

طراحی و بکارگیری یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی جهت حل مسئله بهینه‌سازی تخصیص انرژی و رزرو

محمد فرشاد
دانشجوی کارشناسی ارشد
گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
با همکاری دفتر تحقیقات و استانداردها - شرکت برق منطقه‌ای خراسان

جواد ساده
استادیار

حبیب رجبی مشهدی
استادیار

واژه‌های کلیدی: بازار رقابتی برق، بازار رزرو، تخصیص انرژی و رزرو، رزرو گرم و سرد

چکیده

در محیط رقابتی صنعت برق، در بین خدمات جانبی، تامین ظرفیت رزرو مورد نیاز سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تامین ظرفیت رزرو از طریق یک بازار رقابتی می‌تواند در رسیدن به قابلیت اطمینان مطلوب و دلخواه سیستم، حل مشکلات ظرفیتی سیستم و کاهش هزینه تامین رزرو موثر واقع گردد. انتخاب یک مدل کامل و مناسب برای بازار رزرو می‌تواند مشکلات بهره‌برداری رزرو را به حداقل برساند. در این مقاله پس از تعریف انواع کالای رزرو، مدلی برای راه اندازی بازار رزرو در محیط تجدید ساختار یافته صنعت برق ارائه می‌شود. همچنین روشی برای حل مسئله بهینه سازی تخصیص کالای انرژی و رزرو توسط الگوریتم ژنتیک و ترکیب این الگوریتم با برنامه‌ریزی خطی ارائه خواهد شد. روش ارائه شده با کاهش فضای جستجوی الگوریتم ژنتیک باعث افزایش سرعت همگرایی می‌گردد و قابلیت اجرا در خصوص سیستم‌های با تعداد ژنراتورهای بالا را دارد.

۱- مقدمه:

در محیط رقابتی صنعت برق، سرویس‌های جانبی^۱ خدمات مکملی هستند که در زمینه‌های تولید، کنترل، انتقال و توزیع توان الکتریکی و در جهت تسهیل فنی و اقتصادی انجام مبادلات برق ارائه می‌گردند [۱]. انواع سرویس‌های جانبی ممکن است از سیستمی به سیستم دیگر متفاوت باشد، زیرا سرویس‌های جانبی با توجه به نیازها و مشخصات هر سیستم تعریف می‌گردند. یکی از انواع سرویس‌های جانبی که در اکثر سیستم‌ها بصورت مشترک وجود دارد، رزرو می‌باشد که مهمترین عنصر جهت تامین قابلیت اطمینان مطلوب سیستم به شمار می‌آید.

ظرفیت رزرو برای حفظ فرکانس سیستم در حد استاندارد و جلوگیری از ریزش بار^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سیستم قدرت ممکن است رخداد‌های پیش‌بینی نشده‌ای همچون افزایش غیر منتظره بار، خروج غیر منتظره ژنراتورها

1. Ancillary Services
2. Load Shedding

بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق

تامین رزرو موردنیاز سیستم بازاری رقابتی راه‌اندازی کند و یا تحت قراردادهای دو طرفه با تولیدکنندگان این میزان رزرو را خریداری نماید. آنچه در اینجا بیشتر مد نظر قرار گرفته است، تامین رزرو از طریق یک بازار رقابتی می‌باشد.

انتخاب یک مدل کامل و مناسب برای بازار رزرو می‌تواند مشکلات بهره‌برداری رزرو را به حداقل برساند، و قابلیت اطمینان، امنیت و پایداری سیستم را در حد مطلوبی از استانداردهای تعیین شده حفظ نماید. انتخاب این مدل مناسب، وابسته به نوع و ظرفیت و چگونگی آرایش واحدهای تولیدی سیستم، چگونگی آرایش بارهای مصرفی و خطوط انتقال شبکه، ساختار سیستم از نظر سازمان‌ها و شرکت‌های فعال در محیط تجدید ساختار یافته، ساختار بازار انرژی و حتی استراتژی‌های سیاسی و اقتصادی حاکم بر سیستم است. ممکن است مدلی در یک سیستم بسیار کار آمد باشد، ولی همین مدل در سیستم‌های دیگر قابل پیاده سازی نباشد و یا اجرای آن باعث ایجاد مشکلاتی در ماهیت اقتصادی و رقابتی بازار شود.

حل مسئله بهینه سازی تخصیص کالای انرژی و رزرو جزو توابع عملیاتی بازار محسوب می‌گردد که می‌تواند توسط ISO و در جهت تعیین برندگان مناقصه بازار اجرا شود. در مطالعات تحقیقاتی نیز فرمولبندی و حل مسئله بهینه سازی تخصیص انرژی و رزرو برای مدل نمودن، تحلیل و بررسی شرایط بازار مفید است. تاکنون مطالعات فراوانی در خصوص فرمولبندی و روش حل مسئله بهینه سازی تخصیص صورت گرفته است. فرمولبندی مسئله بهینه سازی وابسته به مدل بازار انرژی و رزرو و طراحی و قوانین اتخاذ شده در اجرای آنها است. روش حل مسئله بهینه سازی نیز باید با توجه به فرمولبندی مسئله انتخاب شود.

در مرجع [۷]، LR^۵ برای حل مسئله بهینه سازی دیسپچ توام انرژی و رزرو مناسب تشخیص داده شده است.

در مرجع [۸]، فرمولبندی مسئله بهینه سازی بصورت یک مسئله MILP^۱ بیان شده است. فرمولبندی مسئله ارائه شده

و یا خطوط و تجهیزات انتقال، منجر به بهم خوردن تعادل تولید و مصرف گردند که در صورت عدم وجود ظرفیت رزرو کافی در سیستم، این وقایع منجر به ریزش بار خواهند شد.

در ساختار سنتی معمولاً قابلیت اطمینان بر اساس روش‌های قطعی مانند معیار (N-1)^۱ و یا روش‌های احتمالی مبتنی بر محاسبه LOLP^۲ و EENS^۳، بصورت یکسان و بدون قید و شرط در سرتاسر سیستم تامین می‌گردد، و تمامی واحدهای تولیدی نیز در تامین رزرو موردنیاز سیستم مشارکت دارند. در این ساختار در هنگام خروج غیر منتظره ژنراتور و یا کمبود تولید، بهره‌بردار سیستم به واحدهای برنامه ریزی شده دستور تولید اضافی را صادر می‌کند. در صورتی‌که در ساختار جدید هر تولیدکننده از لحاظ اقتصادی یک موجودیت مستقل دارد و مکانیزم بازار باید راه حل مناسبی جهت تامین قابلیت اطمینان موردنیاز سیستم ارائه دهد و خدمات رزرو باید به عنوان یک کالا تلقی گردد. [۴-۲]

امروزه تامین رزرو و دیگر خدمات جانبی از طریق بازار رقابتی مورد توجه قرار گرفته است، زیرا رقابت می‌تواند به افزایش سودمندی و بهره‌وری کالا، شفافیت قیمت و رضایت تولیدکننده و مصرف‌کننده کمک نماید. بازار رقابتی رزرو این اجازه را به شرکت کنندگان می‌دهد تا بطور مناسب بین هزینه و سود حاصل از تامین رزرو تعادل ایجاد کرده و ارزش واقعی کالای رزرو را مشخص نمایند. [۵]

در اکثر سیستم‌های تجدید ساختار یافته برق مانند کالیفرنیا، New England و New York، PJM، سرویس‌های جانبی بر عهده بهره‌بردار مستقل سیستم^۴ (ISO) است [۶]. برای تامین رزرو در محیط رقابتی صنعت برق روش‌ها و مدل‌های مختلفی وجود دارد، ISO می‌تواند برای

۱. سیستم‌های قدرت معمولاً به گونه‌ای طراحی و بهره‌برداری می‌گردند که وقوع تنها یک رخداد غیر منتظره در سیستم منجر به ریزش و قطع بار نگردد، این معیار قابلیت اطمینان را معیار N-1 گویند [۲].

2. Loss-of-Load Probability
3. Expected Energy Not Supplied
4. Independent System Operator

بیستین کنفرانس بین‌المللی برق

جستجوی هوشمند استوار است. هنگامی که فضای جستجوی الگوریتم ژنتیک بزرگ می‌شود، سرعت همگرایی آن کاهش می‌یابد و این مورد یکی از معایب این الگوریتم در حل مسئله بهینه‌سازی تخصیص به شمار می‌آید. در این مقاله، با ترکیب این الگوریتم با یک روش بهینه‌سازی کلاسیک همچون برنامه ریزی خطی و با کاهش فضای جستجوی آن، سرعت همگرایی بطور قابل توجهی افزایش یافته است. با این روش، تخصیص کالای انرژی و رزرو در خصوص سیستمی با قانون تسویه^۲ PAB^۲ اجرا خواهد شد.

۲- مدل بازار رزرو:

در این بخش یک شمای کلی از مدل بازار رزرو ارائه خواهد شد. تعریف انواع کالای رزرو، مدل‌های قیمت دهی و پرداخت، روش اجرای مناقصه و فرمولبندی مسئله بهینه‌سازی تخصیص کالای رزرو از موارد اساسی در بازار رزرو به شمار می‌روند.

۲-۱- انواع کالای رزرو:

ممکن است انواع کالای رزرو مورد استفاده و تعاریف موجود برای آنها، از سیستمی به سیستم دیگر متفاوت باشد [۱۱]. در هر سیستم با توجه به تعداد، نوع، ظرفیت و مشخصات واحدهای تولیدی آن، انواع کالای رزرو قابل تامین که برای آن سیستم نیز مفید باشد، تعریف می‌گردند.

انواع رزروی که در این مقاله تعریف شده است، رزرو گرم و سرد می‌باشد. رزرو گرم، رزرو چرخشی در سیستم بوده و توسط واحدهای سنکرون با شبکه تامین می‌گردد. ظرفیت رزرو گرم تخصیص یافته به واحدها باید در مدت ۱۰ دقیقه قابل دسترسی باشد. رزرو سرد توسط واحدهایی تامین می‌گردد که در بازار انرژی پذیرفته نشده اند و سنکرون با شبکه نمی‌باشند. این نوع رزرو به عنوان رزرو جایگزین و پشتیبان در سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مرجع [۸]، تا حدودی مشابه فرمولبندی مسئله مطرح شده در این مقاله می‌باشد. حل یک مسئله MILP معمولاً به کمک تکنیک‌های حلی همچون Branch-and-Bound امکان‌پذیر است که روش نسبتاً زمانبری بوده و زمان رسیدن به جواب بهینه، به دلیل وابستگی زیاد این روش به ابعاد مسئله، نسبتاً طولانی می‌باشد و برای سیستم‌هایی با ابعاد بزرگ قابل اجرا به نظر نمی‌رسد.

در مرجع [۹]، روش حل مسئله بهینه‌سازی تخصیص انواع کالای رزرو، به دلیل فرمولبندی خاص آن، بر اساس جستجوی کامل ترکیب‌های ممکن از قیمت‌ها استوار است. بدیهی است که روش جستجوی مستقیم نسبت به یک روش جستجوی هوشمند، مانند الگوریتم ژنتیک، زمان بیشتری را برای رسیدن به جواب بهینه تحمیل خواهد نمود. این روش نیز برای اعمال در سیستم‌هایی با ابعاد بزرگ قابل اجرا به نظر نمی‌رسد.

در مرجع [۱۰]، الگوریتم ژنتیک که یک روش جستجوی هوشمند می‌باشد، برای حل مسئله بهینه‌سازی دیسپچ توام انرژی و رزرو مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در مثال حل شده در مرجع [۱۰]، تنها ۳ ژنراتور شرکت کنندگان بازار انرژی و رزرو را تشکیل می‌دهند. الگوریتم ژنتیک با وجود اینکه یک روش بهینه‌سازی هوشمند است ولی در مواردی که فضای جستجو بزرگ شود، سرعت همگرایی آن کاهش می‌یابد، البته در این حالت نیز عملکرد آن در مقایسه با روش جستجوی مستقیم، بهتر و سریعتر خواهد بود.

در این مقاله پس از تعریف انواع کالای رزرو، مدلی برای راه اندازی بازار رزرو در محیط تجدید ساختار یافته ارائه می‌شود. سپس روشی برای حل مسئله بهینه‌سازی تخصیص کالای انرژی و رزرو توسط الگوریتم ژنتیک و ترکیب این الگوریتم با برنامه‌ریزی خطی^۲ ارائه خواهد شد. الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی عددی می‌باشد که بر پایه

بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق

در مدل PAB برنده بازار بر اساس قیمت آمادگی پیشنهادی خود هزینه آمادگی را دریافت خواهد کرد. شرکت کنندگان در بازار رزرو باید علاوه بر قیمت پیشنهادی، مشخصات دیگری همچون ماکزیمم توانایی خود در تامین انواع کالای رزرو را نیز ارائه دهند.

۲-۳- مناقصه بازار رزرو:

بطور کلی دو شکل اجرای مناقصات بازار جهت انجام مبادلات کالاها و خدمات مختلف انرژی وجود دارد. در شکل اول محصولات بازار بصورت پشت‌سرهم^۲ و توسط مناقصات مرکزی با مدیریت ISO تامین می‌گردند. اجرای مناقصه بازار انرژی در اولویت قرار دارد، سپس بازار انتقال در راستای مدیریت تراکم^۳ اجرا می‌گردد، در مرحله بعد بازار خدمات جانبی جهت تامین قابلیت اطمینان مطلوب سیستم اجرا می‌شود. این شکل برگزاری مناقصات در سیستم‌های استرالیا، اسکانندیناوی، کالیفرنیا (۲۰۰۰-۱۹۹۸) و تگزاس اجرا شده است. در شکل دوم محصولات بازار بصورت همزمان^۴ و توسط مناقصه‌های مرکزی تامین می‌گردند. این شیوه برگزاری مناقصه در سیستم‌های نیویورک، بریتانیا (۲۰۰۱-۱۹۸۹)، New England و PJM به مرحله اجرا در آمده است. [۱۳]

مناقصه‌های بازار انواع کالای رزرو نیز می‌توانند به هریک از شکل‌های ذکر شده اجرا گردند. در این مقاله فرض شده است که ISO عهده دار اجرای بازار انرژی و رزرو است و انواع کالای مورد نیاز سیستم را از طریق مناقصات همزمان تامین می‌نماید.

به لحاظ زمانی، مناقصه در بازار رزرو می‌تواند بصورت Real-Time، Day-Ahead، Forward، بلند مدت و یا ترکیبی از آنها (مانند بازارهای New England و کالیفرنیا [۱۴-۱۵]) اجرا شود. توجه به بازه زمانی اجرای بازار انرژی و ساختار این بازار می‌تواند به عنوان یکی از

این انواع رزرو می‌توانند از طریق بازارهای جداگانه رزرو تامین گردند. ترتیب و یا همزمانی اجرای این بازارها وابسته به طراحی صورت گرفته و استراتژی اتخاذ شده در اجرای بازار رزرو است. میزان نیاز سیستم به هریک از انواع رزرو که توسط ISO تعیین می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و در میزان قابلیت اطمینان سیستم تاثیر مستقیم دارد.

۲-۲- مدل قیمت دهی و پرداخت:

در طراحی بازارهای رزرو کوتاه مدت ممکن است یکی از مدل‌های قیمت دهی و پرداخت زیر مورد استفاده قرار گیرد: [۱۲]

۱- ژنراتورها تنها هزینه آمادگی^۱ را دریافت کنند. (مدل A)

۲- ژنراتورها تنها هزینه فرصت ازدست رفته را دریافت کنند. (مدل L)

۳- ژنراتورها هزینه آمادگی و هزینه فرصت ازدست رفته را دریافت کنند. (مدل A+L)

۴- ژنراتورها هزینه آمادگی یا هزینه فرصت ازدست رفته را دریافت کنند. (مدل A|L)

هزینه آمادگی پولی است که واحد به ازای مقدار ظرفیت رزرو تخصیص یافته به آن دریافت می‌کند. هزینه فرصت از دست رفته نیز در واقع برای جبران کاهش سود واحد در بازار انرژی بدلیل مطرح شدن قید تامین رزرو، پرداخت می‌شود.

در مدل بازار رزرو موردنظر در این مقاله، واحدهای تامین کننده ظرفیت رزرو گرم و سرد تنها هزینه آمادگی را دریافت خواهند نمود. این هزینه آمادگی متناسب با میزان ظرفیت تخصیص یافته به واحدها پرداخت می‌گردد. شرکت کنندگان در بازار رزرو، قیمت آمادگی پیشنهادی خود را ارائه می‌دهند و هزینه آمادگی بر اساس قانون تسویه PAB به برندگان بازار رزرو پرداخت خواهد شد.

۱. این هزینه آمادگی متفاوت از هزینه ثابت آمادگی است که در بازار ایران به تمامی ژنراتورهای شرکت کننده در بازار انرژی پرداخت می‌گردد.

2. Sequentially
3. Congestion Management
4. Simultaneously

بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق

قید ماکزیمم و مینیمم تولید واحد
 قید ماکزیمم توانایی تامین رزرو گرم واحد
 قید ماکزیمم توانایی تامین رزرو سرد واحد
 قید تساوی بار و تولید انرژی : محدودیت‌ها
 قید تامین رزرو گرم موردنیاز سیستم
 قید تامین رزرو سرد موردنیاز سیستم
 قیود خطوط انتقال

در رابطه (۱)، CR_i ، HR_i ، P_i به ترتیب مقادیر برنده شده واحد i ام در بازار انرژی، رزرو گرم و رزرو سرد و pe_i ، ph_i و pc_i به ترتیب قیمت پیشنهادی واحد i ام در بازار انرژی، رزرو گرم و رزرو سرد را نمایش می‌دهند. ضریب α_i متغیری است که مقدار آن می‌تواند صفر و یا یک باشد، در صورتی که مقدار آن یک باشد، نشان دهنده برنده شدن واحد i ام در بازار انرژی است. در این فرمولبندی، فرض بر این است که شرکت کنندگان بازار رزرو سرد را تنها واحدهایی تشکیل می‌دهند که در بازار انرژی پذیرفته نشده‌اند.

برای انتخاب پیشنهادهای برنده در بازار می‌توان دو نوع

تابع هدف در نظر گرفت^۳: [۶]

(الف) هزینه اجتماعی مینیمم^۴

(ب) هزینه تامین مینیمم^۵

در تابع هدف (الف)، مینیمم سازی بر اساس پیشنهادات قیمت ارائه شده توسط شرکت کنندگان و ظرفیت پذیرفته شده آنها صورت می‌پذیرد. در تابع هدف (ب)، مینیمم سازی بر اساس قیمت پرداختی به برندگان و ظرفیت پذیرفته شده آنها صورت می‌گیرد. در بازاری با قانون تسویه PAB، نتایج حاصل از این دو تابع هدف بر یکدیگر منطبق می‌باشند. روش مینیمم سازی هزینه تامین، کاملاً به قانون تسویه اعمالی در سیستم وابسته است. در بازاری با قانون پرداخت یکنواخت، نتایج مینیمم سازی هزینه اجتماعی لزوماً بر نتایج مینیمم سازی هزینه تامین منطبق نمی‌باشد [۱۶]. مسئله بهینه سازی خصوص سیستمی با قانون تسویه یکنواخت و مینیمم سازی هزینه اجتماعی نیز مشابه رابطه (۱) است.

معیارهای انتخاب بازه زمانی مناسب جهت اجرای بازار رزرو به شمار آید. ایجاد هماهنگی بین بازار انرژی و رزرو یکی از بحث‌های پر اهمیت طراحی بازار رزرو محسوب می‌گردد که می‌تواند در استراتژی اتخاذ شده جهت انتخاب بازه زمانی اجرای بازار رزرو تاثیرگذار باشد. در این مقاله فرض شده است که بازه زمانی اجرای مناقصات انرژی و رزرو Day-Ahead بوده و شرکت کنندگان در روز قبل برای هر ساعت روز بهره‌برداری، قیمت و ظرفیت پیشنهادی خود را ارائه می‌دهند.

۲-۴- مسئله بهینه سازی تخصیص:

همانطور که در بخش (۲-۳) نیز بیان شد، در اینجا فرض شده است که ISO، انرژی، رزرو گرم و رزرو سرد را از طریق مناقصات همزمان تامین می‌نماید. در واقع ISO در یک بازار با مدل PAB، سعی می‌کند تا به گونه‌ای کالای انرژی و رزرو را تامین کند که رفاه اجتماعی^۱ تحقق یابد و این به زبان ریاضی، مینیمم سازی مجموع هزینه تامین سه نوع کالای انرژی، رزرو گرم و رزرو سرد می‌باشد. در حین مینیمم سازی هزینه کل، رعایت قیود تساوی تولید و مصرف، قیود ماکزیمم و مینیمم تولید ژنراتورها، قیود نرخ بارگیری واحدها، قیود خطوط انتقال و غیره نیز دارای اهمیت است.

شکل کلی مسئله بهینه سازی توأم^۲ تخصیص انرژی، رزرو گرم و رزرو سرد در مناقصه‌های PAB، با ساده‌سازی و صرفنظر از محدودیت‌هایی مانند حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحدها و بطور کلی محدودیت های وابسته به زمان، برای هر ساعت روز بهره برداری در رابطه (۱) آمده است.

$$\begin{aligned} \text{تابع هدف} \quad & \text{Min} \sum_i (\alpha_i * P_i * pe_i \\ & + \alpha_i * HR_i * ph_i \\ & + (1 - \alpha_i) * CR_i * pc_i) \end{aligned} \quad (1)$$

3. The Bid Selection Objective Function
 4. Minimum Social Cost
 5. Minimum Procurement Cost

1. Social Welfare
 2. Co-Optimization

بیستین کنفرانس بین‌المللی برق

۳- حل مسئله بهینه‌سازی تخصیص:

مسئله بهینه‌سازی تخصیص ذکر شده در رابطه (۱) را نمی‌توان بطور مستقیم با برنامه ریزی خطی حل نمود. زیرا وجود متغیر α_i که یک متغیر عدد صحیح و گسسته می‌باشد، مسئله را از حالت خطی خارج ساخته است. الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی که توانایی حل مسائل بهینه‌سازی غیر خطی پیچیده و با متغیرهای پیوسته و گسسته را دارد، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این الگوریتم قابلیت دستیابی به جواب بهینه سراسری را نیز دارد. بر خلاف بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک، در هنگام استفاده از الگوریتم ژنتیک الزامی به محذب بودن و یا مشتق پذیر بودن مسئله وجود ندارد. مشکلی که در حل مسائل به کمک الگوریتم ژنتیک وجود دارد این است که، هنگامی که تعداد بیت‌های کروموزوم افزایش می‌یابد، زمان رسیدن به جواب بهینه سراسری نیز زیاد می‌شود، زیرا فضای جستجوی الگوریتم ژنتیک با افزایش طول کروموزوم بصورت نمایی بزرگ می‌شود. البته در این حالت می‌توان با انتخاب مناسب پارامترهای برش و جهش و تعداد افراد جمعیت و تکنیک‌های مختلف، سرعت رسیدن به پاسخ بهینه سراسری را تا حدودی بهبود بخشید.

برای حل مسئله بهینه‌سازی تخصیص به کمک الگوریتم ژنتیک ابتدا برای بیان دو دویی متغیرها باید مسئله را کدبندی نمود. یکی از ساده‌ترین روش‌های کدبندی در نظر گرفتن یک بیت برای متغیر α و تعدادی بیت برای متغیرهای HR, P, CR و برای هر ژنراتور می‌باشد. اگر فرض کنیم که برای هر یک از متغیرهای HR, P, CR پنج بیت در نظر گرفته شود، آنگاه در مجموع برای هر واحد تولیدی ۱۶ بیت در نظر گرفته شده است. در اینصورت برای یک سیستم با ۱۵ واحد تولیدی، یک کروموزوم رشته‌ای به طول ۲۴۰ بیت وجود خواهد داشت. در این حالت معمولاً برای رسیدن به جواب بهینه سراسری تکرارهای فراوانی مورد نیاز خواهد بود. هر چه سیستم بزرگتر شود سرعت همگرایی الگوریتم به دلیل افزایش طول کروموزوم کاهش خواهد یافت.

در اینجا روشی ارائه خواهد شد که در آن با کاهش طول کروموزوم و جلوگیری از محاسبه بی‌مورد هزینه که خود زمان‌بر است، سرعت همگرایی افزایش می‌یابد. در این روش استفاده ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و برنامه ریزی خطی مد نظر قرار می‌گیرد. در این روش به هر واحد تولیدی تنها یک بیت در کروموزوم اختصاص می‌یابد که بیان‌کننده متغیر α برای آن واحد می‌باشد. در اینصورت برای یک سیستم با ۱۵ واحد تولیدی، یک کروموزوم رشته‌ای به طول ۱۵ بیت وجود خواهد داشت. در هر تکرار الگوریتم، در مرحله محاسبه هزینه، ابتدا بررسی می‌گردد که هر کروموزوم که حاوی اطلاعات روشن و خاموش بودن واحدها می‌باشد، قیود اصلی را تامین می‌کند و یا خیر. این قیود اصلی در روابط (۲) تا (۵) آمده است.

$$\sum_{j \in ON} HR_j^{\max} \geq HR^{Req} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in ON} P_j^{\max} \geq P^{Load} + HR^{Req} \quad (3)$$

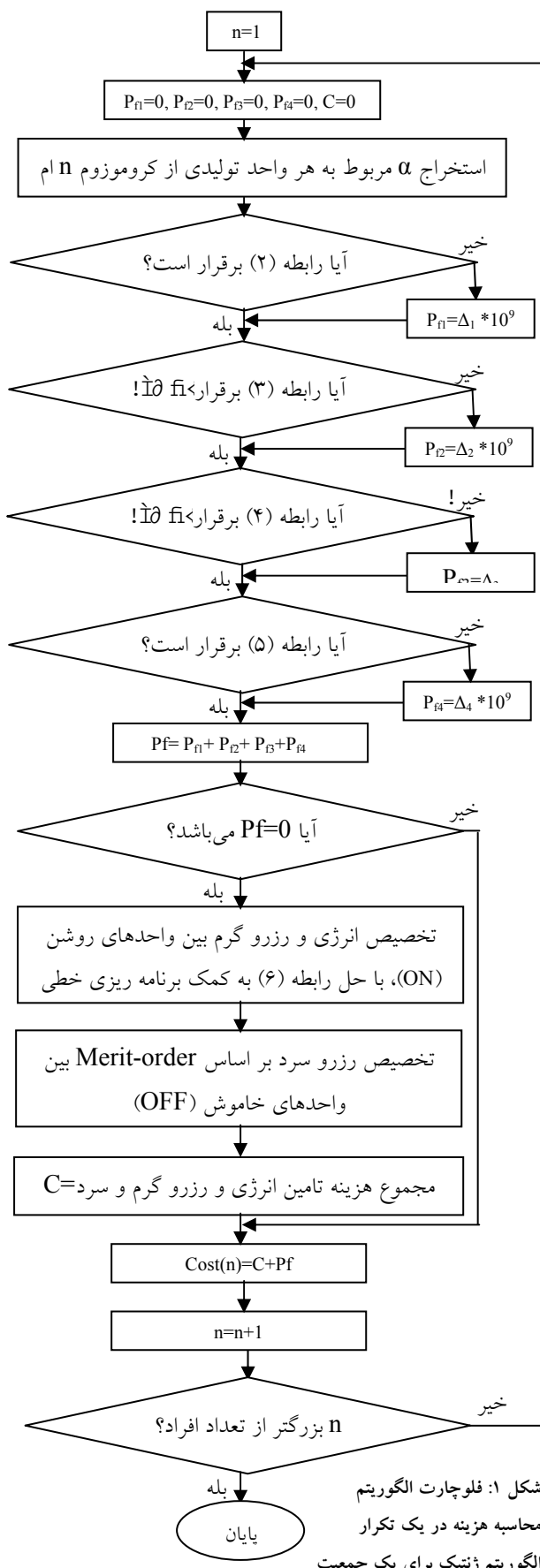
$$\sum_{j \in ON} P_j^{\min} \leq P^{Load} \quad (4)$$

$$\sum_{j \in OFF} CR_j^{\max} \geq CR^{Req} \quad (5)$$

در روابط (۲) تا (۵)، P_j^{\max} ، HR_j^{\max} و CR_j^{\max} به ترتیب ماکزیمم توانایی تامین انرژی، رزرو گرم و رزرو سرد اعلام شده از سوی واحد j ام و P_j^{\min} مینیمم توانایی تولید واحد j ام می‌باشد. همچنین P^{Load} ، HR^{Req} و CR^{Req} به ترتیب میزان انرژی، رزرو گرم و رزرو سرد مورد نیاز سیستم است که باید توسط ISO تامین گردد. در روابط مذکور، ON مجموعه واحدهای روشن ($\alpha_i=1$) و OFF مجموعه واحدهای خاموش ($\alpha_i=0$) در کروموزوم مورد نظر می‌باشد.

در صورت نقض هر یک از قیود اصلی ذکر شده در روابط (۲) تا (۵)، متناسب با میزان نقض شدن قید، یک پنالته نسبتاً بزرگ در هزینه مربوط به آن کروموزوم در نظر گرفته می‌شود. اگر قیود اصلی در خصوص کروموزوم مورد نظر برقرار باشد، مسئله بهینه‌سازی تخصیص رابطه (۶)، به روش برنامه ریزی خطی، در خصوص واحدهای روشن آن کروموزوم حل می‌شود. بر این اساس میزان توان تخصیصی به واحدها با

بیستین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۱: فلوجارت الگوریتم محاسبه هزینه در یک تکرار الگوریتم ژنتیک برای یک جمعیت

رعایت قیود مینیوم و ماکزیمم تولید واحدهای روشن، محدودیت ماکزیمم توانایی تامین رزرو گرم واحدهای روشن، قید تساوی تولید انرژی و بار مصرفی، قید تامین ظرفیت رزرو گرم و قیود خطوط انتقال از حل مسئله برنامه ریزی خطی بدست می‌آید.

$$Min \sum_{j \in ON} (P_j * \rho e_j + HR_j * \rho h_j) \quad (6)$$

قیود ماکزیمم و مینیوم تولید واحد
 قید ماکزیمم توانایی تامین رزرو گرم واحد
 قید تساوی بار و تولید انرژی
 قید تامین رزرو گرم مورد نیاز سیستم
 قیود خطوط انتقال

برنامه ریزی خطی یک الگوریتم تکراری می‌باشد و در صورتی که برای تمامی کروموزوم ها اجرا گردد زمان اجرای الگوریتم ژنتیک افزایش می‌یابد و از سوی دیگر در حالتی که قیود (۲) تا (۵) برقرار نباشند برنامه ریزی خطی همگرا نخواهد شد، بنابراین برنامه ریزی خطی تنها برای حالت‌های شدنی^۱ اجرا می‌گردد تا از محاسبات اضافی جلوگیری شود.

واحدهای خاموش نیز با توجه به قیمت آمادگی رزرو سرد آنها مرتب می‌شوند، سپس با توجه به ماکزیمم توانایی تامین رزرو سرد آنها، تا جایی که ظرفیت رزرو سرد مورد نیاز سیستم تامین گردد، به ترتیب قیمت، به آنها رزرو سرد تخصیص می‌یابد (Merit-order). در این شرایط نیازی به تعیین مقادیر CR_i بر اساس برنامه ریزی خطی نمی‌باشد و پاسخ تخصیص Merit-order بر پاسخ بهینه منطبق است.

در پایان، مجموع هزینه تامین انرژی، رزرو گرم و رزرو سرد محاسبه شده و به عنوان هزینه کروموزوم مورد نظر ذخیره می‌شود. فلوجارت الگوریتم محاسبه هزینه (Cost) برای کروموزوم ها در شکل (۱) نشان داده شده است. در شکل (۱)، $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ و Δ_4 به ترتیب قدرمطلق اختلاف دو طرف معادلات (۲) تا (۵) می‌باشند.

1. Feasible Set

بسیستم کنفرانس بین‌المللی برق

۴- بررسی عددی روش پیشنهادی:

در این بخش مدل بازار انرژی و رزرو ذکر شده در بخش (۲) و روش حل پیشنهادی مسئله تخصیص انرژی و رزرو، در خصوص یک سیستم نمونه اعمال خواهد شد.

جدول ۱: مشخصات واحدهای تولیدی سیستم

Gen. No	P^{max} (MW)	P^{min} (MW)	HR^{max} (MW)	CR^{max} (MW)
1	440	150	50	300
2	440	150	50	300
3	300	100	75	250
4	250	80	75	200
5	250	80	100	200
6	200	80	75	200
7	200	80	100	200
8	200	65	135	200
9	150	50	100	150
10	150	50	100	150
11	150	50	100	150
12	100	35	65	100
13	100	35	65	100
14	100	35	65	100
15	50	15	35	50
16	50	15	35	50
17	50	15	35	50

جدول ۲: قیمت‌های پیشنهادی واحدهای تولیدی سیستم

Gen. No	ρe_i (Rials/MWh)	ρh_i (Rials/MW-h)	ρc_i (Rials/MW-h)
1	76500	110000	73500
2	81500	110500	75000
3	79500	111000	74000
4	86500	113000	80000
5	87500	112000	66000
6	87000	112500	63500
7	88500	100500	70000
8	91000	111000	71000
9	95000	95000	87500
10	86000	115000	77000
11	106500	114000	94000
12	102500	87500	93000
13	96500	85000	91000
14	91500	81500	72000
15	100000	80000	85000
16	121500	116000	94500
17	160000	115500	100000

۴-۱- معرفی سیستم مورد مطالعه:

سیستم مورد مطالعه دارای ۱۷ واحد تولیدی می‌باشد. مشخصات واحدهای تولیدی، شامل مینیمم و ماکزیمم تولید واحدها، ماکزیمم توانایی تامین رزرو گرم و رزرو سرد، در جدول (۱) آمده است. همچنین قیمت‌های پیشنهادی واحدهای تولیدی سیستم در یک ساعت برای انرژی، آمادگی رزرو گرم و آمادگی رزرو سرد در جدول (۲) آورده شده است.

میزان بار مصرفی کل سیستم در ساعت مورد نظر ۲۱۱۰ مگا وات و ماکزیمم تولید کل در سیستم ۳۱۸۰ مگا وات می‌باشد. میزان نیاز سیستم به هر یک از انواع رزرو گرم و سرد در ساعت مورد نظر ۴۰۰ مگاوات است.

Minimum Up / Down Time واحدهای تولیدی ۱

ساعت در نظر گرفته شده است و تخصیص برای هر ساعت بصورت جداگانه انجام می‌شود.

همانگونه که در بخش (۲) نیز اشاره شد، بازه زمانی اجرای مناقصات انرژی و رزرو Day-Ahead بوده و شرکت کنندگان در روز قبل برای هر ساعت روز بهره‌برداری، قیمت و ظرفیت پیشنهادی خود را ارائه می‌دهند. انواع کالای انرژی و رزرو مورد نیاز سیستم از طریق مناقصات همزمان تامین می‌گردد. قانون تسویه مناقصات انرژی و رزرو PAB می‌باشد. واحدهای تامین کننده ظرفیت رزرو گرم و سرد تنها هزینه آمادگی را دریافت خواهند نمود.

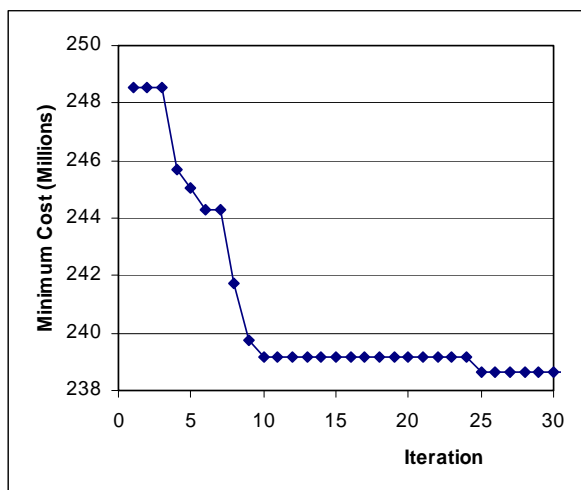
۴-۲- حل مسئله تخصیص انرژی و رزرو در سیستم

مورد مطالعه:

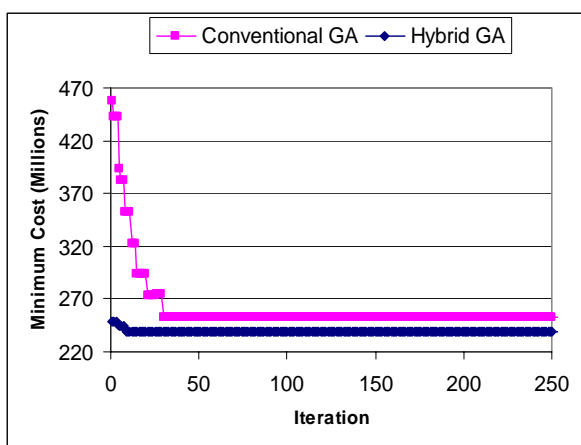
برای حل مسئله بهینه سازی بیان شده در رابطه (۱) در خصوص سیستم مورد مطالعه، از روش پیشنهادی بخش (۳) استفاده گردید. بر اساس روش حل پیشنهادی، طول کروموزوم رشته‌ای برای سیستم مورد نظر ۱۷ بیت خواهد بود. برش تک نقطه‌ای، جهش تک بیتی و نخبه گرایی^۱ عملگرهای به کار رفته در الگوریتم ژنتیک می‌باشند. تعداد

بیستین کنفرانس بین‌المللی برق

نیامده است. مدت زمان اجرای ۲۵ تکرار این الگوریتم در یک کامپیوتر با پروسسور ۷۳۳ مگا هرتز برابر با ۱۲ ثانیه می‌باشد.



شکل ۲: روند تغییرات مینیمم هزینه در تکرارهای الگوریتم ژنتیک ترکیبی (پیشنهادی)



شکل ۳: روند تغییرات مینیمم هزینه در تکرارهای الگوریتم ژنتیک معمولی و ترکیبی (پیشنهادی)

در صورتی که بر اساس آنچه در بخش (۳) بیان شد، برای هر ژنراتور ۱۶ بیت در نظر گرفته شود، یک کروموزم رشته‌ای با ۲۷۲ بیت وجود خواهد داشت و در این حالت فضای جستجوی الگوریتم ژنتیک شامل 2^{272} حالت خواهد بود. الگوریتم ژنتیک با این طریقه کدبندی نیز برای حل مسئله بهینه‌سازی تخصیص در سیستم مورد مطالعه اجرا شد و تا ۱۰۰۰ تکرار (در مدت زمان ۳۰۰ ثانیه) نیز به پاسخ بدست آمده از روش حل پیشنهادی دست نیافت. شکل (۳) روند

افراد جمعیت برابر ۲۰ و احتمال برش و جهش به ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۰۵۹ در نظر گرفته شده است. برنامه الگوریتم در محیط نرم افزار مطلب تهیه شده است. نتایج حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی تخصیص انرژی و رزرو در خصوص سیستم مورد مطالعه در جدول (۳) آمده است. شکل (۲)، روند تغییرات مینیمم هزینه را در تکرارهای الگوریتم ژنتیک ترکیبی پیشنهادی نمایش می‌دهد. بر اساس جداول (۲) و (۳)، مجموع هزینه تامین انرژی، رزرو گرم و رزرو سرد برابر با ۲۳۸۶۶۷۵۰۰ ریال می‌باشد.

جدول ۳: نتایج حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی تخصیص انرژی و رزرو برای ساعت مورد مطالعه

Gen. No	P (MWh)	HR (MW)	CR (MW)
1	440	0	0
2	440	0	0
3	300	0	0
4	250	0	0
5	250	0	0
6	0	0	200
7	110	70	0
8	0	0	200
9	50	100	0
10	150	0	0
11	0	0	0
12	35	65	0
13	35	65	0
14	35	65	0
15	15	35	0
16	0	0	0
17	0	0	0
هزینه تامین (ریال)	175922500	35845000	26900000

همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می‌گردد، الگوریتم ژنتیک ترکیبی پیشنهادی در تکرار ۲۵ به جواب مناسبی دست یافته است. آنچه باعث شده است که مینیمم هزینه در هیچ تکراری روند افزایشی نداشته باشد، عملگر نخبه‌گرایی می‌باشد. لازم به توضیح است که این الگوریتم ژنتیک بارها اجرا شده و پس از ۱۰۰۰ تکرار نیز جواب بهتری به دست

بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق

تغییرات مینیمم هزینه در تکرارهای این الگوریتم ژنتیک معمولی در مقایسه با روش حل پیشنهادی را نمایش می‌دهد. البته لازم به ذکر است که در الگوریتم ژنتیک معمولی، مقادیر پناستی اضافه شده به هزینه کروموزوم‌ها با توجه به قیود متعدد موجود در آن، متفاوت از الگوریتم ژنتیک ترکیبی بوده و به همین دلیل در تکرار اول با وجود اینکه جواب اولیه انتخاب شده در هر دو الگوریتم یکسان هستند، هزینه بهترین کروموزوم‌ها با یکدیگر متفاوت می‌باشند. البته در تکرارهای بعدی الگوریتم ژنتیک معمولی، هزینه بهترین کروموزوم کمتر با پناستی مواجه شده و کاملاً قابل مقایسه با هزینه بهترین کروموزوم الگوریتم ژنتیک ترکیبی است که در آن هزینه کروموزوم‌ها به ندرت و تنها در مواقع نقض قیود اصلی (۲) تا (۵) با پناستی مواجه می‌شوند.

با روش پیشنهادی و در نظر گرفتن یک بیت برای هر ژنراتور، فضای جستجوی الگوریتم ژنتیک به 2^{17} حالت کاهش یافته است. طبیعی است که با کاهش فضای جستجوی الگوریتم ژنتیک، سرعت همگرایی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر کارایی محاسباتی الگوریتم با تکنیک محاسباتی به کار رفته به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

مراجع:

- [1] Song, Y.H. and Wang X.F., "Operation of Market-oriented Power Systems", Published by Springer, 2003, ISBN 185233-67006
- [2] Flynn, M., et al, "Reliability and Reserve in Competitive Electricity Market Scheduling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 1, February 2001, PP.78-87
- [3] Allen, E.H. and Ilic, M.D., "Reserve Market for Power Systems Reliability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 1, February 2000, PP. 228-233
- [4] Jianxue, W., et al, "Study on Reserve Problem in Power Market", Power System Technology, International Conference, IEEE, Vol. 4, October 2002, PP. 2418-2422
- [5] Rashidi-Nejad, M., Song, Y.H. and Javidi-Dasht-Bayaz, M.H., "Operating Reserve Provision in Deregulated Power Markets", Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Vol. 2, January 2002, PP. 1305-1310
- [6] Oren, S.S., "Design of Ancillary Service Markets", Proceedings of the 34th Hawaii International Conference On System Sciences, 2001
- [7] Bakirtzis, A.G., "Joint Energy and Reserve Dispatch in a Competitive Pool Using Lagrangian Relaxation", IEEE Power Engineering Review, November 1998, PP. 60-62

۵- نتیجه‌گیری:

انتخاب یک مدل مناسب برای راه‌اندازی بازار رزرو وابسته به شرایط و مشخصات سیستم مورد نظر است و مدل یکسانی برای سیستم‌های مختلف قابل ارائه نمی‌باشد. در این مقاله پس از تعریف انواع کالای رزرو، مدلی نمونه برای راه‌اندازی بازار رزرو در محیط تجدید ساختار یافته صنعت برق ارائه شد.

حل مسئله بهینه‌سازی تخصیص کالای انرژی و رزرو خود دارای اهمیت است، که فرمولبندی و روش حل آن وابسته به مدل و قوانین حاکم بر بازار انرژی و رزرو می‌باشد. برای حل مسئله بهینه‌سازی تخصیص انرژی و رزرو در خصوص مدل پیشنهادی، الگوریتم ژنتیک به عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی که قابلیت دستیابی به جواب بهینه سراسری را دارد، مورد

بیستین کنفرانس بین‌المللی برق

- [16] Liu, Y., et al, "Implementing Rational Buyer's Algorithm at California ISO", Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Vol. 2, January 2002, PP. 1293-1298
- [8] Rau, N.S., "Optimal Dispatch of a System Based on Offers and Bids –A Mixed Integer LP Formulation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 1, February 1999, PP. 274-279
- [9] Liu, Y., et al, "A Rational Buyer's Algorithm Used for Ancillary Service Procurement", Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Vol. 2, January 2000, PP. 855-860
- [10] Xu, Z., Dong, Z.Y. and Wong, K.P., "Optimal Dispatch of Spinning Reserve in a Competitive Electricity Market Using Genetic Algorithm", Evolutionary Computation, IEEE, Vol. 1, December 2003, PP. 587-592
- [11] Prada, R.B., et al, "Possible Design of The Brazilian Ancillary Service Market for Generation Reserves", Power System Management and Control, Conference Publication No. 488, April 2002, PP.414-419
- [12] Gan, D. and Litvinov, E., "Energy and Reserve Market Designs With Explicit Consideration to Lost Opportunity Costs", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, February 2003, PP. 53-59
- [13] Wu, T., et al, "Pricing Energy and Ancillary Services in Integrated Market Systems by an Optimal Power Flow", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, February 2004, PP. 339-347
- [14] Market Design Department, "Ancillary Services Market Enhancements: Reserves White Paper", ISO New England Inc, May 2004
- [15] FERC Electric Tariff, "Order on Further Development of The California ISO's Market Redesign and Establishing Hearing Procedures", California Independent System Operator Corporation, Docket No. ER02-1656-017, June 2004