

برنامه‌ریزی بهینه برق با محدودیت‌های زیست محیطی با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی

رضا عفت نژاد استادیار دانشکده فنی و مهندسی گروه برق البرز، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، (نویسنده مسئول)

Reza.eftnejad@kiaou.ac.ir

اکرم زارع برگ آبادی کارشناس ارشد مهندسی قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات - البرز

Adine_zare@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۱۰

چکیده:

امروزه با توجه به روند رو به رشد بار و بالا بودن هزینه‌های تولید انرژی الکتریکی و محدودیت در نصب واحدهای جدید نیروگاهی، نیاز به برنامه‌ریزی و کمینه‌سازی کل هزینه تولیدی برای واحدهای فعال موجود در شبکه قدرت می‌باشد. هدف از توزیع بهینه توان آن است که با تخصیص بهینه سهم هر نیروگاه، علاوه بر تأمین توان مورد نیاز شبکه، هزینه تولید توان حداقل گردد. در این مقاله الگوریتم جستجوی هارمونی، برای برنامه‌ریزی سیستم برق و پخش بار بهینه جهت حداقل‌سازی هزینه‌ها و کاهش میزان آلودگی ناشی از نیروگاه‌ها به عنوان اهداف مسئله در نظر گرفته شده است. یک تابع هدف درجه دوم بر حسب تولیدی واحدها بیان شده و قیود نیز بصورت معادلات مساوی و نامساوی خطی مدل می‌شوند. روش پیشنهادی بر روی یک سیستم ۳۰ شینه استاندارد IEEE اعمال می‌گردد. نتایج حاصله نشان‌دهنده توانایی زیاد این الگوریتم در بهینه‌سازی توابع می‌باشد همچنین نتایج به دست آمده از این الگوریتم با نتایج حاصل از دیگر روش‌های الگوریتم تکاملی مقایسه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی برق، پخش بار اقتصادی، محدودیت‌های زیست محیطی، الگوریتم جستجوی هارمونی.

طبقه بندی JEL: L94 و Q53

۱- مقدمه

امروزه ساختار قوانین حاکم بر صنعت برق کشورهای مختلف به گونه‌ای تغییر کرده است که امکان ایجاد رقابت در تولید و مصرف انرژی الکتریکی، بیش از پیش فراهم آمده است. سیستم قدرت نیازمند ابزارهای خاص جهت تحلیل، پایش و کنترل بهینه جنبه‌های مختلف بهره‌برداری و برنامه‌ریزی است. بیشتر این ابزارها به گونه مناسبی به شکل مسائل بهینه‌سازی فرموله شده‌اند.

برای برنامه‌ریزی سیستم برق و تغذیه بار سیستم قدرت می‌توان ترکیب‌های مختلفی از تولید توان‌های اکتیو و راکتیو را برای واحدهای نیروگاهی تعیین نمود. آنچه که از دیدگاه توزیع بهینه بار مدنظر است آن است که کدام ترکیب، اقتصادی‌تر است. از آنجا که قسمت اصلی هزینه تولید در سیستم قدرت مربوط به تولید توان در نیروگاه‌ها است لذا مسأله اصلی در این بحث، تعیین سهم نیروگاه‌های مختلف سیستم در تولید توان می‌باشد، به صورتی که هزینه تولید حداقل شود.

هدف اصلی یافتن تنظیمات بهینه برای یک سیستم قدرت است به گونه‌ای که تابع هدف معین را برآورده سازد و سایر قیود مانند معادلات پخش بار و محدودیت‌های بهره‌برداری دستگاه‌ها هم برآورده شده باشند. ساختار معرفی شده براساس معادلات پخش بار بهینه در سیستم قدرت مدل‌سازی می‌شود. یکی از مهم‌ترین اهداف شرکت‌های برق تولید انرژی الکتریکی و انتقال و توزیع آن بین مصرف‌کنندگان با قابلیت اطمینان بالا و کمترین هزینه بهره‌برداری می‌باشد. قبل از معرفی مفهوم امنیت سیستم قدرت، مسئله پخش بار بطور معمول بر مسائل اقتصادی بهره‌برداری متمرکز بود تا بر امنیت سیستم (Hur, 2001). امروزه با گسترده‌گی شبکه‌های قدرت و افزایش بار سیستم‌ها ترکیب قیود امنیت با مفهوم پخش بار بهینه یک مسئله مهم شده است. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در تولید اقتصادی نیروگاه‌ها در نظر گرفتن مسائل زیست محیطی شامل گازهای خروجی از نیروگاه‌هاست که مهم‌ترین این گازها اکسیدهای نیتروژن (NOx) و اکسیدهای گوگرد (SOx) می‌باشند که در اینجا در تابع هدف وارد شده‌اند (M. Abido, 2003).

برای حل مسائل پخش بار روش‌های بسیاری ارائه شده است که اکثر آنها براساس برنامه‌ریزی خطی^۱ و روش‌های نیوتون-رافسون می‌باشد. یک مزیت مهم این روش‌ها سازگاری آن‌ها با برنامه‌های توزیع اقتصادی موجود است. تکنیک‌های بهینه‌سازی سنتی بسیاری برای حل مسئله

پخش بار بهینه به کار گرفته شد که معروف‌ترین آنها برنامه‌ریزی خطی، روش برنامه‌ریزی مرتبه دوم متوالی، روش کاهش گرادیان تعمیم یافته و روش نیوتون-رافسون می‌باشند. رشد و توسعه سریع ابزارهای هوشمند محاسباتی اخیر موجب گردید تا محققین آن‌ها را برای مسائل دائماً متغیر پخش بار بهینه به کار گیرند.

دسته جدیدی از ابزارهای هوشمند محاسباتی معرفی شده‌اند تا با محدودیت‌های الگوریتم‌های بهینه‌سازی سنتی مقابله کنند. تکنیک‌های مدرن عمده شامل، الگوریتم ژنتیک^۱ (J. D. Weber, 2002)، تکامل تفاضلی^۲ (J. A. Momoh, 1993—I)، برنامه‌ریزی تکاملی^۳ (J. A. Momoh, 1993—II)، شبکه‌های عصبی مصنوعی^۴ (M. Avriel, 1996)، شبیه‌ساز حرارتی^۵ (A. G. Bakirtzis, 2002)، جستجوی باکتریایی^۶ (K. Vaisakh, 2008)، بهینه‌سازی دسته ذرات^۷ (P. Somasundaram, 2004) و الگوریتم جستجوی هارمونی^۸ (T. T. Nguyen, 1997) می‌باشد. برخی از این روش‌ها که ابزارهای تازه توسعه یافته‌ای هستند، یک پدیده طبیعی معین را در جستجوی خود برای پاسخ بهینه، تقلید می‌کنند مانند تکامل گونه‌ها (EP, GA, ES)، سیستم عصبی انسان (ANN)، رفتار اجتماعی (ICA). این روش‌ها به شکل موفقیت آمیزی قابل اعمال در حوزه گسترده‌ای از مسائل بهینه‌سازی هستند که در آنها پاسخ جامع بیشتر از پاسخ‌های محلی مورد نظر است یا زمانی که مسئله شامل نواحی غیر مشتق‌پذیر است. همچنین این روش‌ها به توانایی در جستجوی سریع در فضای حل بزرگ و قابلیت مواجهه با عدم قطعیت در بخش‌هایی از شبکه قدرت مشهورند.

۲- توابع هدف

۲-۱- تابع هزینه تولید نیروگاه‌ها

اولین رابطه در مسأله برنامه‌ریزی برق و توزیع بهینه بار رابطه اصل بقای انرژی می‌باشد.

- 1 . Genetic Algorithm (GA)
- 2 . Differential Evolution (DE)
- 3 . Evolutionary Programming (EP)
- 4 . Artificial Neural Network (ANN)
- 5 . Simulated Annealing (SA)
- 6 . Bacteria Foraging (BF)
- 7 . Particle Swarm Optimization (PSO)
- 8 . Harmony Search Algorithm

$$P_D = \sum_{i=1}^{ng} P_{gen(i)} = P_{load(i)} + P_L \quad (1)$$

P_D : توان مورد تقاضا

$P_{gen(i)}$: توان تولیدی ژنراتور i ام (شین‌های ژنراتوری)

$P_{load(i)}$: توان مصرفی بار i ام

P_L : توان تلف شده در خطوط انتقال

N_g : تعداد ژنراتورهای سیستم

N_i : تعداد بارهای سیستم (شین‌های بار)

رابطه (۱) بیان می‌کند که مجموع توان تولیدی با مجموع توان مصرفی، شامل توان مصرف شده در بارها و توان تلف شده در مسیر انتقال برابر است. این رابطه بیانی از قانون بقای انرژی است. باید در نظر گرفت که ظرفیت تولید هر ژنراتور محدود است و هر ژنراتور دارای یک محدودیت حداکثر تولید می‌باشد. همچنین بدلیل برخی از محدودیت‌ها توان تولیدی هر ژنراتور نمی‌تواند به هر میزان کاهش یابد. بنابراین برای تولید هر ژنراتور دو محدودیت حداکثر و حداقل وجود دارد که به صورت رابطه (۲) نشان داده می‌شود.

$$P_{gen(i)min} \leq P_{gen(i)} \leq P_{gen(i)max} \quad (2)$$

$P_{gen(i)min}$: حداقل توان تولیدی ژنراتور

$P_{gen(i)max}$: حداکثر توان تولیدی ژنراتور

در رابطه (۱) بیانگر توان تلف شده در خطوط انتقال است. مقدار تلفات در خطوط انتقال را می‌توان با کمک رابطه کرون بدست آورد. برای بدست آوردن مقدار تلفات از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$P_L = \sum_{i=1}^{ng} \sum_{j=1}^{ng} p_i B_{ij} p_j + \sum_{i=1}^{ng} B_{oi} P_i + B_{oo} \quad (3)$$

که در آن P بردار حاصل از مگاوات خالص تمام شین‌های تولید، B_{ij} ضرایب ماتریس مربعی تلفات، B_{oi} بردار با طولی مساوی طول P و B_{oo} مقدار ثابت می‌باشد که از معادلات پخش بار بدست می‌آید.

مقدار هزینه کل تولید توان را می‌توان با استفاده از مجموع هزینه‌های تولید توان در هر ژنراتور

بدست آورد. بنابراین هزینه کل تولید توان به راحتی با استفاده از رابطه (۴) قابل محاسبه است.

$$C_i = C_1 + C_2 + \dots + C_{ng} \quad (4)$$

که در آن C تابع هزینه نیروگاه بر حسب قدرت خروجی کل نیروگاه می‌باشد. هزینه تولید هر نیروگاه را می‌توان از روی منحنی هزینه سوخت آن نیروگاه بدست آورد. منحنی‌های هزینه سوخت را برای سادگی با چند جمله‌ای درجه دوم تخمین می‌زنند و به صورت رابطه (۵) نمایش می‌دهند. برای بدست آوردن دقت بیشتر می‌توان این منحنی را با چند جمله‌ای‌های درجات بالاتر تخمین زد و یا آنکه با استفاده از توابع چند ضابطه‌ای اثرات ناپیوستگی را نیز در نظر گرفت.

$$F(P_i) = \sum_{i=1}^{ng} (a_i + b_i p_i + c_i p_i^2) S / hr \quad (5)$$

در جایی که a_i, b_i, c_i ضرایب ثابت هزینه می‌باشند. P_i توان تولیدی ژنراتور می‌باشد.

۲-۲- تابع هزینه زیست محیطی

یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی بشر در دهه‌های آینده به طور قطع، آلودگی هوا خواهد بود. تولید انرژی الکتریکی ناشی از سوخت‌های فسیلی، چندین ماده مختلف مثل دی‌اکسید گوگرد، اکسید و دی‌اکسید کربن را در هوا پخش می‌کند. دو نمونه از مهمترین این ترکیبات که در اکثر نیروگاه‌های قدرت تولید می‌شوند، اکسید نیتروژن (NO_x) و دی‌اکسید گوگرد (SO_2) می‌باشند. گوگرد به عنوان یک بخش از سوخت وارد دیگ بخار (بویلر) شده و این گوگرد با اکسیژن به میزان معین ترکیب می‌شود و SO_2 را تشکیل می‌دهد. باقیمانده‌ی گوگرد به عنوان خاکستر در مواد ناشی از احتراق ماده سوختنی در بویلر قرار می‌گیرد. ابتدایی‌ترین راه برای از بین بردن آن، استفاده از دودکش‌های مخصوص است که تحت اثر فیلترهای مخصوص قرار می‌گیرند که بدین وسیله می‌توان از انتشار SO_2 در هوا تا حدی جلوگیری کرد. اما با روش‌های جدیدی نظیر استفاده از ترکیب سوخت، سوئیچ سوخت و پاک‌کننده مالشی می‌توان به میزان زیادی از انتشار SO_2 در هوا جلوگیری کرد.

مراحل انتشار NO_x نسبت به SO_2 پیچیده‌تر است. برای ترکیب نیتروژن با اکسیژن و تشکیل NO_x دو راه وجود دارد. راه اول نیتروژن موجود در هواست که به NO_x حرارتی معروف است و راه دوم، نیتروژن موجود در سوخت است که NO_x سوخت نامیده می‌شود. کل NO_x تولیدکننده در طول احتراق، مجموع NO_x حرارتی و NO_x سوخت است که در اینجا هزینه ناشی از

جلوگیری انتشار این ترکیبات در هوا نیز در تابع هدف دیده شده است. بنابراین تابع هدف نشر آلاینده‌گی به صورت زیر بیان می‌گردد (M. Abido, 2009).

$$E = \sum_{i=1}^{NG} [a_i + b_i P_i + c_i P_i^2] + d_i \exp(e_i P_i) \quad (6)$$

که در آن a_i , b_i , c_i , d_i و e_i ضرایب آلاینده‌ها برای i امین ژنراتور می‌باشند. فاکتور هزینه کنترل نشر بر حسب دلار بر تن است. هزینه سوخت و نشر آلودگی اهداف متناقضی هستند و به طور همزمان نمی‌توان آن‌ها را به حداقل رساند. با این حال، راه‌حلی را می‌توان بدست آورد که در آن‌ها هزینه سوخت و نشر آلاینده در تابع واحدی با فاکتور تنظیم مختلفی ترکیب می‌شوند، که با رابطه زیر شرح داده می‌شود:

$$\min F = \alpha.F_{ec} + (1-\alpha).F_{pc} \quad (7)$$

که α فاکتور تنظیم‌کننده است که $0 \leq \alpha \leq 1$ را برآورده می‌کند. در این مدل، زمانی که فاکتور تنظیم‌کننده $\alpha = 1$ است، تابع هدف به پخش بار اقتصادی کلاسیک تبدیل می‌شود، زمانی که فاکتور تنظیم‌کننده $\alpha = 0$ است، مسئله به حداقل رساندن مطلق سطح کنترل آلودگی است و اگر $\alpha = 0.5$ حداقل هزینه تولید و نشر آلودگی را نشان می‌دهد.

۳- الگوریتم جستجوی هارمونی

در سال ۲۰۰۱ Zong Woo Geem الگوریتم متاهوریستیک به نام الگوریتم جستجوی هارمونی را ارائه نمود که طرح کلی آن برگرفته از رفتار طبیعی و واقعی موسیقیدان‌ها در جهت ساخت بهترین هارمونی است (Mahdavi, 2006).

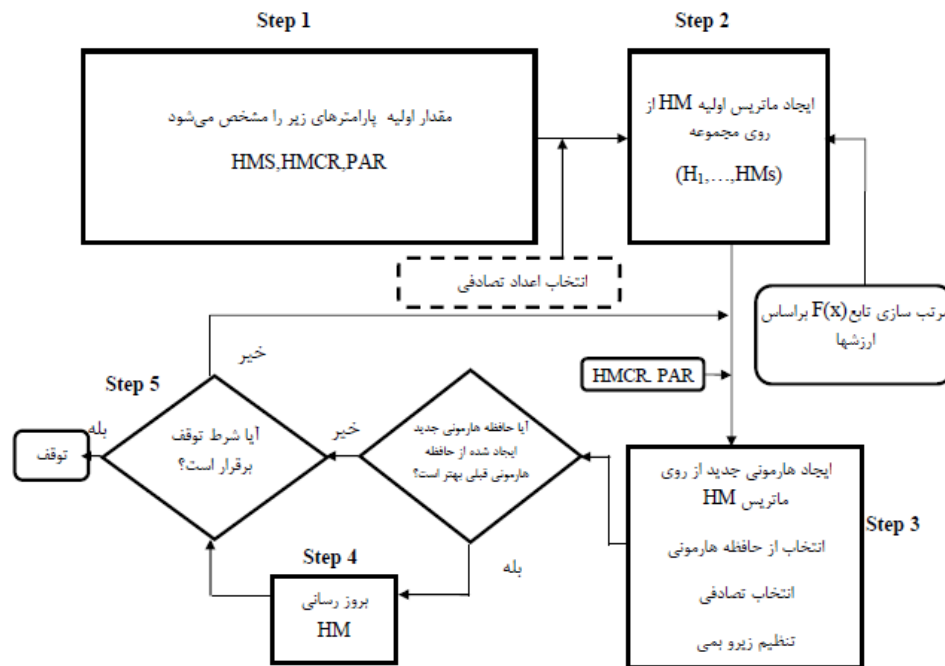
موسیقیدان‌ها با توجه به ابزاری که برای ساخت موسیقی در اختیار دارند ابتدا به صورت تصادفی اقدام به نواختن موسیقی با ابزارهای موجود می‌نمایند. این هارمونی درون حافظه موسیقیدان نگه‌داری می‌گردد و در مرحله بعدی موسیقیدان با توجه به هارمونی‌های موجود در حافظه خود اقدام به نواختن موسیقی جدید که نسبت به قبلی تغییراتی دارد می‌نماید.

زمانی که یک موسیقیدان صدایی را آنی می‌سازد معمولاً از یکی از سه قانون زیر پیروی می‌کند: نواختن یکی از صداهایی که در حافظه‌اش دارد، نواختن صدای مجاور و نزدیک صدایی که در حافظه‌اش دارد و نواختن صدایی تصادفی از درجه صداهای محتمل. مسئله با توجه به ساختار الگوریتم جستجوی هارمونی فرموله‌سازی گشته و ساختار پاسخ مسئله به شکل هارمونی در نظر

گرفته می‌شود. سپس الگوریتم اقدام به ساخت هارمونی به صورت تصادفی با رعایت شرایط امکان‌پذیری نموده و درون حافظه هارمونی قرار می‌دهد.

در مرحله بعدی با توجه به سه روش که در ساخت هارمونی جدید ارائه شد، اقدام به ساخت هارمونی جدید می‌نماید. مرحله آخر سازگارسنجی هارمونی ایجاد شده در مرحله کلی می‌باشد. اگر میزان سازگاری هارمونی جدید از بدترین هارمونی موجود در حافظه بهتر باشد هارمونی جدید جایگزین هارمونی موجود در حافظه می‌گردد و اگر نه، مراحل قبلی تکرار می‌شود تا زمانی که شرط پایانی را در برگیرد.

شکل (۱) روند کاری یک الگوریتم جستجوی هارمونی را نمایش می‌دهد. این الگوریتم از پنج مرحله تشکیل شده است، که در ادامه به توضیح هریک از مراحل به صورت کامل پرداخته شده است.



شکل (۱): فلوچارت الگوریتم جستجوی هارمونی

۳-۱- مقدار دهی مسأله بهینه‌سازی و مشخصات الگوریتم

ابتدا باید مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف شود

$$\text{Minimize } f(x), x_i \in X_i, i=1,2,\dots,N$$

در این مرحله پارامترهای زیر مقداردهی می‌شوند:

HMS: اندازه حافظه هارمونی (تعداد بردارهای حل در حافظه هارمونی)،

HMCR: نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی

PAR: نرخ تنظیم زیر و بمی

MaxImp: حداکثر تعداد جستجو

bw: پهنای باند^۱

۳-۲- مقداردهی حافظه هارمونی

مرحله دوم الگوریتم، ایجاد و شکل‌دهی حافظه هارمونی است، که طبق ماتریس رابطه (۸)

مقداردهی می‌شود.

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_n^2 \\ \vdots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_n^{HMS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(x^1) \\ f(x^2) \\ \vdots \\ f(x^{HMS}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

در این مرحله ماتریس حافظه هارمونی که نشان داده شده است به صورت تصادفی با بردارهای مولد

حل و تابع عملکرد واقعی $f(x)$ ساخته می‌شود، که از این پس نقش حافظه را بر عهده خواهد داشت.

۳-۳- ایجاد یک هارمونی جدید بهبود یافته

در این مرحله با ایجاد تغییرات در هارمونی‌های موجود در حافظه، مهم‌ترین بخش الگوریتم

جستجوی هارمونی می‌باشد. با توجه به رابطه (۹) نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی HMCR،

مشخص می‌کند که ساخت هارمونی جدید تا چه میزان مستقیماً از داخل حافظه هارمونی انتخاب

می‌شود و $1-HMCR$ ، نشان‌دهنده احتمال ایجاد تصادفی هارمونی جدید است.

$$x_i \leftarrow \begin{cases} x_i \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\} & HMCR \\ x_i \in Xi & (1-HMCR) \end{cases} \quad (9)$$

برای مثال، اگر در یک مسئله HMCR برابر ۸۰٪ در نظر گرفته شده باشد، نشان دهنده این است که الگوریتم جستجوی هارمونی برای ساخت ارزش‌های هارمونی جدید، ۸۰٪ از ارزش‌های ذخیره شده در حافظه هارمونی برگزیده شده و احتمال ۲۰٪ به صورت تصادفی تولید خواهد شد. نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی (HMCR) را نمی‌توان ۱ در نظر گرفت، زیرا بهبود سراسری راه حل با ارزش ذخیره شده در حافظه هارمونی کار می‌کند تا بهترین را پیشنهاد کند. این مسئله شبیه الگوریتم ژنتیک است که سرعت جهش در پروسه انتخاب می‌شود. در صورت انتخاب ارزش‌ها از داخل حافظه هارمونی پروسه نرخ تنظیم زیر و بمی اجرا می‌شود (K. Lee, 2005). وقتی یک ارزش از داخل حافظه انتخاب می‌شود بسته به احتمال PAR ممکن است دچار تغییر گردد (رابطه ۱۰). که این تغییر با اضافه کردن مقداری صحیح به مقدار ارزش انجام می‌پذیرد.

$$x_i \leftarrow \begin{cases} Yes & W.P & PAR \\ No & W.P & (1- PAR) \end{cases} \quad (10)$$

$$x_i \leftarrow x_i \pm rand() * bw \quad (11)$$

که bw، پهنای باند می‌باشد.

برای بهبود عملکرد الگوریتم جستجوی هارمونی، PAR و bw طی ایجاد هر هارمونی جدید به ترتیب زیر تغییر می‌کنند:

$$PAR(g) = PAR_{\min} + \frac{PAR_{\max} - PAR_{\min}}{NI} \times g \quad (12)$$

که PAR(g) نرخ تنظیم‌کننده زیر و بمی هارمونی فعلی، PARmin حداقل نرخ تنظیم‌کننده زیر و بمی، PARmax حداکثر نرخ تنظیم‌کننده زیر و بمی، g تعداد هارمونی فعلی و NI تعداد تکرارها است.

$$bw(g) = bw_{\max} \exp \left(\frac{\ln \left(\frac{bw_{\min}}{bw_{\max}} \right)}{NI} \times g \right) \quad (13)$$

که bw(g) فرکانس هارمونی فعلی، bwmin و bwmax به ترتیب حداقل و حداکثر فرکانس هارمونی فعلی هستند.

۳-۴- بروز رسانی حافظه هارمونی

در این مرحله اگر هارمونی جدید از بدترین هارمونی موجود در حافظه بهتر باشد، جایگزین

آن می‌شود و بدترین هارمونی موجود در حافظه حذف می‌شود.

۳-۵- بررسی شرط پایان

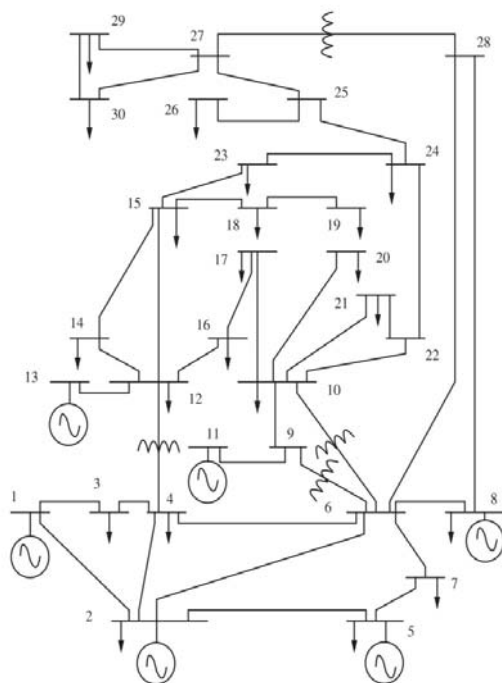
در این مرحله شرط پایان اجرای الگوریتم بررسی می‌شود که در الگوریتم جستجوی هارمونی بررسی تعداد تکرار است. در صورت عدم برقراری شرط پایان مراحل ۳ و ۴ مجدداً تکرار می‌گردد. البته می‌توان شرط پایان یافتن الگوریتم را برای مقدار بهینه مشخصی تنظیم نمود و تا پایان آن مقدار مراحل الگوریتم را تکرار کرد.

برای حل مسئله برنامه‌ریزی بهینه برق الگوریتم‌های هوشمند بسیاری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، که رایج‌ترین آن‌ها الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات می‌باشد. الگوریتم GA و PSO دارای خصوصیات شبیه به هم می‌باشند. از جمله هر دو دارای جمعیت تصادفی اولیه و دارای مقدار شایستگی برای ارزیابی جمعیت می‌باشند. الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، تعداد تکرار بسیار بیشتر نسبت به دو الگوریتم مذکور دارد. مثلاً در الگوریتم ژنتیک با توجه به اینکه این الگوریتم در هر مرتبه تکرار جمعیت جدیدی که برابر با تعداد جمعیت اولیه است، را تولید می‌نماید یعنی در هر بار تکرار اقدام به ایجاد تعداد بیشتری ژن نموده در حالی که الگوریتم جستجوی هارمونی در هر بار تکرار تنها اقدام به ساخت یک نمونه هارمونی می‌نماید. می‌توان گفت که یک مرتبه تکرار الگوریتم ژنتیک با توجه به پیاده‌سازی مورد نظر، میزان جمعیت اولیه اگر n در نظر گرفته شده باشد، برابر با n مرتبه تکرار الگوریتم جستجوی هارمونی است. مزیت دیگر این الگوریتم نسبت به الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات این است که با اینکه تعداد تکرار بیشتری دارد ولی سریع‌تر به جواب مسئله همگرا می‌شود و به همین سبب کارآمدتر خواهد بود.

۴- سیستم مورد مطالعه

برای ارزیابی روش پیشنهادی برنامه‌ریزی بهینه برق با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی از سیستم نمونه تولیدی ۳۰ شینه استاندارد IEEE مطابق شکل (۲) استفاده شده است. این شبکه یک شبکه واقعی در سیستم برق ایالت میدوست، امریکا است (۱۹۶۱). این شبکه دارای ۶ ژنراتور، ۶ ترانسفورماتور و ۴۳ خط انتقال می‌باشد (Alrashidi, 2003). مشخصات ژنراتورها در جدول (۱) مشخص شده است، در این جدول a, b, c مقادیر ثابت تابع هزینه درجه دوم هستند، P_{max} و

P_{\min} حداکثر و حداقل توان تولیدی هر ژنراتور برای نشان دادن قیود نامساوی استفاده شده‌اند. جدول (۲) ضرایب تابع مربوط به محاسبه آلودگی نیروگاه‌ها را نشان می‌دهد. حداکثر توان مورد نیاز شبکه ۲۸۳/۴ مگاوات می‌باشد. در این مقاله، دو هدف جهت برنامه‌ریزی برق، یعنی کاهش هزینه سوخت و کاهش آلاینده مورد بررسی قرار گرفته‌اند.



شکل (۲): دیاگرام خطی از شبکه ۳۰ شینه IEEE

جدول (۱): مشخصات ژنراتورها شبکه ۳۰ شینه IEEE

$c \cdot 10^{-4}$ (\$/MW ² .hr)	b (\$/MW.hr)	a (\$.hr)	P g max (M W)	P g min (M W)	Bus
۳۷/۵	۲/۰۰	۰	۲۰۰	۵۰	۱
۱۷۵/۰	۱/۷۵	۰	۸۰	۲۰	۲
۶۲۵/۰	۱/۰۰	۰	۵۰	۱۵	۵
۸۳/۰	۳/۲۵	۰	۳۵	۱۰	۸
۲۵۰/۰	۳/۰۰	۰	۳۰	۱۰	۱۱
۲۵۰/۰	۳/۰۰	۰	۴۰	۲	۱۳

مأخذ: M. R. Alrashidi, 2003

جدول (۲) : ضرایب آلودگی شبکه ۳۰ شینه IEEE

e.10 ⁻²	d.10 ⁻⁴	c.10 ⁻⁶	b.10 ⁻⁴	a.10 ⁻²	Bus
۲/۸۵۷	۲/۰	۶/۴۹	-۵/۵۵۴	۴/۰۹۱	۱
۳/۳۳۳	۵/۰	۵/۶۳۸	-۶/۰۴۷	۲/۵۴۳	۲
۸/۰	۰/۰۱	۴/۵۸۶	-۵/۰۹۴	۴/۲۵۸	۵
۲/۰	۲۰/۰	۳/۳۸	-۳/۵۵	۵/۳۲۶	۸
۸/۰	۰/۰۱	۴/۵۸۶	-۵/۰۹۴	۴/۲۵۸	۱۱
۶/۶۶۷	۱۰/۰۰	۵/۱۵۱	-۵/۵۵۵	۶/۱۳۱	۱۳

مأخذ: M. R. Alrashidi, 2003

۵- نتایج حاصل از شبیه‌سازی

برای انجام محاسبات، پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

1. $HMS = 20$
2. $HMCR = 0.85$
3. $PAR_{min} = 0.2$, $PAR_{max} = 2$
4. $BW_{min} = 0.45$, $BW_{max} = 0.9$
5. $NI = 100$

این الگوریتم را ۲۰ مرتبه اجرا کرده و بهترین نتایج با پارامترهایی مذکور، به دست آمده است. جدول شماره (۳)، هزینه تولید، هزینه آلودگی، هزینه کل و توان تلفاتی را برای حداقل تولید ($\alpha = 1$)، حداقل آلودگی ($\alpha = 0$) و حداقل کردن دو تابع هدف ($\alpha = 0.5$) که با الگوریتم جستجوی هارمونی محاسبه شده، را نشان داده شده است.

پیاده‌سازی الگوریتم جستجوی هارمونی با نرم افزار MATLAB R2009a صورت گرفته و زمان اجرای مراحل الگوریتم در سیستم کامپیوتری مورد استفاده دارای سیستم عامل win XP و پردازنده Intel Celeron 2.66 GHZ و حافظه 320 GB RAM به صورت زیر است. برای محاسبه حداقل هزینه ($\alpha = 1$) حدود 20/83 ثانیه، برای حداقل تابع نشر آلودگی ($\alpha = 0$) حدود 20/85 ثانیه و برای هر دو تابع هدف، ($\alpha = 0.5$) 20/64 ثانیه می‌باشد، که نسبت به الگوریتم ژنتیک و

الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات به مراتب کمتر است. در جدول شماره (۴) نتایج به دست آمده از الگوریتم جستجوی هارمونی، با الگوریتم زنبور عسل^۱ و الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات که از مقالات اشاره شده در جدول اخذ شده، مقایسه شده است (Dervis Karaboga, 2007).

جدول (۳): نتایج حداقل هزینه برای سیستم ۳۰ شینه IEEE به ازای $(\alpha = 0.5, \alpha = 1, \alpha = 0)$

ذرات	حداقل تولید	حداقل هزینه تولید + حداقل آلودگی	حداقل آلودگی
۱	۱۷۶/۷۶۷۸	۱۹/۴۶۶۴	۶۸/۲۱۶۳
۲	۴۸/۸۲۸۵	۲۲/۴۶۴۰	۷۱/۰۴۳۱
۵	۲۱/۴۶۶۳	۳۵/۰۰۰۰	۵۰/۰۰۰۰
۸	۲۱/۶۲۴۹	۲۵/۶۹۱۶	۳۵/۰۰۰۰
۱۱	۱۲/۰۹۱۵	۵۷/۱۶۴۴	۳۰/۰۰۰۰
۱۳	۱۲/۰۰۰۰	۱۳۰/۱۳۶۹	۳۲/۸۵۷۳
هزینه تولید (\$/h)	۸۰۱/۸۴۳۶	۸۱۹/۷۴۸۶	۹۳۴/۷۵۵۸
آلودگی (ton/\$)	۰/۳۶۷۳	۰/۲۷۰۵	۰/۲۱۷۵
هزینه کل (\$/h)	۱۰۰۳/۷	۹۶۸/۵	۱۰۵۴/۳
توان تلفاتی (MW)	۹/۳۷۹۱	۶/۵۲۳۱	۳/۷۱۶۷

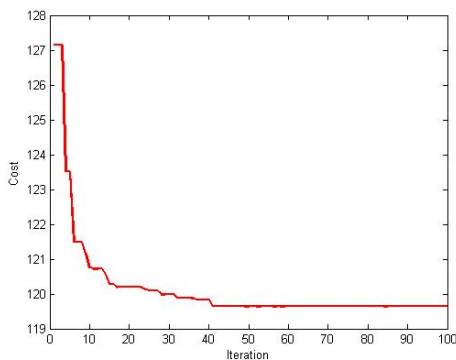
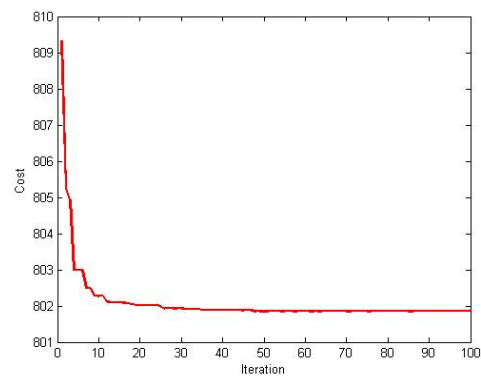
مأخذ: محاسبات مؤلفین

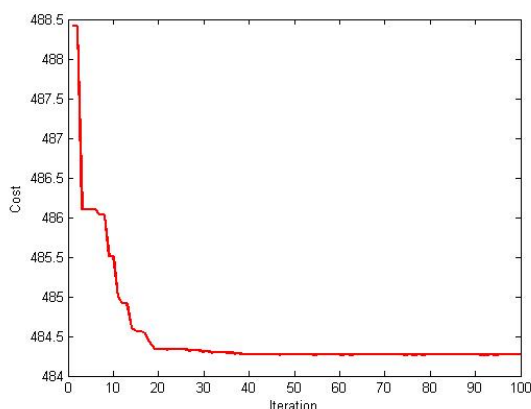
جدول (۴) : مقایسه نتایج

	حداقل هزینه تولید ($\alpha = 1$)			حداقل هزینه تولید + حداقل آلودگی ($\alpha = 0.5$)			حداقل آلودگی ($\alpha = 0$)		
	ABC	PSO	HS	ABC	PSO	HS	ABC	PSO	HS
هزینه تولید (\$/h)	۸۰۲/۱۶۴۹	۸۰۲/۳۷۷	۸۰۱/۸۴۳۶	۸۲۰/۱۶۱۶	۸۲۲/۰۹۲	۸۱۹/۷۴۸۶	۹۳۵/۲۷۵	۹۴۸/۳۹۹	۹۳۴/۷۵۵۱
آلودگی (ton/\$)	۰/۳۷۸۱	۰/۳۷۲	۰/۳۶۷۳	۰/۲۷۱۲	۰/۲۶۸	۰/۲۷۰۵	۰/۲۱۷۶	۰/۲۱۸	۰/۲۱۷۵
هزینه کل (\$/h)	۱۰۱۰/۴	۱۰۰۷/۵۷۷	۱۰۰۳/۷	۹۶۹/۵۱۱	۹۶۹/۸۴۵	۹۶۸/۵	۱۰۵۵/۱	۱۰۵۸/۸۵۴	۱۰۵۳/۳

مأخذ: محاسبات مؤلفین

شکل (۳) همگرایی تابع هزینه (تابع شماره ۵) را بر حسب قیدها نشان می‌دهد و قیود نیز بصورت معادلات مساوی و نامساوی خطی مدل می‌شوند. در شکل (۴) همگرایی تابع هدف نشر آلودگی (تابع شماره ۶) و در شکل (۵) همگرایی هر دو تابع هدف، مشخص شده است. وقتی الگوریتم به پایان می‌رسد که تکرار به پایان رسیده باشد.

شکل (۴) : تغییرات تابع نشر آلودگی ($\alpha = 0$)شکل (۳) : تغییرات تابع هزینه ($\alpha = 1$)

شکل (۵): تغییرات دو تابع هدف ($\alpha = 0/5$)

۶- نتیجه گیری

در این مقاله از الگوریتم جستجوی هارمونی (با توجه به سرعت بالا و کارایی آن در شبکه‌های پیچیده) برای برنامه‌ریزی برق و پخش بار بهینه و کاهش آلودگی در سیستم قدرت استفاده شد. این الگوریتم کمتر در مینیمم‌های محلی گیر می‌کند و به همین دلیل تابع هدف را کمتر فراخوانی می‌کند که باعث افزایش سرعت آن نسبت به الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات می‌گردد. این الگوریتم پیچیدگی کمتری دارد که همین مسئله باعث می‌شود زمان حل مسئله با الگوریتم جستجوی هارمونی نسبت به سایر روش‌ها در این مقاله کمتر باشد. توابع هدف مناسبی تعریف شد نتیجه کار کاهش هزینه تولید توان و آلودگی محیط زیست با توجه به قیده‌های مسئله بود. نتایج نشان می‌دهد، که الگوریتم معرفی شده در یافتن نقطه بهینه موفق عمل می‌کند.

مراجع

- Bakirtzis, G., P.N. Biskas, C.E. Zoumas and V. Petridis, (2002), "Optimal Power Flow by Enhanced Genetic Algorithm" IEEE Trans. Power Syst., Vol 17, No 2.
- Karaboga, Dervis and Bahriye Basturk, (2007), Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems, Springer- Verlag.
- Hur, D., and Jong-Keun Park, (2001), Security Constrained Optimal Power flow for evaluation of transmission capability on Korea electric power system", Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, Vol 2.

- Weber, J. D., and T. J. Overbye, (2002), "An individual welfare maximization algorithm for electricity markets," IEEE Trans. Power Syst., Vol 17 No 3.
- Momoh, J.A., R. Adapa, and M. E. El-Hawary, (1999), "A review of selected optimal power flow literature to 1993—I: Nonlinear and quadratic programming approaches," IEEE Trans. Power Syst., Vol 14 No 1.
- Momoh, J. A., M. E. El-Hawary and R. Adapa, (1999), "A review of selected optimal power flow literature to 1993—II: Newton, linear programming and interior point methods," IEEE Trans. Power Syst., Vol 14 No 1.
- Vaisakh, K., and L. R. Srinivas, (2008), "Differential Evolution based OPF with Conventional and Non-Conventional Cost Characteristics", Power System Technology and IEEE Power India Conference.
- Abido, M. (2003), "Environmental economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms", IEEE Trans. Power Syst., Vol 18 No 4.
- Avriel M. and B. Golany, (1996), *Mathematical Programming for Industrial Engineers*, New York: Marcel Dekker.
- Abido, M. (2009), "Multiobjective particle swarm optimization for environmental economic dispatch problem", *Electr. Power Syst. Res.* Vol 79 No 7.
- Alrashidi, M. R. and M. E. El-Hawary, (2003), "Impact of Loading Conditions on the Emission-Economic Dispatch". *IEEE Transaction on Power*, Vol 18, No 4.
- Somasundaram, P.,K. Kuppusamy and R.P. Kumudini, (2004), "Evolutionary programming based security constrained optimal power flow" *Electric Power Systems Research*, Vol 72.
- Nguyen, T.T. (1997), "Neural network optimal-power-flow", *Fourth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*.