

زمان بندی تعمیرات واحدهای تولید انرژی در سیستم‌های چندحاملی انرژی

سید نقی حسینی^۱، دانشجو دکتری؛ عبدالرضا شیخ الاسلامی^۲، دانشیار؛ تقی بارفوروشی^۳، استادیار؛ محمد امین لطیفی^۴، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - naghi.hoseini@chmail.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - asheikh@nit.ac.ir

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

۴- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - latify@cc.iut.ac.ir

چکیده: در برنامه‌ریزی میان‌مدت سیستم‌های چندحاملی انرژی، بهره‌بردار نیازمند برنامه‌ی خروج واحدها برای تعمیرات می‌باشد. چالش اساسی این برنامه‌ریزی، وجود منابع تولید هم‌زمان است. این منابع به‌سبب تولید چندحامل انرژی، نقشی کلیدی در برنامه‌ی تولید شبکه‌های انرژی ایفا می‌کنند. در این مقاله، مدلی به‌منظور زمان‌بندی تعمیرات منابع تولید در سیستم‌های چندحاملی انرژی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های میان‌مدت و تأمین قابلیت اطمینان ارائه می‌شود. مدل پیشنهادی شامل یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی است که در سطح بالا، هدف حداقل‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری در میان‌مدت و در سطح پایین، هدف بیشینه‌سازی شاخص قابلیت اطمینان به همراه قیود مربوطه می‌باشد. مدل پیشنهادی بر روی یک سیستم چندحاملی بومی (منطقه ویژه اقتصادی عسلویه) مورد آزمون قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که پنجره‌ی زمانی خروج هماهنگ واحدهای تولید، دارای قابلیت اطمینان بهتری نسبت به برنامه‌های مستقل بوده و چالش‌های برنامه‌ریزی مستقل شبکه‌ها را مرتفع می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های چندحاملی انرژی، منابع تولید هم‌زمان برق، گرما و سرما (CCHP)، زمان‌بندی نگهداشت، شاخص قابلیت اطمینان

Generation Units Maintenance Scheduling in Multi-Carrier Energy System

N. Hosseini¹, PhD student; A. R. Sheikholeslami², Associate Professor; T. Barforoushi³, Assistant Professor; M. A. Latify⁴, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: naghi.hoseini@chmail.ir

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

3- HV substations research group, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: barforoshi@nit.ac.ir

4- Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Email: latify@cc.iut.ac.ir

Abstract: In medium-term planning of multi-carrier energy systems, the operator is required to schedule the outage of units for maintenance. The Main challenging is that there are concurrent resources in the system. These concurrent resources play key role in energy generation networks. In this paper, the scheduled maintenance is done in order to minimize the costs in the medium term while the reliability of multi-carrier systems and supply reliability is preserved. The proposed framework includes a bi-level programming model. The objective of the proposed model in the higher level is to minimize operating costs in the medium term and at the lower level, the objective is to maximize the reliability indices with corresponding constraints. The proposed model is tested on a local Multi-carrier System (Special Economic Zone in Assaluyeh), and the simulation results indicate that coordinated outage window unit, is more reliable than the separated scheduling models and therefore highlights the need to fix the models conventionally utilized by independent programming networks.

Keywords: Multi-carrier energy system (MCES), CCHP & CHP, maintenance scheduling, reliability index.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۳، ۱۳۹۶/۰۶/۲۰ و ۱۳۹۶/۰۸/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۰

نام نویسنده مسئول: دکتر عبدالرضا شیخ‌الاسلامی

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

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر عواملی زیادی از جمله توجه به راندمان مصرف سوخت و افزایش هزینه‌های انرژی، سبب افزایش نصب منابع تولید هم‌زمان در شبکه‌های مختلف انرژی شده است. این رویکرد استفاده از منابع تولید هم‌زمان، سبب توجه ویژه منابع علمی به مسئله برنامه‌ریزی، تولید و توسعه منابع و شبکه‌های چندحاملی شده است. در این میان محققان به مسائل برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و بلندمدت این منابع با توجه به ویژگی چندحاملی آن‌ها توجه خاصی نشان داده‌اند [۳-۱]. چندحاملی بودن منابع سبب می‌گردد تا در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از شبکه، منابع مختلف تولید به صورت یکپارچه مورد بررسی قرار گیرند [۲، ۳]. در حالت کلی اگر فرض بر تک‌حامل بودن یک منبع انرژی باشد، می‌توان آن منبع را با استفاده از مدل‌های موجود، مورد تحلیل قرار داده و برای بهره‌برداری و توسعه آن برنامه‌ریزی نمود [۴].

اکثر تحقیقات انجام‌شده با محوریت شبکه چندحاملی انرژی ($MCES^1$) بر روی بهینه‌سازی طراحی در بلندمدت و بهره‌برداری در کوتاه‌مدت متمرکز [۵، ۶] و به برنامه‌ریزی میان‌مدت این شبکه‌ها کمتر توجه شده است. در این میان تحقیقاتی نظیر مشارکت واحدها [۷]، توزیع اقتصادی [۸، ۹] و پخش بار بهینه [۱۰] از توجه بیشتری برخوردار بوده‌اند. با توجه به اینکه منابع تولید هم‌زمان ($CCHP^2$) نقش مهمی در تولید و ارتباط میان حامل‌های شبکه دارند [۱۱]؛ بررسی مسائل مربوط به برنامه‌ریزی میان‌مدت این منابع با توجه اهمیت تعمیرات آن‌ها، ضرورت می‌یابد.

با توجه به مدل‌های ارائه‌شده در مراجع، اگر منابع تولید هم‌زمان به صورت تولیدکننده یک حامل در نظر گرفته شوند، می‌توان برنامه‌ریزی میان‌مدت برای تعمیرات آن‌ها را انجام داد. در شرایط واقعی منابع تولید هم‌زمان در شبکه‌ی چندحاملی توانایی تولید چندین حامل انرژی (مانند برق، گرما و سرما) را دارا بوده و عملاً مدل‌های موجود کارایی لازم برای تحلیل خروج این منابع برای تعمیرات را ندارند. علت این عدم کارایی مربوط به کاهش قابلیت اطمینان شبکه‌ها به سبب خروج این منابع می‌باشد. به‌عنوان نمونه و با فرض این‌که یک منبع، توانایی تولید دو حامل انرژی را دارا باشد، با توجه به مدل‌های ارائه شده، منبع را باید در برنامه‌ریزی یک حامل و سپس در برنامه‌ریزی حامل بعد شرکت داد. این امر به‌گونه‌ای می‌باشد که ممکن است در برنامه‌ی حامل اول واحد تولید خاموش شده، ولی در همان مقطع زمانی در برنامه حامل دوم منبع بنا به نیاز، در بیشینه توان خود قرار گیرد. بر این اساس می‌توان انتظار داشت هنگامی که یک منبع، چندحامل انرژی مختلف را تولید می‌نماید، رفتار آن تابعی از ترکیب رفتار منابع موجود برای تولید هر حامل می‌باشد. در نتیجه اگر بهره‌بردار بخواهد مانند شرایط تک‌حاملی از این منابع بهره‌برداری نماید، بهره‌برداری غیربهینه و در برخی از موارد نشدنی (مانند خاموش شدن در یک برنامه و روشن بودن در برنامه دیگر) خواهد بود.

در زمینه‌ی برنامه‌ریزی میان‌مدت، تمرکز مراجع بر روی هماهنگی و برنامه‌ریزی نگهداشت واحدها می‌باشد. در بسیاری از این مراجع، مسئله هماهنگی واحدهای تولید برق به‌عنوان چالش اصلی مد نظر قرار گرفته است [۱۲] و نیز تأمین قابلیت اطمینان و رزرو [۱۳، ۱۴] و یا کاهش هزینه [۱۵، ۱۶] به‌عنوان اهداف اصلی مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین در برخی از تحقیقات تجهیزات دیگری مانند شبکه‌ی گاز [۱۷]، شبکه‌ی انتقال [۱۸، ۱۹] و مسائلی مانند امنیت در تأمین بار [۲۰] و منابع ذخیره‌ی انرژی [۲۱] مورد مطالعه قرار گرفته است. در بخشی از مراجع نیز به استفاده از روش‌های حل مسئله با تکنیک‌های ابتکاری و یا کلاسیک پرداخته شده است.

در حالت کلی مسئله زمان‌بندی تعمیرات به‌صورت برنامه‌ریزی خروج برای واحدهای شبکه و به‌صورت متمرکز در بسیاری از مراجع مدل شده است. با توجه به رشد روزافزون استفاده از منابع چندحاملی و تولید هم‌زمان (مانند استفاده از منابع CHP و $CCHP$) حل مسئله برنامه‌ریزی تعمیرات به‌صورت مجزا برای هر حامل با مشکلات عمده روبرو است. همان‌گونه که بیان شد، این مشکلات به صورت کلی شامل، نحوه‌ی هماهنگی خروج واحدهای تولید هم‌زمان و کاهش میزان قابلیت اطمینان به سبب خروج منابع و به طبع آن کاهش میزان سطح رزرو می‌باشد که در مراجع به بررسی این چالش‌ها پرداخته نشده است.

نوآوری این مقاله رفع چالش‌های فوق به واسطه‌ی ارائه یک مدل خروج هماهنگ منابع تولید برای تعمیرات می‌باشد. بر این اساس چهارچوبی جدید به‌منظور برنامه‌ریزی تعمیرات منابع تولید در یک $MCES$ ارائه می‌شود. برای تعیین پنجره خروج منابع تولید در $MCES$ با در نظر گرفتن بهینه‌شدن هزینه و قابلیت اطمینان در گام اول بیان ریاضی مسئله به یک شکل مناسب ضروری بوده که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است. همچنین برای برخی از منابع، مانند منابع تولید هم‌زمان نیز مدل‌سازی‌های جدیدی انجام می‌شود. از سویی دیگر با توجه به چندحاملی بودن شبکه‌ها و ارتباط میان آن‌ها، از یک رزرو تجمعی برای این شبکه‌ها استفاده می‌شود.

با توجه به اینکه بهره‌بردار شبکه یک نهاد بوده و شبکه‌های چندحاملی انحصاری می‌باشد، هدف اصلی بهره‌بردار در مسئله بهینه‌سازی، کمینه‌نمودن هزینه‌های میان‌مدت وابسته به تولید و تعمیر می‌باشد. از سویی دیگر، در این شبکه‌ها عموماً مصرف‌کنندگان بارهای مهمی می‌باشند که از دست‌رفتن قابلیت اطمینان و خاموشی آن‌ها، سبب وارد آمدن خسارات مالی زیادی می‌گردد. از همین رو بهره‌بردار سعی بر آن دارد تا قابلیت اطمینان سیستم را در بیشینه‌ترین حالت با توجه به هزینه‌ها نگاه دارد. بر اساس اهداف بیان‌شده (کمینه‌نمودن هزینه و بیشینه‌نمودن قابلیت اطمینان)، مسئله مدنظر به‌صورت یک مسئله دوسطحی بهینه‌سازی مدل می‌شود. در سطح اول مهم‌ترین هدف یعنی کمینه‌سازی هزینه در طول مدت برنامه‌ریزی و در سطح دوم مسئله حداکثرسازی قابلیت اطمینان مدل می‌شود. برای حل این مدل از شرایط KKT^3 سطح دوم برای تک‌سطحی‌سازی مسئله استفاده می‌شود.

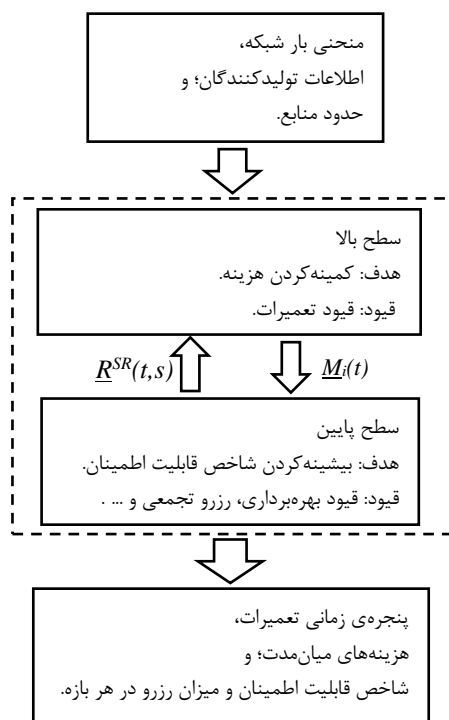
بر اساس وجود این مشکل در رویکرد اول و پاسخ بهینه‌تر و هماهنگ‌تر رویکرد دوم، در ادامه به بیان و مدل‌سازی این رویکرد برنامه‌ریزی نگهداشت پرداخته می‌شود.

۲-۱- معرفی چهارچوب پیشنهادی

همان‌گونه که پیش‌تر بیان گردید، بهره‌بردار شبکه با یک مسئله کمینه‌کردن هزینه‌ها با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم مواجه است. از سویی دیگر با توجه به حساسیت بار به خاموشی، باید قابلیت اطمینان در بیشینه مقدار خود باشد. بر این اساس، مسئله برنامه‌ریزی میان‌مدت از نگاه بهره‌بردار شبکه یک مسئله دو سطحی خواهد بود.

شکل (۱) چهارچوب پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این مدل و در سطح بالا، هدف کمینه‌سازی هزینه‌های میان‌مدت و در سطح پایین هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان است. توابع هدف و محدودیت‌های موجود در دو سطح از طریق بردار تصمیم نگهداشت واحدها، $M_i(t)$ و بردار میزان رزرو چرخان $R^{SR}(t,s)$ به یکدیگر مرتبط می‌شوند.

ورودی مدل، پارامترهای مسئله مانند مقدار بار، پیشبینی از قیمت در دوره‌ی زمانی برنامه‌ریزی، اطلاعات مربوط به واحدهای تولید و حدود مربوط به قیود واحدها می‌باشد. پنجره‌ی زمانی هماهنگ تعمیرات منابع تولید در $MCES$ ، میزان شاخص قابلیت اطمینان و مقدار رزرو چرخان در بازه‌های زمانی تعمیرات و هزینه میان‌مدت بهره‌برداری و نگهداشت از خروجی‌های قابل توجه در این چهارچوب به‌شمار می‌روند.



شکل ۱: چهارچوب کلی طرح پیشنهادی

در ادامه و در بخش دوم به بیان مدل پرداخته شده و در بخش سوم به شرح نتایج عددی و در بخش پایانی جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲-۲ مدل‌سازی منابع شبکه چندحاملی در برنامه تعمیرات

در یک MCES منابع تولید و مصرف گوناگونی وجود دارند که در این مقاله فرض بر آن است، مالک و بهره‌بردار تمام این شبکه‌ی چندحاملی، یک نهاد می‌باشد. همان‌گونه که پیش‌تر بیان گردید، بهره‌بردار در برنامه‌ریزی میان‌مدت قصد دارد که با کمترین میزان هزینه و با بیشترین مقدار قابلیت اطمینان، تمامی واحدهای تولید (برق، گرما و سرما) را در یک دوره‌ی زمانی معین (یک ساله) به تعمیرات ببرد. برای این امر در حالت کلی، بهره‌بردار شبکه با دو رویکرد کاری مواجه خواهد بود:

- خروج منابع تولید برای تعمیرات را به‌صورت جداگانه برنامه‌ریزی نماید. به بیان بهتر منابع تولید برق را در برنامه تعمیرات الکتریک، منابع تولید گرما را در برنامه تعمیرات گرمایش و منابع تولید سرما را در برنامه تعمیرات سرمایش از چرخه تولید خارج نماید، که این امر علاوه بر بهینه‌نبودن، در مورد منابعی که چندحامل را تولید می‌نمایند، مشکل آفرین بوده و ممکن است سبب خروج غیربهینه و متناقض شود. حتی در بعضی از موارد این امر سبب کاهش میزان قابلیت اطمینان شبکه در برخی از حامل‌ها خواهد شد. به‌عنوان نمونه اگر منابع تولید هم‌زمان با برنامه‌ی تعمیرات الکتریک به تعمیرات برود، در برخی از بازه‌های زمانی شبکه‌ی حرارت و یا سرما دچار کمبود تولید توان و کاهش میزان شاخص قابلیت اطمینان خواهند شد.

- کل شبکه و منابع تولید حامل‌های گوناگون باهم در برنامه‌ریزی تعمیرات قرار گیرند که این برنامه به نتیجه مطلوب‌تری (نسبت به رویکرد اول) منتهی خواهد شد.

بر این اساس در MCES اگر بهره‌بردار شبکه از رویکرد اول بهره ببرد، برنامه‌ریزی تعمیرات مجموعه، به چند برنامه‌ی جداگانه تبدیل شده و آنگاه می‌توان بر اساس زمان‌های خروج در نظر گرفته‌شده در هر برنامه منابع را خارج نمود. نکته قابل توجه وجود منابع تولید هم‌زمان است که مالک می‌تواند با یک بازبینی در برنامه‌ی خروج آن‌ها برای تعمیرات، تنها یک‌بار (و در یک برنامه معین به‌عنوان نمونه در برنامه شبکه الکتریک) این منابع را خارج نماید. مهم‌ترین مشکل این طرح خروج غیربهینه‌ی منابع و کاهش شاخص قابلیت اطمینان در دیگر شبکه‌ها خواهد بود. به عبارت دیگر، در این روش، ممکن است واحد تولید هم‌زمان i در برنامه الکتریک با توجه به شرایط شبکه الکتریک به تعمیرات رود، ولی در برنامه شبکه گرمایش که به انرژی این واحد نیاز دارد در بیشینه توان خود برنامه‌ریزی شده باشد و خروج آن برای تعمیرات سبب کاهش قابلیت اطمینان شبکه گرمایش شود.

۲-۲- فرمول‌بندی ریاضی

بر اساس چهارچوب ارائه‌شده، مدل بهینه‌سازی دوسطحی برای این مسئله ارائه می‌شود و بهره‌بردار MCES تمایل فراوانی برای کاهش میزان هزینه‌های میان‌مدت شبکه دارد. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، در مسئله بهینه‌سازی سطح بالا هدف کاهش هزینه با در نظر گرفتن قیود تعمیرات در میان‌مدت می‌باشد. از سویی دیگر با توجه به اینکه در این شبکه‌ها تأمین انرژی مصرف‌کنندگان مقوله‌ای اساسی بوده و از دست‌دادن انرژی، هزینه‌های جانبی بسیار زیادی به‌همراه دارد، قابلیت اطمینان در تأمین انرژی یکی دیگر از اهداف مالک مجموعه می‌باشد. بر این اساس سطح پایین این مسئله بهینه‌سازی قابلیت اطمینان MCES با در نظر گرفتن قیود بهره‌برداری و میزان رزرو باقی مانده منابع تولید شبکه در صورت خروج واحدها برای تعمیرات است. در ادامه به بیان جزئیات مدل‌سازی پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱- مسئله سطح بالا

هدف بهره‌بردار کمینه‌کردن هزینه‌های برنامه‌ریزی میان‌مدت در طول دوره‌ی زمانی معین، برای کلیه‌ی واحدهای تولید موجود در شبکه چندحاملی می‌باشد. مسئله کمینه‌سازی از دید بهره‌بردار را می‌توان به صورت رابطه (۱) مدل‌سازی نمود.

objective function : Min MCOST

$$MCOST = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^N \left[\sum_{s=1}^S \left[\pi_i^{p^t}(t,s) \times G_i(t,s) + \pi_i^{Ex^t} \times U_i(t,s) + \pi_i^{Su^t} \times \omega_i(t,s) \right] + \pi_i^{m^t} \times M_i(t) G_i^{max} \right] + \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^S \left[\pi_i^{SR}(t,s) \times R_i^{SR}(t,s) \right] \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱) اندیس i نشان‌دهنده مولفه‌های بردارهای تصمیم می‌باشد. در بخش اول رابطه (۱) هزینه‌ی تولید در دوره‌ی برنامه‌ریزی، بخش دوم هزینه‌ی ثابت مربوط به در مداربودن واحد تولید، هزینه‌ی راه‌اندازی به عنوان بخش سوم و هزینه‌ی تعمیرات بخش چهارم هزینه‌های میان‌مدت می‌باشد. در بخش پنجم رابطه‌ی (۱) هزینه‌ی رزرو چرخان لحاظ شده است. با این رابطه می‌توان هزینه‌ی بهره‌برداری و تعمیرات واحدهای تولید در افق زمانی برنامه‌ریزی را مدل‌سازی نمود.

در رابطه (۱) فرض بر آن شده است که هر تولیدکننده توانایی تولید تمامی حامل‌های انرژی را داشته باشد. بر این اساس می‌توان متغیر تصمیم توان تولیدی هر تولیدکننده در هر بازه زمانی t و زیربازه زمانی s به‌صورت زیر توسط یک بردار به نام $G_i(t,s)$ نشان داد. در این رابطه i نماد واحدهای تولید است.

$$G_i(t,s) = \begin{bmatrix} E_i(t,s) \\ H_i(t,s) \\ C_i(t,s) \\ \vdots \end{bmatrix}$$

برای بررسی روشن و خاموش بودن این مولفه‌ها در ساعات تولید نیاز به بیان یک متغیر باینری می‌باشد. $U_i(t,s)$ بردار باینری نشان‌دهنده وضعیت تولید واحدها است. اگر عنصری از $U_i(t,s)$ یک باشد به معنی

روشن بودن واحد i در بازه‌ی زمانی t و زیربازه‌ی s است. بردار تصمیم‌گیری دیگری که در مدل بیان می‌شود، بردار باینری تعمیرات، $M_i(t)$ است. اگر عنصری از $M_i(t)$ یک باشد به معنی در تعمیرات بودن واحد i در بازه‌ی زمانی t و زیربازه s است. همچنین، بازه‌ی زمانی t معرف هفته‌های افق برنامه‌ریزی می‌باشند. هر بازه برنامه‌ریزی (هفته) از ۶ زیربازه تشکیل شده است که شامل روزهای کار و آخر هفته، و ساعات پیک، غیرپیک و میان‌باری می‌باشد.

بهره‌بردار شبکه باید رابطه (۱) را با توجه به قیود حاکم بر شبکه، به کمینه مقدار خود برساند. در MCES به‌سبب وجود حامل‌های گوناگون، قابلیت‌های فیزیکی تولیدکننده‌ها و شرایط اجرای برنامه تعمیرات پیشگیرانه، محدودیت‌هایی وجود دارد که در ادامه بیان می‌شود.

$$\sum_{\tau=1}^T M_i(t) = dur_i, \forall i \quad (2)$$

$$M_i(t) - M_i(t-1) \leq M_i(t + dur_i - 1), \forall i, \forall t \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I M_i(t) \leq N_i(t), \forall t \quad (4)$$

$$\sum_{\tau=1}^I M_{i_1}(\tau-1) - M_{i_2}(t) \geq 0, \forall \{i_1, i_2\} \in \varphi^p, \forall t \quad (5)$$

$$\sum_{\tau=1}^I M_{i_1(\gamma_{i1})}(\tau-1) - M_{i_2(\gamma_{i2})}(t) \geq 0, \forall i, \forall \{\gamma_{i1}, \gamma_{i2}\} \in G_i, \forall t \quad (6)$$

$$\sum_{\tau=1}^I M_{i_1}(\tau - dur_{i_1} + OVI_{i_2}) - M_{i_2}(t) \geq 0, \forall \{i_1, i_2\} \in \varphi^o, \forall t \quad (7)$$

$$\sum_{\tau=1}^I [dur_{i_1}^{min} M_{i_1}(\tau - dur_{i_1} + OVI_{i_2})] - \sum_{\tau=1}^I [dur_{i_2}^{max} M_{i_2}(\tau)] \leq 0, \forall \{i_1, i_2\} \in \varphi^o, \forall t \quad (8)$$

$$\sum_{\tau=1}^I M_{i_1(\gamma_{i1})}(\tau - dur_{i_1} + OVI_{i_2(\gamma_{i2})}) - M_{i_2(\gamma_{i2})}(t) \geq 0, \forall i, \forall \{\gamma_{i1}, \gamma_{i2}\} \in G_i, \forall t \quad (9)$$

$$\sum_{\tau=1}^I [dur_{i_1(\gamma_{i1})}^{min} M_{i_1(\gamma_{i1})}(\tau - dur_{i_1} + OVI_{i_2(\gamma_{i2})})] - \sum_{\tau=1}^I [dur_{i_2(\gamma_{i2})}^{max} M_{i_2(\gamma_{i2})}(\tau)] \leq 0, \forall i, \forall \{\gamma_{i1}, \gamma_{i2}\} \in G_i, \forall t \quad (10)$$

$$dur_{i_1}^{min} = \min \{dur_{i_1}, dur_{i_2}\}$$

$$dur_{i_2}^{max} = \max \{dur_{i_1}, dur_{i_2}\}$$

$$dur_{i_1(\gamma_{i1})}^{min} = \min \{dur_{i_1(\gamma_{i1})}, dur_{i_2(\gamma_{i2})}\}$$

$$dur_{i_2(\gamma_{i2})}^{max} = \max \{dur_{i_1(\gamma_{i1})}, dur_{i_2(\gamma_{i2})}\}$$

$$\sum_{\tau=1}^I M_{i_1}(\tau - dur_{i_1} - SEP_{i_2}) - M_{i_2}(t) \geq 0, \forall \{i_1, i_2\} \in \varphi^s, \forall t \quad (11)$$

$$\sum_{\tau=1}^I [dur_{i_1}^{min} M_{i_1}(\tau - dur_{i_1} - SEP_{i_2})] - \sum_{\tau=1}^I [dur_{i_2}^{max} M_{i_2}(\tau)] \leq 0, \forall \{i_1, i_2\} \in \varphi^s, \forall t \quad (12)$$

$$\sum_{\tau=1}^I M_{i_1(\gamma_{i1})}(\tau - dur_{i_1} - SEP_{i_2(\gamma_{i2})}) - M_{i_2(\gamma_{i2})}(t) \geq 0, \forall i, \forall \{\gamma_{i1}, \gamma_{i2}\} \in G_i, \forall t \quad (13)$$

$$\sum_{\tau=1}^I [dur_{i_1(\gamma_{i1})}^{min} M_{i_1(\gamma_{i1})}(\tau - dur_{i_1} - SEP_{i_2(\gamma_{i2})})] - \sum_{\tau=1}^I [dur_{i_2(\gamma_{i2})}^{max} M_{i_2(\gamma_{i2})}(\tau)] \leq 0, \forall i, \forall \{\gamma_{i1}, \gamma_{i2}\} \in G_i, \forall t \quad (14)$$

دیگری برای تعیین سطح حداقل رزرو و شاخص رزرو تولید قابلیت اطمینان ارائه نمود.

در رابطه‌ی (۱۵) مقدار ظرفیت تولید باقی‌مانده در کل بازه‌های زمانی نشان داده شده‌است و هدف این است که در طول مدت برنامه‌ریزی میزان ذخیره‌ی باقی‌مانده (چرخان و غیرچرخان) در شبکه بیشینه مقدار خود باشد.

objective function : $Max RIX(t,s)$

$$RIX(t,s) = \frac{R^{SR}(t,s) + R^{NSR}(t,s)}{\sum_{i=1}^I G_i^{max} - DN(t,s)} \quad (15)$$

صورت کسر رابطه (۱۵)، میزان کل ذخیره شبکه چند حاملی (چرخان و غیرچرخان) را نشان می‌دهد که در دسترس بهره‌بردار برای افزایش سطح قابلیت اطمینان قرار دارد. شاخص فوق از دو بخش رزرو چرخان که وابسته به میزان ظرفیت تولید واحد روشن و رزرو غیرچرخان تشکیل یافته‌است. با توجه به اینکه رزرو چرخان متغیر تصمیم مسئله می‌باشد، بهره‌بردار باید با توجه به شرایط شبکه و با کمترین میزان مقدار آن را به دست آورد. از سویی دیگر میزان رزرو غیرچرخان وابسته به برنامه‌ی میان‌مدت و در تعمیرات نبودن واحد می‌باشد که این محدودیت‌ها در قیود مسئله بیان می‌گردد.

در حالت کلی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مسئله که با استفاده از پیش‌بینی و تحلیل بار حاصل می‌شود، میزان تقاضای بار مصرفی مشترکین می‌باشد که به‌صورت بردار $\underline{D}(t,s)$ نمایش داده می‌شود. این بردار میزان مصرف حامل‌ها توسط مصرف‌کنندگان بوده و تعداد درایه‌های آن می‌تواند با درایه‌های بردار تولید $\underline{G}(t,s)$ تفاوت داشته باشد. به بیان بهتر مصرف‌کننده‌ها انرژی الکتریکی، گرمایی، سرمایی و گاز را مصرف نموده و برای خود گرما، سرما، روشنایی و مصرف برق برای وسایل الکتریکی دیگر مانند موتورها را تأمین می‌نمایند. در این شرایط می‌توان هر یک از این مولفه‌ها را توسط رابطه‌ای (۳۱) با مولفه‌های اصلی موجود در شبکه ارتباط داد.

$$\underline{D}(t,s) = \underline{C} \times \underline{DN}(t,s)$$

$$\underline{D}(t,s) = \begin{bmatrix} E_D(t,s) \\ H_D(t,s) \\ C_D(t,s) \\ \vdots \end{bmatrix}, \quad \underline{DN}(t,s) = \begin{bmatrix} E_{DN}(t,s) \\ H_{DN}(t,s) \\ C_{DN}(t,s) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶) ماتریس تبدیل مولفه‌ی شبکه به مولفه‌ی بار است. همچنین بردار $\underline{DN}(t,s)$ بردار مولفه‌های مصرفی از دید شبکه بوده و برنامه‌ریزی تولید باید بر پایه‌ی این بردار انجام شود. با توجه به این مطالب می‌توان گفت که بار از دو بخش تشکیل شده‌است. بخش اول، آن دسته از حامل‌های مصرفی است که نیازی نیست که از تبدیل حامل‌های اولیه حاصل شوند. بخش دوم، شامل مقداری از مصرف می‌باشد که از تبدیل حامل‌های اولیه به‌دست می‌آید. به بیان دیگر رابطه‌ی (۱۶) را می‌توان به صورت (۱۷) بازنویسی نمود.

در معادلات فوق، رابطه‌ی (۲) مدت زمان تعمیرات واحد تولید را بیان می‌کند. رابطه (۳) الزام می‌کند که بازه‌های زمانی تعمیرات، تعمیراتی پیوسته را ایجاد نماید. رابطه (۴) بیان‌کننده محدودیت نیروی انسانی و تجهیزات برای تعمیرات می‌باشد.

با توجه به اینکه در برنامه‌ریزی تعمیرات واحدها، در برخی از شرایط باید برخی از واحدها زودتر از واحدهای دیگر تعمیر شوند و یا در برخی از تولیدکنندگان که چند حامل انرژی را تولید می‌کنند ممکن است مولفه‌های نسبت به مولفه‌های دیگر در رفتن به تعمیرات تقدم داشته باشد. این محدودیت‌ها توسط روابط (۵) و (۶) مدل می‌شوند. رابطه‌ی (۵) مربوط به محدودیت تقدم دو واحدهای تولیدی نسبت به هم می‌باشد. مجموعه‌ی φ^p ، مجموعه واحدهایی است که نسبت به هم حق تقدم دارند و i_1 و i_2 عضو این مجموعه می‌باشند و i_1 نسبت به i_2 دارای حق تقدم است. رابطه‌ی (۶) همانند رابطه‌ی (۵) است با این تفاوت که در یک واحد تولیدی مانند i یکی از مولفه‌ها مانند γ_{i1} نسبت به مولفه‌ی دیگری مانند γ_{i2} دارای تقدم است.

روابط (۷-۱۰) هم‌زمانی برنامه نگهداشت را نشان می‌دهد. این قیود وضعیت‌هایی را نشان می‌دهند که یک واحد و یا مؤلفه تولید در زمان تعمیرات حتماً باید با یک واحد و یا مؤلفه دیگر هم‌زمان باشد. به‌عنوان نمونه در برنامه‌ریزی واحد $CCHP$ نمی‌توان واحد حرارتی را در یک بازه زمانی و واحد الکتریکی را در بازه‌ی زمانی دیگر برای تعمیر خاموش کرد. در این شرایط و یا شرایط مشابه این واحدها و مولفه‌ها باید با هم برای تعمیر از مدار تولید خارج شوند. در روابط فوق $OVI_{i_1 i_2}$ میزان هم‌زمانی دو واحد $OVI_{i_1(i_1) i_2(i_2)}$ میزان هم‌زمانی دو مؤلفه و مجموعه φ^o نشان دهنده مجموعه واحدهای دارای هم‌زمانی می‌باشد.

مانند قیود مربوط به هم‌زمانی برای خروج واحدها و یا مولفه‌ها، در برخی موارد باید یک واحد خاص تعمیر شود و پس از بازه‌ی زمانی معینی، واحد دیگری و یا مولفه‌ی دیگری از یک واحد تولیدی به تعمیرات برود. بر اساس این فرض روابط (۱۱-۱۲) محدودیت را برای واحدهای تولید و روابط (۱۳-۱۴) محدودیت را برای مولفه‌های یک منبع تولید بیان می‌دارند. در روابط فوق $SEP_{i_1 i_2}$ میزان فاصله زمانی بین تعمیرات دو واحد و $SEP_{i_1(i_1) i_2(i_2)}$ میزان فاصله زمانی بین تعمیرات دو مؤلفه و مجموعه φ^s نشان‌دهنده مجموعه واحدهای که با هم اختلاف زمانی دارند، می‌باشد.

۲-۲-۲- مسئله سطح پایین

بر اساس مطالب بیان‌شده، در مسئله برنامه‌ریزی میان‌مدت، هدف بهره‌بردار کمینه‌کردن هزینه‌ها با توجه به شاخص قابلیت اطمینان است. به بیان بهتر یکی از مهم‌ترین قیود در برنامه‌ریزی نگهداشت شبکه‌ها، قیود مربوط به بیشینه‌نمودن تأمین رزرو تولید، در بازه‌های زمانی برنامه‌ریزی می‌باشد [۱۳]. در این مقاله با توجه به چندحاملی بودن شبکه، وابستگی بار به حامل‌های مختلف (توانایی تأمین بار با استفاده از حامل‌های گوناگون) و وجود ماتریس تبدیل حامل‌ها، می‌توان ساختار

از سوی دیگر این نحوه محاسبه رزرو این اختیار را به بهره‌بردار خواهد داد تا با صرف انرژی و هزینه‌ی کمتر میزان رزرو مورد نیاز خود را با توجه به تبدیلات بار تعیین کند. به بیان دیگر بهره‌بردار می‌تواند به جای رزرو شبکه سرمایه‌ی تنها مقداری رزرو شبکه گرمایی را افزایش دهد. این امر با هزینه‌ی کمتر می‌تواند کمک شایانی به بهره‌برداری از سیستم نماید.

همان‌گونه که پیش‌تر بیان گردید، در $MCES$ به سبب وجود حامل‌های گوناگون و قابلیت‌های فیزیکی تولیدکننده‌ها باید قیودی نیز در رابطه با بهره‌برداری منابع در این سطح در نظر گرفته شود که در ادامه بیان می‌گردد.

$$\sum_i G_i(t,s) = \underline{DN}(t,s), \forall t, \forall s \quad (22)$$

$$U_i(t,s) - U_i(t,s-1) \leq \underline{\omega}_i(t,s), \mu_{(i,t,s)}^2, \forall i, \forall t, s = 2, \dots, N \quad (23)$$

$$U_i(t,1) - U_i(t-1,N) \leq \underline{\omega}_i(t,s), \mu_{(i,t,s)}^3, \forall i, t = 2, \dots, N \quad (24)$$

$$G_i(t,s-1) - G_i(t,s) \leq \underline{R}_{Gi}^{down}, \mu_{(i,t,s)}^4, \forall i, \forall t, s = 2, \dots, N \quad (25)$$

$$G_i(t-1,N) - G_i(t,1) \leq \underline{R}_{Gi}^{down}, \mu_{(i,t,s)}^5, \forall i, t = 2, \dots, N \quad (26)$$

$$G_i(t,s) - G_i(t,s-1) \leq \underline{R}_{Gi}^{up}, \mu_{(i,t,s)}^6, \forall i, \forall t, s = 2, \dots, N \quad (27)$$

$$G_i(t,1) - G_i(t-1,N) \leq \underline{R}_{Gi}^{up}, \mu_{(i,t,s)}^7, \forall i, t = 2, \dots, N \quad (28)$$

$$\left(\underline{Flg}_i(t,s-1) - \underline{UPT}_i \right) \left(U_i(t,s-1) - U_i(t,s) \right) \leq 0$$

$$\mu_{(i,t,s)}^8, \forall i, \forall t, \forall s \quad (29)$$

$$\left(\underline{Flg}_i(t-1,N) - \underline{UPT}_i \right) \left(U_i(t-1,N) - U_i(t,s) \right) \leq 0$$

$$\mu_{(i,t,s)}^9, \forall i, \forall t \quad (30)$$

$$\left(\underline{Flg}_i(t,s-1) - \underline{DOWT}_i \right) \left(U_i(t,s) - U_i(t,s-1) \right) \leq 0$$

$$\mu_{(i,t,s)}^{10}, \forall i, \forall t, \forall s \quad (31)$$

$$\left(\underline{Flg}_i(t-1,N) - \underline{DOWT}_i \right) \left(U_i(t,s) - U_i(t-1,N) \right) \leq 0$$

$$\mu_{(i,t,s)}^{11}, \forall i, \forall t \quad (32)$$

$$M_i(t) + U_i(t,s) \leq 1, \mu_{(i,t,s)}^{12}, \forall i, \forall t, \forall s \quad (33)$$

$$U_i(t,s) G_i^{min} \leq G_i(t,s) \leq U_i(t,s) G_i^{max}, \mu_{(i,t,s)}^{13}, \mu_{(i,t,s)}^{14}, \forall i, \forall t, \forall s \quad (34)$$

$$\left(\frac{1}{E_i^{max}} \right) G_{i_{E_i}}(t,s) \leq G_{i_{E_i}}(t,s) \leq \left(\frac{1}{E_i^{min}} \right) G_{i_{E_i}}(t,s)$$

$$\mu_{(i,t,s)}^{15}, \mu_{(i,t,s)}^{16}, \forall i, \forall t, \forall s \quad (35)$$

$$\partial - \left(\frac{1}{H_i^{min}} \right) G_{i_{H_i}}(t,s) \leq G_{i_{H_i}}(t,s) \leq \partial - \left(\frac{1}{H_i^{max}} \right) G_{i_{H_i}}(t,s)$$

$$\mu_{(i,t,s)}^{17}, \mu_{(i,t,s)}^{18}, \forall i, \forall t, \forall s \quad (36)$$

رابطه‌ی (۲۲) نشان‌دهنده تعادل میان تولید و مصرف است. رابطه (۲۳) به بررسی راه‌اندازی واحد در یک بازه‌ی زمانی و رابطه (۲۴) به بررسی راه‌اندازی واحد میان دو بازه زمانی پشت سر هم t و $t-1$ می‌پردازد. در روابط (۲۵-۲۸) قیدهای حاکم بر نرخ تغییرات مجاز در سطح تولید برای حامل‌های مختلف مدل شده است. در رابطه‌ی (۲۵) قید نرخ کاهش توان برای هر زیربازه در بازه‌ی زمانی t مدل و رابطه‌ی (۲۶) قید نرخ کاهش توان مابین دو بازه‌ی زمانی را مدل می‌سازد. روابط (۲۷) و (۲۸) نیز مانند روابط (۲۵) و (۲۶) به مدل‌سازی قید نرخ افزایش توان می‌پردازد. این قیود با توجه به این‌که برخی مولدها به سبب ماهیت کاری (مانند

$$\underline{D}(t,s) = \underline{D}_1(t,s) + \underline{D}_2(t,s), \begin{cases} \underline{D}_1(t,s) = \underline{C} \times \underline{DN}_1(t,s) \\ \underline{D}_2(t,s) = \underline{DN}_2(t,s) \end{cases} \quad (17)$$

بر این اساس می‌توان مقدار مصرف مورد نیاز از شبکه را به صورت (۱۸) و براساس پیش‌بینی بار مشترکین به دست آورد.

$$\underline{DN}(t,s) = \underline{DN}_1(t,s) + \underline{DN}_2(t,s)$$

$$\underline{DN}(t,s) = \underline{C}^{-1} \times \underline{D}_1(t,s) + \underline{D}_2(t,s) \quad (18)$$

در $MCES$ همواره میزان مصرف حامل‌ها با یکدیگر رابطه دارد. بدین صورت که در صورت مشکل برای تأمین حاملی، مقدار تقاضای برای مصرف آن مؤلفه به سمت مؤلفه‌های دیگر سوق پیدا می‌کند. علت این امر، وجود امکان تبدیل (متبلور در ماتریس تبدیل \underline{C}) میان میزان مصرف واقعی مصرف‌کنندگان (\underline{D}_1) و مصرف دیده‌شده از سوی شبکه‌ی تولید (\underline{DN}_1) است. به بیان بهتر هنگامی که حاملی از دست می‌رود، مصرف‌کننده‌ها به صورت خودکار می‌توانند (در صورت وجود امکان تبدیل) نیاز به آن حامل را از طریق مصرف حامل‌های دیگر برآورده می‌نمایند و در نتیجه می‌توان یک رزرو کلی برای کل حامل‌ها در نظر گرفت. بر این اساس روابط (۱۹-۲۰) میزان حداقلی برای رزرو چرخان به واسطه‌ی رابطه‌ی میان حداقل رزرو برای تک تک حامل‌ها را بیان می‌نماید.

$$\sum_{i=1}^I U(i,t) G_i(t,s) (1 - M_i(t)) + \underline{R}^{SR}(t,s) - (C^{-1} \times \underline{DN}_1(t,s) + \underline{DN}_2(t,s)) \geq \underline{R}^{min}(t,s)$$

$$\mu_{(i,t,s)}^1, \forall t, \forall s \quad (19)$$

$$\underline{R}^{min}(t,s) = \underline{\alpha} \times loadIndx$$

$$\times \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^N \left(\sum_{i=1}^I G_i^{max} (1 - M_i(t)) - loadIndx \right)}{\sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^N loadIndx}$$

$$loadIndx = (C^{-1} \times \delta \underline{DN}_1(t,s) + \underline{DN}_2(t,s)) \quad (20)$$

$$\underline{R}^{NSR}(t,s) = \sum_{i=1}^I (1 - U(i,t)) G_i^{max} (1 - M_i(t)) \quad (21)$$

در رابطه (۱۹) میزان تولید واحدهای روشن با میزان رزرو چرخان باید از مقدار بار به اندازه $\underline{R}^{min}(t,s)$ بیشتر باشد. رابطه (۲۰) نشان‌دهنده میزان حداقلی رزرو برای هر حامل است. در این رابطه بردار $\underline{\alpha}$ ضریب کلی تعیین میزان حداقلی رزرو شبکه و بردار δ ضریب مقبولیت استفاده و سوق به سمت مؤلفه‌ها در شبکه می‌باشد. این ضرایب توسط بهره‌بردار سیستم و با استفاده از تحلیل حساسیت حامل‌های انرژی و تحلیل میزان طریقه مصرف آن‌ها با توجه به سابقه‌ی بار حاصل می‌گردد.

با استفاده از این ضرایب، بهره‌بردار می‌تواند با توجه به مقبولیت استفاده از حامل‌ها، میزان رزرو اختصاص داده‌شده به آن حامل را تعیین نماید. به عنوان مثال در یک شبکه مصرف خانگی، تمایل افراد برای مصرف انرژی الکتریکی به عنوان جایگزین انرژی‌های دیگر بسیار بالاست. این امر به گونه‌ای است که حتی در صورت وجود سایر حامل‌ها، مصرف کنندگان تمایل فراوانی به استفاده از انرژی الکتریکی دارند. این موضوع سبب افزایش ضریب مقبولیت و در نتیجه میزان رزرو برای انرژی الکتریکی شده و میزان رزرو برای حامل‌های دیگر را کاهش می‌دهد.

روش با آن مواجه است، این است که مسئله سطح دوم باید شرایط KKT را اقتناع نموده و محدب و پیوسته باشد، که بتوان از معادلات آن مشتق گرفت. بر این اساس و با توجه به اینکه متغیر باینری $M_i(t)$ که از سطح اول وارد سطح دوم می‌شود به‌عنوان یک پارامتر تعیین شده می‌باشد، کلیه معادلات سطح پایین پیوسته و مشتق پذیر بوده و می‌توان با استفاده از روش KKT مدل دوسطحی را به‌صورت یک مدل تک‌سطحی بازنویسی نمود.

بر این اساس تابع لاگرانژ را تشکیل و بر اساس اصول روش KKT معادلات زیر را به معادلات سطح اول افزود [۲۳]:

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^I G_i^{max} - DN(t,s)} + \mu_{(t,s)}^1 = 0 \quad (38)$$

$$\mu_{(t,s)}^1 \times \left(\sum_{i=1}^I U_i(i,t) G_i(t,s) (1 - M_i(t)) + R^{SR}(t,s) - (C^{-1} \times DN_1(t,s) + DN_2(t,s)) - R^{min}(t,s) \right) = 0 \quad (39)$$

$$\sum_i G_i(t,s) - DN(t,s) = 0 \quad (40)$$

$$\mu_{(t,s)}^2 \times (\omega(t,s) - U_i(t,s) + U_i(t,s-1)) = 0 \quad (41)$$

$$\mu_{(t,s)}^3 \times (\omega(t,s) - U_i(t,s) + U_i(t-1,N)) = 0 \quad (42)$$

$$\mu_{(t,s)}^4 \times (R_{Gi}^{down} - G_i(t,s-1) + G_i(t,s)) = 0 \quad (43)$$

$$\mu_{(t,s)}^5 \times (R_{Gi}^{down} - G_i(t-1,N) + G_i(t,1)) = 0 \quad (44)$$

$$\mu_{(t,s)}^6 \times (R_{Gi}^{up} - G_i(t,s) + G_i(t,s-1)) = 0 \quad (45)$$

$$\mu_{(t,s)}^7 \times (R_{Gi}^{up} - G_i(t,1) + G_i(t-1,N)) = 0 \quad (46)$$

$$\mu_{(t,s)}^8 \times ((Flg_i(t,s-1) - UPT_i)(U_i(t,s) - U_i(t,s-1))) = 0 \quad (47)$$

$$\mu_{(t,s)}^9 \times ((Flg_i(t-1,N) - UPT_i)(U_i(t,N) - U_i(t-1,s))) = 0 \quad (48)$$

$$\mu_{(t,s)}^{10} \times ((Flg_i(t,s-1) - DOWT_i)(U_i(t,s-1) - U_i(t,s))) = 0 \quad (49)$$

$$\mu_{(t,s)}^{11} \times ((Flg_i(t-1,N) - DOWT_i)(U_i(t-1,N) - U_i(t,s))) = 0 \quad (50)$$

$$\mu_{(t,s)}^{12} \times (1 - M_i(t) - U_i(t,s)) = 0 \quad (51)$$

$$\mu_{(t,s)}^{13} \times (G_i(t,s) - U_i(t,s) G_i^{min}) = 0 \quad (52)$$

$$\mu_{(t,s)}^{14} \times (U_i(t,s) G_i^{max} - G_i(t,s)) = 0 \quad (53)$$

$$\mu_{(t,s)}^{15} \times \left(G_{i_{E_i}}(t,s) - \left(\frac{1}{E_i^{max}} \right) G_{i_{E_i}}(t,s) \right) = 0 \quad (54)$$

$$\mu_{(t,s)}^{16} \times \left(\left(\frac{1}{E_i^{min}} \right) G_{i_{E_i}}(t,s) - G_{i_{E_i}}(t,s) \right) = 0 \quad (55)$$

$$\mu_{(t,s)}^{17} \times \left(G_{i_{H_i}}(t,s) - \partial + \left(\frac{1}{H_i^{min}} \right) G_{i_{H_i}}(t,s) \right) = 0 \quad (56)$$

$$\mu_{(t,s)}^{18} \times \left(\partial - \left(\frac{1}{H_i^{max}} \right) G_{i_{H_i}}(t,s) - G_{i_{H_i}}(t,s) \right) = 0 \quad (57)$$

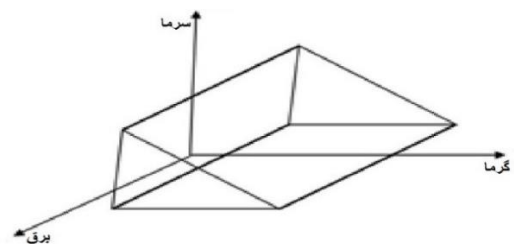
$$\mu_{(t,s)}^k \geq 0 \quad (58)$$

بر این اساس می‌توان مسئله‌ی رابطه‌ی (۵۹) را به‌عنوان مسئله برنامه‌ریزی میان‌مدت بهره‌بردار در نظر گرفت.

$$\begin{aligned} \text{Min} & \quad (1) \\ \text{S.T} & \quad (2) - (14) \\ & \quad (19) \\ & \quad (22) - (36) \\ & \quad (38) - (58) \end{aligned} \quad (59)$$

مولدهای تولید بخار)، نرخ افزایش و یا کاهش توان آن‌ها بسیار پایین بوده و گاهی چند زیربازه‌ی زمانی را پوشش می‌دهد، مدل‌سازی شده‌اند. روابط (۲۹-۳۲) حداقل میزان بازه‌ی زمانی مورد نیاز برای روشن بودن و یا خاموش بودن مولفه‌های واحدهای تولید را نشان می‌دهند. بردار $Flg_i(t,s)$ بیانگر بردار تعداد ساعات روشن بودن (+) و یا خاموش بودن (-) واحد i می‌باشد. UPT_i بردار حداقل زمان مجاز برای روشن ماندن و بردار $DOWT_i$ بیانگر حداقل زمان مجاز برای خاموش ماندن واحد تولیدکننده i می‌باشد. این مقادیر با توجه به حامل انرژی و قابلیت‌های ترمودینامیکی و فیزیکی تجهیزات به‌دست می‌آید که برنامه‌ریز تعمیرات باید این موارد را مورد توجه قرار دهد. رابطه (۳۳) ارتباط درمدار بودن واحدهای تولید را با وضعیت تعمیرات نشان می‌دهد. رابطه (۳۴) به بررسی حداکثر و حداقل میزان توان تولیدی یک واحد می‌پردازد.

روابط (۳۵-۳۶) شامل قیدهایی مربوط به حد بالا و پایین نسبت تولید قدرت الکتریکی و قدرت حرارتی (و نسبت تولید حرارت و سرما) در سیستم می‌باشند. در یک سیستم تولید هم‌زمان برق، حرارت و سرما یک منحنی قابلیت تولید مطابق شکل (۲) وجود دارد که رفتار CCHP می‌تواند بر اساس شرایط کاری در هر لحظه، در یک نقطه خاص از این مشخصه قابلیت، قرار گیرد. در حالت کلی این نسبت به‌صورت یک تابع درجه دوم از شرایط کاری سیستم و عوامل محیطی مانند رطوبت نسبی، ارتفاع از سطح دریا، دمای محیط و... می‌باشد؛ ولی در مدل‌سازی این رابطه به‌صورت یک تابع خطی با یک فضای شدنی تقریب زده شده است که پاسخ خروجی کل مدل‌سازی را سریع‌تر و با یک دقت مناسبی از پاسخ واقعی سیستم ارائه می‌دهد.



شکل (۲): منحنی قابلیت تولید منابع CCHP

در رابطه (۳۶) θ یک عدد ثابت می‌باشد که به تکنولوژی تولید سرما وابسته است.

بر این اساس می‌توان مسئله برنامه‌ریزی میان‌مدت تعمیرات شبکه‌ی چندحاملی دوسطحی فوق را به‌صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{aligned} \text{Min} & \quad (1) \\ \text{S.T} & \quad (2) - (14) \\ & \quad \text{Max} \quad (15) \\ & \quad \text{S.T} \quad (19) - (36) \end{aligned} \quad (37)$$

۲-۲-۳- تک‌سطحی‌سازی مسئله دوسطحی

برای تک‌سطحی‌سازی مسئله فوق از اعمال شرایط KKT بر مسئله سطح دوم می‌توان استفاده نمود [۲۲]. محدودیت مهمی که استفاده از این

۵	۱۰	۱۵	۲۰	R.U(MW/h)
۱۰	۱۵	۲۵	۳۰	R.D (MW/h)
۳۴۰۰۰	۳۷۵۰۰	۴۷۲۰۰	۹۵۰۰۰	Mcost (\$)
۴۵۷۰۰	۵۹۸۰۰	۶۵۳۰۰	۶۷۰۰۰	Fcost (\$)
۶۱/۴۷	۵۷/۲۱	۸۹/۷	۹۵	Scost (\$)

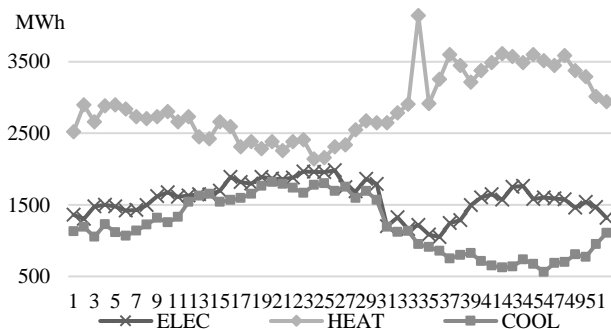
جدول (۴): مشخصات منابع تولید انرژی منابع تولید هم‌زمان

۱۰-۷	۶-۵	۴-۱	CCHP واحد
۵۰	۷۵	۱۵۰	MAX Electric
۱۰	۳۰	۷۰	MIN Electric
۷۰	۶۵	۱۳۵	MAX Heat
۱۰	۲۰	۵۰	MIN Heat
۰	۵۵	۱۰۰	MAX Cool
۰	۱۵	۳۰	MIN Cool
۱	۲	۲	DURation

جدول (۵): راندمان تولید منابع تولید هم‌زمان

۱۰-۷	۶-۵	۴-۱	CCHP واحد
۰/۶۹۷	۱/۱۷	۱/۱۳	E _{emin}
۰/۹۷۳	۱/۳۹	۱/۴۶	E _{emax}
---	۱/۱۹۳	۱/۳۷۲	H _{hmin}
---	۱/۲۸۴	۱/۶۴	H _{hmax}

شکل (۳) نمودار میزان پیک بار مصرفی هفتگی در بخش‌های گرما، سرما و الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل (۳): نمودار بار مصرفی برای حامل‌های مختلف

برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی از روش تحلیل مدل بر اساس مدل‌های مشابه استفاده شده است. برای این کار، در ابتدا شبیه‌سازی با فرض وجود حامل‌های الکتریکی و در غیاب سایر حامل‌ها انجام شده و نتایج آن با نتایج مرجع [۱۳] تطبیق داده شد. پس از اطمینان از پاسخ، سایر حامل‌ها به مدل افزوده و به بررسی قیود با استفاده از تحلیل فضای‌شدنی، بررسی تغییر در پارامترها و کران روابط، پرداخته شد. سپس تأثیر سایر حامل‌ها در حالت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و از صحت نتایج خروجی شبیه‌سازی در نرم‌افزار، اطمینان کامل به‌دست آمد.

۳-۱- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

ابتدا منابع تولید هر حامل در برنامه تعمیرات مستقل، برنامه‌ریزی شد. در گام بعد برنامه پیشنهادی تعمیرات^۴ مورد استفاده قرار گرفته و

لازم به ذکر است که مسئله مدل‌سازی پیشنهادی پس از تک‌سطحی‌سازی به یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط^۴ تبدیل شده و در این مقاله توسط نرم‌افزار GAMS^۵ حل می‌شود.

با توجه به این مدل‌سازی انتظار می‌رود پاسخ برنامه تعمیرات متمرکز نسبت به برنامه تعمیرات جداگانه دارای قابلیت اطمینان و میزان رزرو بیشتر، هزینه کمتر باشد. در ادامه به بررسی این موضوع با یک مطالعه عددی پرداخته خواهد شد.

۳- مطالعات عددی

برای شبیه‌سازی و پایش مدل ارائه‌شده و تحلیل نتایج مدل از اطلاعات یک شبکه چندحاملی بومی استفاده شده است. شبکه چندحاملی مذکور، در منطقه ویژه اقتصادی عسلویه در شرق استان بوشهر واقع شده و شامل چندین پالایشگاه، پتروشیمی، نیروگاه برق و بخار و سرما و منطقه‌ی مسکونی می‌باشد. در این ناحیه ۱۰ منبع تولید هم‌زمان، ۱۴ واحد تولید انرژی الکتریکی و ۱۵ واحد تولید حرارت و سرما وجود دارد که در ادامه، اطلاعات این منابع در جداول (۱-۷) ارائه شده است:

جدول (۱): مشخصات منابع تولید انرژی الکتریکی

۱۴-۱۰	۹-۷	۶-۳	۲-۱	واحد الکتریک
۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	Max (MW)
۱۰	۲۵	۷۰	۱۱۰	Min (MW)
۱	۱	۲	۳	Duration
۱	۱	۴۸	۷۲	M.U.T (h)
۱	۱	۴۸	۹۶	M.D.T (h)
۵۰	۱۰۰	۵۰	۲۰	R.U(MW/h)
۵۰	۱۰۰	۷۵	۵۰	R.D (MW/h)
۲۰۱۰۰۰	۱۸۱۰۰۰	۱۲۱۰۰۰	۸۰۰۰۰	Mcost (\$)
۴۳۷۰۰	۴۷۲۰۰	۸۷۴۰۰	۹۴۰۰۰	Fcost (\$)
۵۴	۳۶	۷۳	۱۴۹	Scost (\$)

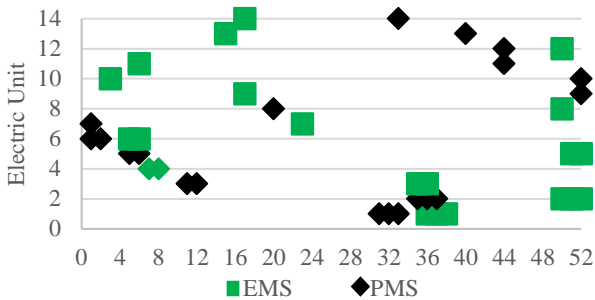
جدول (۲): مشخصات منابع تولید انرژی گرمایی

۱۵-۱۲	۱۱-۹	۸-۵	۴-۱	واحد گرما
۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۴۰۰	Max (MW)
۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۵۰	Min (MW)
۱	۱	۱	۱	Duration
۲۴	۹۶	۹۶	۱۴۴	M.U.T (h)
۲۴	۴۸	۹۶	۱۲۰	M.D.T (h)
۵۰	۵۰	۱۲۵	۱۰۰	R.U(MW/h)
۱۰۰	۱۰۰	۱۲۵	۲۵۰	R.D (MW/h)
۲۲۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	Mcost (\$)
۴۲۰۰۰	۴۲۰۰۰	۴۲۰۰۰	۴۲۰۰۰	Fcost (\$)
۲۲/۵	۱۹/۸	۳۴/۷	۴۵	Scost (\$)

جدول (۳): مشخصات منابع تولید انرژی سرمایی

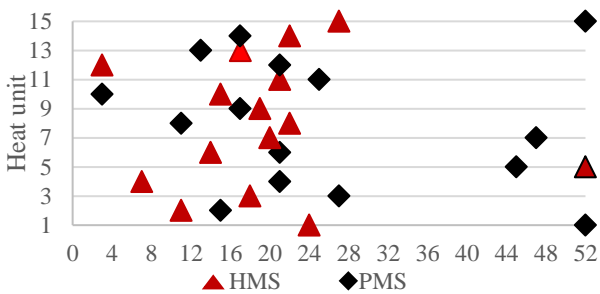
۱۵-۱۰	۹-۷	۶-۴	۳-۱	واحد سرما
۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	Max (MW)
۲۵	۵۰	۷۰	۱۰۰	Min (MW)
۲	۲	۳	۳	Duration
۴۸	۹۶	۱۴۴	۱۲۰	M.U.T (h)
۱۲۰	۱۲۰	۱۶۸	۱۶۸	M.D.T (h)

برنامه تعمیراتی منابع تولید هم‌زمان به صورت یک برنامه واحد درآمده است، در برنامه تعمیراتی دیگر واحدهای تولید نیز تغییراتی ایجاد شده که در ادامه به بررسی این موضوع پرداخته می‌شود.



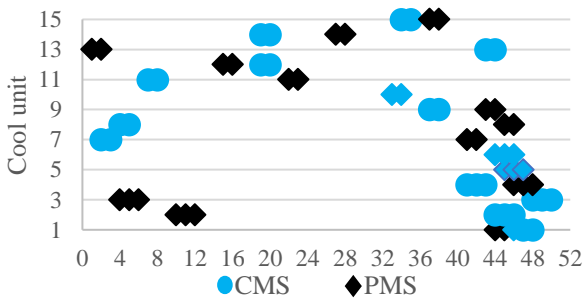
شکل (۵): برنامه زمان‌بندی تعمیرات منابع تولید الکتریک

به دلیل تغییر در برنامه خروج منابع تولید هم‌زمان، برنامه خروج واحدهای الکتریکی با توجه به قیود مسئله تغییر یافته است. البته در برخی موارد نیز وضعیت خروج منابع دو برنامه‌ی مستقل نگهداشت (EMS) و پیشنهادی (PMS) با هم مطابقت دارد، مانند واحد ۴ که در هر دو برنامه در هفته‌های ۷ و ۸ به تعمیرات می‌رود.



شکل (۶): برنامه زمان‌بندی تعمیرات منابع تولید حرارت

در مورد دیگر شبکه‌ها و منابع تولید مانند سرما و گرما، روندی مشابه شبکه الکتریک و شکل (۵) وجود دارد. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، آرایش خروج منابع حرارتی در دو برنامه‌ی نگهداشت منابع حرارتی (HMS) و برنامه‌ی پیشنهادی (PMS) متفاوت است. علت این امر نیز تأثیر هماهنگ شدن خروج منابع تولید هم‌زمان بر روی شبکه حرارت می‌باشد. در این شبکه برنامه‌ی خروج تمامی واحدها تغییر نموده است. به‌عنوان نمونه برنامه‌ی خروج واحد یک از هفته ۲۴ به هفته ۵۲ انتقال یافته است. این روند برای منابع تولید سرما در شکل (۷) نمایش داده شده است.

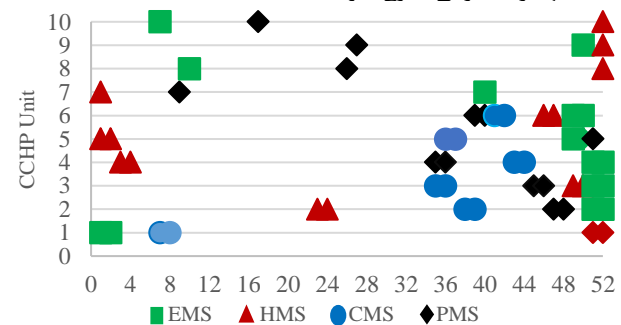


شکل (۷): برنامه زمان‌بندی تعمیرات منابع تولید سرما

برنامه‌ی زمان‌بندی تعمیرات واحدها ارائه می‌شود. با توجه به منحنی بارها، انتظار می‌رود برنامه تعمیراتی شبکه‌های مختلف و برنامه پیشنهادی، پنجره‌های زمانی مختلفی را شامل شود. در ادامه به بررسی این برنامه‌ها برای منابع CCHP، الکتریک، گرما و سرما پرداخته می‌شود. مدل‌ها در نرم‌افزار GAMS شبیه‌سازی و توسط موتور CPLEX حل شده است. اجرای برنامه برای برنامه‌های مستقل (با ۲۴ هزار متغیر) در حدود ۲ ساعت و برای برنامه پیشنهادی (با ۵۴ هزار متغیر) در حدود ۱۵ ساعت، توسط یک کامپیوتر با RAM 4G و CPU Ci7 2.8GHz به طول انجامیده است.

۳-۱-۱- برنامه خروج منابع تولید

برنامه‌های تعمیراتی مختلف بنا به میزان هزینه سیستم، محدودیت‌ها و منحنی بار هر حامل، زمان‌های خاموشی مختلفی را برای منابع CHP و CCHP ارائه می‌دهند. این پنجره‌های زمانی مختلف همانگونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، سبب خواهد شد تا بهره‌بردار شبکه با چالش انتخاب زمان مناسب برای خروج منابع مواجه شود. علت این مسئله این است که در صورت استفاده از هر کدام از برنامه‌های مستقل (برنامه تعمیرات منابع تولید برق^۷، برنامه تعمیرات منابع تولید حرارت^۸ و برنامه تعمیرات منابع تولید سرما^۹)، خروج منابع CHP و CCHP سبب کاهش قابلیت اطمینان شبکه‌های دیگر شده و ممکن است فضای حل مسئله آنها از همگرایی خارج شود.



شکل (۴): برنامه زمان‌بندی تعمیرات منابع تولید هم‌زمان در برنامه‌های مختلف

با مدل پیشنهادی، این زمان‌های خروج با هماهنگی دیگر حامل‌ها مشخص می‌گردد. به عنوان نمونه واحد ۴ در هفته‌های ۲ و ۳ با توجه به برنامه حرارتی؛ در هفته‌های ۴۳ و ۴۴ با توجه به برنامه سرمایش و در هفته‌های ۵۱ و ۵۲ با توجه به برنامه الکتریکی باید از مدار تولید برای نگهداشت خاموش می‌شد. نکته قابل توجه این است که اگر هر یک از این برنامه‌ها را بهره‌بردار به‌عنوان مرجع قبول نماید، در ساختار تولید و هزینه بهره‌برداری سایر شبکه‌ها تغییری ایجاد می‌شود. در حالی که وقتی کل سیستم با هم مدل می‌شود واحد ۴ باید در هفته‌های ۳۵ و ۳۶ به برنامه تعمیراتی برود. در این میان برخی از واحدها نیز وجود دارند که برنامه تعمیراتی پیشنهادی با برنامه تعمیراتی یکی از شبکه‌ها مطابقت دارد (مانند واحد پنج که در هفته ۵۰ برنامه تعمیراتی جامع پیشنهادی با برنامه شبکه الکتریکی مشترک است). از سویی دیگر به سبب این که

۲-۳- شاخص قابلیت اطمینان و رزرو

با توجه به روابط (۳۰) و (۳۴)، میانگین شاخص قابلیت اطمینان و میزان حداقل این شاخص در طول دوره اجرای برنامه‌های تعمیراتی را می‌توان مورد بررسی قرار داد. این بررسی بر روی این موضوع استوار است که اگر از یک برنامه تعمیراتی برای خروج واحدها استفاده شود، این خروج بر روی شاخص قابلیت اطمینان در دیگر برنامه‌ها تاثیری می‌گذارد.

جدول (۶): مقدار متوسط و حداقل شاخص قابلیت اطمینان در طول

سال برای منابع الکتریکی در برنامه‌های مختلف

	PMS	EMS	HMS	CMS	
متوسط	۰/۹۲۱	۰/۹۳۱	۰/۸۲۹	۰/۸۶۵	
حداقل	۰/۷۴۸	۰/۵۶۲	۰/۲۳۷	۰/۳۴۷	

مقدار شاخص قابلیت اطمینان شبکه‌ی الکتریک با توجه به برنامه خروج منابع CHP و CCHP در برنامه‌های مختلف در جدول (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان میانگین شاخص در برنامه مختص شبکه الکتریکی با برنامه پیشنهادی تقریباً یکسان است. این در حالیست که اگر از برنامه مربوط به منابع حرارتی و یا سرمایه‌ی، مولدهای تولید هم‌زمان به تعمیرات روند میزان قابلیت اطمینان شبکه‌ی الکتریکی کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، در صورت مرجع قراردادن پنجره‌ی زمانی برنامه‌های دیگر برای زمان‌بندی نگاهداشت منابع CHP و CCHP، میزان میانگین قابلیت اطمینان کاهش خواهد یافت. از سویی دیگر مقدار حداقل رزرو در برنامه پیشنهادی بیشتر از میزان حداقل شاخص دیگر برنامه‌ها می‌باشد. بر اساس جدول (۷) و (۸) این موضوع در مورد شبکه‌های دیگر نیز برقرار است.

جدول ۷: مقدار متوسط و حداقل شاخص قابلیت اطمینان در طول

سال برای منابع حرارتی در برنامه‌های مختلف

	PMS	EMS	HMS	CMS	
متوسط	۰/۹۴۱	۰/۸۷۴	۰/۹۵	۰/۸۵۱	
حداقل	۰/۶۲۵	۰/۳۴۲	۰/۶۳۸	۰/۵۱۱	

جدول ۸: مقدار متوسط و حداقل شاخص قابلیت اطمینان در طول

سال برای منابع سرمایه‌ی در برنامه‌های مختلف

	PMS	EMS	HMS	CMS	
متوسط	۰/۸۹۹	۰/۸۴۹	۰/۸۵۲	۰/۹۳۸	
حداقل	۰/۵۵۱	۰/۴۸۳	۰/۴۹۷	۰/۶۰۵	

۱-۲-۳- هزینه نگاهداشت در برنامه‌ها

در حالت کلی هنگامی که منابع یک شبکه به صورت مستقل برنامه‌ریزی می‌شوند، هزینه میان‌مدت بهره‌برداری پایین‌تری خواهد داشت. به بیان بهتر در یک شبکه چندحاملی انتظار می‌رود، هزینه‌های میان‌مدت نگاهداشت منابع تولیدکننده هر حامل به صورت مستقل، کمتر از برنامه‌ریزی هماهنگ شبکه خواهد بود. در این شبیه‌سازی عددی هزینه‌های بهره‌برداری میان‌مدت همان‌گونه که در جدول (۹) مشاهده می‌شود، تغییر چندانی ننموده است.

جدول (۹): میزان هزینه برنامه‌های نگاهداشت مختلف بر حسب (M\$)

۱۲۱۹	۵۷۴	هزینه‌ی برنامه شبکه‌ی الکتریکی
	۳۱۴	هزینه‌ی برنامه شبکه‌ی گرمایش
	۳۳۱	هزینه‌ی برنامه شبکه‌ی سرمایه‌ی
۱۲۲۱/۷		هزینه‌ی برنامه پیشنهادی

۴- نتیجه‌گیری

در برنامه‌ریزی میان‌مدت شبکه‌های چندحاملی، برنامه‌ریزی تعمیرات واحدهای تولید به سبب ارتباط میان حامل‌ها و وجود منابع تولید هم‌زمان، پیچیده خواهد بود. در این مقاله، مدلی به منظور زمان‌بندی تعمیرات منابع تولید در سیستم‌های چندحاملی انرژی با ملاحظه هزینه‌های بهره‌برداری و معیار قابلیت اطمینان ارائه شد و مشاهده گردید که با حفظ شاخص‌های قابلیت اطمینان و بدون افزایش محسوسی در هزینه‌های میان‌مدت برنامه تعمیرات، می‌توان یک پنجره‌ی زمانی برای خروج هماهنگ واحدهای تولید ارائه داد. این برنامه چالش تعیین زمان خروج بهینه برای واحدهای تولید هم‌زمان در شبکه‌های مختلف انرژی را مرتفع خواهد ساخت. از سوی دیگر مدل پیشنهادی مانع کاهش میانگین و حداقل شاخص قابلیت اطمینان در شبکه‌ها به علت استفاده از پنجره‌های زمانی مختلف می‌شود. همچنین با ارائه رزرو ترکیبی در شبکه‌های چندحامله میزان رزرو مستقل مورد نیاز برای هر حامل کمتر خواهد شد و در نتیجه میزان حداقل رزرو باقی‌مانده افزایش خواهد یافت.

پیوست

علائم و نمادها

اندیس‌ها

I اندیس واحد تولید

N اندیس زیربازه‌های زمانی

T اندیس بازه‌های زمانی

مجموعه‌ها

φ^p مجموعه واحدهایی که نسبت به هم دارای حق تقدم برای تعمیرات می‌باشند.

φ^s مجموعه واحدهایی که نسبت به هم دارای فاصله زمانی برای تعمیرات می‌باشند.

φ^o مجموعه واحدهایی که نسبت به هم دارای هم‌پوشانی در تعمیرات می‌باشند

پارامترها

π_i^{Fx} هزینه ثابت (\$/h)

π_i^m هزینه تعمیرات (\$/MW)

$\pi_i^p(t, s)$ هزینه تولید (\$/MWh)

π_i^{Su} هزینه روشن شدن (\$)

duri زمان تعمیرات واحد i

$\underline{N}_i(t)$ حداکثر تعداد واحدهایی که می‌توانند در تعمیرات باشند

$R_{min}(t,s)$ حداقل مقدار شاخص قابلیت اطمینان در هر بازه زمانی

مبتنی بر منابع CHP از طریق برنامه‌ریزی تولید و پاسخ تقاضا، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۳، صفحه ۱۹۷-۲۰۹، ۱۳۹۵.

[7] L. M. Ramirez-Elizondo and G. C. Paap, "Unit commitment in multiple energy carrier systems," In Proc. North American Power Symposium (NAPS), Starkville, MS, USA, pp. 1-6, 2009.

[8] M. Geidl and G. Andersson, "Optimal power dispatch and conversion in systems with multiple energy carriers," In proc. 15TH Power systems computation conf, Liège, Belgium, 2005.

[9] M. Moeini-Aghtaie, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, and E. Hajipour, "Multiagent genetic algorithm: an online probabilistic view on economic dispatch of energy hubs constrained by wind availability," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol.5, pp. 699-708, 2014.

[10] M. Geidl and G. Andersson, "Optimal power flow of multiple energy carriers," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, pp. 145-155, 2007.

[11] W. GU, W. Zhi and B. Rui, "Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 54, pp. 26-37, 2014.

[12] A. Froger, M. Gendreau, J. Mendoza and E. Pinson, "Maintenance scheduling in the electricity industry: A literature review," European Journal of Operational Research, vol. 251, pp. 695-706, 2016.

[13] A. J. Conejo, R. García-Bertrand and M. Díaz-Salazar, "Generation maintenance scheduling in restructured power systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, pp. 984-992, 2005.

[14] A. Badri and A. N. Niazi, "Preventive generation maintenance scheduling considering system reliability and energy purchase in restructured power systems," International Journal of Basic and Applied Scientific Research, vol. 12, pp. 12773-12786, 2012.

[15] M. El-Sharkh and A. El-Keib, "Maintenance scheduling of generation and transmission systems using fuzzy evolutionary programming," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, pp. 862-866, 2003.

[16] J. Yellen, T. Al-Khamis, S. Vemuri and L. Lemonidis, "A decomposition approach to unit maintenance scheduling," IEEE Trans. Power Syst., vol. 7, no. 2, pp. 726-733, May 1992.

[17] M. A. Latify, H. Seifi and H. R. Mashhadi, "An integrated model for generation maintenance coordination in a restructured power system involving gas network constraints and uncertainties," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 46, pp. 425-440, 2013.

[18] M. Marwali and S. Shahidepour, "Integrated generation and transmission maintenance scheduling with network constraints," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 13, pp. 1063-1068, 1998.

[19] E. Da Silva, M. TH. Schilling and MC. Rafael, "Generation maintenance scheduling considering transmission constraints," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, pp. 838-843, 2000.

[20] L. Garver, "Adjusting maintenance schedules to levelize risk," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-91, no. 5, pp. 2057-2063, 1972.

[۲۱] عباس مارینی، محمدامین لطیفی، محمدصادق قاضی‌زاده، «زمان‌بندی توأم تعمیرات واحدهای تولیدی و منابع ذخیره‌ساز انرژی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۲۸۵-۲۹۷، ۱۳۹۵.

[22] W. GU, W. Zhi and B. Rui, "Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 54, pp. 26-37, 2014.

[23] S. A. Gabriel, A. J. Conejo and J. D. Fuller, *Complementarity modeling in energy markets* vol. 180: Springer Science & Business Media, 2012.

میزان همپوشانی زمان تعمیرات برای واحدهای i_1 و i_2
 $OVl_{i_1 i_2}$
 میزان همپوشانی زمان تعمیرات برای مولفه‌های ۱ و ۲ واحد i
 $OVl_{i(v_{i1})i(v_{i2})}$
 بردار تقاضا شبکه (MW)
 $DN(t,s)$
 شیب مجاز کاهش تولید مولفه‌های واحد i
 R_{Gi}^{down}
 شیب مجاز افزایش تولید مولفه‌های واحد i
 R_{Gi}^{up}
 حداکثر ظرفیت تولید واحد i (MW)
 G_i^{max}
 حداقل ظرفیت تولید واحد i (MW)
 G_i^{min}
 حداقل میزان رزرو شبکه (MW)
 $R_{total}^{min}(t,s)$
 بازه زمانی میان پایان تعمیرات مؤلفه ۱ و آغاز تعمیر مؤلفه ۲ برای واحد i
 $SEP_{i(v_{i1})i(v_{i2})}$
 بازه زمانی میان پایان تعمیرات واحد ۱ و آغاز تعمیرات واحد ۲
 $SEP_{i_1 i_2}$
 حداقل نسبت تبدیل تولید گرما به برق در CCHP
 E_i^{min}
 حداکثر نسبت تبدیل تولید گرما به برق در CCHP
 E_i^{max}
 حداقل نسبت تبدیل تولید گرما به برق در CCHP
 H_i^{min}
 حداکثر نسبت تبدیل تولید گرما به برق در CCHP
 H_i^{max}
 توابع و متغیرها
 $RIX(t,s)$
 شاخص قابلیت اطمینان در بازه t و زیر بازه s
 $G_i(t,s)$
 بردار متغیر تولید واحد i در بازه t و زیر بازه s
 $U_i(t,s)$
 متغیر باینری تعیین وضعیت روشن و خاموشی واحد i در بازه t و زیر بازه s (۱ برای روشن‌بودن و ۰ برای خاموشی)
 $M_i(t)$
 متغیر باینری تعیین وضعیت تعمیرات واحد i در بازه t و زیر بازه s (۱ برای در تعمیربودن و ۰ برای در مدار کار بودن)
 $\omega_i(t,s)$
 متغیر باینری روشن‌شدن واحد i
 $R^{SR}(t,s)$
 متغیر تصمیم رزرو چرخان در بازه زمانی t و زیر بازه s

مراجع

[1] M. Salimi, H. Ghasemi and M. Adelpour, "Optimal planning of energy hubs in interconnected energy systems: a case study for natural gas and electricity," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, pp. 695-707, 2015.

[2] R. Evins, K. Orehounig and J. Carmeliet "New formulations of the 'energy hub' model to address operational constraints," Energy, vol. 73, pp. 387-398, 2014.

[3] A. Shahmohammadi, M. Moradi-Dalvand, H. Ghasemi, "Optimal design of multicarrier energy systems considering reliability constraints," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, pp. 878-886, 2015.

[4] H. Barot and K. Bhattacharya, "Security coordinated maintenance scheduling in deregulation based on genco contribution to unserved energy," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, pp. 1871-1882, 2008.

[5] T. Krause, G. Andersson and K. Frohlich, "Multiple-energy carriers: modeling of production, delivery, and consumption," Proceedings of the IEEE, vol. 99, pp. 15-27, 2011.

[۶] داود روشن‌دوست؛ رحمت‌الله هوشمند؛ اسکندر قلی‌پور؛ مصطفی نصرت آبادی، «طراحی یک سیستم مدیریت انرژی برای یک ریزشبکه صنعتی

زیر نویس‌ها

⁶ Proposed Maintenance Scheduling (PMS)

⁷ Electric Maintenance Scheduling (EMS)

⁸ Heat Maintenance Scheduling (HMS)

⁹ Cool Maintenance Scheduling (CMS)

¹ Multi Carrier Energy System (MCES)

² Combined Cooling, Heating and Power (CCHP)

³ The Karush-Kuhn-Tucker Conditions (KKT)

⁴ Mixed Integer Programing (MIP)

⁵ General Algebraic Modeling System (GAMS)