

برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه در سیستم قدرت با ملاحظه اثر خودتنظیمی بار

مهدی روح‌الامینی^۱، کارشناس ارشد؛ مسعود رشیدی‌نژاد^۲، استاد؛ سعید اسماعیلی جعفرآبادی^۴، استادیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان - ایران - mrouholamini@eng.uk.ac.ir

۲- شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان - کرمان - ایران

۳- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان - ایران - mrashidi@uk.ac.ir

۴- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان - ایران - s_esmaeili@uk.ac.ir

چکیده: یک سیستم قدرت دائماً در معرض رخداد حوادثی نظیر تغییرات ناگهانی بار و یا خروج واحدهای نیروگاهی قرار دارد. این حوادث سبب نامتعادلی در عرضه و تقاضای توان اکتیو و در نتیجه انحراف فرکانس سیستم می‌شود. خدمات جانبی کنترل فرکانس به‌منظور مقابله با این اثر نامطلوب در سرتاسر سیستم قدرت پیش‌بینی می‌گردند. این خدمت، طی برگزاری یک حراج توسط مدیر بازار تأمین می‌شود. در پژوهش‌های اخیر برتری شیوه حراج هم‌زمان انرژی و خدمات جانبی کنترل فرکانس نسبت به حراج متوالی به اثبات رسیده است. این مقاله، ساختار مسئله بهینه‌سازی حراج هم‌زمان انرژی و خدمات کنترل فرکانس را مورد مطالعه قرار داده و دست‌های از نامعادلات خطی را جهت شناسایی آرایش‌های ناموجه فروشندگان انرژی و خدمات معرفی می‌کند. علاوه بر این، محدودیت تراکم خطوط انتقال و همچنین اثر خودتنظیمی بار را نیز در ساختار مسئله بهینه‌سازی حراج هم‌زمان مورد توجه قرار می‌دهد. مسئله بهینه‌سازی مزبور یک مسئله غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح بوده که جهت حل آن از بسته‌های نرم‌افزاری GAMS و MATLAB استفاده می‌شود. در پایان نیز روش ارائه‌شده بر روی یک سیستم ۳۹ شینه شبیه‌سازی گردیده است. نتایج ارائه‌شده نشان از دقت و کارایی روش پیشنهادی دارد. در این بررسی، مدل بازار مشابه بازار ایران به‌صورت پرداخت بر اساس پیشنهاد است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی هم‌زمان، ذخیره کنترل فرکانس اولیه، افت فرکانس مجاز، تراکم خطوط انتقال، اثر خودتنظیمی بار.

Simultaneous Scheduling of Energy and Frequency Control Ancillary Services in regard to Load Self-regulation Effect

Mehdi Rouholamini, MSC^{1,2}; Masoud Rashidinejed, Professor³; Saeid Esmaeili Jafarabadi, Assistant Professor⁴

1- Faculty of Technical Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: mrouholamini@eng.uk.ac.ir

2- Electricity Distribution Company of South Kerman, Kerman, Iran

3- Faculty of Technical Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: mrashidi@uk.ac.ir

4- Faculty of Technical Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: s_esmaeili@uk.ac.ir

Abstract: A power system is exposed to sudden variation, unwanted changes in system demand or losing a generating unit that cause a frequency deviation in system frequency. In restructured power systems, frequency control resources must be prepared to compensate this unwanted effect. It is one of the most important tasks of ISO. Previous researches have demonstrated that simultaneous scheduling of energy and frequency control reserves is preferred to sequential scheduling method; therefore this paper discusses simultaneous method considering both transmission congestion and self-regulation effect of load. Furthermore, the paper presents a string of novel inequalities to distinguish unfeasible statuses of participants in the sale. The present problem is mixed-integer and nonlinear, so GAMS and MATLAB software are jointly used to solve it. Finally, the proposed method is implemented on a 39-bus case system. The obtained results verify the efficiency and robustness of the proposed method. In this survey, it is assumed that the market structure is pay as bid.

Keyword: Simultaneous scheduling, Primary reserve, Allowed frequency deviation, Congestion, Self-regulation effect.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۰۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۰۷ و ۱۳۹۴/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۰۶

نام نویسنده مسئول: مسعود رشیدی‌نژاد

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمان - بلوار ۲۲ بهمن - دانشگاه شهید باهنر کرمان - دانشکده فنی.

۱- مقدمه

تغییرات ناگهانی بار سیستم، خروج یک یا دسته‌ای از واحدهای نیروگاهی و یا پارگی خطوط انتقال از جمله حوادث غیر منتظره‌ای^۱ هستند که ممکن است در یک سیستم قدرت رخ دهد. این حوادث عدم تعادل در مصرف و تولید را به دنبال داشته و منجر به تغییر فرکانس^۲ سیستم از مقدار نامی می‌گردد. در این هنگام به منظور احیای سیستم قدرت، ذخیره‌های متفاوتی به لحاظ کیفی مورد نیاز است. این ذخایر کنترل فرکانس بر اساس زمان پاسخ‌گویی و نحوه به‌کارگیری به سه دسته تقسیم‌بندی می‌گردند [۱]. ذخیره‌های اولیه کنترل فرکانس^۳، ظرفیت‌های آماده‌ای از ظرفیت واحدهای در مدار هستند که در نخستین ثانیه‌های پس از یک اغتشاش به انحراف فرکانس پاسخ می‌دهند. این ذخیره سریع‌ترین پاسخ به انحراف فرکانس است لیکن سیستم کنترلی این نوع ذخیره دارای یک خطای حالت ماندگار است و لذا ذخیره‌های اولیه قادر به بازگرداندن فرکانس سیستم به مقدار برنامه‌ریزی شده نبوده و صرفاً از افت شدید فرکانس ممانعت به عمل می‌آورند. بعد از به‌کارگیری ذخیره‌های اولیه، سیستم کنترل تکمیلی^۴ از طریق به‌کارگیری ذخیره‌های بهره‌بردار (ذخیره‌های ثانویه)^۵، از بین بردن خطای حالت ماندگار و بازیابی فرکانس سیستم به مقدار برنامه‌ریزی شده را در کنار حفظ محدودیت‌های تبادلات بین نواحی انجام می‌دهد. این کنترل، به کنترل ثانویه مشهور است [۴-۲]. ذخیره‌های کنترل فرکانس ثالثیه^۶ نیز به‌منظور ترمیم ذخیره‌های ازدست‌رفته، مدیریت گرفتگی شبکه و همچنین وظایفی که کنترل فرکانس ثانویه قادر به انجام آن‌ها نبوده است در آخرین مرحله بازیابی به‌کار گرفته می‌شوند [۷-۵].

بنا بر آنچه در مراجع [۶، ۷] در خصوص وابستگی میزان ذخایر به‌کار گرفته‌شده و تولید ازدست‌رفته عنوان شده است، میزان افت فرکانس ناشی از خروج هر واحد، بستگی شدیدی به برنامه‌ریزی ساعتی انرژی دارد. برنامه‌ریزی ساعتی انرژی نیز به‌نوبه خود به نحوه برگزاری حراج انرژی بستگی دارد. برگزاری حراج می‌تواند به دو شیوه هم‌زمان^۷ و یا غیر هم‌زمان^۸ انجام شود. در شیوه برنامه‌ریزی هم‌زمان خرید انرژی و خدمات جانبی طی یک حراج انجام می‌شود. درحالی‌که در شیوه برنامه‌ریزی غیر هم‌زمان، حراج خرید خدمات جانبی بعد از برگزاری حراج انرژی انجام می‌شود به‌عبارت‌دیگر در این شیوه نتایج حاصل از حراج انرژی به حراج خدمات جانبی تحمیل می‌گردد. شیوه حراج هم‌زمان برخلاف روش غیر هم‌زمان توانایی رسیدن به بهینه سراسری را دارا است [۵، ۷]. بررسی‌های انجام‌یافته در خصوص برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و برنامه‌ریزی متوالی (غیر هم‌زمان) نشان داده است که برنامه‌ریزی هم‌زمان می‌تواند موجب افزایش رفاه اجتماعی گردد [۶]. علاوه بر این به‌کارگیری روش برنامه‌ریزی غیر هم‌زمان می‌تواند منجر به بروز پدیده وارونگی قیمت گردد که در کالیفرنیا و نیوانگلند تجربه شده است [۴، ۸، ۹]. به همین علت در این مقاله روش برنامه‌ریزی هم‌زمان مورد توجه بوده است.

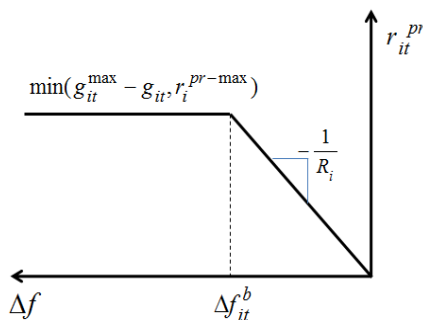
حل مسئله بهینه‌سازی در مدار قرار گرفتن واحدها با در نظر گرفتن محدودیت‌های تأمین ذخیره‌های کنترل فرکانس از جمله مسائلی بوده است که در سال‌های اخیر توجه محققین را به خود معطوف داشته است، مرجع [۱۰] یکی از مهم‌ترین پژوهش‌های انجام‌یافته در خصوص برنامه‌ریزی ذخیره اولیه است که یک الگوریتم تکرار متوالی مبتنی بر توزیع اقتصادی بار را ارائه کرده است و در آن، میزان تولید و ذخیره واحدها تا جایی که میزان انحراف فرکانس در محدوده مجاز قرار گیرد، اصلاح می‌شوند. در [۱۱] نیز میزان تولید و منابع ذخیره اولیه به کمک الگوریتم درخت تصمیم و با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه و پایداری تعیین گردیده است. برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره کنترل فرکانس در دو روش فوق‌الذکر مشابه برنامه‌ریزی متوالی بوده و لذا فارغ از مزایای برنامه‌ریزی هم‌زمان هستند.

در مرجع [۱۲] نسبتاً به نحو مطلوبی به مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس پرداخته شده است و در آن از بسته نرم‌افزاری GAMS^۹ جهت حل مسئله به‌صورت آمیخته با اعداد صحیح استفاده گردیده است. در این مرجع از خطی‌سازی معادلات هزینه سوخت استفاده شده که ممکن است رسیدن به بهینه سراسری را به مخاطره بیندازد علاوه بر این در آن فرض شده است که تمامی واحدهای در مدار، در کنترل فرکانس مشارکت می‌کنند. آقای رجبی در مراجع [۹-۷] یک روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک را جهت حل مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان ارائه داده است و در آن محدودیت‌ها و قابلیت‌های واحدهای نیروگاهی پیشرفته نیز در نظر گرفته شده است اما محدودیت‌های شبکه انتقال نظیر تراکم خطوط در آن‌ها لحاظ نگردیده است. ملاحظه نمودن محدودیت‌های شبکه در ساختار مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها و توزیع اقتصادی بار منجر به اجرائی بودن جواب‌های خروجی می‌گردد [۱۳]. این مهم در پژوهش‌هایی نظیر [۱۴] مورد توجه بوده است و در آن‌ها سعی شده است با ارائه روش‌های ابتکاری به بهینه مطلق دست یابند. عمده آن‌ها از شیوه‌های اقدام اصلاحی متوالی بهره برده‌اند که از آن جمله روش مجزاسازی بندرز است. از آنجایی‌که ماهیت دو مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان و در مدار قرار گرفتن واحدها یکسان است ضروری است که به‌منظور اجرائی نمودن جواب مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان، محدودیت‌های شبکه نیز در جریان حل مسئله لحاظ گردد.

در این مقاله در ابتدا مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس با رعایت تمامی قیود معمول مسئله، مدل‌سازی گردیده به‌نحوی که برخلاف پژوهش‌های پیشین [۱۲]، امکان وقوع مشارکت غیر همگانی فروشندگان انرژی در کنترل فرکانس در مدل مسئله پیش‌بینی گردد سپس به کمک بخش بار مستقیم محدودیت گرفتگی خطوط در قالب دسته نامعادلات خطی مدل‌سازی و در ساختار مسئله بهینه‌سازی غیر خطی تعبیه می‌گردد. شیوه مورد استفاده جهت مدل‌سازی محدودیت گرفتگی خطوط تاکنون در پژوهش‌های انجام‌یافته ارائه نگردیده است. در ادامه نقش اثر خودتنظیمی بار در

به دلیل وجود محدودیت‌های حرارتی واحد، نرخ تغییر توان خروجی ژنراتور به یک حد معین محدود می‌شود. این مهم منجر به معرفی حد بالای نرخ بارگیری^{۱۱} برای هر یک از واحدها می‌گردد که توسط فروشندگان (بهره‌بردار واحد) ارائه می‌شود [۲]. در هنگام بروز اغتشاش، خروجی گاورنر آن دسته از واحدهای نیروگاهی که آماده ارائه ذخیره اولیه هستند افزایش می‌یابد لیکن مقدار این افزایش توسط ظرفیت بهره‌برداری واحد و یا نرخ بارگیری، هر کدام که کمتر باشد محدود می‌گردد. آن‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، خروجی گاورنر تا قبل از حد اشباع خود به صورت خطی با انحراف فرکانس افزایش می‌یابد. لذا می‌توان پاسخ گاورنر به انحراف فرکانس را توسط رابطه (۴) مدل کرد:

$$r_{it}^{pr} = \begin{cases} -\frac{1}{R_i} \cdot \Delta f & , \text{if } \Delta f_i^b \geq |\Delta f| \geq 0 \\ \min(g_{it}^{\max} - g_{it}, r_{it}^{pr-\max}) & , \text{if } \Delta f \geq \Delta f_i^b \end{cases} \quad (4)$$



شکل ۱: محدودیت حد بالای ذخیره اولیه

سایر محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه را می‌توان به شرح ذیل عنوان:

الف) تعادل مصرف شبکه و مجموع تولید واحدها که به صورت رابطه (۵) مدل گردیده و در آن از تلفات شبکه صرف‌نظر گردیده است.

$$\sum_{i=1}^n u_{it} \cdot g_{it} = d_t \quad (5)$$

ب) محدودیت حدود مجاز تولید واحدها

$$u_{it} \cdot g_i^{\min} \leq g_{it} \leq u_{it} \cdot g_i^{\max} \quad (6)$$

ج) در صورت آماده بودن ذخیره اولیه هر واحد و در صورت خروج یک واحد نیروگاهی و یا افزایش ناگهانی بار، میزان تولید واحد، متناسب با میزان انحراف فرکانس و مشخصه دروپ گاورنر به صورت خطی افزایش می‌یابد. این میزان افزایش تولید به وسیله حداکثر ظرفیت تولید و یا حداکثر نرخ بارگیری مجاز واحد، هر کدام که کمتر باشد محدود می‌شود. این محدودیت به صورت رابطه (۷) مدل می‌گردد [۱۰-۷].

$$r_{it}^{pr} \leq u_{it} \cdot v_{it} \cdot [\min(g_{it}^{\max} - g_{it}, r_{it}^{pr-\max})] \quad (7)$$

د) محدودیت کفایت مجموع ذخیره‌های اولیه واحدهای مشارکت‌کننده در کنترل فرکانس که به صورت رابطه (۸) مدل می‌گردد و در آن مقدار تولید واحد از دست‌رفته است.

تدارک ذخیره‌های کنترل فرکانس اولیه و هزینه تمام‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. از اهم ارکان این مقاله، استخراج و معرفی دسته نامعادلات خطی در بخش ۳ است که دیدگاه الهام بخشی را در خصوص شرایط لازم برای پیاده‌سازی حراج هم‌زمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه برای مدیر بازار به وجود می‌آورد. مسئله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و خدمات کنترل فرکانس، یک مسئله غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح^{۱۱} است که جهت حل آن، بسته‌های نرم‌افزاری GAMS و MATLAB در یک حلقه بهینه‌سازی به کار گرفته می‌شوند. در پایان نیز روش ارائه‌شده بر روی سیستم استاندارد ۳۹ شینه متشکل از ۱۰ واحد نیروگاهی پیاده‌سازی و نتایج عددی برای حالات مختلف در نظر گرفتن محدودیت گرفتگی خطوط و اثر خودتنظیمی بار ارائه می‌شود. از آنجاکه در یک سیستم قدرت در صورت عدم کفایت ذخیره‌های اولیه کنترل فرکانس، اساساً مراحل بعدی بازیابی فرکانس آغاز نخواهد گردید لذا در این مقاله فقط ذخیره‌های کنترل فرکانس اولیه مورد توجه قرار دارند. در اینجا از اثرات گذرای افت فرکانس در قبال وقوع رخداد حادثه صرف‌نظر گردیده است و همچنین فرض شده است که سیستم AGC (کنترل تکمیلی) در شبکه پیاده نشده است.

۲- فرمول‌بندی مسئله

در این بخش نحوه فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی ساعتی هم‌زمان انرژی و ذخیره اولیه کنترل فرکانس برای یک شبکه جزیره‌ای ارائه شده است. در این فرمول‌بندی فرض شده است که نحوه بسته شدن بازار بر اساس پرداخت به‌ازای پیشنهاد صورت می‌گیرد. شرایط اضطراری به صورت خروج واحدها و از درجه N-1 مدل شده است. همچنین فرض شده است که تابع هزینه بهره‌برداری هر یک از واحدها به صورت یک رابطه درجه دوم قابل تقریب است.

هزینه‌های به‌کارگیری ذخیره‌های کنترل فرکانسی شامل دو بخش است: بخش اول مربوط به هزینه آمادگی واحد جهت مشارکت در کنترل فرکانس بعد از وقوع رخداد است، به عبارت دیگر مدیر بازار بایستی مبلغی را بابت فرصت از دست‌رفته فروشندگان در حراج انرژی بپردازد. بخش دوم شامل هزینه استفاده از ذخایر اولیه است که در صورت به‌کارگیری برحسب واحد انرژی پرداخت می‌گردد. در این مقاله از این بخش از هزینه ذخیره‌های اولیه کنترل فرکانس صرف‌نظر شده است. بنا بر آنچه گفته شد تابع هدف مسئله بهینه‌سازی توسط رابطه (۱) مدل می‌گردد. بخش اول این رابطه هزینه‌های بهره‌برداری، توقف و راه‌اندازی را شامل می‌شود و بخش دوم معرف هزینه‌های تأمین ذخیره اولیه است.

$$\min \sum_i \sum_j [y_{it} C_{it}^{su} + z_{it} \cdot C_{it}^{sd} + C_{it}(g_{it}, u_{it})] + C_{it}^{pr}(r_{it}^{pr}, u_{it}, v_{it}) \quad (1)$$

$$C_{it}(g_{it}, u_{it}) = u_{it} \cdot (c_i + b_i \cdot g_{it} + a_i \cdot g_{it}^2) \quad (2)$$

$$C_{it}^{pr}(r_{it}^{pr}, v_{it}) = q_{it}^{pr} \cdot r_{it}^{pr} \cdot v_{it} \quad (3)$$

برحسب مقادیر زاویه ولتاژ باس‌ها ارائه می‌دهد. محدودیت گرفتگی خطوط را نیز می‌توان به صورت زیر مدل کرد:

$$-\lambda_{ij} \leq p_{ij} \leq \lambda_{ij} \Rightarrow \begin{pmatrix} p_{ij} \\ -p_{ij} \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} \lambda_{ij} \\ \lambda_{ij} \end{pmatrix} \quad (13)$$

با اعمال رابطه (۱۱) به هر یک از باس‌های سیستم می‌توان نوشت:

$$PG_i - PD_i = \frac{\theta_i - \theta_1}{x_{i1}} + \dots + \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} + \dots + \frac{\theta_i - \theta_n}{x_{in}} \quad (14)$$

$$\Rightarrow [PG] - [PD] = [Y] \times [\theta] \quad (15)$$

$$\Rightarrow [\theta] = [Y]^{-1} \times ([PG] - [PD]) \quad (16)$$

در رابطه (۱۳) مقادیر توان‌های عبوری از خطوط مجهول است و رابطه (۱۲) مقادیر آن‌ها را برحسب زاویه فاز ولتاژ باس‌ها بیان می‌کند. بنابراین تنها مقادیر θ_i مجهول باقی می‌ماند که آن هم به کمک رابطه (۱۶) قابل جایگزینی است. بنابراین با ترکیب روابط (۱۲) و (۱۳) و (۱۶) و به کارگیری استقرای ریاضی، دسته نامعادلات خطی جهت اعمال محدودیت تراکم خطوط در مدل مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان به صورت رابطه (۱۸) بازنویسی می‌گردد.

$$A = [\lambda_{12}/Y_{12} \dots \lambda_{ij}/Y_{ij} \dots] \quad (17)$$

$$[\psi][Y]^{-1}[PG] \leq A^T + [\psi][Y]^{-1}[PD] \quad (18)$$

$$-[\psi][Y]^{-1}[PG] \leq A^T - [\psi][Y]^{-1}[PD] \quad (19)$$

روابطی که استخراج گردید، روابط (۱۸) و (۱۹)، محدودیت‌هایی خطی هستند که برای هر سیستم با هر تعداد باس قابل اعمال است. این روابط در کنار رابطه (۷) قرار می‌گیرد و محدودیت گرفتگی خطوط را در قالب یک محدودیت خطی جدید بر روی بردار تولید واحدها اعمال می‌کند. تعداد این نامعادلات خطی (رابطه ۱۳) همواره دو برابر تعداد شاخه‌های شبکه است لیکن ممکن است برخی از نامعادلات با توجه به حدود مجاز بهره‌برداری واحدها همواره برقرار باشند که در این صورت می‌توان این دسته از معادلات را از مجموعه نامعادلات (۱۸) حذف کرد. این کار را می‌توان از طریق بررسی صحت روابط (۱۸) حول مقادیر مرزی تولید واحدها انجام داد. ضمناً در روابط فوق PG و PD ماتریس‌های تک‌ستونی با تعداد سطر برابر با باس‌های سیستم (بدون باس اسلک^۲) هستند. عناصر این ماتریس‌ها به ترتیب مقادیر تولید و بار روی باس‌ها می‌باشند.

۲-۲- مدل‌سازی اثر خودتنظیمی بار در برابر انحراف فرکانس

آن گونه که پیش‌ازاین عنوان گردید در این مقاله از اثرات گذرای ناشی از افت فرکانس صرف‌نظر گردیده است. بنابراین اثرات ناشی از تغییرات گذرای ولتاژ بر روی مقدار توان مصرفی ملاحظه نمی‌گردد. البته ذکر این نکته ضروری است که پاسخ بار به تغییرات فرکانس سریع‌تر از پاسخ آن به تغییرات ولتاژ است [۱۶]. بار در یک سیستم قدرت متشکل از دستگاه‌های گوناگون الکتریکی است. برخی از آن‌ها فقط اهمی، برخی بار موتوری با مشخصه‌های متغیر توان-فرکانس و بعضی دیگر مشخصه کاملاً متفاوتی دارند. از آنجایی که بار موتوری، بار غالب یک سیستم قدرت است لازم است که تأثیر تغییر در فرکانس بر بار

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n u_{it} \cdot v_{it} \cdot r_{it}^{pr} \geq u_{jt} \cdot g_{jt} \quad (8)$$

محدودیت حد بالای افت مجاز فرکانس، این محدودیت بیان‌گر این است که به کارگیری ذخیره‌های اولیه در هنگام بروز اغتشاش نایستی مستلزم افت بیش از حد فرکانس باشد. رابطه (۹) این محدودیت را مدل می‌کند.

$$\Delta f \leq \Delta f_{cr} \quad (9)$$

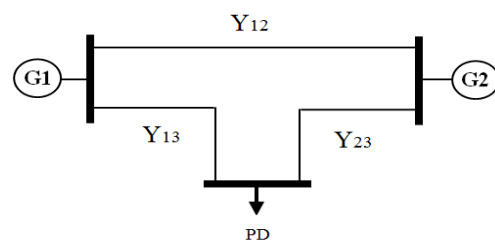
محدودیت حد مجاز تغییر در تولید واحدها بعد از وقوع اغتشاش، این محدودیت معرف این واقعیت است که مقدار تغییر خروجی واحدهای مشارکت‌کننده در کنترل فرکانس نایستی از مقدار رزرو مقرر برای آن واحد تجاوز نماید. این مهم در [۱۲] به نحو مطلوبی تبیین شده لیکن در [۷-۹] مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله، این محدودیت غیر خطی توسط رابطه (۱۰) در ساختار مسئله مورد بحث مدل می‌شود.

$$u_{it} \cdot v_{it} \cdot \Delta g_{it}^j \leq r_{it}^{pr} \quad (10)$$

سایر محدودیت‌های متداول مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها نظیر هزینه راه‌اندازی و توقف، حداقل زمان توقف و روشن بودن نیز می‌تواند در مدل‌سازی مسئله مدنظر قرار گیرد [۱۳، ۱۵]. در این مقاله فقط هزینه‌های راه‌اندازی در نظر گرفته شده است.

۲-۱- مدل‌سازی محدودیت گرفتگی خطوط

پخش بار مستقیم تقریبی از پخش بار متناوب بوده که حل متناوب را به یک مسئله ساده خطی تبدیل می‌کند [۲]. شکل ۲ یک شبکه سه شینه را نشان می‌دهد. رابطه (۱۱) معادله اساسی در پخش بار مستقیم است که توان عبوری از خط واصل دو باس را به دست می‌دهد.



شکل ۲: شبکه سه شینه

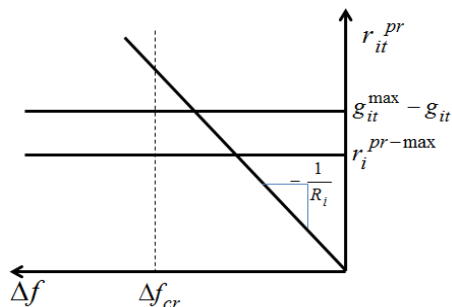
$$p_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} = Y_{ij}(\theta_i - \theta_j) \quad (11)$$

با فرض مرجع بودن باس شماره ۱ و بازنویسی رابطه (۱۱) برای تمامی خطوط سیستم سه شینه فوق داریم:

$$\begin{cases} p_{12} = Y_{12}(\theta_1 - \theta_2) \\ p_{13} = Y_{13}(\theta_1 - \theta_3) \\ p_{23} = Y_{23}(\theta_2 - \theta_3) \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} p_{12}/Y_{12} \\ p_{13}/Y_{13} \\ p_{23}/Y_{23} \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}}^{\psi} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

در روابط فوق زاویه فاز ولتاژ برای باس مرجع برابر صفر در نظر گرفته شده است. این رابطه مقادیر توان عبوری هر یک از خطوط سیستم را

محدودیت رابطه (۲۲) معرف یک حد بالا برای ذخیره کنترل فرکانس اولیه است که می‌تواند در کنار حدود ارائه شده در رابطه (۷) قرار گیرد. این موضوع در شکل ۳ نمایش داده شده است. حال مجدداً به قید کفایت ذخیره‌های کنترل فرکانسی (رابطه (۸)) بازمی‌گردیم. بدیهی است که این رابطه بایستی به‌ازای مقادیر حد بالای ذخیره کنترل فرکانس اولیه همواره برقرار باشد. در ادامه با جایگزینی مقدار حد بالای ذخیره اولیه، رابطه (۲۲)، صحت این موضوع را بررسی می‌کنیم:



شکل ۳: حد بالای مجاز برای ذخیره کنترل فرکانس اولیه

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n u_{ii} \cdot v_{ii} \cdot \frac{\Delta f_{cr}}{R_i} \geq u_{ji} \cdot g_{ji} \quad (23)$$

در صورتی که رابطه (۲۳) برای مقادیر $j=1, 2, \dots, n$ باز نویسی و سپس با یکدیگر جمع شوند مقادیر تولید ساعتی واحدها به کمک قید تعادل مصرف (رابطه (۵))، حذف می‌گردند. لذا داریم:

$$\sum_{i=1}^n u_{ii} \cdot v_{ii} \cdot \frac{\Delta f_{cr} \cdot g_i^{\max}}{R_i \cdot f} \geq \frac{d_i}{\sum u_{ii} - 1} \quad (24)$$

پارامترهای g_i^{\max} و f صرفاً به منظور خارج کردن مقدار رابطه (۲۳) از حالت مبنای واحد در رابطه (۲۴) ظاهر گردیده‌اند. به‌طور مشابه با جایگزینی سایر حدود بالای ذخیره اولیه داریم:

$$\sum_{i=1}^n u_{ii} \cdot g_i^{\max} \geq \frac{\sum u_{ii} \cdot d_i}{\sum u_{ii} - 1} \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^n u_{ii} \cdot v_{ii} \cdot r_i^{\text{pr-max}} \geq \frac{d_i}{\sum u_{ii} - 1} \quad (26)$$

با دقت در ساختار روابط فوق‌الذکر می‌توان دریافت که این روابط به مقادیر تولید و ذخیره کنترل فرکانس اولیه وابسته نیستند بلکه پیش‌شرطهایی را در خصوص مسئله برنامه‌ریزی انرژی و خدمات کنترل فرکانس اولیه ارائه می‌دهد. روابط یادشده صرفاً به مشخصات فنی سیستم قدرت و مقدار دیمانند وابسته هستند. در مراجع [۹-۷] مسئله بهینه‌سازی حراج هم‌زمان انرژی و خدمات کنترل فرکانس به دو مسئله بهینه‌سازی، یکی شامل متغیرهای باینری و دیگری شامل متغیرهای پیوسته، تفکیک گردیده است. به‌کارگیری روابط ابتکاری فوق‌الذکر در چنین شیوه‌هایی به منظور کاهش فضای جستجو بسیار سودمند خواهد بود که در واقع مزیت عمده روش پیشنهادی است. لازم به‌ذکر است که روابط مزبور در شیوه‌های برنامه‌ریزی غیر هم‌زمان

خالص یک سیستم مدل‌سازی گردد. رابطه معمول تغییر بار در قبال تغییر فرکانس به‌صورت زیر است [۲]:

$$\Delta P = D \cdot \Delta f_{p,u}^k \quad (20)$$

رابطه (۸) بیانگر قید کفایت ذخیره‌های کنترل فرکانسی است. در نظر گرفتن اثر خودتنظیمی بار مقدار تولید از دست‌رفته را که باید جبران شود تحت الشعاع قرار داده و در شرایط افت فرکانس (افزایش بار یا از دست رفتن واحد) آن را کاهش می‌دهد. لذا رابطه (۸) بایستی به‌صورت زیر مجدداً بازنگری گردد:

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n u_{ii} \cdot v_{ii} \cdot r_{ii}^{\text{pr}} \geq u_{ji} \cdot (g_{ji} - \frac{D \cdot \Delta f_j^k \cdot d}{f}) \quad (21)$$

پارامترهای d و f به منظور خارج کردن مقدار رابطه (۲۰) از حالت مبنای واحد در رابطه (۲۱) ظاهر گردیده‌اند. تا پیش از این، محدودیت رابطه (۸) یک محدودیت خطی با متغیرهای باینری بود اما با ملاحظه اثر خودتنظیمی بار، این محدودیت به یک رابطه غیر خطی بدل می‌گردد. لازم به‌ذکر است که در نظر گرفتن اثر خودتنظیمی بار در قبال تغییر فرکانس، در پژوهش‌هایی که تاکنون در حوزه برنامه‌ریزی تأمین ذخیره‌های کنترل فرکانس انجام شده، مدنظر قرار نگرفته است.

۳- امکان‌سنجی برگزاری حراج خدمات کنترل فرکانس اولیه

در برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره اولیه کنترل فرکانس؛ فروشندگان، قیمت‌های پیشنهادی خود را در خصوص انرژی و ذخیره اولیه به مدیر بازار ارائه می‌دهند. در پایان حراج و در ساده‌ترین حالت، هریک از فروشندگان می‌تواند در یکی از سه حالت ذیل قرار گرفته باشد: (۱) هیچ سهمی از انرژی و خدمات مبادله شده را به خود اختصاص نداده باشد، (۲) فقط در مبادله انرژی شرکت یافته باشد، (۳) علاوه بر این‌که در مبادله انرژی شرکت یافته، تأمین بخشی از خدمات ذخیره اولیه را نیز به خود اختصاص داده باشد.

مدیر بازار موظف است چنان آرایشی از فروشندگان را انتخاب نماید که علاوه بر برآورده‌سازی محدودیت‌های مسئله، دارای حداقل هزینه از دیدگاه تابع هدف نیز باشد. بدون توجه به شیوه حل این مسئله بهینه‌سازی، بدیهی است که مدیر بازار آرایش‌های متعددی را جهت دستیابی بدین مهم مورد آزمون قرار خواهد داد. حال آن‌که ممکن است به‌ازای برخی آرایش‌های انتخابی، مسئله بهینه‌سازی دارای پاسخ نبوده و اساساً دارای حل نباشد. لذا شناسایی موجه یا ناموجه بودن آرایش انتخابی جهت پیاده‌سازی حراج هم‌زمان می‌تواند مورد استقبال شدید مدیر بازار باشد تا بتواند در مدت‌زمان کمتری نائل به حل مسئله آید یا این‌که در خصوص ساختار حراج، محدودیت‌هایی را وضع نماید. با دقت در رابطه (۹)، محدودیت حد افت فرکانس مجاز، می‌توان دریافت که به‌جای مقدار Δf می‌توان مقدار معادل آن را با توجه به شکل ۱ برابر $R_i \cdot r_{ii}^{\text{pr}}$ انتخاب کرد، بنابراین:

$$r_{ii}^{\text{pr}} \leq \frac{\Delta f_{cr}}{R_i} \quad (22)$$

حل نمود. در این پژوهش برای حل مسئله مزبور از بسته‌های نرم‌افزاری GAMS و MATLAB استفاده شده و یک روش ابتکاری ارائه گردیده است. نرم‌افزار GAMS یکی از پرقدرت‌ترین زبان‌های مدل‌سازی مدل‌های مختلف مسئله از جمله مسائل بهینه‌سازی غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح است. علت انتخاب این نرم‌افزار مدل‌سازی، قابلیت توصیف مدل در آن به صورت مستقل از الگوریتم حل آن است [۱۷]. الگوریتم‌های مختلف حل مسائل بهینه‌سازی از جمله: سیمپلکس^{۱۳}، انشعاب و تحدید^{۱۴}، برنامه‌ریزی اعداد صحیح و برخی روش‌های جستجوی هیروستیک در این نرم‌افزار پیش‌بینی گردیده است. در برخی پژوهش‌های اخیر به طور مبسوط به توسعه استفاده از نرم‌افزار GAMS در حل مسائل پیرامون سیستم قدرت پرداخته شده است [۱۸]. تمامی بخش‌های مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره اولیه را دقیقاً به همان صورتی که پیش‌ازین بیان گردیده‌اند، می‌توان در محیط برنامه‌نویسی GAMS تعریف نمود. محدودیت‌های (۱۰) و (۲۱) محدودیت‌های غیر خطی مسئله هستند و قرارگیری آن‌ها در فرآیند بهینه‌سازی سبب کندی سرعت پیشرفت حل مسئله می‌گردد. بایستی توجه داشت که محدودیت رابطه (۷) علی‌رغم آنچه در ظاهر به نظر می‌رسد یک محدودیت خطی است و می‌تواند به صورت اجماع دو محدودیت خطی بازنویسی گردد [۱۹]. مجدداً به محدودیت رابطه (۲۱) باز می‌گردیم، این رابطه بیانگر یک محدودیت غیر خطی از نوع گسسته است (به دلیل وجود سطوح اشباع در مقدار ذخیره اولیه). علاوه بر این، شامل مقادیر افت فرکانس ناشی از خروج یکایک واحدهای نیروگاهی، Δf^k ، نیز است که استخراج آن‌ها در حین فرآیند بهینه‌سازی نیازمند ملاحظه یک‌سری روابط غیر خطی گسسته افزون بر رابطه (۲۱) است که سبب یک تضعیف مضاعف در سرعت هم‌گرایی مسئله می‌گردد. در روش پیشنهادی جهت حل مسئله، در ابتدا محدودیت رابطه (۲۱) به صورت رابطه (۸) یعنی بدون در نظر گرفتن اثر خودتنظیمی بار فرض می‌گردد سپس مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و خدمات کنترل فرکانس اولیه به کمک نرم‌افزار GAMS حل می‌شود. خروجی این مسئله بهینه‌سازی شامل آرایش واحدها در هر ساعت، مقدار تولید واحدها و همچنین مقادیر ذخیره اولیه است. مقادیر افت فرکانس ناشی از خروج هر یک از واحدها نیز با در اختیار داشتن مقادیر تولید و ذخیره اولیه واحدها قابل محاسبه خواهد بود. افت فرکانس ناشی از خروج واحد، مقدار انحراف فرکانسی است که به‌ازای آن، مجموع ذخیره‌های به‌کار گرفته‌شده با مقدار تولید از دست‌رفته برابر می‌گردد (رابطه (۸)). سپس با ملاحظه اثر خودتنظیمی بار، مقادیر ذخیره اولیه هر یک از واحدها اصلاح می‌شود. از آنجا که در این مقاله رخداد حادثه به صورت خروج یک واحد نیروگاهی فرض گردیده و عموماً در یک سیستم قدرت تقاضای توان اکتیو با افت فرکانس کاهش می‌یابد لذا اصلاح مقادیر ذخیره اولیه به صورت اثر کاهشی ظاهر می‌گردد. مطابق آنچه در شکل ۴ نمایش داده شده است بعد از حل مسئله بهینه‌سازی بدون

(متوالی) نیز قابل به‌کارگیری هستند. علاوه بر این مدیر بازار می‌تواند به کمک این پیش‌شرطها یک دیدگاه سودمند در خصوص امکان برگزاری حراج خدمات جانبی با توجه به مشخصات سیستم به‌دست آورد. به عبارتی، ممکن است به‌دلیل وجود پاره‌ای محدودیت‌های فنی در سیستم قدرت، امکان برگزاری حراج هم‌زمان انرژی و خدمات جانبی کنترل فرکانس وجود نداشته باشد که تشخیص این مهم به کمک روابط (۲۶-۲۴) محقق می‌گردد. در صورت ملاحظه اثر خودتنظیمی بار، پیش‌شرط‌های فوق‌الذکر به فرم‌های (۲۷-۲۹) قابل بیان هستند. بایستی توجه داشت که در محدودیت رابطه (۲۱)، می‌توان مقدار Δf^k را با مقدار افت فرکانس بحرانی، Δf_{cr} جایگزین کرد. در این صورت رابطه (۲۱) به یک شرط لازم و نه کافی بدل می‌گردد. متذکر باید شد که در صورت عدم تحقق پیش‌شرط‌های (۲۷-۲۹)، به‌ازای هیچ‌یک از آرایش‌های مختلف واحدهای نیروگاهی، امکان برگزاری حراج خدمات کنترل فرکانس به‌دلیل محدودیت‌های فنی مقدور نیست. به‌طور خلاصه، روابط (۲۶-۲۴)، دسته‌ای از روابط کاملاً ابتکاری هستند که در صورت برقرار بودن آن‌ها برای یک سیستم، شرایط لازم برای برنامه‌ریزی تأمین ذخیره‌های اولیه کنترل فرکانس فراهم است و عدم برقراری آن‌ها به معنای عدم وجود شرایط تأمین ذخیره‌های کنترل فرکانس به‌دلیل محدودیت‌های فنی سیستم قدرت است. این روابط در هیچ‌یک از پژوهش‌های پیشین اشاره نشده‌اند.

$$\sum_{i=1}^n u_{it} \cdot v_{it} \cdot \frac{\Delta f_{cr} \cdot g_i^{\max}}{R_i \cdot f} \geq \frac{d_t}{\sum u_{it} - 1} \left(1 - \frac{n \cdot D \cdot \Delta f_{cr}}{f}\right) \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^n u_{it} \cdot g_i^{\max} \geq \frac{d_t \cdot \sum u_{it}}{\sum u_{it} - 1} \left(1 - \frac{n \cdot D \cdot \Delta f_{cr}}{f}\right) \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^n u_{it} \cdot v_{it} \cdot r_i^{pr-\max} \geq \frac{d_t}{\sum u_{it} - 1} \left(1 - \frac{D \cdot \Delta f_{cr}}{f}\right) \quad (29)$$

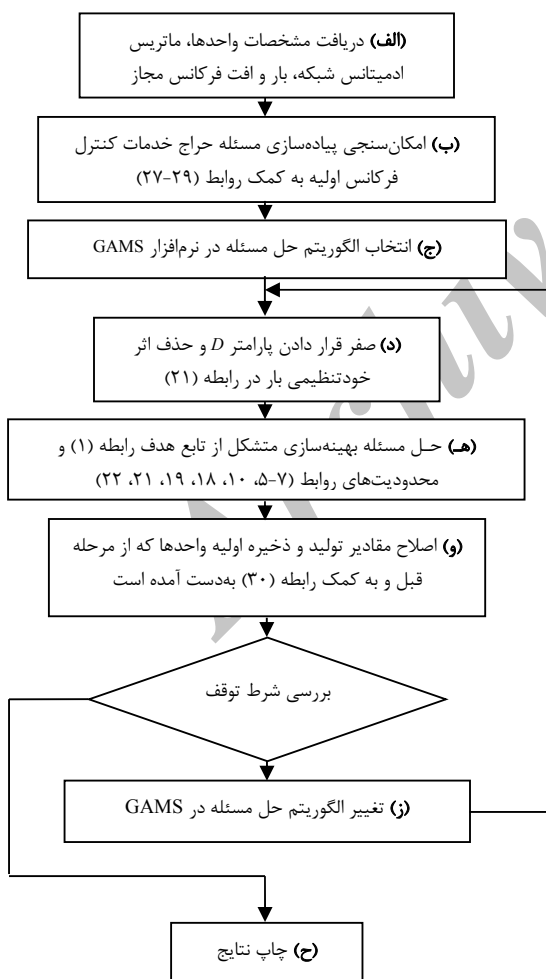
۴- روش پیشنهادی برای حل مسئله

پیش از این در بخش دوم نشان داده شد که مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه با توجه به نوع تابع هدف و محدودیت‌های ذکرشده یک مسئله بهینه‌سازی غیر خطی است. این مسئله شامل متغیرهای باینری (صفر و یک) و متغیرهای پیوسته است. متغیرهای باینری شامل وضعیت در مدار قرار گرفتن هر واحد (u_{it})، انتخاب مد کنترل فرکانس (v_{it})، راه‌اندازی (z_{it}) و توقف در طی دوره t ام است و متغیرهای پیوسته شامل میزان تولید g_{it} و ذخیره اولیه r_{it}^{pr} برای هر واحد نیروگاهی است. از آنجا که رابطه ذخیره اولیه نسبت به انحراف فرکانس خطی نبوده و به یک سطح اشباع می‌رسد و همچنین به سبب شکل تابع هدف، مسئله برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره اولیه یک مسئله برنامه‌ریزی غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح (MINLP) است. از این رو نمی‌توان این مسئله را به‌وسیله روش‌های استاندارد برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح (MILP)

GAMS انجام می‌شود. شکل ۵ فلوجارت روش پیشنهادی حل مسئله را نشان می‌دهد.

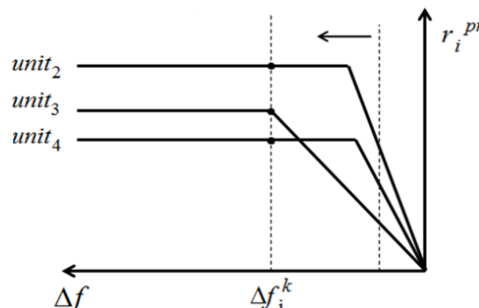
۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به‌منظور بررسی و تحلیل نوآوری ارائه‌شده در مقاله، روش پیشنهادی بر روی یک سیستم ۳۹ شینه شبیه‌سازی گردیده است. به‌منظور سادگی، شبیه‌سازی تنها برای یک ساعت انجام یافته و از محدودیت‌های حداقل زمان توقف و روشن ماندن واحدها صرف‌نظر و تنها هزینه‌های راه‌اندازی واحدها لحاظ گردیده است. مشخصات خطوط و بار در باس‌های سیستم مورد مطالعه مطابق نسخه ۴ از بسته نرم‌افزاری matpower [۲۰] و داده‌های واحدهای نیروگاهی مطابق مرجع [۱۵] انتخاب گردیده است. جدول ۱ مشخصات واحدهای نیروگاهی این سیستم را نشان می‌دهد. در این جدول مقدار نرخ بارگیری واحد برابر ۲۰ درصد حد بالای ظرفیت تولید واحد در نظر گرفته شده است. مشابه مرجع [۹] قیمت آمادگی ذخیره اولیه (هزینه خرید خدمات) برابر ضریب مؤلفه درجه اول تابع هزینه سوخت و مقدار پارامتر D ، اثر خودتنظیمی بار، برابر ۱/۵ درصد فرض شده است [۲].



شکل ۵: فلوجارت روش پیشنهادی جهت حل مسئله

ملاحظه اثر خودتنظیمی بار، سطوح اشباع ذخیره‌های اولیه برای هر واحد مشخص می‌گردد، سپس فرض می‌شود که اولین واحد از مدار خارج شده است، مقدار تولید این واحد به‌جای مقدار g_{jt} در رابطه (۳۰) و مقدار Δf^k در این رابطه برابر یک مقدار اولیه (ترجیحاً صفر) قرار داده می‌شود. جهت به‌دست آوردن مقادیر ذخیره اولیه که در آن‌ها اثر خودتنظیمی بار نیز منعکس شده است، مقدار Δf^k ($j=1$) به‌طور پیوسته افزایش داده می‌شود و مقادیر ذخیره اولیه متناظر با آن به کمک شکل ۴ به‌دست می‌آید.



شکل ۴: اصلاح مقادیر ذخیره اولیه

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n u_{ji} \cdot v_{ii} \cdot r_{ii}^{pr} = u_{ji} \cdot \left(g_{jt} - \frac{D \cdot \Delta f_j^k \cdot d_t}{f} \right) \quad (30)$$

مقادیر ذخیره اولیه به‌دست‌آمده در رابطه (۳۰) قرار داده می‌شود و چنانچه تساوی برقرار باشد، آخرین مقادیر ذخیره اولیه به‌دست‌آمده ثبت می‌گردد. این تکنیک به‌ازای خروج سایر واحدهای نیروگاهی نیز به‌طور مشابه انجام می‌شود بدیهی است از آنجا که در حین فرآیند جستجو همواره یکی از واحدهای نیروگاهی در حالت خارج از مدار قرار دارد (فرض شده است که در اثر شرایط اضطراری خارج شده است) لذا در پایان جستجو، تعداد $n-1$ مقدار برای ذخیره اولیه هر یک از واحدها به‌دست می‌آید.

واضح است که مقدار ذخیره اولیه مقرر برای یک واحد بایستی برابر حداکثر مقدار از میان مقادیر به‌دست‌آمده انتخاب گردد تا بتواند پاسخ‌گوی همه رخدادها باشد.

ذکر این نکته ضروری است که تکنیک یادشده جهت حل مسئله برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره اولیه کاملاً با روش‌های برنامه‌ریزی غیر هم‌زمان و یا متوالی متفاوت است. ضمناً به‌سبب کوچک بودن اثر خودتنظیمی بار مقدار تغییر در مقادیر ذخیره اولیه بسیار اندک است به‌عبارت‌دیگر در اینجا مقادیر ذخیره‌های اولیه حول یک مقدار معلوم مورد بازبینی قرار می‌گیرند. اگرچه ممکن است این شیوه برای برخی سیستم‌ها رسیدن به پاسخ بهینه سراسری را تضمین نکند. در بخش نتایج شبیه‌سازی کارایی تکنیک ارائه‌شده در حل سریع مسئله صحه‌گذاری گردیده است. در روش پیشنهادی مراحل الف، ب و ح (شکل ۵) توسط نرم‌افزار MATLAB و سایر بخش‌ها توسط نرم‌افزار

F	۵۴۹	۱۳۸	۶۵۶	۳۱	۵۴۹	۱۳۶	۶۵۶	۳۱
G	۲۹۸	۱۱۶	۱۷۷	۱۱۶	۲۹۸	۱۰۶	۱۷۷	۱۰۹
H	۴۵۲	۱۱۲	۱۰	۱۱۲	۴۵۲	۱۰۳	۱۰	۱۰۶
I	۵۵۱	۱۷۴	۸۶۵	-	۵۵۱	۱۵۸	۸۶۵	-
J	۶۴۲	۱۸۵	۹۷۲	-	۶۴۲	۱۷۳	۹۷۲	-
cost	۱۵۶۳۶۰	۱۶۷۹۶۳	۱۵۴۶۳۵					۱۶۶۸۴۶

البته در این حالت از اثر خودتنظیمی بار صرف‌نظر شده است. تحت این شرایط مقدار هزینه نسبت به حالت پیشین یک افزایش ۷ درصدی را به دنبال داشته است. جدول ۳ مقادیر توان عبوری خطوط حاصل از انجام پخش بار به‌ازای آرایش تولید مطابق مقادیر جدول ۲ را نمایش می‌دهد. از آنجا که مقادیر تولید واحدها در شرایط ۵ و ج نسبت به شرایط الف و ب تغییر نیافته لذا مقادیر توان‌های عبوری از خطوط فقط برای دو حالت ارائه گردیده است. قابل ذکر است که داده‌های مربوط به حد مجاز توان عبوری از خطوط مطابق مرجع [۲۱] است. حالت ج به‌طور مشابه مقادیر تولید و ذخیره اولیه را وقتی که اثر خودتنظیمی بار در مسئله لحاظ گردیده نشان می‌دهد. تحت این شرایط از محدودیت تراکم در خطوط صرف‌نظر شده است. در اینجا هزینه‌های تولید و خرید ذخیره اولیه نسبت به حالت الف کاهش یافته است به‌عبارت‌دیگر اثر خودتنظیمی بار به‌عنوان یک منبع تأمین ذخیره اولیه عمل کرده و از مقدار ذخیره مورد نیاز جهت خرید می‌کاهد. چنان‌که مقایسه ذخیره‌های اولیه در دو ستون ج و الف مؤید این موضوع است. آن‌گونه که جدول ۳ نشان می‌دهد به‌ازای حالت‌های الف و ج به‌دلیل عدم ملاحظه محدودیت گرفتگی، خطوط ۸-۱۹، ۱۶-۷ و ۲۴-۲۳ دچار تراکم گردیده‌اند. این نقیصه در حالت (د) به‌عنوان کامل‌ترین حالت، به‌سبب ملاحظه توأمان اثر خودتنظیمی بار و محدودیت تراکم خطوط انتقال، برطرف گردیده است. لازم به‌ذکر است به‌دلیل کثرت خطوط سیستم مورد مطالعه، در جدول ۳ مقادیر توان‌های عبوری صرفاً برای برخی شاخه‌های شبکه ۳۹ شینه ارائه شده است. ذکر این نکته ضروری است که در این مقاله منظور از تغییر دیماند، افزایش یا کاهش بار هریک از باس‌های سیستم به یک نسبت یکسان است.

جدول ۳: توان عبوری از خطوط در شرایط متناظر جدول ۲

Line	Rate		الف	ب
	MW			
۱-۲	۶۰۰	۳۰۹	۳۰۹	۹۵
۲-۳	۵۰۰	۵۲۵	۵۲۵	۴۷۳
۲-۳۰	۹۰۰	۷۲۵	۷۲۵	۷۱۸
۳-۱۸	۵۰۰	۱۵	۱۵	۷۶
۴-۱۴	۵۰۰	۲۴۱	۲۴۱	۱۲۲
۵-۸	۹۰۰	۲۸۷	۲۸۷	۲۰۷
۶-۱۱	۴۸۰	۵۳۱	۵۳۱	۱۳۳
۷-۸	۱۰۰	۱۴۵	۱۴۵	۱۰۰
۹-۳۹	۹۰۰	۹	۹	۱۰۶

سایر مشخصات سیستم از جمله فرکانس سیستم، دیماند و افت فرکانس مجاز به‌ترتیب برابر ۵۰ Hz، ۵۰۰ MW و ۵۰۰ mHz و دروپ گاورنر واحدها برابر ۴٪ فرض گردیده است. ذخیره اولیه مورد نیاز برای آرایش تولید در یک ساعت، بر مبنای معیار قابلیت اطمینان $N-1$ در نظر گرفته شده است به‌طوری که در صورت خروج هر واحد، ذخیره اولیه مورد نیاز پاسخ‌گوی میزان تولید از دست‌رفته خواهد بود. علاوه بر این فرض می‌شود که کلیه واحدهای مورد نظر قابلیت مشارکت در کنترل فرکانس را دارند.

جدول ۲ نتایج حاصل از شبیه‌سازی مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان را بر روی این سیستم نشان می‌دهد. ستون (الف) نتایج حاصله شامل ذخیره‌های کنترل فرکانس اولیه به همراه مقادیر تولید واحدها را بدون در نظر گرفتن محدودیت تراکم خطوط انتقال و اثر خودتنظیمی بار نشان می‌دهد. در این شرایط، واحد B در مدار قرار نگرفته است، واحدهای A، C و D نیز علیرغم مشارکت در تأمین انرژی در زمره تأمین‌کنندگان خدمات کنترل فرکانس اولیه قرار نگرفته‌اند. ستون (ب) از جدول ۲ بیانگر مقادیر تولید و ذخیره اولیه واحدها به‌ازای شرایطی است که محدودیت گرفتگی خطوط نیز در مسئله لحاظ شده است.

جدول ۱: مشخصات واحدهای نیروگاهی

g^{\min}	g^{\max}	a	b	c	$r^{pr-\max}$	q^{pr}	SUC
MW		\$/MWh ²	\$/MWh	\$/h	MW	\$/MW	\$
۱۵۰	۱۰۴۰	۰/۰۰۰۴۸	۱۶/۱۹	۱۰۰۰	۲۰۸	۱۶/۱۹	۹۰۰۰
۱۵۰	۶۴۶	۰/۰۰۳۱	۱۷/۲۶	۹۷۰	۱۳۰	۱۷/۲۶	۱۰۰۰۰
۲۰	۷۲۵	۰/۰۰۲	۱۶/۶۱	۷۰۰	۱۴۶	۱۶/۶۱	۱۱۰۰
۲۰	۶۵۲	۰/۰۰۲۱۱	۱۶/۵۰	۶۸۰	۱۳۰	۱۶/۵۰	۱۱۲۰
۲۵	۵۰۸	۰/۰۰۳۹۸	۱۹/۷۰	۴۵۰	۱۰۲	۱۹/۷۰	۱۸۰۰
۲۰	۶۸۷	۰/۰۰۷۱۲	۲۲/۲۶	۳۷۰	۱۳۸	۲۲/۲۶	۳۴۰
۲۵	۵۸۰	۰/۰۰۷۹	۲۷/۷۴	۴۸۰	۱۱۶	۲۷/۷۴	۵۲۰
۱۰	۵۶۴	۰/۰۰۴۱۳	۲۵/۹۲	۶۶۰	۱۱۲	۲۵/۹۲	۶۰
۱۰	۸۶۵	۰/۰۰۲۲۲	۲۷/۲۷	۶۶۵	۱۷۴	۲۷/۲۷	۶۰
۱۰	۱۱۰۰	۰/۰۰۱۷۳	۲۷/۷۹	۶۷۰	۲۲۰	۲۷/۷۹	۶۰

جدول ۲: نتایج حاصل از شبیه‌سازی مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان بر روی

سیستم ۳۹ شینه

Unit	الف		ب		ج		د	
	g	r	g	r	g	r	g	r
A	۷۲۵	-	۷۱۸	۲۰۸	۷۲۵	-	۷۱۸	۱۹۵
B	-	-	۵۱۶	۱۲۹	-	-	۵۱۶	۱۲۱
C	۷۲۵	-	۳۳۴	۱۴۵	۷۲۵	-	۳۳۴	۱۳۶
D	۶۵۲	-	۵۲۲	۱۳۰	۶۵۲	-	۵۲۲	۱۲۲
E	۴۰۶	۱۰۲	۲۳۱	۱۰۲	۴۰۶	۹۳	۲۳۱	۹۵

D	۵۴۳	۱۰۳	۰/۱۹۷
E	۲۱۰	۸۱	۰/۰۷۲
F	۵۷۲	۱۰۹	۰/۲۱۱
G	۲۳۹	۹۲	۰/۰۸۴
H	۴۶۹	۸۹	۰/۱۶۴
I	۷۹۲	۷۳	۰/۲۹۳
J	۹۷۸	-	۰/۳۳۵
Cost	۱۷۱۸۰۶		

در صورت تنظیم رله‌های افت فرکانس به‌ازای مقادیر کوچک‌تر از این حد فرکانسی، مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره اولیه فاقد جواب موجه خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی به‌ازای مقادیر مختلف دیامند نشان می‌دهد که حداکثر بار سیستم در ازای $\Delta f_{cr} = 0.5 \text{ Hz}$ برابر 51.03 MW است. جدول ۵ مقادیر تولید واحدها، ذخیره اولیه و افت فرکانس ناشی از خروج هر واحد را تحت شرایطی که مقدار افت فرکانس مجاز در سیستم برابر حد بحرانی افت فرکانس مجاز، 33.5 mHz تنظیم شده است، نشان می‌دهد. در این حالت مقدار هزینه بهره‌برداری افزایش یافته است. به‌عبارت‌دیگر بفرنج شدن مقدار افت فرکانس مجاز به‌صورت افزایش هزینه بهره‌برداری ظاهر می‌شود. در جدول ۵ محدودیت گرفتگی و اثر خودتنظیمی بار نیز لحاظ گردیده است.

مقایسه الگوریتم‌های مختلف حل مسئله در GAMS

پیش از این در بخش سوم، چرخه حل مسئله برنامه‌ریزی ارائه گردید. در نرم‌افزار GAMS این امکان وجود دارد که الگوریتم‌های متفاوتی را جهت حل مسئله به‌کار گرفت. بدیهی است که ممکن است برخی الگوریتم‌ها در نقطه بهینه سراسری همگرا نشوند، علاوه بر این بسته به ساختار مسئله بهینه‌سازی، الگوریتم‌های مختلف می‌توانند زمان حل متفاوتی داشته باشند. جدول ۶ نتایج حاصل از به‌کارگیری برخی از الگوریتم‌های شناخته‌شده را در خصوص مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره اولیه ارائه می‌دهد. مقادیر این جدول با رعایت مفروضات حالت (د) از جدول ۴ ارائه شده است.

از جدول ۶ چنین برمی‌آید که در میان الگوریتم‌های دارای کمترین هزینه، الگوریتم BONMIN دارای کوچک‌ترین زمان حل است. مدت‌زمان ارائه‌شده در جدول، کل زمان حل مسئله شامل حل مسئله برنامه‌ریزی و اصلاح مقادیر تولید و ذخیره اولیه است. نتایج شبیه‌سازی ارائه‌شده در بخش‌های پیشین با استفاده از الگوریتم مزبور به‌دست آمده‌اند. اساس الگوریتم یادشده، الگوریتم انشعاب و تحدید است [۱۷].

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا به فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه پرداخته شد. مسئله مذکور یک مسئله غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح بوده و فضای جستجوی گسترده‌ای را

۱۰-۱۳	۶۰۰	۲۰۶	۱۹۴
۱۲-۱۱	۵۰۰	۱۲	۶
۱۳-۱۴	۲۰۰	۱۸۷	۱۹۴
۱۵-۱۶	۶۰۰	۳۱۰	۱۸۴
۱۶-۱۹	۲۰۰	۵۱۴	۲۰۰
۱۶-۲۴	۶۰۰	۲۵	۴۵
۱۷-۲۷	۶۰۰	۱۳	۱۱۸
۱۹-۳۳	۹۰۰	۶۵۲	۵۲۲
۲۱-۲۲	۹۰۰	۴۲۷	۴۳۳
۲۲-۲۵	۹۰۰	۵۴۹	۶۵۶
۲۳-۲۴	۲۰۰	۲۲۱	۲۰۰
۲۵-۲۶	۶۰۰	۱۶۳	۱۹
۲۶-۲۷	۶۰۰	۲۱۲	۳۴۳
۲۶-۲۹	۶۰۰	۱۰۰	۲۵۷
۲۹-۳۸	۱۲۰۰	۵۵۱	۸۶۵

اثر خودتنظیمی بار، یک عامل تقریباً غیر قابل کنترل است [۵]، اما نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد در صورتی که اطلاعات دقیقی از مقدار آن در سیستم قدرت در دسترس باشد ملاحظه آن در مسئله برنامه‌ریزی می‌تواند منجر به کاهش هزینه تدارک ذخیره اولیه گردد. جدول ۴ مقادیر انحراف فرکانس در اثر خروج هر واحد را به‌ازای شرایط مختلف جدول ۲ ارائه می‌دهد. آن گونه که از این جدول برمی‌آید مقادیر انحراف فرکانس همواره کمتر از حد مجاز انحراف فرکانس سیستم هستند که در اینجا برابر 50.0 mHz فرض شده بود. در صورت تکرار متوالی حل مسئله به‌ازای مقادیر مختلف انحراف فرکانس مجاز، مقدار حد بحرانی انحراف فرکانس مجاز برابر 33.5 mHz به‌ازای بار 5000 MW به‌دست می‌آید.

جدول ۴: مقادیر انحراف فرکانس ناشی از خروج هر واحد (هرتز)

واحد خارج‌شده	الف	ب	ج	د
A	۰/۳۳۷	۰/۳۷۳	۰/۳۱۴	۰/۳۴۵
B	۰	۰/۲۳۸	۰	۰/۲۲۱
C	۰/۳۳۷	۰/۱۵۱	۰/۳۱۴	۰/۱۴۱
D	۰/۳۰۲	۰/۲۴۱	۰/۲۸۳	۰/۲۲۵
E	۰/۲۱۴	۰/۰۹۴	۰/۱۹۸	۰/۰۸۸
F	۰/۳۰۳	۰/۲۷۸	۰/۲۸۰	۰/۲۶۱
G	۰/۱۶۰	۰/۰۷۳	۰/۱۴۸	۰/۰۶۹
H	۰/۲۴۱	۰/۰۰۴	۰/۲۲۳	۰/۰۰۳
I	۰/۳۲۰	۰/۳۵۳	۰/۲۹۴	۰/۳۳۲
J	۰/۴۰۲	۰/۳۹۹	۰/۳۶۶	۰/۳۷۵

جدول ۵: مقادیر تولید، ذخیره اولیه و انحراف فرکانس

انحراف فرکانس	ذخیره اولیه	تولید	واحد از دست‌رفته
A	۱۶۵	۳۴۲	۰/۱۳۰
B	۱۰۳	۵۳۸	۰/۱۹۵
C	۱۱۵	۳۱۸	۰/۱۱۴

λ_{ij}	حد مجاز توان عبوری از خط واصل باس i به باس j
PG_i	مقدار تولید در باس i
PD_i	مقدار مصرف در باس i
Ψ	ماتریس باینری ضرایب
suc	هزینه راه‌اندازی
D	اثر خودتنظیمی بار
ΔP	تغییر توان مصرفی در اثر تغییر فرکانس
AGC	سیستم کنترل اتوماتیک تولید واحدها
g_{it}	مقدار تولید واحد λ ام
g_{jt}	مقدار تولید از دست‌رفته واحد λ ام در دوره t
R_i	شیب پاسخ گاورنر واحد λ ام
Δb_i	افت فرکانس شکست
Δf_{cr}	افت فرکانس بحرانی
n	تعداد واحدها (فروشنندگان و یا پیشنهاددهندگان قیمت)
g_i^{\min}	حد پایین تولید واحد λ ام
g_i^{\max}	حد بالای تولید واحد λ ام
d	دیمانند مصرفی
C_{it}^{su}	هزینه راه‌اندازی
C_{it}^{sd}	هزینه توقف
g_{it}	تولید واحد λ ام در دوره t ام
c_i	ترم ثابت تابع هزینه واحد λ ام
b_i	ترم درجه اول تابع هزینه واحد λ ام
a_i	ترم درجه دوم تابع هزینه
y_{it}	متغیر باینری راه‌اندازی واحد
z_{it}	متغیر باینری توقف واحد
r_{it}^{pr}	ذخیره اولیه واحد λ ام در دوره t
$r_i^{pr-\max}$	نرخ بارگیری واحد
v_{it}	متغیر باینری مشارکت واحد λ ام در کنترل فرکانس
u_{it}	متغیر باینری مشارکت واحد λ ام در تأمین انرژی
q_{it}^{pr}	قیمت ذخیره اولیه واحد λ ام
Δg_{it}^j	تغییر تولید واحد λ ام
Δf^k	مقدار ماندگار افت فرکانس ناشی از خروج واحد λ ام
f	فرکانس سیستم

بسته به تعداد واحدها در برمی‌گیرد. این مقاله مجموعه پیش‌شرط‌هایی را جهت شناسایی آرایش‌های ناموجه فروشنندگان انرژی و خدمات معرفی کرد. این پیش‌شرط‌ها به‌عنوان مجموعه شروط لازم جهت برگزاری حراج خدمات کنترل فرکانس اولیه بوده و صرفاً به مشخصات فنی سیستم قدرت و مقدار بار بستگی دارند. بهره‌بردار مستقل سیستم قادر خواهد بود با به‌کارگیری شروط یادشده نسبت به امکان‌سنجی برگزاری حراج ذخیره اولیه اقدام نماید یا این‌که جهت شرکت‌کنندگان در حراج مقرراتی را وضع نماید. در ادامه محدودیت‌های ناشی از شبکه قدرت شامل اثر خودتنظیمی بار و حد مجاز توان عبوری خطوط در مدل مسئله لحاظ گردید. محدودیت گرفتگی در خطوط به کمک استفاده از تکنیک پخش بار مستقیم در قالب دسته نامعادلات خطی مدل و سپس به مسئله بهینه‌سازی غیر خطی اعمال گردید. اعمال این محدودیت‌ها در کنار سایر شرایط ارائه‌شده برای مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان باعث گردید که نتایج به‌دست‌آمده کاملاً اجرایی و از هر حیث موجه باشند. برای حل مسئله برنامه‌ریزی غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح از مجموعه بسته‌های نرم‌افزاری GAMS و MATLAB در طی یک حلقه بهینه‌سازی استفاده شد. در پایان نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر روی سیستم استاندارد ۳۹ شینه در حالت‌های مختلف ارائه گردید. بر طبق نتایج ارائه‌شده ملاحظه اثر خودتنظیمی بار در مسئله منجر به کاهش هزینه تدارک ذخیره اولیه می‌گردد و مقدار حد مجاز افت فرکانس در سیستم اثر قابل توجهی در هزینه تمام‌شده تدارک ذخیره‌های اولیه کنترل فرکانس دارد.

جدول ۶: کارایی الگوریتم‌های GAMS در حل مسئله

الگوریتم	زمان حل مسئله (ثانیه)	هزینه (\$)
BONMIN	۶/۶۵	۱۶۶۸۴۶
BARON	۱۰	۱۶۶۸۴۶
COUENNE	۸/۲	۱۶۶۸۴۶
KNITRO	۶۰/۰۱	۱۶۷۳۶۰
OQNLP	۳/۷۷	۱۷۰۴۰۰

علاوه بر این بررسی مقایسه‌ای الگوریتم‌های مختلف موجود در نرم‌افزار GAMS در حل مسئله برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره اولیه نشان داد که الگوریتم‌های مبتنی بر روش بهینه‌سازی انشعاب و تحدید از کارایی نسبی مطلوب‌تری در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها در حل این مسئله برخوردار هستند.

فهرست علائم

θ_i	زاویه فاز ولتاژ در باس λ ام
P_{ij}	توان عبوری از خط واصل باس i به باس j
Y_{ij}	ادمیتانس خط واصل باس i به باس j

مراجع

- [۱] مصطفی رجبی مشهدی، برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه با در نظر گرفتن قابلیت‌های فنی و محدودیت‌های واقعی واحدهای نیروگاهی، رساله دکتری مهندسی برق قدرت، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ۱۳۸۹.

- [11] K.A. Papadogiannis, and N.D. Hatziagyriou, "Optimal allocation of primary reserve services in energy markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 519-523, 2004.
- [12] J. Restrepo, *Unit Commitment With Primary Frequency Regulation Constraints in Electric Power System*, Ph.D. Thesis, McGill University, Montreal, Canada, 2005.
- [13] F. Aminifar, A. Khodaei, "A novel unit commitment approach considering transmission constraints," *15th ICEE Proceedings*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2007.
- [14] C.L. Tseng, S.S. Oren, C.S. Cheng, C. Li, A.J. Svoboda, and R.B. Johnson, "A transmission-constrained unit commitment method in power system scheduling," *Decision Support Systems*, vol. 24, pp. 297-310, 1999.
- [15] M. Pourakbari-Kasmaei, M. Rashidi-Nejad, and A. Abdollahi, "A novel unit commitment technique considering prohibited operating zones," *Journal of Applied Science*, vol. 9, no. 16, pp. 2962-2968, 2009.
- [16] R. Navarro, *Dynamic Load Models for Power Systems*, Ph.D. Thesis, Lund University, Sweden, 2002.
- [17] R.E. Rosenthal, *GAMS: A User's Guide*, GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA, 2011.
- [18] D. Chattopadhyay, "Application of general algebraic modeling system to power system optimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 15-22, 1999.
- [19] M. Rouholamini, M. Rashidinejad, and S. Esmaili, "A new methodology to solve joint energy and primary reserve scheduling," *Journal of technology and optimization*, vol. 3, no. 2, pp. 139-147, 2013.
- [20] D. Zimmerma, E. Murillo-Sanchez, Available online at: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>, 2011.
- [21] M. Esmaili, H.A. Shayanfar, and N. Amjady, "Congestion management considering voltage security of power systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 2562-2569, 2009.
- [2] A.J. Wood, and B.F. Wollenberg, *Power Generation Operation and Control*, Wiley Publishing, 1996.
- [3] R.J. Koessler, J.W. Feltes, and J.R. Willis, "A methodology for management of spinning reserves requirements," *IEEE Power Eng.*, vol. 1, pp. 584-589, 1999.
- [4] R. Raineri, S. Rios, D. Schiele, "Technical and economic aspects of ancillary services markets in the electric power industry: an international comparison," *Energy Policy*, vol. 34, pp. 1540-1555, 2006.
- [5] J.F. Restrepo, and F.D. Galiana, "Unit commitment with primary frequency regulation constraints," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 1836-1843, 2005.
- [6] F.D. Galiana, F. Bouffard, J.M. Arroyo, and J.F. Restrepo, "Scheduling and pricing of coupled energy and primary, secondary and tertiary reserves," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 11, pp. 1970-1984, 2005.
- [۷] مصطفی رجبی مشهدی، «برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه با لحاظ کردن قابلیت‌های فنی واحدهای نیروگاهی پیشرفته»، *مجله انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران*، سال ششم، شماره دوم، ۱۳۹۱.
- [۸] مصطفی رجبی مشهدی، «بررسی و تحلیل اثر استفاده از نرخ بارگیری سریع به‌منظور تأمین ذخیره اولیه بر قیمت برق و نوسانات آن»، *مجله انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران*، سال نهم، شماره دوم، صفحات ۴۸-۳۹، ۱۳۹۲.
- [9] M.R. Mashhadi, M.H. Javidi, and M.S. Ghazizadeh, "The impacts of capabilities and constraints of generating unit on simultaneous scheduling of energy and primary reserve," *Electr. Eng.*, vol. 93, no. 1, pp. 117-126, 2012.
- [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. 519-523, 1999.

زیرنویس‌ها

⁸ Sequential Scheduling Method

⁹ General Algebraic Modeling System(GAMS)

¹⁰ Mixed integer Nonlinear Programming

¹¹ Ramp up limit

¹² Slack bus

¹³ Simplex

¹⁴ Branch and Bound

¹ Contingency

² Frequency Deviation

³ Primary Reserve

⁴ Automatic Generation Control

⁵ Secondary Reserve

⁶ Tertiary Reserve

⁷ Simultaneous Scheduling Method