ارزیابی و تعیین استراتژی بهینه برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت مقید واحدهای نیروگاهی در حضور منابع پاسخ‌گوی بار

مژگان ملاحسنی‌پور، مسعود رشیدی‌نژاد، امیر عبدالهی
دانشکده برق و الکترونیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان
کرمان، ایران
m.mollahassani@gmail.com, mrashidi@uk.ac.ir, a.abdollahi@uk.ac.ir

چکیده: لزوم توجه به تجدید ساختار صنعت برق و بازنگری در روش‌های برنامه‌ریزی سیستم قدرت، امری اجتناب-ناپذیر می‌باشد. در این بین برنامه‌های مدیریت بار یکی از گزینه‌های اثرگذار بر سیاست‌های حوزه تصمیم‌گیری انرژی می‌باشند که؛ مدیریت برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت تا بلندمدت سیستم‌قدرت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت پیشگیرانه واحدهای نیروگاهی نیز تحت تأثیر برنامه-های پاسخ‌گویی بار قرار می‌گیرد. در مقاله پیش‌رو، از منابع پاسخ‌گویی بار به عنوان منبعی مجازی برای تدارک رزرو سیستم استفاده شده است. لذا با ارائه مدلی جامع، اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی برنامه‌های خدمات جانبی پاسخ‌گوی بار بر برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت پیشگیرانه مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار پیشنهادی به صورت یک مسأله خطی آمیخته با اعداد صحیح ارائه شده است. در این‌جا برنامه‌ریزی توأمان رزرو و انرژی با هدف کمینه‌سازی هزینه و آلایندگی انجام می‌گیرد. هم‌چنین برنامه بهینه تعمیرات، وضعیت تعهد واحدها و سطح مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخ-گویی بار مشخص می‌گردد. مدل پیشنهادی به شبکه استاندارد IEEE-RTS اعمال شده و نتایج حاصله حاکی از مؤثر بودن مدل پیشنهادی در کاهش آلاینده‌های انتشاریافته بخش تولید و کاهش هزینه‌های سیستم می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: منابع پاسخ‌گوی بار؛ برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه مقید؛ برنامه‌ریزی انرژی و رزرو؛ برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح؛ معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی.

۱. مقدمه

امروزه با افزایش مصرف انرژی و هم‌چنین اهمیت ملاحظات زیست‌محیطی، زمان و میزان مصرف انرژی به چالشی مهم مبدل شده است. در محیط تجدید ساختار یافته صنعت برق، مدیریت سمت تقاضا یکی از گزینه‌های اثرگذار بر سیاست‌های حوزه تصمیم‌گیری انرژی می‌باشد. پاسخ تقاضا (DR) را می‌توان ایجاد تغییر در مصرف برق توسط مشترکین از حالت طبیعی مصرف آن‌ها در پاسخ به تغییرات قیمت برق در طول زمان تعریف کرد. انجمن انرژی آمریکا، پاسخ‌گویی تقاضا را تغییر در الگوی مصرف انرژی توسط مصرف‌کنندگان، در پاسخ به تغییر قیمت برق در طول زمان، یا برنامه‌های اقتصادی طرح شده برای تشویق به عدم مصرف در زمان افزایش قیمت و یا کاهش قابلیت اطمینان؛ معرفی کرده است. به‌طور کلی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به دو دسته کلی برنامه‌های تشویقی محور و برنامه‌های تعرفه زمانی تقسیم می‌شوند که هریک به زیر گروه-هایی تقسیم‌بندی می‌شوند. جزئیات بیشتر در ارتباط با منابع پاسخ‌گویی در [۱] موجود می‌باشد. برنامه‌های پاسخ‌گویی

Archive of SID

www.SID.ir

فوایدی را از جمله کاهش هزینه، کاهش آلایندگی، بهبود قابلیت اطمینان، کاهش وابستگی به منابع فسیلی و افزایش درآمد ناشی از کاهش سرمایه‌گذاری بر روی احداث نیروگاه‌های جدید را به دنبال خواهند داشت [۲].

در مقاله حاضر، در راستا بررسی فواید اقتصادی و زیست-محیطی برنامه‌های سمت تقاضا، مدلی هزینه - آلاینده محور از برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت پیشگیرانه مقید در حضور منابع پاسخ‌گویی بار ارائه شده است.

تعمیر و نگهداشت پیشگیرانه مجموعه‌ای از اعمال از پیش تعیین‌شده در راستای افزایش ایمنی و طول عمر تجهیزات، و هم‌چنین کاهش وقفه‌های ناخواسته در تجهیزات می‌باشد که در زمانی مشخص صورت می‌پذیرند [۳]. برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت پیشگیرانه واحدهای نیروگاهی منتج به سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان می‌گردد؛ که بر سایر برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت سیستم قدرت، از جمله تعهد تولید اثرگذار می‌باشد [۴]. به‌طور کلی برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت پیشگیرانه واحدهای تولیدی یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده با ماهیت برنامه‌ریزی مختلط با اعداد صحیح می‌باشد. در دهه‌های اخیر روش‌های متنوعی شامل روش‌های قطعی، ابتکاری و ترکیبی برای حل مسئله مذکور به‌کار گرفته شده است. روش‌های قطعی مبتنی بر روش‌های ریاضی‌محور می‌باشند و توانایی یافتن جواب در مسائلی با مقیاس بزرگ را در بازه زمانی تعریف شده ندارند [۵]. این محدودیت منجر به معرفی روش‌های ابتکاری گردید. گرچه روش‌های ابتکای قادر به حل مسائل پیچیده می‌باشند اما الزاماً یافتن جواب بهینه را تضمین نمی نمایند. در [۶]، برنامه بهینه تعمیرات به‌منظور کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، با بهره‌گیری از الگوریتم کلونی مورچه‌ها مشخص شده‌است. در [۷]، برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت با روش بهینه‌سازی سرد شدن فلزات انجام می‌پذیرد. در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از نرم‌افزارهای تجاری در حل مسئله برنامه‌ریزی تعمیرات مورد توجه قرار گرفته است [۱۰-۸]. در [۸]، برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت واحدهای نیروگاهی در حضور قیود شبکه مورد بررسی قرار گرفته شده است. در [۹]، علاوه بر قیود متداول تعمیرات و تولید، محدودیت شبکه انتقال و محدودیت سوخت نیز در برنامه‌ریزی تعمیرات لحاظ شده‌اند. در [۱۰] علاوه بر هزینه بهره‌برداری، هزینه تدارک رزرو و میزان آلایندگی نیز در فرآیند بهینه‌سازی موردتوجه قرار گرفته؛ لذا سطح مشارکت واحدهای تولیدی در تأمین رزرو و تقاضا به طور هم‌زمان تعیین می‌گردد.

در مقاله پیش‌رو، به منظور بررسی اثرات منابع پاسخ‌گوی بار بر روی برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت مقید، ساختاری اقتصادی-زیست‌محیطی محور ارائه شده است. در این جا از منابع پاسخ‌گویی بار به عنوان منبعی مجازی برای تدارک رزرو استفاده شده است. ساختار پیشنهادی؛ برنامه بهینه تعمیرات، وضعیت راه‌اندازی واحدهای نیروگاهی، سطح انرژی و رزرو، و میزان مشارکت مصرف‌کنندگان را در برنامه‌های پاسخ‌گویی به نحوی تعیین می‌کند که هزینه کل سیستم و میزان آلایندگی به‌طور هم‌زمان کمینه گردند. مدل پیشنهادی در قالب یک مسأله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح (MILP) ساختار یافته و از بهینه‌ساز CPLEX که قابلیت بسیار بالایی در حل مسائل MILP ، استفاده شده است [۱۱].

مقاله پیش‌رو به صورت زیر ساختار یافته است: مدل پیشنهادی مسئله برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت مقید در حضور منابع پاسخ‌گویی در بخش ۲ به تفصیل بیان شده‌است. بخش ۳ نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد و سرانجام نتیجه‌گیری بحث در بخش ۴ بیان شده است.

۲. توصیف مدل و فرمول‌بندی

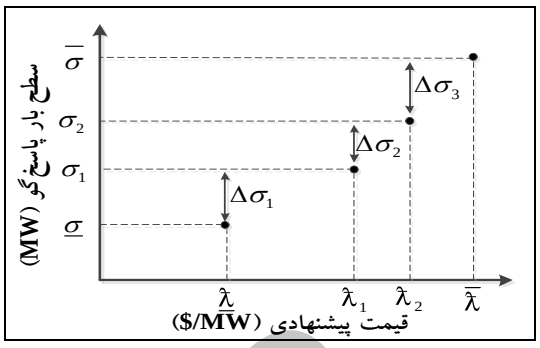
در مدل پیشنهادی برقراری ارتباط بین منابع تولید نیروگاهی و منابع مجازی تولید سمت مصرف حائز اهمیت می-باشد. سازوکار مدل بدین صورت می‌باشد که در ابتدا مشخصات واحدهای نیروگاهی، شبکه انتقال، بار و پیشنهادات سمت تقاضا برای شرکت در برنامه‌های DR در اختیار اپراتور مستقل سیستم (ISO) قرار می‌گیرند. پس از دریافت کلیه اطلاعات، ISO برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت مقید را در حضور منابع DR انجام می‌دهد. در ساختار ارائه شده؛ زمان بهینه تعمیرات واحدهای نیروگاهی، وضعیت راه‌اندازی واحدها، برنامه‌ریزی سطح رزرو و انرژی واحدهای تولیدی و هم‌چنین میزان مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخ‌گویی به نحوی تعیین می‌گردد که هزینه متحمل شده و میزان آلودگی در بازه زمانی مورد مطالعه کمینه گردد.

۲.۱.مدل برنامه پاسخ‌گوی بار

در مقاله حاضر منابع پاسخ‌گویی بار به عنوان منبعی مجازی برای تأمین رزرو به کار می‌روند. هر مصرف‌کننده پیشنهاد خود را در راستای کاهش بار و مشارکت در تدارک رزرو، با واسطه در اختیار ISO قرار می‌دهد. بالواقع فراهم‌کننده‌های پاسخ‌گویی تقاضا (DRPs) پیشنهادات مصرف‌کنندگان را جمع‌آوری می-

www.SID.ir

کنند و به عنوان واسطه بین مصرف‌کنندگان و اپراتور مستقل سیستم عمل می‌کنند. استراتژی قیمت‌دهی قطع بار و مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی مطابق «شکل ۱» می‌باشد [۱۲].



شکل ۱: استراتژی قیمت دهی برنامه‌های پاسخ‌گو بار

در صورت مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های مدیریتی تقاضا، حداقل میزان مشارکت DRP در هر دوره زمانی $\underline{\sigma}(d,t)$ میبایستی از یک مقدار از پیش تعیین شده که توسط ISO تعیین می‌گردد، بزرگتر باشد. در (۱) و (۲) مدلی خطی از استراتژی قیمت‌دهی در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ارائه شده است. $\vartheta(\nu,d,t)$ متغییری باینری می‌باشد که وضعیت پیشنهاد کاهش بار را با قیمت پیشنهادی در بلوک ν یک DRP نشان می‌دهد. در صورت پذیرش قیمت و قطع بار $\vartheta(\nu,d,t)$ یک و در غیر این صورت صفر می‌باشد. $\sigma(\nu,d,t)$ و $\hat{\lambda}(\nu,d,t)$ به ترتیب برابر با میزان بار قابل قطع و هزینه پرداختی به مشتری در ازاء قطع بار در ν^{th} بلوک DRP می‌باشند. $\rho_{Total}(d,t)$ و $\hbar_{DR}(d,t)$ نیز به ترتیب، هزینه کل پرداختی به مشتریان و میزان کل مشارکت مصرف کنندگان در هر DRP می‌باشند. تعداد بلوک‌های قیمت‌دهی مصرف‌کنندگان به وسیله N_{SDR} نشان داده می‌شوند.

$$\hbar_{DR}(d,t)=\underline{\sigma}(d,t)\underline{\vartheta}(d,t)+\sum_{\nu=1}^{N_{SDR}}\sigma(\nu,d,t)\vartheta(\nu,d,t);\quad \forall d,\forall t. \tag{۱}$$

$$\rho^{Total}(d,t)=\underline{\hat{\lambda}}(d,t)\underline{\sigma}(d,t)\underline{\vartheta}(d,t)+\sum_{\nu=1}^{N_{SDR}}\sigma(\nu,d,t)\hat{\lambda}(\nu,d,t)\vartheta(\nu,d,t);\quad \forall d,\forall t. \tag{۲}$$

۲.۲. برنامه‌ریزی تعمیرونگهداشت پیشگیرانه مقید در حضور منابع پاسخ‌گو بار

در این بخش ساختار مسئله تعمیرونگهداشت مقید در حضور منابع DR با هدف کمینه‌سازی هم‌زمان آلایندگی و هزینه کل شامل هزینه تأمین انرژی، رزرو، تعمیرات و هزینه متحمل‌شده ناشی از مشارکت در برنامه پاسخ‌گویی بار ارائه شده است. روش پیشنهادی به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح (MILP) ساختار یافته است. در مقاله حاضر از بهینه‌ساز CPLEX و با بهره‌گیری از نرم‌افزار تجاری GAMS که قابلیت بسیار بالایی در حل مسائل MILP دارد، استفاده شده است. تابع هدف پیشنهادی مسئله تعمیر و نگهداشت به صورت (۳) می‌باشد که w_c و w_e به ترتیب ضرایب وزنی مربوط به ترم هزینه و آلایندگی می‌باشند.

$$\begin{aligned} &Minimize\ O.F.:\\ &w_c\begin{pmatrix} Cost_{Fuel}+Cost_{Maintenance}+\\ Cost_{Reserve}+Cost_{DR\ Programs}\end{pmatrix}\\ &+w_e\left(Emitted_{Polllution}\right). \end{aligned} \tag{۳}$$

$$where:\quad w_e+w_c=1.$$

توضیحات مربوط به ترم‌های تابع هدف در ادامه بیان شده است.

- هزینه سوخت واحدهای تولیدی تابعی درجه دو از توان تولیدی می‌باشد که در (۴) نشان داده شده و می‌توان آن را با چندین بلوک تکه‌ای خطی تخمین زد که در (۵) فرموله شده است. $a(i)$، $b(i)$ و $c(i)$ ضرایب تابع سوخت و $P(i,t)$ توان تولیدی نیروگاه می‌باشد. $\underline{F}(i)$ حد پایین هزینه به ازاءِ مینیمم تولید، و $P_m(i,t)$ و $b_m(i)$ نیز به ترتیب، توان تولیدی در قسمت m تابع سوخت خطی در دوره t، و شیب بخش m در تابع سوخت خطی نیروگاه i می‌باشند. تعداد بلوک‌های تابع هزینه خطی و تعداد نیروگاه‌ها به ترتیب با N_{SF} و N_G نشان داده می‌شوند. وضعیت تعهد نیروگاه i در هر دوره با $u(i,t)$ مدل شده؛ اگر واحد تولیدی در مدار باشد $u(i,t)$ یک و در غیر این‌صورت صفر می‌باشد.

$$Cost_{Fuel}:\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_G}\left(a(i)+b(i)P(i,t)+c(i)P^2(i,t)\right). \tag{۴}$$

$$Cost_{Fuel}:\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_G}\left(\underline{F}(i)u(i,t)+\sum_{m=1}^{N_{SF}}P_m(i,t)b_m(i)\right). \tag{۵}$$

Archive of SID
www.SID.ir

متغیر تعمیرات توسط $z(i,t)$ مدل شده و چنان‌چه نیروگاه تحت تعمیر قرار گیرد $z(i,t)$ یک و در غیر این‌صورت صفر می‌باشد. $M_C(i)$ هزینه تعمیر و بازرسی نیروگاه i می‌باشد.

$$Cost_{Maintenance}: \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_G} z(i,t)M_C(i) \qquad (۶)$$

- هر نیروگاه قیمتی را برای تدارک رزرو سیستم، $\pi(i)$، پیشنهاد می‌دهد. لذا با توجه به قیمت‌های پیشنهادی انرژی و رزرو، سطح ظرفیت رزرو هر واحد، $url(i,t)$ ، مشخص می‌گردد.

$$Cost_{Reserve}: \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_G} url(i,t)\pi(i) \qquad (۷)$$

- هزینه پرداختی به مشترکین در ازاءِ کاهش بار و مشارکت در برنامه‌های مدیریتی تقاضا در (۸) مدل شده است. N_{DRP} معرف تعداد فراهم‌کننده‌های تقاضا می‌باشد.

$$Cost_{DR\ Programs}: \sum_{t=1}^{T}\sum_{d=1}^{N_{DRP}}\left(\underline{\lambda}(d,t)\underline{\sigma}(d,t)\underline{\vartheta}(d,t)+\sum_{\nu=1}^{N_{SDR}}\sigma(\nu,d,t)\lambda(\nu,d,t)\vartheta(\nu,d,t)\right) \qquad (۸)$$

- آلایندگی واحدهای تولیدی نیز عموماً تابعی درجه دو از توان تولیدی، مطابق با (۹) در نظر گرفته شده؛ که در (۱۰) فرم خطی شده آن ارائه شده است. $\alpha(i)$، $\beta(i)$ و $\gamma(i)$ ضرایب تابع آلودگی در واحد نیروگاهی می‌باشند. $\underline{e}(i)$ حد پایین انتشار به ازاءِ مینیمم تولید است. $\Upsilon_m(i,t)$ و $e_m(i)$ به ترتیب، توان تولیدی در قسمت m تابع خطی‌شده، و شیب بخش m تابع انتشار خطی نیروگاه می‌باشد. تعداد بلوک‌های تابع انتشار خطی به وسیله N_{SE} نشان داده می‌شود.

$$Emitted_{Pollution}: \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_G}\left(\alpha(i)+\beta(i)P(i,t)+\gamma(i)P^2(i,t)\right) \qquad (۹)$$

$$Emitted_{Pollution}: \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_G}\left(\underline{e}(i)u(i,t)+\sum_{m=1}^{N_{SE}}\Upsilon_m(i,t)e_m(i)\right) \qquad (۱۰)$$

تابع هدف بیان شده در (۳) از محدودیت‌های زیر تبعیت می‌کند.

- توازن بار

$$\sum_{i=1}^{N_G}P(i,t) = \sum_{b=1}^{N_B}P_D(b,t)-\sum_{d=1}^{N_{DRP}}\hbar_{DR}(d,t)+loss(t); \quad \forall t. \qquad (۱۱)$$

- محدوده مجاز توان تولیدی در نیروگاه

$$\underline{P}(i)u(i,t)+\sum_{m=1}^{N_{SF}(i)}P_m(i,t) \le \bar{P}(i)u(i,t) - url(i,t); \quad \forall i,\forall t. \qquad (۱۲)$$

- تدارک رزرو سیستم

$$\sum_{i=1}^{N_G}u(i,t)\bar{P}(i) \ge \sum_{b=1}^{N_B}P_D(b,t)-\sum_{d=1}^{N_{DRP}}\hbar_{DR}(d,t) + loss(t)+SR(t); \quad \forall t. \qquad (۱۳)$$

$$0 \le url(i,t) \le \left[\bar{P}(i)-\underline{P}(i)\right]u(i,t); \quad \forall i,\forall t. \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G}url(i,t)+\sum_{d=1}^{N_{DRP}}\hbar_{DR}(d,t) \ge SRR(t); \quad \forall t. \qquad (۱۵)$$

در روابط (۱۱) تا (۱۵)؛ تلفات سیستم، بار درخواستی در هر باس‌بار، و تعداد باس بارها به ترتیب با $loss(t)$، $P_D(b,t)$ و N_B نشان داده می‌شوند. $SR(t)$ نیز معرف حداقل سطح رزرو سیستم است.

- میزان بار قطع‌شده در هر دوره می‌بایستی از یک حد از پیش تعیین شده (ماکزیمم بار قابل قطع هر دوره) یعنی $\eta(d,t)$، کمتر باشد.

$$\hbar_{DR}(d,t) \le \eta(d,t); \quad \forall d,\forall t. \qquad (۱۶)$$

- میزان بار قطع شده در طول دوره زمانی مورد مطالعه در هر DRP با توجه به (۱۷) محدود می‌شود.

$$\sum_{t=1}^{T}\hbar_{DR}(d,t) \le \bar{\Upsilon}_{LC}(d); \quad \forall d. \qquad (۱۷)$$

- محدودیت مدت زمان تعمیر واحد نیروگاهی

$$\sum_{t=1}^{T}z(i,t) = \zeta(i); \quad \forall i. \qquad (۱۸)$$

Archive of SID

www.SID.ir

- محدودیت یک بار تعمیر: $\varpi(i,t)$ وضعیت شروع تعمیرات نیروگاه می‌باشد. چنان‌چه تعمیرات نیروگاه در دوره t شروع شود، $\varpi(i,t)$ یک و در غیر این‌صورت صفر می‌باشد.

$$\sum_{t=1}^{T}\varpi(i,t)=1; \quad \forall i. \tag{۱۹}$$

- تعمیرات متوالی هر واحد نیروگاهی

$$z(i,t)-z(i,t-1)\le\varpi(i,t); \quad \forall i,\forall t. \tag{۲۰}$$

- محدودیت اتصال

$$z(i,t)+u(i,t)\le 1; \quad \forall i,\forall t. \tag{۲۱}$$

- محدودیت ممانعت تعمیرات

$$z(i,t)+z(j,t)\le 1; \quad \forall t. \tag{۲۲}$$

- محدودیت هم‌زمانی تعمیرات

$$\sum_{i=1}^{N_G} z(i,t)\le \upsilon(t); \quad \forall t. \tag{۲۳}$$

- قیود مرتبط با شبکه: محدودیت انتقال با استفاده از مدل حمل‌ونقل فرموله شده که در (۲۴) آمده است. $L(t)$ و $P_g(t)$ بردار میزان بار و توان تولیدی در هر دوره می‌باشند. $L_{Cur}(t)$ بردار میزان مشارکت مصرف‌کنندگان در هر DRP می‌باشد. s^T، $f(t)$ و $r(t)$ به ترتیب ماتریس تلاقی شاخه و گره، بردار توان اکتیو عبوری از خطوط، و بردار نیروگاه مجازی در راستای انرژی تأمین نشده می‌باشند. $f(l,t)$ توان عبوری از خط، $\overline{f}_L$ ماکزیمم توان بارگذاری خط و ε حد مجاز انرژی تأمین‌نشده در شبکه می‌باشد.

$$\begin{aligned} &s^T f(t)+g(t)+r(t)=L(t)-L_{Cur}(t); \quad \forall t.\\ &|f(l,t)|\le \overline{f}_L; \quad \forall t,\forall l.\\ &\sum_{b=1}^{N_B} r(b,t)\le\varepsilon; \quad \forall t. \end{aligned} \tag{۲۴}$$

۳.مطالعه موردی

۳.۱. مشخصات شبکه موردمطالعه

روش پیشنهادی به شبکه IEEE-RTS شامل ۲۶ واحد نیروگاهی، ۱۵ نیروگاه نفت خام (O_1-O_{15})، ۹ نیروگاه زغال‌سنگی (C_{16}-C_{24})، و ۲ نیروگاه هسته‌ای (N_{25}-N_{26}) اعمال شده است. افق زمانی تحت مطالعه یک ساله (۵۲ هفته) با پیک بار ۲۱۰۰ MW در نظر گرفته شده‌است [۱۳]. تابع سوخت و آلایندگی [۱۴] واحدهای تولیدی توسط ۲۰ بلوک خطی بین ماکزیمم و مینیمم ظرفیت تولید تقریب‌زده شده‌اند. سایر اطلاعات بهره‌برداری و تعمیرونگهداری از [۱۵] اتخاذ شده است. حداقل سطح رزرو سیستم برابر با ظرفیت بزرگترین نیروگاه، ۴۰۰ MW می‌باشد و حداکثر امکان تعمیر هم‌زمان ۳ نیروگاه وجود دارد. حداکثر بار قابل قطع در هر باس بار برابر با ۱۰٪ بار کل آن باس و ماکزیمم مشارکت سالانه مصرف‌کنندگان در هر باس بار برابر با ۵٪ بار کل باس مورد نظر در سال لحاظ شده است. استراتژی قیمت دهی مربوط به برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در «جدول ۱» آورده شده است. در این مطالعه گرچه محدودیت‌های انتقال مدنظر قرار گرفته‌اند، اما از تلفات سیستم صرف‌نظر شده می‌شود. هم‌چنین سطح مجاز انرژی تأمین‌نشده نیز صفر لحاظ شده‌است.

جدول ۱: استراتژی قیمت‌دهی منابع سمت تقاضا

ν	$\sigma(\nu,d)$	$\hat{\lambda}(\nu,d)$
۰	۳۳٪ کل پاسخ‌گویی بار	۱۱
۱	۶۶٪ کل پاسخ‌گویی بار	۱۲
۲	۱۰۰٪ کل پاسخ‌گویی بار	۱۳

۳.۲. آنالیز نتایج شبیه‌سازی

در این‌جا، مطالعات موردی مختلفی به منظور بررسی اثرات برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت پیشگیرانه انجام شده است. در «سناریو ۱» و «سناریو ۲» به ترتیب برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت مقید را بدون درنظرگیری و با درنظرگیری منابع پاسخ‌گویی بار انجام می‌گیرد. در «سناریو ۱» ضرایب w_c و w_e برابر با ۰/۵ درنظرگرفته شده‌اند. حال آن که در «سناریو ۲» به منظور نشان دادن اثرپذیری سطح مشارکت مصرف‌کنندگان از میزان اهمیت ترم‌های آلایندگی و هزینه، مقادیر مختلف w_c و w_e به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

Archive of SID
www.SID.ir

- «سناریو ۱-۲»: w_c و w_e به ترتیب برابر با یک و صفر می‌باشند.
- «سناریو ۲-۲»: w_c و w_e برابر با ۰/۵ می‌باشند.
- «سناریو ۳-۲»: w_c و w_e به ترتیب برابر با ۰/۲ و ۰/۸ می‌باشند.

در ابتدا با اعمال CPLEX 12.4.0 [۱۱]، هزینه کل سیستم شامل هزینه بهره‌برداری و تعمیرات، و رزرو در «سناریو ۱» برابر با ۲۳۵/۲۳ m$ و میزان آلایندگی SO_2 و NO_x به ترتیب برابر با ۹۱/۵ mlbs و ۳۶/۶ mlbs به دست آمده است. حال آن که در «سناریو ۲»، برنامه پاسخ‌گویی بار کاهش چشم‌گیر هزینه و آلایندگی را به دنبال خواهد داشت. در «جدول ۲» میزان هزینه و آلایندگی در هر یک از آنالیزهای «سناریو ۲» آورده شده است. هزینه رزرو مجموع هزینه نگهداشت رزرو در نیروگاه‌های حرارتی و میزان پرداختی به مشترپانی می‌باشد که در برنامه‌های DR شرکت کرده‌اند. با مراجعه به «جدول ۲»، بهینه‌ترین وضعیت از جنبه اقتصادی و جنبه زیست‌محیطی به ترتیب «سناریو ۱-۲» و «سناریو ۳-۲» می‌باشند. توجه به هریک از اهداف مذکور، سبب انحراف از حد مطلوب هدف دیگر می‌گردد. حال آن‌که در «سناریو ۲-۲» برنامه‌ریزی تعمیرات واحدهای تولیدی به نحوی انجام شده است که با کمترین انحراف از وضعیت بهینه اقتصادی و زیست‌محیطی مواجه می‌باشیم. لذا تعیین استراتژی بهینه تعمیرات وابسته به درجه اهمیت هریک از اهداف مورد بررسی می‌باشد.

جدول ۲: هزینه و آلایندگی در آنالیزهای متفاوت سناریو ۲

هزینه و آلایندگی	سناریو ۲-۱	سناریو ۲-۲	سناریو ۲-۳
هزینه بهره‌برداری و تعمیرات ($m)	۱۷۸/۱۱	۱۶۶/۰۱	۱۶۱/۷۳
هزینه کلی رزرو ($m)	۲۵/۰۳	۴۳/۰۹	۵۰/۷۳
هزینه کل ($m)	۲۰۳/۱۴	۲۰۹/۱	۲۱۲/۴۶
میزان انتشار SO_2 (mlbs)	۳۵/۳۲	۳۲/۹۱	۳۲/۰۵
میزان انتشار NO_x (mlbs)	۸۸/۳۱	۸۲/۲۷	۸۰/۱۳

با توجه به مشابهت ضرایب w_c و w_e در «سناریو ۱» و «سناریو ۲-۲»، در «جدول ۳» به بررسی دقیق اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی برنامه پاسخ‌گویی بار پرداخته شده است. در «جدول ۳» هزینه‌های متحمل شده سیستم به تفکیک و هم‌چنین میزان انتشار گازهای SO_2 و NO_x آورده شده‌است. با مراجعه به «جدول ۳» مشخص است که در شرایط یکسان، برنامه‌های مدیریتی بار سبب کاهش ۲۶/۱۴ m$ در هزینه سیستم می‌گردند. بالواقع در «سناریو ۲» به علت مشارکت مصرف‌کنندگان، تعداد نیروگاه‌های در حال بهره‌برداری در هر دوره نسبت به «سناریو ۱» کمتر می‌گردد. در «سناریو ۱» تعدادی از نیروگاه‌های گران قیمت صرفاً به منظور تدارک رزرو در مدار قرار می‌گیرند که موجب افزایش هزینه بهره‌برداری می‌گردد. این مهم برای ماکزیمم دوره بارگذاری در «جدول ۴» آوره شده است. در سناریو «۲-۲» با توجه به مشارکت MW ۱۶۳ مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در دوره ۵۱، تعدادی از نیروگاه‌ها از مدار خارج می‌شوند.

جدول ۳: مقایسه هزینه و آلایندگی در سناریو ۱ و سناریو ۲-۲

	سناریو ۱	سناریو ۲-۲	تغییرات (٪)
هزینه بهره‌برداری و تعمیرات (m$)	۱۸۴/۴۷	۱۶۶/۰۱	-۱۰/۰۱
هزینه رزرو در نیروگاه‌های متداول (m$)	۵۰/۷۶	۳۴/۵۴	-۳۱/۹۴
هزینه رزرو منابع پاسخ‌گویی (m$)	---	۸/۵۴	---
هزینه کلی رزرو (m$)	۵۰/۷۶	۴۳/۰۹	-۱۵/۱۱
هزینه کل (m$)	۲۳۵/۲۳	۲۰۹/۰۹	-۱۱/۱۱
میزان انتشار SO_2 (mlbs)	۹۱/۵۰	۸۲/۲۶	-۱۰/۰۹
میزان انتشار NO_x (mlbs)	۳۶/۶۰	۳۲/۹	-۱۰/۰۹

جدول ۴: مقایسه وضعیت تعهد واحدها در سناریو ۱ و سناریو ۲-۲

Sec. 2-2	Sec. 1	Unit	Sec. 2-2	Sec. 1	Unit	Sec. 2-2	Sec. 1	Unit
On	On	C_{22}	On	On	C_{16}	Off	On	O_1
On	On	C_{23}	On	On	C_{17}	Off	On	O_2
On	On	C_{24}	On	On	C_{18}	Off	On	O_3
On	On	N_{25}	On	On	C_{19}	On	On	O_{10}
On	On	N_{26}	On	On	C_{20}	Off	On	O_{12}
			On	On	C_{21}	Off	On	O_{13}

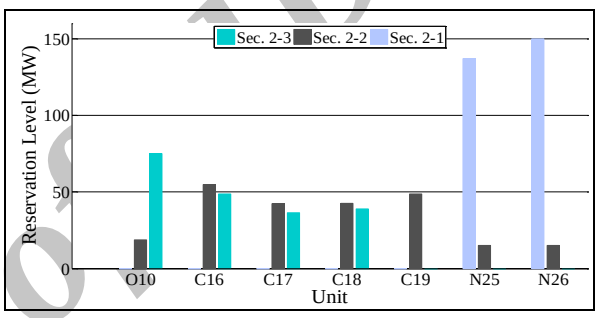
در «جدول ۵» میزان مشارکت مصرف‌کنندگان در تدارک رزرو سیستم در آنالیزهای مختلف «سناریو ۲» برای دو دوره نمونه، دوره ۳۸ و دوره ۵۱، آورده شده است.

جدول ۵: میزان مشارکت سمت مصرف (MW) در تدارک رزرو

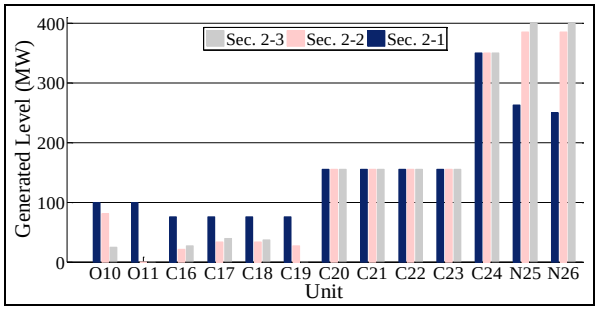
دوره زمانی	سناریو ۲-۱	سناریو ۲-۲	سناریو ۲-۳
دوره ۵۱	۱۱۳	۱۶۳	۲۰۱
دوره ۳۸	۶۷/۷	۹۲/۷	۹۵/۲

Archive of SID
www.SID.ir

در «شکل ۲» و «شکل ۳» به ترتیب نحوه توزیع رزرو و تقاضا در بین نیروگاه‌های در حال بهره‌برداری در آنالیزهای «سناریو ۲» در دوره ۵۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در «شکل ۲» مشخص است؛ در «سناریو ۱-۲» که هدف صرفاً کمینه‌سازی هزینه متحمل شده در سیستم می‌باشد و هیچ توجهی به میزان آلایندگی نشده است، سطح رزرو در نیروگاه-های ارزان قیمت و کم آلاینده (N_{26}-N_{25}) نسبت به حالت‌های دیگر بیشتر می‌باشد تا هزینه کل متحمل‌شده به حداقل میزان خود برسد. در حالی که در «سناریو ۲-۲» و «سناریو ۳-۲» باتوجه به لحاظ نمودن ملاحظات زیست‌محیطی در فرآیند بهینه‌سازی، سطح تولید در نیروگاه‌هایی با آلایندگی کمتر (C_{24}-N_{25}-N_{26}) افزایش می‌یابد که این مهم در «شکل ۳» مشهود می‌باشد.



شکل ۲: سطح رزرو در آنالیزهای مختلف سناریو ۲ در دوره ۵۱



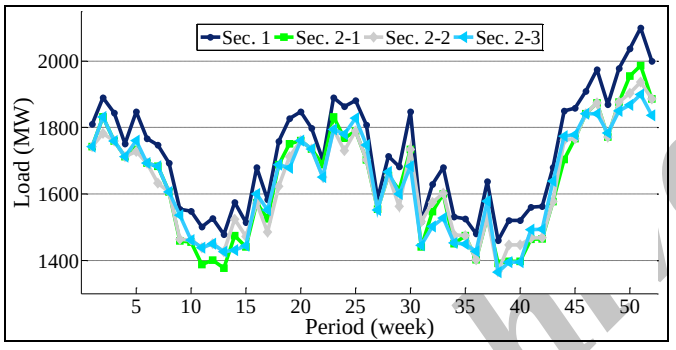
شکل ۳: سطح تولید در آنالیزهای مختلف سناریو ۲ در دوره ۵۱

در «جدول ۶» برنامه بهینه تعمیرات واحدهای نیروگاهی در «سناریو ۱» و آنالیزهای مختلف «سناریو ۲» آورده شده است. با مراجعه به «جدول ۶» این امر مبرهن می‌باشد که در تمامی سناریوها به منظور کاهش هرچه بیشتر هزینه متحمل شده نیروگاه‌های ارزان‌قیمت و کم آلاینده (C_{24}-N_{25}-N_{26}) در ساعات غیر پیک و به طور غیر هم‌زمان از مدار خارج می‌شوند.

در «شکل ۴»، اثرات برنامه‌های DR بر پروفیل بار در آنالیزهای «سناریو ۲» نشان داده است. میزان بار قطع شده در هر دوره بستگی به درجه اهمیت ترم‌های هزینه و آلایندگی دارد. همان‌طور که در «شکل ۴» مشخص است سطح مشارکت مصرف‌کنندگان در تمامی آنالیزها در دوره‌های پیک در مقایسه با سایر دوره‌ها بیشتر می‌باشد تا هزینه سیستم به حداقل مقدار ممکن خود برسد.

جدول ۶: شروع دوره تعمیرات واحدهای نیروگاهی

Sec. 2-3	Sec. 2-2	Sec. 2-1	Sec. 1	Unit	Sec. 2-3	Sec. 2-2	Sec. 2-1	Sec. 1	Unit
۱۶	۲	۲۱	۱۴	O_{14}	۱۹	۲۹	۱	۹	O_1
۱۳	۹	۴۰	۲۲	O_{15}	۲۸	۹	۱۳	۳	O_2
۴۷	۲۲	۱۵	۲۰	C_{16}	۴۵	۲۳	۲	۳۹	O_3
۴۳	۱۷	۲۵	۲۷	C_{17}	۳	۱۴	۱۹	۱۱	O_4
۲۲	۲۵	۱۵	۱	C_{18}	۲۵	۱	۱۸	۴۶	O_5
۴۹	۲۷	۲۷	۳۹	C_{19}	۵	۱۹	۱۳	۳۲	O_6
۶	۱۵	۵	۴۰	C_{20}	۲۲	۴۰	۱۱	۴۷	O_7
۳۷	۱۵	۱۵	۳۱	C_{21}	۴۳	۲۱	۴۴	۱۳	O_8
۲۷	۲۹	۳۱	۱۵	C_{22}	۲۳	۳	۲۴	۳۰	O_9
۱۶	۵	۲۹	۱۷	C_{23}	۲۰	۱۹	۱۹	۲۷	O_{10}
۳۸	۳۳	۳۴	۱۱	C_{24}	۲	۴۹	۳۷	۲۴	O_{11}
۱۰	۹	۹	۶	O_5	۲۵	۳۹	۹	۴۲	O_{12}
۳۱	۳۸	۳۹	۳۴	O_6	۸	۲	۳	۲۳	O_{13}



شکل ۴: تغییرات منحنی بار در حضور منابع پاسخ‌گوی بار

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، از منابع سمت تقاضا به عنوان منبعی مجازی برای تدارک رزرو موردنیاز سیستم استفاده شده است. در این‌جا اثرات این منابع بر برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت پیشگیرانه مقید مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، با ارائه مدلی اقتصادی-زیست‌محیطی محور، اثرات منابع پاسخ‌گو بار، بر برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت مقید بررسی می‌شود. در ساختار پیشنهادی، زمان تعمیرات و نحوه راه‌اندازی نیروگاه‌ها، برنامه‌ریزی انرژی و رزرو، و سطح مشارکت مصرف‌کنندگان در تدارک رزرو به نحوی تعیین می‌شود که میزان هزینه و آلایندگی سیستم حداقل گردند. کاربردی بودن روش پیشنهادی با اعمال به شبکه IEEE-RTS نشان داده شده‌است. نتایج بدست‌آمده مؤید این مطلب می‌باشد که به کارگیری

Archive of SID

www.SID.ir

منابع پاسخ‌گویی بار سبب کاهش هزینه‌های سیستم و آلایندگی، و همچنین تغییر در برنامه بهینه تعمیرات و نحوه راه‌اندازی نیروگاه‌ها می‌شود.

منابع

[1] FERC, Staff Report, "Assessment of demand response and advanced metering," [Online]. Available: http://www.FERC.gov Aug. 2006.

[2] A. Abdollahi, M. P. Moghaddam, M. Rashidinejad, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Investigation of Economic and Environmental-Driven Demand Response Measures Incorporating UC," Smart Grid, IEEE Transactions on, vol. 3, pp. 12-25, 2012.

[3] D. Chen and K. S. Trivedi, "Closed-form analytical results for condition-based maintenance," Reliability Engineering & System Safety, vol. 76, pp. 43-51, 2002.

[4] A. Volkanovski, B. Mavko, T. Boševski, A. Čauševski, and M. Čepin, "Genetic algorithm optimisation of the maintenance scheduling of generating units in a power system," Reliability Engineering & System Safety, vol. 93, pp. 779-789, 2008.

[5] M. Marwali and S. Shahidehpour, "A deterministic approach to generation and transmission maintenance scheduling with network constraints," Electric power systems research, vol .47 , pp. 101-113, 1998.

[6] A. Fetanat and G. Shafipour, "Generation maintenance scheduling in power systems using ant colony optimization for continuous domains based 0–1 integer programming," Expert Systems with Applications, vol. 38, pp. 9729-9735, 2011.

[7] J. T. Saraiva, M. L. Pereira, V. T. Mendes, and J. C. Sousa, "A simulated annealing based approach to solve the generator maintenance scheduling problem," Electric Power Systems Research, vol. 81, pp. 1283-1291, 2011.

[8] A. Badri, A. N. Niazi, and S. M. Hoseini, "Long Term Preventive Generation Maintenance Scheduling with Network Constraints," Energy Procedia, vol. 14, pp. 1889-1895, 2012.

[9] A. Norozpour Niazi, A. Sheikholeslami, and A. Karimi Varaki, "Global Generation Maintenance Scheduling with Network Constraints, Spinning Reserve, Fuel, and Energy Purchase from Outside ",in Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2012 IEEE, 2012, pp. 330-336.

[۱۰] م. ملاحسنی‌پور، م. رشیدی‌نژاد، و ا. عبدالهی، «بررسی اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی تخصیص رزرو در برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداشت پیشگیرانه مقید واحدهای نیروگاهی،» پنجمین کنفرانس صنعت نیروگاه‌های حرارتی، خرداد ۱۳۹۳.

[11] CPLEX 12.4.0 Manual ILOG corp.

[12] M. Parvania and M. Fotuhi-Firuzabad, "Demand response scheduling by stochastic SCUC," Smart Grid, IEEE Transactions on, vol. 1, pp. 89-98, 2010.

[13] M. Mollahassani-pour, A. Abdollahi, and M. Rashidinejad, *"Application of a novel cost reduction index to preventive maintenance scheduling,"* International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 56, pp. 235-240, 2014.

[14] M. Parvania, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Shahidehpour, "Assessing impact of demand response in emission-constrained environments," in Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, 2011

[15] P. Subcommittee, *"IEEE reliability test system,"* Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, pp. 2047-2054, 1979.

Archive of SID

www.SID.ir