

برنامه‌ریزی تولید و ذخیره منابع تولید حرارتی در شرایط عدم قطعیت تولید بادی و بار در حضور ذخیره‌ساز انرژی و پاسخ‌گویی سمت تقاضا

محسن رمضان‌زاده^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ میثم جعفری نوکنندی^۲، استادیار؛ تقی بارفروشی^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی - بابل - ایران - ramzanzademohsen@stu.nit.ac.ir

۲- گروه پژوهشی پست‌های فشار قوی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی - بابل - ایران - m.jafari@nit.ac.ir

۳- گروه پژوهشی پست‌های فشار قوی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی - بابل - ایران - barforoshi@nit.ac.ir

چکیده: در این مقاله مدلی بر اساس برنامه‌ریزی تصادفی جهت مطالعه تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر شاخص‌های اقتصادی و امنیت بهره‌برداری شبکه قدرت در شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. شبکه قدرت موردنظر در این مقاله شامل منابع تولید حرارتی، بادی و ذخیره‌ساز مغناطیسی ابررسانا است که در آن عدم قطعیت‌های بار و تولید توان منابع بادی و خروج تصادفی واحدهای تولید و خطوط انتقال در نظر گرفته می‌شوند. مسئله موردنظر در قالب یک مسئله بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای مدل‌سازی شده و با استفاده از تکنیک‌های حل مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح حل می‌شود. نتایج مطالعات در شبکه شش شینه نشان می‌دهد که به‌کارگیری منابع ذخیره‌ساز انرژی و پاسخ‌گویی سمت تقاضا در کنار ذخیره بخش تولید می‌تواند ضمن صرفه‌جویی در هزینه‌های بهره‌برداری شبکه قدرت، امنیت شبکه را با وجود عدم قطعیت حفظ نماید. مطالعات حساسیت انجام شده، نشان داده است که استفاده از ظرفیت مناسب این منابع ضمن آن‌که موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های شبکه قدرت می‌شود، قابلیت اطمینان شبکه را نیز بهبود بخشیده و باعث جلوگیری از سرمایه‌گذاری اضافی می‌شود. همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که افزایش خطای پیش‌بینی بار در مقایسه با خطای پیش‌بینی باد، تأثیر بیش‌تری بر هزینه‌های شبکه قدرت می‌گذارد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تصادفی، ذخیره تولید، پاسخ‌گویی بار، بار قابل انتقال، ذخیره‌ساز انرژی، عدم قطعیت.

Scheduling of Generation and Reserve of Thermal Generation Resources Considering Load and Wind Uncertainty in Presence of Energy Storage and Demand Response

M. Ramezanzade¹, MSc. Student; M. Jafari-Nokandi², Assistant Professor; T. Barforoshi³, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran,
Email: ramzanzademohsen@stu.nit.ac.ir

2- Substation Research Group, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: m.jafari@nit.ac.ir

3- Substation Research Group, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: barforoshi@nit.ac.ir

Abstract: In this paper, a stochastic model is introduced to study the influence of demand response programs on economic and system security indices in uncertain conditions. The power system under study includes thermal and wind power sources and superconductive magnitude energy storage in which, the uncertainties of load and wind power and stochastic outages of generation units and transmission lines are considered. The problem is formulated through a two stage stochastic optimization model and is solved by utilizing Mixed Integer Linear Programming (MILP) technique. The results of the studies of the 6-bus system illustrates that the employment of energy storage resources and demand response along with the generation reserve not only reduce the costs of operation in power system, but also maintain its security level through managing the uncertainties. Sensitivity analyses show that using the appropriate capacity of demand-side reserve not only reduces the cost of the power system but also improve system reliability and avoids additional investment. Moreover, The results show that increasing load forecasting error has more effects on the operation cost of the power system.

Keywords: Stochastic programming, generation reserve, demand response, shiftable load, storage system, uncertainty.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۴

نام نویسنده مسئول: میثم جعفری نوکنندی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بابل - دانشگاه صنعتی نوشیروانی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

در شبکه‌های قدرت امروزی، استفاده حداکثری از ظرفیت‌های موجود در شبکه برای کاهش هزینه تأمین انرژی همراه با حفظ امنیت شبکه در مقابل خروج‌های برنامه‌ریزی نشده تجهیزات و تغییرات ناگهانی بار بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تخصیص خدمات جانبی نظیر ذخیره‌های چرخان و تنظیم فرکانس در برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و رزرو یکی از کارآمدترین روش‌های دستیابی به این هدف است.

از سوی دیگر گسترش بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی باد و استفاده از مزارع بادی چالش‌هایی را به برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه قدرت وارد نموده است. یکی از چالش‌های این منابع عدم قطعیت در تولید آن‌ها است که عملکرد اقتصادی و مطمئن یک شبکه قدرت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین عدم قطعیت در برآورد نیاز مصرف چالش دیگری برای بهره‌بردار شبکه قدرت به‌شمار می‌رود. بنابراین با توجه به امکان وجود خطا در پیش‌بینی تولید توان واحدهای بادی و میزان بار شبکه، برنامه‌ریزی شبکه باید به نحوی انجام شود که علاوه بر تأمین تقاضای پیش‌بینی‌شده، رزرو مناسب نیز تأمین گردد تا خطای پیش‌بینی بار، تولید بادی و همچنین خروج واحدهای تولیدی و خطوط جبران شود.

با پیشرفت تکنولوژی، در سال‌های اخیر روش‌های نوینی به‌منظور مدیریت عدم قطعیت‌های حاکم بر شبکه‌های قدرت معرفی شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از منابع مانند پاسخ‌گویی بار (DR) و ذخیره‌ساز انرژی اشاره کرد. برای عملکرد کارا و درعین حال با کم‌ترین هزینه، منابع DR گزینه مناسبی هستند [۱]. منابع ذخیره‌ساز انرژی هم، روشی مؤثر جهت تسهیل ادغام توان بادی به شبکه و جبران عدم قطعیت‌های آن است [۲].

با توجه به تنوع منابع عدم قطعیت و روش‌های مدیریت آن‌ها، تحقیقات مختلفی برای تعیین رزرو موردنیاز شبکه صورت گرفته است. در [۳] به مسئله مشارکت واحدهای نیروگاهی در حضور منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت آن‌ها پرداخته شده است. مسئله با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی هماهنگ^۲ حل گردیده است. البته عدم قطعیت بار و خروج تجهیزات به‌کارگیری منابع سمت تقاضا و فناوری نوین ذخیره‌ساز انرژی لحاظ نشده است. در [۴، ۵]، از ذخیره چرخان برای مواجهه با عدم قطعیت‌های پیش‌بینی‌نشده میان تولید و مصرف استفاده شده است و در آن از روش ارزش در خطر شرطی^۳ به‌منظور تعیین رزرو بهینه استفاده شده است. البته خروج تجهیزات تولید و انتقال و همچنین به‌کارگیری منابع DR و ذخیره‌ساز لحاظ نشده است. در [۶] به شرح روش‌های مختلف مدیریت سمت مصرف به‌منظور مدیریت ادغام بالای توان بادی پرداخته شده است. به‌طور خاص، پاسخ‌گویی بار با جابه‌جا کردن زمان مصرف خود که حساس به قیمت زمان واقعی و دسترس‌پذیری توان بادی است تغییرات توان بادی را مدیریت می‌کند. در [۷] ضمن استفاده از پاسخ سمت تقاضا برای کاهش اثرات نامطلوب

پیشامدهای خروج اجزای شبکه قدرت به تعیین میزان اثرگذاری این برنامه‌ها بر بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های قدرت تجدیدساختاریافته با ملاحظه عدم قطعیت‌های باد و بار پرداخته شده است. در [۸]، مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای ارائه شده است تا در شرایط نفوذ بالای توان بادی، مقدار مورد نیاز رزرو سمت مصرف را هم از سمت تقاضا و هم از سمت تولید تأمین نماید. اما در اینجا نیز عدم قطعیت بار و پیشامدهای خروج تجهیزات لحاظ نشده‌اند. در [۹] به اثرات نامطلوب تولید انرژی به‌وسیله توربین‌های بادی مانند افزایش هزینه بهره‌برداری، عدم کارکرد مناسب واحدهای حرارتی و حتی در برخی موارد، در معرض خطر قرار گرفتن امنیت شبکه اشاره شده است. بنابراین شبکه قدرت به انعطاف‌پذیری بیشتری در زمینه بهره‌برداری و عملکرد تحت این شرایط نیاز دارد. لذا در آن تحقیق، توزیع هم‌زمان انرژی و رزرو با در نظر گرفتن به‌کارگیری ذخیره‌ساز انرژی و همچنین پاسخ‌گویی بار ارائه شده است. در [۱۰] به ویژگی‌های مثبت به‌کارگیری ذخیره‌سازهای انرژی مانند قابلیت جابه‌جایی انرژی و تغییرات سریع نرخ تزریق توان به شبکه به‌منظور سهولت در ادغام توان بادی تأکید شده است. لذا از چارچوب دومرحله‌ای استفاده شده است که مرحله اول شامل مسئله درمدار قرار گرفتن واحدها به‌صورت برنامه‌ریزی تصادفی و با عدم قطعیت در تولید توان بادی، و به‌کارگیری ذخیره‌ساز انرژی و مرحله دوم شامل برنامه‌ریزی ذخیره‌ساز انرژی است.

با بررسی تحقیقات گذشته در زمینه تخصیص رزرو شبکه قدرت مشخص می‌شود که تاکنون تحقیق جامعی برای مدیریت عدم قطعیت بار و توان بادی و پیشامدهای احتمالی خروج تجهیزات در حضور پاسخ سمت تقاضا و ذخیره‌ساز انرژی صورت نگرفته است. لذا در مقاله حاضر، مدلی به‌منظور برنامه‌ریزی شبکه قدرت در شرایط عدم قطعیت واحدهای تولید بادی، بار پیش‌بینی‌شده و خروج تصادفی تجهیزات شبکه در حضور منابع پاسخ‌گویی بار و ذخیره‌ساز انرژی ارائه می‌شود. نوآوری‌های مدل ارائه شده به شرح زیر است:

- ارائه مدل برنامه‌ریزی تصادفی به‌منظور مطالعه اثرات متقابل منابع پاسخ‌گویی بار و ذخیره‌ساز انرژی در شرایط عدم قطعیت.
- در نظر گرفتن هم‌زمان عدم قطعیت‌های واحدهای تولید بادی، پیش‌بینی بار و خروج تجهیزات شبکه قدرت.
- اجرای هم‌زمان برنامه‌های پاسخ‌گویی بار شامل تأمین رزرو و بارهای قابل انتقال (SL)^۴.
- در نظر گرفتن ذخیره‌ساز انرژی.

بخش دوم به مدل‌سازی پاسخ‌گویی سمت تقاضا جهت تأمین رزرو، بارهای قابل انتقال، ذخیره‌ساز انرژی و همچنین مدل‌سازی عدم قطعیت توان باد و بار و خروج تجهیزات می‌پردازد. مسئله تسویه بازار خدمات جانبی و انرژی در بخش سه تعریف می‌شود. مطالعات موردی در بخش چهارم ارائه شده است و در بخش پنجم مطالعه حساسیت بر روی شبکه موردنظر پرداخته شده است و بخش ششم این مقاله جمع‌بندی نتایج را شامل می‌شود.

۲- مدل‌سازی بارهای پاسخ‌گو و عدم قطعیت

۲-۱- مدل پاسخ‌گویی بار برای تأمین رزرو

فراهم‌کنندگان خدمات پاسخ‌گویی بار ضمن جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز از مصرف‌کننده‌ها برای شرکت در برنامه خدمات جانبی، بسته‌های پیشنهادی حاوی ظرفیت و قیمت را به‌صورت گسسته به بهره‌بردار شبکه ارائه می‌دهند [۱۱]. مطابق شکل ۱، هر بلوک از پیشنهاد ارائه شده، به‌طور کامل پذیرفته و یا رد می‌شود و در زمان مورد نیاز هم به‌طور کامل استفاده می‌شود. در این شکل وجود "X" برای هر قسمت نشان‌دهنده پذیرفته شدن پاسخ تقاضای آن بخش از پیشنهاد بار پاسخ‌گو در مرحله برنامه‌ریزی است و "+" نشان‌دهنده استفاده از آن بخش در مرحله تحقق سناریوها است.

روابط (۱) و (۲)، رزرو پذیرفته شده از مصرف‌کننده r در ساعت t و هزینه آن را نشان می‌دهند. توان واقعی استفاده شده در سناریو s در زمان t و هزینه مرتبط با آن توسط روابط (۳) و (۴) بیان شده است.

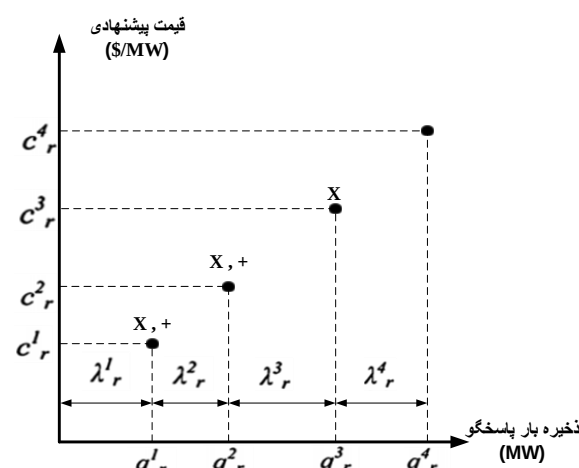
$$DRR_{rt} = \sum_{k=1}^{NQ_r} \lambda_r^k u_{rt}^k \quad (1)$$

$$CDRR_{rt} = \sum_{k=1}^{NQ_r} cc_{rt}^k \lambda_r^k u_{rt}^k \quad (2)$$

$$DRR_{rts} = \sum_{k=1}^{NQ_r} \lambda_r^k u_{rts}^k \quad (3)$$

$$CEDRR_{rts} = \sum_{k=1}^{NQ_r} ec_{rts}^k \lambda_r^k u_{rts}^k \quad (4)$$

$$\lambda_r^k = q_r^k - q_r^{k-1} \quad (5)$$



شکل ۱- نقاط پیشنهادی و پذیرفته شده بارهای تأمین‌کننده رزرو

۲-۲- مدل بار قابل انتقال

در مدل ارائه شده بار قابل انتقال برای استفاده در زمان‌های اوج مصرف در نظر گرفته می‌شود. بهره‌بردار شبکه با توجه به پیش‌بینی بار و بر اساس ویژگی و ظرفیت‌های شبکه قدرت می‌تواند با ارائه مشوق بخشی از مصرف را به جابه‌جایی از زمان‌های اوج مصرف به زمان‌های کم‌باری ترغیب نماید تا فشار بر شبکه در ساعت‌های اوج مصرف کاهش یابد. فرض می‌شود که درصدی از بارهای موجود در هر شین به‌منظور

شرکت در برنامه جابه‌جایی بار فراخوانی می‌شود. اطلاعات این مدل بار در جدول ۳ مشاهده می‌شود و روابط (۶) و (۷) هزینه به‌کارگیری این مدل بار در حالت‌های پایه و در سناریوها را نشان می‌دهد.

$$CSL_{j0}^{t,t_2} = SL_{j0}^{t,t_2} IP^{t,t_2} \quad (6)$$

$$CSL_{js}^{t,t_2} = SL_{js}^{t,t_2} IP^{t,t_2} \quad (7)$$

۲-۳- مدل ذخیره‌ساز انرژی

به‌منظور کاهش تأثیر عدم قطعیت توان بادی از منابع ذخیره‌ساز انرژی استفاده می‌شود [۱۲]. روابط (۸) تا (۱۲) مدل ریاضی ذخیره‌ساز را نشان می‌دهند. رابطه (۸) مقدار انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز e در هر ساعت از حالت پایه یا سناریو s را به‌صورت تابعی از انرژی ذخیره‌شده تا ساعت قبل و توان شارژ یا دشارژ در آن ساعت نشان می‌دهد. رابطه (۹)، حداکثر و حداقل انرژی قابل ذخیره در هر ساعت را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ذخیره‌ساز در حالت‌های شارژ و دشارژ در روابط (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده‌اند. رابطه (۱۲) نیز از هم‌زمانی شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز ممانعت می‌کند.

$$SE_{e,t,s} = SE_{e,t-1,s} + Pch_{e,t,s} \eta_c - Pdis_{e,t,s} / \eta_d \quad (8)$$

$$E_{min,e} \leq SE_{e,t,s} \leq E_{max,e} \quad (9)$$

$$0 \leq Pch_{e,t,s} \leq Pch_{max,e} X_{e,t,s}^{ch} \quad (10)$$

$$0 \leq Pdis_{e,t,s} \leq Pdis_{max,e} X_{e,t,s}^{dis} \quad (11)$$

$$X_{e,t,s}^{ch} + X_{e,t,s}^{dis} \leq 1 \quad (12)$$

۲-۴- شبیه‌سازی عدم قطعیت توان بادی و پیش‌بینی بار

خطای پیش‌بینی توان باد و بار به‌صورت توزیع نرمال و مستقل از هم در نظر گرفته شده‌اند [۱۳]. انحراف استاندارد خطای پیش‌بینی بار برابر ۳٪ فرض شده است. همچنین انحراف استاندارد خطای پیش‌بینی باد از زمان صفر تا زمان ۲۴ به‌صورت خطی از صفر تا ۶/۵ درصد توان پیش‌بینی شده طبق رابطه زیر افزایش می‌یابد [۱۰]:

$$\sigma_{w,t} = 0.0027tP_{Dnw} \quad (13)$$

با در نظر گرفتن مشخصات واحد بادی در مرجع [۱۱] و با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، ۱۰۰۰ سناریو تصادفی متناظر با خطای پیش‌بینی باد و بار تولید شده و سپس از طریق روش کاهش سناریوی بازگشتی سریع [۱۴] تعداد آن‌ها به ۱۰ سناریو کاهش یافته است. شکل‌های ۲ و ۳ توان باد و بار متناظر با سناریوها و جدول ۱ احتمال وقوع سناریوها را نشان می‌دهند.

۲-۵- شبیه‌سازی خروج تجهیزات

خروج ژنراتورها و خطوط انتقال طبیعت تصادفی دارد. بنابراین در دسترس نبودن آن‌ها می‌تواند به‌عنوان متغیر تصادفی با احتمال برابر با احتمال خروج تجهیزات در افق زمانی برنامه‌ریزی در نظر گرفته شود. دسترس‌ناپذیری تجهیزات توسط نرخ خرابی آن‌ها قابل تعیین است [۱۵]. جدول ۱ احتمال خروج واحدها و خطوط را در شبکه شش‌شینه مورد مطالعه با سه ژنراتور و هفت خط انتقال نشان می‌دهد [۱۶].

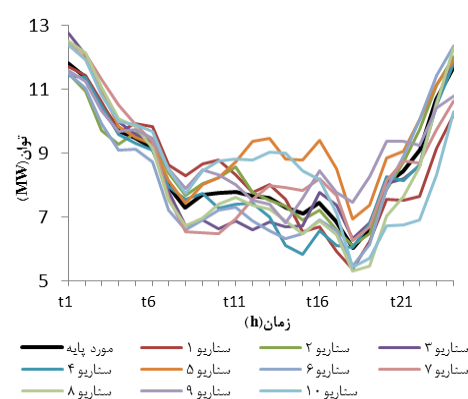
دومرحله‌ای ارائه می‌شود. توجه شود که حالت پایه همان برنامه‌ریزی مرحله اول است که در آن، تولید واحدهای حرارتی و بادی، رزرو واحدهای حرارتی و بارهای پاسخ‌گو و میزان انتقال بار و همچنین وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز تعیین می‌شود. سپس با توجه به سناریوی محقق شده یعنی انحراف توان بادی از حالت پایه و انحراف توان بار از مقدار پیش‌بینی شده و یا خروج تجهیزات تولید و انتقال، میزان استفاده از رزرو واحدها و بارهای پاسخ‌گو و انرژی ذخیره‌ساز و قطع بار مشخص می‌شود.

همچنین لازم به ذکر است که به دلیل صفر بودن هزینه تولید و عدم انتشار آلاینده‌گی توسط واحدهای بادی، استفاده از تمام توان تولیدی آن‌ها به‌صرفه بوده و موجب کاهش هزینه کلی سیستم می‌شود. اما به علت تغییرپذیری توان این واحدها در اثر تغییرات سرعت باد، لازم است که در صورت افزایش توان این واحدها از مقدار برنامه‌ریزی شده، یا از رزرو چرخان کاهشی و رزرو گران قیمت تنظیم کاهشی استفاده شود تا عدم تعادل توان تولیدی و مصرفی جبران شود و یا آن‌که توان تولیدی توسط نیروگاه‌های مزرعه بادی، کاهش یابد. با توجه به این‌که کاهش توان بادی، به‌طورکلی به‌صرفه نبوده و بهتر است که تا حد امکان از آن اجتناب شود لذا در تابع هدف، هزینه‌ای برای آن در نظر گرفته می‌شود تا کاهش توان بادی، تا حد امکان انجام نشود و فقط در صورتی‌که جبران عدم تعادل تولید و مصرف با تأمین رزروهای کاهشی، هزینه بیش‌تری به سیستم تحمیل کند کاهش توان بادی صورت گیرد.

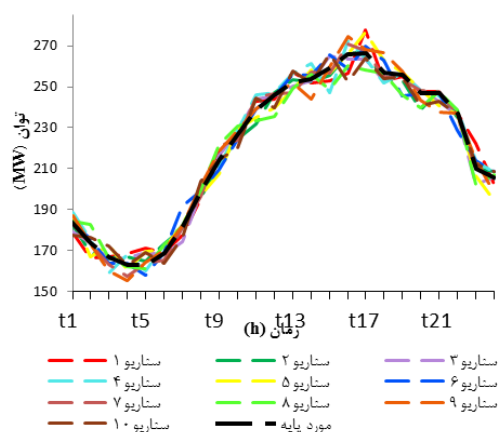
۳-۱- تابع هدف

رابطه (۱۴) تابع هدف را نشان می‌دهد که شامل دو جمله به ترتیب متناظر با هزینه تصمیم‌گیری‌های مرحله اول و دوم است. در هزینه مرحله اول که با رابطه (۱۵) بیان شده است، جملات ردیف اول، هزینه‌های توان تولیدی، راه‌اندازی و خاموش‌شدن واحدهای حرارتی، رزروهای تنظیم افزایشی و کاهشی، رزروهای چرخان افزایشی و کاهشی تأمین شده توسط ژنراتورها در حالت پایه (پیش‌بینی‌شده) را نشان می‌دهند. ردیف دوم، متناظر با هزینه کاهش توان بادی در حالت پایه و هزینه شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز بوده و ردیف سوم نیز هزینه رزرو تأمین‌شده از بارهای پاسخ‌گو و تشویقی بابت انتقال بارهای جابه‌جاپذیر است. جمله دوم تابع هدف که با رابطه (۱۶) نشان داده شده است، مقدار مورد انتظار هزینه‌های سناریوها را بیان می‌کند که مؤلفه‌های آن به‌ترتیب مربوط به هزینه استفاده از رزروهای تولید (تنظیم و چرخان)، هزینه کاهش توان بادی و هزینه به‌کارگیری ذخیره‌ساز انرژی، هزینه استفاده از رزرو سمت تقاضا، هزینه بار قابل انتقال و هزینه قطع بار غیرداوطلبانه است.

برنامه‌ریزی منابع باید برای حالت پایه انجام شود و سپس با توجه به سناریوی محقق شده، تصمیمات زمان واقعی اتخاذ شوند. بنابراین تابع هدف باید به ازای دو دسته قیود زیر بهینه شود:



شکل ۲- مقدار پیش‌بینی شده و سناریوهای توان باد



شکل ۳- مقدار پیش‌بینی شده و سناریوهای بار شبکه

جدول ۱- احتمال وقوع سناریوهای توان باد و بار و خروج تجهیزات

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵
احتمال	۰/۲۴۲۵۸	۰/۱۱۱۹۶	۰/۰۷۴۶۴	۰/۰۶۵۳۱	۰/۱۳۰۶۲
سناریو	۶	۷	۸	۹	۱۰
احتمال	۰/۰۸۳۹۷	۰/۰۱۸۶۶	۰/۰۶۵۳۱	۰/۰۶۵۳۱	۰/۰۷۴۶۴
سناریو	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
احتمال	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
سناریو	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
احتمال	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱

سناریوهای ۱۱ تا ۱۳ به ترتیب معادل با خروج واحدهای تولیدی اول تا سوم بوده و سناریوهای ۱۴ تا ۲۰ متناظر با خروج خطوط اول تا هفتم هستند. در این سناریوها از مقدار بار و توان بادی پیش‌بینی شده در حالت پایه استفاده می‌شود.

۳- مدل تسویه بازار انرژی و خدمات جانبی

تسویه بازار هم‌زمان انرژی و خدمات جانبی به‌صورت مسئله برنامه‌ریزی مقید به امنیت مشارکت واحدها بیان شده است. برای جبران انحرافات بار ساعتی و تولید نیروگاه بادی و نیز خروج تجهیزات، از رزروهای چرخان و تنظیم فرکانس استفاده شده است. در این بخش فرمول‌بندی ریاضی مدل پیشنهادی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی تصادفی

می‌کنند. رابطه (۲۴) رزرو قابل تأمین توسط بارهای پاسخ‌گو را به حداکثر میزان پیشنهادی آن‌ها محدود می‌کند. بر اساس رابطه (۲۵)، حداکثر تولید برنامه‌ریزی شده بادی برابر با مقدار پیش‌بینی شده توان باد است. رابطه (۲۶)، کاهش توان بادی را در حالت پایه محاسبه می‌کند. در رابطه (۲۷)، حداکثر میزان انتقال بار هر مصرف‌کننده به درصدی از تقاضای آن محدود می‌شود. مطابق رابطه (۲۸) نیز به همان میزان بار انتقال یافته از یک ساعت، به تقاضای بار در ساعت مقصد اضافه خواهد شد.

مطابق قیود (۲۹) و (۳۰)، اگر واحد حرارتی در دو ساعت متوالی روشن باشد حداکثر میزان افزایش یا کاهش تولید ساعتی آن به ترتیب به UR_i و DR_i محدود می‌شود. اما اگر واحد تولیدی در حال راه‌اندازی باشد، تولید آن در ساعت بعدی به P_{min} آن واحد می‌رسد و در صورت توقف واحد، توان آن در ساعت قبلی به P_{min} رسیده است [۱۱]. روابط (۳۱) تا (۳۴)، نیز مقدار متغیرهای باینری متناظر با راه‌اندازی و توقف واحدها را تعیین می‌کنند.

$$P_{it0} - P_{i(t-1)0} \leq (1 - y_{it})UR_i + y_{it}P_{min,i} \quad (29)$$

$$P_{i(t-1)0} - P_{it0} \leq (1 - z_{it})DR_i + z_{it}P_{min,i} \quad (30)$$

$$y_{it} - z_{it} \leq I_{it} - I_{i(t-1)} \quad (31)$$

$$y_{it} + z_{it} \leq 1 \quad (32)$$

$$0 \leq y_{it} \leq 1 \quad (33)$$

$$0 \leq z_{it} \leq 1 \quad (34)$$

همچنین قیود حداقل زمان روشن و خاموش ماندن واحدها با روابط (۳۵) و (۳۶) نشان داده می‌شوند [۱۷].

$$\sum_{q=t-UT_i+1}^t y_{it} \leq I_{it} \quad \forall i, t \in \{UT_i, \dots, T\} \quad (35)$$

$$\sum_{q=t-DT_i+1}^t z_{it} \leq 1 - I_{it} \quad \forall i, t \in \{DT_i, \dots, T\} \quad (36)$$

رابطه (۳۷)، توان عبوری از خطوط را بر اساس مدل پخش بار DC تعیین می‌کند و روابط (۳۸) و (۳۹) نیز به ترتیب توان خطوط و زاویه ولتاژ شین‌ها را به حداقل و حداکثر مقدار آن‌ها محدود می‌کنند.

$$f_{L,nm,t0} = B_L(\theta_{n,t,0} - \theta_{m,t,0}) \quad (37)$$

$$-f_{\max,L} \leq f_{L,nm,t0} \leq f_{\max,L} \quad (38)$$

$$-\theta_{\max} \leq \theta_{n,t,0} \leq \theta_{\max} \quad (39)$$

۳-۳- قیود مرحله دوم

قیود مرحله دوم، مربوط به شرایط واقعی بهره‌برداری از شبکه قدرت است، یعنی درحالتی که سناریوهای شبکه مانند تولید توان بادی و عدم قطعیت بار و یا خروج تجهیزات تحقق یافته است.

الف- قید تعادل توان در هر شین در سناریوها

$$\sum_{i \in n} P_{nis} + P_{wts} + \sum_{r \in n} DRR_{rs} - \sum_{e \in n} Pdis_{e,t,s} - \sum_{e \in n} Pch_{e,t,s} - \sum_{m=1}^{Nb} f_{L,nm,t,s} = Pd_{nts} - \sum_{j \in n} SL_{j0}^{t_2,t} + \sum_{j \in n} SL_{j0}^{t_1,t} - LC_{nts} \quad (40)$$

$$\min f_1 + f_2 \quad (14)$$

$$f_1 = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{Ng} \left[C_{g,i} P_{it0} + SU_{it} + SD_{it} + C_{RR,i} RR_{u,it} + C_{RR,i} RR_{d,it} + C_{SR,i} SR_{u,it} + C_{SR,i} SR_{d,it} \right] + \sum_{w=1}^{Nw} P_{curt,wto} C_{curt,wt} + \sum_{e=1}^{Ne} [Fch_e Pch_{e,t,0} + Fdis_e Pdis_{e,t,0}] + \sum_{r=1}^{NDR} CDRR_r + \sum_{t,t_2}^{Nsl} \sum_{j=1}^{Nsl} CSL_{j0}^{t,t_2} \right\} \quad (15)$$

$$f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^{Ns} \left\{ \rho_s \sum_{i=1}^{Ng} (C_{g,i} P_{its} - C_{g,i} P_{it0}) + \sum_{w=1}^{Nw} P_{curt,wts} C_{curt,wt} + \sum_{e=1}^{Ne} [Fch_e Pch_{e,t,s} + Fdis_e Pdis_{e,t,s}] + \sum_{r=1}^{NDR} CEDRR_{rs} + \sum_{t,t_2}^{Nsl} \sum_{j=1}^{Nsl} CSL_{js}^{t,t_2} + \sum_{n=1}^{Nb} VOLL_n LC_{nts} \right\} \quad (16)$$

۳-۲- قیود مرحله اول (حالت پایه)

قیود مرحله اول که به مدل‌سازی تسویه انرژی و ذخیره در بازار برق می‌پردازد به شرح زیر است. رابطه (۱۷)، تعادل میان توان‌های تولیدی و توان مصرفی را در هر شین شبکه نشان می‌دهد.

الف- قید تعادل توان در هر شین

$$\sum_{i \in n} P_{it0} + P_{wt0} + \sum_{e \in n} Pdis_{e,t,0} - \sum_{e \in n} Pch_{e,t,0} - \sum_{m=1}^{Nb} f_{L,nm,t0} = Pd_{nt0} - \sum_{j \in n} SL_{j0}^{t_2,t} + \sum_{j \in n} SL_{j0}^{t_1,t} \quad (17)$$

البته در شین‌های فاقد واحد تولیدی بادی، مقدار توان واحد بادی (P_{wt0}) صفر در نظر گرفته می‌شود.

قیود مقدار تولید و رزرو واحدها و قطع توان بادی با روابط زیر بیان می‌شوند:

$$P_{it0} + RR_{u,it} + SR_{u,it} \leq P_{\max,i} I_{it} \quad (18)$$

$$P_{it0} - RR_{d,it} - SR_{d,it} \geq P_{\min,i} I_{it} \quad (19)$$

$$0 \leq RR_{u,it} \leq RR_{\max,i} \quad (20)$$

$$0 \leq RR_{d,it} \leq RR_{\max,i} \quad (21)$$

$$0 \leq SR_{u,it} \leq SR_{\max,i} \quad (22)$$

$$0 \leq SR_{d,it} \leq SR_{\max,i} \quad (23)$$

$$0 \leq DRR_{rt} \leq DRR_{\max,r} \quad (24)$$

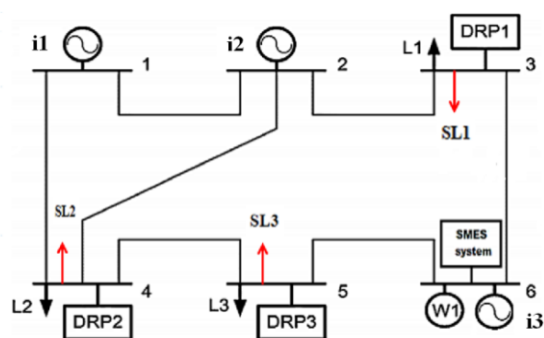
$$0 \leq P_{wt0} \leq P_{\varphi,wt0} \quad (25)$$

$$P_{curt,wt0} = P_{\varphi,wt0} - P_{wt0} \quad (26)$$

$$0 \leq SL_{j0}^{t_1,t_2} \leq \gamma Pd_{rt0} \quad (27)$$

$$SL_{j0}^{t_2,t_1} = -SL_{j0}^{t_1,t_2} \quad (28)$$

مطابق روابط (۱۸) و (۱۹)، تولید تخصیص یافته به‌علاوه ذخیره‌های افزایشی و یا منهای ذخیره‌های کاهشی هر واحد تولیدی باید بین حداکثر و حداقل ظرفیت تولید آن واحد باشد. روابط (۲۰) تا (۲۳) حداکثر میزان ذخیره‌های تنظیم و چرخان افزایشی و کاهشی واحدها را با توجه به محدودیت نرخ تغییر تولید آن‌ها مشخص



شکل ۴- شبکه ۶ شینه مورد مطالعه

پیشنهاد تأمین رزرو توسط بارهای پاسخگو به ترتیب شامل سه نقطه ۱/۸، ۳/۶ و ۵/۶ مگاواتی و به ترتیب با قیمت برنامه‌ریزی ۱۰، ۱۳ و ۱۶ دلار بر مگاوات و قیمت به‌کارگیری رزرو آن‌ها در سناریوها، ۱۰ دلار بر مگاوات است [۱۱]. ارزش بار از دست‌رفته در هر باس بار ۴۵۰ \$/MWh و همچنین ارزش توان بادی قطع شده برابر با ۵۰ \$/MWh (بالاتر از گران‌ترین واحد حرارتی) فرض شده است. بازده شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز برابر با ۰/۹۵ فرض شده [۱۸] و سایر اطلاعات آن در جدول ۲ آمده است [۱۹]. همچنین در جدول ۳ مشخصات مربوط به بارهای قابل انتقال ذکر شده است.

جدول ۲- مشخصات ذخیره‌ساز انرژی

Pdmax (MW)	Pchmax (MW)	E _{max} (MWh)	E _{min} (MWh)
۱۵	۱۵	۳۰	۷

جدول ۳- مشخصات بارهای قابل انتقال

بار قابل انتقال	مبلغ تشویقی (\$/MWh)	از ساعت (t1)	به ساعت (t2)
$SL_j^{17,4}$	۷	۱۷	۴
$SL_j^{16,5}$	۷	۱۶	۵
$SL_j^{15,3}$	۷	۱۵	۳
$SL_j^{18,4}$	۳	۱۸	۴
$SL_j^{19,6}$	۳	۱۹	۶

نتایج برنامه‌ریزی در چهار حالت زیر با هم مقایسه شده است:

حالت اول: بدون اجرای برنامه DR و SL و ذخیره‌ساز

حالت دوم: با اجرای برنامه DR

حالت سوم: با اجرای برنامه DR و SL

حالت چهارم: با اجرای برنامه DR و SL و به‌کارگیری ذخیره‌ساز

۴-۱- حالت اول

در این حالت برنامه‌ریزی هم‌زمان تولید و ذخیره تحت سناریوهای محتمل پیش‌بینی باد و بار و نیز خروج واحدهای تولید و خطوط انتقال انجام می‌گیرد و برای مدیریت این عدم قطعیت‌ها از ظرفیت بالقوه بخش تولید و همچنین قطع غیرداوطلبانه بار استفاده می‌شود. هزینه بهره‌برداری تحت این شرایط برابر با ۱۷۰۳۳۰/۷ دلار می‌شود. در این حالت قطع بار تنها در پیشامدهای خروج و به‌خصوص سناریو ۱۱ که ناشی از خروج ژنراتور بزرگ یک است اعمال شده است، به‌طوری‌که ۸۳ درصد از کل هزینه قطع بار مربوط به خروج واحد اول است. در این حالت مقدار ۱۰/۵ مگاوات در کل سناریوها کاهش توان بادی انجام

همچنین در باس‌هایی که فاقد واحد تولیدی بادی هستند، مقدار توان واحد بادی (P_{wts}) صفر در نظر گرفته می‌شود.

۴-۳- قیود ارتباط‌دهنده مرحله اول و دوم

مؤلفه‌های توان خروجی واحد تولیدی و خطوط.

به‌منظور مدل‌سازی خروج واحدهای حرارتی و خطوط انتقال از پارامتر باینری Ψ برای تجهیزات موجود استفاده شده است به‌طوری‌که در سناریوهای متناظر با خروج هریک از عناصر شبکه این پارامتر برای آن عنصر صفر خواهد شد تا توان تولیدی ژنراتور یا توان عبوری از خط متناظر صفر شود و برای سایر عناصر مقدار یک را خواهد داشت. معادلات (۴۲) و (۴۴) تأثیر این پارامتر باینری را نشان می‌دهد.

$$P_{its} = \psi_{is} (P_{it0} + RR_{its} + SR_{its}) \quad (41)$$

$$\psi_{is} = \begin{cases} 0 & \text{if generator } i \text{ is out of service in scenario } s \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (42)$$

محدودیت رزرو به کار گرفته شده

$$-RR_{d,it} \leq RR_{its} \leq RR_{u,it} \quad (43)$$

$$-SR_{d,it} \leq SR_{its} \leq SR_{u,it} \quad (44)$$

$$0 \leq DRR_{its} \leq DRR_{rt} \quad (45)$$

قید توان بادی و قطع بار غیرداوطلبانه در سناریوها

$$0 \leq P_{wts} \leq P_{\phi, wts} \quad (46)$$

$$P_{curt, wts} = P_{\phi, wts} - P_{wts} \quad (47)$$

$$0 \leq LC_{nts} \leq LC_{max, n} \quad (48)$$

محدودیت تغییر تولید واحدهای حرارتی در هر ساعت

$$P_{its} - P_{i(t-1)s} \leq (1 - y_{it})UR_i + y_{it}P_{min,i} \quad (49)$$

$$P_{i(t-1)s} - P_{its} \leq (1 - z_{it})DR_i + z_{it}P_{min,i} \quad (50)$$

قیود شبکه انتقال

$$f_{L, nm, ts} = \psi_{Ls} B_L (\theta_{n, t, s} - \theta_{m, t, s}) \quad (51)$$

$$-f_{max, L} \leq f_{L, nm, ts} \leq f_{max, L} \quad (52)$$

$$-\theta_{max} \leq \theta_{n, t, s} \leq \theta_{max} \quad (53)$$

$$\psi_{Ls} = \begin{cases} 0 & \text{if line } L \text{ is out of service in scenario } s \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (54)$$

۴- شبیه‌سازی مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی در نرم‌افزار GAMS کدنویسی شده و از نسخه ۱۲ حل‌کننده CPLEX برای بهینه‌سازی استفاده شده است. برنامه پیاده‌سازی شده در یک دستگاه رایانه شخصی با پردازنده مرکزی پنج هسته‌ای با سرعت ۲/۴۰ zGH و ۴ GB حافظه RAM اجرا شده است، به‌منظور مطالعه موردی، شبکه شش شینه شکل ۴ با حضور نیروگاه بادی ۲۰ مگاواتی در شین شماره شش در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به واحدهای تولید و خطوط در جداول پیوست آمده است. برنامه‌های بار پاسخگو و بار جابه‌جاپذیر در شین‌هایی که بار دارند در دسترس است. در این شبکه ذخیره‌ساز انرژی در شین شش که نیروگاه بادی در آن حضور دارد نصب شده است.

۱۴	۷/۲۸	۱۰	۶۹/۵۲	۱۶۶/۶۷
۱۵	۷/۱۲	۱۰	۷۵/۰۴	۱۶۶/۶۷
۱۶	۷/۴۳	۱۰	۸۱/۸۰	۱۶۶/۶۷
۱۷	۶/۸۵	۱۰	۸۲/۶۰	۱۶۶/۶۷
۱۸	۶/۰۴	۱۰	۷۳/۹۷	۱۶۶/۶۷
۱۹	۶/۶۴	۱۰	۷۲/۵۸	۱۶۶/۶۷
۲۰	۸/۰۲	۱۰	۶۲/۴۱	۱۶۶/۶۷
۲۱	۸/۴۴	۱۰	۶۱/۹۴	۱۶۶/۶۷
۲۲	۹/۱۱	۱۰	۵۰/۹۰	۱۶۶/۶۷
۲۳	۱۰/۶۸	۱۰	۲۲/۷۲	۱۶۶/۶۷
۲۴	۱۱/۶۸	۱۰	۱۷/۳۴	۱۶۶/۶۷

هزینه تولید برنامه‌ریزی شده واحدهای حرارتی، هزینه رزروهای چرخان، تنظیم، قطع غیرداوطلبانه بار و هزینه بارهای پاسخ‌گو در جدول ۷ برای تمام حالت‌ها به تفکیک آمده‌است.

جدول ۵- توزیع انرژی براساس برنامه‌ریزی حالت ۴ (MW)

ساعت	DRR	$Pch_{ext}(+)$ $Pdis_{ext}(-)$	W	i3	i2	i1
۱	۷/۲	۱/۴۹	۱۱/۸۲	۸/۳۳	۱۰	۱۵۵/۰۳
۲	۵/۴	۱/۸	۱۱/۴	۸/۳۸	۰	۱۵۵/۴۷
۳	۳/۶	۲/۰۰	۱۰/۵۱	۷/۲۷	۰	۱۵۷/۲
۴	۳/۶	۵/۲۵	۹/۷	۸/۹۱	۰	۱۵۲/۹۴
۵	۳/۶	۱/۹۹	۹/۴۹	۸/۹۳	۰	۱۵۵/۶۱
۶	۵/۴	۱/۲۰	۹/۱۸	۹/۶۹	۰	۱۵۴/۲۷
۷	۳/۶	۰/۰۲	۷/۹۵	۱۰	۰	۱۶۳/۹۱
۸	۹	-۵/۳۴	۷/۳۰	۱۰	۱۰	۱۶۶/۶۷
۹	۱۶/۲	-۳/۶۲	۷/۷۰	۱۰	۲۶/۶۸	۱۶۶/۶۷
۱۰	۱۶/۲	۷/۳۸	۷/۷۵	۱۰	۴۹/۵۱	۱۶۶/۶۷
۱۱	۱۶/۲	-۲/۱۱	۷/۷۹	۱۰	۵۱/۶۲	۱۶۶/۶۷
۱۲	۱۶/۲	-۵/۸۷	۷/۶۶	۱۰	۵۵/۶۱	۱۶۶/۶۷
۱۳	۱۶/۲	-۲/۸۲	۷/۶۱	۱۰	۶۴/۹۴	۱۶۶/۶۷
۱۴	۱۶/۲	۶/۰۴	۷/۲۸	۱۰	۷۵/۵۶	۱۶۶/۶۷
۱۵	۱۶/۲	-۵/۸۰	۷/۱۲	۱۰	۶۳/۰۹	۱۶۶/۶۷
۱۶	۱۶/۲	-۳/۴۹	۷/۴۳	۱۰	۷۸/۳۱	۱۶۶/۶۷
۱۷	۱۶/۲	۲/۱۵	۶/۸۵	۱۰	۸۱/۱۳	۱۶۶/۶۷
۱۸	۱۶/۲	۲/۰۹	۶/۰۴	۱۰	۷۲/۷۰	۱۶۶/۶۷
۱۹	۱۶/۲	-۴/۲۴	۶/۶۴	۱۰	۶۵/۸۶	۱۶۶/۶۷
۲۰	۱۶/۲	-۵/۵۸	۸/۰۲	۱۰	۶۵/۸۹	۱۶۶/۶۷
۲۱	۱۶/۲	۱/۶۷	۸/۴۴	۱۰	۶۳/۶۱	۱۶۶/۶۷
۲۲	۱۶/۲	-۹/۲۰	۹/۱۱	۱۰	۴۱/۶۹	۱۶۶/۶۷
۲۳	۱۶/۲	۰/۶۷	۱۰/۶۸	۱۰	۲۳/۳۳	۱۶۶/۶۷
۲۴	۱۴/۴	-۰/۶۱	۱۱/۶۸	۱۰	۱۶/۶۷	۱۶۶/۶۷

جدول ۶- مقدار بار جابه‌جا شده در حالت‌های سوم و چهارم (MW)

انتقال	حالت ۳			حالت ۴		
	باس ۳	باس ۴	باس ۵	باس ۳	باس ۴	باس ۵
$SL_j^{17,4}$	۲/۸۴	۶/۳۰	۱۰/۳۹	۰/۵۱	۱/۴۱	۱/۷
$SL_j^{16,5}$	۲/۴۲	۴/۷۷	۱۰	۰/۸۴	۱/۷۶	۳/۰۱
$SL_j^{15,3}$	۲/۳۸	۵/۶۲	۹/۱۲	۰/۹۸	۲/۲۴	۲/۹۲
$SL_j^{18,4}$	۲/۰۲	۵/۷۲	۹/۳۶	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۱۴
$SL_j^{19,6}$	۲/۵	۶/۶۷	۸/۸۸	۰/۳۶	۰/۵	۱/۶۱

می‌شود تا از رزروهای تنظیم و چرخان افزایشی و کاهش‌ی گران استفاده نشود تخصیص انرژی واحدهای تولیدی در این حالت در جدول ۴ آورده شده است.

۴-۲- حالت دوم

در این حالت برنامه پاسخ‌گویی بار به‌عنوان ذخیره چرخان وارد برنامه‌ریزی بازار روز پیش‌رو تولید و ذخیره می‌شود. هزینه کل بهره‌برداری در این حالت برابر با ۱۶۸۴۳۷/۶ دلار می‌شود که در مقایسه با حالت اول ۱/۱۱ درصد صرفه‌جویی در هزینه داشته است. در این حالت کاهش توان بادی ۱۰/۲ مگاوات است که نشان می‌دهد برنامه پاسخ‌گویی بار خدمات جانبی در حد ناچیزی از کاهش توان بادی جلوگیری کرده است.

۴-۳- حالت سوم

در این حالت بار قابل انتقال نیز در برنامه‌ریزی شرکت می‌کند. هزینه کل در این حالت برابر ۱۶۷۷۴۰/۵ دلار می‌شود که نسبت به حالت اول ۱/۵۲ درصد در هزینه‌ها صرفه‌جویی شده است. کاهش توان بادی در این حالت بسیار کم و تنها در سناریوی دهم و به میزان ۰/۸۴ مگاوات است. زیرا به‌کارگیری بارهای قابل انتقال باعث می‌شود ساعت‌های کم‌باری کم‌تری ایجاد شده و نیازی به کاهش توان بادی در این ساعت‌ها وجود نداشته باشد.

۴-۴- حالت چهارم

در این حالت حضور واحد ذخیره‌ساز انرژی نیز در نظر گرفته شده است که با حداقل انرژی خود در ابتدای دوره برنامه‌ریزی حضور دارد. در این حالت هزینه کل بهره‌برداری برابر ۱۶۶۷۳۵/۴ دلار است که در مقایسه با حالت اول حدود ۲/۱۱ درصد کاهش یافته است. در این حالت قطع توان بادی صورت نگرفته است. همچنین در جدول ۵ مقدار توان برنامه‌ریزی شده واحدهای نیروگاهی، برنامه پاسخ‌گویی بار و توان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی مشاهده می‌شود. همچنین جدول ۶ مقدار برنامه‌ریزی شده برای جابه‌جایی بار در حالت‌های سوم و چهارم را نشان می‌دهد.

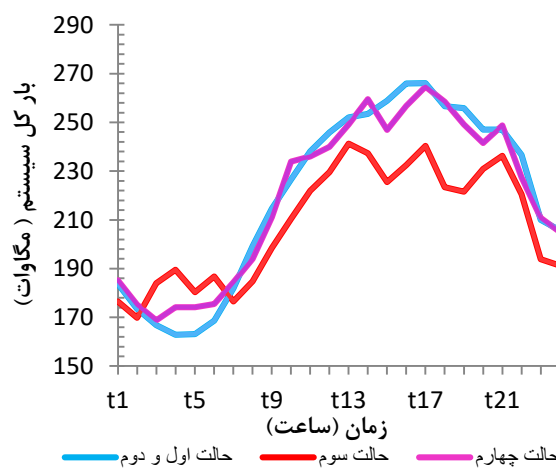
جدول ۴- توزیع انرژی براساس برنامه‌ریزی حالت ۱ (MW)

ساعت	W	i3	i2	i1
۱	۱۱/۸۲	۶/۶۷	۱۰	۱۵۵/۲۱
۲	۱۱/۴	۶/۶۷	۰	۱۵۵/۳۸
۳	۱۰/۵۱	۲/۰۵	۰	۱۵۴/۲۷
۴	۹/۷	۱/۶۷	۰	۱۵۱/۴۶
۵	۹/۴۹	۱/۶۷	۰	۱۵۲/۰۱
۶	۹/۱۸	۵/۰۵	۰	۱۵۴/۴۵
۷	۷/۹۵	۶/۶۷	۱۰	۱۵۷/۲۴
۸	۷/۳۰	۱۰	۱۶/۶۷	۱۶۵/۲۴
۹	۷/۷۰	۱۰	۳۰/۳۰	۱۶۶/۶۷
۱۰	۷/۷۵	۱۰	۴۲/۱۳	۱۶۶/۶۷
۱۱	۷/۷۹	۱۰	۵۳/۷۲	۱۶۶/۶۷
۱۲	۷/۶۶	۱۰	۶۱/۴۹	۱۶۶/۶۷
۱۳	۷/۶۱	۱۰	۶۷/۷۵	۱۶۶/۶۷

جدول ۷- هزینه برنامه‌ریزی در چهار حالت (\$)

حالت‌های مورد بررسی	هزینه تولید و راه‌اندازی	هزینه رزروهای تنظیم و چرخان	هزینه قطع بار غیرداوطلبانه	هزینه رزرو بارهای پاسخ‌گو
حالت ۱	۱۲۵۵۶۸/۰۵	۱۰۰۷۷/۱۰	۴۱۸۴۰/۸۳	۰
حالت ۲	۱۲۵۵۹۵/۸۲	۸۸۵۵/۸۶	۳۶۹۵۶/۱۵	۳۸۸۴/۴
حالت ۳	۱۲۵۵۸۹	۸۷۴۷/۲۸	۳۶۹۰۵/۹۵	۳۸۳۷/۶
حالت ۴	۱۲۳۹۶۹/۶۶	۸۴۰۰/۴۳	۳۳۶۲۸/۰۴	۳۹۵۴/۶

در شکل ۵ مقدار کل بار مصرفی در هر چهار حالت مشاهده می‌شود. در این شکل اثر برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا و همچنین ذخیره‌ساز انرژی بر بار کل نشان داده شده است. مشاهده می‌شود حالت سوم برای تغییر الگوی بار مناسب‌تر است و باعث کاهش بهتر پیک بار در ساعت‌های اوج مصرف و همچنین نزدیک شدن حداکثر و حداقل مصرف به یکدیگر و در نتیجه بهبود ضریب بار می‌شود.



شکل ۵- بار کل شبکه در هر چهار حالت

۵- مطالعات حساسیت

در این بخش به مطالعه حساسیت بر روی برنامه‌های مختلف مورد استفاده توسط بهره‌بردار سیستم پرداخته می‌شود تا مقدار بهینه هریک از برنامه‌ها در حالت چهارم مشخص شود.

۵-۱- تعیین مقدار بهینه ساعت‌های کم باری

در این قسمت مقدار بارهای جابه‌جاپذیر برای زمان‌های کم‌باری مورد بررسی قرار می‌گیرد به‌طوری‌که در یکی از پیشنهادها جابه‌جایی بار، ساعت پیشنهادی که بار به آن انتقال می‌یابد از ساعت اول تا ساعت ششم تغییر می‌یابد و سایر پیشنهادها جابه‌جایی بار، ثابت می‌مانند. این کار به ترتیب برای پیشنهادها مختلف متناظر با سطرهای جدول ۳ انجام می‌شود تا مشخص شود که جابه‌جایی در چه زمان‌هایی موجب بیش‌ترین کاهش هزینه بهره‌برداری می‌شود. شکل ۶ نتیجه این بررسی را نشان می‌دهد.

۵-۲- تعیین مقدار بهینه توان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی

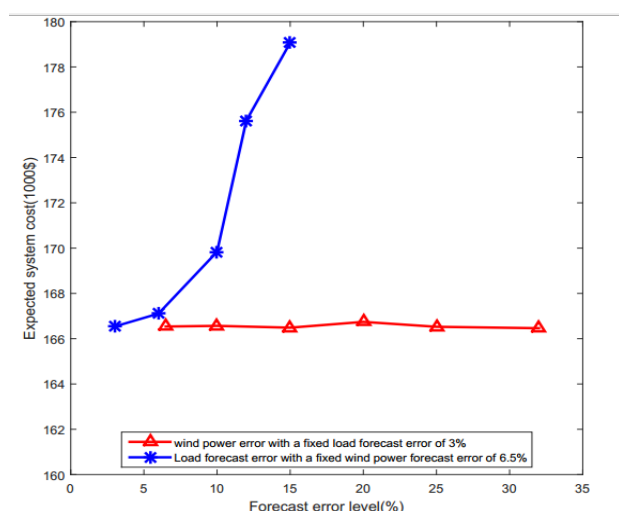
از آن‌جاکه ذخیره‌ساز انرژی قابلیت این را دارد که به‌سرعت وارد مدار شود لذا به‌کارگیری این تکنولوژی در شبکه‌های قدرت به‌منظور جلوگیری از هزینه‌های قابل توجه قطع بار در مواقع خروج تجهیزات شبکه قدرت می‌تواند مفید واقع شود. لذا در این بخش تحلیل حساسیت کل هزینه شبکه و هزینه قطع بار نسبت به حداکثر نرخ شارژ و دشارژ و ظرفیت انرژی ذخیره‌ساز انرژی انجام می‌شود. این تحلیل به‌صورت سه‌بعدی انجام شده است که در یک بعد آن، ظرفیت ذخیره انرژی تا ۱۰۰ مگاوات ساعت و در بعد دیگر، حداکثر نرخ شارژ و دشارژ از ۰ تا ۱۰۰٪ ظرفیت انرژی ذخیره شده در آن تغییر می‌کند. نتایج در شکل‌های ۷ و ۸ قابل مشاهده است. در شکل ۷ همان‌طور که با خطوط خط‌چین قرمز رنگ مشاهده می‌شود، بهترین حالت ممکن در ظرفیت به‌کارگرفته شده ذخیره‌ساز انرژی ۷۰ مگاوات ساعت و نسبت توان شارژ/دشارژ به ظرفیت انرژی، ۸۰ درصد است. لذا اگر ظرفیت بیش‌تری از این مقدار انتخاب شود تنها سرمایه‌گذاری اضافی انجام گرفته است.

۵-۳- تأثیر خطای پیش‌بینی باد و بار

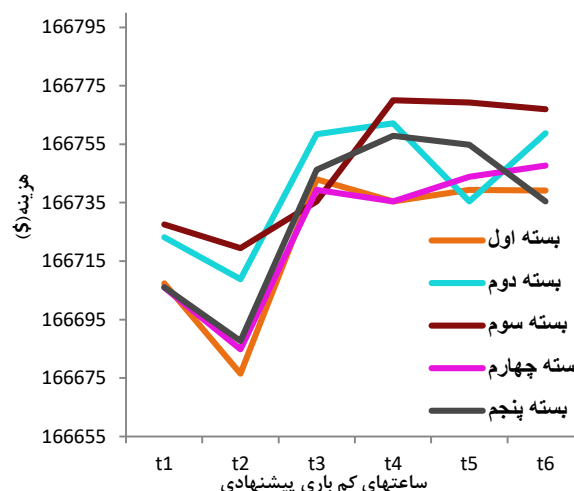
این تحلیل حساسیت به‌منظور بررسی نحوه تأثیر خطای پیش‌بینی باد و بار بر روی هزینه کل بهره‌برداری انجام می‌شود. به‌منظور مقایسه بین اثر خطای پیش‌بینی باد و بار، انحراف استاندارد آن‌ها توسط ظرفیت حداکثر آن‌ها نرمالیزه می‌شود. ابتدا انحراف استاندارد خطای پیش‌بینی بار در ۳ درصد ثابت می‌ماند و خطای پیش‌بینی باد از ۶/۵ تا ۳۲ درصد تغییر می‌یابد. آن‌چه مشاهده می‌شود این است که خطای پیش‌بینی باد اثر قابل توجهی بر هزینه مورد انتظار شبکه ندارد زیرا ظرفیت تولید توان بادی در مقایسه با ظرفیت تولید واحدهای حرارتی قابل توجه نیست. سپس با ثابت ماندن خطای پیش‌بینی توان بادی در ۶/۵ درصد، خطای پیش‌بینی بار شبکه از ۳ تا ۱۵ درصد تغییر می‌کند. در این حالت هزینه مورد انتظار شبکه به‌صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. زیرا رزروهای اضافی به‌منظور پاسخ‌گویی به افزایش تغییرات بار شبکه به‌کارگرفته می‌شود. شکل ۹ این وضعیت را نشان می‌دهد.

۵-۴- حداکثر ظرفیت نفوذ توان بادی

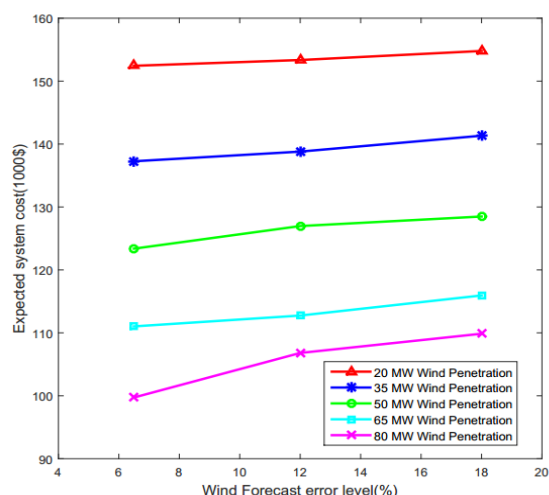
شکل ۱۰ هزینه مورد انتظار شبکه در هر سطح نفوذ توان بادی را در هنگامی‌که انحراف استاندارد بار شبکه، ۳ درصد است نشان می‌دهد. در این‌جا به‌ازای ظرفیت تولید کم برای واحد بادی حساسیت هزینه مورد انتظار شبکه نسبت به خطای پیش‌بینی آن قابل توجه نیست زیرا که رزروها به‌منظور مدیریت عدم قطعیت در توان بادی، کم‌تر مورد نیاز می‌شوند. اما در سطوح بالاتر با افزایش انحراف استاندارد هزینه مورد انتظار شبکه به‌نسبت افزایش می‌یابد.



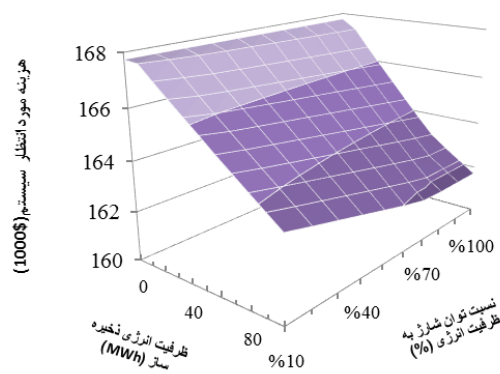
شکل ۹- حساسیت هزینه مورد انتظار شبکه نسبت به سطح خطای پیش‌بینی باد و بار



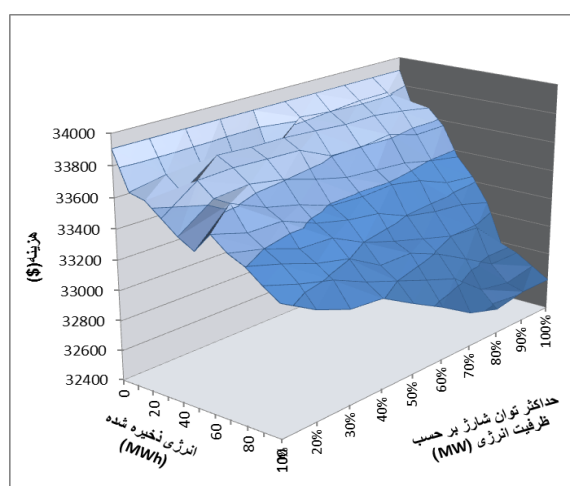
شکل ۶- حساسیت هزینه بهره‌برداری به زمان جابه‌جایی بار



شکل ۱۰- حساسیت هزینه مورد انتظار شبکه نسبت به خطای پیش‌بینی باد در سطوح نفوذ مختلف توان بادی



شکل ۷- حساسیت هزینه سیستم به ظرفیت انرژی و حداکثر نرخ شارژ ذخیره‌ساز



شکل ۸- حساسیت هزینه قطع بار به ظرفیت انرژی و حداکثر نرخ شارژ ذخیره‌ساز

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله تسویه هم‌زمان بازار انرژی و خدمات جانبی با حضور نیروگاه‌های بادی و عدم قطعیت‌های بار و خروج واحدهای نیروگاهی و خطوط به‌وسیله برنامه‌ریزی تصادفی مدل‌سازی شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، استفاده توأم از تکنولوژی‌های متنوع نظیر برنامه‌های مدیریت سمت مصرف شامل پاسخ‌گویی بار و بارهای قابل انتقال و همچنین ذخیره‌ساز انرژی موجب بهره‌برداری کم هزینه‌تر شبکه قدرت می‌شود. ضمن آن‌که امنیت شبکه را در برابر عدم قطعیت‌های موجود در شبکه به‌خوبی تأمین می‌نماید و از کاهش توان بادی و یا قطع غیرداوطلبانه بار تا حدی ممانعت به عمل می‌آید. تحلیل حساسیت نشان می‌دهد میزان اثرگذاری ذخیره‌ساز انرژی بر هزینه‌های بهره‌برداری شبکه قدرت به ظرفیت ذخیره‌ساز و توان شارژ

آن بستگی دارد که با انتخاب مناسب آن‌ها می‌توان از صرف هزینه بیش از حد در زمان سرمایه‌گذاری اجتناب کرد.

هم‌چنین تحلیل حساسیت‌های مربوط به خطای پیش‌بینی باد و بار نشان می‌دهد که هزینه مورد انتظار شبکه حساسیت بیش‌تری به خطای پیش‌بینی بار دارد. هزینه شبکه با بالا رفتن ظرفیت توان واحد بادی کاهش می‌یابد. البته با افزایش انحراف استاندارد خطای پیش‌بینی باد در ظرفیت‌های بالای توان بادی، هزینه شبکه قدرت افزایش قابل توجهی می‌یابد.

پیوست‌ها

جداول ۸ تا ۱۰ به‌ترتیب اطلاعات شبکه قدرت و واحدهای تولیدی حرارتی و مقادیر توان باد و بار در سناریوها را نشان می‌دهند.

جدول ۸- اطلاعات خطوط انتقال

شماره خط	از بآس	به بآس	راکتانس خط (p.u.)	ظرفیت خط (MW)
۱	۱	۲	۰/۱۷۰	۲۰۰
۲	۱	۴	۰/۲۵۸	۱۵۰
۳	۲	۴	۰/۱۹۷	۱۵۰
۴	۵	۶	۰/۱۴۰	۱۰۰
۵	۲	۳	۰/۰۳۷	۱۳۵
۶	۴	۵	۰/۰۳۷	۱۲۰
۷	۳	۶	۰/۰۱۸	۱۰۰

جدول ۱۰- مقادیر پیش‌بینی شده و سناریوهای توان مزرعه بادی و بار مصرفی ($P_{d_{net}} - P_{\phi,wt}$)

سناریو ساعت	حالت پایه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱	۱۸۲/۷-۱۱/۸	۱۷۸/۷-۱۱/۷	۱۸۲/۵-۱۱/۵	۱۷۹/۴-۱۲/۷	۱۸۸/۳-۱۱/۴	۱۸۷-۱۲/۴	۱۸۲/۹-۱۲/۴	۱۸۲/۳-۱۲/۵	۱۸۲/۱-۱۱/۶	۱۸۲/۱-۱۱/۶	۱۷۷/۵-۱۲/۴
۲	۱۷۳/۴-۱۱/۴	۱۶۶/۴-۱۱/۴	۱۶۹-۱۰/۹	۱۷۴-۱۲	۱۷۵/۴-۱۱/۳	۱۶۷/۲-۱۱/۹	۱۷۵/۸-۱۱	۱۷۳/۱-۱۲/۱	۱۸۲/۷-۱۲/۱	۱۷۳/۴-۱۱/۲	۱۷۶/۷-۱۱/۹
۳	۱۶۶/۸-۱۰/۵	۱۶۶/۷-۱۰/۶	۱۶۶/۴-۹/۷	۱۶۶/۱-۱۰/۸	۱۵۹-۱۰/۵	۱۷۲/۷-۱۱	۱۶۴-۹/۹	۱۶۳/۵-۱۱/۳	۱۶۶/۲-۱۱	۱۶۰/۱-۱۰/۳	۱۷۲/۳-۱۰/۸
۴	۱۶۲/۸-۹/۷	۱۶۸/۶-۹/۷	۱۶۷/۲-۹/۲	۱۶۶/۵-۱۰	۱۶۸/۱-۹/۶	۱۶۰/۷-۹/۸	۱۶۳/۸-۹/۱	۱۵۷/۶-۱۰/۵	۱۶۲/۴-۱۰	۱۵۵/۴-۹/۶	۱۶۲/۸-۱۰
۵	۱۶۳/۱-۹/۵	۱۷۱/۴-۹/۹	۱۶۵-۹/۶	۱۶۹/۳-۹/۶	۱۶۰-۹/۳	۱۶۹/۶-۹/۵	۱۵۸/۲-۹/۱	۱۶۳/۸-۹/۹	۱۶۱/۲-۹/۸	۱۶۴/۳-۹/۷	۱۶۸/۹-۹/۹
۶	۱۶۸/۷-۹/۵	۱۶۹/۱-۹/۸	۱۷۳/۴-۹/۴	۱۶۷/۹-۹/۳	۱۷۲/۹-۹/۱	۱۷۰/۷-۹/۳	۱۶۸/۹-۸/۷	۱۶۵/۶-۹/۳	۱۷۲/۹-۹/۱	۱۷۰/۴-۹/۴	۱۶۳/۸-۹/۷
۷	۱۸۱/۸-۷/۹	۱۷۷/۷-۸/۶	۱۸۰/۹-۸/۴	۱۷۴/۴-۷/۸	۱۸۰/۳-۷/۹	۱۸۳/۴-۸/۱	۱۹۱/۹-۷/۲	۱۸۱/۳-۷/۶	۱۸۲/۳-۷/۵	۱۸۲/۴-۸/۵	۱۷۶/۵-۸/۴
۸	۱۹۹/۲-۷/۳	۱۹۵/۹-۸/۲	۱۹۵/۹-۷/۶	۱۹۷/۹-۶/۷	۲۰۰/۸-۷/۶	۱۹۶/۹-۷/۴	۱۹۹/۱-۶/۶	۱۹۶/۷-۶/۵	۱۹۹/۶-۶/۷	۲۰۰/۹-۷/۸	۲۰۳/۷-۷/۷
۹	۲۱۴/۶-۷/۷	۲۱۸/۴-۸/۶	۲۱۲/۷-۸	۲۱۶/۷-۶/۹	۲۱۱/۴-۷/۷	۲۰۷/۵-۸	۲۰۹/۵-۶/۷	۲۲۱/۴-۶/۵	۲۲۱/۹-۶/۹	۲۱۸/۵-۸/۴	۲۱۴/۴-۸/۴
۱۰	۲۲۶/۵-۷/۷	۲۲۶-۸/۷	۲۲۴/۶-۸/۲	۲۲۷/۹-۶/۶	۲۲۸/۷-۷/۳	۲۲۹/۴-۸/۲	۲۲۴/۳-۷/۲	۲۲۴-۶/۴	۲۳۰/۸-۷/۴	۲۲۸/۷-۸/۳	۲۲۰/۴-۸/۷
۱۱	۲۳۸/۱-۷/۸	۲۴۲/۹-۸/۳	۲۴۲-۸/۵	۲۴۳/۸-۶/۸	۲۴۵/۹-۷/۴	۲۳۵/۱-۸/۷	۲۳۹/۴-۷/۳	۲۴۵/۲-۶/۹	۲۳۳/۴-۷/۶	۲۳۹/۴-۸	۲۴۴/۶-۸/۸
۱۲	۲۴۵/۸-۷/۶	۲۴۴/۲-۷/۷	۲۴۷/۲-۷/۸	۲۴۵/۵-۶/۶	۲۴۷/۲-۷/۴	۲۳۹/۷-۹/۳	۲۴۵/۵-۶/۸	۲۴۶/۵-۷/۵	۲۴۵/۸-۷/۵	۲۴۵/۸-۷/۵	۲۳۹/۸-۸/۷
۱۳	۲۵۲-۷/۶	۲۵۷/۳-۸	۲۵۳/۳-۷/۵	۲۵۰/۱-۶/۸	۲۵۶/۸-۷	۲۴۸/۸-۹/۴	۲۵۶-۶/۵	۲۴۶/۸-۸	۲۴۹-۷/۲	۲۵۱/۹-۷/۴	۲۵۷/۷-۹
۱۴	۲۵۳/۴-۷/۳	۲۵۲-۷/۵	۲۵۲/۵-۷/۳	۲۵۲/۹-۶/۷	۲۵۱/۲-۶/۱	۲۵۸/۱-۸/۸	۲۵۵/۶-۶/۳	۲۵۷/۱-۷/۹	۲۵۵/۹-۶/۸	۲۴۴-۶/۸	۲۵۲-۹
۱۵	۲۵۸/۸-۷/۱	۲۵۳-۶/۵	۲۵۵/۳-۶/۹	۲۵۴/۹-۶/۷	۲۴۷-۵/۸	۲۵۶/۷-۸/۷	۲۵۵/۳-۶/۴	۲۵۶/۷-۷/۸	۲۴۸/۷-۶/۴	۲۶۰-۷/۶	۲۶۶/۱-۸/۴
۱۶	۲۶۵/۹-۷/۴	۲۵۶/۶-۶/۶	۲۶۶/۱-۷/۳	۲۶۳/۵-۷/۸	۲۷۲/۵-۶/۵	۲۶۶/۱-۹/۴	۲۵۸/۷-۶/۹	۲۷۰/۹-۸/۲	۲۶۰/۲-۶/۸	۲۷۴/۵-۸/۴	۲۵۳/۵-۸/۱
۱۷	۲۶۶/۱-۶/۸	۲۷۷/۵-۵/۹	۲۶۷/۱-۶/۶	۲۶۳/۵-۷/۳	۲۶۴-۶	۲۷۶/۷-۸/۵	۲۷۰-۶/۵	۲۶۶/۸-۷/۶	۲۵۸/۴-۷/۵	۲۶۸-۷/۷	۲۶۳/۷-۸/۱
۱۸	۲۵۶/۷-۶	۲۵۳/۶-۶/۱	۲۵۳/۶-۶/۱	۲۵۲/۹-۶/۳	۲۵۱/۸-۶	۲۶۲/۹-۶/۹	۲۶۲/۷-۵/۴	۲۵۴/۹-۶/۲	۲۵۶/۵-۵/۳	۲۶۶/۵-۷/۴	۲۵۳/۹-۵/۴
۱۹	۲۵۵/۹-۶/۶	۲۵۵-۶/۲	۲۵۳/۱-۶/۴	۲۵۶/۵-۶/۸	۲۵۶/۵-۶/۷	۲۵۳/۳-۷/۳	۲۴۵/۵-۶/۱	۲۵۳/۶-۶/۷	۲۴۶-۵/۴	۲۵۷/۸-۸/۲	۲۵۵/۱-۵/۷
۲۰	۲۴۷/۱-۸	۲۴۷/۵-۷/۵	۲۴۸-۸	۲۴۸/۲-۸/۲	۲۴۸/۷-۸/۸	۲۴۶/۷-۷/۹	۲۴۸/۱-۸/۱	۲۴۸/۱-۸/۱	۲۳۹/۹-۷	۲۴۳/۲-۹/۳	۲۴۰/۶-۶/۷
۲۱	۲۴۷-۸/۴	۲۴۷/۵-۷/۵	۲۴۸/۷-۸/۷	۲۴۳-۸/۲	۲۴۵/۴-۸/۱	۲۴۰/۹-۹	۲۴۷-۸/۹	۲۴۷/۶-۸/۷	۲۴۷/۵-۷/۶	۲۳۷/۶-۹/۳	۲۴۳-۶/۷
۲۲	۲۳۶/۷-۹/۱	۲۳۶/۹-۷/۶	۲۳۶/۹-۹/۷	۲۳۶-۸/۶	۲۳۸/۶-۸/۶	۲۳۵/۵-۱۰	۲۳۸/۸-۱۰	۲۳۶/۴-۸/۷	۲۳۸/۵-۸/۵	۲۳۷/۱-۹/۲	۲۳۶/۶-۹/۹
۲۳	۲۱۰-۱۰/۷	۲۲۲/۴-۹/۱	۲۱۰/۴-۱۱/۱	۲۰۲/۳-۱۰/۶	۲۱۲/۷-۱۰/۵	۲۰۶/۵-۱۱/۱	۲۱۳/۸-۱۱/۴	۲۱۰/۴-۹/۷	۲۰۲/۱-۱۰/۵	۲۱۴/۴-۱۰/۴	۲۱۲/۴-۸/۳
۲۴	۲۰۵/۷-۱۱/۷	۲۰۲/۴-۱۰/۲	۲۰۸/۴-۱۲	۲۰۵/۸-۱۱/۸	۲۰۸/۳-۱۱/۸	۱۹۴/۵-۱۱/۹	۲۰۸/۴-۱۲/۳	۲۰۷/۹-۱۰/۶	۲۰۷-۱۲/۳	۱۹۸/۱-۱۰/۷	۲۰۸/۶-۱۰/۳

علائم و اختصارها

شاخص‌ها

ρ_s : احتمال وقوع سناریوی s	q و t : شاخص دوره زمانی (ساعت)
$VOLL_n$: هزینه قطع بار غیرداوطلبانه در باس n (\$/MWh)	r : شاخص بارهای پاسخ‌گوی تأمین‌کننده رزرو
$FRRE_{s,e}$: هزینه شارژ/دشارژ ذخیره‌ساز e در سناریوی s (\$/MW).	k : شاخص بسته‌های پیشنهادی تأمین رزرو توسط بارهای پاسخ‌گو
P_{nt0} : تقاضای توان در شین n در زمان t (MW)	s : شاخص سناریوها
P_{nts} : تقاضای توان در شین n در زمان t و سناریوی s (MW)	z : شاخص بار قابل انتقال
$P_{max,i}$: حداکثر توان تولیدی واحد i (MW)	e : شاخص ذخیره‌ساز انرژی
$P_{min,i}$: حداقل توان تولیدی واحد i (MW)	w : شاخص واحد بادی
$RR_{max,i}$: حداکثر ظرفیت رزرو تنظیم واحد i (MW)	i : شاخص واحد تولید حرارتی
$SR_{max,i}$: حداکثر ظرفیت رزرو چرخان واحد i (MW)	n : شاخص شین‌های شبکه
$DRR_{max,r}$: حداکثر بار قابل کاهش توسط بار پاسخ‌گوی r (MW)	L : شاخص خط انتقال
$P_{\phi,w,t0}$: توان پیش‌بینی‌شده واحد بادی w در زمان t (MW).	
γ : حداکثر توان قابل انتقال توسط بارها در برنامه جابه‌جایی بار (/).	
UR_i : حداکثر میزان افزایش تولید واحد i در هر ساعت (MW)	
DR_i : حداکثر میزان کاهش تولید واحد i در هر ساعت (MW)	
UT_i : حداقل زمان روشن بودن واحد i (ساعت)	
DT_i : حداقل زمان خاموش بودن واحد i (ساعت).	
B_L : سوسپتانس خط L (p.u.)	
$f_{max,L}$: حداکثر توان قابل انتقال از خط L (MW)	
θ_{max} : حداکثر زاویه ولتاژ شین‌ها (رادیان)	
$P_{\phi,w,t}$: توان پیش‌بینی‌شده واحد بادی w در زمان t و سناریو s (MW)	
$LC_{max,n}$: حداکثر توان قابل قطع (غیرداوطلبانه) در شین n (MW)	
ψ_{is} : پارامتر باینری که صفر بودن آن نشان‌دهنده خروج واحد i در سناریوی s است.	
ψ_{Ls} : پارامتر باینری که صفر بودن آن نشان‌دهنده خروج خط L در سناریوی s است.	

پارامترها

cc_{rt}^k : قیمت نقطه k از پیشنهاد بار پاسخ‌گوی r (\$/MW).	
q_r^k : مقدار رزرو متناظر با نقطه k از پیشنهاد بار پاسخ‌گوی r (MW).	
ec_{rt}^k : هزینه به‌کارگیری رزرو متناظر با نقطه k از پیشنهاد بار پاسخ‌گوی r در زمان t و سناریوی s (\$/MWh).	
NQ_r : تعداد نقاط پیشنهادی برای تأمین رزرو توسط بار پاسخ‌گوی r	
IP^{t,t_2} : قیمت انتقال بار از ساعت t به ساعت t_2 (\$/MW)	
η_c : بازده شارژ ذخیره‌ساز e	
η_d : بازده دشارژ ذخیره‌ساز e	
$E_{min,e}$: حداقل انرژی قابل ذخیره در ذخیره‌ساز e (hMW)	
$E_{max,e}$: حداکثر انرژی قابل ذخیره در ذخیره‌ساز e (hMW)	
$Pch_{max,e}$: حداکثر نرخ شارژ ذخیره‌ساز e (MW)	
$Pdis_{max,e}$: حداکثر نرخ دشارژ ذخیره‌ساز e (MW)	
P_{Dtw} : توان پیش‌بینی شده باد (MW).	
$\sigma_{w,t}$: انحراف استاندارد خطای پیش‌بینی باد در زمان t	
T : دوره برنامه‌ریزی معادل با ۲۴ ساعت	
Ng : تعداد واحدهای حرارتی	
NDR : تعداد شرکت‌کنندگان در برنامه پاسخ‌گویی بار	
Nsl : تعداد شرکت‌کنندگان در برنامه جابه‌جایی بار	
Nw : تعداد مزارع بادی شبکه	
Ne : تعداد ذخیره‌سازهای انرژی	
Ns : تعداد سناریوها	
Nb : تعداد شین‌ها	
$C_{g,i}$: هزینه تولید انرژی توسط واحد i (\$/MWh)	
$C_{RR,i}$: هزینه تأمین رزرو تنظیم توسط واحد i (\$/MW)	
$C_{SR,i}$: هزینه تأمین رزرو چرخان توسط واحد i (\$/MW)	
$C_{curt,wt}$: هزینه قطع هر مگاوات ساعت توان بادی واحد w (\$/MWh)	
Fch_e : هزینه شارژ واحد ذخیره‌ساز e (\$/MW)	
$Fdis_e$: هزینه دشارژ واحد ذخیره‌ساز e (\$/MW)	

متغیرها

DRR_{rt} : رزرو تأمین شده توسط بار پاسخ‌گوی r در زمان t (MW)	
DRR_{rts} : رزرو استفاده شده بار r در زمان t و سناریوی s (MW)	
$C_{DRR,rt}$: هزینه تأمین رزرو از بار پاسخ‌گوی r در زمان t (\$/MW)	
$C_{EDRR,rt}$: هزینه به‌کارگیری رزرو بار r در زمان t و سناریو s (\$/MW)	
u_{rt}^k : متغیر باینری که یک بودن آن به معنی خرید پله k ام از رزرو از بار پاسخ‌گو r در زمان t است.	
u_{rts}^k : متغیر باینری که یک بودن آن به معنی استفاده از پله k ام از رزرو بار پاسخ‌گوی r در زمان t و سناریوی s است.	
SL_{j0}^{t,t_2} : مقدار بار قابل انتقال مصرف‌کننده j از ساعت t به ساعت t_2 در حالت پایه (MW)	
SL_{js}^{t,t_2} : مقدار بار قابل انتقال مصرف‌کننده j از ساعت t به ساعت t_2 در سناریوی s (MW)	
CSL_{j0}^{t,t_2} : هزینه انتقال بار مصرف‌کننده j از ساعت t به ساعت t_2 در حالت پایه (\$/MW)	

- [۳] حسین شکری، سجاد نجفی روادانق، «حل مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۱، صفحه ۲۹-۴۲، بهار ۱۳۹۴.
- [4] J. Wu, B. Zhang, W. Deng and K. Zhang. "Application of cost-cvar model in determining optimal spinning reserve for wind power penetrated system," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 66, pp. 110-115, 2015.
- [۵] سعید صبوری، رسول کاظم‌زاده، هدایت صبوری، «ارزیابی میزان ریسک‌پذیری بهره‌بردار ناشی از عدم قطعیت منابع بادی و بار در مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای حرارتی با استفاده از شاخص ارزش در خطر شرطی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۲، صفحه ۱۳۵-۱۴۸، تبریز، تابستان ۱۳۹۵.
- [6] B. Wang, D. F. Gayme, X. Liu and C. Yuan. "Optimal siting and sizing of demand response in a transmission constrained system with high wind penetration," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 68, pp. 71-80, 2015.
- [7] M. Nikzad and B. Mozafari. "Reliability assessment of incentive-and priced-based demand response programs in restructured power systems," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 56, pp. 83-96, 2014.
- [8] N. G. Paterakis, O. Erdinc, A. G. Bakirtzis and J. P. S. Catalão. "Load-following reserves procurement considering flexible demand-side resources under high wind power penetration," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 3, pp. 1337-1350, 2015.
- [9] E. Heydarian-Forushani, M. E. H. Golshan, M. Shafie-khah and J. P. S. Catalão. "Optimal coordination of battery energy storages and demand response programs with application to wind integration," IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), pp. 1-6, Oshawa, Canada, 2015.
- [10] N. Li, C. Uçkun, E. M. Constantinescu, J. R. Birge, K. W. Hedman and A. Botterud. "Flexible operation of batteries in power system scheduling with renewable energy," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 2, pp. 685-696, 2016.
- [11] C. Sahin, M. Shahidehpour and I. Erkmén, "Allocation of hourly reserve versus demand response for security-constrained scheduling of stochastic wind energy," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 4, pp. 219-228, 2013.
- [12] T. Das, V. Krishnan and J. D. McCalley. "Assessing the benefits and economics of bulk energy storage technologies in the power grid," Applied Energy, vol. 139, pp. 104-118, 2015.
- [13] M. A. Ortega-Vazquez and D. S. Kirschen, "Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration," IEEE Transaction on Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 24-33, 2009.
- [14] A. J. Conejo, M. Carrión and J. M. Morales, *Decision Making under Uncertainty in Electricity Markets*, Springer, New York, 2010.
- [15] S. Talari, M. R. Haghifam and A. Akhavein. "Optimization of the microgrid scheduling with considering contingencies in an uncertainty environment," International Journal of Smart Electrical Engineering, vol. 2, no. 2, pp. 95-101, 2013.
- CSL_{js}^{t,t2}: هزینه انتقال بار مصرف‌کننده j از ساعت t به ساعت t_2 در سناریوی s (\$/MW)
- $SE_{e,t}$: انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز e در زمان t (MWh)
- $SE_{e,t,s}$: انرژی ذخیره‌ساز e در زمان t و سناریوی s (MWh)
- $Pch_{e,t}$: توان شارژ ذخیره‌ساز e در زمان t (MW)
- $Pdis_{e,t}$: توان دشارژ ذخیره‌ساز e در زمان t (MW)
- $X_{e,t}^{ch}$: متغیر باینری حالت شارژ ذخیره‌ساز e در زمان t
- $X_{e,t}^{dis}$: متغیر باینری حالت دشارژ ذخیره‌ساز e در زمان t
- P_{it0} : توان تولیدی واحد i در ساعت t (MW)
- $RR_{u,it}$: رزرو تنظیم افزایشی برنامه‌ریزی‌شده واحد i در زمان t (MW)
- $RR_{d,it}$: رزرو تنظیم کاهشی برنامه‌ریزی‌شده واحد i در زمان t (MW)
- $SR_{u,it}$: رزرو چرخان افزایشی برنامه‌ریزی‌شده واحد i در زمان t (MW)
- $SR_{d,it}$: رزرو چرخان کاهشی برنامه‌ریزی‌شده واحد i در زمان t (MW)
- SU_{it} : هزینه راه‌اندازی شدن واحد i در زمان t (\$)
- SD_{it} : هزینه خاموش شدن واحد i در زمان t (\$)
- $P_{curt_{wt0}}$: کاهش توان بادی واحد w در زمان t (MW)
- $P_{curt_{wts}}$: کاهش توان بادی واحد w در زمان t و سناریوی s (MW)
- P_{its} : توان تولیدی واحد i در زمان t و سناریوی s (MW)
- RR_{its} : رزرو تنظیم استفاده‌شده واحد i در زمان t و سناریوی s (MW)
- SR_{its} : رزرو چرخان استفاده‌شده واحد i در زمان t و سناریوی s (MW)
- LC_{nts} : مقدار قطع بار در باس n در زمان t و سناریوی s (MW)
- $f_{L,nm,t0}$: توان خط L از باس n به m در زمان t و حالت پایه (MW)
- $f_{L,nm,ts}$: توان خط L از باس n به m در زمان t و سناریوی s (MW)
- I_{it} : متغیر باینری که یک بودن آن نشان دهنده در مدار قرار گرفتن واحد i در زمان t در حالت پایه است.
- P_{wt0} : توان بادی برنامه‌ریزی‌شده در حالت پایه (MW)
- y_{it} : متغیر باینری راه‌اندازی واحد تولیدی i در زمان t
- z_{it} : متغیر باینری توقف واحد تولیدی i در زمان t
- $\theta_{n,t,0}$: زاویه ولتاژ باس n در حالت پایه در زمان t (رادیان)
- $\theta_{n,t,s}$: زاویه ولتاژ باس n در سناریوی s در زمان t (رادیان)
- P_{wts} : توان بادی در برنامه‌ریزی مرحله دوم (MW)

مراجع

- [1] E. Heydarian-Forushani, M. E. H. Golshan, M. Shafie-khah and J. P. S. Catalão. "Impacts of stochastic demand response resource scheduling on large scale wind power integration," Australian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), pp. 1-6, Wollongong, Australia, 2015.
- [2] Y. Huang, Q. P. Zheng and J. Wang. "Two-stage stochastic unit commitment model including non-generation resources with conditional value-at-risk constraints," Electric Power Systems Research, vol. 116, pp. 427-438, 2014.

- reliability,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, pp. 1052-1063, 2010.
- [18] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li and Y. Ding. “Progress in electrical energy storage system: a critical review,” Progress in Natural Science, vol. 19, no. 3, pp. 291-312, 2009.
- [19] B. Zakeri and S. Syri, “Electrical energy storage systems: a comparative life cycle cost analysis,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 42, pp. 569-596, 2015.
- [16] R. Billinton, S. Kumar, N. Chowdhury, K. Chu, K. Debnath, L. Goel, E. Khan, P. Kos, G. Nourbakhsh and J. Oteng-Adjei. “A reliability test system for educational purposes-basic data,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 4, no. 3, pp. 1238-1244, 1989.
- [17] K. W. Hedman, M. C. Ferris, R. P. O'Neill, E. B. Fisher and S. S. Oren, “Co-optimization of generation unit commitment and transmission switching with n-1

زیر نویس‌ها

^۱ Demand Response

^۲ Harmony Search Algorithm

^۳ Cost-Cvar

^۴ Shiftable Load

^۵ Solver