فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۵، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، ص ۱۲-۱
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

عنوان مقاله: تولید پراکنده نیروگاه های بادی
دوره ۵ / شماره ۴ / زمستان ۱۴۰۰/ ص ۱۲ - ۱

تولید پراکنده نیروگاه های بادی

اصغر قادری۱، محمد ابراهیم بایگان*۲، عبدالغنی سهویی۲ و ادهم پرکاسی۲
۱- استادیار گروه برق (دکتری پلاسما) ، دانشگاه آزاد واحد ایرانشهر
۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی برق ، دانشگاه آزاد واحد ایرانشهر

چکیده

این مقاله یک راهکار نوین بر اساس الگوریتم رقابت استعماری (ICA) معرفی می‌کند تا پاسخ بهینه‌ی ممکن مساله‌ی زمانبندی تولید۱ (GS) در سیستم‌های قدرت مقیاس وسیع دارای مزارع بادی بزرگ تعیین شود. قیود مربوط به میزان ذخیره، تعادل بار و دسترسی توان بادی در این کار در نظر گرفته شده‌اند. به منظور حل یک مساله‌ی GS به شدت مقید، یک ICA نسخه‌ی اصلاح شده معرفی می‌شود تا آغاز کشورهای جدید و عملگرهای همسان‌ساز۲ ICA بهبود یابد. MICA ی ارائه شده به سیستم‌های تست مختلف با میزان نفوذ گوناگون انرژی بادی اعمال می‌شود. نتایج بدست آمده با دیگر روش‌ها مقایسه می‌شود و این مقایسه نشان دهنده‌ی اعتبار و کارائی روش ارائه شده است، که منجر به جدول‌های نزدیک به بهینه می‌شود، در عین حال انواع قیود معادلاتی و نامعادلاتی در نظر گرفته شده و رعایت می‌شود.

واژگان کلیدی: تولید، نیروگاههای بادی

---

[1] Generation Scheduling

[2] Assimilation operator

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، به دلیل رشد بازارهای انرژی الکتریکی، و افزایش سریع قیمت‌های سوخت فسیلی، یک نیاز فوری برای کاوش منابع جدید انرژی برای تولید برق بوجود آمده است. انرژی بادی و خورشیدی به عنوان محبوب‌ترین منابع توانی شناخته شده‌اند که قادر به تبدیل شدن به الکتریسیته هستند. این مقاله زمانبندی تولید (GS) برق را با مزارع بادی مقیاس بزرگ در نظر می‌گیرد تا هزینه‌ی کلی را در طی دوره‌های زمانی خاص حداقل کند.

مساله‌ی زمانبندی تولید شامل دو زیرمساله‌ی اصلی است؛ مشارکت واحد[۳] و توزیع اقتصادی[۴]. این مساله شامل چیدمان طرح حداقل هزینه‌ی عملکردی برای دوره‌های زمانبندی است. به عبارت دیگر، هدف اصلی مساله‌ی زمانبندی تولید تصمیم‌گیری روی مشارکت و تولید منابع توانی موجود در طی یک افق زمان‌بندی (زمانبندی) است تا هزینه‌ی کلی تولید حداقل شود. مساله‌ی زمانبندی تولید دارای قیود مربوط به تقاضاهای سیستم و الزامات ذخیره‌سازی است [۱]. از آنجا که هزینه‌ی سوخت مهم‌ترین بخش در مخارج ژنراتورهای معمولی است، کاهش میزان سوخت موردنیاز باعث صرفه‌جوئی چشم‌گیر مالی در هر سال برای شرکت‌ها خواهد شد.

فوری‌ترین ماموریت در عملکرد سیستم قدرت، که شامل زمانبندی تولید بهینه می‌باشد، قیود فنی و اقتصادی را طی یک زمان برنامه‌ریزی از یک ساعت تا چندین سال را در نظر می‌گیرد. یافتن پاسخ قطعی، برای یک زمانبندی تولید طولانی مدت تقریبا غیرممکن است که دلیل آن زمان محاسباتی بسیار طولانی و قیود زیادی است که در این مساله حضور دارند. از سوی دیگر، بهدلیل صرفنظر از چندین قید، استفاده از زمانبندی تولید کوتاه مدت برای زمانبندی دوره‌ی طولانی مدت مناسب نیست.

مساله‌ی زمانبندی تولید می‌تواند با بررسی همه‌ی پاسخ‌های ممکن در سیستم قدرت واقعی دقیقا حل شود [۱]. مساله‌ی زمانبندی تولید به دلیل چندین طرح ممکن، یک مساله‌ی مقیاس بسیار وسیع، غیر خطی و عدد صحیح مختلط[۵] است. همچنین به دلیل خطاهای پیش‌بینی، به خصوص در سیستم‌هایی با نفوذ بالای انرژی بادی، یک نوع برنامه‌ریزی و طرح غیردقیق است. تاکنون انواع برنامه‌نویسی‌های ریاضیاتی و روش‌های تحقیقاتی ارائه شده است مثل برنامه‌نویسی پویا [۲]، برنامه‌نویسی تکاملی [۳]، شبیه‌سازی تبرید[۶] [۴]، الگوریتم ژنتیک [۵، ۶]، آزادسازی لاگرانژ[۷] [۷-۱۰]، جستجوی تابو[۸] [۱۱] و بهینه‌سازی ازدحام جزئی [۱۲-۱۶]. محققان از یک روش مبتنی بر منطق فازی به عنوان گزینه‌ای متاسب برای حل مساله‌ی مشارکت واحد استفاده کردند [۱۷-۱۹].

الگوریتم رقابت استعماری (ICA) در سال ۲۰۰۷ توسط آتاشپاز و لوکاس ارائه شد [۲۰]. ICA همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، مثل PSO یا GA، با یک جمعیت اولیه آغاز می‌شود. در این روش، جمعیت، که آن را کشور می‌نامند، دارای دو نوع است: مستعمرات[۹] و استعمارگران[۱۰]. ICA مبتنی است بر یک رقابت استعماری بین این استعمارگران و جستجوی یک شرط که در یان تنها یک استعمارگر موجود بوده و دیگر کشورها در موضع مخالف هستند. آخرین کشور بهترین نتیجه خروجی مساله‌ی بهینه‌سازی است. اعتبار ICA به کمک تست توابع مبنای مختلف [۲۰] و مسائل بهینه‌سازی در سیستم‌های قدرت است، مثل جاگذاری DG [۲۱، ۲۲]، توزیع توان اقتصادی پویای غیرمحدب [۲۳]، جاگذاری خازن [۲۴] و برنامه‌ریزی توسعه‌ی انتقال [۲۵].

این مقاله به کمک الگوریتم رقابت استعماری اصلاح یافته (MICA)، راهکاری برای مساله ی زمانبندی تولید با برخی قیود اضافی را که ناشی از حضور مزارع بادی بزرگ است، ارائه می‌کند. در MICAی ارائه شده دو گام اصلاح می‌شود تا به قیود مختلف عملکردی و فنی رسیدگی شود. اصلاح اول به گام تولید کشورهای جدید اعمال می‌شود تا کشورهای جدیدی با متغیرهای ممکن

[3] Unit Commitment
[4] Economic dispatch
[5] Mixed-integer
[6] Simulated annealing
[7] Lagrangian relaxation
[8] Tabu
[9] colony
[10] imperialist

شروع شود. اصلاح دوم به بخش همسان‌سازی اعمال می‌شود. هدف از این اصلاحات تعیین متغیرها بر اساس حدود پایین و بالای آنها و در عین حال ارضای قیود تعادل تقاضا است. به دلیل مساله‌ی مقیاس وسیع غیرخطی، یک سازوکار همسان‌سازی جدید معرفی می‌شود تا از به دام افتادن در اکسترمم‌های محلی (حداقل‌ها و حداکثرهای محلی) جلوگیری شود. روش ارائه شده به موارد تست مختلفی که دارای سطوح مختلفی از نفوذ انرژی بادی هستند اعمال می‌شود.نتایج بدست آمده با دیگر روش‌ها مقایسه می‌شود. این نتایج توانمندی MICA ی ارائه شده در حل مساله‌ی زمانبندی تولید را ارزیابی می‌کنند.

سایر بخش‌های مقاله به این ترتیب است: مرور مختصری بر مشخصات توربین بادی در بخش۲ ارائه می‌شود. بخش۳ در مورد فرمول‌بندی مساله‌ی زمانبندی تولید و قیود مربوط به آن است. معرفی و کاربرد MICA در حل مساله‌ی زمانبندی تولید در بخش۴ ارائه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی این مطالعات در بخش۵ گزارش شده و در بخش۶ نتیجه‌گیری صورت می‌گیرد.

۱. توربین بادی

هر مزرعه‌ی بادی دارای توربین‌های بادی زیادی است. توان تولیدی توسط توربین‌های بادی به عنوان تابعی از سرعت باد، متغیر است. هر توربین بادی دارای منحنی توان مخصوص به خود است، که در واقع توان تولیدی خروجی در برابر سرعت باد است، مطابق شکل۱. یک توربین در سرعت آغاز[11] (V_{ci}) شروع به تولید توان کرده و در سرعت قطع باد (V_{co}) باز می‌ایستد. وقتی سرعت باد بین سرعت نامی باد (V_r) و سرعت قطع باشد، توربین توان نامی(P_r) خود را تولید می‌کند. وقتی سرعت باد بین سرعت آغاز و سرعت نامی باشد، رابطه‌ی بین توان خروجی و سرعت باد به صورت یک منحنی غیرخطی است. توان خروجی توربین در یک سرعت باد داده شده را می‌توان به صورت ذیل مدل کرد:

$$P_{out} = P_{rated} \times \begin{cases} 0 & 0 \leqslant WS < V_{ci} \\ A + B \times WS + C \times WS^2 & V_{ci} \leqslant WS < V_{rated} \\ 1 & V_{rated} \leqslant WS < V_{co} \\ 0 & V_{co} \leqslant WS \end{cases} \quad (1)$$

که A، B و C مقادیری ثابت هستند که آن‌ها را می‌توان به صورت ذیل محاسبه کرد [۲۶]:

$$A = \frac{1}{(V_{ci} - V_{rated})^2} \left\{ V_{ci}(V_{ci} + V_{rated}) - 4V_{ci}V_{rated} \left[\frac{V_{ci} + V_{rated}}{2V_{rated}} \right]^3 \right\} \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{(V_{ci} - V_{rated})^2} \left\{ 4(V_{ci} + V_{rated}) \left[\frac{V_{ci} + V_{rated}}{2V_{rated}} \right]^3 - (3V_{ci} + V_{rated}) \right\} \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{(V_{ci} - V_{rated})^2} \left\{ 2 - 4 \left[\frac{V_{ci} + V_{rated}}{2V_{rated}} \right]^3 \right\} \quad (4)$$

[11] Cut-in speed

ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

۲. فرمول‌بندی مساله‌ی زمانبندی تولید (GS)

هدف مساله‌ی GS حداقل کردن هزینه‌ی کلی عملکرد واحدهای تولیدی در یک سیستم قدرت در طی دوره‌های زمانبندی است در عین حال که قیود عملکردی ارضا شود. به دلیل فواصل زمانی ماهیانه (فواصل طولانی‌تر)، از نرخ شیب و قیود حداقل بالا/ پایین روی خروجی واحدهای تولیدی چشم‌پوشی می‌شود. هزینه‌ی تولید برابر است با مجموع هزینه‌های سوخت، اجرا و نگهداری و تعمیر همه‌ی واحدهای حرارتی و مزارع بادی.

هزینه‌ی سوخت اصلی‌ترین هزینه‌ی واحدهای حرارتی است که تابعی از توان خروجی می‌باشد. هزینه‌ی سوخت هر واحد حرارتی به صورت ذیل است:

$$F_t^i = a_{gi} + b_{gi} \times P_t^i + c_{gi} \times \left(P_t^i\right)^2 \quad i = 1, 2, 3, \ldots, N_{gth} \tag{5}$$

هزینه‌ی اجرا و نگهداری و تعمیر هر واحد حرارتی شامل بخش‌های متغیر و ثابت است. بخش متغیر بستگی به تولید و ذخیره‌ی توان زمانبندی شده‌ی واحد بوده و بخش ثابت بستگی دارد به بیشترین ظرفیت تولید واحد [۱۶]. عبارت هزینه‌ی متغیر برای واحد i در زمان t را می‌توان به صورت ذیل بیان کرد:

$$(C_V)_t^i = \left[P_t^i + \left(R_{Thermal}^i\right)_t\right] \times OMVC_i \times 720 \tag{6}$$

عبارت ثابن نیز به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$(C_F)_t^i = \frac{P_{\max}^i \times OMFC_i \times 720}{8760} \tag{7}$$

همچون واحدهای معمولی، هر مزرعه‌ی بادی نیز دارای هزینه‌های اجرا و نگهداری است. هزینه‌ی ثابت، در این واحدهای تولیدی قابل صرفنظر کردن است [۷]. در این کار، از هزینه‌ی ثابت مزارع بادی چشم‌پوشی می‌شود و تنها بخش متغیر هزینه‌ها است که به صورت ذیل در نظر گرفته می‌شود:

$$(C_V)_t^j = P_t^j \times OMVC_j \times 720 \quad j = 1, 2, 3, \ldots, N_{gwind} \tag{8}$$

در نهایت، تابع هدف مجموع (۵)-(۸) برای یک زمان زمانبندی‌شده است که آن را می‌توان به صورت ذیل بیان کرد:

$$Obj.Fun = \sum_{i=1}^{N_{gth}} \sum_{t=1}^{T} F_t^i + \sum_{i=1}^{N_{gth}} \sum_{t=1}^{T} (C_V)_t^i \times U(t) + \sum_{i=1}^{N_{gth}} \sum_{t=1}^{T} (C_F)_t^i \times U(t) + \sum_{j=1}^{N_{gwind}} \sum_{t=1}^{T} (C_V)_t^j \times V(t) \tag{9}$$

تابع هدف ذکر شده در (۹) مشروط به تعدادی از قیود عملکرد است. این قیود هر دو واحدهای تولیدی و سیستم‌های قدرت را در نظر می‌گیرند، که برای یافتن پاسخ‌های ممکن باید به آنها توجه داشت. قیود یاد شده به صورت ذیل هستند.

۲,۱. قید تعادل توان

برای تامین تقاضای سیستم و تعادل بین توان تولید شده و توان موردتقاضا، قید ذیل باید ارضا شود:

$$\sum_{i=1}^{N_{gth}} P_t^i \times U_i(t) + \sum_{j=1}^{N_{gwind}} P_t^j \times V_j(t) = P_t^{demand} \quad \forall t = 1, 2, \ldots, T \tag{10}$$

فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۵، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، ص ۱۲-۱
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

که $U_i(t)$ و $V_j(t)$ به ترتیب وضعیت واحدهای حرارتی و بادی را نشان می‌دهند. این متغیرهای صحیح وقتی برابر ۱ هستند که واحد مربوطه انتخاب شده باشد و در غیر اینصورت برابر صفر هستند. حدود عملکردی واحد.

توان خروجی الکتریکی هر واحد تولیدی باید بین حدود کمینه و بیشینه‌ی خود قرار گیرد، که آن را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$P^i_{\min} \leqslant \left(P^i_t + (P_{reserve})^i_t\right) \cdot U_i(t) \leqslant P^i_{\max} \forall i = 1, 2, \ldots, N_g, \quad t = 1, 2, \ldots, T \tag{11}$$

$$P^j_t \cdot V_j(t) \leqslant P^j_{\max} \forall j = 1, 2, \ldots, N_{gwind}, \quad t = 1, 2, \ldots, T \tag{12}$$

۲,۲. قید ذخیره

دیگر قید مهم میزان ذخیره‌سازی است. ذخیره، در یک سیستم قدرت به منظور فراهم کردن توان لازم برای اغتشاشات پیش‌بینی نشده‌ی ممکن در تولید، ضروری است. هر دوی دقت مربوط به بار و سرعت (توان) باد، به شدت روی میزان ذخیره‌ی سیستم تاثیرگذارند. با افزایش ظرفیت بادی، میزان ذخیره نیز در سیستم افزایش می‌یابد [۲۷]. در این مقاله، میزان نیاز به ذخیره شامل دو بخش است؛ اولین بخش مبتنی بر بار کلی سیستم بوده و بخش دوم یک ذخیره‌ی اضافی است که به منظور جبران خطای دقت پیش‌بینی توان بادی در نظر گرفته می‌شود. روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی میزان ذخیره در سیستم‌های دارای مزارع بادی وجود دارد، مثل برنامه‌نویسی تصادفی، شبیه‌سازی مونته کارلو و ذخیره‌ی با مقدار ثابت. در این مقاله، فواصل زمانبندی یک ماهه بوده و انرژی بادی موجود (در اختیار) با یک سرعت متوسط نشان داده می‌شود. روش‌هایی چون برنامه‌نویسی تصادفی در حل مساله‌ی مشارکت واحد در سیستم‌های با مزارع بادی مقیاس بزرگ بسیار مفیدند، جائی که فواصل چدول‌بندی یک ساعته است و لازم است تا نرخ شیب ژنراتورهای حرارتی برای تضمین امنیت سیستم در تغییرات ناگهانی سرعت باد در نظر گرفته شود. در زمانبندی تولید میان‌مدت، از نرخ شیب واحدهای حرارتی بهدلیلی رفتار طبیعی مساله صرفنظر می‌شود. در نظر گرفتن ذخیره‌ی ثابت برای جبران خطای دقت پیش‌بینی توان بادی روش مناسبی در مساله‌ی زمانبندی تولید میان مدت است [۲۸]. هر دو الزام ذخیره را باید به صورت ذیل ارضا کرد:

$$\sum_{i=1}^{N_{gth}} (P_{reserve})^i_t \cdot U_i(t) \geqslant LR \times P^{demand}_t + WR \times \sum_{j=1}^{Ngwind} P^j_t \cdot V_j(t) \tag{13}$$

که WR یک مقدار ثابت است، که به منظور جبران خطای پیش‌بینی نادرست مبتنی بر توان خروجی زمانبندی شده‌ی مزارع بادی در نظر گرفته می‌شود. LR به عنوان تابع بار کلی سیستم برای جبران اغتشاشات تولیدی پیش‌بینی نشده تعریف می‌شود. در این مقاله، فرض می‌شود LR برابر ۵٪ کل بار سیستم باشد، همانطور که در [۱۶] نیز اینگونه سفارش شده است.

۳. کاربرد الگوریتم رقابت استعماری (ICA) برای مساله‌ی زمانبندی تولید

نمودار گردشی روش ارائه شده در شکل۲ تشریح شده است. در MICAی ارائه شده، گام‌های شکل‌گیری اولیه‌ی کشورهای جدید و همسان‌سازی اصلاح شده‌اند تا راندمان الگوریتم رقابت استعماری در حل مساله‌ی زمانبندی تولید به شدت مقید، بهبود یابد. گام‌های بعدی مراحل پیاده‌سازی MICAی ارائه شده برای حل مساله‌ی زمانبندی تولید در سیستم‌های دارای مزارع بادی بزرگ را ترسیح می‌کنند. مراحل نمودار گردشی ارائه شده به صورت ذیل است:

۳,۱. تولید کشورهای اولیه

در اولین گام از الگوریتم ارائه شده، آرایه‌های متغیرهای بهینه‌سازی ایجاد می‌شود. در الگوریتم رقابت استعماری، هر آرایه را یک کشور می‌نامند. در یک مساله‌ی بهینه‌سازی N_{var} بُعدی، هر کشور یک آرایه با طول N_{var} است. در اینمقاله هر کشور شامل

فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۵، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، ص ۱۲-۱
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

$N_{Thermal}$ متغیر برای واحد تولید حرارتی معمولی، $N_{Thermal}$ متغیر برای میزان ذخیره‌ی در نظر گرفته شده برای واحدهای حرارتی و N_{Wind} متغیر برای هر مزرعه ی بادی به عنوان توان خروجی آن است. بنابراین، تعداد کل متغیرها برابر است با $2\times N_{Thermal}+N_{Wind}$. شکل۳ یک آرایه‌ی ساده را نشان می‌دهد که برای مساله‌ی زمانبندی تولید به کار می‌رود. هزینه‌ی هر کشور با کمک تابع هزینه‌ی متغیرها (P_1، P_2، P_3، ...، P_{Nvar}) به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$Cost = f(country) = f(P_1, P_2, P_3, \ldots, P_{Nvar}) \quad (14)$$

فرایند بهینه‌سازی با تولید N_{pop} تعداد از کشورهای اولیه آغاز می‌شود. N_{imp} تعداد استعمارگران اولیه است. قدرتمندترین کشورها انتخاب می‌شوند تا فرمانروایی‌های اولیه شکل گیرد. N_{imp} برابر ٪۱۰ N_{pop} انتخاب می‌شود، که در [۲۰] اینگونه توصیه شده است. دیگر ($N_{colony}(=N_{pop}-N_{imp})$ کشور باقی مانده به عنوان مستعمرات اولیه خواهند بود و بسته به توان خود بین استعمارگران تقسیم خواهند شد. بنابراین، هر فرمانروایی شامل دو کشور است؛ یک کشور استعمارگر و تعدادی متسعمره.

در الگوریتم رقابت استعماری معمولی، متغیرهای کشورهای اولیه اعداد تصادفی بین حدود حداکثر و حداقل خود قرار می‌گیرند. شکل‌دهی یک کشور به این صورت برای مساله‌ی زمانبندی تولید مناسب نیست، که دلیل آن قیودی چون تعادل توان و میزان ذخیره‌ی لازم است. در MICA، فرایند تولید اصلاح می‌شود تا به بتوان به قیود ذکر شده رسیدگی کرده و جمعیت اولیه‌ی مناسبی بدست آورد، جمعیتی که نتایج ممکن و همگرائی سریع را به ارمغان بیاورد. مراحل شکل‌دهی اولیه‌ی کشورهای جدید، برای t اُمین فاصله‌ی زمانی زمانبندی به صورت ذیل است:

(گام ۱) برای هر واحد بادی، $(P_{Wind})_t$ و $(P_{Thermal})_t$ را به صورت زیر قرار دهید:

$$\left(P^i_{Wind}\right)_t = R\ and \times P^{Max}_{Wind} \quad (15)$$

$$\left(P^i_{thermal}\right)_t = \begin{cases} R\ and \times \left(P^i_{thermal_{Max}} - P^i_{thermal_{Min}}\right) & \\ \quad + P^i_{thermal_{Min}} & R\ and\ 1 > R\ and\ 2 \\ 0 & R\ and\ 2 > R\ and\ 1 \end{cases} \quad (16)$$

(گام ۲) خطای خروجی کلی مزارع بادی و واحدهای حرارتی و P_{demand} به صورت ذیل محاسبه شود:

$$(P_{Output})_t = \sum_{i=1}^{N_{Wind}} \left(P^i_{Wind}\right)_t + \sum_{i=1}^{N_{Thermal}} \left(P^i_{Thermal}\right)_t \quad (17)$$

$$(P_{Diff})_t = (P_{demand})_t - (P_{Output})_t \quad (18)$$

(گام ۳) اگر $(P_{Diff})_t = 0$ باشد آنگاه به گام ۵ برود، در غیر این صورت متغیرها به صورت ذیل تعیین شوند:

- اگر $(P_{Diff})_t > 0$ آنگاه یکی از واحدهای حرارتی به صورت تصادفی انتخاب شود و به صورت زیر تنظیم مجدد شده و سپس به گام ۲ برود.

$$\left(P^i_{thermal}\right)_t = \min\left(\left(P^i_{Thermal}\right)_t + (P_{Diff})_t, P^i_{Thermal_{Max}}\right) \quad (19)$$

- اگر $(P_{Diff})_t < 0$ آنگاه یکی از واحدهای حرارتی به صورت تصادفی انتخاب شده و به صورت زیر تنظیم مجدد شده و سپس به گام ۲ برود.

فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۵، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، ص ۱۲-۱
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

$$\left(P^{i}_{thermal}\right)_t = \max\left(\left(P^{i}_{Thermal}\right)_t + (P_{Diff})_t, P^{i}_{Thermal_{Min}}\right) \quad (20)$$

(گام ۴) $(R^{i}_{thermal})_t$ را برای هر واحد حرارتی با کمک (۲۰) قرار دهید و اختلاف ذخیره‌ی کلی و ذخیره‌ی موردنیاز $(R_{Demand})_t$ را به صورت زیر محاسبه کنید:

$$\left(R^{i}_{thermal}\right)_t = \begin{cases} R\,and \times \left(P^{i}_{thermal_{Max}} - P^{i}_{thermal}\right) & R\,and\,1 > R\,and\,2 \\ 0 & R\,and\,2 > R\,and\,1 \end{cases} \quad (21)$$

$$(R_{Total})_t = \sum_{j=1}^{N_{Thermal}} \left(R^{i}_{thermal}\right)_t \quad (22)$$

$$(R_{Diff})_t = (R_{Demand})_t - (R_{Total})_t \quad (23)$$

(گام ۵) اگر $(R_{Diff})_t \leq 0$ باشد آنگاه به گام ۷ برود، در غیر این صورت یکی از واحدهای حرارتی به صورت تصادفی انتهاب و به صورت ذیل تنظیم مجدد شده و سپس به گام ۴ برود:

$$\left(R^{i}_{Themal}\right)_t = P^{i}_{Themal_{Max}} - \left(P^{i}_{Themal}\right)_t \quad (24)$$

(گام ۶) تولید این کشور متوقف شده و تولید کشوری دیگری آغاز شود.

در ادامه‌ی گام‌های ذکر شده، یک کشور جدید شکل خواهد گرفت که قیود مساله‌ی زمانبندی تولید را ارضا می‌کند. برای تولید کشورهای جدید، این رویه برای هر فاصله‌ی زمانی زمانبندی، N_{pop} بار تکرار خواهد شد.

۳,۲. همسان‌سازی

در این مرحله، پس از شکل‌دهی امپراتوری‌های اولیه، مستعمرات شروع به حرکت به سمت استعمارگران مربوطه‌ی خود می‌کنند. در الگوریتم رقابت استعماری معمول، این موضوع با همسان‌سازی همه‌ی مستعمرات به سمت استعمارگر، مطابق شکل۴، مدل می‌شود. مسیر حرکت برداری است از مستعمره به استعمارگر با x واحد.

متغیر x به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$x \sim U(0, \beta \times d) \quad (25)$$

تنظیم β به مقداری بیش از واحد، باعث همسان‌سازی از هر دو سمت می‌شود و d فاصله‌ی بین مستعمره و استعمارگر است. در این مقاله، β طبق توصیه‌ی [۲۰] برابر ۲ تنظیم می‌شود.

مساله‌ی زمانبندی تولید یک مساله‌ی بسیار بزرگ غیرخطی اعداد صحیح مختلط است که باعث می‌شود الگوریتم در کمینه‌های محلی به دام افتد. علاوه بر مشکل به دام افتادن، موضوع دیگر در رابطه با قیود مختلف مساله‌ی زمانبندی تولید مطرح می‌شود. سازوکار همسان‌سازی الگوریتم رقابت استعماری مرسوم دارای این توانمندی نیست که با یان مسائل دست و پنجه نرم کند. در این مقاله موضوع همسان‌سازی اصلاح می‌شود تا از به دام افتادگی محلی پیشگیری شده و با قیود مساله به شیوه‌ای موثر رسیدگی شود.

در سازوکار جدید همسان‌سازی، مستعمره به سمت هر دوی استعمارگر و به کک یک بردار وزنی به سوی یکی دیگر از مستعمرات قدرتمند حرکت می‌کند. در این سازوکار، دومین کشور قدرتمند، که دارای قدرتی بیش از دیگر مستعمرات است، به منظور

فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۵، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، ص ۱۲-۱
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

شکل‌دهی یک بردار همسان‌سازی وزندار به کار می‌رود. شکل۵ سازوکار همسان‌سازی جدید را ترسیم کرده است. در شکل۵ بردار $\vec{A}$ همان بردار وزندار ذکر شده است. به منظور همسان‌سازی دو طرفه، مجموع کلی $\vec{\alpha}_1$, $\vec{\alpha}_2$ برابر دو است. در این مقاله، $\vec{\alpha}_1$, $\vec{\alpha}_2$ به ترتیب برابر ۱/۳ و ۰/۷ انتخاب شده است. همانند روش مرسوم، x یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت است که مقداری کمتر از واحد دارد.

پس از حرکت مستعمره، موقعیت جددی ممکن است قیود مختلف مساله را ارضا نکند. به منظور غلبه بر این مشکل، گام‌های ذیل به انتهای گام همسان‌سازی افزوده می‌شود. گام‌ها برای فاصله‌ی زمانی زمانبندی t ام به صورت ذیل است:

(گام ۱) پس از فرایند همسان‌سازی از پیش تعریف شده، متغیرها برای ارضای قید به صورت ذیل سازماندهی می‌شوند:

- اگر $\left(P^i_{Wind}\right)_t > P^i_{Wind_{max}}$ آنگاه $\left(P^i_{Wind}\right)_t = P^i_{Wind_{max}}$
- اگر $\left(P^i_{Thermal}\right)_t < P^i_{Thermal_{Min}}$ آنگاه $\left(P^i_{Thermal}\right)_t = 0$
- اگر $\left(P^i_{Thermal}\right)_t > P^i_{Thermal_{Max}}$ آنگاه $\left(P^i_{Thermal}\right)_t = P^i_{Thermal_{Max}}$
- اگر $\left(R^i_{Thermal}\right)_t > P^i_{Thermal_{Max}} - \left(P^i_{Thermal}\right)_t$ آنگاه $\left(R^i_{Thermal}\right)_t = P^i_{Thermal_{Max}} - \left(P^i_{Thermal}\right)_t$
- اگر $\left(P^i_{Thermal}\right)_t = 0$ آنگاه $\left(R^i_{Thermal}\right)_t = 0$

(گام ۲) اختلاف توان خروجی کلی واحدهای تولیدی و $(P_{demand})_t$ را به صورت ذیل محاسبه کنید:

$$(P_{Output})_t = \sum_{i=1}^{N_{Wind}} \left(P^i_{Wind}\right)_t + \sum_{j=1}^{N_{Thermal}} \left(P^i_{Thermal}\right)_t \quad (26)$$

$$(P_{Diff})_t = (P_{Demand})_t - (P_{Output})_t \quad (27)$$

(گام ۳) اگر $(P_{Diff})_t = 0$ آنگاه به گام ۴ برود، در غیر این صورت متغیرها به صورت ذیل بازتنظیم شوند:

- اگر $(P_{Diff})_t > 0$ آنگاه یکی از واحدهای حرارتی به صورت تصادفی انتخاب شده و به صورت ذیل تنظیم مجدد شده و سپس به گام ۲ برود.

$$\left(P^i_{Themal}\right)_t = \min\left(\left(P^i_{Themal} + P_{Diff}\right)_t, P^i_{Themal_{Max}}\right) \quad (28)$$

- اگر $(P_{Diff})_t < 0$ آنگاه یکی از واحدهای حرارتی به صورت تصادفی انتخاب شده و به صورت ذیل تنظیم مجدد شده و سپس به گام ۲ برود.

$$\left(P^i_{Themal}\right)_t = \max\left(\left(P^i_{Themal} + P_{Diff}\right)_t, P^i_{Themal_{Min}}\right) \quad (29)$$

(گام ۴) اختلاف ذخیره‌ی کلی واحدهای حرارتی و $(R_{demand})_t$ به صورت ذیل محاسبه شود:

$$(R_{Total})_t = \sum_{j=1}^{N_{Thermal}} \left(R^i_{Thermal}\right)_t \quad (30)$$

$$(R_{Diff})_t = (R_{demand})_t - (R_{Total})_t \quad (31)$$

(گام ۵) اگر $(R_{Diff})_t \leq 0$ آنگاه به گام ۶ برود و در غیر این صورت یکی از واحدهای حرارتی به طور تصادفی انتخاب شده و به صورت ذیل تنظیم شود و سپس به گام ۴ رود.

فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۵، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، ص ۱۲-۱
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

$$\left(R^i_{Themal}\right)_t = P^i_{Themal_{Max}} - \left(P^i_{Themal}\right)_t \quad (32)$$

(گام ۶) همسان‌سازی این مستعمره به سمت استعمارگر خود متوقف شود.

این رویه برای همه‌ی کشورها تکرار خواهد شد. پس از این مرحله، مستعمرات در موقعیت‌های جدید خود قرار داشته و قیود عملکردی ارضا می‌شوند.

۳,۳. تکامل (انقلاب)[12]

در هر امپراتوری، چندین مستعمره وجود دارد، که دارای موقعیت‌های مختلف با هزینه‌های مختلف هستند. در MICAی ارائه شده، یک مرحله‌ی انقلاب تعریف می‌شود تا راندمان الگوریتم بهبود یابد. در مرحله‌ی انقلاب، مستعمرات هر امپراتوری با در نظر گرفتن هزینه‌هایشان به ترتیب بهترین تا بدترین رتبه‌بندی می‌شوند. در این مرحله، $\rho\%$ ضعیف‌ترین مستعمرات به دلیل عدم قدرتشان با انقلاب مواجه می‌شوند، جائی که ρ به عنوان نرخ انقلاب تعریف می‌شود. در MICAی ارائه شده، این انقلاب با جایگزینی مستعمرات ضعیف با کشورهای جدید تولید شده مدل می‌شود. در این مقاله، مقدار ρ پس از شبیه‌سازی‌های خسته کننده و طولانی برابر ۴۰٪ انتخاب شده است.

۳,۴. تعویض موقعیت‌های استعمارگر و مستعمره

یک مستعمره در فرایند حرکت و تکامل به سمت استعمارگر مربوطه، ممکن است به یک موقعیت بهتری دست یابد که دارای هزینه‌ی کمتری نسبت به هزینه‌ی استعمارگر مربوط به خود باشد. در این صورت، یک مستعمره‌ی قدرتمند جدید تبدیل به استعمارگر شده و استعمارگر سابق به یک مستعمره‌ی جدید این استعمارگر جدید تغییر می‌کند.

۳,۵. قدرت کلی یک امپراتوری

استعمارگر دارای بیشترین اثر روی قدرت کلی هر امپراتوری است؛ با این حال مستعمرات دارای تاثیری جزئی روی توان کلی هستند. این موضوع را می‌توان به صورت ذیل مدل کرد:

$$T.C_{.n} = Cost(imperialist_n) + \xi\ mean\{Cost(colonies\ of\ empire_n)\} \quad (33)$$

ξ ضریب تاثیر مستعمرات است، در حالی که یک عدد مثبت کمتر از واحد است. در این مقاله این ضریب برابر ۰/۰۲ انتخاب شده است تا تاثیر مستعمرات روی قدرت کلی امپراتوری و تاکید روی قدرت استعمارگر کاهش یابد.

۳,۶. رقابت استعماری

در این مرحله، یعنی مرحله‌ی اصلی، رقابت استعماری آغاز می‌شود، و همه‌ی امپراتوری‌ها سعی دارند تا مستعمرات بیشتری نسبت به امپراتوری‌های دیگر تصاحب کنند. این رقابت استعماری به تدریج موجب کاهش در قدرت امپراتوری‌های ضعیف می‌شود. امپراتورهای صعیف مستعمرات خود را از دست می‌دهند که منجر به افزایش قدرت امپراتوری‌های قوی می‌شود. این رویه موجب می‌شود تا امپراتوری‌های قدرتمند مستعمرات بیشتری را در اختیار بگیرند. این رقابت با انتخاب ضعیف‌ترین مستعمره‌ی ضعیف‌ترین امپراتوری‌ها و ایجاد یک رقابت بین همه‌ی امپراتوری‌ها در راستای تصاحب این مستعمره‌ی ضعیف مدل می‌شود. در این رقابت شانس قدرتمندترین امپراتوری‌ها بیشتر از دیگران است. در واقع، این مستعمره توسط قدرتمندترین امپراتوری تصاحب نمی‌شود، بلکه این امپراتوری شانس بیشتری برای تصاحب آن خواهد داشت.

[12] Revolution

۳,۷. حذف امپراتوری‌های بدون قدرت

طی رقابت استعماری، قدرت کلی برخی امپراتوری‌ها کاهش می‌یابد، و آنها مستعمرات خود را یکی پس از دیگری از دست می‌دهند. پس از تقسیم مستعمرات امپراتوری‌های بی قدرت، آنها دچار فروپاشی می‌شوند، به عبارت دیگر، وقتی یکی از استعمارگران به شرایطی می‌رسد که هیچ مستعمره‌ای ندارد، حذف شده و از بین خواهد رفت.

۳,۸. همگرایی

پس از چند تکرار (موسوم به دهه در ICA) همه‌ی امپراتوری‌ها فرو خواهند ریخت به جز یکی از آنها که قدرتمندترین است. در این حالت همه‌ی کشورها در یک امپراتوری قرار دارند که دارای پرقدرتمندترین استعمارگر است. در این دنیا، همه‌ی مستعمرات و حتی استعمارگر دارای موقعیت یکسانی هستند. به عبارت دیگر، تنها یک کشور در جهان وجود دارد و آن کشوری است با بهترین موقعیت با کمترین هزینه. الگوریتم وقتی همگرا می‌شود که به این موثعیت رسیده باشد.

۴. مطالعات شبیه‌سازی

در این بخش، عملکرد و اعتبار روش ارائه شده با کمک شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای ارزیابی می‌شود. بدین منظور، سه سیستم با در نظر گرفتن دو مزارعه‌ی بازی مقیاس بزرگ در هر کدام از آنها، پیاده‌سازی می‌شود. در هر مورد مطالعه‌ای، به طور میانگین ۳۰ اجرا گزارش می‌شود. در همه‌ی شبیه‌سازی‌های انجام شده، نتایج MICA با نتایج برخی از روش‌های دیگر مقایسه می‌شود. به دلیل فواصل زمانی طولانی مدت، ممکن است بتوان این مساله را برای هر ماه به صورت جداگانه حل کرد.

۴,۱. مورد ۱

اولین سیستم شامل ۱۲ واحد تولیدی است، که شامل ده واحد حرارتی و دو مزرعه‌ی بادی است. اطلاعات ژنراتورها برای این مورد تست در جدول۱ ارائه شده است [۷]. در شبیه‌سازی‌ها، بار پیک سیستم برابر ۱۵۰۰ مگاوات فرض می‌شود. فرض می‌شود تقاضای بار پیک به صورت سالیانه در ماه دوازدهم رخ دهد. تقاضاهای دیگر ماه‌ها در جدول۲ نشان داده شده است، که به شکل درصدی از بار پیک سالیانه نمایش داده می‌شوند. اطلاعات سرعت باد و انرژی بادی موجود در جدول۲ داده شده است. همانطور که قبلا ذکر شد، ۵٪ کل تقاضای سیستم به عنوان ذخیره‌ی سیستم و ذخیره‌ی پیش‌بینی نادرست انرژی بادی در نظر گرفته می‌شود. در این مورد تست، فرض می‌شود WR برابر ۱۰٪ باشد [۲۸]. به عبارت دیگر، ۱۰٪ کل توان بادی زمانبندی شده فرض می‌شود ذخیره‌ی پیش‌بینی نادرست باشد. در اهدافی مانند مشارکت واحد [۲۰، ۳۰]، برنامه‌ریزی توسعه‌ی DG [۳۱]، زمانبندی تولید [۱۶، ۲۸]، معمول این است که با مزرعه‌ی بادی بسان یک تک ژنراتور توان رفتار شود، لذا هر مزرعه‌ی بادی به عنوان یک واحد تولیدی تنها در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت هر دو مزرعه برابر ۸۰ مگاوات است، در حالی که در نقاط مختلف و با میزان دسترسی به انرژی باد مختلف قرار دارند. جدول۳ زمانبندی بهینه‌ی بدست آمده برای واحدهای تولیدی به کمک MICA ی ارائه شده را نشان می‌دهد، که جزئیات مقادیر توان خروجی و ذخیره برای فواصل زمانی یک ماه در طی یک سال ارائه شده است. جدول۴ نیز هزینه‌ی بهینه‌ی هر ماه و هزینه‌ی کلی افق زمانی (یک ساله) را نشان می‌دهد.

۴,۲. مورد ۲

این مورد تست شامل ۱۵ واحد حرارتی و دو مزرعه‌ی بادی یکسان همانند مورد ۱ است. اطلاعات این مورد از مرجع [۳۲] بدست آمده است. در این سیستم، پیک بار سالانه برابر ۲۶۷۰ مگاوات فرض می‌شود و الگوی بار افق زمانی همانند مورد۱ است. جدول۵ زمانبندی بهینه‌ی این سیستم را برای هر ماه و طی دوره‌ی یکساله نشان می‌دهد. همانند مورد قبلی، WR برابر ۱۰٪ قرار داده شده و دسترسی به توان بادی همانند جدول۳ است. در این مورد، میزان نفوذ انرژی بادی کاهش یافته است. به عبارت دیگر، این مورد تست به منظور ارزیابی کارائی MICA در حل مساله‌ی زمانبندی تولید با میزان نفوذ مختلف انرژی بادی در سیستم‌های قدرت طراحی شده است.

۴،۳. مورد ۳

در این مورد، میزان نفوذ انرژی بادی کاهش یافته است و بیشتر تقاضا توسط واحدهای حرارتی مرسوم تامین می‌شود. این مورد شامل چهل واحد حرارتی است که اطلاعات آنها از [۳۲] بدست آمده است و دو مزرعه‌ی بادی نیز همانند موارد قبلی است. در این مورد، WR برابر ۱۰٪ فرض شده و بیشترین تقاضای بار برابر ۹۵۰۰ مگاوات است. الگوی تقاضا به صورت جدول۲ است. در این مورد، تعداد واحدهای حرارتی کاهش یافته است. به عبارت دیگر، این مورد به منظور نشان دادن اعتبار MICAی ارائه شده در حل مساله‌ی زمانبندی تولید مقیاس وسیع دارای مزارع بادی طراحی شده است. جدول۶ نتیجه‌ی بهینه را نشان می‌دهد که با کمک MICA برای هر ماه و در طی یک سال بدست آمده است.

۴،۴. مورد ۴

در این مورد، همانند مورد۳، چهار واحد حرارتی و دو مزرعه‌ی بادی وجود دارد. بیشترین تقاضای بار برابر ۹۵۰۰ مگاوات بوده و الگوی تقاضا همانند جدول۲ است. در این مورد، اثر نقطه‌ی دریچه‌ای[13] به صورت ذیل در تابع هزینه در نظر گرفته شده است [۳۳]:

$$F_t^i = a_{gi} + b_{gi} \times P_t^i + c_{gi} \times \left(P_t^i\right)^2 + \left|e_i Sin\left(h_i\left(P_{\min}^i - P_t^i\right)\right)\right|$$
$$i = 1, 2, 3, \ldots, N_{gth} \qquad (34)$$

جدول۷ نتیجه‌ی بهینه را نشان می‌دهد که توسط MICA برای هر ماه و در طی یک سال بدست آمده است.

۴،۵. تحلیل و مقایسه‌ی نتایج

در این بخش، عملکرد MICA ی ارائه شده تحلیل می‌شود. در موارد قبلی، نتایج مقادیر متوسطی بودند که از ۵۰ اجرای مستقل بدست آمده بودند. در همه‌ی موارد، جمعیت اولیه برابر ۲۰۰ تنظیم شده بود و تعداد استعمارگران اولیه همان طور که در بخش۳ ذکر شد برابر ۲۰ بود. بیشترین تعداد تکرارها برابر ۲۵۰ است، در حالی که الگوریتم خیلی سریع طبق شکل۶ همگرا می‌شود. همان طور که نشان داده شده است این الگوریتم در کمتر از ۱۰۰ دهه (تکرار) به مقدار بهینه همگرا می‌شود. این مشخصه‌ی همگرایی مناسب از سازوکار جستجو و همسان‌سازی MICA ناشی می‌شود که جمعیت را بین چندین امپراتوری توزیع می‌کند. مشخصه‌ی همگرایی سریع موجب زمان اجرای کمتری در مقایسه با دیگر روش‌هی خلاقانه و تحلیلی می‌شود. جدول۸ نتایج بهینه‌ی بدست آمده از MICA در مقایسه با بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) [۱۶] و MINLP به کمک نتایج GAMS [۱۶] را نشان می‌دهد. طبق جدول۸، در موارد تست مختلف، نتایج روش ارائه شده دارای هزینه‌های پایین‌تری است. در کنار نتایج بهتر، انحراف از استاندارد نتایج روش ارائه شده کمتر از نتایج گزارش شده در [۱۶] است.

همانطور که جدول۸ نشان می‌دهد، MICA در مقایسه با الگوریتم‌های دیگری جون PSO دارای نتایج بهتری است. مشخصه‌ی همگرایی سریع که موجب زمان اجرای کمتری می‌شود حاصل اصلاح گام‌های مقداردهی اولیه و همسان‌سازی الگوریتم است. سازوکار جدید همسان‌سازی، که مسیر همسان‌سازی را تغییر می‌دهد، مانع از آن می‌شود که الگوریتم در کمینه‌های محلی به دام افتد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مساله‌ی زمانبندی تولید در سیستم‌های قدرت دارای مزارع بادی مقیاس بزرگ به کمک الگوریتم رقابت استعماری اصلاح شده حل شد. مزارع بادی که در سیستم‌های قدرت وجود دارند، موجب الزامات ذخیره‌ای بیشتری می‌شوند که موجب پیچیدگی در رسیدگی و ارضای قیود عملکردی می‌شود. MICAی نوین در این کار ارائه می‌شود که اصلاح شده است تا عملکرد

[13] Valve point effect

فصلنامه علمی تخصصی ایده های نو در علوم، مهندسی و فناوری ، دوره ۵، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، ص ۱۲-۱
ISSN: 2588-3984
http://www.Tajournals.com

بهتر در حل مسائل زمانبندی تولید به شدت مقید، بهبود یابد. این عمل اصلاحی روی مراحل تولید کشور جدید و همسان‌سازی اعمال شده است. سازوکار جدید همسان‌سازی به منظور اجتناب از به دام افتادن در کمینه‌های محلی تعریف می‌شود. روش ارائه شده روی سه مورد تست مختلف که دارای تعداد مختلف واحدهای حرارتی و میزان نفوذ انرژی بادی هستند به کار رفت. نتایج، در مقایسه با دیگر روش‌ها، اعتبار MICA در حل مساله‌ی غیرخطی و عدد صحیح مختلط زمانبندی تولید را ارزیابی میکند. اصلاح الگوریتم رقابت استعماری معمولی منجر به کاهش زمان اجرا و زمانبندی‌های بهینه‌ی ممکن می‌شود.