تدارک همزمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه بادرنظرگرفتن محدودیت گرفتگی خطوط

مهدی روح الامینی[1] مسعود رشیدی‌نژاد[2]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده فنی- دانشگاه شهید باهنر- کرمان- ایران

mehdi.amini82@gmail.com

۲- دانشیار- دانشکده فنی- دانشگاه شهید باهنر - کرمان- ایران

mrashidi@mail.uk.ac.ir

چکیده: برنامه‌ریزی همزمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس، از جمله موضوعات مورد توجه محققین در برخی پژوهش های اخیر بوده است. لیکن در این پژوهش ها از محدودیت‌های عملیاتی واحدها و شبکه قدرت صرفنظر گردیده است. بنابراین اجرایی بودن جواب نهایی تضمین نمی‌گردد. بی تردید موجه بودن جواب نهائی در گرو مدلسازی محدودیت های یاد شده در ساختار مسئله‌ی درمدار قرار گرفتن واحدها است که شروط تامین ذخیره کنترل فرکانس را نیز در بر دارد . در این مقاله، قابلیت‌های واحدهای پیشرفته نیروگاهی و ومحدودیت های فنی آنها مورد توجه بوده و علاوه‌براین محدودیت گرفتگی در خطوط انتقال به کمک روش پخش بار مستقیم درساختار مسئله بهینه سازی مدل گردیده است. سپس به کمک الگوریتم ژنتیک باینری به حل مسئله برنامه ریزی تدارک همزمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه در قالب یک روش ابتکاری پرداخته شده است. در پایان نیز روش ارائه شده بر روی سیستم استاندارد ۳۹ شینه IEEE شبیه سازی می‌شود. نتایج ارائه شده نشان از دقت و کارائی روش پیشنهادی دارد. در این بررسی،مدل بازار مشابه بازار ایران بصورت پرداخت براساس پیشنهاد می باشد.

کلمات کلیدی: **افت فرکانس مجاز، الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی همزمان، تراکم، ذخیره اولیه، نرخ بارگیری**

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۵/۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۲/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مسعود رشیدی نژاد

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – کرمان – انتهای بلوار۲۲ بهمن – دانشگاه شهید باهنرکرمان – دانشکده فنی- بخش برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

۱- مقدمه

در یک سیستم قدرت، بهره بردار مستقل سیستم وظیفه دارد که سازوکار لازم برای مقابله با تغییرات فرکانس را در قبال تغییرات ناگهانی بار مصرفی و یا خروج واحدهای نیروگاهی فراهم کند. لذا ضروری است که بخشی از ظرفیت واحد های نیروگاهی در مدار، به منظور جلوگیری از فروپاشی شبکه کنار گذارده شود[۱،۲] . ذخیره های اولیه کنترل فرکانس[۱]، ظرفیت های آماده ای هستند که در نخستین ثانیه های پس ازیک اغتشاش به انحراف فرکانس پاسخ می دهند. این ذخیره سریعترین پاسخ به انحراف فرکانس[۲] است . بعد از بکارگیری ذخیره های اولیه، سیستم AGC[۳] از طریق بکارگیری ذخیره های بهره برداری ، بازیابی فرکانس سیستم به مقدار برنامه ریزی شده را در کنار حفظ محدودیت های تبادلات بین نواحی انجام می دهدکه به کنترل ثانویه[۴] مشهور است[۳،۴]. ذخیره های کنترل فرکانس ثالثیه[۵] نیز بمنظور ترمیم ذخیره های از دست رفته، مدیریت گرفتگی شبکه و همچنین وظایفی که کنترل فرکانس ثانویه قادر به انجام آنها نبوده است در آخرین مرحله بازیابی بکارگرفته می-شوند[۵،۶،۷] .

بنابر آنچه در مراجع[۶،۷] در خصوص وابستگی میزان ذخایر بکار گرفته شده و تولید از دست رفته عنوان شده است، میزان افت فرکانس ناشی از خروج هر واحد بستگی شدیدی به برنامه ریزی ساعتی انرژی دارد و وابستگی به برنامه ریزی ساعتی انرژی نیز به معنای وابستگی به ساز و کار تامین انرژی و خدمات در مسئله حراج است.

برگزاری حراج بمنظور تامین انرژی و خدمات کنترل فرکانس (خدمات جانبی) در بازارهای برق کشورهای مختلف به روش های متفاوت از جمله برنامه ریزی همزمان[۶] و یا برنامه ریزی متوالی[۷] صورت میگیرد. در برنامه ریزی همزمان، انرژی وخدمات جانبی[۸] بصورت همزمان خریداری می گردند. این شیوه برخلاف روش های متوالی و غیرهمزمان توانائی رسیدن به بهینه سراسری را دارا می‌باشد[۵،۷]. بررسی های انجام یافته در خصوص برنامه ریزی همزمان انرژی و برنامه ریزی متوالی نشان داده است که برنامه ریزی همزمان می‌تواند موجب افزایش رفاه اجتماعی گردد[۶] . به همین علت در این مقاله روش برنامه ریزی همزمان مورد توجه بوده است.

حل مسئله بهینه سازی در مدار قرار گرفتن واحدها بادرنظر گرفتن محدودیت های تامین ذخیره های کنترل فرکانس از جمله مسائلی بوده است که در سالهای اخیر توجه محققین را به خود معطوف داشته است، مرجع[۱۰] یکی از مهمترین پژوهش های انجام یافته در خصوص برنامه ریزی 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 جائیکه میزان انحراف فرکانس در محدوده مجاز قرار گیرد،اصلاح می‌شوند. در[۱۱] نیز میزان تولید و منابع ذخیره اولیه بکمک الگوریتم درخت تصمیم[۹] و با در نظر گرفتن محدودیت های شبکه و پایداری تعیین گردیده است. دو روش فوق مشابه برنامه ریزی غیر همزمان هستند.

در مرجع[۱۲] نسبتا به نحو مطلوبی به مدلسازی مسئله برنامه ریزی همزمان انرژی وذخیره اولیه پرداخته شده است و درآن از بسته نرم افزاری *GAMS* جهت حل مسئله بصورت مخلوط عدد صحیح[۱۰] استفاده گردیده است. در این مرجع از خطی سازی معادلات هزینه سوخت استفاده شده که ممکن است رسیدن به بهینه سراسری را به مخاطره بیندازد. آقای رجبی درمرجع[۹-۷] یک روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک را جهت حل مسئله برنامه ریزی همزمان ارائه داده است و در آن محدودیت ها و قابلیت های واحدهای نیروگاهی پیشرفته نیز درنظر گرفته شده است اما محدودیت های شبکه در آنها لحاظ نگردیده است.

ملاحظه نمودن محدودیت های شبکه در ساختار مسئله‌ی در مدار قرارگرفتن واحدها و توزیع اقتصادی بار منجر به اجرائی بودن جواب های خروجی می‌گردد[۱۸]. این مهم در پژوهش هایی نظیر[۲۲-۱۹] مورد توجه بوده است و در آنها سعی شده است با ارائه روش های ابتکاری به بهینه مطلق دست یابند. عمده آنها از شیوه های اقدام اصلاحی متوالی بهره برده‌اند که از آن جمله روش مجزا سازی Benders است. از آنجا که ماهیت دو مسئله‌ی برنامه ریزی همزمان و در مدار قرار گرفتن واحدها یکسان است ضروریست که بمنظور اجرائی نمودن جواب مسئله‌ی برنامه ریزی همزمان، محدودیت های شبکه نیز در جریان حل مسئله لحاظ گردد.

اجرایی نبودن جواب نهایی، عدم توجه به محدودیت‌های شبکه انتقال و عدم حل مسئله‌ی حراج انرژی و خدمات بصورت همزمان، را می توان بعنوان نقایص پژوهش های پیشین در زمینه تامین ذخیره-های کنترل فرکانس برشمرد .

در این مقاله در ابتدا مسئله برنامه ریزی همزمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه با رعایت تمامی قیود معمول مسئله، مدلسازی گردیده به نحوی که امکان وقوع مشارکت غیر همگانی فروشندگان انرژی درکنترل فرکانس نیز در آن پیشبینی گردیده است. سپس به کمک پخش بار مستقیم، محدودیت گرفتگی خطوط در قالب دسته نا معادلات خطی مدلسازی گردیده و در ساختار مسئله‌ی بهینه سازی غیر خطی تعبیه گردیده است. شیوه مدلسازی محدودیت گرفتگی خطوط تا کنون در پژوهش های انجام یافته ارائه نگردیده است. در ادامه به کمک یک روش کاملا ابتکاری مبتنی بر حذف آرایش های ناموجه فروشندگان و بکارگیری الگوریتم ژنتیک باینری، نتایج شبیه-سازی بر روی سیستم استاندارد ۳۹ شینه ارائه شده است. نتایج شبیه سازی برای حالات با و بودن محدودیت گرفتگی خطوط ارائه گردیده است. در اینجا از اثرات گذرای افت فرکانس در قبال وقوع رخداد حادثه صرفنظرمی‌شود و فقط ذخیره های کنترل فرکانس اولیه در مسئله لحاظ می‌گردد. در این مقاله محدودیت ولتاژ شین‌ها مورد بررسی قرار نمی‌گیرد، به همین دلیل از پخش بار DC جهت ملاحظه

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

محدودیت گرفتگی خطوط استفاده شده است. همچنین فرض می‌شود که سیستم AGC در شبکه پیاده نشده است.

۲- فرمول بندی مسئله

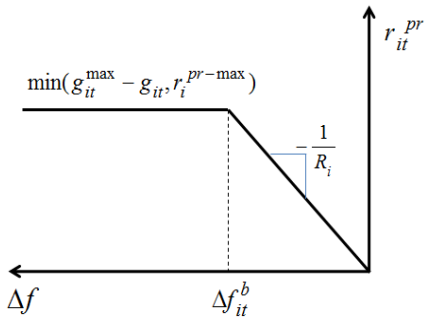
در این قسمت نحوه فرمول بندی مسئله برنامه ریزی ساعتی همزمان انرژی و ذخیره اولیه برای یک شبکه جزیره ای ارائه گردیده است. در این فرمول بندی از اثر خود تنظیمی بار صرفنظر گردیده و فرض شده است که نحوه بسته شدن بازار بر اساس پرداخت به ازای پیشنهاد صورت می گیرد. شرایط اضطراری نیز بصورت خروج واحدها و از درجه *N-1* [۱۱] مدل گردیده است. همچنین فرض گردیده است که تابع هزینه بهره برداری هر یک از واحدها بصورت یک رابطه درجه دوم قابل تقریب است. هزینه های بکارگیری ذخیره های کنترل فرکانسی شامل دو بخش میباشد: بخش اول مربوط به هزینه آمادگی واحد جهت مشارکت درکنترل فرکانس بعد از وقوع رخداد است ، به عبارت دیگر مدیر بازار بایستی مبلغی را بابت فرصت از دست رفته‌ی فروشندگان در حراج انرژی بپردازد. بخش دوم شامل هزینه‌ی استفاده از ذخایر اولیه است که در صورت بکارگیری بر حسب واحد انرژی پرداخت می گردد. در این مقاله از بخش دوم هزینه‌های ذخیره اولیه کنترل فرکانس صرفنظر می‌شود. بنابرآنچه گفته شد تابع هدف مسئله بهینه سازی توسط رابطه(۱) مدل می‌گردد. بخش اول این رابطه هزینه های بهره برداری، توقف و راه اندازی را شامل می شود و بخش دوم معرف هزینه های تامین ذخیره اولیه است .

$$Min \quad :\sum_t \sum_i [y_{it} C_{it}^{su} + z_{it.} C_{it}^{sd} + C_{it}(g_{it}, u_{it})] + C_{it}^{pr}(r_{it}^{pr}) \qquad (۱)$$

$$C_{it}(g_{it}, u_{it}) = u_{it}.c_i + b_i.g_{it} + a_i.g_{it}^{\,2} \qquad (۲)$$

$$C_{it}^{pr}(r_{it}^{pr}) = q_{it}^{pr}.r_{it}^{pr}.v_{it} \qquad (۳)$$

نرخ تغییر توان خروجی واحدهای نیروگاهی در واحد زمان بدلیل محدودیت های حرارتی دارای محدودیت است که منجر به معرفی حد بالای نرخ بارگیری[۱۲] برای هر یک از واحدها می گردد و توسط فروشندگان ارائه می‌شود[۱،۲].



شکل(۱) : محدودیت حد بالای ذخیره اولیه

در هنگام بروز اغتشاش، خروجی گاورنر آندسته از واحدهای نیروگاهیی که آماده‌ی ارائه ذخیره اولیه هستند افزایش می یابد لیکن مقدار این افزایش توسط ظر فیت بهره برداری واحد و یا نرخ بارگیری، هر کدام که کمتر باشد محدود می گردد. آنطور که در شکل(۱) نشان داده شده است ، خروجی گاورنر تاقبل ازحد اشباع خود بصورت خطی با انحراف فرکانس افزایش می یابد. لذا می توان پاسخ گاورنر به انحراف فرکانس را توسط رابطه(۴) مدل کرد :

$$r_i^{pr} = \begin{cases} -\frac{1}{R_i}.\Delta f & ,if \ \ \Delta f_i^{\,b} \geq |\Delta f| \geq 0 \\ \min(g_{it}^{\max} - g_{it}, r_i^{pr-\max}), if & \Delta f \geq \Delta f_i^{\,b} \end{cases} \qquad (۴)$$

سایر محدودیت های مسئله بهینه سازی برنامه ریزی همزمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه را می توان به شرح ذیل عنوان کرد :

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

$$\sum_{i=1}^{n} u_{it}.g_{it} = d_t \qquad (۵)$$

ب) محدودیت حدود مجاز تولید واحد ها

$$u_{it}.g_i^{\min} \leq g_{it} \leq u_{it}.g_i^{\max} \qquad (۶)$$

ج) محدودیت حد بالای ذخیره اولیه آماده ، 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 می یابد. این میزان افزایش تولید بوسیله حداکثر ظرفیت تولید و یا حداکثر نرخ بارگیری مجاز[۱۳] واحد محدود می شود. این محدودیت بصورت رابطه(۷) مدل می گردد[۵،۷،۱۰].

$$r_{it}^{pr} \leq u_{it}.v_{it}.[\min(g_{it}^{\max} - g_{it}, r_i^{pr-\max})] \qquad (۷)$$

د) محدودیت حداقل مجموع ذخیره های اولیه واحدهای مشارکت کننده در کنترل فرکانس که بصورت رابطه(۸) مدل می گردد و در آن g_j مقدار تولید واحد ازدست رفته می باشد.

$$\sum_{i=1, i\neq j}^{n} r_{it}^{pr} \geq u_{it}.g_{jt} \qquad (۸)$$

ه)محدودیت حداقل میزان افت مجاز فرکانس، این محدودیت بیانگر اینست که بکارگیری ذخیره های اولیه در هنگام بروز اغتشاش نبایستی مستلزم افت بیش از حد فرکانس باشد. رابطه(۹) این محدودیت را مدل می کند.

$$\Delta f \leq \Delta f_{cr} \qquad (۹)$$

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

در ادامه محدودیتی که عدم در نظر گرفتن آن در مرجع[۹-۷] موجب اجرایی نبودن جواب نهایی گردیده، تبیین شده است.

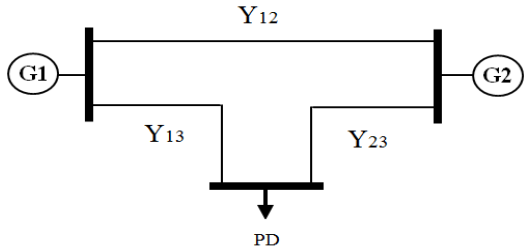
و) محدودیت حد مجاز تغییر در تولید واحدها بعد از وقوع اغتشاش، این محدودیت بیانگر این واقعیت است که مقدار تغییر خروجی واحدهای مشارکت کننده در کنترل فرکانس نبایستی از مقدار رزرو مقرر برای آن واحد تجاوز نماید. این مهم در [۱۲] به نحومطلوبی تبیین گردیده است. این محدودیت تنها محدودیت غیرخطی مسئله بوده و توسط رابطه(۱۰) مدل گردیده است.

$$\Delta g_{it}^{j} \le r_{it}^{pr} \qquad (۱۰)$$

محدودیت های متداول مسئله در مدار قرارگرفتن واحدها نظیر هزینه راه اندازی و توقف، حداقل زمان توقف[۱۴] و روشن[۱۵] بودن نیز می تواند در مدلسازی مسئله مد نظرقرار گیرد[۱۳]. در این مقاله فقط هزینه های راه اندازی در نظر گرفته شده است.

۳- 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 می دهد. رابطه(۱۱) معادله اساسی در پخش بارمستقیم است که توان عبوری از خط واصل دو باس را بدست میدهد



شکل(۲) :شبکه سه شینه

$$p_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} = Y_{ij}(\theta_i - \theta_j) \qquad (۱۱)$$

بافرض مرجع بودن باس شماره ۱و بازنویسی رابطه(۱۱) برای تمامی خطوط سیستم داریم:

$$\begin{cases} p_{12} = Y_{12}(\theta_1 - \theta_2) \\ p_{13} = Y_{13}(\theta_1 - \theta_3) \\ p_{23} = Y_{23}(\theta_2 - \theta_3) \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} p_{12}/Y_{12} \\ p_{13}/Y_{13} \\ p_{23}/Y_{23} \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}}^{\psi} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \\ \theta_3 \end{bmatrix} \qquad (۱۲)$$

در روابط فوق زاویه فاز ولتاژ برای باس مرجع برابر صفر در نظر گرفته شده است. محدودیت گرفتگی[۱۶] خطوط را نیز می توان به صورت زیر مدل کرد :

$$-\lambda_{ij} \le p_{ij} \le \lambda_{ij} \Rightarrow \begin{pmatrix} p_{ij} \\ -p_{ij} \end{pmatrix} \le \begin{pmatrix} \lambda_{ij} \\ \lambda_{ij} \end{pmatrix} \qquad (۱۳)$$

با اعمال رابطه(۱۱) به شبکه می توان نوشت :

$$PG_i - PD_i = \frac{\theta_i - \theta_1}{x_{i1}} + \ldots + \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} + \ldots + \frac{\theta_i - \theta_n}{x_{in}} \qquad (۱۴)$$

$$\Rightarrow [PG] - [PD] = [Y] \times [\theta] \qquad (۱۵)$$

$$\Rightarrow [\theta] = [Y]^{-1} \times [PG - PD] \qquad (۱۶)$$

با ترکیب روابط (۱۲) و(۱۳) و (۱۶) و بکارگیری استقرای ریاضی، دسته نامعادلات خطی جهت اعمال محدودیت شبکه در مدل مسئله‌ی برنامه ریزی همزمان بصورت رابطه(۱۸) بازنویسی می‌گردد .

$$A = [\lambda_{12}/Y_{12} \quad \ldots \quad \lambda_{ij}/Y_{ij} \quad \ldots] \qquad (۱۷)$$

$$[\psi][Y]^{-1}[PG] \le [A \quad A]^T + [\psi][Y]^{-1}[PD] \qquad (۱۸)$$

رابطه(۱۸) یک محدودیت خطی بوده که برای هر سیستم با هر تعداد باس قابل اعمال است. این رابطه در کنار محدودیت های (۷) قرار می‌گیرد. تعداد این نا معادلات خطی(رابطه(۱۳)) همواره دو برابر تعداد شاخه های شبکه است لیکن ممکن است برخی از نامعادلات با توجه به حدود مجاز بهره برداری واحدها ذاتا برقرار باشند که در این صورت می توان این دسته از معادلات را از مجموعه نا معادلات(۱۸) حذف کرد. این کار را می توان از طریق بررسی صحت روابط(۱۸) حول مقادیر مرزی تولید واحدها انجام داد.

۴- امکانسنجی آرایش انتخابی فروشندگان انرژی و خدمات

در برنامه ریزی همزمان انرژی و ذخیره اولیه کنترل فرکانس، فروشندگان ؛ قیمت های پیشنهادی خود را در خصوص انرژی و ذخیره اولیه به مدیر بازار ارائه می دهند. در پایان حراج و درساده ترین حالت، هر یک از فروشندگان می تواند 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 براینکه در مبادله انرژی شرکت یافته تامین بخشی از خدمات ذخیره اولیه را نیز به خود اختصاص داده باشد. بنابراین مدیر بازار درحراج همزمان با یک مسئله بهینه سازی متشکل از دو زیر مسئله بهینه سازی عدد صحیح و برنامه ریزی درجه دوم روبرو خواهد بود.

مدیر بازار موظف است چنان آرایشی از فروشندگان را انتخاب نماید که علاوه بر برآورده سازی محدودیت های مسئله برنامه‌ریزی، دارای حداقل هزینه از دیدگاه تابع هدف نیز باشد. بدون توجه به شیوه حل این مسئله بهینه سازی، بدیهی است که مدیر بازار آرایش های متعددی را جهت دستیابی بدین مهم مورد آزمون قرار خواهد داد. حال آنکه ممکن است به ازای برخی آرایش های انتخابی، اساسا زیر مسئله

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

بهینه سازی دارای پاسخ نبوده و دارای حل نباشد. لذا شناسایی موجه یا ناموجه بودن آرایش انتخابی جهت پیاده سازی حراج همزمان می تواند مورد استقبال شدید مدیر بازار باشد تا بتواند در مدت زمان کمتری نائل به حل مسئله آید یا اینکه در خصوص ساختار و مقررات برگزاری حراج، محدودیت هایی را وضع نماید. پیش از این در مرجع[۲۳] ساختار مسئله‌ی حراج همزمان انرژی و ذخیره اولیه‌ی کنترل فرکانس بصورت مبسوط مورد مطالعه قرارگرفته است .این مرجع روابط سه گانه ذیل را به عنوان پیش شرط های لازم برای موجه بودن آرایش فروشندگان ارائه کرده است.

$$\sum_{i=1}^{n} u_{it}.g_i^{\max} \geq \frac{\sum_{i=1}^{n} u_{it}}{\sum_{i=1}^{n} u_{it}-1} d_t \qquad (۱۹)$$

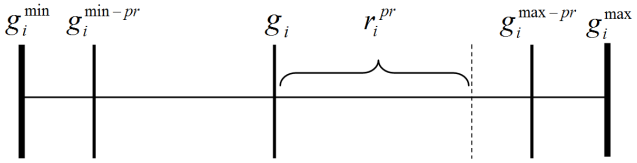
$$\sum_{i=1}^{n} v_{it}.r_i^{pr-\max} \geq \frac{d_t}{\sum_{i=1}^{n} u_{it}-1} \qquad (۲۰)$$

$$\sum_{i=1}^{n} v_{it}.\frac{\Delta f_{cr}.g_i^{\max}}{R_i.f} \geq \frac{d_t}{\sum_{i=1}^{n} u_{it}-1} \qquad (۲۱)$$

با دقت در ساختار روابط فوق الذکر می‌توان دریافت که این روابط به مقادیر تولید و ذخیره اولیه خریداری شده وابسته نیستند لذا می-توانند جهت شناسایی یک آرایش ناموجه از فروشندگان بکار گرفته شوند قبل از اینکه حل ناپذیری زیرمسئله بهینه سازی محرز گردد. ذکر این نکته ضروری است که پیش‌شرط‌های یاد شده، شرایط لازم و نه کافی برای حل‌پذیری مسئله برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره کنترل فرکانس هستند.

۵- محدودیتها و قابلیت های فنی واحدهای نیروگاهی پیشرفته

تعدد انتخاب در نرخ بارگیری از جمله قابلیت های مهم واحدهای نیروگاهی پیشرفته است.گاورنر این دسته از واحدها می تواند در مدفعال و یا غیر فعال در برابر تغیر فرکانس سیستم قرار گیرند و یا اینکه تنها به ازای محدوده معینی از انحراف فرکانس سیستم عمل نمایند. در برخی ازواحدهای نیروگاهی پیشرفته، امکان استفاده از نرخ بارگیری سریع که حدود۲تا۳ برابر میزان نرخ بارگیری عادی است، نیز فراهم شده تا در صورت نیاز بکارگرفته شود. توسعه نرم افزاری در سیستم کنترل این واحدهای نیروگاهی، این قابلیت را ایجاد نموده است که بهره بردار نیروگاه در هر لحظه بتواند نرخ بارگیری از قبل تعریف شده ای را انتخاب نماید[۲۴]. از سویی برخی واحدها قادر به مشارکت در کنترل فرکانس در تمام محدوده مجاز ظرفیت تولید نیستند. برای درک بهتر این موضوع بطور نمونه یک واحدنیروگاهی سیکل ترکیبی را در نظر آورید که در مد کنترل فرکانس در حال بهره برداری در محدوده حداقل ظرفیت تولید مجازمی باشد. به محض رخداد حادثه منجر به افزایش فرکانس (کاهش ناگهانی بار)، میزان تولید توربین گاز کاهش یافته که سبب کاهش دمای بخار ورودی به توربین می گردد، دراین شرایط خروج واحد بخار در شرف وقوع است. شرایط مشابهی نیز به ازای بهره برداری در حداکثر ظرفیت مجاز و وقوع حادثه منجر به افت فرکانس رخ می دهد[۹،۲۵]. به عبارت دیگر مشارکت واحدها در کنترل فرکانس بدلیل لزوم ملاحظه‌ی یک حاشیه امنیت در بارگیری از واحد باعث تقلیل بازه مجاز بهره برداری از واحد می گردد که در شکل(۳) نشان داده شده است. مدلسازی مسئله برنامه ریزی همزمان با توجه محدودیت ها وقابلیت های این دسته از واحدها می تواند به کمک روابط(۲۳،۲۴،۲۵) تعمیم یابد. در اینجا فرض گردیده است واحدهای پیشرفته دارای دو نرخ بارگیری عادی وسریع هستند[۷].



شکل(۳): بازه مجاز بهره برداری واحدهای مشارکت کننده در کنترل فرکانس

$$g_i'^{\min} = u_{it}.[v_{it}.g_i^{\min-pr} + (1-v_{it}).g_i^{\min}] \qquad (۲۲)$$

$$g_i'^{\max} = u_{it}.[v_{it}.g_i^{\max-pr} + (1-v_{it}).g_i^{\max}] \qquad (۲۳)$$

$$r_i^{pr-\max} = v_{it}.[w_{it}.r_i^{f-pr} + (1-w_{it}).r_i^{n-pr}] \qquad (۲۴)$$

۶- روش پیشنهادی برای حل مسئله

مسئله‌ی برنامه ریزی همزمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه شامل متغیرهای باینری و پیوسته است. متغیرهای باینری بیانگر وضعیت واحد شامل وضعیت درمدار قرار گرفتن، مد کنترل فرکانس، راه‌اندازی، توقف و نوع نرخ بارگیری در طی هر ساعت می باشد و متغیرهای پیوسته شامل میزان تولید و ذخیره اولیه هر واحد در هر ساعت می باشد. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک باینری در کنار روابط معرفی شده جهت حل مسئله برنامه ریزی همزمان انرژی و ذخیره اولیه انجام شده است. این الگوریتم دارای یک هوشمندی جمعی بوده و بطور هدفمند در فضای مسئله جستجو می کند و توانایی رسیدن به بهینه سراسری را دارا می باشد. علاوه براین به مشق پذیر بودن و یا محدب بودن تابع هدف بستگی ندارد[۱۵،۱۶]. در روش پیشنهادی، به منظور افزایش سرعت همگرایی مسئله از روابط(۱۹،۲۰،۲۱) در راستای شناسایی‌وحذف کروموزوم های ناشدنی استفاده شده است. دراین مقاله

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

از شیوه کد بندی دودویی برای متغیرهای باینری و باتوجه به حالت های مختلفی که یک واحد ممکن است برای درمدار قرارگرفتن و مشارکت در کنترل فرکانس داشته باشد، استفاده شده است[۹-۷]. این حالت ها در جدول(۱) آمده اند. حالت هایی که امکان وقوع ندارند با علامت× مشخص شده اند. با توجه به اینکه دو نرخ بارگیری برای هر واحد در نظر گرفته شده است، تعدادحالات ممکن برای هر واحد چهار حالت می باشد.

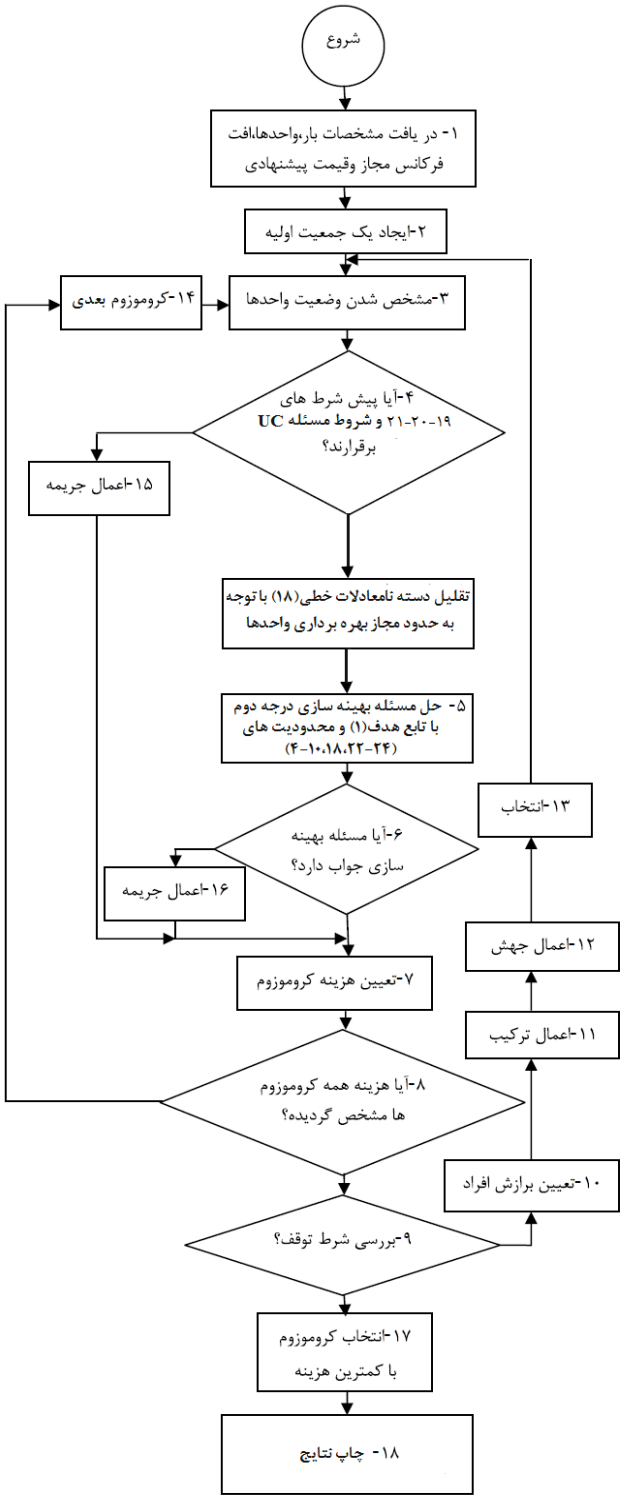
جدول(۱): حالت های ممکن وضعیت واحد

ردیف	u_{it}	v_{it}	w_{it}	وضعیت حالت
۱	۰	۰	۰	۱
۲	۰	۰	۱	×
۳	۰	۱	۰	×
۴	۰	۱	۱	×
۵	۱	۰	۰	۲
۶	۱	۰	۱	×
۷	۱	۱	۰	۳
۸	۱	۱	۱	۴

در مرجع[۷] دو رابطه جهت حدف کروموزوم های ناشدنی ارائه شده است. یکی از این دو همان شرط مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها(رابطه(۶)) و دیگری رابطه(۸) است که به جای مقادیر تولید واحدها و ذخیره های اولیه به ترتیب حد پایین تولید واحدها و حد بالای ذخیره اولیه قرار گرفته است. در اینجا علاوه بر روابط فوق، روابط (۱۹،۲۰،۲۱) نیز جهت شناسایی حالات ناممکن بکارگرفته شده اند. هر چند روابط مزبور قادر به حذف تمامی حالات ناممکن نیستند. لذا در صورتیکه زیر مسئله بهینه سازی غیر خطی(مسئله برنامه‌ریزی درجه دوم) جواب نداشته باشد، کروموزوم متناظر با این آرایش از طریق افزودن بر مقدار تابع هدف جریمه می گردد تا با شانس کمتری در نسل بعدی ظاهر گردد. این روند برای تمام کروموزوم ها تکرار و نسل ها پی در پی تولید می‌گردد تا شرط توقف برآورده و کروموزوم با کمترین هزینه مشخص شود. شکل(۴) چرخه روش پیشنهادی را نمایش می دهد.

۶- شبیه سازی بر روی سیستم مورد مطالعه

در این قسمت روش ارائه شده بر روی سیستم ۳۹ شینه استاندارد *IEEE* متشکل از ۱۰ واحد و ۴۶ شاخه پیاده گردیده است. به منظور سادگی شبیه سازی تنها برای یک ساعت انجام یافته و از محدودیت های حداقل زمان توقف و روشن ماندن واحدها صرفنظر می‌شود. مشخصات خطوط و بار در باس های سیستم مورد مطالعه مطابق نسخه ۴ از بسته نرم افزاری matpower [۲۶] و مشخصات واحدهای نیروگاهی مطابق مرجع [۲۷] انتخاب گردیده است. جدول(۲) مشخصات واحدهای نیروگاهی این سیستم را نشان می دهد. در این جدول مقدار نرخ بارگیری سریع برابر۲۰ درصد حد بالای ظرفیت تولید واحد در نظر گرفته شده است. مشابه مرجع[۹]، مقدار نرخ بارگیری عادی معادل یک دوم نرخ بارگیری سریع می باشد.



شکل(۴): الگوریتم روش پیشنهادی جهت حل مسئله

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

قیمت استفاده از نرخ بار گیری سریع برابر ضریب ترم درجه اول تابع هزینه سوخت و قیمت استفاده از نرخ بار گیری عادی نیز برابر ۰,۱ قیمت ذخیره اولیه با نرخ بارگیری سریع فرض می‌شود. در این جدول، مقادیر حدود بالا و پایین تولید مجاز واحدهای مشارکت کننده در کنترل فرکانس، با رعایت یک حاشیه امنیت انتخاب شده اند.

جدول(۲): مشخصات واحدهای نیروگاهی

واحد	g^{min}	g^{max}	g^{min}	g^{max}	a	b	c	$r^{pr\text{-}max}$	SUC
	MW				$/MWh²	$/MWh	$/h	MW	$
A	۱۵۰	۱۰۴۰	۲۰۰	۹۵۰	۰,۰۰۰۴۸	۱۶,۱۹	۱۰۰۰	۲۰۸	۹۰۰۰
B	۱۵۰	۶۴۶	۲۰۰	۶۰۰	۰,۰۰۳۱	۱۷,۲۶	۹۷۰	۱۳۰	۱۰۰۰۰
C	۲۰	۷۲۵	۴۰	۷۰۰	۰,۰۰۲	۱۶,۶	۷۰۰	۱۴۶	۱۱۰۰
D	۲۰	۶۵۲	۴۰	۶۱۰	۰,۰۰۲۱۱	۱۶,۵	۶۸۰	۱۳۰	۱۱۲۰
E	۲۵	۵۰۸	۵۰	۴۸۰	۰,۰۰۳۹۸	۱۹,۷	۴۵۰	۱۰۲	۱۸۰۰
F	۲۰	۶۸۷	۴۰	۶۴۰	۰,۰۰۷۱۲	۲۲,۲۶	۳۷۰	۱۳۸	۳۴۰
G	۲۵	۵۸۰	۵۰	۵۶۰	۰,۰۰۷۹	۲۷,۷۴	۴۸۰	۱۱۶	۵۲۰
H	۱۰	۵۶۴	۲۰	۵۵۰	۰,۰۰۴۱۳	۲۵,۹۲	۶۶۰	۱۱۲	۶۰
I	۱۰	۸۶۵	۲۰	۸۱۰	۰,۰۰۲۲۲	۲۷,۲۷	۶۶۵	۱۷۴	۶۰
J	۱۰	۱۱۰۰	۲۰	۱۰۲۵	۰,۰۰۱۷۳	۲۷,۷۹	۶۷۰	۲۲۰	۶۰

جدول(۳) نتایج حاصل از شبیه سازی مسئله برنامه ریزی همزمان را بر روی این سیستم نشان می‌دهد. فرکانس سیستم، افت فرکانس مجاز و دروپ گاورنرها به ترتیب برابر ۵۰ هرتز، ۰,۶ هرتز و ۴٪ در نظرگرفته شده است.

جدول(۳) : نتایج حاصل از شبیه سازی مسئله برنامه ریزی همزمان بر روی سیستم ۱۰ واحدی

حالت	الف		ب		ج		د		ه	
واحد	g_i	r_i^{pr}	g_i	r_i^{pr}	g_i	r_i^{pr}	g_i	r_i^{pr}	g_i	r_i^{pr}
A	۵۶۹	۱۰۴	۴۵۶	۲۰۸	۶۳۴	۹۸	۳۸۰	۲۰۸	-	-
B	-	-	-	-	۵۳۵	۶۵	۶۴۶	-	-	-
C	۶۰۰	۷۳	۶۵۱	۴۹	۶۲۷	۷۳	۳۴۴	۱۴۵	۴۴۵	۷۳
D	۵۴۵	۶۵	۴۸۰	۱۳۰	۵۴۵	۶۵	۴۸۰	۱۳۰	۴۵۳	۶۵
E	۴۳۴	۵۱	۲۱۷	۱۰۲	۴۳۴	۵۱	۲۷۳	۱۰۲	-	-
F	۵۵۵	۶۹	۵۴۴	۹۶	۵۲۴	۶۹	۵۱۵	۱۲۵	۴۴۹	۶۹
G	۱۵۴	۵۸	۲۳۵	۵۸	۱۲۶	۵۸	۲۸۸	۱۱۶	۷۶	۵۸
H	۴۹۴	۵۶	۴۰۷	۵۶	۴۶۱	۵۶	۴۳۱	۱۱۲	۳۶۶	۵۶
I	۵۸۶	۸۷	۸۰۹	-	۵۵۴	۸۷	۷۳۹	۷۱	۳۷۷	۸۷
J	۵۶۳	۱۱۰	۷۰۰	۱۱۰	۵۶۰	۱۱۰	۱۰۱۰	-	۳۳۴	۱۱۰
هزینه	۱۲۵۹۶۴,۲		۱۳۸۴۶۶,۷		۱۴۴۹۶۶,۸		۱۷۱۷۰۵,۳		۶۸۱۰۱,۷	

جدول(۴) : توان عبوری از خطوط در شرایط متناظر جدول(۳)

خط	حد گرفتگی MW	الف	ب	ج	د	ه
۲ -۱	۶۰۰	۲۹۵	۱۷۳	۲۹۳	۲۲	۱۰۰
۳۹ -۱	۱۰۰۰	۲۲۵	۱۷۳	۲۱۴	۲۲	۱۰۰
۳-۲	۵۰۰	۴۹۰	۵۰۰	۴۵۰	۵۰۰	۱۵۶
۲۵ -۲	۵۰۰	۲۱۶	۲۱۷	۱۰۹	۱۴۱	۲۵۸
۳۰ -۲	۹۰۰	۵۶۹	۴۵۷	۶۳۴	۳۸۱	۰
۴ -۳	۵۰۰	۲۵۸	۲۲۸	۹۰	۱۲۰	۷۰
۱۸ -۳	۵۰۰	۰	۳۷	۱۰۲	۱۱۸	۴۴
۵ -۴	۶۰۰	۱۰۵	۴۹	۱۲۷	۱۹۶	۱۸
۱۴ -۴	۵۰۰	۲۰۷	۱۸۷	۱۸۲	۹۰	۱۵۱
۶ -۵	۱۲۰۰	۱۵۴	۱۷۱	۴۴۲	۳۸۶	۱۲۹
۸ -۵	۹۰۰	۲۵۹	۲۱۹	۳۱۵	۱۹۰	۱۴۷
۷-۶	۹۰۰	۲۹۵	۲۶۷	۴۰۲	۲۹۰	۱۷۵
۱۱ -۶	۴۸۰	۴۵۶	۴۴۵	۳۱۶	۳۷	۳۰۷
۳۱ -۶	۱۸۰۰	۷	۷	۵۲۷	۶۳۸	۴
۸ -۷	۱۰۰	۱۲۷	۹۶	۲۱۵	۱۰۰	۸۰
۹ -۸	۹۰۰	۱۱	۶۶	۱۱۳	۱۳۵	۱۵
۳۹ -۹	۹۰۰	۷	۶۶	۱۰۸	۱۳۵	۱۵
۱۱-۱۰	۶۰۰	۴۴۵	۴۳۷	۳۱۹	۴۸	۳۰۱
۱۳-۱۰	۶۰۰	۱۵۴	۲۱۴	۳۰۸	۱۹۶	۱۴۴
۳۲-۱۰	۹۰۰	۶۰۰	۶۵۱	۶۲۷	۲۴۴	۴۴۵
۱۱-۱۲	۵۰۰	۱۱	۸	۳	۱۱	۶
۱۳-۱۲	۵۰۰	۱۷	۱۴	۴	۴	۹
۱۴-۱۳	۲۰۰	۱۳۷	۲۰۰	۳۰۳	۲۰۰	۱۳۴
۱۵ -۱۴	۶۰۰	۷۰	۱۳	۱۲۱	۱۱۰	۱۷
۱۶-۱۵	۶۰۰	۳۰۰	۲۲۱	۱۳۴	۱۵۰	۱۴۷
۱۶-۱۷	۶۰۰	۶۵	۹۱	۲۴	۹۷	۸۳
۱۹-۱۶	۲۰۰	۴۹۰	۲۰۰	۴۳۵	۲۰۰	۱۷۷
۲۱-۱۶	۶۰۰	۱۶۷	۱۹۷	۱۰۲	۱۷۲	۱۷۶
۲۴-۱۶	۶۰۰	۵۵	۲۶	۱۱۵	۵۱	۱۱
۱۸-۱۷	۶۰۰	۱۱۴	۷۸	۲۴	۱۰	۱۰۹
۲۷-۱۷	۶۰۰	۴۹	۱۶۷	۰	۱۰۷	۲۶
۲۰-۱۹	۹۰۰	۵۵	۲۸۱	۱۱۰	۲۸۰	۲۷۶
۳۳-۱۹	۹۰۰	۵۴۵	۴۸۰	۵۴۵	۴۸۰	۴۵۳
۳۴-۲۰	۹۰۰	۴۳۴	۲۱۷	۴۳۴	۲۷۳	۰
۲۲-۲۱	۹۰۰	۳۶۴	۳۹۸	۳۲۱	۳۹۴	۲۸۷
۲۳-۲۲	۶۰۰	۱۹۱	۱۴۶	۲۰۳	۱۲۰	۱۶۱
۳۵ -۲۲	۹۰۰	۵۵۵	۵۴۴	۵۲۴	۵۱۵	۴۴۹
۲۴-۲۳	۲۰۰	۱۶۷	۲۰۰	۱۳۱	۲۰۰	۱۳۷
۳۶-۲۳	۹۰۰	۱۵۴	۲۳۵	۱۲۶	۲۸۱	۷۶
۲۶-۲۵	۶۰۰	۱۱۷	۲۶	۱۷۳	۱۰۸	۱۸
۳۷-۲۵	۹۰۰	۴۹۴	۴۰۷	۴۶۱	۴۳۱	۳۶۶
۲۷-۲۶	۶۰۰	۲۵۱	۳۷۵	۲۲۵	۳۳۶	۱۴۰
۲۸-۲۶	۶۰۰	۹۹	۲۰۷	۶۱	۱۵۰	۷۹
۲۹ -۲۶	۶۰۰	۱۳۴	۲۴۴	۱۰۱	۱۹۱	۹۹
۲۹ -۲۸	۶۰۰	۲۴۷	۳۵۸	۲۲۶	۳۱۷	۱۶۳
۳۸-۲۹	۱۲۰۰	۵۸۶	۸۰۹	۵۵۴	۷۳۹	۳۷۷

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.2- Fall & Winter 2012
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

ستون (الف) از جدول(۳)، نتایج حاصله شامل ذخیره های کنترل فرکانس اولیه به همراه مقادیر تولید ژنراتورها به ازای بار۴۵۰۰ مگاوات و بدون استفاده از نرخ بارگیری سریع را نشان می‌دهد. دراین حالت محدودیت گرفتگی خطوط در نظرگرفته نشده است. مقادیر توان عبوری هر یک از خطوط سیستم مورد مطالعه تحت این شرایط در جدول(۴) آمده است. پخش بار در شرابطی انجام شده است که مقادیر تولید هر یک از واحدها مطابق جدول(۳) تنظیم گردیده است. لازم به ذکر است، در مواردیکه بار سیستم با مقدار بار سیستم اولیه، [۲۶]، متفاوت بوده، بار در تمامی باس ها به یک نسبت افزایش و یا کاهش یافته است. مقدار فلوی مجاز عبوری از خطوط سیستم مطابق مرجع[۲۸] می‌باشد. همانطور که در جدول(۴) مشاهده می گردد به دلیل عدم ملاحظه حد گرفتگی خطوط در مدل مسئله، خطوط ۸- ۷ و ۱۹- ۱۶ دچار تراکم گردیده اند. در حالت (ب) از جدول(۳) محدودیت گرفتگی نیز لحاظ گردیده است تحت این شرایط همانطور که انتظار می رفت مقدار هزینه نسبت به حالت (الف) افزایش یافته است ضمن اینکه واحدهایA, D, E, F با نرخ بارگیری سریع در مد کنترل فرکانس شرکت یافته اند. در این حالت در صورت عدم بکارگیری نرخ بارگیری سریع، مسئله حل ناپذیر است که اشاره به نقش مهم نرخ بارگیری سریع دارد.

ستون (ج) از جدول(۳) مقادیر بهینه‌ی تولید واحدها و ذخیره اولیه را بطور مشابه اما به ازای بار ۵۰۰۰ مگاوات نشان می دهد. از آنجا که محدودیت تراکم در این حالت لحاظ نگردیده، خطوط ۸- ۷، ۱۴-۱۳ و ۱۹-۱۶ دچار تراکم هستند. در حالت (د) محدودیت تراکم نیز به شرایط مفروض حالت (ج) اضافه گردیده است. در این شرایط به غیر ازواحد I ،سایر واحدها بانرخ بارگیری سریع در کنترل فرکانس شرکت خواهند کرد ضمن اینکه دو واحد نیز در مد غیر فعال نسبت به کنترل فرکانس قرار گرفته اند. بدلیل افزایش بار سیستم در این حالت، واحد B که تاپیش ازاین در تولید مشارکت نداشت به جمع فروشندگان انرژی و خدمات پیوسته است.

ستون (ه) نتایج حاصل از حل مسئله‌ی برنامه ریزی همزمان را به ازای بار ۲۵۰۰ مگاوات نشان میدهد. تحت این شرایط علیرغم اعمال محدودیت گرفتگی خطوط، تمامی واحدهای قرار گرفته در مدار، با نرخ بارگیری عادی در کنترل فرکانس شرکت خواهند کرد که به دلیل کاهش مقدار بار سیستم و ارزان تر بودن قیمت نرخ بارگیری عادی در برابر نرخ بارگیری سریع است. این مهم نشان از نقش اجتناب ناپذیر نرخ بارگیری سریع در حل پذیری مسئله‌ی برنامه ریزی همزمان در قبال افزایش بار دارد.

مدت زمان حل مسئله در روش پیشنهادی، با استفاده از یک دستگاه رایانه CoreI5-4*2.26GH-1GB(RAM) برابر ۲۴۹ ثانیه می‌باشد. درمرجع[۵] که از بسته نرم‌افزاری *GAMS* استفاده شده، زمان حل مسئله بر روی یک سیستم قدرت ۱۷واحدی ، برابر۱۱۰ ثانیه عنوان شده است. لیکن در مقاله حاضر، محدودیت حد پرشدگی خطوط و محدودیت‌های واقعی واحدهای نیروگاهی مدرن، مورد توجه بوده و علاوه‌براین دو متغیر باینری v_{it} و w_{it} که به ترتیب بیانگر وضعیت مشارکت واحد در کنترل فرکانس و نوع نرخ بارگیری واحد می‌باشند، نیز به ساختار مسئله اضافه شده است. در اینجا شبیه‌سازی به کمک بسته نرم‌افزاری MATLAB-R2009a انجام شده است.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا به فرمول بندی مسئله‌ی برنامه ریزی همزمان انرژی و ذخیره‌ی کنترل فرکانس اولیه پرداخته شده است. مسئله‌ی مذکور یک مسئله غیرخطی مخلوط عدد صحیح است و فضای جستجوی گسترده ای را بسته به تعداد واحدها در بر میگیرد. این مقاله مجموعه پیش شرط هایی را جهت شناسایی آرایش های ناموجه فروشندگان انرژی وخدمات معرفی می‌کند که منجر به کاهش چشم گیر فضای جستجوی مسئله گردیده است. در ادامه مجموعه محدودیت ها و قابلیت های فنی واحدهای نیروگاهی پیشرفته در کنار محدودیت های شبکه در مدل مسئله لحاظ گردید. محدودیت شبکه شامل حد گرفتگی خطوط به کمک استفاده از تکنیک پخش بار مستقیم در قالب دسته نامعادلات خطی مدل و سپس به مسئله‌ی بهینه سازی غیرخطی اعمال گردیده است. اعمال این محدودیت ها در کنار سایر شرایط ارائه شده برای مسئله‌ی برنامه ریزی همزمان باعث گردیده که نتایج بدست آمده کاملا اجرایی و از هر حیث موجه باشند. در پایان نیز نتایج حاصل از شبیه سازی روش پیشنهادی بر روی سیستم استاندارد۳۹ شینه *IEEE* در هر دو حالت با و بدون در نظر گرفتن محدودیت تراکم خطوط به ازای مقادیر مختلف بار آمده است. بهینه سازی با استفاده از یک روش ابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک باینری انجام یافته است. براساس نتایج بدست آمده نقش نرخ بارگیری سریع به عنوان یکی از قابلیت های واحدهای نیروگاهی مدرن در افزایش قابلیت بارپذیری سیستم بررسی گردیده است. نتایج شبیه سازی موئید کارایی روش ارائه شده در رسیدن به پاسخ بهینه سراسری می باشد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

فهرست علائم

سیستم کنترل اتوماتیک تولید واحدها	AGC
ترم درجه دوم تابع هزینه	a_i
ترم درجه اول تابع هزینه واحد i ام	b_i
ترم ثابت تابع هزینه واحد i ام	c_i
هزینه راه اندازی واحد i ام در طی دوره t	C_{it}^{su}
هزینه توقف واحد i ام در طی دوره t	C_{it}^{sd}
دیماند مصرفی در طی دوره t	d_t
فرکانس سیستم	f
مقدار تولید واحد i ام	g_{it}
مقدار تولید از دست رفته‌ی واحد j ام در دوره t	g_{jt}
حد پایین تولید واحد i ام	$g_i^{\min}$
حد بالای تولید واحد i ام	$g_i^{\max}$
حد پایین بهره برداری واحد i ام در مد کنترل فرکانس	$g_i^{\min-pr}$
حد بالای بهره برداری واحد i ام در مد کنترل فرکانس	$g_i^{\max-pr}$
تولید واحد i ام در دوره t ام	g_{it}
تعدادواحدها (فروشندگان و یا پیشنهاد دهندگان قیمت)	n
توان عبوری از خط واصل باس i به باس j	p_{ij}
مقدار تولید در باس i	PG_i
مقدار بار در باس i	PD_i
قیمت ذخیره اولیه واحد i ام	q_{it}^{pr}
ذخیره اولیه واحد i ام در دوره t	r_{it}^{pr}
نرخ بارگیری عادی	r_i^{n-pr}
نرخ بارگیری سریع	r_i^{f-pr}
حد بالای ذخیره اولیه	$r^{pr-\max}$
شیب پاسخ گاورنر واحد i ام	R_i
هزینه راه اندازی	suc
متغیر باینری مشارکت واحد i ام در تامین انرژی	u_{it}
متغیر باینری مشارکت واحد i ام در کنترل فرکانس	v_{it}
متغیر باینری نوع مشارکت واحد i ام در کنترل فرکانس	w_{it}
ادمیتانس خط واصل باس i به باس j	Y_{ij}
متغیر باینری راه اندازی واحد i ام در دوره t	y_{it}
متغیرباینری توقف واحد i ام در دوره t	z_{it}
زاویه فاز ولتاژ در باس i ام	θ_i
حد مجاز توان عبوری از خط واصل باس i به باس j	λ_{ij}
ماتریس باینری ضرایب	ψ
افت فرکانس شکست برای پاسخ گاورنر واحد i ام	Δb_i
افت فرکانس بحرانی سیستم	Δf_{cr}
تغییر تولید واحد i ام در اثر خروج واحد j ام	Δg_{it}^{j}
افت فرکانس ناشی از خروج واحد i ام	Δf_i^{k}

مراجع

[1] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994.

[2] A.J.Wood and B.F.Wollenberg Power Generation Operation and Control, 2nd Ed. New York: Wiley, 1996.

[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, pp.584-589, Feb.1999.

[4] R.Raineri, S.Rios, D.Schiele,"Technical and Economic Aspects of Ancillary Servieces Markets in the Electric Power Industry: an International Comparsion", Energy Policy 34, pp.1540-1555, 2006.

[5] Jose' F.Restrepo,Francisco D.Galiana, "Unit Commitment With Primary Frequency Regulation Constraints" ,IEEE Trans.Power Syst. ,vol.20, no.4,pp.1836-1843, Nov 2005.

[6] Fransisco D.Galiana, Franccois Bouffard, Jose M.Arroyo, Jose' F.Restrepo,"Scheduling and Pricing of Coupled Energy and Primary, Secondary, and Tertiary Reserves", Proceedings of the IEEE, pp.1970-1984, vol.93, no.11, 2005.

[۷] مصطفی رجبی مشهدی، محمدحسین جاویدی، محمد صادق قاضی‌زاده، "برنامه ریزی همزمان انرژی و ذخیره کنترل فرکانس اولیه با لحاظ کردن قابلیت های فنی واحدهای نیروگاهی پیشرفته" ،مجلیه انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال ششم، شماره دوم، ۱۳۸۸.

[۸] مصطفی رجبی مشهدی، محمد حسین جاویدی، محمد صادق قاضی زاده، " بررسی وتحلیل اثراستفاده از نرخ بارگیری سریع به منظور تامین ذخیره‌ی اولیه بر قیمت برق و نواسانات آن"، مجله انجمن مهندسین برق والکترونیک ایران، سال ششم، شماره دوم، ۱۳۸۸.

[9] M.R.Mashhadi, M.H.Javidi, M.S.Ghazizadeh, "The Impacts of Capabilities and Constraints of Generating Unit on Simultaneous Scheduling of Energy and Primary Reserve", elen

[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, May 1999.

[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, Feb.2004.

[12] Jose'.Restrepo, "Unit Commitment With Primary Frequency Regulation Constraints in Electric Power System", the thesis submitted to the department of electrica and computer engineering og McGill University, Montral, Canada, February 25,2005.

[13] K.S.Swarup and S.Yamashiro,"Unit Commitment Solution Methodology Using Genetic Algorithm", IEEE Trans Power Syst., vol.17, no.1, pp.87-91, Feb 2002.

[14] Damousis IG, Bakirtzis AG, Dokopoulos PS (2004) "A solution to the unit commitment problem using integer-codeed genetic algorithym". IEEE Trans Power Syst 19(2): 1165-1172.

[15] Mohamed A.El-Sharkawi, Kwang Y.Lee, Modern Heuristic Optimization Techniques, John Wiley & Sons Inc, 2005.

[16] G.Rudolph, "Convergence Analysis of Canonical Genetic Algorithm", IEEE Trans on Neural Networks, vol.5, No.1, pp.96-101, 1994.

[17] C.Wang, S.M.Shahidehpour,"Effect of ramp-rate limits on unit commitment and economic dispatch", IEEE Transaction on Power Systems, vol. 8, pp. 1341-1350, Aug 1993.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]

[18] Farrokh aminifar, amin khodaei, Sharif University of Technology, "A Novel Unit Commitment Approach Considering Transmission Constraints", 15th ICEE Proceedings.
[19] Mohammad Shahidehpour, Zuyi Li, "Security-Constrained Unit Commitment with AC Constraints", IEEE Transaction on power systems, vol. 20, NO. 3. August 2005.
[20] Chung-Li Tseng a,), Shmuel S. Oren a, Carol S. Cheng b, Chao-an Li b,Alva J. Svoboda b, Raymond B. Johnson, "A transmission-constrained unit commitment method in power system scheduling", Decision Support Systems 24 (1999) 297–310.
[21] M.Pourakbari-Kasmaei, M.Rashidi-Nejad, A.Abdollahi, "A Novel Unit Commitment Technicue Considering Prohibited Operating Zones", Journal of Applied Science 9(16): 2962-2968, 2009
[22] Carlos Murillo, Robert J. Thomas, "Thermal Unit Commitment Including Optimal AC Power Flow Constraints", Hawaii International Conference On System Sciences, January 6-9, 1997, Kona, Hawaii.
[23] M.Rouholamini, M.Rashidinejad, S.Esmaeili, "A New Methodology to Solve Joint Energy and Primary Reserve Scheduling", Fifth Global Conference on Power Control and Optimization, June 2011, Dubai, UAE.
[24] Technical Data and Specification, Shirvan Combined Cycle Power Plant (Gas Turbine Portion), 2005.
[۲۵] دستورالعمل قرارگرفتن واحدهای گازیGE-F9 نیروگاه سیکل ترکیبی کشور در وضعیت کنترل فرکانس، نیروگاه شهید رجائی، سال ۸۶.
[26] D.Zimmerma, E. Murillo-S_anchez, http://www.pserc .cornell.edu/matpower, February 7, 2011.
[27] T. Senjyu, H. Yamashiro, K. Uezato, T. Funabashi, A unit commitment problem by using genetic algorithm based on unit characteristic classification , IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting 1 (2002), 58 63.
[28] Masoud Esmaili, Heidar Ali Shayanfar, Nima Amjady, "Congestion management considering voltage security of power systems", Energy Conversion and Management 50 (2009) 2562–2569.

زیرنویس ها

[1] Primary frequency control reserve
[2] Frequency deviation
[3] Automatic Generation Control
[4] Secondary reserve
[5] Terrtiary reserve
[6] Simultaneous scheduling
[7] Sequential scheduling
[8] Ancillary service
[9] Decision tree
[10] Mixed integer programming
[11] Single contingency
[12] Ramp Rate
[13] Ramp up limite
[14] Minimum Down Time
[15] Minimum Up Time
[16] Congestion

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-19]