumar, J.V. and D.V. Kumar. Risk-constrained bidding strategy for Generation Companies in an open electricity market using Fuzzy Adaptive Particle Swarm Optimization. in 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal. 2011. IEEE.

[9] Langary, D., N. Sadati, and A.M. Ranjbar, Direct approach in computing robust Nash strategies for generating companies in electricity markets. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014. 54: p. 442-453.

[10] Li, G., J. Shi, and X. Qu, Modeling methods for GenCo bidding strategy optimization in the liberalized electricity spot market–A state-of-the-art review. Energy, 2011. 36(8): p. 4686-4700.

[11] Mozdawar, A., et al. Game based strategic bidding in pay as bid markets considering incomplete information and risk factor. in 2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. 2009. IEEE.

[12] Boonchuay, C. and W. Ongsakul, Risk-constrained optimal bidding strategy for a generation company using self-organizing hierarchical particle swarm optimization. Applied Artificial Intelligence, 2012. 26(3): p. 246-260.

[13] Takano, Y., N. Ishii, and M. Muraki, A sequential competitive bidding strategy considering inaccurate cost estimates. Omega, 2014. 42(1): p. 132-140.

[14] Da-Wei, H. and H. Xue-Shan. Study on generation companies' bidding strategy based on hybrid intelligent method. in 2009 Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems. 2009. IEEE.

[15] Ma, X. and T. Shi. Credibility theory based approach to build optimal bidding strategies with risk management for generation companies. in 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. 2008. IEEE.

[16] Li, Y.-p. and X.-g. Li. Power supplier's risk types and optimal asset management reckon in biding failure. in 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. 2008. IEEE.

[17] Jain, A., et al. Bacteria foraging optimization algorithm based strategic bidding in electricity markets. in 2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC). 2014. IEEE.

[18] Baringo, L. and A.J. Conejo, Offering strategy of wind-power producer: A multi-stage risk-constrained approach. IEEE Transactions on Power Systems, 2015. 31(2): p. 1420-1429.

[19] Zareian Jahromi et al., Robust multi-objective optimization model in sustainable closed loop supply chain design, Industrial engineering researches in production systems, 2014, 2(3): p. 93-111. (In Persian)

[20] Rafiei, M., Mohammadi Talab, A., Presenting a mathematical model with a robust optimization approach for the design of a dynamic cellular manufacturing system considering multi-tasking machines, Industrial engineering researches in production systems, 2016, 4(9): p. 281-295. (In Persian)

[21] Jalilvand-Nejad, A., R. Shafaei, and H. Shahriari, A Genco self-scheduling problem with correlated prices using a new robust optimization approach. International

1. Data-Driven Robust optimization

Journal of Production Research, 2017. 55(11): p. 3249-3265.

[22] Rahimiyan, M. and L. Baringo, Strategic bidding for a virtual power plant in the day-ahead and real-time markets: A price-taker robust optimization approach. IEEE Transactions on Power Systems, 2015. 31(4): p. 2676-2687.

[23] Thatte, A.A., D.E. Viassolo, and L. Xie. Robust bidding strategy for wind power plants and energy storage in electricity markets. in 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2012. IEEE.

[24] Zugno, M. and A.J. Conejo, A robust optimization approach to energy and reserve dispatch in electricity markets. European Journal of Operational Research, 2015. 247(2): p. 659-671.

[25] Grigg, C., et al., The IEEE reliability test system-1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee. IEEE Transactions on power systems, 1999. 14(3): p. 1010-1020.

[26] Kardakos, E.G., C.K. Simoglou, and A.G. Bakirtzis, Optimal bidding strategy in transmission-constrained electricity markets. Electric Power Systems Research, 2014. 109: p. 141-149.

[27] Wood, A.J., B.F. Wollenberg, and G.B. Sheblé, Power generation, operation, and control. 2013: John Wiley & Sons.

[28] Taha, H.A. and H.A. Taha, Operations research: an introduction. Vol. 7. 2003: Prentice hall Upper Saddle River, NJ.

[29] Mulvey, J.M., R.J. Vanderbei, and S.A. Zenios, Robust optimization of large-scale systems. Operations research, 1995. 43(2): p. 264-281.

[30] Rahmani, D., et al., A robust optimization model for multi-product two-stage capacitated production planning under uncertainty. Applied Mathematical Modelling, 2013. 37(20-21): p. 8957-8971.

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Autumn and Winter 2023, Volume 11., No. 23., pp. 5-19
www.ier.basu.ac.ir

DOI: https://dx.doi.org/10.22084/IER.2024.5562

Modelling a Robust Bidding Strategy Problem for Price-Maker Gencos Considering the Uncertainty of Competitors' Bids

Amir Jalilvandnejad*

Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Garmsar University, Garmsar, Iran

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 21 June 2023
Accepted 3 October 2024

***Keywords*:**

Day-ahead Market
Bidding Strategy
Robust Optimization
Correlation

ABSTRACT

Day-ahead power market is one of the most common electricity sales markets in deregulated electricity networks. Power generation companies (Gencos) need to submit a bid to participate in this market. This bid includes an output-price proposal staircase that shows the Gencos attitude to different levels of generation. The bidding strategy problem responds to this requirement of Gencos. In this paper, the bidding strategy problem has been studied from the perspective of price-maker Gencos as a bi-level programming problem where the first level includes a self-scheduling problem from the point of view of the Genco and the second level includes a market settlement problem from the perspective of the market operator. Hence, robust optimization has been used as a tool to deal with uncertainty. Due to the existence of uncertainty in the second level sub-problem and the importance of investigating its effects on the solution of the first level sub-problem, the problem has been reformulated as a single-level integrated model and Then, a robust optimization approach that can be used in the presence of correlation between uncertainty factors has been used. Finally, the performance of the proposed robust model has been evaluated during a Monte Carlo simulation process. The simulation results show that the robust model lead to solutions with lower profit compared to the deterministic model. However, due to increasing the chance of acceptance of a robust solution in the market settlement process, it increases the average profit of the strategic Genco in the long run.

* Corresponding author. Amir Jalilvandnejad
Tel.:023-31930335; E-mail address: a.jalilvandnejad@gmail.com