بکارگیری قابلیت‌های جدید واحدهای نیروگاهی برای پاسخ‌گویی به عدم قطعیت‌های نفوذ بالای توان باد در شبکه

ایمان‌خوشیان/ دانشگاه‌صنعتی‌سجاد/ مشهد/ ایران/ i.khoshian@gmail.com
مصطفی رجبی مشهدی/ دانشگاه صنعتی سجاد/ شرکت برق منطقه‌ای خراسان/ مشهد/ ایران/ m.rajabimashhadi@ieee.org

کلید واژه: برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره اولیه، عدم‌قطعیت توان باد، کنترل فرکانس، نرخ بارگیری، نرخ بارگیری چندگانه.

چکیده:
امروزه کنترل فرکانس در سیستم‌های قدرت با نفوذ گسترده منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله نیروگاه‌های باد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کمبود منابع ذخیره کنترل فرکانس سریع و کافی برای پاسخ گویی به عدم قطعیت ذاتی موجود در توان باد یکی از عوامل محدود کننده اتصال توربین‌های باد به شبکه است. در این مقاله قابلیت فراهم کردن نرخ بارگیری چندگانه (MRR[1])توسط واحدهای تولیدی برای مقابله با عدم قطعیت موجود در توان باد معرفی شده و در فرمول‌بندی مسأله برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره اولیه وارد شده است. همچنین برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره اولیه با در نظر گرفتن قابلیت‌ها و محدودیت‌های واحدهای تولیدی برای مشارکت در کنترل فرکانس برای یک سیستم نمونه انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در صورت به‌کارگیری قابلیت جدید نرخ بارگیری چندگانه برای پاسخ‌گویی به تغییرات تولید، می‌توان از در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌های جدید اجتناب نمود و هزینه بهره‌برداری شبکه را کاهش داد.

۱. مقدمه

با نفوذ گسترده منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت امروزی استفاده از فناوری‌های جدید برای کنترل فرکانس بیش از گذشته اهمیت دارد. خدمات کنترل فرکانس که توسط واحدهای حرارتی فراهم می‌شود را با توجه به اهمیت و زمان پاسخ‌گویی آن‌ها می‌توان به سه دسته کلی خدمات کنترل فرکانس اولیه، ثانویه و ثالثیه تقسیم‌بندی کرد [۲،۱]. ذخیره اولیه سریع‌ترین ذخیره در میان ذخیره‌های موجود بوده و بعد از چندین ثانیه پس از یک تغییر ناگهانی در بار و یا تولید سیستم بکارگرفته می‌شود. در ذخیره کنترل فرکانس اولیه، واحدهای تولیدی پس از چندین ثانیه پس از وقوع حادثه بر طبق مشخصه دروپ گاورنر خود به انحراف فرکانس از مقدار نامی پاسخ می‌دهند. ذخیره کنترل فرکانس ثانویه برای جبران ذخیره کنترل فرکانس اولیه مصرف شده و بازگرداندن فرکانس و خطای کنترل ناحیه به مقدار برنامه‌ریزی شده بعد از حدود چندین دقیقه بکار گرفته می‌شوند [۳،۴]. ذخیره کنترل فرکانس ثالثیه برای جبران ذخیره‌های استفاده شده در مراحل قبل و پس از حدود ۱۵ الی ۳۰ دقیقه بکار گرفته می‌شود [۶،۵].

سهم مشارکت هر واحد تولیدی در کنترل فرکانس از برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره اولیه مشخص می‌شود. مکانیزم برگزاری حراج برای تأمین انرژی و خدمات جانبی به روش های متفاوت از جمله برنامه‌ریزی همزمان و یا برنامه‌ریزی متوالی صورت می‌گیرد. در برنامه‌ریزی همزمان، انرژی و خدمات جانبی به صورت همزمان خریداری می‌گردند. این در حالی است که در برنامه‌ریزی متوالی و پشت سر هم، ابتدا حراج انرژی برای تأمین انرژی مصرف کنندگان اجرا شده و سپس ذخیره‌های متفاوت به ترتیب و بر اساس میزان مرغوبیت انتخاب می‌گردند از آن جایی که برنامه‌ریزی انرژی و سرویس‌های ذخیره بسیار به یکدیگر وابسته هستند برنامه‌ریزی آن‌ها به صورت همزمان دارای مزایای زیادی از جمله افزایش رفاه اجتماعی [۸] و قیمت‌های مناقصه بازار کمتر می‌شود [۹].

یکی از اصلی‌ترین مطالعات انجام شده بر روی برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره اولیه در [۷] ارائه شده است. در مطالعه انجام شده ارتباط بین میزان ذخیره اختصاص یافته به هر واحد و انحراف فرکانس ناشی از یک اغتشاش در مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها وارد شده است. در [۱۰] روش پخش بار اقتصادی دو مرحله‌ای معرفی شده است که در آن انحراف فرکانس فراتر از حد مجاز در مرحله دوم جواب پخش بار اقتصادی انجام شده در مرحله اول را اصلاح می‌کند. در [۱۱] روش پخش بار اقتصادی بر پایه الگوریتم درخت تصمیم معرفی شده که به صورت همزمان انرژی و ذخیره اولیه را کمینه می‌کند. یکی از معایب کارهای انجام شده تاکنون در نظر نگرفتن محدودیت‌ها و قابلیت‌های فنی و واقعی واحدهای تولیدی برای شرکت در کنترل فرکانس است که منجر به پاسخی غیر ممکن برای برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره اولیه خواهد شد. در [۱۲] الگوریتم اصلاحی برای توسعه قابلیت‌های واحد گازی یک نیروگاه سیکل ترکیبی برای مشارکت در کنترل فرکانس معرفی شده است. در [۱۳] یک الگوریتم ژنتیک باینری برای حل مسأله برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره اولیه ارائه شده که در آن قابلیت‌ها و محدودیت‌های واقعی واحدهای تولیدی از جمله قابلیت انتخاب نرخ بارگیری (نرخ بارگیری عادی و سریع) و همچنین انتخاب مد کنترل فرکانس وارد شده است.

در سیستم‌های قدرت امروزی با نفوذ گسترده منابع انرژی عدم قطعی از جمله انرژی باد کنترل فرکانس اهمیتی بیش از گذشته دارد. عدم قطعیت ذاتی موجود در سرعت باد منجر به تغییرات شدید و متناوب در توان تولیدی توربین‌های باد و تغییرات متناوب در فرکانس سیستم قدرت خواهد شد. علاوه بر این سهم زیاد این توربین‌ها از بار سیستم منجر به کاهش جرم چرخان سیستم شده و در نهایت افت شدید فرکانسی را هنگام وقوع یک حادثه از جمله خروج ناگهانی یک واحد خواهیم داشت. اخیراً بسیاری از مراجع به بررسی راه‌های شرکت کردن واحدهای بادی در کنترل فرکانس برای کاهش نیاز به استفاده از ذخیره‌های جانبی ارائه شده توسط واحدهای تولیدی مرسوم، به وسیله معرفی کردن کنترلرهای متفاوت پرداخته‌اند [۱۴]. در [۱۵] و [۱۶] کنترلرهایی برای فراهم کردن پاسخ لختی توسط توربین‌های بادی دو سو تغذیه پیشنهاد شده است و در [۱۷] کنترل دروپ نیز به کنترلرهای معرفی شده اضافه شده است.

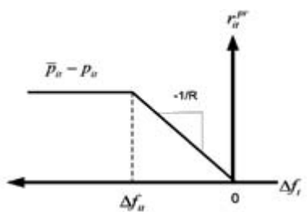
با پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه کنترل نرم‌افزاری نیروگاه‌های مدرن پیش‌بینی می‌شود که در آینده‌ای نزدیک این واحدها قابلیت فراهم کردن نرخ بارگیری تا چندین برابر نرخ بارگیری عادی خود را داشته باشند. افزایش نرخ بارگیری منجر به افزایش ذخیره کنترل فرکانس قابل بکارگیری هر واحد خواهد شد. از طرف دیگر، عدم قطعیت موجود در سرعت باد منجر به نوسانات با دامنه زیاد و تغییرات متناوب در فرکانس سیستم قدرت در حالت نفوذ زیاد توربین‌های باد در شبکه خواهد شد. در نتیجه نداشتن منابع ذخیره کنترل فرکانس کافی و سریع یکی از عواملی است که اتصال توربین‌های باد به شبکه را محدود می‌کند. از این رو در این مقاله ابتدا قابلیت فراهم کردن نرخ بارگیری چندگانه (MRR) توسط واحدهای تولیدی معرفی شده و سپس این قابلیت در فرمول‌بندی مسأله برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره اولیه وارد شده است. در نهایت شبیه‌سازی بر روی یک سیستم نمونه با ۱۷ واحد تولیدی با در نظر گرفتن نفوذ زیاد توان باد در شبکه انجام شده است.

۲. قابلیت‌ها و محدودیت‌های واقعی واحدهای مدرن برای مشارکت در کنترل فرکانس اولیه

علاوه بر آنکه میزان نرخ بارگیری در برنامه ریزی کوتاه مدت تولید تأثیر گذار می‌باشد، در میزان ذخیره اولیه ی بکارگرفته شده نیز نقش مؤثری دارد. بطوریکه، ذخیره‌ی اولیه در صورت خروج یک واحد نیروگاهی و یا افزایش ناگهانی بار، متناسب با میزان انحراف فرکانس و مشخصه دروپ گاورنر به صورت خطی افزایش می‌یابد و با میزان حداکثر ظرفیت تولید مجاز برای مشارکت در کنترل فرکانس و یا نرخ بارگیری واحد هر کدام که کمتر بود، محدود می‌گردد «شکل ۱». در این شکل $\overline{p}_{it}$ حداکثر میزان تولید واحد نیروگاهی در طی فرآیند کنترل فرکانس می‌باشد و توسط رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$\overline{p}_{it} = \min(u_{it}.p_i^{pr-\max} + p_{it} + u_{it} + r_i^{pr-\max}) \qquad (1)$$

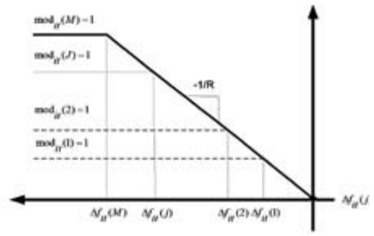
توسعه فن‌آوری در بخش نرم افزاری سیستم کنترل واحدهای نیروگاهی، قابلیت‌های مانور جدیدی از جمله، انتخاب مد مشارکت در کنترل فرکانس(فعال و یا غیرفعال) و همچنین انتخاب نرخ بارگیری (عادی و یا سریع) را در هر لحظه و بدون توقف واحد امکان پذیر نموده که در توسعه‌ی ظرفیت ذخیره‌ی کنترل فرکانس اولیه و نحوه‌ی مشارکت واحدهای نیروگاهی در کنترل فرکانس تأثیر گذار است.



شکل ۱: ذخیره اولیه بکار گرفته شده متناسب با انحراف فرکانس

هم‌چنین با پیشرفت‌های صورت گرفته در این زمینه این واحدها به قابلیت فراهم کردن چندین نرخ بارگیری به صورت همزمان و تا چند برابر نرخ بارگیری عادی مجهز خواهند شد. با بهره‌برداری واحدها در نرخ بارگیری بیشتر، میزان ذخیره‌ی اولیه (r_{it}^{pr}) آماده بکار بیشتری برای مشارکت در کنترل فرکانس در اختیار بهره بردار شبکه خواهد بود. «شکل ۲» رابطه‌ی بین افزایش نرخ بارگیری و ذخیره در دسترس واحدهایی که قابلیت فراهم کردن نرخ بارگیری چندگانه را دارا می‌باشند، نشان می‌دهد. رابطه حداکثر میزان توان تولیدی برای یک واحد با قابلیت MRR به صورت (۲) تعریف می‌شود.

$$\overline{p}_{it} = \min\left\{u_{it}.p_i^{\max}, p_{it} + \sum_{j=1}^{M_i} \mathrm{mod}_{it}(j).r_i^{pr-\max}(j).u_{it}.v_{it}\right\} \quad (2)$$



شکل ۲: ذخیره اولیه در دسترس متناسب با انحراف فرکانس برای واحدهای تولیدی با قابلیت MRR

افزایش نرخ بارگیری منجر به کاهش طول عمر رتور و تحمیل هزینه به بهره‌بردار واحد نیروگاهی می‌شود. اما در صورت جبران هزینه‌های ناشـــی از افزایش نرخ می‌توان انتظار داشـــت بهره‌بردار، نرخ بارگیری واحـــد نیروگاهـــی خود را افزایش دهد. لازم به ذکر اســـت که محدوه مجاز واحدها برای مشـــارکت در کنتـــرل فرکانس با محدوده‌ی مجاز بهره‌بـــرداری آن‌ها یکســـان نبـــوده و در برخی موارد بـــه دلایل فنی کوچکتر از آن است [۱۸،۱۹]. «شکل ۳» محدوده مجاز بهره‌برداری و بخشـــی از آن را که برای مشارکت واحد در کنترل فرکانس در نظر گرفته می‌شو برای یک واحد تولیدی نشان می‌دهد.

شکل ۳: محدوده‌ی مجاز واحدهای نیروگاهی برای مشارکت در کنترل فرکانس

در صورت اســـتفاده از قابلیت MRR واحدهای تولیدی قادر به فراهم کـــردن چندین نرخ بارگیری و تا چنـــد برابر نرخ بارگیری عادی خود خواهنـــد بـــود. از ایـــن رو برای مقابله بـــا عدم قطعیت‌هـــای توان باد بهره‌بردار شـــبکه ذخیره اولیه در دســـترس بیشتری در اختیار دارد و می‌تواند در برنامه‌ریزی ســـاعتی انرژی و ذخیره اولیه هر یک از این نرخ‌هـــای بارگیری را در صـــورت لزوم انتخاب کنـــد. در ادامه قابلیت MRR در مســـأله برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره اولیه وارد شده است. در مدل معرفی شـــده محدودیت‌های واقعی واحدهای تولیدی برای مشارکت در کنترل فرکانس نیز در نظر گرفته شده است.

۳. فرمول‌بندی مسئله معرفی شده

در ایـــن بخش به فرمول‌بندی مســـئله برنامه‌ریـــزی همزمان انرژی و ذخیـــره اولیه با وجود توان باد در شـــبکه و با فرض این که هر یک از واحدهای تولیدی قابلیت فراهم کردن چندین نرخ بارگیری هســـتند پرداختـــه می‌شـــود. تابع هدف مدل پیشـــنهادی کمینه کردن هزینه تأمین انرژی و ذخیره اولیه در طول دوره برنامه‌ریزی می‌باشد. معادله (۳) بیان کننده تابع هدف پیشـــنهادی اســـت که شـــامل هزینه‌های بهره‌برداری و هزینه ذخیره اولیه است. هزینه بهره‌برداری خود شامل هزینـــه راه‌اندازی، هزینه خاموش کردن واحـــد و هزینه توان تولیدی اســـت. هزینه بهره‌برداری به صورت تابعی خطی از میزان تولید واحد در نظر گرفته شده است.

$$Min\left[\sum_i\sum_t\{y_{it}.C_{it}^{su}.+z_{it}.C_{it}^{sd}+C_{it}(p_{it},u_{it})\}+\sum_i\sum_t\{C_{it}^{pr}(r_{it}^{pr},u_{it})\}\right] \quad (3)$$

از آن‌جایـــی که افزایش بیـــش از حد نرخ بارگیـــری منجر به کاهش طـــول عمر روتور و نتیجتاً افزایش هزینه بهره‌برداری می‌شـــود قیمت پیشـــنهادی واحدهـــای تولیدی بـــرای تأمین ذخیره اولیـــه از معادله (۴) تبعیـــت می‌کند، که در آن $Cr(j)$ قیمت پیشـــنهادی واحد i برای بکارگیری j امین نرخ بارگیری می‌باشد.

$$C_{it}^{pr}(r_{it}^{pr}) = \left(\sum_{j=1}^{M_i}\mathrm{mod}_{it}(j).Cr_i(j)\right).r_{it}^{pr}.u_{it}.v_{it},\ \forall i,t. \quad (4)$$

همان‌طور که گفته شـــد، هدف برنامه‌ریـــزی همزمان انرژی و ذخیره اولیه در کمترین هزینه ممکن بدون نقض کردن قیود زیر است. تعادل بین میزان بار و تـــوان تولیدی واحدها و توان تزریقی توربین‌های باد بایـــد قبل از وقوع حادثـــه در طول دوره برنامه‌ریزی برابر باشـــد (۵). همچنین حداکثر و حداقل توان تولیدی واحدهای مشارکت کننده در کنترل فرکانس باید در محدوده‌ی مجاز باشد (۶)،(۷).

$$\sum_i p_{it} + p_{wt} = d_t,\ \forall t. \quad (5)$$

$$p_{it} \le u_{it}.(v_{it}.p_i^{pr-\max} + (1-v_{it}).p_i^{\max}),\ \forall i,t. \quad (6)$$

$$p_{it} \ge u_{it}.(v_{it}.p_i^{pr-\min} + (1-v_{it}).p_i^{\min}),\ \forall i,t. \quad (7)$$

بـــرای اطمینان از اینکـــه در هر بازه زمانی تنها یکـــی از مدهای نرخ بارگیری واحدها انتخاب می‌شود قید زیر تعریف می‌شود.

$$\sum^{M_i}\mathrm{mod}_{it}(j) = 1,\ \forall i,t. \quad (8)$$

بر طبق معیار قابلیت اطمینان N-1 در هر حادثه که به صورت خروج ناگهانی یک واحد تعریف می‌شود، قید تعادل بین تولید و مصرف باید برقرار شود. بنابراین واحدهای سالم در مدار باید به اندازه کافی ذخیره اولیـــه در هر حادثـــه تأمین کنند. همچنیـــن از آن‌جایی که تغییرات فرکانـــس منفی در برنامه‌ریزی لحاظ شـــده اســـت، میـــزان ذخیره‌ی برنامه‌ریزی شـــده جوابگوی تغییرات مثبت توان باد نیز باید باشـــد. از این رو قید زیر برای پیاده‌ســـازی معیار میزان ذخیره مورد نیاز شبکه تعریف شده است.

$$\sum_{i\in s^a} r_{it}^{pr} \ge \sum_{i\in s^a} p_{it} + \left(p_{wt}(t) - p_{wt}(t-1)\right),\ p_{wt}(t) \ge p_{wt}(t-1) \quad (9)$$

ذخیـــره اولیه واحد i باید در (۱۰) صدق کنـــد که بیان کننده‌ی این اســـت که حداکثر ذخیره اولیه در دسترس واحد i مقدار حداقل بین ظرفیت استفاده نشده واحدهای در مدار و نرخ بارگیری آن‌هاست.

$$\left.\begin{aligned} &0 \le r_{it}^{pr} \le u_{it}p_i^{\max} - p_{it} \\ &r_{it}^{pr} \le \left(\sum_{j=1}^{M_i}\mathrm{mod}_{it}(j).r_i^{pr-\max}(j)\right).u_{it}.v_{it} \end{aligned}\right\}\ \forall i,t. \quad (10)$$

نقطه شکست فرکانس در شکل (۱) توسط (۱۱) تعریف می‌شود.

$$\Delta f_{it} = \frac{(p_{it} - \overline{p}_{it})}{D_i} \quad (11)$$

عـــلاوه بـــر این برای اجتنـــاب از عملکـــرد رله‌های فرکانـــس پایین و جلوگیری از حـــذف بار، انحراف فرکانس از مقـــدار نامی باید محدود شود.

$$0 \ge \Delta f_i \ge \Delta f^{\min},\ \forall t. \quad (12)$$

۴. نتایج شبیه‌سازی بر روی یک سیستم نمونه

مدل معرفی شـــده برای حل مســـأله‌ی برنامه‌ریـــزی همزمان انرژی و ذخیـــره اولیه بـــا در نظر گرفتن نفوذ زیاد توان باد در شـــبکه بر روی سیســـتم نمونه‌ای شامل ۱۷ واحد تولیدی شبیه‌سازی گردیده است. مســـئله برنامه‌ریزی مخلوط عدد صحیح غیرخطی فرمول‌بندی شده به وســـیله روش‌هایی که در [۲۲] معرفی شـــده، خطی شده و توسط حل‌کننده‌ی CPLEX نرم‌افزار GAMS حل شده است. از آن‌جایی که بازه زمانی تغییرات توان باد کمتر از ۱۵ دقیقه می‌باشـــد و در مراجع نیز تاکنون برنامه‌ریزی انـــرژی و ذخیره اولیه برای حداقل بازه زمانی ۱۵ دقیقه انجام شده، در این مقاله نیز شبیه‌سازی برای بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای و برای ۶ ساعت متوالی انجام شده است. میزان نفوذ توان باد در شـــبکه ۲۰درصد بار پیک شـــبکه و برابر ۴۰۰ مگاوات در نظر گرفته شـــده و فرض شده است که این مقدار به میزان مساوی در دو منطقه مختلف با دو ســـرعت باد متفاوت نصب شده است. مشخصات سیســـتم نمونه از [۱۰] و داده‌های ســـرعت باد از [۲۱] گرفته شـــده اســـت. ضریب دروپ گاورنر تمامی واحدها ۵درصـــد ، فرکانس نامی سیستم ۵۰ هرتز و ماکزیمم انحراف فرکانس مجاز ۵۰۰ میلی هرتز در نظر گرفته شده است. از معیار قابلیت اطمینان N-1 به عنوان معیاری برای سنجش مقدار ذخیره اولیه مورد نیاز سیستم استفاده شده است. مقدار ذخیره اولیه در دسترس سیستم باید به گونه‌ای باشد که منجر بـــه عملکرد رله‌های فرکانس پاییـــن و حذف بار نگردد و علاوه بر این تغییرات توان باد را در بازه زمانی برنامه‌ریزی پوشش دهد. میزان نرخ بارگیری ســـریع تمامی واحدها برابر با میـــزان نرخ بارگیری در [۱۰] مســـاوی نظر گرفته شده و فرض شده است که تمامی واحدها قابلیت فراهم کردن ســـه نرخ بارگیری که نرخ‌های بارگیری عادی، ســـریع و خیلی ســـریع نامیده می‌شود را داشته باشـــند. نرخ بارگیری عادی و خیلی سریع واحدها به ترتیب نصف و دو برابر نرخ بارگیری سریع در نظر گرفته شده است.

حد ماکزیمم و مینیمم واحدهای تولیدی هنگام مشـــارکت در کنترل فرکانس برابر بـــا ۹۰درصد و ۱۲۰درصد حد ماکزیمم و مینیمم توان تولیدی آن‌ها در [۱۰] در نظر گرفته شـــده است. هزینه حدی ذخیره اولیـــه واحدها بـــرای فراهم کردن برای نرخ بارگیری عادی، ســـریع و خیلی سریع به ترتیب ۰،۰۵، ۰،۱ و ۰،۲ برابر ضریب خطی تابع هزینه [۱۰] در نظر گرفته شـــده و ضریب مربوط به قســـمت درجه دو تابع هزینه صفر در نظر گرفته شـــده اســـت. قیود وابسته به زمان از جمله نـــرخ بارگیری بالارونده و پاییـــن رونده و قیود مربوط به نرخ بارگیری در هنگام راه‌اندازی و خاموش کردن واحدها در نظر گرفته شده است. میـــزان بار در بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای، مشـــابه تغییرات بار ســـاعتی در [۱۰] در نظر گرفته شـــده اســـت. میزان توان تولیدی و ذخیره اولیه برنامه‌ریزی شـــده واحدها و همچنیـــن مد عملکردی نرخ بارگیری در «جدول ۱» نشـــان داده شـــده اســـت. در این جـــدول n نمایانگر نرخ بارگیـــری عـــادی، f نمایانگر نـــرخ بارگیری ســـریع و vf نمایانگر نرخ بارگیری خیلی سریع می‌باشند. همچنین عدد مربوط به زمان در این جدول نمایانگر t امین ۱۵ دقیقه‌ای اســـت که برنامه‌ریزی در آن بازه زمانی انجام شده است.

جدول ۱: تولید ذخیره اولیه (MW) و نرخ بارگیری برنامه‌ریزی شده برای سیستم با ۱۷ واحد تولیدی

ساعت	2	6	10	14	2	6	10	14	2	6	10	14
واحد	تولید برنامه‌ریزی شده (MW)				ذخیره اولیه برنامه‌ریزی شده (MW)				نرخ بارگیری برنامه‌ریزی شده			
A	204	120	297	297	55	55	33	33	n	n	f	f
B	208	156	265	268	49	49	32	29	n	n	f	f
C	0	0	134	128	0	0	20	25	-	-	f	f
D	0	0	102	102	0	0	20	20	-	-	f	f
E	141	58	210	195	39	39	24	38	n	n	f	n
F	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-
G	81	78	78	78	9	12	12	12	f	n	n	n
H	85	82	82	82	9	12	12	12	f	n	n	n
I	138	64	222	221	45	45	31	45	n	n	f	n
J	107	69	211	211	46	46	46	46	n	n	n	n
K	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-
L	0	0	102	156	0	0	43	43	-	-	n	n
M	0	0	80	0	0	0	19	0	-	-	f	-
N	0	0	76	0	0	0	21	0	-	-	n	-
O	23	0	0	29	16	0	0	16	f	-	-	f
P	0	0	0	62	0	0	0	19	-	-	-	f
Q	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-

همان‌طور که از «جدول۱» مشخص است برای تأمین نیازهای ذخیره کنترل فرکانس شبکه و برای مقابله با تغییرات توان باد در اکثر ساعات، واحدهای تولیدی در نرخ بارگیری ســـریع و خیلی سریع بهره‌برداری می‌شـــوند، که منجر بـــه جلوگیری از در مدار قـــرار گرفتن واحدهای جدید شـــده و هزینه بهره‌برداری شبکه را کاهش می دهد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بکارگیری MRR منجر به کاهش ۳،۳ درصـــدی در هزینه بهره برداری از شـــبکه نســـبت به حالتی که واحدها تنها در نرخ بارگیری عادی خود می‌توانند بهره‌برداری شـــوند، می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در ایــن مقاله ابتــدا قابلیت بکارگیری نرخ بارگیری چندگانه توســط واحدهای نیروگاهی معرفی شــده اســت. با بکارگیری قابلیت MRR واحدهای تولیدی قادر بــه فراهم کردن نرخ بارگیری تا چندین برابر نرخ بارگیــری عادی خود می‌شــوند و بهره‌بردار شــبکه برای تأمین ذخیره کنتــرل فرکانس اولیه مورد نیاز می‌توانــد هر یک از نرخ‌های بارگیــری را به طور دلخواه بدون خاموش کــردن واحد انتخاب کند. از آنجایی که با اســتفاده از قابلیــت MRR واحدهای تولیدی قادر به دنبال کردن نوسانات توان باد خواهند شد، میزان توان باد قابل اتصال به شــبکه افزایش خواهد یافت. در ادامــه محدودیت‌ها و قابلیت‌های معرفی شده واحدهای تولیدی از جمله قابلیت MRR در فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره اولیه با در نظر گرفتن نفوذ باد در شــبکه وارد شده است. فرمول‌بندی غیرخطی ارائه شده، خطی شــده و بر روی یک سیســتم نمونه با ۱۷ واحــد تولیدی و با در نظر گرفتن سه نرخ بارگیری برای هر واحد پیاده‌سازی شده است. مسئله برنامه‌ریــزی خطی مخلوط عدد صحیح حاصله با اســتفاده از نرم‌افزار GAMS و توســط حل‌کننده‌ی CPLEX این نرم‌افزار حل شده است. نتایج حاصله از شــبیه ســازی نشــان می‌دهد که با بکارگیری MRR می‌تــوان از در مدار قرار گرفتن واحدهای تولید گران برای تأمین نیاز ذخیره کنترل فرکانس شــبکه جلوگیری کرد و هزینه بهره‌برداری از شبکه را کاهش داد.

***

پی‌نوشت

1. Multi-ramp rate

مراجع

[1] A. J. Wood and B. F.Wollenberg, Power Generation Operation and Control, 2nd ed. New York: Wiley, 1996.
[2] G .Rebours, D. S .Kirschen, M .Trotignon, S .Rossignol, “A survey of frequency and voltage control ancillary—part I: technical Features,” IEEE Trans. Power Syst. , vol. 22, no. 1, pp. 350-357, Feb. 2007.
[3] R. J. Koessler, J. W. Feltes, and J. R. Willis, “A methodology for management of spinning reserves requirements,” in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, vol. 1, Feb. 1999, pp. 584–589.
[4]N. Jalleli, D. N. Ewart, L. H. Fink, and A. G. Hoffmann, “Understanding automatic generation control,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 7, no. 3, pp. 1106–1112, Aug. 1992.
[5] M.I. Alomoush, “Load frequency control and automatic generation control using fractional-order controllers,” Springer Journal of Electrical Eng., vol. 7, pp. 357-368, 2010.
[6] H. Singh and A. Papalexopoulos, “Competitive procurement of ancillary services by an independent system operator,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, no. 2, pp. 498-504, May 1999.
[7] J. F. Restrepo, F. D. Galiana, “Unit commitment with primary frequency regulation constraints,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 2, pp. 1836-1842, Nov. 2005.
[8] F. D. Galiana, F. Bouffard, J. M. Arroyo, J. F. Restrepo, “Scheduling and pricing of coupled energy and primary, secondary, and tertiary reserves,” Proc. IEEE, pp. 1970-1982.
[9] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z. Li, Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling, and Risk Management, New York: Wiley, 2002.
[10] J. W. O'Sullivan and M. J. O'Malley, “A new methodology for the provision of reserve in an isolated power system,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, no. 2, pp. 519–524, May 1999.
[11] K. A. Papadogiannis and N. D. Hatziargyriou, “Optimal allocation of primary reserve services in energy markets,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 1, pp. 519–523, Feb. 2004.
[۱۲] مصطفی رجبی مشهدی، علیرضا قبادی چهکندک، داوود جانفدا، محمدحسین جاویدی، "تخصیص ظرفیت معین مشــارکت در کنترل فرکانس با ارائه یــک الگوریتم اصلاحی در حلقه کنترل فرکانس نیروگاه شریعتی مشــهد"، بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق، صفحه ۱-۱۰، سال ۱۳۸۸.
[13] M. Rajabi. Mashhadi, M. H. Javidi, M. S. Ghazizadeh, “The impacts of capabilities and constraints of generating units on simultaneous scheduling of energy and primary reserve,” Springer Journal of Electrical Eng., vol. 93, pp. 117-126, Feb. 2011.
[14] R. Doherty, A. Mullane, G. Nolan, D. J. Burke, A. Bryson, and M. O'Malley, “An assessment of the impact of wind generation on system frequency control,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 1, pp. 452–460, Feb. 2010.
[15] G. Lalor, A. Mullane, and M. J. O'Malley, “Frequency control and wind turbine technologies,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 4, pp. 1905–1913, Nov. 2005.
[16] J.Morren, J. Pierik, and S. W. H. de Haan, “Inertial response of variable wind turbines,” Elect. Power Syst. Res., vol. 76, pp. 980–987, 2006, Elsevier, Wind Energy.
[17] G. Ramtharan, J. B. Ekanayake, and N. Jenkins, “Frequency support From doubly fed induction generator wind turbines,” IET Renew. Power Gener., vol. 1, no. 1, pp. 3–9, 2007.
[18] J. H. Kehler, “Frequency regulation from steam turbine generators,” IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, vol. 1, Feb. 1999, pp. 775-776.
[19] M. H. Asgari, M. J. Tabatabaei, R. Riahi, A. Mazhabjafari, M. Mirzaee, H.R. Bagheri, “Establishment of regulation service market in Iran restructured power system,” IEEE CCECE, 2008, Canadian Conf. on Elect. Com. Eng., pp. 713–718.
[20] A. Hadian, M. R. Haghifam, “Probabilistic Approach for Renewable DG Placement in Distribution Systems with Uncertain and Time Varying Loads,” Power & Energy Society General Meeting PES. IEEE, 2009.
[21]http://www.suna.org.ir/fa/aboutorganization/ationoffice/windenergyoffice/windamar
[22] J. Bisschop, AIMMS Optimization Modeling, Haarlem: Paragon Decision Technology B.V., 2000.

فهرست علائم و اختصارات

شاخص‌ها

i	مشخصه مربوط به ژنراتورها
t	مشخصه مربوط به ساعات
j	مشخصه مربوط به نرخ بارگیری

پارامترها

M_i	تعداد نرخ بارگیری واحد i ام
d_t	میزان بار در زمان t
C_{it}^{su}	هزینه راه‌اندازی واحد i در زمان t
C_{it}^{sd}	هزینه خاموش کردن واحد i در زمان t
$Cr_{it}(j)$	هزینه پیشنهادی واحد i برای بکارگیری نرخ بارگیری jام
$\Delta f^{\min}$	حداقل مجاز افت فرکانس سیستم
R_i	دروپ واحد i
$r_i^{pr-\max}(j)$	حداکثر ذخیره اولیه قابل بکارگیری واحد i در صورت بکارگیری نرخ بارگیری jام
$P_i^{\min}$	حداقل تولید مجاز واحد i
$P_i^{\max}$	حداکثر تولید مجاز واحد i
$P_i^{pr-\min}$	حداقل تولید مجاز واحد i در صورت شرکت کردن در کنترل فرکانس
$P_i^{pr-\max}$	حداکثر تولید مجاز واحد i در صورت شرکت کردن در کنترل فرکانس
V_{ci}	سرعتی که در آن توربین باد شروع به تولید توان می‌کند
V_r	سرعت نامی توربین باد
V_{co}	سرعت قطع توان توربین باد

متغیرهای پیوسته

p_{it}	تولید برنامه‌ریزی شده واحد i در زمان t
$\bar{p}_{it}$	حداکثرمجاز تولید واحد i در صورت شرکت کردن در کنترل فرکانس
$\Delta f_{it}(j)$	نقطه شکست منحنی مشخصه فرکانس واحد i در زمان t در صورت بکارگیری نرخ بارگیری jام
r_{it}^{pr}	ذخیره اولیه برنامه‌ریزی شده واحد i در بازه زمانی t
Δf_t	حداکثر انحراف فرکانس در بازه زمانی t در صورت وقوع بدترین حادثه

متغیرهای باینری

u_{it}	در صورتی که واحد i دربازه زمانی t روشن باشد 1، در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.
v_{it}	در صورتی که واحد i دربازه زمانی t در کنترل فرکانس شرکت کند 1، در غیر این صورت صفر می‌باشد.
y_{it}	اگر واحد i در زمان t روشن شود 1، در غیر این صورت مقدار آن صفر می‌باشد.
z_{it}	اگر واحد i در زمان t خاموش شود 1، در غیر این صورت مقدار آن صفر می‌باشد.