

بخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن محدودیت برخطی و ترکیبی

نورالدین قدیمی^۱، حسن حسین زاده^۲ و محسن محمدی^۳

۱ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اردبیل، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، اردبیل، ایران

۲ گروه ریاضی، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران

۳ گروه مهندسی برق، دانشگاه پیام نور، ایران

چکیده

در این مقاله با برنامه ریزی برای سیستم های فعال شبکه به کمک الگوریتم استعماری سعی بر تولید انرژی با کمترین هزینه شده است. به عبارتی دیگر برای کمینه کردن هزینه ها از روشی هوشمند جدیدی به نام الگوریتم ICA که مبتنی بر هوش جمعی می باشد، برای حل مساله توزیع اقتصادی بار بین نیروگاه ها استفاده شده است. این الگوریتم برای حل مساله توزیع اقتصادی بار با توابع غیر خطی هزینه که شامل محدودیت های ناشی از نیروگاه ها از جمله: شیر ورودی بخار، توازن تولید و مصرف در سیستم، زون های ممنوعه، حدود تولید، نرخ های افزایشی و کاهشی می باشد، مورد استفاده قرار گرفته و بر روی سیستم های نمونه اعمال شده است. الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم های نمونه ۶ نیروگاهی با بار درخواستی ۱۲۶۳ مگاوات، ۱۵ نیروگاهی با بار درخواستی ۲۶۵۰ مگاوات و ۴۰ نیروگاهی با بار درخواستی ۲۵۰۰ مگاوات با در نظر گرفتن اثر شیر ورودی، زون های ممنوعه و تابع آلودگی ناشی از نیروگاه ها اعمال شده و نتایج بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم های دیگر مقایسه شده که نشان دهنده کارایی این الگوریتم در حل مساله توزیع اقتصادی بار می باشد.

واژگان کلیدی: اثر شیر ورودی بخار، تابع آلودگی، الگوریتم ICA، توزیع اقتصادی بار، محدودیت غیر خطی

۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت الکتریکی یکی از مهمترین منابع تولید انرژی محسوب. امروزه یکی از مهمترین مسائل در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، توزیع بار بین واحدهای تولید انرژی می‌باشد، به نحوی که کمترین هزینه را برای نیروگاه‌ها در برداشته باشد. استراتژی‌های گوناگونی برای حداقل کردن هزینه واحدهای تولید انرژی الکتریکی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی پیشنهاد شده است. توزیع بهینه یا اقتصادی بار در واقع تخصیص تولید بین واحدهای فعال می‌باشد بنحوی که همزمان با تامین تقاضای بار، حدود تولید، نرخ‌های افزایشی یا کاهش‌ی واحدها، نواحی کار ممنوع و سایر محدودیت‌های نیروگاه‌ها در نظر گرفته شده و با لحاظ تلفات شبکه انتقال، هزینه کل تولید در هر بازه زمانی و برای شرایط بار پیش‌بینی شده حداقل شود. از دید اقتصادی، هر چه هزینه کل کاهش یابد وضعیت سیستم بهتر است. بنابراین امروزه تلاش می‌شود که با روش‌های مختلف این هزینه‌ها کاهش یابد. تعدادی از این روش‌ها بر مبنای روش‌های بهینه‌سازی ریاضی می‌باشند، نظیر برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی درجه دوم [۱]. روش‌های برنامه‌ریزی خطی عموماً سریع هستند و از تقریب خطی و تکه‌ای هزینه سوخت استفاده می‌کنند. با این تقریب دقت مسئله کم می‌شود. برای غلبه بر مشکل بالا از برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده می‌شود. اما برنامه‌ریزی غیرخطی نیز مشکل همگرایی داشته و الگوریتم پیچیده‌ای دارد. حل برخی از محدودیت‌های غیرخطی با برنامه‌ریزی غیرخطی نیز خیلی مشکل است [۲]. همچنین با افزایش تعداد واحدها، زمان و حافظه مورد نیاز برای حل مسئله بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند علاوه بر مواجه نبودن با محدودیت‌های ذکر شده، زمان و ابعاد حل مسئله تقریباً بصورت خطی با تعداد واحدها افزایش می‌یابد که با وجود کامپیوترهای امروزی، انتخابی صحیح برای حل مسائل عملی توزیع اقتصادی بار به نظر می‌رسند. به همین دلیل استفاده از روش‌های هوشمندی نظیر بهینه‌سازی اجتماع ذرات [۲] و الگوریتم ژنتیک [۳] در حل مسئله توزیع اقتصادی بار بسیار رایج می‌باشد. علاوه بر اینها الگوریتم تفاضل تکاملی (DE) برای توزیع اقتصادی بار نیز اجرا شده است [۴]. الگوریتم DE، یک الگوریتم جستجوی تصادفی است و ساختار ساده‌ای دارد اما این الگوریتم ممکن است خیلی سریع به نقاط محلی همگرا شود. در این مقاله با استفاده از الگوریتم استعمارگر رقابتی (ICA) به حل مسئله توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن تابع هدفی متشکل از تلفات، هزینه آلودگی و هزینه سوخت نیروگاه‌ها پرداخته شده است. الگوریتم حاصل بر روی سیستم نمونه اجرا شده و نتایج حاصل با الگوریتم‌های دیگر مقایسه شده است. الگوریتم استفاده شده دارای سرعت همگرایی بالا می‌باشد و قرار گرفتن آن در نقاط محلی به مراتب از الگوریتم‌های دیگر کمتر است. همچنین پاسخ مناسب‌تری نسبت به سایر روشها به دست می‌دهد.

۲- فرمول بندی مساله توزیع اقتصادی بار

توزیع اقتصادی بار، روشی با بیشترین کارآمدی، کمترین هزینه و بهره‌برداری قابل اطمینان یک سیستم قدرت را به وسیله پخش مناسب منابع تولید انرژی برای تامین بار سیستم تعیین می‌کند. هدف اولیه آن به حداقل رساندن هزینه کل تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری منابع تولید می‌باشد. مسئله توزیع اقتصادی بار، مقدار بار را برای نیروگاه‌ها به منظور کم کردن هزینه‌ها معین می‌کند. فرمول‌بندی آن نیز به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن هزینه کلی سوخت مجموع نیروگاه‌هایی که بار و تلفات را تامین می‌کنند، ارائه می‌شود. بنابراین مسئله توزیع اقتصادی بار می‌تواند با تابع هدف زیر بیان شود [۱]:

$$\min \sum_{i=1}^N F_i(P_i) + k_l \left(\sum_{i=1}^N P_i - P_D - P_{loss} \right)^2 \quad (1)$$

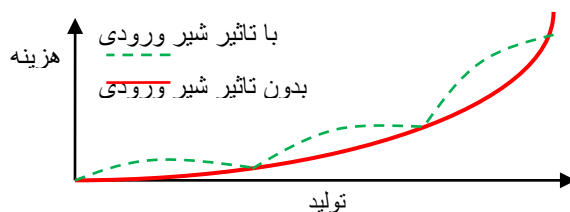
که $F_i(P_i)$ هزینه سوخت i امین نیروگاه، N تعداد ژنراتورهای در حال بهره‌برداری سیستم و P_i توان خروجی i امین ژنراتور است. P_D تقاضای بار و P_{loss} تلفات شبکه انتقال می‌باشد. $F_i(P_i)$ معمولاً به صورت معادله درجه دوم پیوسته زیر بیان می‌شود:

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

در رابطه (۲) a_i ، b_i و c_i ضرایب هزینه i امین ژنراتور است. برای در نظر گرفتن اثرات موقعیت شیر، توابع سینوسی به شکل زیر وارد تابع هدف می شود [۵].

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i \sin(f_i (P_i^{\min} - P_i))| \quad (۳)$$

که e_i و f_i ضرایب موقعیت شیر i امین ژنراتور بوده، تابع هزینه (۱) به یک تابع مرکب چند جمله ای و غیر محدب تبدیل می شود. شکل ۱ تاثیر شیر ورودی را بر غیرخطی بودن تابع هزینه نشان می دهد. علاوه بر اثرات موقعیت شیر، هر نوع هزینه دیگر، همچون هزینه های تعمیر و نگهداری یا آلودگی را می توان به تابع هزینه افزود. تابع هدف حاصل مقید به محدودیت های زیر فرمول بندی مسأله توزیع اقتصادی بار را نتیجه خواهد داد.



شکل ۱- تاثیر شیر ورودی بر تابع هزینه واحد نیروگاهی

● توازن تولید و مصرف در سیستم

مجموع توان تولید شده توسط کلیه واحدهای در مدار باید با مجموع مصرف سیستم برابر باشد.

$$\sum_{i=1}^N P_i - P_D - P_{loss} = 0 \quad (۴)$$

تلفات شبکه انتقال، P_{loss} ، به ساختار فیزیکی شبکه و مقدار تولید بستگی دارد و از محاسبات پخش بار یا ضرایب تلفات B با رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N B_{ij} P_i P_j + \sum_{i=1}^N B_{i0} P_i + B_{00} \quad (۵)$$

● حدود تولید

قدرت خروجی هر ژنراتور نباید بیشتر از مقدار نامی آن باشد و همچنین نباید کمتر از مقداری باشد که برای بهره برداری پایدار دیگ بخار ضروری است. بنابراین، تولید چنان محدود می شود که در بین دو محدوده از پیش تعیین شده حداقل و حداکثر قرار گیرد. هر واحد تولیدی در مدار دارای حدود تولید با رابطه زیر بیان می شود.

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (۶)$$

حدود فوق، علاوه بر اینکه ناشی از محدودیت های فنی هر واحد می باشند، باعث می شوند تا واحد با هزینه کمتر، بیش از حداکثر توان مجاز خود و واحد با هزینه بیشتر، کمتر از حد مجاز خود تولید نداشته باشد.

● نرخ های افزایشی و کاهشی

بدلایل فنی نیروگاه های حرارتی نمی توانند به صورت آنی توان خود را افزایش یا کاهش دهند و این افزایش یا کاهش با آهنگی همراه است. بدین شکل که هر نیروگاه دارای محدودیت هایی در شیب افزایش یا کاهش توان تولیدی خود است که تجاوز از این محدودیت ها منجر به خسارت به روتور شده و باعث افزایش هزینه عملکرد می گردد. که این محدودیت ها با قیود زیر داده می شود.

$$P_i^{\min}(t) \leq P(t)_i \leq P_i^{\max}(t) \quad (۷)$$

که $P_i^{\min}(t) = \max(P_i(t-1) - RDR_i, P_i^{\min})$ و $P_i^{\max}(t) = \min(P_i(t-1) + RUR_i, P_i^{\max})$ نرخ کاهشی نیروگاه و RUR_i نرخ افزایشی نیروگاه می باشد. به منظور اعمال محدودیت های فوق لازم است تا وضعیت تولید اولیه هر نیروگاه معلوم باشد.

● هزینه زیست محیطی

یکی از مهمترین چالش های پیش روی بشر در حال حاضر و در دهه های آینده به طور قطع، کاهش آلودگی هوا می باشد. تولید انرژی الکتریکی ناشی از سوخت های فسیلی، چندین ماده مختلف مثل دی اکسید گوگرد، اکسید نیتروژن و دی اکسید کربن را در هوا پخش می کند. دو نمونه از مهمترین این ترکیبات که در اکثر نیروگاه های قدرت تولید می شوند، اکسید نیتروژن (NO_x) و دی اکسید گوگرد (SO_2) می باشند. در این مقاله هزینه ناشی از جلوگیری انتشار این ترکیبات در هوا نیز در تابع هدف در نظر گرفته شده است. معادله انتشار به صورت یک تابع درجه دوم با ضرایب ثابت برای هر واحد تولیدی در نظر گرفته می شود. کل هزینه انتشار به صورت تابع هدف (تابع هزینه) وارد می شود تا حداقل گردد. البته یک ضریب g به عنوان ضریب خطای قیمت در نظر گرفته می شود. ضریب g دارای واحد $\$/\text{KG}$ می باشد و تابع انتشار را به تابع هزینه تبدیل می کند:

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^n C(P_i) + \sum_{i=1}^n E_i(P_i) \quad (8)$$

● زون های ممنوع

نیروگاه ها به دلایل فنی نمی توانند در برخی از نواحی مابین حداقل و حداکثر تولید خودشان، توان تولید کنند. این نواحی به عنوان زون های ممنوع نامیده می شوند و به صورت $[P_{i,jL} \ P_{i,jU}]$ مشخص می شوند. بدین ترتیب نواحی کار ممکن واحد تولید i ام به شکل زیر مشخص می شود.

$$P_i \in \begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i,1}^L \\ P_{i,j-1}^U \leq P_i \leq P_{i,j}^L, \quad j = 2, 3, \dots, Z_i \\ P_{i,Z_i}^U \leq P_i \leq P_i^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

که Z_i تعداد زون های ممنوع واحد i ام می باشد.

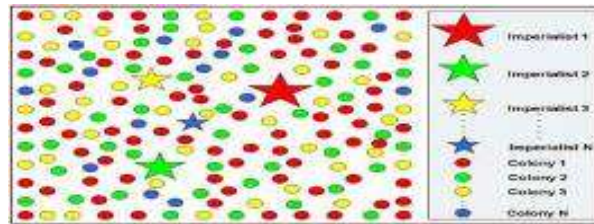
● محدودیت های قابلیت اطمینان و امنیت شبکه

سایر محدودیت های ناشی از معیارهای قابلیت اطمینان و امنیت شبکه را نیز می توان به عنوان محدودیت های فنی مسئله توزیع بار اقتصادی در نظر گرفت. در غالب موارد، این محدودیت ها در سایر مطالعات یا برنامه ریزی ها در نظر گرفته می شوند و توزیع اقتصادی بار بدون منظور نمودن این محدودیت ها حل می شود.

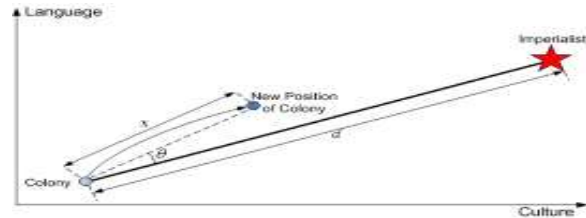
۳- الگوریتم ICA

اخیرا الگوریتم جدیدی با نام الگوریتم رقابت استعماری. توسط آقایان اسماعیل آتشپز و کارو لوکس ارائه شده است، که برای بهینه سازی، بجای طبیعت از یک پدیده اجتماعی الهام گرفته است [۶].

این الگوریتم مطابق شکل (۲) با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آنها یک "کشور" نامیده می شوند، شروع می گردد. کشور ها به دو دسته مستعمره و استعمارگر (امپریالیست) تقسیم می شوند. سیاست جذب و رقابت استعماری، هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل می دهد [۶]. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت (معادل نخبه ها در الگوریتم ژنتیک) بعنوان استعمارگر انتخاب شده و باقیمانده جمعیت نیز بعنوان مستعمره، در نظر گرفته می شوند. استعمارگر ها بسته به قدرتشان که با تابع هزینه نسبت عکس دارد. این مستعمرات را با یک روند خاص به طرف خود جلب می کنند. شکل (۳) حرکت مستعمرات به سمت استعمارگر را نشان می دهد. مطابق این شکل کشور امپریالیست کشور مستعمره را در راستای محورهای فرهنگ و زبان به سمت خود جذب می کند [۷]. در این شکل، فاصله میان استعمارگر و مستعمره با d نشان داده شده است X و θ نیز اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت به صورت رابطه (۱۰) میباشند.



شکل (۲): استعمارگران اولیه تولید شده و مستعمرات آنها



شکل (۳): حرکت مستعمرات به سمت امپریالیست

$$x \sim U(0, \beta \times d) \quad (10)$$

که در آن β عددی بزرگتر از یک و نزدیک ۲ می باشد. یک انتخاب مناسب می تواند $\beta=2$ باشد. وجود ضریب $\beta > 1$ باعث می شود تا کشور مستعمره در حین حرکت به سمت کشور استعمارگر، از جهت های مختلف به آن نزدیک شود. در رابطه (۵) پارامتری دلخواه می باشد که افزایش آن باعث افزایش جستجوی اطراف امپریالیست شده و کاهش آن نیز باعث می شود تا مستعمرات تا حد ممکن، به بردار واصل مستعمره به استعمارگر، نزدیک حرکت کنند. در اکثر پیاده سازیها، انتخاب $\gamma = \pi/4$ انتخاب مناسبی بوده است. قدرت کل هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل دهنده آن یعنی کشور امپریالیست (بعنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن، بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور امپریالیست، به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، مدل شده است. با شکل گیری امپراطوری های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آن ها شروع می شود. هر امپراطوری ای که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند، از صحنه رقابت استعماری، حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراطوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری های رقیب، و به سطره در آوردن آنها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراطوریهای بزرگتر افزوده شده و امپراطوریهای ضعیف تر، حذف خواهند شد. امپراطوری ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند.

با گذشت زمان، مستعمرات از لحاظ قدرت به امپراطوری ها نزدیک تر خواهند شد و شاهد یک نوع همگرایی خواهیم بود مراحل الگوریتم به همین ترتیب ادامه می یابد تا بالاخره تعداد امپراطوری ها به یک برسد. در این حالت تمام کشورها مستعمره یک امپراطوری هستند و الگوریتم به پایان می رسد. شکل (۴) فلوچارت الگوریتم پیشنهادی را نشان می دهد.

۴- نتایج شبیه سازی سیستم های مورد مطالعه

سناریو اول: سیستم شامل ۲۶ باس، ۴۶ خط انتقال و ۶ واحد تولید حرارتی می باشد [۸]. ضرایب تابع هزینه و حدود واحدهای تولیدی در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۲ نرخ های افزایشی و کاهشی تولید و نواحی ممنوعه برای هر کدام از واحدهای تولیدی ارائه شده اند.

جدول ۱- ضرایب هزینه و حدود واحدهای تولیدی سیستم ۶ نیروگاهی

Unit	a_i (\$)	b_i (\$/MW)	c_i (\$/MW ²)	P_i^{max} (MW)	P_i^{min} (MW)
1	240	7.0	0.0070	500	100
2	200	10.0	0.0095	200	50
3	220	8.5	0.0090	300	80
4	200	11.0	0.0090	150	50
5	220	10.5	0.0080	200	50

6	190	12.0	0.0075	120	50
---	-----	------	--------	-----	----

جدول ۲- مشخصات واحدهای تولیدی سیستم ۶ نیروگاهی

Unit	P_i^0 (MW)	RUR_i (MW/h)	RDR_i (MW/h)	Prohibited zones (MW)
1	440	80	120	[210 240][350 380]
2	170	50	90	[90 110][140 160]
3	200	65	100	[150 170][210 240]
4	150	50	90	[80 90][110 120]
5	190	50	90	[90 110][140 150]
6	110	50	90	[75 85][100 105]

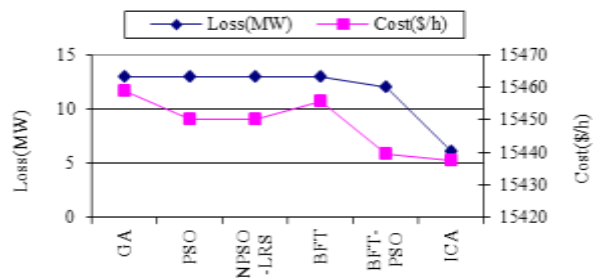
$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 0.0017 & 0.0012 & 0.0007 & -0.0001 & -0.0005 & -0.0002 \\ 0.0012 & 0.0014 & 0.0009 & 0.0001 & -0.0006 & -0.0001 \\ 0.0007 & 0.0009 & 0.0031 & 0.0000 & -0.0010 & -0.0006 \\ -0.0001 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0024 & -0.0006 & -0.0008 \\ -0.0005 & -0.0006 & -0.0010 & -0.0006 & 0.0129 & -0.0002 \\ -0.0002 & -0.0001 & -0.0006 & -0.0008 & -0.0002 & 0.0150 \end{bmatrix}$$

$$B_{i0} = 10^{-3} [-0.3908 \quad -0.1297 \quad 0.7047 \quad 0.0591 \quad 0.2161 \quad -0.6635]$$

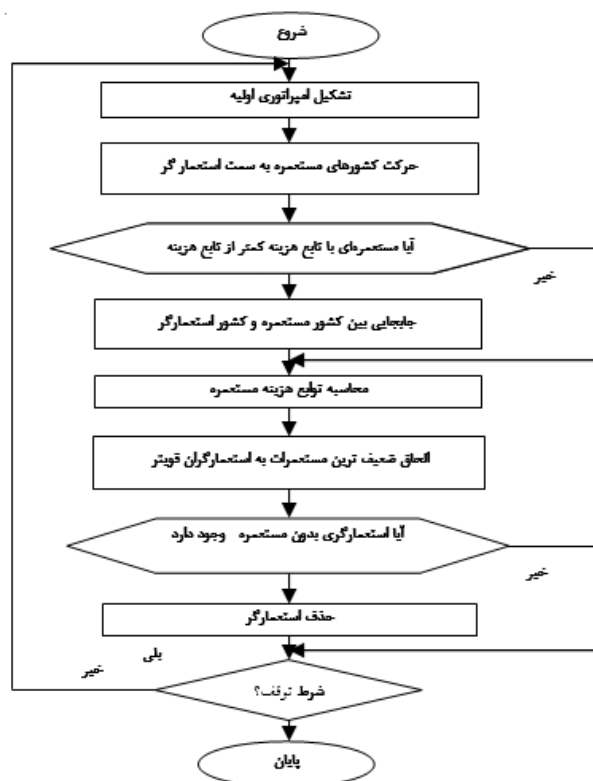
$$B_{00} = 0.0056$$

جدول ۳- نتایج شبیه سازی واحدهای تولیدی سیستم ۶ نیروگاهی

Unit	GA [16]	PSO [16]	NPSO-LRS [17]
P_1 (MW)	474.807	447.497	446.960
P_2 (MW)	178.636	173.322	173.394
P_3 (MW)	262.208	263.474	262.344
P_4 (MW)	134.282	139.059	139.512
P_5 (MW)	151.903	165.476	164.709
P_6 (MW)	74.181	87.128	89.016
Loss(MW)	13.0217	12.9584	12.936
Total Gen.(MW)	1276.030	1276.010	1275.940
Total Load(MW)	1263.00	1263.00	1263.00
Cost(\$/h)	15459.00	15450.00	15450.00



شکل ۵. نتایج به دست آمده برای سیستم ۶ نیروگاهی



شکل (۴): فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری

ادامه جدول ۳- نتایج شبیه سازی واحدهای تولیدی سیستم ۶ نیروگاهی

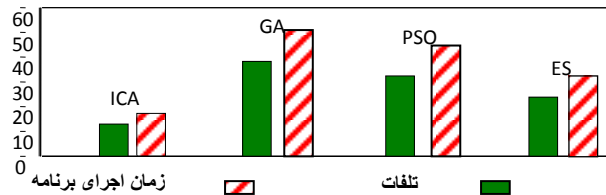
Unit	BFT [18]	BFT-PSO [18]	ICA
P ₁ (MW)	448.688	450.129	500.000
P ₂ (MW)	164.007	173.623	150.3989
P ₃ (MW)	263.156	260.607	240.101
P ₄ (MW)	131.657	139.489	125.137
P ₅ (MW)	197.039	159.697	140.081
P ₆ (MW)	71.488	91.507	94.210
Loss(MW)	13.0054	12.0525	6.053
Gen.(MW) Total	1276.034	1275.052	1269.153

Load(MW) Total	1263.00	1263.00	1263.00
Cost(\$/h)	15455.65	15439.45	15437.60

شکل ۳ مقایسه برای نتایج انجام گرفته را نشان می دهد.

همان گونه که در شکل ۵ نشان می دهد الگوریتم پیشنهادی به مراتب قویتر از سایر الگوریتم های بوده است.

سناریو دوم: در این سناریو سیستم ۱۵ نیروگاهی در دو حالت با در نظر گرفتن تابع آلودگی، زون های ممنوعه و تابع تلفات در دو جدول ۴ و ۵ آورده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی در دو جدول ۶ و ۷ آمده است. اطلاعات سیستم مورد مطالعه در مرجع [۸-۹] داده شده است.



شکل ۶- تغییرات تلفات و زمان اجرای برنامه سیستم ۱۵ نیروگاهی

جدول ۴- مشخصات واحدهای تولیدی سیستم ۱۵ نیروگاهی

واحد	P_i^0 (M W)	RUR_i (MW/ h)	RDR_i (MW/ h)	Prohibited zones (MW)		
				Zone 1	Zone 2	Zone 3
1	400	80	120	----	----	----
2	300	80	120	[185 255]	[305 335]	[420 450]
3	105	130	130	----	----	----
4	100	130	130	----	----	----
5	90	80	120	[180 200]	[305 335]	[390 420]
6	400	80	120	[230 255]	[365 395]	[430 455]
7	350	80	120	----	----	----
8	95	65	100	----	----	----
9	105	60	10	----	----	----
10	110	60	100	----	----	----
11	60	80	80	----	----	----
12	40	80	80	[30 40]	[55 65]	----
13	30	80	80	----	----	----
14	20	55	55	----	----	----
15	20	55	55	----	----	----

جدول ۵- اطلاعات سیستم با تابع هزینه درجه سوم با در نظر گرفتن ضرایب آلودگی $F_i(P_i) = (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + d_i P_i^3)$

واحد	a_i (\$)	b_i (\$/MW)	c_i (\$/MW ²)	$d_i(\times 10^{-6})$	P_i^{max} (MW)	P_i^{min} (MW)
1	671	10.1	0.0002	0.031	150	455
2	574	10.2	0.0002	0.051	150	455
3	374	8.8	0.0011	0.091	20	130
4	374	8.8	0.0011	0.092	20	130
5	461	10.4	0.0002	0.081	150	470

6	630	10.1	0.0003	0.061	135	460
7	548	9.8	0.0004	0.051	135	465
8	227	11.2	0.0003	0.342	60	300
9	173	11.2	0.0008	0.552	25	162
10	175	10.7	0.0012	0.53	20	160
11	186	10.2	0.0036	0.43	20	80
12	230	9.9	0.0055	0.33	20	80
13	225	13.1	0.0004	0.23	25	85
14	309	12.1	0.0019	0.143	15	55
15	323	12.4	0.0044	0.13	15	55

جدول ۶- نتایج شبیه سازی واحدهای تولیدی سیستم ۱۵ نیروگاهی با تلفات

واحد	Evolution strategy [19]	Particle swarm optimization [20]	Genetic algorithm [20]	ICA
P ₁ (MW)	455	439.12	415.31	449.1
P ₂ (MW)	380	407.97	359.72	174.5
P ₃ (MW)	130	119.63	104.42	20.8
P ₄ (MW)	150	129.99	74.98	89.3
P ₅ (MW)	168.9	151.07	380.28	361.12
P ₆ (MW)	459.3	459.99	426.79	380.3
P ₇ (MW)	430	425.56	341.32	430.2
P ₈ (MW)	97.4	98.56	124.79	170.3
P ₉ (MW)	30.6	113.49	133.14	160
P ₁₀ (MW)	142.5	101.11	89.26	124.7
P ₁₁ (MW)	80	33.91	60.06	60.25
P ₁₂ (MW)	85	79.96	50.00	70.2
P ₁₃ (MW)	15	25	38.7	68.4
P ₁₄ (MW)	15	41.41	41.9	42.08
P ₁₅ (MW)	15	35.61	22.64	28.75
Total Load(MW)	2653.85	2662.41	2668.44	2642.8
Loss(MW)	23.85	32.42	38.28	93
Cost(\$/h)	32568.54	32858.00	33113.00	32550.32

شکل ۶ مقایسه ای برای زمان اجرای برنامه و تلفات محاسبه شده برای سیستم مورد مطالعه می باشد. همان گونه که از شکل نشان داده شده است الگوریتم پیشنهادی با سرعت بالاتر و دقت بیشتر مساله پخش بار اقتصادی را انجام داده است.

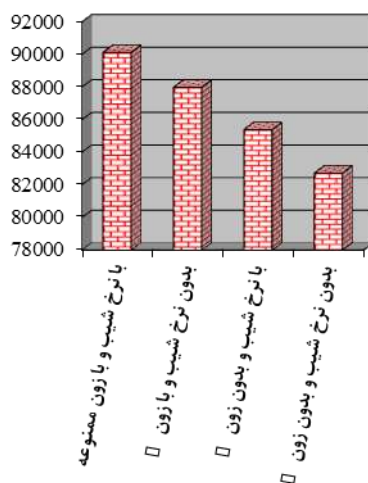
جدول ۷- نتایج شبیه سازی واحدهای تولیدی سیستم ۱۵ نیروگاهی با آلودگی

واحد	بدون نرخ شیب و زون ممنوعه	با نرخ شیب و بدون زون ممنوعه	بدون نرخ شیب و با زون ممنوعه	با نرخ شیب و زون ممنوعه
P ₁ (MW)	393.28	430.12	290.3	280.14
P ₂ (MW)	291.12	354.2	416.87	420
P ₃ (MW)	124	125.76	125.37	128.12
P ₄ (MW)	129.41	128.65	121.23	127.54
P ₅ (MW)	394.84	201.36	386.71	389.12
P ₆ (MW)	426.75	440.53	430	430

P ₇ (MW)	461.95	432.5	445	350
P ₈ (MW)	85.23	92.76	80.97	67.2
P ₉ (MW)	49.66	57.98	50.23	43.62
P ₁₀ (MW)	90.66	120.47	90.12	132.87
P ₁₁ (MW)	69.45	73.21	79.3	79.8
P ₁₂ (MW)	73.41	73.87	65.9	65
P ₁₃ (MW)	30.2	58.93	25.55	60.1
P ₁₄ (MW)	16.5	35.19	18.45	39.21
P ₁₅ (MW)	13.54	33.47	24.0	37.21
LoadMW Total	8.56	8.23	8.19	8.896
Cost(\$/h)	82731	85392	87983	90129

شکل ۷ مقایسه ای بین حالت‌های انجام گرفته برای سیستم ۱۵ نیروگاهی را نشان می دهد.

سناریو سوم: سیستم مورد مطالع دارای ۴۰ واحد نیروگاهی می باشد. اطلاعات سیستم مورد مطالعه در مرجع [۱۰] داده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی در جدول ۸ آمده است. جداول ۳، ۶، ۷ و ۸ نشان می دهند که الگوریتم ICA در پیدا کردن پاسخ بهینه از سایر روش های ذکر شده موفق تر بوده است. در سیستم های مورد مطالعه در واحد اول در مقدار مرزی قرار دارد و هزینه کل تولید به دست آمده در این روش از سایر روش ها کمتر می باشد در حالیکه تلفات شبکه انتقال به مقدار قابل توجهی کمتر از سایر روش ها می باشد.



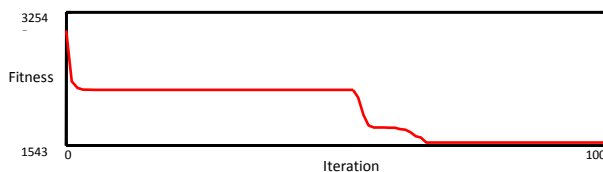
شکل ۷ مقایسه برای حالت‌های ممکن برای سیستم ۱۵ نیروگاهی

میانگین و انحراف معیار پاسخ های به دست آمده در اجراهای متعدد برنامه، در حد قابل قبولی بوده و کارایی روش را برای استفاده های بعدی نشان می دهد. با توجه به زمان اندک لازم برای اجرای الگوریتم، می توان از آن برای توزیع بار اقتصادی که بر مبنای پیش بینی بار و معمولاً در بازه های چندین دقیقه ای یا ساعتی انجام می یابد، استفاده کرد. در شکل های زیر همگرایی الگوریتم را برای ۳ سیستم نمونه در ۱۰۰ تکرار با جمعیت ۴۰ نشان می دهد.

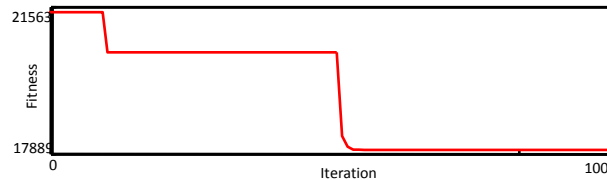
جدول ۸- نتایج شبیه سازی واحدهای تولیدی سیستم ۴۰ نیروگاهی با در نظر گرفتن تغییرات شیر ورودی

واحد	GA-PS-SQP	DEC-SQP	ICA
P ₁ (MW)	110.97	111.76	109.0186
P ₂ (MW)	111.02	111.59	113.1157

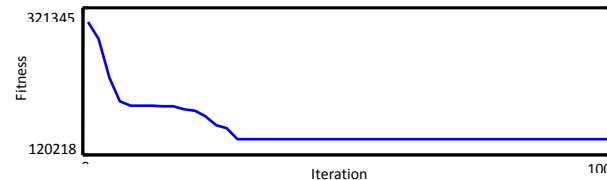
P ₃ (MW)	120.00	97.4	120.00
P ₄ (MW)	179.73	179.73	177.3053
P ₅ (MW)	88.27	91.66	91.00
P ₆ (MW)	140.00	140.00	140.00
P ₇ (MW)	259.60	300.00	263.84
P ₈ (MW)	284.60	300.00	284.29
P ₉ (MW)	284.60	284.56	288.78
P ₁₀ (MW)	130.00	130.00	130.00
P ₁₁ (MW)	168.80	168.8	165.23
P ₁₂ (MW)	168.80	94.00	165.63
P ₁₃ (MW)	214.76	214.75	211.92
P ₁₄ (MW)	394.28	394.28	390.26
P ₁₅ (MW)	304.52	30450	302.42
P ₁₆ (MW)	304.52	30450	303.77
P ₁₇ (MW)	489.28	489.28	491.27
P ₁₈ (MW)	489.28	489.28	490.33
P ₁₉ (MW)	511.28	511.28	513.00
P ₂₀ (MW)	511.28	511.28	509.55
P ₂₁ (MW)	523.28	523.28	526.00
P ₂₂ (MW)	523.28	523.28	525.79
P ₂₃ (MW)	523.28	523.28	525.83
P ₂₄ (MW)	523.28	523.28	526.00
P ₂₅ (MW)	523.28	523.28	522.49
P ₂₆ (MW)	523.28	523.28	522.36
P ₂₇ (MW)	10.00	10.00	10.00
P ₂₈ (MW)	10.00	10.00	10.00
P ₂₉ (MW)	10.00	10.00	10.00
P ₃₀ (MW)	88.66	90.33	88.08
P ₃₁ (MW)	190.00	190.00	190.00
P ₃₂ (MW)	190.00	190.00	190.00
P ₃₃ (MW)	190.00	190.00	190.00
P ₃₄ (MW)	164.80	200.00	161.35
P ₃₅ (MW)	200.00	200.00	200.00
P ₃₆ (MW)	200.00	200.00	200.00
P ₃₇ (MW)	110.00	110.00	110.000
P ₃₈ (MW)	110.00	110.00	110.000
P ₃₉ (MW)	110.00	110.00	110.000
P ₄₀ (MW)	511.28	511.28	511.2792
Cost(\$/h)	121458.14	121741.98	120220.12



شکل ۸- تغییرات تابع هدف برای سیستم ۶ نیروگاهی



شکل ۹- تغییرات تابع هدف برای سیستم ۱۵ نیروگاهی



شکل ۱۰- تغییرات تابع هدف برای سیستم ۴۰ نیروگاهی

۵- نتیجه گیری

در این مقاله از الگوریتم جدیدی برای تعیین توزیع اقتصادی بار بین واحدهای موجود سه سیستم استاندارد استفاده شده است. برای نشان دادن کارایی بهتر این الگوریتم نتایج به دست آمده از توزیع اقتصادی بار برای سیستم نمونه بوسیله الگوریتم ICA با نتایج حاصل از الگوریتم-های مختلف مقایسه شده است. نتایج حاصل از توزیع اقتصادی بار نشان دهنده این است که الگوریتم پیشنهادی دارای کارایی بیشتر در مواجه شدن با مسائل پیچیده تر بوده است. در تابع هدف ارائه شده، محدودیت های نقاط کار سیستم، کاهش میزان آلودگی و تلفات در نظر گرفته شده است. همچنین تأثیر در نظر گرفتن تابع هزینه ناصاف با مرتبه سوم، نرخ شیب نیروگاه ها و مناطق ممنوعه تولید نشان داده و مقایسه شده است. این موارد، باعث دقیق تر شدن مدل سازی حل مسئله می شود. همزمان با کمینه سازی هزینه تولید به حداقل کردن تلفات شبکه انتقال نیز توجه شده است و روش ارائه شده در یافتن نقطه بهینه نزدیک به نقطه بهینه کلی موفق تر بوده است.

۶- منابع مورد استفاده

- [1] R., "Security constrained economic dispatch with participation factors based on worst case bus load variations", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 96, No.2, pp. 347-356, 2006.
- [2] Liu, Yang, Wei Wang, and Noradin Ghadimi. "Electricity load forecasting by an improved forecast engine for building level consumers." Energy 139 (2017): 18-30.
- [3] Hosam K. Youssef and Khaled M. El-Naggar., "Genetic based algorithm for security constrained power system economic dispatch", Electric Power Systems Research, Vol. 53, No. 1, pp. 47-51, 2000.
- [4] Parsian, Ali, Mehdi Ramezani, and Noradin Ghadimi. "A hybrid neural network-gray wolf optimization algorithm for melanoma detection." Biomedical Research 28.8 (2017).
- [5] Kim JO, Shin DJ, Park JN, Singh C., "Atavistic genetic algorithm for economic dispatch with valve point effect", Elect Power Syst Res, Vol. 62, pp. 201-207, 2002.
- [6] Ghadimi, N. (2014), A new hybrid algorithm based on optimal fuzzy controller in multimachine power system. Complexity. doi: 10.1002/cplx.215447
- [7] Caro Lucas, Zahra Nasiri-Gheidari, Farid Tootoonchian, "Application of an imperialist competitive algorithm to the design of a linear induction motor", Energy Conversion and Management, Volume 51, Issue 7, July 2010, Page(s): 1407-1411
- [8] Razmjoooy, Navid, Mehdi Ramezani, and Noradin Ghadimi. "Imperialist Competitive Algorithm-Based Optimization of Neuro-Fuzzy System Parameters for Automatic Red-eye Removal." International Journal of Fuzzy Systems 19.4 (2017): 1144-1156.

- [9] Alsumait a J.S., Sykulski a J.K., Al-Othman A.K., "*A hybrid GA-PS-SQP method to solve power system valve-point economic dispatch problems*", Applied Energy , Vol. 87, No. 2, pp. 1773-1781, 2010.
- [10] Plamondon, R., Lorette, G., "Automatic Signature Verification and Writer Identification - The State of the Art", Pattern Recognition, Vol. 22, pp. 107-131, 1989