نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره ۳، جلد ۱۸، پاییز ۱۳۸۶، صفحه ۴۰-۳۱
ویژه‌نامه مهندسی برق و مکانیک

در مدار قرار دادن واحدها در سیستم‌های تجدید ساختار شده با استفاده از الگوریتمهای ژنتیک و SA

احد کاظمی و محسن نجفی

چکیده: تجدید ساختار سازی صنعت برق، رقابتی شدن تولید و توجه به برق به عنوان یک کالا در بسیاری از کشورهای پیشرفته جهان آغاز شده و در نتیجه بسیاری از الگوریتم‌ها و برنامه‌های مورد استفاده در شبکه‌های سنتی دچار تغییراتی شده است.
برنامه در مدار قرار دادن واحدها یکی از آن موارد است. در سیستم‌های سنتی تابع هدف، کمینه‌سازی هزینه در نظر گرفته می‌شد و در محیط‌های رقابتی تابع هدف، بیشینه‌سازی سود برای تولید کنندگان در نظر گرفته شده و با توجه به قیدهای جدید، پخش بار اقتصادی خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
در این مقاله از الگوریتم ژنتیک و روش تابکاری شبیه سازی شده (SA) برای برنامه‌ریزی تولید واحدها در سیستم‌های تجدید ساختار شده استفاده می‌شود.
روش تابکاری شبیه سازی شده برای اولین بار در این مقاله استفاده شده است. از مزایای این روش می‌توان به سرعت بالای آن نسبت به الگوریتم ژنتیک اشاره کرد که در سیستم‌هایی با ابعاد بزرگتر، مساله زمان بسیار حائز اهمیت است و مزیت دیگر این روش جواب‌های دقیق‌تر آن است که در نتایج شبیه‌سازی آورده شده است. در پایان، روش‌های پیشنهاد شده برای سیستم نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و ویژگی‌های هر کدام بیان شده است.

واژه‌های کلیدی: تجدید ساختارسازی، در مدار قرار دادن واحدها، الگوریتم ژنتیک، SA

۱. مقدمه

تجدید ساختار کردن صنعت برق کار بسیار پیچیده‌ای است که بر اساس سیاست‌ها و استراتژی‌های ملی انرژی، پیشرفت‌ها در اقتصاد کلان و شرایط ملی انجام می‌شود و اجرای آن از یک کشور تا کشور دیگر متفاوت است.
رقابتی شدن تولید، بازاری را ایجاد می‌کند که در آن شرکت‌های مستقل براساس قیمت برای فروش مستقیم برق به مشتریان صنعتی بزرگ با یکدیگر رقابت می‌کنند و منبع برق، به وسیله انتقال مشترک، به توزیع کننده‌ها که به نوبهٔ خود فروشنده انرژی به مصرف کننده‌های نهایی هستند، می‌رسد.

مقاله در تاریخ ۸۳/۵/۳۰ دریافت شده و در تاریخ ۸۵/۷/۱۵ به تصویب نهایی رسیده است.
مهندس احد کاظمی، قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، دانشکده برق، دانشگاه علم وصنعت ایران، kazemi@iust.ac.ir
محسن نجفی، دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، najafi1979@yahoo.com.uk

در سیستم‌های تجدید ساختار شده چهار جزء مهم نقش اساسی را ایفا می‌کنند: شرکت‌های تولید، شبکه انتقال (معمولا دولتی)، شرکت‌های توزیع و بهره‌بردار مستقل سیستم.
کار بهره‌بردار مستقل، سیستم گرفتن اطلاعات از منابع و مشتریان و هماهنگی بین آنها، تعیین نرخ برق، بالا بردن امنیت و قابلیت اطمینان در سیستم است [۲و۱].
با تجدید ساختار شدن صنعت برق بسیاری از الگوریتم‌ها و روش‌های کنترل و بهره‌برداری سیستم دچار دگرگونی‌ها و تغییراتی می‌شوند. از جمله الگوریتم‌ها و برنامه‌هایی که دچار تغییرات می‌شوند، برنامه در مدار قرار گرفتن واحدها است.
میزان مصرف برق با توجه به فعالیت انسان‌ها و تغییر زمان تفاوت می‌کند. (برای برنامه‌ریزی دقیق تولید و توزیع اقتصادی و عملکرد مطمئن، مقدار تقاضا باید برای برنامه‌ریزی در مدار قرار دادن واحدها مشخص باشد).
مساله در مدار قرار گرفتن واحدها دارای عناصر غیرخطی پیوسته و پیچیده‌ای است، زیرا تابع هدف آن غیرخطی بوده و دارای قیدهای

Archive of SID
www.SID.ir

زیادی است. تعداد واحدهای تولیدی و ساعت‌های مورد نظر اندازه و ابعاد مساله را مشخص می‌کند.

در سیستم‌های سنتی روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی شناخته شده مناسبی نظیر برنامه‌ریزی دینامیکی [۳]، شاخه و مرز[۲] [۴] و آزادسازی لاگرانژ[۳] [۵] برای حل مساله در مدار قرار دادن واحدها مورد استفاده قرار گرفته است.

این روش‌ها برای حل مسائلی با ابعاد کوچک مناسب بوده و جواب بهینه را در مدت زمان قابل قبولی بدست می‌آورد.

در مورد مسائلی با ابعاد بزرگ‌تر از روش‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک [۶و۷]، جستجوی تابو[۴] و تابکاری شبیه سازی شده [۵] [۸و۹] استفاده می‌شود. بعضی از روش‌های ترکیبی نیز نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند [۱۰].

تجدید ساختار سازی سیستم برق باعث ایجاد بازار باز شده است. سیستم تجدید ساختار شده به تولید کننده‌ها اجازه می‌دهد تا با هم رقابت داشته باشند و به مشتریان نیز اجازه می‌دهد تا منابع انرژی را انتخاب کنند.

در محیط‌های یکپارچه سنتی مساله در مدار قرار دادن واحدها، به صورت برنامه ریزی تولید واحدها (روشن/خاموش) در نظر گرفته می‌شد که هدف آن کمینه‌سازی هزینه تولید و تامین قیدهای سیستم بود. اما در محیط تجدید ساختار شده مساله در مدار قرار دادن واحدها پیچیده‌تر و رقابتی‌تر از محیط سنتی است. دیگر مانند گذشته شرکت‌های تولیدکننده، مساله در مدار قرار دادن واحدها را به منظور کمینه‌سازی هزینه تولید در نظر نمی‌گیرند بلکه برای بیشینه‌سازی سود خود آن را به اجرا درمی‌آورند. روش‌هایی برای حل الگوریتم جدید در سیستم‌های تجدید ساختار شده با توجه به حالت‌های مختلف ارائه شده است [۱۱-۱۴]. علاوه بر آن در گذشته، شرکت‌ها مجبور به ارائه خدمت به مشتریان بودند، از جمله می‌توان به قیدهای ذخیره چرخان و تقاضا اشاره کرد که در سیستم‌های سنتی باید این نیازها تامین می‌شد.

اما در سیستم‌های تجدید ساختار شده تامین این نیازها ضروری نیست. در سیستم رقابتی، شرکت‌های تولید کننده می‌توانند برنامه‌ای را در نظر بگیرند که کمتر از تقاضای بار پیش بینی شده تولید کنند اما بیشترین سود را بدست آورند [۱۵]. در این مقاله از دو روش الگوریتم ژنتیک و SA برای حل مساله در مدار قرار دادن واحدها در سیستم‌های تجدید ساختار شده استفاده می‌شود. از الگوریتم ژنتیک برای حل مساله استفاده شده است اما از الگوریتم SA برای اولین بار استفاده می‌شود و در پایان به بررسی ویژگی‌های هر کدام پرداخته می‌شود.

[2] Branch and Bound
[3] Lagrangian Relaxation
[4] Tabu Search
[5] Simulated Annealing

۲. مدل‌های بازار

سه نوع بازار برق وجود دارد که در شکل ۱ نشان داده شده است.

مدل (الف): سیستم منبع یکپارچه متداول را نشان می دهد. یک بهره‌بردار سیستم و تمام ژنراتورها به یک شرکت تعلق دارند و بهره‌بردار مسئول تامین بار است. در این مدل، هدف بهره‌بردار سیستم کمینه‌سازی مجموع هزینه سوخت ژنراتورها به شیوه مطمئن بوده و این همان مدل سیستم‌های سنتی است. بنابراین، روش‌های در مدار قراردادن متداول را می‌توان برای برنامه‌ریزی ژنراتورها بر پایه هزینه بکار برد.

در مدل (ب)، ژنراتورها به طور کامل از یکدیگر جدا شده‌اند و به صورت مختصر می‌توان گفت که عملکرد سیستم مستقل از قسمت تولید کننده است. در این مدل هدف بیشینه‌سازی سود برای شرکت‌های تولید کننده بوده و برنامه در مدار قرار دادن واحدها بر پایه سود استوار است. در این مدل، بار و سیستم به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده و در این مقاله برنامه‌ریزی بر پایه این الگو استوار است.

مدل (ج) مدل کاملی را بر پایه استخر ارائه می دهد. تولید و بهره‌برداری از سیستم به طور کامل از یکدیگر مجزا بوده و به صورت شرکت مستقل عمل می کنند. تابع هدف بهره‌بردار باید بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی باشد. اگرچه، اگر پیشنهاد تقاضا و یا حساسیت قیمت تقاضا در نظر گرفته نشود، بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی ممکن است انجام نشود [۱۷و۱۶].

۳. در مدار قرار دادن واحدها به صورت سنتی

در گذشته مساله در مدار قرار دادن واحدها به صورت روشی برای برنامه‌ریزی تولید واحدها ارائه می‌شد که هزینه را در سیستم قدرت کمینه و قیدهای سیستم را تامین می‌کرد. تابع هدف آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Minimize\ F = \sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} F_i(P_{it}).U_{it} + SU_i.X_{it}(1-X_{it-1}) + SD_i(1-X_{it}).X_{it-1} \quad (۱)$$

هزینه سوخت هر واحد را می‌توان به صورت یک تابع درجه دوم در نظر گرفت.

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (۲)$$

قیدهای مساله را می‌توان به صورت زیر فرمول‌بندی کرد:

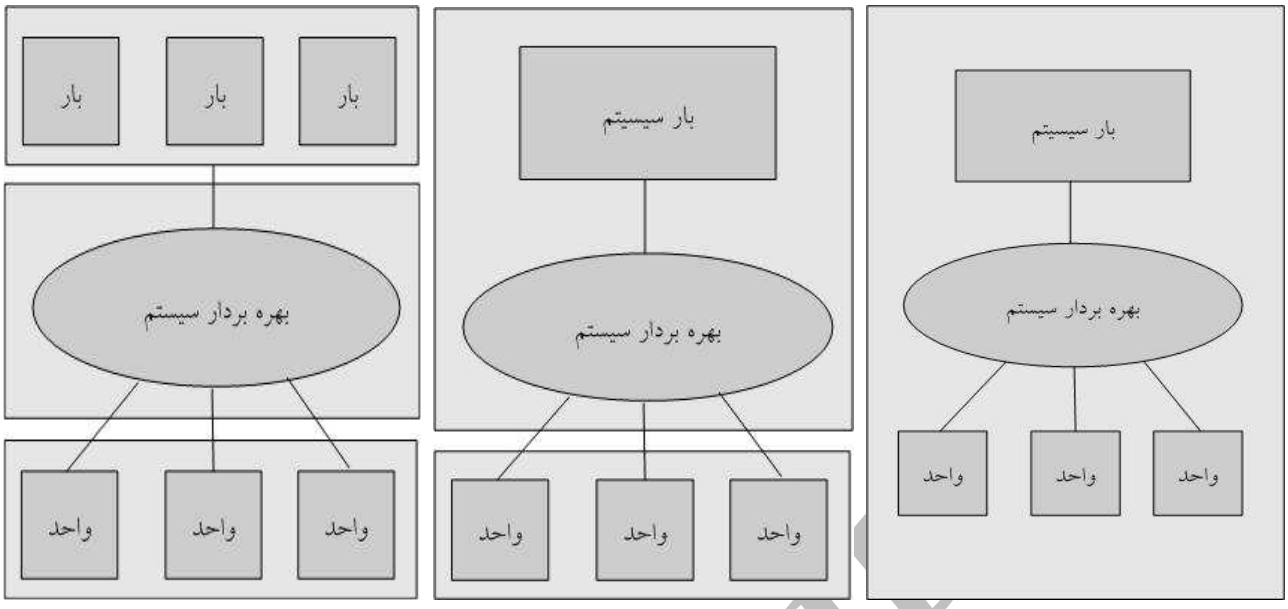
تقاضا یا بار برابر است با:

$$\sum_{i=1}^{N} P_{it} X_{it} = D_t \qquad t = 1,2,...,T \quad (۳)$$

ذخیره چرخان از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sum_{i=1}^{N} P_{i(\max)} X_{it} \geq D_t + SR_t \qquad t = 1,2,...,T \quad (۴)$$

Archive of SID
www.SID.ir



الف- مدل یکپارچه **ب- مدل تولید نامتمرکز** **ج- مدل استخر با بار و تولید**

شکل ۱. مدل‌های بازار

محدوده بهره‌برداری از واحدها عبارت است از:

$$P_{i\min} \le P_i \le P_{i\max} \qquad i = 1,2,...,N \qquad (۵)$$

و حداقل زمان روشن و خاموش شدن واحدهای حرارتی با استفاده از نامعادلات زیر تعیین می‌شوند:

$$(Ton_i(t-1) - Tup_i) * (X_i(t-1) - X_i(t)) \ge 0 \qquad (۶)$$

$$(Toff_i(t-1) - Tdown_i) * (X_i(t-1) - X_i(t)) \ge 0 \qquad (۷)$$

متغیرهای استفاده شده در زیر تعریف شده‌اند:

U_{it}: حالت واحد i در ساعت t (صفر یا یک است)

F_i: تابع هزینه سوخت واحد i

P_{it}: توان اکتیو تولیدی واحد i در ساعت t

X_{it}: وضعیت روشن و خاموش بودن واحد i در ساعت t

SU_i: هزینه راه‌اندازی واحد i

SD_i: هزینه خاموش کردن واحد i

D_t: مقدار تقاضا یا بار

SR_t: ذخیره چرخان در ساعت t

$P_{i\min}$: حداقل تولید واحد i

$P_{i\max}$: حداکثر تولید واحد i

Tup_i: حداقل زمان کار واحد i

$Tdown_i$: حداقل زمان توقف واحد i

Ton_i: مدت زمان روشن بودن واحد i

$Toff_i$: مدت زمان خاموش بودن واحد i

برای حل مساله در مدار قرار دادن واحدها در محیط‌های رقابتی در تابع هدف و قیدهای مساله تغییراتی ایجاد می شود.

بدین معنی که در محیط جدید تابع هدف از کمینه‌سازی هزینه به بیشینه‌سازی سود تغییر کرده و قیمت برق نیز ساعت به ساعت تفاوت می‌کند و قید مهمی که تغییر می‌یابد، آن است که دیگر شرکت‌های تولیدکننده تعهدی برای تامین بار نداشته و با توجه با این قید جدید، پخش بار اقتصادی نمی‌تواند همانند سیستم‌های سنتی مورد استفاده قرار گیرد و دچار تغییراتی خواهد شد.

تابع هدف تغییر داده شده را می‌توان به صورت زیر فرمول‌بندی کرد:

$$Maximize\ profit = \sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}(P_{it}.fp_t).X_{it} - F \qquad (۸)$$

قید تقاضای جدید نیز از نامعادله زیر تعیین می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{N} P_{it}X_{it} \le D_t \qquad (۹)$$

که در آن fp_t قیمت پیش‌بینی شده در ساعت t است.

ممکن است تصور شود که بیشینه سازی سود همان کمینه سازی هزینه است ولی این مورد لزوما درست نیست.

وقتی اجباری برای تامین بار وجود ندارد شرکت‌های تولید کننده ممکن است کمتر از تقاضا تولید کنند و بیشترین سود برای آنها در این مقدار تولید بدست آید.

این مساله باعث افزایش انعطاف در مساله در مدار قرار دادن واحدها می شود. به علاوه فرض بر آن است که بالا و پایین شده قیمت‌ها بر طبق عرضه و تقاضا است.

Archive of SID

www.SID.ir

در سیستم‌های سنتی معمولا سطح منحنی بار برای مهندسین دانسته در نظر گرفته می شود و آنها در این سطح، هزینه‌ها را کمینه می‌کنند ولی اگر قرار باشد سود بیشینه شود، شرکت‌های تولید کننده ممکن است به این نتیجه برسند که در شرایطی غیر از سطح بار به حداکثر سود می‌رسند.

سود نه تنها به هزینه بلکه به درآمد نیز بستگی دارد. اگر درآمد بیشتر از هزینه افزایش یابد، سود افزایش خواهد یافت.

۴. پخش بار اقتصادی در محیط‌های رقابتی

پخش بار اقتصادی بخش مهمی از برنامه در مدار قرار دادن واحدها است و معمولا برای کمینه سازی هزینه‌ها مورد استفاده قرار می گیرد. در محیط های رقابتی جدید که بر اساس سود است پخش باراقتصادی نیز تغییر می‌یابد.

در سیستم های سنتی از روش‌های مختلفی نظیر تکرار λ، تابع لاگرانژ، روش گرادیان درجه اول و دوم برای حل پخش بار اقتصادی استفاده می‌شد. در سیستم‌های سنتی یکی از قیدهای پخش بار اقتصادی، تامین بار است که در محیط‌های رقابتی این قید تغییر می‌کند. در برنامه پخش بار اقتصادی سنتی هزینه‌های ثابت و گذرا برای تنظیم سطح توان واحدها نادیده گرفته می‌شد تا آنها همان هزینه افزایشی را داشته باشند یعنی $(\lambda_1 = \lambda_2 = ... \lambda_i = \lambda_T)$. در برنامه پخش بار اقتصادی جدید، λ با قیمت کاذب مساوی در نظر گرفته شده است. این قیمت کاذب به صورت ساعت به ساعت با توجه به قیمت پیش‌بینی شده برای محاسبه هزینه‌های ثابت و گذرا، مطابق رابطه زیر، تغییر می‌یابد:

$$\lambda_t = fp_t - \frac{\sum_t^T \sum_i^N (transition..\cos ts) + \sum_t^T \sum_i^N (fixed..\cos ts)}{\sum_t^T \sum_i^N P_{it}} \quad (۱۰)$$

که قیمت کاذب را بر حسب دلار بر مگاوات- ساعت نشان می‌دهد. هزینه‌های گذرا شامل هزینهٔ راه‌اندازی گرم یا سرد و خاموش کردن واحدها است. هزینه‌های ثابت (برای هر ساعت که واحد روشن است) با اضافه کردن عبارت ثابت تابع درجهٔ دوم هزینه تامین می‌شود.

در هر دوره هزینه‌های ثابت و گذرا به هزینه‌های افزایشی اضافه می‌گردند. هزینه‌های افزایشی هزینه‌هایی نظیر تعمیر و نگهداری واحدها و بانک‌داری است. روش پخش بار اقتصادی ارائه شده به هزینه‌های ثابت و گذرا اختصاص دارد.

چندین روش دیگر نیز وجود دارد که این کار را انجام می‌دهد. اگر قیمت برق تولیدی ژنراتورها در هنگام شب دارای قیمتی کمتر از قیمت رقابتی باشد، به نحوی که این قیمت‌ها از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نباشند، می‌توان بعضی هزینه‌های در طول روز را که مربوط به نرخ‌ها در شب است، به دوره زمانی شبانه منتقل کرد. در این مقاله، مجموع توان تولیدی به وسیله تقاضای پیش‌بینی شده تقریب زده می‌شود. یکی از ویژگی‌های مهم روش ارائه شده آن است که در آن زمان بسیار کمی برای محاسبات پخش بار اقتصادی لازم بوده و زمان اجرای برنامه در مقایسه با الگوریتم ارائه شده برای سیستمهای سنتی کمتر است [۱۸].

۵. ارائه الگوریتم‌ها

۵-۱. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک نوع الگوریتم جستجو است. این الگوریتم با الهام از اصل انتخاب طبیعی داروین و اصول ژنتیک بنا شده است که با انتخاب از مجموعه تصادفی از رشته‌ها (جواب‌های بالقوه مساله) و با توجه به سازگاری (معیاری برای سنجش کارایی) آنها و اعمال عملگرهای ژنتیکی طی نسل‌های متوالی (دوره محاسباتی)، به رشته‌های سازگارتر (جواب‌های بهینه) دست خواهد یافت [۱۹].

اصول الگوریتم ژنتیک را می‌توان به صورت زیر نوشت:

(الف) مقداردهی اولیه جمعیت به صورت اتفاقی، تعیین اندازه جمعیت اولیه و مشخص کردن حداکثر تعداد تکرار.

(ب) تا زمانی که تعداد تکرار تمام شود یا جواب همگرا شود مراحل زیر انجام می‌شود:

- محاسبه مقدار شایستگی هر عضو از جمعیت
- انتخاب والدین با استفاده از شایستگی‌ها
- جابجایی ژنها در والدین و ایجاد فرزندان منتخب
- جهش در میان این فرزندان جدید
- جایگزینی اعضاء با شایستگی کمتر با فرزندان
- اضافه کردن یکی به تعداد تکرار و بازگشت به مرحله دوم

پیاده سازی الگوریتم ژنتیک در برنامه‌ریزی در مدار قرار دادن واحدها شامل مراحل مقداردهی اولیه، محاسبات هزینه، انتخاب نخبه‌سالار، بازتولید، جابجایی ژن‌ها، جهش، پخش بار اقتصادی و جهش هوشمند است.

همانطوریکه در بخش‌های قبل اشاره شد تفاوت در مدار قرار دادن واحدها در محیط های جدید و سنتی در تابع هدف، پخش بار اقتصادی و بعضی قیدهای آن است. فلوچارت برنامه مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. در زیر به توضیح هر یک از بلوکهای آن پرداخته می‌شود [۲۰].

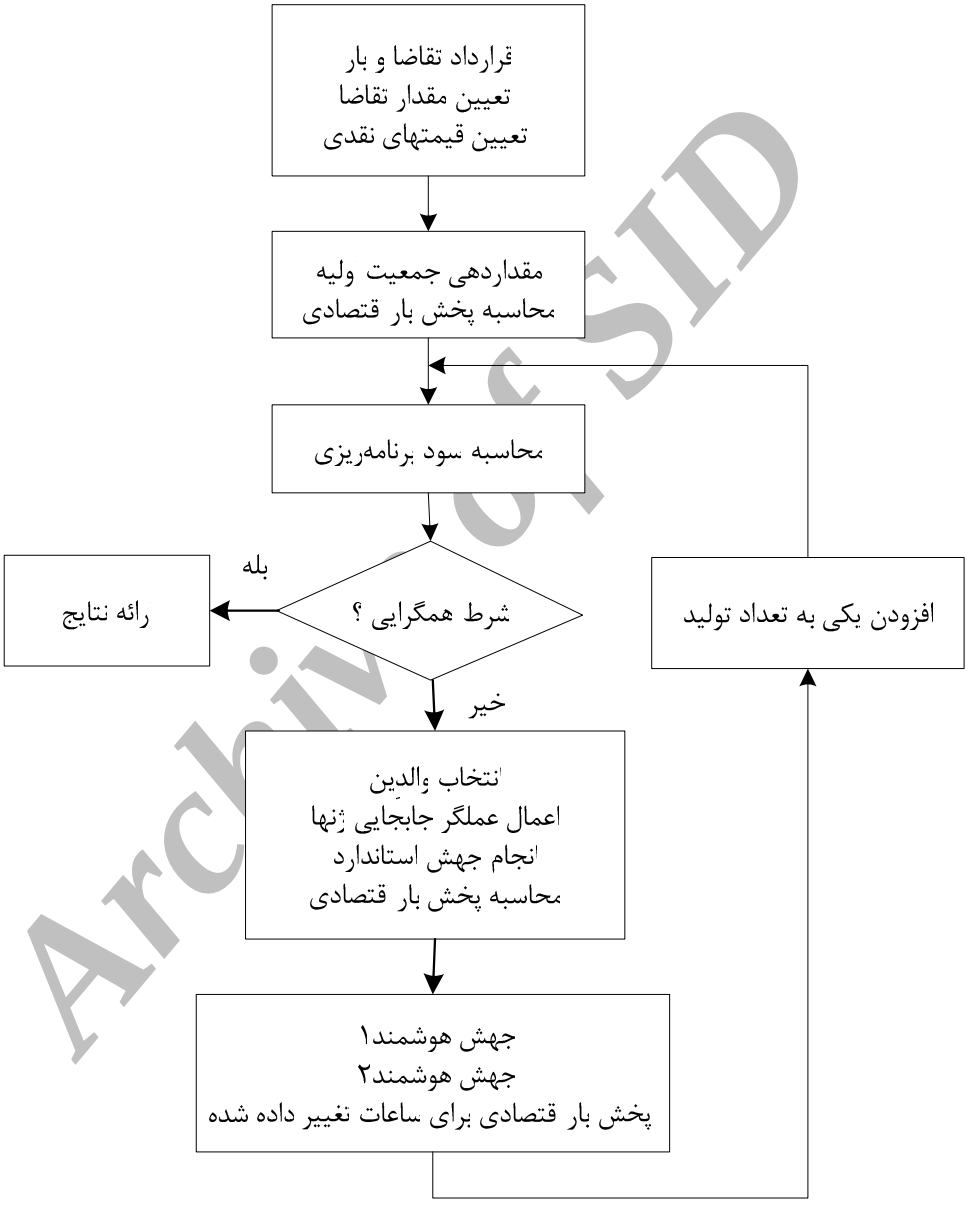
در ابتدای فلوچارت قراردادهای مربوط به تقاضا و قیمت‌ها، پیش‌بینی تقاضای باقی‌مانده و قیمت های نقدی پیش‌بینی شده به صورت معلوم در نظر گرفته می‌شود. مشخص کردن قیمت در هر ساعت و پیش‌بینی تقاضا با استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های خاصی انجام می‌شود که در اینجا فقط از نتیجه نهایی آن استفاده می‌گردد [۲۱].

این مقادیر به صورت ورودی در اختیار برنامه قرار می‌گیرد. مقداردهی اولیه برای اعضای جمعیت اولیه انجام می‌شود. تعداد عضوهای جمعیت با توجه به ابعاد مساله بین ۳۰ تا ۵۰ است که در اینجا ۳۰ در نظر گرفته شده است.

هر عضو جمعیت شامل ماتریسی به ابعاد تعداد واحدها در تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی است. این ماتریس بیان‌کننده حالت روشن/خاموش واحدهای تولید کننده است.

Archive of SID
www.SID.ir

گام نخست در مقداردهی اولیه پیدا کردن جواب‌های بهینه برای هر تکرار است که سود مناسبی را نتیجه دهد. با استفاده از برنامه پخش بار اقتصادی مقدار تولید هر یک از واحدها مشخص می‌شود. سپس با استفاده از تابع هدف ارائه شده مقدار سود محاسبه می‌گردد و کنترل می‌شود که آیا به حداکثر تعداد تکرار مجاز رسیده است یا سایر قیود توقف برنامه آورده شده است. در غیر اینصورت اجرای برنامه ادامه می‌یابد و مرحلهٔ بعدی که بازتولید نام دارد اجرا می‌گردد. بازتولید ساز و کاری است که بوسیله آن بالاترین و بهترین اعضا از نظر شایستگی در جمعیت انتخاب می‌شوند. گام اول در مرحله باز تولید انتخاب والدین است. برای انتخاب والدین از روش چرخه شانس و شیوه انتخاب نخبه‌سالار استفاده می‌شود. در روش چرخه شانس، اعضاء با شایستگی بیشتر امکان انتخاب بیشتری خواهند داشت و انتخاب نخبه سالار در هر مرحله تولید، اعضا با شایستگی بالاتر را حفظ خواهد کرد. بعد از انتخاب والدین از عملگر جابجایی ژن‌ها استفاده می‌شود. جابجایی ژن‌ها یکی از عملگرهای اولیه ژنتیک است که نواحی جدیدی را در فضای جستجو ایجاد می‌کند.



شکل ۲. فلوچارت برنامه در مدار قرار دادن واحدها با استفاده از الگوریتم ژنتیک

جابجایی ژن‌ها دارای ساختاری است که اطلاعات را با استفاده از ساز و کار اتفاقی بین رشته‌ها انتقال می‌دهد.

جابجایی ژن‌ها با انتخاب اتفاقی دو عضو قدیمی که در مرحله باز تولید قرار داشته‌اند، انجام می‌شود. در این مقاله از جابجایی ژن‌های دو نقطه‌ای استفاده می‌شود. در این شیوه اطلاعات از یک والد تا نقطه اول به یک فرزند منتقل شده و از نقطه اول تا دوم اطلاعات از والد دوم به آن فرزند منتقل می‌شود. از نقطه دوم تا پایان دوباره از والد اول اطلاعات منتقل شده و به طور معکوس اطلاعات به فرزند

Archive of SID

www.SID.ir

دوم منتقل می‌شود. پس از مرحله جابجایی ژن‌ها، جهش ژنی استاندارد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جهش ژنی استاندارد شامل انتخاب تصادفی واحدهای خاموش در برنامه داده شده است.

این عملگر اطمینان می‌دهد که هیچ رشته‌ای به صورت مقدار ثابت در جستجو ثابت نخواهد ماند.

جهش استاندارد به وسیله مکان ماتریس وزن استاندارد با استفاده از احتمال جهش داده می‌شود. احتمال جهش مورد استفاده در این روش تابعی از تعداد ژنراتورها است. ابتدا احتمال هر جهش داده می‌شود. در هر مرحله تولید، احتمال جهش به صورت نمایی افزایش می‌یابد. در مراحل اولیه از آنجا که ژنراتورهایی که عضو جمعیت هستند متمایز هستند به جهش استاندارد نیاز نیست. در مراحل تولید پایانی وقتی که در محدوده مناسب جواب قرار گرفت، نیاز است که جواب‌های بهتر در این نواحی نگهداری شوند.

پس از مرحله جهش ژنی استاندارد، پخش بار اقتصادی برای تعیین مقدار تابع هدف که همان سود است در ساعاتی که تغییر ایجاد شده است، انجام می‌شود. علاوه بر جهش ژنی استاندارد، الگوریتم دو عملگر جهش ژنی هوشمند را مورد استفاده قرار می‌دهد که با تشخیص هزینه‌های گذرا و حداقل زمان‌های کار و توقف کار می‌کند.

عملگر جهش ژنی هوشمند اول، به دنبال ترکیبات ۱۰۱ یا ۰۱۰ می‌گردد. این نوع ترکیبات قابل قبول نیستند. بنابراین به صورت تصادفی صفر به ۱ یا ۱ به صفر تبدیل می‌شود.

عملگر جهش ژنی هوشمند دوم به صورت تصادفی به دنبال ترکیبات ۰۱ یا ۱۰ می‌گردد و این ترکیبات را به ۰۰ یا ۱۱ تغییر می‌دهد و هر کدام سود بیشتری را داشته باشد انتخاب می‌کند و در انتهای الگوریتم با اضافه کردن یکی به تعداد تولید به ابتدا برمی‌گردد.

۲-۵. الگوریتم روش تابکاری شبیه سازی شده

الگوریتم روش تابکاری شبیه سازی شده و یا به اختصار SA یکی از روشهایی است که برای حل تقریبی مسائل بهینه‌سازی بکار می‌رود.

این الگوریتم یک روش بهینه‌سازی قدرتمند و همه منظوره است که ایدهٔ آن از قیاس با پروسه خنک‌سازی آهسته در فلزات به منظور تهیه کریستال و ایجاد ساختار مولکولی منظم حاصل شده است.

در این عملیات حرارتی، یک فلز که در ابتدا دارای ساختار مولکولی نامنظم و در نتیجه خواص فیزیکی نامطلوب است، ابتدا تا حد ذوب شدن گرم شده و سپس به تدریج و به صورت کنترل شده سرد می‌شود تا در نهایت در درجه حرارت عادی دارای ساختار مولکولی منظم و مطلوب شود.

با شروع از حداکثر درجه حرارت می‌توان فرآیند فوق را بدین صورت شرح داد که در هر درجه حرارت T به فلز فرصت داده می‌شود تا به تعادل حرارتی برسد. این تعادل حرارتی در هر درجه حرارت با یک تابع توزیع احتمال برای انرژی داخلی فلز به نام توزیع بولتزمن بدین صورت تعریف می‌شود [۲۲]:

$$P_r\{Energy = E\} = \frac{1}{Z(T)}.\exp(-E/K_B T) \qquad (۱۱)$$

که در آن $Z(T)$ یک فاکتور نرمال کننده وابسته به T بوده و K_B ثابت بولتزمن می‌باشد. فلوچارت روش در شکل ۳ آورده شده است.

۳-۵. پیاده سازی الگوریتم SA برای حل مساله در مدار قرار دادن واحدها در سیستم‌های تجدید ساختار شده

مرحله اول: یک جواب قابل قبول به صورت اتفاقی در نظر گرفته می‌شود و شمارنده $k=0$ در نظر گرفته می‌شود.

مرحله دوم: با استفاده از برنامه پخش بار اقتصادی جدید میزان تولید هر واحد مشخص می‌شود و هزینه راه‌اندازی، خاموش کردن و در نهایت سود محاسبه می‌شود.

مرحله سوم: دمای اولیه برای حل مساله تعیین می‌شود(T_k).

مرحله چهارم: اگر تعادل بدست آید به مرحله هفتم رفته و در غیر اینصورت تا زمانیکه معیار تعادل تامین شود مراحل پنجم و ششم در همان دما تکرار می‌شود.

مرحله پنجم: به دست آوردن یک جواب در همسایگی جواب i با نام j و محاسبه مقدار تابع هدف یا همان سود.

مرحله ششم: انجام آزمایش برای قبول و یا رد جواب.

یکی از مسائل مهم بدست آوردن جواب j از روی جواب i در هر دمای ثابت است که در زیر به نحوه بدست آوردن آن اشاره می‌شود.

مرحله هفتم: اگر معیار توقف تامین شده است برنامه متوقف می‌شود و در غیر اینصورت دما کاهش می‌یابد (T_{k+1}، $k=k+1$) و بازگشت به مرحله چهارم انجام می شود.

گام اول: واحدی به صورت تصادفی از بین واحدها انتخاب می‌شود. (i) و ساعتی نیز به طور تصادفی از بین دوره مذکور انتخاب می‌شود.

گام دوم: اگر واحد i در ساعت t خاموش باشد به گام سوم می‌رود و در غیر اینصورت یعنی در مدار بودن به گام چهارم می‌رود.

گام سوم: در گام سوم مراحل زیر انجام می‌شود:

(الف) به حالت پسرو، رو به عقب در زمان حرکت می‌کند تا به نزدیکترین ثابت خاموش شدن برسد ($Tshut_i$).

(ب) به حالت پیشرو، رو به جلو در زمان حرکت می‌کند تا به نزدیکترین ثابت روشن شدن برسد ($Tstart_i$).

(ج) اگر $Tshut_i = Tstart_i = ۰$ شد، آنگاه $Toff_i = T$، واحد برای تمامی ساعات خاموش است.

در بازه $(1, T - Tdown_i + 1)$ مقدار L انتخاب می‌شود.

اگر $L = T - Tdown_i + 1$ شد، $L = T$ را قرار بدهد و به مرحله (و) برود.

(د) اگر $Toff_i = Tdown_i$، $L = Toff_i$ را قرار بدهد و $t = Tshut_i$، به مرحله (و) برود.

(ه) اگر $Toff_i > Tdown_i$ آنگاه در بازه $(1, Toff_i - Tdown_i + 1)$ مقدار L انتخاب شده و $t = Tshut_i$ در نظر گرفته شود.

Archive of SID
www.SID.ir

اگر $L=Toff_i-Tdown_i+1$ بود، $L=Toff_i$ را قرار داده و به مرحله(و) برود.

(و) واحد i در زمانهای $t+k$ روشن شود $(k=0,1,\ldots,L-1)$.

(ز) رفتن به گام پنجم.

گام چهارم: در گام چهارم مراحل زیر انجام می‌شود:

(الف) به حالت پیشرو، رو به جلو در زمان حرکت می‌کند تا به نزدیکترین ثابت خاموش شدن برسد $(Tshut_i)$.

(ب) به حالت پسرو، رو به عقب در زمان حرکت می‌کند تا به نزدیک ترین ثابت روشن شدن برسد $(Tstart_i)$.

(ج) اگر $Tshut_i=Tstart_i=0$ شد، آنگاه $Toff_i=T$، واحد برای تمامی ساعات روشن است.

در بازه $(1,T-Tup_i+1)$ مقدار L انتخاب شود.

اگر $L=T-Tup_i+1$ شد، $L=T$ را قرار داده و به مرحله (و) برود.

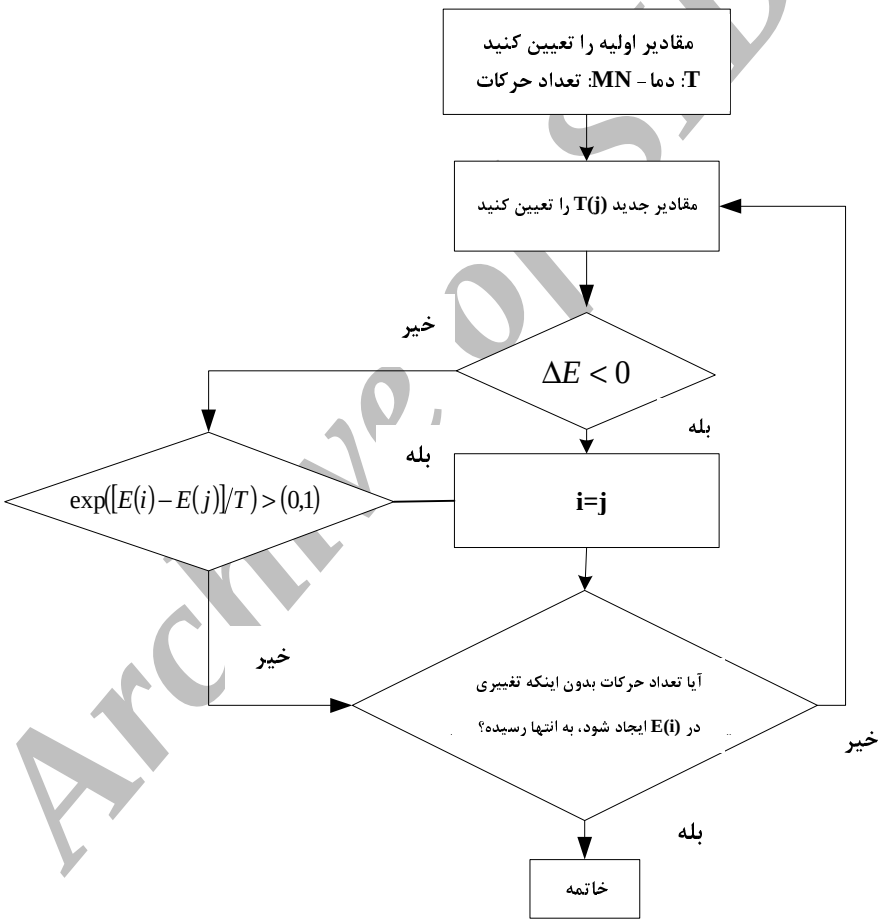
(د) اگر $Ton_i=Tup_i$ شد، آنگاه $L=Ton_i$ و $t=Tstart_i$ را قرار داده و به مرحله (و) برود.

(ه)اگر $Ton_i>Tup_i$، آنگاه در بازه $(1,Ton_i-Tup_i+1)$ مقدار L انتخاب شده و $t=Tstart_i$ در نظر گرفته شود. اگر $L=Ton_i-Tup_i+1$ بود، $L=Toff_i$ را قرار داده و به مرحله (و) برود.

(و) واحد i در زمانهای $t+k$ خاموش شود $(k=0,1,\ldots,L-1)$.

(ز) رفتن به گام پنجم.

گام پنجم: اگر قید ذخیره تامین شده باشد، جواب بدست آمده قابل قبول است. در غیر اینصورت به گام اول برمی‌گردد.



شکل ۳. فلوچارت روش SA

۶. نتایج شبیه سازی

الگوریتم‌های ارائه شده برای سیستمی با سه واحد و دوره زمانی ۱۲ ساعتی مورد آزمایش قرار گرفته است.

اطلاعات مربوط به واحدها، مقدار بار در هر ساعت و قیمت انرژی در ضمیمه آمده است [۲۳].

در حالت اول، مساله در مدار قرار گرفتن واحدها به صورت متداول و در سیستم‌های سنتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل می‌شود.

مقدار تولید واحدها و چگونگی روشن و خاموش شدن آنها در جدول ۱ نشان داده شده است.

مقدار هزینه کمینه شده ۶۷۳۱۳ دلار و مقدار سود ۵۸۹۷/۷ دلار می‌شود.

Archive of SID

www.SID.ir

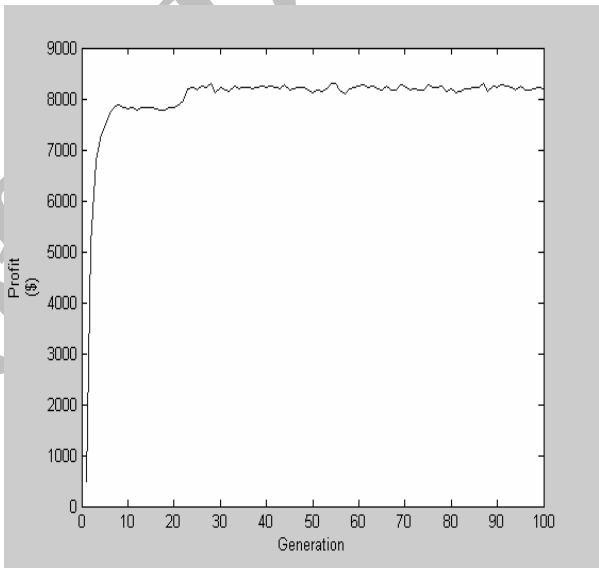
زمان اجرای برنامه در این حالت ۹۷/۳۷ ثانیه بوده و بعد از ۶ تکرار همگرا می‌شود.

با اجرای برنامه بر روی همان سیستم و بر اساس بیشینه سازی سود و با استفاده از الگوریتم ژنتیک مشاهده می‌شود که سود در این حالت ۸۵۰۴/۷ دلار و مقدار هزینه ۳۶۶۹۵ دلار می‌شود.

تعداد جمعیت اولیه ۳۰ و زمان اجرای برنامه ۲۵۹ ثانیه است و برنامه بعد از ۱۰۰ تکرار متوقف می‌شود. ضریب احتمال جابجایی ژن‌ها، ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است.

مشاهده می‌شود که مقدار سود ۲۶۰۷ دلار افزایش می‌یابد. مراحل رسیدن به همگرایی نیز در شکل ۴ نشان داده شده است.

چگونگی در مدار قرار گرفتن واحدها و مقدار تولید آنها در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۴. نحوه رسیدن به همگرایی در روش الگوریتم ژنتیک

جدول ۱. مقدار تولید واحدها برای کمینه کردن

ساعت	واحد ۱ (مگاوات)	واحد ۲ (مگاوات)	واحد ۳ (مگاوات)
۱	۰	۱۰۰	۷۰
۲	۰	۱۰۰	۱۵۰
۳	۰	۲۰۰	۲۰۰
۴	۰	۳۲۰	۲۰۰
۵	۱۳۶/۳۶	۳۶۳/۶۳	۲۰۰
۶	۴۵۰	۴۰۰	۲۰۰
۷	۵۰۰	۴۰۰	۲۰۰
۸	۲۰۰	۴۰۰	۲۰۰
۹	۱۰۰	۳۵۰	۲۰۰
۱۰	۰	۱۳۰	۲۰۰
۱۱	۰	۲۰۰	۲۰۰
۱۲	۰	۳۵۰	۲۰۰

جدول ۲. مقدار تولید واحدها برای بیشینه سازی سود با استفاده از الگوریتم ژنتیک

ساعت	واحد ۱ (مگاوات)	واحد ۲ (مگاوات)	واحد ۳ (مگاوات)
۱	۰	۰	۱۷۰
۲	۰	۰	۲۰۰
۳	۰	۰	۲۰۰
۴	۰	۰	۲۰۰
۵	۰	۳۰۳/۲۲	۲۰۰
۶	۰	۴۰۰	۲۰۰
۷	۰	۴۰۰	۲۰۰
۸	۰	۴۰۰	۲۰۰
۹	۰	۳۹۷/۴۶	۲۰۰
۱۰	۰	۰	۲۰۰
۱۱	۰	۰	۲۰۰
۱۲	۰	۰	۲۰۰

در حالت بعدی، از الگوریتم SA برای حل مساله در مدار قرار گرفتن واحدها در سیستم‌های تجدید ساختار شده استفاده می‌شود. در هر دما ۳۰ جواب بدست آمده است. دمای اولیه ۱۰۰ و زمان اجرای برنامه ۶۷ ثانیه است. مقدار سود بدست آمده ۸۶۸۹/۲ دلار و مقدار هزینه ۳۹۵۱۳ دلار می‌شود. مقدار تولید و نحوه در مدار قرار گرفتن واحدها در جدول ۳ نشان داده شده است. مشاهده می شود که سود بدست آمده از روش SA نسبت به الگوریتم ژنتیک بیشتر است و زمان اجرای برنامه بسیار کمتر شده است. هزینه در روش الگوریتم ژنتیک و SA در مقایسه با سیستم‌های سنتی کمتر می‌شود و دلیل آن کاهش مقدار تولید است و همان طوری که مشاهده می‌شود در بعضی ساعات، بار پیش بینی شده تامین نمی‌شود.

جدول ۳. مقدار تولید واحدها برای بیشینه سازی سود با استفاده از الگوریتم SA

ساعت	واحد ۱ (مگاوات)	واحد ۲ (مگاوات)	واحد ۳ (مگاوات)
۱	۰	۰	۱۷۰
۲	۰	۰	۲۰۰
۳	۰	۰	۲۰۰
۴	۰	۰	۲۰۰
۵	۰	۳۵۷/۳	۲۰۰
۶	۰	۴۰۰	۲۰۰
۷	۰	۴۰۰	۲۰۰
۸	۰	۴۰۰	۲۰۰
۹	۰	۳۹۲/۵	۲۰۰
۱۰	۰	۱۱۸/۴	۲۰۰
۱۱	۰	۱۸۶	۲۰۰
۱۲	۰	۰	۲۰۰

Archive of SID
www.SID.ir

مزیت مهم روش SA کوتاه بودن زمان اجرای برنامه است که در مقایسه با الگوریتم ژنتیک قابل تامل است و در سیستم‌های با ابعاد بزرگتر، زمان فاکتور بسیار مهمی است.

در جدول ۴ دو روش با یکدیگر مقایسه شده اند و مقدار هزینه و سود و زمان اجرای برنامه با روش های سنتی مقایسه شده اند.

جدول ۴. مقایسه روشهای مورد استفاده

پارامتر مورد مقایسه	سیستم سنتی (الگوریتم ژنتیک)	سیستم تجدید ساختار شده (الگوریتم ژنتیک)	سیستم تجدید ساختار شده (الگوریتم SA)
هزینه	۶۷۳۱۳	۳۶۶۹۵	۳۹۵۱۳
سود	۵۸۹۷/۷	۸۵۰۴/۷	۸۶۸۹/۲
زمان اجرای برنامه	۹۷/۳۷	۲۵۹	۶۷

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله از الگوریتم ژنتیک و روش SA برای حل مساله در مدار قرار گرفتن واحدها بر پایهٔ سود استفاده شد. همچنین پخش بار اقتصادی نوینی در اینگونه مسائل مورد استفاده قرار گرفت.

از ویژگی‌های پخش بار اقتصادی جدید می‌توان به کوتاه بودن زمان محاسبات اشاره کرد و چون این عمل بارها تکرار می‌شود، در کل زمان اجرای برنامه بسیار مهم است.

با مقایسه دو روش نتیجه می‌شود که روش SA نسبت به الگوریتم ژنتیک از جواب‌های بهتری برخوردار است و زمان اجرای برنامه در الگوریتم SA در مقایسه با الگوریتم ژنتیک بسیار کمتر می‌شود.

بنابراین یکی از مزیت‌های مهم روش SA آن است که در زمان بسیار کمتری جواب بهتری خواهد داد. با مقایسه جواب‌های هر دو روش با سیستم‌های سنتی نتیجه می‌شود که سود از ۵۸۹۷/۷ دلار به حدود ۸۶۰۰ دلار می‌رسد. مقدار افزایش سود در مقایسه با سیستم‌های سنتی حدود ۴۰ درصد است.

از ویژگی‌های مهم هر دو روش می‌توان به این نکته اشاره کرد که در صورت متوقف شدن در حین اجرای برنامه، برخلاف روش‌های کلاسیک مانند برنامه‌ریزی پویا، تعدادی جواب در اختیار خواهد بود.

با بررسی آزمایش‌های مختلف مشاهده می‌شود که الگوریتم ژنتیک در احتمال جابجایی ۰/۷ از جواب‌های بهتری برخوردار است و با توجه به زمان اجرای برنامه‌ها نتیجه می‌شود که در احتمال جابجایی ۰/۹۵ در شرایط مساوی، زمان رسیدن به جواب سریعتر خواهد بود.

یکی از مسائل مهم در روش SA تعیین دمای اولیه برای شروع به کار برنامه است.

با بررسی آزمایش‌های مختلف نتیجه می‌شود که دمای اولیه ۱۰۰ برای اجرای برنامه مناسب است و می‌توان ادعا کرد که تعداد ۳۰ تا ۴۰ جواب در هر دما مناسب است و در زمان قابل قبولی به جواب می رسد.

مراجع

[1] Albuyeh F., Alaywan Z., "*Implementation of the California Independent System Operator*", PICA 99, Proceedings of the 21st IEEE International Conference, May 1999, PP. 233-238.

[2] Bearcen M. K. and Wilson J. N., "*California Independent System Operator Grid Meter Application*", IEEE Transmission and Distribution Conference, Vol. 1, April 1999, PP. 286-290.

[3] Snyder W. L., "*Dynamic Programming to Unit Commitment*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-2, No. 2, 1987, PP. 339-350.

[4] Merline A. and Sandrin P., "*A New Method for Unit Commitment at Electricite de France*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PAS-100, 1983, PP. 1218-1225.

[5] Cohen A. I., Yashimura M., "*A Branch-and-Bound Algorithm for Unit Commitment*", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 2, 1987, PP. 444-451.

[6] Dagupta D., McGregor D.R., "*Short Term Unit-Commitment Using Genetic Algorithms*", TAI 93, Proceedings of Fifth International Conference, Nov. 1993, PP. 240-247.

[7] Swarup K.S., Yamashiro S., "*Unit Commitment Solution Methodology Using Genetic Algorithm*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 1, Feb. 2002, PP. 87-91.

[8] Zhuang F., Galiana F.D, "*Unit Commitment by Simulated Annealing*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, Feb. 1990, PP. 311-318.

[9] Viana A., Sousa J.P., Matos M., "*Simulated Annealing for the Unit Commitment Problem*", Proceedings of Power Tech. Conference, Porto, Portugal, Sep. 2001, PP. 10-13.

[10] Cheng Ch. P., liu Ch. W., Liu Ch., "*Unit Commitment by Lagrangian Relaxation and Genetic Algorithms*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, May 2000, PP. 707-714.

[11] Valenzuela J., Mazumdar M., "*Making Unit Commitment Decisions When Electricity Is Traded at Spot Market Prices*", IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting, Vol. 3, Jan. 2001, PP. 1509-1512.

[12] Oren S. S., Svoboda A. J., Johnson R. B., "*Volatility of Unit Commitment in Competitive Electricity Markets*", Proceedings of the Thirteenth Hawaii International Conference, Vol. 5, Jan. 1997, PP. 594-601.

Archive of SID

www.SID.ir

[13] Larsen T. J, Wangensteen I., Gjengedal T., "*Sequential Timestep Unit Commitment*", IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting, Vol. 3, Jan. 2001, PP. 1524-1529.

[14] Hao Sh., Zhuang F., "*New Models for Integrated Short-Term Forward Electricity Markets*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, May 2003, PP. 478-485.

[15] Sheble G. B., "*Priced Based Operation in an Auction Market Structure*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 4, Nov. 1996, PP. 1770-1777.

[16] Tsukamoto M., Tsukamoto Y., Iba K., "*Influence of Auction Rules on Short-Term Generation Scheduling*", IEEE Power Engineering Society, Summer Meeting, Vol. 2, July 1999, PP. 658-663.

[17] Huang G., Zhao O., "*A Power Market Paradigm for Deregulated Environment*", Proceedings of POWERCON 98, Vol. 1, Aug. 1998, PP. 694-698.

[18] Richter C. W., Sheble G. B., "*A Profit-Based Unit Commitment GA for the Competitive Environment*", IEEE Transactions on Powers Systems, Vol. 15, No. 2, May 2000, PP 715-721.

[19] Goldberg D. E, *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Canada, 1989.

[20] Maifeld T. T., Sheble G. B., "*Genetic-Based Unit Commitment Algorithm*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 3, Aug. 1996, PP. 1359-1370.

[21] Mielczarski W., Michalik G., Wildjaja M., "*Bidding Strategies in Electricity Markets*", PCIA 99, IEEE 21st International Conference on Power Industry Computer Applications, May 1999, pp. 71–76.

[22] Azencott R., *Simulated Annealing Parallelization Techniques*, John Wiley and Sons, Paris, 1992.

[23] Purushothama G. K., Jenkins L., "*Simulated Annealing with Local Search-A Hybrid Algorithm for Unit Commitment*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, Feb. 2003, PP. 273-278.

پیوست‌ها

جدول ۵. مقادیر بار و قیمت در هر ساعت

ساعت	تقاضای پیش‌بینی شده (MW)	قیمت نقدی پیش‌بینی شده ($/MW)
۱	۱۷۰	۱۰/۵۵
۲	۲۵۰	۱۰/۳۵
۳	۴۰۰	۹
۴	۵۲۰	۹/۴۵
۵	۷۰۰	۱۰
۶	۱۰۵۰	۱۱/۲۵
۷	۱۱۰۰	۱۱/۳۰
۸	۸۰۰	۱۰/۶۵
۹	۶۵۰	۱۰/۳۵
۱۰	۳۳۰	۱۱/۲۰
۱۱	۴۰۰	۱۰/۷۵
۱۲	۵۵۰	۱۰/۶۰

جدول ۶. مشخصات واحدها

مشخصات واحد	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳
حداکثر تولید (MW)	۶۰۰	۴۰۰	۲۰۰
حداقل تولید (MW)	۱۰۰	۱۰۰	۵۰
($/MW^{2}h) a	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۵
($/MWh) b	۱۰	۸	۶
($/h) c	۵۰۰	۳۰۰	۱۰۰
حداقل زمان کار (h)	۳	۳	۳
حداقل زمان توقف (h)	۳	۳	۳
هزینه راه‌اندازی ($)	۴۵۰	۴۰۰	۳۰۰
هزینه توقف ($)	۰	۰	۰
حالت اولیه (h)	-۳	۳	۳

Archive of SID

www.SID.ir