

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۲۶

برنامه‌ریزی تولید روزپیش سیستم قدرت در حضور منابع تولید سریع تحت عدم قطعیت واحدهای تولید تجدیدپذیر

علیرضا منصوری^۱، علیرضا شیخی فینی^{۲*}، محسن پارسامقدم^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

mansoori.ali1995@gmail.com

^۲ استادیار، گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

asheikhi@nri.ac.ir

^۳ استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

parsa@modares.ac.ir

چکیده: افزایش نفوذ منابع تولید تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی تولید روزپیش سیستم قدرت را با چالش‌های جدی فنی و اقتصادی روبه‌رو کرده است. با توجه به ماهیت تصادفی تولید این منابع، تأمین انعطاف‌پذیری مورد نیاز برای پوشش عدم قطعیت و تغییرپذیری آن‌ها به موضوعی مهم تبدیل شده است. از جمله منابع تأمین‌کننده انعطاف‌پذیری، واحدهای سریع نظیر واحدهای گازی هستند که استفاده از ظرفیت شیب غیرچرخان آن‌ها می‌تواند نیاز به بهره‌برداری چرخان از واحدهای گران‌قیمت را کاهش دهد. از طرفی مطابق رویکرد قابل قبول بازارهای برق، توجه به حداکثرسازی رفاه اجتماعی در برنامه‌ریزی روزپیش تولید از اهمیت بالایی برخوردار است که لازمه آن تسویه همزمان انرژی و رزرو ظرفیت شیب است. لذا در مقاله حاضر از بهینه‌سازی مقاوم تطبیق‌پذیر مبتنی بر روش تولید قید و ستون برای حل مسئله برنامه‌ریزی تولید روزپیش با بهره‌گیری از پتانسیل واحدهای سریع، تحت نفوذ بالای منابع تولید بادی بهره گرفته شده است. بررسی نتایج بر روی شبکه آزمایش استاندارد ۲۴ باسه IEEE، حاکی از آن است که بهره‌گیری از پتانسیل منابع سریع، کاهش هزینه بهره‌برداری تا میزان ۰/۸۵٪ را در پی دارد. همچنین استفاده از روش تولید قید و ستون، منجر به افزایش سرعت همگرایی روند حل مسئله و رسیدن به جواب بهینه در حداکثر سه تکرار شده است.

واژه‌های کلیدی: واحدهای سریع، واحدهای تولید بادی، بهینه‌سازی مقاوم تطبیق‌پذیر، رفاه اجتماعی، روش تولید قید و ستون.

* نویسنده مسئول

• این مقاله برگزیده کنفرانس SJC 2020 بوده که پس از تکمیل و داوری مجدد پذیرفته شده است.

۱. مقدمه

را از طریق حل یک مسئله مشارکت واحدها^{۱۴} (UC) که منجر به برنامه‌ریزی بهینه تولید می‌شود، انجام می‌دهد. از طرفی افزایش نفوذ منابع تولید اتکاناپذیر منجر به ایجاد فرصتی مناسب برای حضور منابعی منعطف و سریع پاسخ^{۱۵} در بازارهای عمده فروشی برق شده است تا بتوان علاوه بر واحدهای تولید کندپاسخ^{۱۶}، از پتانسیل این گونه منابع نیز در برنامه‌ریزی بهره‌برداری روزپیش با هدف تأمین انعطاف‌پذیری عملیاتی^{۱۷} سیستم قدرت بهره گرفت. در واقع این نوع منابع با قابلیت تغییر وضعیت از حالت غیر فعال به فعال و برعکس در زمان بهره‌برداری، نقش مهمی در تأمین ظرفیت شیب مورد نیاز سیستم ایفا می‌کنند. لذا حضور این منابع، می‌تواند مسئله جدید UC را نسبت به نمونه‌های سنتی آن پیچیده‌تر کرده و چالش‌های جدیدی را در روند حل آن به وجود آورد.

در سال‌های اخیر، چهارچوب‌های بهینه‌سازی مختلفی به منظور مواجهه با عدم قطعیت منابع تولید اتکاناپذیر در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها، توسعه داده شده است. از جمله این چهارچوب‌ها می‌توان به روش‌های قطعی^{۱۸} [۶]، برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای^{۱۹} [۷] و بهینه‌سازی مقاوم تطبیق‌پذیر چندمرحله‌ای^{۲۰} [۸، ۹] اشاره کرد؛ چراکه غالباً از این روش‌ها به منظور برنامه‌ریزی بهره‌برداری تحت عدم قطعیت منابع اتکاناپذیر استفاده شده است. در روش‌های قطعی به دلیل در نظر گرفتن عدم قطعیت بدون احتمال وقوع آن، تنها بخشی از نایقینی محقق شده، قابل مدیریت است. از طرفی در برنامه‌ریزی تصادفی، دقت اطلاعات احتمالاتی و مشخصه‌های آن نقش مهمی در برنامه‌ریزی ایفا می‌کند. لذا برنامه‌ریزی تصادفی نیازمند مصالحه میان سهولت استفاده^{۲۱} و دقت آن بوده که این امر در کاربردهای عملی، امری دشوار است. لذا به دلیل پیچیدگی و عدم شفافیت این روش، در عمل، بهره‌برداران سیستم قدرت تمایلی به استفاده از آن ندارند زیرا معتقدند توانایی محاسباتی و کارآمدی مدل‌های مبتنی بر بهینه‌سازی تصادفی پیش از عملیاتی شدن به ملاحظات بیشتری نیاز دارد [۱۰].

اخیراً بهینه‌سازی مقاوم به عنوان چهارچوبی عملی و جایگزین برای رویکرد تصادفی ارائه شده است که در آن، منابع عدم قطعیت به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری، تحت مجموعه‌ای از نایقینی با یک فاصله اطمینان که بر اساس داده‌های تاریخی یا پیش‌بینی شده است، مدل‌سازی

در سال‌های اخیر، رشد منابع تولید تجدیدپذیر^۱ به‌ویژه واحدهای تولید بادی، روندی افزایشی داشته است به گونه‌ای که چشم‌انداز بسیاری دولت‌ها نظیر هند و ژاپن، تأمین بیش از ۵۰٪ انرژی الکتریکی مورد نیاز خود از منابع تجدیدپذیر تا سال هدف ۲۰۳۰ است [۱]. استفاده از این منابع در سیستم قدرت مزایای زیادی از جمله کاهش گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های سوخت را به دنبال دارد. با این حال، حضور این منابع که از آن‌ها به عنوان منابع تولید اتکاناپذیر^۲ نیز یاد می‌شود، به دلیل ماهیت تصادفی بودن تولید آن‌ها، چالش‌های فنی و اقتصادی را در بهره‌برداری کوتاه‌مدت سیستم قدرت ایجاد کرده که نیازمند افزایش انعطاف‌پذیری در سیستم قدرت است. انعطاف‌پذیری در سیستم قدرت باید پاسخ‌گوی دو عامل مهم ناشی از حضور منابع تجدیدپذیر، یعنی عدم قطعیت^۳ و تغییرپذیری^۴ باشد. عدم قطعیت در نتیجه خطای پیش‌بینی و تغییرپذیری در نتیجه تغییرات تولید متغیر با زمان این منابع است. لذا ذات تصادفی منابع تولید اتکاناپذیر منجر به شکل‌گیری نوعی رزرو تحت عنوان محصول شیب منعطف^۵ (FRP) شده است. تفاوت این نوع رزرو با رزروهای مرسوم بهره‌برداری در نرخ و نوع فراخوانی آن با توجه به تغییرات مکرر تولید منابع اتکاناپذیر است [۲، ۳]. از جمله منابع تأمین‌کننده این نوع رزرو، واحدهای تولید مرسوم^۶ بوده که با توجه به ظرفیت شیب خود، به منظور پوشش تغییرات تولید تجدیدپذیر در بازار خدمات جانبی^۷ به منظور تأمین رزرو شیب منعطف شرکت می‌کنند [۴]. لذا در برنامه‌ریزی بهره‌برداری^۸ مطلوب روزپیش^۹، مشخصه‌های فنی و اقتصادی واحدهای تولیدی از جمله محدوده‌های توان تولیدی، قیود بهره‌برداری میان‌دوره‌ای شامل نرخ شیب^{۱۰}، حداقل زمان روشن/خاموش بودن^{۱۱}، حداقل هزینه‌های تولید، راه‌اندازی و خاموشی، قیود شبکه و تسویه همزمان انرژی و رزرو به منظور حداکثرسازی رفاه اجتماعی^{۱۲}، نقش مهمی را ایفا می‌کنند [۵]. در بسیاری از بازارهای برق دنیا نظیر CAISO^{۱۳} [۲]، اپراتور مستقل سیستم برنامه‌ریزی بهره‌برداری

1. Renewable Based Power Generation
2. Non-Dispatchable Generation
3. Uncertainty
4. Variability
5. Flexible Ramping Product (FRP)
6. Conventional
7. Ancillary Services
8. Operation Planning
9. Day-Ahead
10. Ramp Rate
11. Minimum up/ down time
12. Social welfare
13. California Independent System Operator (CAISO)

14. Unit Commitment (UC)

15. Fast Response

16. Slow Response

17. Operational flexibility

18. Deterministic

19. Two Stage Stochastic Programming

20. Multi Stage Adjustable Robust Optimization

21. Tractability

الگوریتم تجزیه بندرز است که منجر به غیرمحدب^{۱۲} شدن سطح سوم مسئله، افزایش پیچیدگی محاسباتی و کاهش سرعت همگرایی می‌شود. گفتنی است که در این کار، تخصیص رزرو ظرفیت شیب به منابع تأمین کننده انعطاف پذیری، بدون توجه به ظرفیت شیب آن‌ها صورت گرفته است که همین امر می‌تواند در زمان بهره‌برداری، سیستم قدرت را با کمبود ظرفیت شیب و در نتیجه عدم کفایت عرضه مواجه کند.

در این مقاله، ضمن ارائه مدلی کارآمد با پیچیدگی محاسباتی کمتر برای تفکیک منابع تولید به منظور بهره‌گیری بهینه از ظرفیت شیب آن‌ها، از بهینه‌سازی مقاوم تطبیق‌پذیر دو مرحله‌ای و سه سطحی با بهره‌گیری از روش تولید قید و ستون که به دلیل وجود برش‌های بهینگی از جنس مسئله پیرو، با نام برش‌های بهینگی اولیه^{۱۳}، سرعت همگرایی بالاتری نسبت به سایر روش‌های تجزیه‌محور از جمله روش تجزیه بندرز دارد، به منظور برنامه‌ریزی بهره‌برداری روزپیش منابع تولید تحت نفوذ بالای واحدهای تولید بادی استفاده شده است. در جدول (۱)، مقایسه‌ای میان مقاله حاضر با مراجعی که از منظر تحقیقاتی نزدیک به آن هستند، صورت گرفته است. در بیشتر تحقیقات صورت گرفته در حوزه برنامه‌ریزی بهره‌برداری مقاوم روزپیش، رویکرد تفکیک منابع تولید بر اساس سرعت پاسخ‌گویی آن‌ها، توجه به قیود مربوط به ظرفیت شیب منابع و به کارگیری روش تولید قید و ستون با توجه به دقت و سهولت استفاده از آن، مورد توجه قرار نگرفته‌اند.

مرجع	هم‌زمان انرژی و رزرو شیب	استفاده از CCG	تفکیک منابع (کندپاسخ و سریع پاسخ)	تخصیص رزرو شیب مبتنی بر قیود شیب منابع	مقایسه مقاله حاضر با مطالعات پیشین	
					تسویه	رویکرد
[۱۲ و ۱۴]	x	x	x	x	x	x
[۱۳]	x	✓	x	x	x	x
[۱۵ و ۱۹]	✓	x	x	x	x	x
[۱۶-۱۸]	✓	✓	x	x	x	x
[۲۰-۲۲]	✓	x	✓	x	x	x
مقاله حاضر	✓	✓	✓	✓	✓	✓

شایان ذکر است تمام شبیه‌سازی‌های این مقاله با استفاده از نرم‌افزار GAMS^{۱۴} انجام شده است. همچنین به دلیل حضور متغیرهای عدد صحیح در مدل‌سازی مسئله و تبدیل شدن آن به برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح^{۱۵} (MIP)، حل کننده CPLEX این نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه و در بخش ۲ مدل‌سازی مسئله، در بخش ۳

می‌شود. رویکرد بهینه‌سازی مقاوم راه‌حلی را ارائه می‌کند که در صورت تحقق نایقینی‌ها^۱، پاسخی شدنی^۲ برای مسئله وجود داشته باشد. در واقع این راه‌حل در برابر تحقق بدترین حالت^۳ مرتبط با منابع عدم قطعیت، مقاوم است [۱۱].

با توجه به مطالب ذکر شده، بسیاری از تحقیقات در حوزه برنامه‌ریزی بهره‌برداری روزپیش منابع تولید، از رویکرد مقاوم استفاده کرده‌اند. نکته قابل توجه در مورد برخی از این تحقیقات، بی‌توجهی به تسویه همزمان انرژی و رزرو برای تأمین رزرو ظرفیت شیب مورد نیاز سیستم است و در این کارها تنها بدترین حالت تحقق نایقینی بدون توجه به حالت پایه سیستم لحاظ شده به گونه‌ای که منجر به برنامه‌ریزی محافظه‌کارانه^۴ و تخصیص قطعی رزرو می‌شود که برخلاف رویکرد قابل قبول بازار و ذات غیر قطعی منابع تولید اتکانا پذیر است [۱۲-۱۴]. به منظور اصلاح این رویکرد، تحقیقاتی با هدف تسویه همزمان بازار انرژی و رزرو به منظور پوشش تغییرات بار خالص^۵ در سیستم قدرت نظیر [۱۵-۱۷] از بهینه‌سازی مقاوم تطبیق‌پذیر با روش‌های تجزیه‌محور شامل تجزیه بندرز^۶ (BD) و تولید قید و ستون^۷ (CCG) بهره گرفته‌اند. گرفته‌اند. نکته قابل توجه در مورد این مراجع، عدم تفکیک واحدهای تولیدی بر اساس سرعت پاسخ آن‌ها به منظور مشارکت در تأمین رزرو ظرفیت شیب مورد نیاز سیستم است. از طرفی در برخی از تحقیقات از قیود مرتبط با رزرو ظرفیت شیب قابل ارائه توسط واحدهای تولیدی چشم‌پوشی شده که برخلاف ملاحظات فنی در برنامه‌ریزی بهره‌برداری روزپیش است [۱۸ و ۱۹]. از اولین کارها در حوزه تفکیک منابع تولید به منابع سریع پاسخ و کندپاسخ با رویکرد مقاوم می‌توان به مرجع [۲۰] اشاره کرد. در مرجع [۲۱] از نظریه تصمیم شکاف اطلاعات^۸ (IGDT) به منظور برنامه‌ریزی بهره‌برداری روزپیش منابع تولید با رویکرد تفکیک منابع تولید به منابع سریع پاسخ و کندپاسخ با قابلیت ارائه رزرو ظرفیت شیب چرخان و غیرچرخان و منابع کندپاسخ با قابلیت ارائه رزرو ظرفیت شیب چرخان استفاده شده است. در [۲۲] از رویکرد تفکیک منابع تولید استفاده شده که نکته قابل توجه در مورد این مرجع، اضافه شدن متغیرهای دودویی مربوط به تغییر وضعیت واحدهای سریع پاسخ در مسئله پیرو^۹ (SP) و برش‌های بهینگی دوگان^{۱۰} مسئله اصلی^{۱۱} (MP)

1. Uncertainty Realizations
2. Feasible
3. Worst Case
4. Conservative
5. Net load
6. Benders Decomposition (BD)
7. Column and Constraint Generation (CCG)
8. Information-Gap Decision Theory (IGDT)
9. Sub Problem (SP)
10. Optimality dual cuts
11. Master Problem (MP)

12. Convex
13. Optimality primal cuts
14. General Algebraic Modeling System (GAMS)
15. Mixed Integer Programming (MIP)

$$p_{it-1} + FRU_{it-1} + FRN_{it-1} \leq SD_i(1 - v_{it} + v_{it}^{sd} - v_{it}^{st}) + \bar{p}_{it}(v_{it} - v_{it}^{sd} + v_{it}^{st}); \quad \forall i \in I^{FR}, \forall t \in T \quad (18)$$

$$\{c_{it}^{su}\}_{t \in T}, \{c_{it}^{sd}\}_{t \in T}, \{v_{it}\}_{t \in T}; \quad \forall i \in I \quad (19)$$

در مسئله سطح اول، تابع هدف (۱) و قیود (۲) تا (۱۹) شامل توزیع و برنامه‌ریزی منابع تأمین‌کننده انرژی و رزرو شیب منعطف با حداقل هزینه بهره‌برداری مطمئن، تحت عدم قطعیت واحدهای تولیدی بادی است. در تابع هدف (۱)، هزینه‌های مربوط به برنامه‌ریزی در حالت پایه شامل هزینه‌های تولید، راه‌اندازی و خاموشی واحدهای تولیدی و همچنین هزینه‌های مربوط به برنامه‌ریزی تحت شرایط عدم قطعیت شامل هزینه‌های رزرو ظرفیت شیب چرخان بالارونده و پایین‌رونده واحدهای تولید کندپاسخ و سریع‌پاسخ و هزینه رزرو ظرفیت شیب غیرچرخان واحدهای تولید سریع‌پاسخ، کمینه می‌شود. قیود (۲) تا (۴) نمایانگر محدودیت‌های شبکه انتقال در حالت پایه، یعنی مقدار بار خالص پیش‌بینی شده شبکه است. قید (۲) مربوط به تعادل توان گره‌ای است. قیود (۳) و (۴) نیز بیان‌گر فلوی توان بر اساس پخش بار DC و ظرفیت خطوط انتقال توان الکتریکی شبکه هستند. با توجه به قابلیت واحدهای سریع‌پاسخ در ارائه ظرفیت شیب در محدوده توان تولیدی آن‌ها در بازه زمانی کوتاه‌مدت، قیود (۵) و (۶)، شامل متغیرهای دودویی راه‌اندازی (v_{it}^{st}) یا خاموشی (v_{it}^{sd}) در زمان بهره‌برداری ارائه شده است. قید (۷) بیانگر محدوده‌های تولید توان توسط واحدهای تولیدی در حالت پایه است. قیود (۸) تا (۱۰) مربوط به رزرو ظرفیت شیب چرخان قابل ارائه توسط واحدهای تولیدی کندپاسخ و سریع‌پاسخ با توجه به محدوده‌های مجاز توان تولیدی آن‌ها است (FRU_{it}, FRD_{it}). همچنین قید (۱۰) نشان می‌دهد در صورتی که واحد سریع‌پاسخ در شرایط عدم قطعیت برای خاموشی برنامه‌ریزی شود، باید قادر به ارائه ظرفیت شیب پایین‌رونده در محدوده توان تولیدی خود باشد. قید (۱۱) بیان می‌کند در صورتی که واحد سریع‌پاسخ در حالت پایه به صورت خاموش برنامه‌ریزی شده باشد، بعد از تحقق نایقینی قادر به ارائه ظرفیت شیبی به میزان نرخ شیب راه‌اندازی خود است (FRN_{it}). قید (۱۲) نشان‌دهنده آن است در صورتی که با توجه به تحقق نایقینی‌ها نیاز به خاموشی واحد سریع‌پاسخ باشد، این واحد می‌تواند ظرفیت شیبی به میزان نرخ شیب خاموشی خود ارائه دهد. قیود (۱۳) تا (۱۸) مربوط به قابلیت تغییر توان بین بازه‌ای توسط واحدهای سریع‌پاسخ و کندپاسخ در شرایط پایه و شرایط نایقینی با توجه به محدودیت‌های شیب قابل ارائه توسط آن‌هاست. قید (۱۹) بیانگر حداقل زمان روشن / خاموش بودن و هزینه‌های راه‌اندازی و خاموشی واحدهای تولیدی است که جزئیات آن در پیوست [۲۳] ارائه شده است.

رویکرد حل مسئله، در بخش ۴ شبکه مورد آزمایش، در بخش ۵ نتایج عددی و در بخش ۶ نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲. مدل‌سازی مسئله

مدل‌سازی مسئله در مقاله حاضر به صورت برنامه‌ریزی سه‌سطحی مختلط عدد صحیح است که در ادامه هر یک از سطوح مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲.۱. مسئله سطح اول

$$\text{Min of} = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \left[c_i^f v_{it} + c_i^y p_{it} + c_{it}^{su} + c_{it}^{sd} + C_{it}^{FRU} FRU_{it} + C_{it}^{FRD} FRD_{it} \right]$$

$$+ \sum_{i \in I^{FR}} \sum_{t \in T} C_{it}^{FRN} FRN_{it} \quad \text{Subject to:} \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I_b} p_{it} + \sum_{l \in L | \theta(l,t)=b} f_{it} - \sum_{l \in L | \theta(l,t)=b} f_{it} = d_{bt} - p_{bt}^w; \quad \forall b \in B, \forall t \in T \quad (2)$$

$$f_{it} = \frac{1}{x_i} (\theta_{fr(l)t} - \theta_{to(l)t}); \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (3)$$

$$-F_l \leq f_{it} \leq F_l; \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (4)$$

$$v_{it}^{st} \leq 1 - v_{it}; \quad \forall i \in I^{FR}, \forall t \in T \quad (5)$$

$$v_{it}^{sd} \leq v_{it}; \quad \forall i \in I^{FR}, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\underline{p}_{it} v_{it} \leq p_{it} \leq \bar{p}_{it} v_{it}; \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (7)$$

$$p_{it} + FRU_{it} \leq \bar{p}_{it} v_{it}; \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (8)$$

$$p_{it} - FRD_{it} \geq \underline{p}_{it} v_{it}; \quad \forall i \in I^{SR}, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\underline{p}_{it}(v_{it} - v_{it}^{sd}) \leq p_{it} - FRD_{it} \leq \bar{p}_{it}(v_{it} - v_{it}^{sd}); \quad \forall i \in I^{FR}, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\underline{p}_{it} v_{it}^{st} \leq FRN_{it} \leq \bar{p}_{it} v_{it}^{st}; \quad \forall i \in I^{FR}, \forall t \in T \quad (11)$$

$$FRD_{it} \leq SD_i + \bar{p}_{it}(1 - v_{it}^{sd}); \quad \forall i \in I^{FR}, \forall t \in T \quad (12)$$

$$p_{it} + FRU_{it} - (p_{it-1} - FRD_{it-1}) \leq RU_i v_{it-1} + SU_i(v_{it} - v_{it-1}) + \bar{p}_{it}(1 - v_{it}); \quad \forall i \in I^{SR}, \forall t \in T \quad (13)$$

$$p_{it-1} + FRU_{it-1} - (p_{it} - FRD_{it}) \leq RD_i v_{it} + SD_i(v_{it-1} - v_{it}) + \bar{p}_{it}(1 - v_{it-1}); \quad \forall i \in I^{SR}, \forall t \in T \quad (14)$$

$$p_{it} + FRU_{it} + FRN_{it} - (p_{it-1} - FRD_{it-1} + FRN_{it-1}) \leq RU_i(v_{it-1} + v_{it-1}^{st} - v_{it-1}^{sd}) + \bar{p}_{it}(1 - v_{it-1} - v_{it-1}^{st} + v_{it-1}^{sd}); \quad \forall i \in I^{FR}, \forall t \in T \quad (15)$$

$$p_{it-1} + FRU_{it-1} + FRN_{it-1} - (p_{it} - FRD_{it} + FRN_{it}) \leq RD_i(v_{it} + v_{it}^{st} - v_{it}^{sd}) + \bar{p}_{it}(1 - v_{it} - v_{it}^{st} + v_{it}^{sd}); \quad \forall i \in I^{FR}, \forall t \in T \quad (16)$$

$$p_{it} + FRU_{it} + FRN_{it} \leq SU_i(1 - v_{it-1} + v_{it-1}^{sd} - v_{it-1}^{st}) + \bar{p}_{it}(v_{it-1} - v_{it-1}^{sd} + v_{it-1}^{st}); \quad \forall i \in I^{FR}, \forall t \in T \quad (17)$$

۲.۲. مسئله سطح دوم (میانی)

$$\sum_{i \in I_b} p_{it}^u + \sum_{l \in L | \theta(l)=b} f_{it}^u - \sum_{l \in L | f_r(l)=b} f_{it}^u = d_{bt} - p_{bt}^w \quad (25)$$

$$-\Delta p_{bt}^{up} a_{bt}^{up} + \Delta p_{bt}^{dn} a_{bt}^{dn} + \Phi_{bt}^{-u} - \Phi_{bt}^{+u}; \forall b \in B, \forall t \in T$$

$$f_{it}^u = \frac{1}{x_l} (\theta_{fr(l)t}^u - \theta_{to(l)t}^u); \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (26)$$

$$-\bar{F}_l \leq f_{it}^u \leq \bar{F}_l; \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (27)$$

$$p_{it} - FRD_{it} \leq p_{it}^u \leq p_{it} + FRU_{it}; \quad \forall i \in I^{SR}, \forall t \in T \quad (28)$$

$$p_{it} - FRD_{it} \leq p_{it}^u \leq p_{it} + FRU_{it} + FRN_{it} \\ ; \quad \forall i \in I^{FR}, \forall t \in T \quad (29)$$

$$\Phi_{bt}^{-u} \geq 0, \Phi_{bt}^{+u} \geq 0; \quad \forall b \in B, \forall t \in T \quad (30)$$

۴.۲. مسئله اصلی

مسئله اصلی، نسخه آزاد شده^۱ مسئله (۱) تا (۳۰) است که به ازای تکرارهای $1 < j$ ، با استفاده از برش‌های بهینگی اولیه روش تولید قید و ستون، مجموعه‌ای از قیود مربوط به شرایط بهره‌برداری که معادل با قیود (۲۵) تا (۲۹) هستند، به آن اضافه می‌شود. شایان ذکر است که در این قیود، بدترین حالات مربوط به نوسانات تولید واحدهای بادی، با استفاده از حل مسئله پیرو در تکرار قبلی، مقداردهی می‌شود. لذا مسئله اصلی در تکرار j ، به شکل زیر است:

Objective Function (۱) (۳۱)

Subject to:

Constraint (۲)-(۱۹) (۳۲)

$$\sum_{i \in I_b} p_{it}^m + \sum_{l \in L | \theta(l)=b} f_{it}^m - \sum_{l \in L | f_r(l)=b} f_{it}^m = d_{bt} - p_{bt}^w \\ - \Delta p_{bt}^{up} a_{bt}^{up(m)} + \Delta p_{bt}^{dn} a_{bt}^{dn(m)} \\ ; \quad \forall b \in B, \forall t \in T, m = 1, \dots, j-1 \quad (33)$$

$$f_{it}^m = \frac{1}{x_l} (\theta_{fr(l)t}^m - \theta_{to(l)t}^m) \quad (34)$$

$$; \quad \forall l \in L, \forall t \in T, m = 1, \dots, j-1$$

$$-\bar{F}_l \leq f_{it}^m \leq \bar{F}_l \quad (35)$$

$$; \quad \forall l \in L, \forall t \in T, m = 1, \dots, j-1$$

$$p_{it} - FRD_{it} \leq p_{it}^m \leq p_{it} + FRU_{it} \quad (36)$$

$$; \quad \forall i \in I^{SR}, \forall t \in T, m = 1, \dots, j-1$$

$$p_{it} - FRD_{it} \leq p_{it}^m \leq p_{it} + FRU_{it} + FRN_{it} \quad (37)$$

$$; \quad \forall i \in I^{FR}, \forall t \in T, m = 1, \dots, j-1$$

۵.۲. مسئله پیرو

مسئله پیرو شامل مدل max-min مسئله سطح دوم و سوم است که با استفاده از تئوری دوگان^۲ به مدل تک‌سطحی max تبدیل شده و نمایانگر

تابع هدف (۲۰) و قیود (۲۱) تا (۲۳) بیانگر مدل مسئله در سطح میانی است. تابع هدف (۲۰) بدترین شرایط مربوط به عدم تعادل توان گره‌ای با توجه به تصمیمات اخذ شده در مسئله سطح اول را مشخص می‌کند. قیود (۲۱) تا (۲۳) بیانگر استفاده از مجموعه عدم قطعیت چندوجهی مقید به بودجه^۱ [۱۱] است که در آن پارامتر M نشان‌دهنده بودجه عدم قطعیت بوده و بیانگر تعداد باس‌هایی است که به صورت همزمان نوسانات تولید واحد بادی را تجربه می‌کنند و بر اساس عدم قطعیت پیش‌بینی شده مشخص می‌شود. متغیرهای دودویی a_{bt}^{dn} و a_{bt}^{up} به منظور تعیین بدترین حالات ممکن برای نوسانات رو به بالا/پایین واحدهای تولید بادی به‌ازای بودجه عدم قطعیت مشخص ارائه شده‌اند. از آنجا که یک واحد بادی در زمانی مشخص نمی‌تواند هم نوسانات بالارونده و هم نوسانات پایین‌رونده را تجربه کند، قید (۲۱) به این منظور ارائه شده است.

$$\Phi^w = \text{Max } \Phi \quad (20)$$

Subject to:

$$a_{bt}^{up} + a_{bt}^{dn} \leq 1; \quad \forall b \in B^u, \forall t \in T \quad (21)$$

$$p_{bt}^w - \Delta p_{bt}^{dn} a_{bt}^{dn} \leq p_{bt}^{wu} \leq p_{bt}^w + \Delta p_{bt}^{up} a_{bt}^{up} \\ ; \quad \forall b \in B^u, \forall t \in T \quad (22)$$

$$\sum_{b \in B^u} \left[\frac{\max\{0, p_{bt}^{wu} - p_{bt}^w\}}{\Delta p_{bt}^{up}} + \frac{\max\{0, p_{bt}^w - p_{bt}^{wu}\}}{\Delta p_{bt}^{dn}} \right] \leq M \\ ; \quad \forall t \in T \quad (23)$$

۳.۲. مسئله سطح سوم

در تابع هدف (۲۴)، متغیرهای عدم تعادل گره‌ای Φ_{bt}^{-u} و Φ_{bt}^{+u} در شرایط تحقق هر میزان از نایقینی، با توجه به تصمیمات اخذ شده در مسئله سطح اول و دوم، کمینه می‌شوند. قیود (۲۵)–(۲۷) به ترتیب نمایانگر تعادل توان گره‌ای، فلوی توان و ظرفیت توان عبوری از خطوط انتقال توان الکتریکی تحت شرایط عدم قطعیت هستند. قیود (۲۸) و (۲۹) نشان‌دهنده سطح تولید واحدها، اعم از کندپاسخ و سریع‌پاسخ تحت شرایط عدم قطعیت و با توجه به تصمیمات اخذ شده در مسئله سطح اول است. قید (۳۰) نیز نمایانگر نامنفی بودن متغیرهای عدم تعادل گره‌ای هستند.

$$\Phi = \text{Min } \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} (\Phi_{bt}^{-u} + \Phi_{bt}^{+u}) \quad (24)$$

Subject to:

2. Relaxed Version
3. Dual Theory

1. Budget Constrained Polyhedral

با رسیدن به بهینگی سراسری، روند حل مسئله متوقف خواهد شد.

۴. مطالعه موردی

به‌منظور بررسی میزان اثربخشی رویکرد تفکیک منابع تولید به‌صورت کندپاسخ و سریع‌پاسخ در تأمین انعطاف‌پذیری مورد نیاز سیستم و همچنین عملکرد روش پیشنهادی، از شبکه اصلاح‌شده ۲۴ باسه IEEE در [۱۷]، شامل ۲۶ واحد حرارتی، ۲۴ باس، ۳۸ خط انتقال توان الکتریکی، ۶ واحد تولید بادی، هریک با ظرفیت ۱۶۰ MW در باس‌های ۳، ۷، ۱۶، ۲۱ و ۲۳، حداکثر بار شبکه به‌میزان ۳۴۹۸/۶۶ MW و عدم قطعیت تولید واحدهای بادی به‌میزان ۲۰٪ در هر ساعت، استفاده شده است. از میان ۲۶ واحد حرارتی در این شبکه، ۶ واحد سریع‌پاسخ با حداقل زمان روشن/خاموشی ۱ ساعته، شامل واحدهای شماره ۶، ۷، ۸، ۹، ۲۵ و ۲۶ وجود دارد که قیمت رزرو ظرفیت شیب غیرچرخان آن‌ها، دو برابر قیمت رزرو ظرفیت شیب چرخان بالارونده در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود ۶ واحد تولید بادی در این شبکه که همان منابع عدم قطعیت هستند، بودجه عدم قطعیت M می‌تواند بازه تغییراتی از ۰ تا ۶ داشته باشد؛ و $M=6$ و $M=0$ به‌ترتیب بیانگر حالت پایه و بدترین حالت تحقق نایقینی در سیستم است. شایان ذکر است که در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، دقت بهینگی مسئله اصلی و مسئله پیرو به‌ترتیب بر روی ۰/۱٪ و صفر درصد تنظیم شده است. به‌منظور بررسی رویکرد پیشنهادی، در ادامه دو سناریو مطابق زیر بررسی می‌شود:

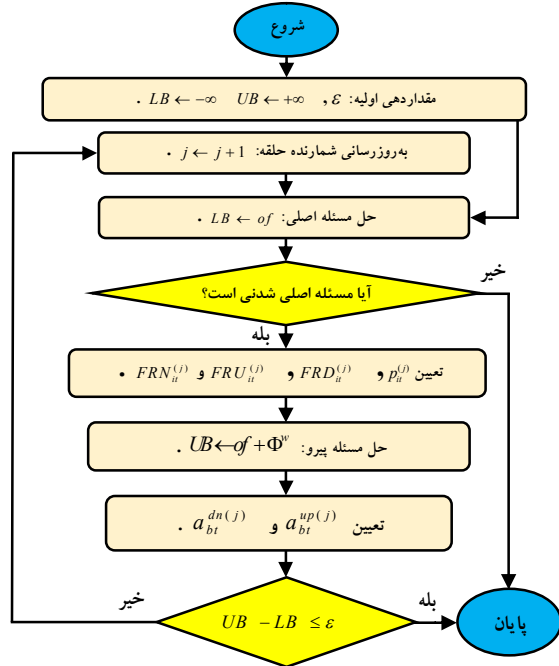
سناریو اول: عدم تفکیک منابع تولید بر اساس سرعت پاسخ‌گویی آن‌ها؛

سناریو دوم: تفکیک منابع تولید بر اساس سرعت پاسخ‌گویی آن‌ها.

۵. نتایج عددی

به‌منظور بررسی میزان اثربخشی مدل پیشنهادی، شبکه آزمایش اشاره‌شده در بخش ۴ مطابق با دو سناریوی اشاره‌شده در این بخش، مورد ارزیابی قرار گرفته که به‌عنوان نمونه نتایج این ارزیابی در جدول (۲) و جدول (۳) به‌زای بدترین حالت تحقق نایقینی در سیستم، یعنی $M=6$ قابل مشاهده است. با مقایسه این دو جدول می‌توان نتیجه گرفت که در صورت تفکیک منابع تولید با توجه به پتانسیل پاسخ‌گویی آن‌ها در شرایط تحقق عدم قطعیت، نیاز به در مدار بودن (۱) واحدهای گران‌به‌منظور بهره‌مندی از رزرو ظرفیت شیب چرخان آن‌ها در صورت نوسانات میزان تولید واحدهای بادی، کاهش خواهد یافت؛ چراکه

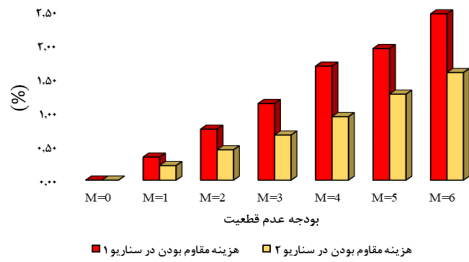
نایقینی‌های محقق‌شده‌ای است که حداکثر عدم تعادل در سیستم را با توجه به تصمیمات اخذشده در مسئله اصلی به‌دنبال دارد. شایان ذکر است که در هر تکرار j ، خروجی‌های مسئله اصلی شامل $p_{it}^{(j)}$ ، $FRD_{it}^{(j)}$ ، $FRU_{it}^{(j)}$ و $FRN_{it}^{(j)}$ وارد مسئله پیرو شده و در مسئله پیرو بدترین حالات عدم تعادل گره‌ای با تعیین متغیرهای دودویی a_{bt}^{up} و a_{bt}^{dn} تعیین شده و وارد مسئله اصلی می‌شود.



شکل (۱): روندنمای پیشنهادی حل مسئله مبتنی بر روش CCG

۳. روش حل مسئله

در شکل (۱)، روندنمای حل مسئله مطابق با روش تکرارشونده تولید قید و ستون (CCG) ارائه شده است. در این روش، در هر تکرار j ، مسئله اصلی بر اساس بدترین حالات عدم تعادل گره‌ای، تحت بودجه عدم قطعیت M که توسط مسئله پیرو در تکرار قبل ($j-1$) به دست آمده، حل شده و تسویه همزمان بازار انرژی و رزرو ظرفیت شیب شامل هزینه‌های ثابت و متغیر تولید، راه‌اندازی و خاموشی و هزینه‌های رزرو ظرفیت شیب واحدهای سریع‌پاسخ و کندپاسخ به‌منظور پوشش تغییرات بار خالص سیستم با کمترین هزینه بهره‌برداری صورت می‌گیرد. نکته قابل توجه در روند حل مسئله، اضافه شدن برش‌های بهینگی اولیه به‌زای تکرارهای $j > 1$ ، شامل قیود (۳۳) تا (۳۷)، به مسئله اصلی است. مطابق شکل (۱)، مسئله تا جایی تکرار می‌شود که تصمیمات اخذشده در مسئله اصلی، حتی در بدترین شرایط تحقق نایقینی نیز منجر به تعادل توان گره‌ای شود ($\epsilon = 0$). لذا در این حالت،



شکل (۳): هزینه مقاوم بودن در هریک از سناریوهای مذکور

جدول (۶): سرعت حل مدل پیشنهادی در شبکه ۲۴ باس IEEE

بودجه عدم قطعیت	زمان محاسبه (ثانیه)	تعداد تکرار
M=۱	۶۲	۳
M=۲	۶۲	۳
M=۳	۸۲	۳
M=۴	۵۵	۳
M=۵	۶۵	۳
M=۶	۵۹	۳

۶. نتیجه گیری

با توجه به افزایش منابع تولید تجدیدپذیر در سیستم قدرت، به ویژه منابع تولید بادی، برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری روزپیش منابع تولید با هدف تأمین انعطاف‌پذیری مورد نیاز سیستم، به موضوعی مهم تبدیل شده است. لذا در مقاله حاضر از رویکرد تفکیک منابع تولید به منابع کندپاسخ و سریع‌پاسخ استفاده شد که نتایج حاکی از پتانسیل بالای این رویکرد در بهره‌برداری بهینه از منابع تولید است؛ به گونه‌ای که به‌ازای مقادیر مختلف بودجه عدم قطعیت، به‌طور میانگین شاهد کاهش هزینه بهره‌برداری و مقاوم بودن، به میزان ۰/۵۲٪ هستیم. از طرفی استفاده از روش تولید قید و ستون با رویکرد مقاوم، بازدهی مطلوبی در سرعت حل مسئله داشته است؛ به گونه‌ای که مسئله در حداکثر ۳ تکرار با میانگین زمان محاسباتی ۶۴ ثانیه به‌ازای مقادیر مختلف بودجه عدم قطعیت، به جواب بهینه رسیده و همگرا شده است.

علائم و اختصارات

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

اندیس باس‌ها	b
اندیس واحدهای تولیدی	i
اندیس خطوط انتقال توان	l
اندیس مربوط به دوره‌های زمانی	t
مجموعه اندیس‌های باس‌ها	B
مجموعه اندیس‌های باس‌هایی که واحد تولید بادی در آن‌ها قرار دارد.	B''

جدول (۴): وضعیت راه‌اندازی واحدهای سریع به‌ازای $M \Rightarrow (V_{it}^{st})$

ساعت	شماره واحد				
	۶	۷	۸	۹	۲۶
t ₃	۰	۰	۰	۰	۱
t ₄	۰	۰	۰	۰	۱
t ₅	۰	۰	۰	۰	۱
t ₆	۰	۰	۰	۰	۱
t ₈	۰	۰	۰	۰	۱
t ₉	۰	۰	۰	۰	۱
t ₁₇	۰	۱	۱	۱	۰
t ₁₈	۰	۱	۱	۰	۱
t ₁₉	۰	۱	۰	۰	۰
t ₂₀	۰	۱	۰	۰	۰
t ₂₁	۰	۰	۰	۰	۰
t ₂₂	۰	۱	۰	۰	۰
t ₂₃	۰	۰	۰	۰	۱
t ₂₄	۰	۰	۰	۰	۱

جدول (۵): مقایسه هزینه بهره‌برداری هریک از سناریوهای ذکر شده

بودجه عدم قطعیت	سناریو اول (\$)	سناریو دوم (\$)
M=۰	۷۸۴۳۳۳/۲	۷۸۴۳۳۳/۲
M=۱	۷۸۶۹۹۹/۶	۷۸۶۰۱۵/۶
M=۲	۷۹۰۲۲۱/۸	۷۸۷۸۳۹
M=۳	۷۹۳۱۸۳/۸	۷۸۹۵۴۴/۷
M=۴	۷۹۷۵۰۷/۶	۷۹۱۶۷۰/۵
M=۵	۷۹۹۵۴۳/۱	۷۹۴۲۷۰/۳
M=۶	۸۰۳۵۴۶/۹	۷۹۶۷۶۰/۳

قابل توجه است که تحت بدترین حالت تحقق نایقینی در سناریو اول، هزینه مقاوم بودن ۲/۴۵٪ بوده که در سناریو دوم به $1/158 = 784333/2 - (784333/2 - 796760/3) / 784333/2$ کاهش یافته است. لذا مطابق با نتایج ارائه‌شده در جدول (۵)، هزینه‌های مقاوم بودن به‌ازای مقادیر مختلف بودجه عدم قطعیت در شکل (۳) قابل مشاهده است. بر اساس این شکل، با اجرای سناریو دوم، به‌طور میانگین هزینه مقاوم بودن به‌میزان ۰/۵۲٪ نسبت به سناریو اول کاهش یافته که دلیل آن کاهش نیاز به در مدار بودن واحدهای گران قیمت به‌منظور بهره‌گیری از ظرفیت شیب چرخان آن‌ها است.

شایان ذکر است که استفاده از بهینه‌سازی مقاوم تطبیق‌پذیر مبتنی بر روش تجزیه‌محور تولید قید و ستون در کنار مدل ارائه‌شده به‌منظور تأمین ظرفیت شیب مورد نیاز سیستم، شامل رویکرد تفکیک منابع تولید بر اساس سرعت پاسخ و تغییر وضعیت آن‌ها به‌منظور پوشش نوسانات تولید واحدهای بادی، مطابق با جدول (۶) از سرعت همگرایی مطلوبی برخوردار است؛ به گونه‌ای که مسئله به‌ازای هر میزان از بودجه عدم قطعیت، در سه تکرار با متوسط زمان محاسباتی ۶۴ ثانیه همگرا شده است.

مجموعه اندیس‌های واحدهای تولیدی	I	باس b و زمان t (MW)	
مجموعه اندیس‌های واحدهای تولیدی سریع پاسخ	I^{FR}	متغیرهای تصمیم	
مجموعه اندیس‌های واحدهای تولیدی کندپاسخ	I^{SR}	a_{bt}^{dn}, a_{bt}^{up}	متغیرهای دودویی بیانگر بدترین حالت میزان تولید واحد بادی
مجموعه اندیس‌های واحدهای تولیدی که در باس b قرار دارند.	I_b	c_{it}^{su}, c_{it}^{sd}	هزینه خاموش/ روشن شدن واحد i در زمان t
مجموعه اندیس‌های خطوط انتقال توان	L	f_{it}^l, f_{it}^u	میزان فلوی توان خط l در زمان t تحت شرایط عدم قطعیت/ شرایط عادی
مجموعه اندیس‌های مربوط به دوره‌های زمانی	T	of	مقدار تابع هدف مرتبط با حداقل هزینه برنامه‌ریزی بهره‌برداری از منابع منعطف
پارامترها		v_{it}	متغیر دودویی بیانگر وضعیت برنامه‌ریزی واحدهای تولیدی در شرایط عادی
هزینه ثابت (\$) و متغیر (\$/MWh) واحد i.	c_i^v, c_i^f	v_{it}^{sd}, v_{it}^{st}	متغیرهای دودویی نشان‌دهنده وضعیت راه‌اندازی/ خاموشی واحدهای سریع‌پاسخ تحت شرایط عدم قطعیت
میزان تقاضای پیش‌بینی شده در باس b و زمان t (MW)	d_{bt}	FRU_{it}, FRD_{it}	رزرو شیب چرخان پایین/ بالا رونده واحد i در زمان t (همواره نامنفی)
باس ابتدایی خط l	$fr(l)$		
باس انتهایی خط l	$to(l)$	FRN_{it}	رزرو شیب غیرچرخان واحد i در زمان t (همواره نامنفی).
راکتانس خط l	x_l	P_{it}, P_{it}^u	سطح تولید واحد i در زمان t تحت عدم قطعیت/ شرایط عادی
هزینه رزرو شیب چرخان بالا/ پایین‌رونده واحد i در زمان t (\$/MWh)	$C_{it}^{FRD}, C_{it}^{FRU}$	P_{it}^{wu}	میزان تولید واحد بادی تحت شرایط عدم قطعیت و وابسته به مقدار پیش‌بینی شده آن در باس b و زمان t
هزینه رزرو شیب غیرچرخان واحد i در زمان t (\$/MWh)	C_{it}^{FRN}	$\theta_{bt}, \theta_{bt}^u$	زاویه ولتاژ باس b در زمان t تحت عدم قطعیت/ شرایط عادی
هزینه خاموش/ روشن شدن واحد i در زمان t (\$)	C_{it}^{su}, C_{it}^{sd}	Φ	میزان عدم تعادل توان در مسئله سطح سوم بدترین حالت مربوط به عدم تعادل سیستم
حداکثر ظرفیت خط l (MW)	\bar{F}_l	Φ_{bt}^+, Φ_{bt}^-	متغیرهای پیوسته بیانگر میزان عدم تعادل توان در باس b و زمان t تحت شرایط عدم قطعیت
پارامتر مربوط به بودجه عدم قطعیت	M		
حدود حداقل/ حداکثر میزان تولید واحد i در زمان t (MW)	$\bar{P}_{it}, \underline{P}_{it}$		
سطح تولید پیش‌بینی شده واحد بادی در باس b و زمان t (MW)	P_{bt}^w		
نرخ شیب بالا/ پایین‌رونده واحد i بین دو بازه زمانی متوالی (MW/h)	RD_i, RU_i		
نرخ شیب خاموش/ روشن شدن واحد i (MW/h)	SU_i, SD_i		
حداکثر نوسان روبه بالا/ پایین واحد تولید بادی در	$\Delta p_{bt}^{dn}, \Delta p_{bt}^{up}$		

مراجع

- [1] Roadmap, I.R.E.N.A., "2030, Doubling the global share of renewable energy: a roadmap to 2030", Working paper.
- [2] Xu, L. and Tretheway, D., "Flexible ramping products", CAISO Proposal, 2012.
- [3] Akrami, A., Doostizadeh, M. and Aminifar, F., "Power system flexibility: an overview of emergence to evolution", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 7, No. 5, pp. 987-1007, 2019.
- [4] Alizadeh, M.I., Moghaddam, M.P., Amjady, N., Siano, P. and Sheikh-El-Eslami, M.K., "Flexibility in future power systems with high renewable penetration: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 57, pp. 1186-1193, 2016.
- [5] Conejo, A.J. and Baringo, L., Power system operations, Switzerland: Springer, 2018.
- [6] Li, Z. and Shahidehpour, M., "Security-constrained unit commitment for simultaneous clearing of energy and ancillary services markets", IEEE transactions on power systems, Vol. 20, No. 2, pp. 1079-1088, 2005.
- [7] Khoshjahan, M., Dehghanian, P., Moeini-Aghtaie, M. and Fotuhi-Firuzabad, M., "Harnessing ramp capability of spinning reserve services for enhanced power grid flexibility", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, No. 6, pp. 7103-7112, 2019.
- [8] Ben-Tal, A., Goryashko, A., Guslitzer, E. and Nemirovski, A., "Adjustable robust solutions of uncertain linear programs", Mathematical

- programming, Vol. 99, No. 2, pp. 351-376, 2004.
- [9] Delage, E. and Iancu, D.A., "Robust multistage decision making", In The operations research revolution: INFORMS, pp. 20-46, 2015.
- [10] Zheng, Q.P., Wang, J. and Liu, A.L., "Stochastic optimization for unit commitment—A review", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No. 4, pp. 1913-1924, 2014.
- [11] Bertsimas, D. and Sim, M., "The price of robustness", Operations research, Vol. 52, No. 1, pp. 35-53, 2004.
- [12] Jiang, R., Zhang, M., Li, G. and Guan, Y., "Two-stage network constrained robust unit commitment problem", European Journal of Operational Research, Vol. 234, No. 3, pp. 751-762, 2014.
- [13] Jurković, K., Pandžić, H. and Kuzle, I., "Robust unit commitment with large-scale battery storage", In 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-5: IEEE, 2017.
- [14] Bertsimas, D., Litvinov, E., Sun, X.A., Zhao, J. and Zheng, T., "Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem", IEEE transactions on power systems, Vol. 28, No. 1, pp. 52-63, 2012.
- [15] Ye, H. and Li, Z., "Robust security-constrained unit commitment and dispatch with recourse cost requirement", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 5, pp. 3527-3536, 2015.
- [16] Ye, H., Wang, J. and Li, Z., "MIP reformulation for max-min problems in two-stage robust SCUC", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 32, No. 2, pp. 1237-1247, 2016.
- [17] Cobos, N.G., Arroyo, J.M., Alguacil, N. and Street, A., "Network-constrained unit commitment under significant wind penetration: A multistage robust approach with non-fixed recourse", Applied energy, Vol. 232, pp. 489-503, 2018.
- [18] Dong, Y., Wang, C., Zhang, Y., Li, X., Sheng, H. and Li, B., "Adaptive robust unit commitment model based on the polyhedral uncertainty set", In 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), pp. 2039-2043: IEEE, 2020.
- [19] Du, Y., Li, Y., Duan, C., Gooi, H.B. and Jiang, L., "An Adjustable Uncertainty Set Constrained Unit Commitment with Operation Risk Reduced through Demand Response", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 17, No. 2, pp. 1154-1165, 2020.
- [20] Street, A., Oliveira, F. and Arroyo, J.M., "Contingency-constrained unit commitment with $n-k$ security criterion: A robust optimization approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 3, pp. 1581-1590, 2010.
- [21] Mirzaei, M.A., Sadeghi-Yazdankhah, A., Mohammadi-Ivatloo, B., Marzband, M., Shafie-khah, M. and Catalão, J.P., "Integration of emerging resources in IGDT-based robust scheduling of combined power and natural gas systems considering flexible ramping products", Energy, Vol. 189, p. 116195, 2019.
- [22] Hu, B. and Wu, L., "Robust SCUC considering continuous/discrete uncertainties and quick-start units: A two-stage robust optimization with mixed-integer recourse", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 2, pp. 1407-1419, 2015.
- [23] Cobos, N.G., Arroyo, J.M. and Street, A., "Least-cost reserve offer deliverability in day-ahead generation scheduling under wind uncertainty and generation and network outages", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 4, pp. 3430-3442, 2016.