حل مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر

حسین شکری[۱]، دانشجوی کارشناسی ارشد، سجاد نجفی روادانق[۲]، استادیار
۱ و ۲- آزمایشگاه شبکه‌های توزیع هوشمند، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران
hossein_shokri64_07@yahoo.com[1], s.najafi@azaruniv.edu[2]

چکیده: باگذشت زمان سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در تامین برق شبکه‌های قدرت هر روز بیش‌تر می‌گردد. حل بهینه مسئله مشارکت واحدهای نیروگاهی (Unit Commitment) در حضور منابع تجدیدپذیر به دلیل ورود پارامترهای جدید ناشی از این منابع همانند منحنی تولید غیر-یکنواخت و وجود عدم قطعیت بالا یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده است. در این مقاله مسئله مشارکت بهینه واحدهای تولیدی حرارتی در یک دوره روزانه در حضور منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی (Harmony Search Algorithm) حل گردیده است. جهت حفظ شکل کلی در حل معادلات پخش بار اقتصادی هزینه‌های تولید منابع تجدیدپذیر نیز به‌صورت یک معادله درجه‌دو مدل-سازی شده و در معادلات پخش بار اقتصادی، وارد شده است. نتایج نشان می‌دهد که هزینه‌های بهره‌برداری برای سیستم ۱۰ واحدی در حضور نیروگاه‌های تجدیدپذیر کم‌تر است. هم‌چنین جهت مقایسه توانایی الگوریتم در حل مسئله مشارکت واحدهای نیروگاهی، جواب‌های به‌دست‌آمده برای حالت بدون وجود منابع تجدیدپذیر با روش‌های دیگر مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: مشارکت واحدهای نیروگاهی، انرژی‌های تجدیدپذیر، الگوریتم جستجوی هارمونی، بهینه‌سازی.

A Solution to Unit Commitment Problem at the Presence of Renewable Energy Resources

H. Shokri[1], S. Najafi Ravadanrgh [2]

1, 2- Smart Distribution Grid research Lab, Electrical Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Abstract: Nowadays the role and impact of renewable energy resources (RER) penetration in power system operation and scheduling is increased dramatically. Because of intermittent and probabilistic behavior of RER power and uncertainty in RER output power, unit commitment (UC) at the presence of RER is a more complicated optimization problem. This paper proposes an innovative and effective modeling procedure based on modification of the Harmony Search Algorithm (HSA) to solve the UC in power systems with and without RER. The proposed algorithm is easy in application compared to the other heuristic methods and has a high capability in reaching to optimal solution with reasonable time. The proposed method is tested on 10 units test system for base case and modification to new test case including wind and solar power plant. To preserve the general structure of economic dispatch equation, the wind and solar power plant operating cost is modeled with a quadratic equation similar to thermal units. Simulations were done for daily units scheduling. Numerical results show the lower operating cost for 10 units system at the presence of RER. The efficiency and improvement of the solution in cost and execution time compared to the results of the other powerful heuristic algorithms is compared.

Keywords: Unit Commitment, Renewable Energy, Harmony Search Algorithm, Optimization.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۲۵
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۲/۱۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۲/۱۱
نام نویسنده مسئول: سجاد نجفی روادانق
نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - گروه مهندسی برق آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های توزیع هوشمند

۱- مقدمه

مسئله مشارکت واحدهای نیروگاهی یکی از مسائل پیچیده و با قیود مختلف در سیستم‌های قدرت به شمار می‌رود. با افزایش تعداد واحدهای نیروگاهی به پیچیدگی مسئله نیز اضافه می‌گردد. آرایش به مدار آمدن نیروگاه‌ها با حداقل هزینه و زمان لازم جهت حل مسئله دو عامل مهم در تعیین کیفیت روش‌های بهینه‌سازی است. انرژی پایدار راه‌حل رسیدن به توسعه پایدار محسوب می‌گردد. دسترسی کشورهای درحال‌توسعه به انواع منابع جدید انرژی، برای توسعه اقتصادی آن‌ها اهمیت اساسی دارد. افزایش هزینه‌های سوخت‌های فسیلی، مسئله آلودگی زیست‌محیطی نیروگاه‌های حرارتی و کاهش هزینه‌های توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر از دلایل اصلی ورود و گسترش منابع تجدیدپذیر در تامین بخشی از توان شبکه‌های قدرت شـده است. ازاین‌رو استفاده از انرژی‌های نو مانند انرژی باد، خورشیدی و غیره موردتوجه قرار گرفته است. با گسترش سهم این منابع در تامین توان شبکه، مسئله چگونگی تامین توان آن‌ها نیز موردتوجه خواهد بود. بنابراین مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی بایستی در حضور این منابع دوباره فرمول‌بندی شده و حل گردد. هدف این مقاله واردکردن توابع هزینه منابع انرژی تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های بادی و خورشیدی در مسئله مشارکت واحدهای تولید قدیمی و حل دوباره مسئله است. در این تحقیق به‌منظور تطبیق مسئله با مسئله قدیمی UC سعی شده است تا یک الگوی مشابه برای هزینه‌های تولید واحدهای تولیدی تجدیدپذیر ارائه شود تا حالت کلی حل مسئله حفظ شود. با این فرمول‌بندی ساختار کلی در حل مسئله پخش بار اقتصادی و نیز UC حفظ خواهد شد.

درزمینه مشارکت واحدهای نیروگاهی مقالات متعددی ارائه شده است. اکثر این مقالات، مسئله فوق را در شبکه قدرت بدون حضور منابع تولید پراکنده حل نموده‌اند. در [۱] روش Priority List (PL) جهت حل مسئله UC استفاده شده است. حسن این روش در سرعت بالای الگوریتم در حل مسئله است. عیب روش فوق در این است که ممکن است به جواب‌هایی با هزینه بالا منتهی شود. در مرجع [۲] روش جدیدی جهت بر مبنای تعیین بـار درخواستی به‌صورت یک جدول بهینه از پیش تعیین‌شده ارائه شده است. سپس به روش مولر مسئله پخش بار اقتصادی حل می‌گردد. در [۳] مسئله UC در حضور بارهای قابل قطع و تولید هم‌زمان برق و حرارت حل گردیده است. در مراجع [۵-۴] مسئله فوق به روش Lagrangian Relaxation (LR) حل شـده اسـت. روش‌هـای بهینه‌سازی هوشمند زیادی مانند الگوریتم ژنتیک، جستجوی ممنوعه، کلونی مورچه‌ها، روش آب‌کاری تدریجی فلزات، در حل مسئله UC مورداستفاده قرار گرفته است [۹-۶]. مهم‌ترین مزیت این روش‌ها رسیدن به جواب‌های بهینه کلی و یا خیلی نزدیک به آن در مسائل بـه ابعاد بـزرگ است. در مقاله [۱۰] مسئله UC در یک دوره کوتاه‌مدت توسط الگوریتم TS حل شده است. نویسندگان در [۱۱] از الگوریتم کلونی مورچه‌ها جهت حل مسئله مشارکت واحدهای نیروگاهی بهره جسته‌اند. با این الگوریتم امکان جستجوی موازی جهت افزایش سرعت مسئله وجود دارد. مسئله UC با در نظرگیری عدم در دسترس بودن واحـدها و نیـز عدم قطعیت در بار برآوردشده با استفاده از الگوریتم SA ارائه داده‌اند [۱۲]. مشابه [۱۱] در مرجع [۱۳] روش توسعه‌یافته الگوریتم AC جهت حل بهینه مسئله UC استفاده شده است. در [۱۴] الگوریتم Hybrid Taguchi-Immune Algorithm (HTIA) که روش‌های Taguchi و Immune را باهم ترکیب کرده است جهت به‌دست آوردن بهترین جواب برای مسئله UC به‌کاربرده شـده است. روش Particle Swarm Optimization (PSO) به همراه یک کدگذاری جدید برای حل مسئله در [۱۵] استفاده گردیده است. در [۱۶] مسئله UC در سیستم‌های قدرت بدون واحدهای تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی برای دوره‌های روزانه و هفتگی حل و نتایج حاصل به‌صورت جدول و نمودار ارائه گردیده است. هم‌چنین در مقاله فوق مسئله برای شبکه‌هایی با ۱۰، ۲۰ ، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و نیز ۱۰۰ واحد نیروگاهی حل و نتایج با روش‌های دیگر منتشرشده مقایسه گردیده است.

درگذشته مسئله مشارکت واحدهای نیروگاهی (UC) و پخش‌بار اقتصادی (ED) به‌طور مرسوم در سیستم‌های قدرت متمرکز حل شده است [۱۷] و [۱۸]. در حل مسئله UC حداقل‌سازی هزینه‌های تولید با توجه به قیود حاکم همچون محدودیت تولید، محدودیت شیب تولید و حداقل زمان روشن / خاموش واحدها مطرح می‌گردد [۱۹]. به دلیل مـاهـیت متغیر ورودی منابع تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های بادی و خورشیدی درصد بالایی از عدم قطعی وارد مسئله مدیریت تولید و زمان‌بندی آن می‌گردد [۲۰]. در این مقاله هزینه تولید توان توسط واحدهای بادی و خورشیدی هرکدام با یک معادله درجه دوم تقریب زده شده است و روی یک شبکه ۱۰ واحدی IEEE با یک بار درخواستی مشخص در طول ۲۴ ساعت مورد مطالعه قرار گرفته شده است. جهت مقایسه نتایج ابتدا شبکه موردنظر بدون در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر توسط الگوریتم جستجوی هارمونی حل شده است. سپس با اثبات کارایی آن مسئله در حضور منابع تجدیدپذیر نیز حل گردیده است. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این موضوع است که باوجود هزینه سرمایه‌گذاری بالا درزمینه واحدهای بادی و خورشیدی بازهم استفاده از این منابع نسبت به منابع تجدیدناپذیر مقرون‌به‌صرفه خواهد بود. از این‌رو هدف این تحقیق ارائه الگوریتمی جهت حل همزمان مشارکت بهینه واحـدهـای نیروگـاهی مرسوم و تجدیدپذیر به‌منظور دست‌یابی به حداقل هزینه بهره‌برداری است.

۲- معرفی الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله UC

در این مقاله از الگوریتم جدیدی به نام الگوریتم جستجوی هارمونی برای حل مسئله UC استفاده شده است. در سال‌های اخیر گیم و

همکاران، الگوریتم فراکاوشی به نام جستجوی هارمونی(HS) را توسعه دادند و از آن در مسائل مختلف مهندسی استفاده کردند [۲۱]. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که به دلیل عدم‌نیاز به فرض مقادیر اولیه پارامترها در فرآیند بهینه‌سازی الگوریتم جستجوی هارمونی در مقایسه با بعضی از الگوریتم‌های تکاملی دیگر مناسب‌تر است. نتایج مقایسه این الگوریتم با روش‌های الگوریتم‌ژنتیک، برنامه‌ریزی پویا و برنامه‌ریزی غیرخطی بیانگر این بود که الگوریتم جستجوی هارمونی در مواقعی که استفاده از روش‌های ریاضی متداول مقدور نیست روش مناسبی است دقیق‌تر و سریع‌تر به جواب می‌رسد.

الگوریتم‌های فراکاوشی پیشین ازجمله جستجوی ممنوعه (Tabu Search)، سردشدن تدریجی فلزات (Annealing Simulated) و الگوریتم‌های تکاملی (Evolutionary Algorithm) از پدیده‌های طبیعی و مصنوعی الهام گرفته‌اند، موسیقی هم یک پدیده مصنوعی آرام‌بخش است که توسط انسان و طبیعت تولید می‌شود، هارمونی در موسیقی اصطلاحاً به اجرای نت‌های متفاوت به‌صورت هم‌زمان می‌گویند که درنهایت تبدیل به آهنگی موزون و زیبا ازنظر شنیداری می‌شود. درواقع الگوریتم جستجوی هارمونی به‌عنوان یکی از روش‌های جدید بهینه‌سازی فراکاوشی از موسیقی الهام گرفته است. معمولاً در الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک، بهترین جواب به‌وسیله ارزیابی توابع هدف تعیین می‌شود. در موسیقی، به‌منظور دست‌یابی به بهترین جواب (اجرا) هر تمرین با تمرین قبل مورد مقایسه قرار می‌گیرد. درحالی‌که در بهینه‌سازی توابع هدف در هر تکرار، نسبت به تکرارهای قبل مقایسه می‌شود [۲۲].

به‌طورکلی فرآیند بهینه‌سازی جستجوی هارمونی در پنج مرحله زیر صورت می‌گیرد:

مرحله اول: تطبیق مسئله بهینه‌سازی با پارامترهای الگوریتم و تعیین متغیرهای ورودی

مرحله دوم: تولید حافظه هارمونی اولی (HM)

مرحله سوم: اصلاح هارمونی جدید (HMS)

مرحله چهارم: به‌طورکلی حافظه هارمونی (HMCR) و

مرحله پنجم: سرعت تنظیم قطعات (PAR)

هر یک از مراحل به‌طور کامل در این قسمت شرح داده شده است [۲۱]-[۲۲].

مرحله اول: معرفی مسئله بهینه‌سازی و پارامترهای الگوریتم

$$\begin{aligned} &Minimize\ F(z) \\ &subject\ \ to\ \ z_i \in Z_i\ \&\ i=1,2,\ldots,n \end{aligned} \qquad (۱)$$

در مسئله بهینه‌سازی فوق $F(z)$ تابع هدف است، z مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم‌گیری z_i است. n تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری (تعداد آلات موسیقی) است و Z_i مجموعه‌ای از محدوده ممکن از ارزش‌ها برای هر متغیر تصمیم‌گیری است، در اینجا $Z_i=\{z_i(1), z_i(2),\ldots,z_i(k)\}$، برای تصمیم‌گیری گسسته متغیرها $z_i(1)<z_i(2)<\ldots<z_i(k)$ و k تعداد مقادیر ممکن برای متغیرهای گسسته است. در این مرحله پارامترها الگوریتم ازجمله اندازه حافظه هارمونی که تعداد بردارهای جواب را در حافظه هارمونی نشان می‌دهد، سرعت بررسی حافظه هارمونی، سرعت تنظیم قطعات و ماکزیمم تعداد تکرارها یا شرط توقف وارد می‌شود. در حافظه هارمونی بعد از به‌دست آوردن تابع هدف هر یک از هارمونی‌ها، از کوچک به بزرگ مرتب می‌شوند. HMCR و PAR پارامترهایی هستند که در بهترکردن بردار جواب استفاده می‌شوند. در این مطالعه، برای اینکه که همه واحدها می‌توانند به صورت ON یا OFF باشند، در نتیجه، n تعداد واحدهای مشارکت‌کننده در برنامه UC است.

مرحله دوم: تولید حافظه هارمونی اولیه

در گام دوم به‌صورت تصادفی از محدوده مقادیر ممکن متغیرهای تصمیم، یک حافظه هارمونی به‌صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$HM=\begin{bmatrix} z_1^1 & \cdots & z_{n-1}^1 & z_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ z_1^{HMS-1} & \cdots & z_{n-1}^{HMS-1} & z_n^{HMS-1} \\ z_1^{HMS} & \cdots & z_{n-1}^{HMS} & z_n^{HMS} \end{bmatrix} \begin{matrix} \Rightarrow F(z^1) \\ \Rightarrow \vdots \\ \Rightarrow F(z^{HMS-1}) \\ \Rightarrow F(z^{HMS}) \end{matrix} \qquad (۲)$$

که $F(Z^1)$ مقدار تابع هدف به‌دست آمده به‌ازای بردار اول و HM ماتریس حافظه هارمونی است. در این مطالعه، ماتریس HM باید به‌طور تصادفی با توجه به محدودیت‌های مسئله پر شود.

مرحله سوم: اصلاح هارمونی جدید

در این گام با استفاده از سه مکانیزم انتخاب تصادفی، بررسی حافظه و سرعت تنظیم قطعات یک هارمونی جدید که در محدود مجاز باشد به‌صورت $z^{New}=(z_1^{New}, z_2^{New},\ldots,z_n^{New})$ تولید می‌گردد.

بر اساس معادله (۳) اگر HMCR بین مقدار صفر و یک تغییر کند سرعت انتخاب از مقادیر مرتب‌شده در حافظه هارمونی است درحالی‌که 1- HMCR سرعت انتخاب تصادفی محدوده مجاز است.

$$\begin{cases} z_i^{New} \in \{z_1^1, z_1^2,\ldots,z_1^{HMS}\} & if\quad HMCR \\ z_i^{New} \in X_i & if\quad (1-HMCR) \end{cases} \qquad (۳)$$

به‌عنوان‌مثال، اگر HMCR برابر ۰/۸۵ باشد الگوریتم با احتمال 85 درصد بردار جدید را از بین بردارهای مرتب‌شده در حافظه هارمونی انتخاب می‌کند و با احتمال ۱۵ درصد بردار جدید به‌صورت تصادفی در محدوده مجاز انتخاب می‌کند. برای هر بردار جدید z_i^{New} شرط لزوم تنظیم قطعات بر روی آن چک می‌گردد. اگر جواب مثبت باشد با احتمال PAR همسایه‌های بالا و پایین نقطه به‌دست‌آمده را

موردبررسی قرار می‌دهد و در غیر این صورت، با احتمال 1-PAR کاری انجام نمی‌دهد. در معادله (۴) چگونگی اعمال این پارامتر بهینه-سازی نشان داده شده است.

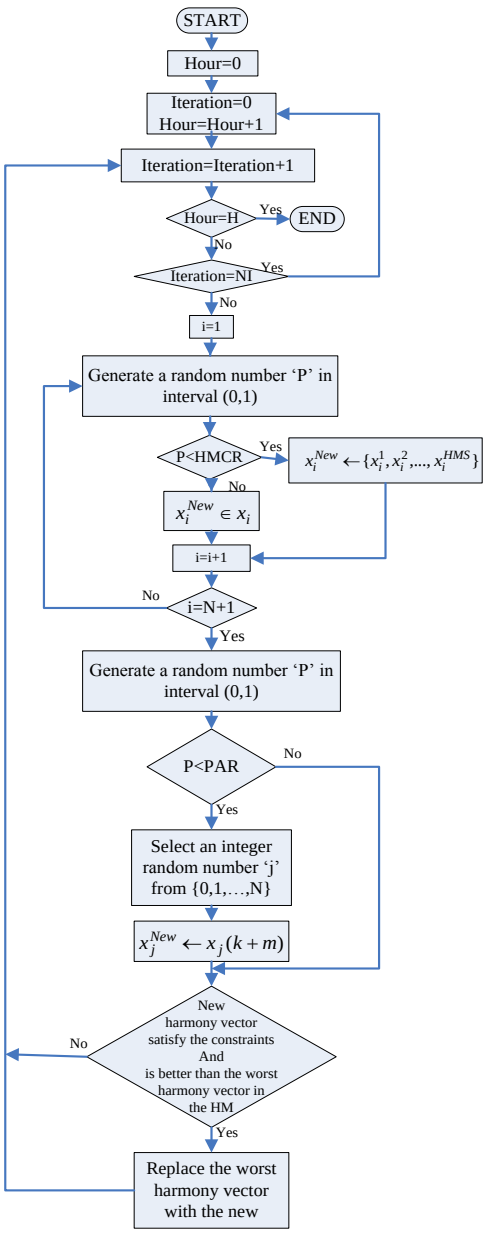
$$\begin{cases} Yes \quad with \quad probability \quad PAR \\ No \quad with \quad probability \quad (1-PAR) \end{cases} \tag{۴}$$

مرحله چهارم: به‌روزرسانی حافظه هارمونی

اگر هارمونی جدید تولی شده بهتر از هارمونی موجود در حافظه هارمونی باشد، آنگاه هارمونی جدید در حافظه جایگزین می‌شود و به این ترتیب هارمونی‌های قبلی از حافظه حذف می‌گردند اما اگر هارمونی موجود در حافظه بهتر از هارمونی جدید باشد در این صورت بدون هیچ جایگزینی الگوریتم وارد تکرار بعدی می‌شود.

مرحله پنجم: بررسی معیار توقف

گام سوم و چهارم آن‌قدر تکرار می‌شود تا شرط توقف ارضا شود. به‌این‌ترتیب آخرین بردار به‌دست‌آمده در الگوریتم جواب مسئله است. بدیهی است که در هر مسئله بهینه‌سازی مقدار پارامترهای HMCR، PAR، HMS و تعداد ماکزیمم تکرارها متفاوت خواهد بود. معمولاً مقدار HMCR را در محدوده ۱-۰/۹ در نظر گرفته می‌شود، اما در بیش‌تر مسائل با ۰/۹۵ مقدار بهینه به‌دست می‌آید. اندازه حافظه هارمونی HMS در محدوده۵۰-۵ مناسب است، این پارامتر به تعداد متغیرهای تصمیم وابسته است، هرچه اندازه حافظه هارمونی بزرگ‌تر باشد مسئله ازنظر ابعادی بزرگ می‌شود بنابراین سعی می‌شود این پارامتر کوچک‌تر انتخاب شود. احتمال بررسی تنظیم قطعات PAR را معمولاً بین ۱-۰/۳ فرض می‌گردد، البته با توجه به مسئله موردنظر ممکن است کم‌تر از این محدوده هم در نظر گرفته شود. در این مقاله بر اساس تجربه $HMCR = 0.7$ و $PAR = 0.2$ فرض شده است. در شکل (۱) فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی نشان داده شده است.



شکل (۱): فلوچارت الگوریتم HS

۳- مدل‌سازی نیروگاه بادی جهت مشارکت واحدهای نیروگاهی

چون انواع مختلفی از توربین‌های بادی با ظرفیت‌ها و مشخصه‌های گوناگون در نیروگاه‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این مقاله نیز از توربین‌هایی با ظرفیت‌های متفاوت استفاده شده است. برآورد انرژی تولید سالیانه نیروگاه، چگونگی اتصال به شبکه سرتاسری یا محلی و مشخصات شبکه از مواردی است که باید دقیقاً مشخص گردد. شکل (۲) میزان توان تعدادی از توربین‌های بادی را برحسب سرعت باد نشان می‌دهد [۲۳].

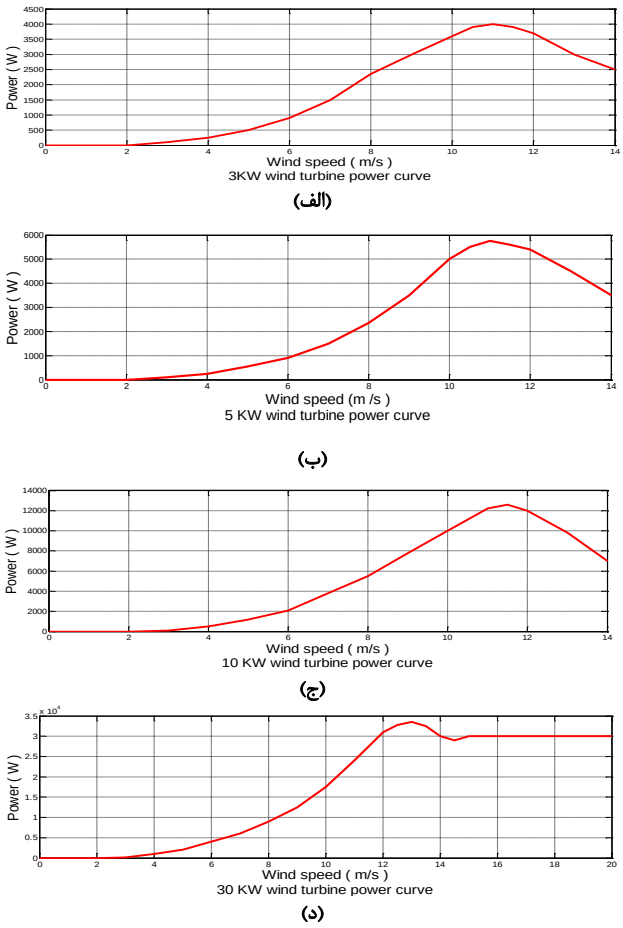
۳-۱- برآورد انرژی تولیدی یک نیروگاه بادی

به دلیل تاثیر عوامل متعدد پیچیده بر میزان وزش باد، برآورد انرژی تولیدی نیروگاه که با سرعت و جهت وزش باد رابطه اساسی دارد و نیازمند محاسبات پیچیده و خاص خود است. درنتیجه به‌منظور برآورد انرژی تولیدی از نرم‌افزارهای متداول نظیر Wind Farmer، WindPro، GH، Wasp و سایر نرم‌افزارهای معتبر استفاده می‌گردد [۲۵].

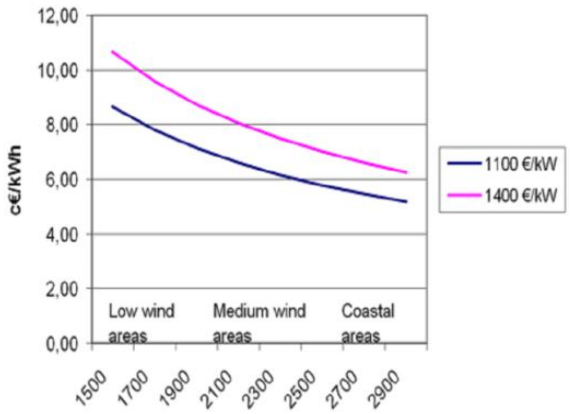
۳-۲- هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به‌علاوه هزینه بهره‌برداری

با بزرگ‌تر شدن اندازه توربین بادی قیمت آن نیز افزایش می‌یابد [۲۳]. یکی از دلایل این امر درجه‌بندی اقتصادی است. بااین‌حال هزینه نیروی انسانی موردنیاز جهت راه‌اندازی توربین‌های بزرگ و کوچک در

بسیاری از موارد یکسان است. در این مقاله هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به‌علاوه هزینه بهره‌برداری برای توربین‌های بادی به‌کاررفته به دو محدوده تقسیم‌بندی شده و به‌صورت نمودار شکل (۳) در نظر گرفته شده که در آن محنی بالا برای توربین با محدوده تولید توان زیاد و منحنی پایین برای توربین با محدوده تولید توان کم استفاده می‌گردد [۲۶]. هم‌چنین بر اساس شکل فوق هزینه تولید توان توربین بادی به بادخیزی منطقه نیز بستگی دارد و در نواحی بادخیز همانند ساحل هزینه تولید کم‌تر است.

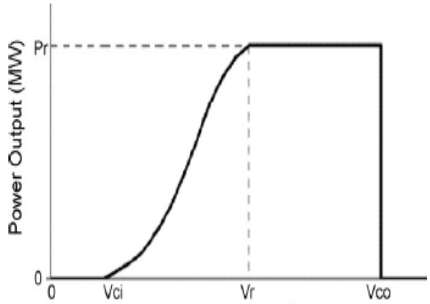


شکل (۲): منحنی توان برحسب سرعت باد برخی از توربین‌های بادی



شکل (۳): منحنی هزینه سرمایه‌گذاری به‌علاوه هزینه بهره‌برداری برحسب یورو بر کیلووات

تولید انرژی الکتریکی توسط واحدهای بادی، شدیداً تابع رفتار باد است. منحنی مشخصه تولید انرژی واحدهای بادی با توجه به سرعت باد، به شکل نوعی مانند شکل (۴) است. که در آن V_{Ci} سرعت متناظر با شروع توان دهی، V_{Cr} سرعت نامی و V_{CO} سرعت خروج توربین از مدار است. استفاده از سرعت متوسط روزانه باد که درواقع سرعت غالب در منطقه است منطقی به نظر می‌رسد. فرض کوچک‌تر بودن سرعت باد در منطقه، نسبت به V_{CO}، انجام محاسبات را بسیار ساده‌تر می‌کند. در این مقاله توان تولیدی نیروگاه بادی برحسب سرعت باد از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد. در این معادله ضرایب ثابت معادله با استفاده از رابطه (۶) به‌دست می‌آیند.



شکل (۴): منحنی مشخصه تولید انرژی الکتریکی برحسب سرعت باد برای یک واحد تولید بادی

$$\begin{cases} P_{WT}=0 & V_{ac}<V_{ci} \\ P_{WT}=\alpha V_{ac}^2+\beta V_{ac}+\gamma & V_{ci}\le V_{ac}<V_r \\ P_{WT}=130 & V_r\le V_{ac}>V_{co} \end{cases} \quad (۵)$$

$$\alpha=\frac{1}{(V_a-V_r)^2}\left\{V_a(V_a+V_r)-4V_aV_r\left[\frac{V_a+V_r}{2V_r}\right]^2\right\}$$

$$\beta=\frac{1}{(V_a-V_r)^2}\left\{4(V_a+V_r)\left[\frac{V_a+V_r}{2V_r}\right]^2-(3V_a+V_r)\right\} \quad (۶)$$

$$\gamma=\frac{1}{(V_a-V_r)^2}\left\{2-4\left[\frac{V_a+V_r}{2V_r}\right]^2\right\}$$

۳-۳- پیش‌بینی سرعت باد در هر ساعت

در این مقاله اطلاعات سرعت باد در طول سال‌های گذشته به‌صورت ساعت‌به‌ساعت اخذ شده و برای هر ساعت متوسط سرعت باد به‌صورت ساعت‌به‌ساعت برای ۲۴ ساعت محاسبه گردیده است. اطلاعات اخذشده از هواشناسی محل جغرافیایی شهر تبریز طبق جدول (۱) استخراج شده و به‌عنوان سرعت متوسط برای هر ساعت جهت محاسبه توان خروجی توربین‌های بادی استفاده گردیده است. در شکل (۵) منحنی روزانه سرعت متوسط بار در یک شبانه‌روز نشان داده شده است. جهت تعیین سرعت باد در ساعت معین t می‌توان از رابطه (۷) با لحاظ کردن سرعت باد در ساعت قبل استفاده کرد.

$$V(t)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10}v(i)^2+v(t-1)^2}{11}} \quad (۷)$$

که در رابطه فوق:

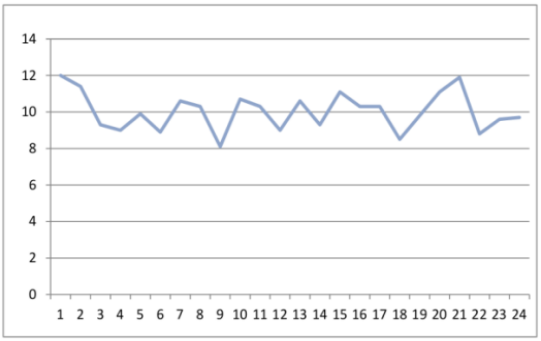
V(i) : سرعت باد در ساعت t در ده سال گذشته

V(t-1) : سرعت باد در ساعت قبل

V(t) : سرعت باد در ساعت t

جدول (۱): متوسط سرعت باد در تبریز برای ۲۴ ساعت برحسب m/s

ساعت	سال									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	12	10	5	8	10	8	8	11	9	15
2	11	12	10	9	9	6	7	12	7	14
3	9	12	8	9	9	9	7	9	7	8
4	9	11	12	11	6	6	8	10	6	8
5	10	10	12	11	6	5	9	10	8	9
6	9	12	11	11	7	10	9	9	6	8
7	10	10	8	10	8	8	7	7	9	9
8	10	9	6	10	9	12	7	6	6	9
9	8	8	9	12	8	12	9	7	5	10
10	11	9	5	12	8	11	9	6	10	10
11	10	9	5	13	9	8	8	7	8	10
12	9	9	12	13	8	6	9	6	11	10
13	11	9	9	15	9	9	9	7	12	10
14	9	8	12	14	9	5	10	6	11	11
15	11	9	13	14	11	5	10	7	8	8
16	10	8	8	14	11	12	9	6	6	8
17	10	8	5	13	11	9	8	7	9	9
18	9	7	5	12	10	12	10	6	5	8
19	10	7	5	10	10	13	9	6	5	9
20	11	8	9	10	12	8	11	6	12	7
21	11	7	9	7	12	5	11	6	9	12
22	9	7	10	8	13	5	10	6	12	10
23	10	6	7	7	13	5	10	6	13	16
24	10	7	10	8	15	9	13	6	8	18

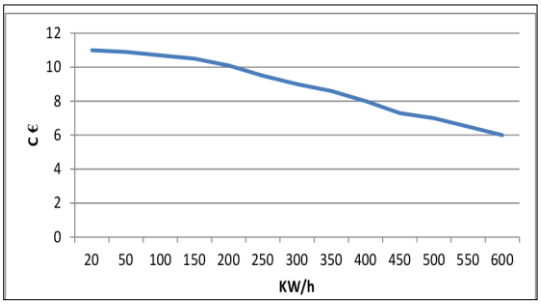


شکل (۵): منحنی مشخصه سرعت باد در یک شبانه‌روز

۳-۴- منحنی و تابع هزینه برحسب توان توربین بادی

در شکل (۲) منحنی‌های توان تولیدی برحسب سرعت باد هر یک از توربین‌ها ارائه شده است هم‌چنین در شکل (۳) نیز منحنی‌هایی ارائه شده است که هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری یک توربین بادی را نشان می‌دهد. ازآنجاکه در مسئله UC وجود تابع هزینه نیروگاه‌ها برحسب توان تولیدی آن‌ها حائز اهمیت است. بنابراین با ترکیب این دو منحنی، منحنی هزینه هر توربین بادی برحسب توان تولیدی محاسبه و با استفاده یک منحنی درجه دوم تقریب زده شده است. این منحنی در شکل (۶) نشان داده شده است. هم‌چنین ضرایب معادله درجه دوم نیز در جدول (۷) آورده شده است.

چون اطلاعات مربوط به سرعت باد و توان تولیدی توربین در طول ۲۴ ساعت در دسترس است، لذا می‌توان هزینه توان تولیدی توربین در هر ساعت از شبانه‌روز را به‌دست آورد. در شکل (۶) شیب منحنی هزینه- توان یک شیب کاهشی است و علت این امر سرعت باد در منطقه موردمطالعه و ساختار توربین‌های بادی است. چون هر توربین یک محدوده خاص تولید توان منحصربه‌فرد را دارا است که به‌شدت وابسته به سرعت باد است، بنابراین در ساعاتی از شبانه‌روز که سرعت باد کم است به نسبت آن توان تولیدی کاهش و هزینه‌ها افزایش خواهد.



شکل (۶): منحنی مشخصه هزینه- توان

۴- مدل‌سازی نیروگاه خورشیدی جهت مشارکت واحدهای نیروگاهی

در این قسمت نحوه مدل‌سازی نیروگاه‌های خورشیدی در مسئله مشارکت واحدهای نیروگاهی بیان می‌گردد. بازده نیروگاه خورشیدی و مسائل اقتصادی و طراحی آن با یک اندازه بهینه از موارد مهم در احداث یک نیروگاه خورشیدی به شمار می‌رود. با طراحی بهینه می‌توان با کم‌ترین هزینه سرمایه‌گذاری به قابلیت اطمینان موردنیاز دست یافت.

۴-۱- محاسبه توان خروجی نیروگاه خورشیدی

توان تولی شده توسط سیستم فتوولتائیک به‌صورت زیر قابل بیان است [۲۷]:

$$P_{PV}(i,t)=\eta_m\eta_{elec}A_m\,G_t(i,t)\times(1-\beta_t(T_c(i,t)-T_r)) \qquad (۸)$$

که در این رابطه A_m مساحت کل پانل‌های فتوولتائیک (m^2)، η_m راندمان ماژول، η_{elec} راندمان الکتریکی مبدل، T_r دمای مرجع سلول فتوولتائیک، β_t ضریب حرارتی، G_t تابش کل خورشید برحسب w/m^2 است. در رابطه فوق دمای سلول از معادله (۹) به‌دست می‌آید:

$$T_c(i,t)=T_a(i,t)+G_t(i,t)\times(\frac{T_n-20}{800}) \qquad (۹)$$

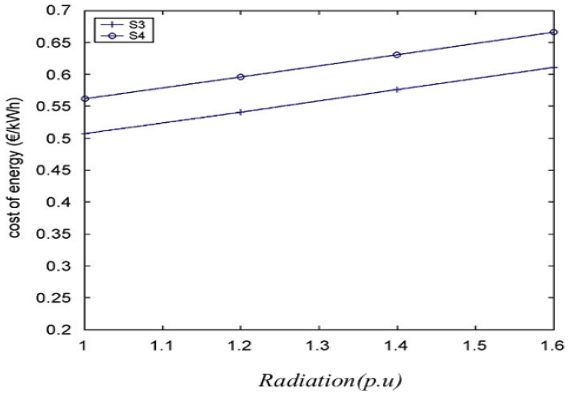
در این رابطه T_a دمای محیط و T_n دمای نامی کارکرد سلول است. انرژی عرضه‌شده توسط سیستم فتوولتائیک به‌صورت زیر است [۲۸]:

$$E_{PV}(i,t) = P_{PV}(i,t) \times \Delta t \qquad (۱۰)$$

که در آن P_{PV} توان سیستم فتوولتائیک است.

۴-۲- هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه بهره‌برداری

در شکل (۷) هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه بهره‌برداری برای نیروگاه خورشیدی ارائه شده است [۲۹]. هم‌چنین در شکل (۸) نیز منحنی متوسط شدت تابش خورشید در شهر تبریز برای یک شبانه‌روز ارائه شده است که مبنای محاسبه توان خروجی نیروگاه خورشیدی است.



شکل (۷): هزینه سرمایه‌گذاری و به‌علاوه هزینه بهره‌برداری از نیروگاه خورشیدی برحسب شدت تابش خورشید

۴-۳- منحنی و تابع هزینه برحسب توان نیروگاه بادی

تنها روش مناسب برای پیش‌بینی و قضاوت درباره تابش خورشید یک منطقه رجوع به اطلاعات آماری و بررسی دقیق آن‌ها است. در این مقاله به‌صورت روزانه و ساعت‌به‌ساعت است.

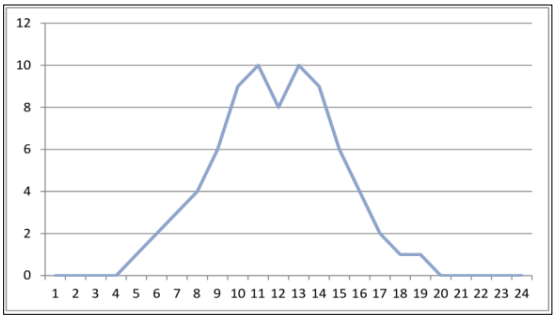
مشابه با نیروگاه‌های بادی، آمار و اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی در سال‌های گذشته اخذ شده و متوسط تابش خورشید برای هر ساعت در سال‌های گذشته برای ۲۴ ساعت محاسبه و در جدول (۲) ارائه گردیده است.

با ترکیب منحنی‌های هزینه- تابش خورشید (شکل (۷)) و شدت تابش خورشید (شکل (۸)) منحنی و تابع هزینه تولید نیروگاه خورشیدی می‌آید (شکل (۹)). ازآنجایی‌که اطلاعات مربوط به تابش خورشید و توان تولیدی سلول خورشیدی در طول ۲۴ ساعت در دسترس است، می‌توان هزینه توان تولیدی نیروگاه خورشیدی را در هر ساعت از شبانه‌روز محاسبه کرد.

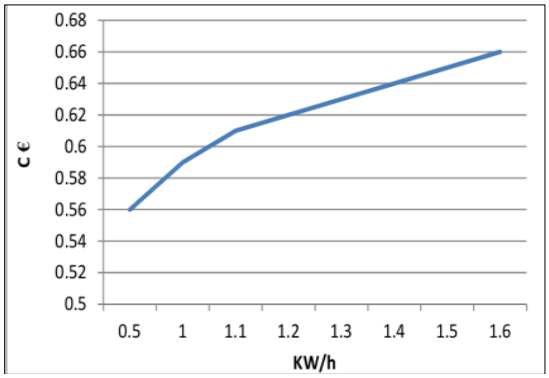
بر اساس شکل (۹) شیب منحنی هزینه-توان برای نیروگاه خورشیدی، یک شیب افزایشی است. با افزایش توان شیب این منحنی افزایش می‌یابد که به‌شدت تابش خورشید در منطقه موردمطالعه و ساختار سلول خورشیدی بستگی دارد. چون هر سلول خورشیدی یک

جدول (۲): متوسط تابش خورشید در تبریز برای ۲۴ ساعت kWh / m^2

ساعت	سال									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	3	2	1	2	1	3	1	2	1	1
7	2	3	3	2	1	3	2	4	2	1
8	5	4	4	3	3	5	4	5	2	3
9	4	6	6	4	5	5	3	4	4	5
10	5	9	6	7	6	8	5	6	5	4
11	6	10	5	7	7	10	8	7	7	5
12	6	8	7	10	7	10	8	9	8	7
13	6	10	7	9	7	10	9	7	8	9
14	5	9	6	10	8	8	9	5	7	6
15	3	6	4	7	5	7	6	3	5	6
16	2	4	4	5	5	4	4	1	2	3
17	1	2	3	2	3	3	3	2	2	3
18	1	1	2	1	1	3	1	1	2	1
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



شکل (۸): منحنی شدت تابش خورشید برای یک شبانه‌روز (تابستان)



شکل (۹): منحنی مشخصه هزینه- توان سلول خورشیدی

محدوده خاص تولید توان منحصربه‌فرد را دارا است که به‌شدت وابسته به تابش خورشید است، پس در ساعاتی از شبانه‌روز که تابش خورشید کم است به نسبت آن توان تولیدی کاهش و هزینه‌ها افزایش خواهد یافت و در ساعاتی که شدت تابش خورشید زیاد است توان تولیدی کمتر بوده و هزینه‌های تولید کاهش می‌یابد.

۵- فرمول‌بندی مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی

هدف از برنامه‌ریزی جهت مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی تعیین توان تولیدی هر یک از آن‌ها در یک بازه زمانی مشخص با حداقل هـزینه و رعـایت تمامی قیود و محدودیت‌های تولید است. به‌عنوان‌مثال محدودیت‌هایی مانند، حداقل زمان خاموشی و حداقل زمان روشن شدن واحدها، تلفات، زون‌های ممنوعه، شیب افزایش تولید و غیره از مهم‌ترین این محدودیت‌ها هستند. مسئله فوق بـا روش‌های و الگوریتم‌های متفاوت حل شده است که از آن می‌توان به روش‌های برنامه‌ریزی مانند روش توسعه‌یافته لاگرانژ، برنامه‌ریزی دینامیکی، برنامه‌ریزی عدد صحیح و نیز روش‌های هوشمند اشاره کرد [۳۰-۲۰]. هم‌چنین این مسئله می‌تواند در محیط بازار برق نیز مطرح گردد که در آن قیود مربوط به امنیت نیز وارد مسئله می‌گردد و از آن به‌عنوان مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی با حفظ معیارهای امنیتی (Security Constraints Unit Commitment) یاد می‌گردد. در این روش محدودیت‌هایی مانند تغذیه بار، حداکثر کردن حدود امنیت و حداقل‌سازی هزینه از مهم‌ترین این قیود است [۱۶].

۵-۱- تابع هدف در مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی

مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی به‌صورت معادله (۱۱) در غالب یک مسئله بهینه‌سازی بیان می‌گردد:

$$SC=\sum_{i}^{n}\sum_{t}^{T}[[FC_i(P_i(t))+L_i(P_i(t))]\times U_{it}+C_{ON}+C_{OFF} \qquad (۱۱)$$

SC: هزینه بهره‌برداری سیستم

i : شاخص واحد نیروگاهی

t : شاخص زمان

n : تعداد واحدهای نیروگاهی

T : دوره برنامه‌ریزی (۲۴ ساعت)

P_{it}: توان تولیدی واحد i در زمان t

FC_i: تابع هزینه تولید و نگهداری واحد نیروگاهی i

$L_i(.)$: تابع هزینه انتشار آلاینده‌های واحد

U_{it}: وضعیت مشارکت واحد i در زمان t
(۱: روشن ۰: خاموش)

$C_{ON_{it}}$ / $C_{OFF_{it}}$: هزینه راه‌اندازی / خاموش‌کردن واحد i در زمان t

بنابراین هزینه بهره‌برداری شامل هزینه تولید و نگهداری، هزینه انتشار آلاینده‌هـا، هزینه راه‌انـدازی و هزینه خاموش‌کـردن واحـدها است. یکی از مهم‌ترین پارامترها در بهره‌برداری اقتصادی هزینه تولید و نگهداری (۱۲) است، که به‌صورت یک معادله درجه‌دو از توان خروجی واحد بیان می‌گردد. در مسئله پخش بار اقتصادی و نیز مشارکت واحدهـای نیروگاهی این تابع با رعایت قیود مسئله حداقل می‌گردد.

$$FC_i(P_i(t))=A_i+B_iP_i(t)+C_iP_i^2(t) \qquad (۱۲)$$

که در این رابطه، A_i , B_i , C_i ضرایب هزینه می‌باشند.

۵-۲- تابع هزینه تولید واحدهای تجدیدپذیر

همان‌گونه که بیان شد در این مقاله یک تابع تحلیلی مرتبه دو برای هزینه‌های تولید واحدهای تجدیدپذیر ارائه شده است که از رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد.

$$FC_{RER_i}(P_{RER_t}(t))=\alpha_i+\beta_iP_{RER_t}(t)+\gamma_iP_{RER_t}(t)^2 \qquad (۱۳)$$

که در آن $P_{RER_t}(t)$ توان تولیدی واحد تجدیدپذیر i در ساعت t است. ضرایب ثابت α_i , β_i ,γ_i از جدول (۷) محاسبه می‌گردند.

۵-۳- هزینه راه‌اندازی

ازآنجاکه درجه حرارت و فشار یک واحد حرارتی باید به آهستگی تغییر نماید، حد مشخصی از انرژی باید مصرف شود تا بتوان واحد را وارد مدار کرد. این انرژی هیچ تولید موثری از واحد را باعث نمی‌شود و در مسئله مشارکت واحدها به‌عنوان هزینه راه‌اندازی موسـوم اسـت. هزینه راه‌اندازی می‌تواند از حداکثری که به هزینه راه‌اندازی سرد موسوم است تا مقدار بسیار کم‌تری که واحد به‌تازگی متوقف شده باشد و درجه حرارت در نزدیکی حد معمول باشد، تغییر داشته باشد. در حالت کلی هزینه راه‌اندازی می‌توان به‌صورت یک مقدار ثابت (۱۴) بیان گردد و یا با استفاده از یک رابطه نمایی به متغیرهای واحد مرتبط گردد. در این مقاله از مقادیر ثابت برای هزینه‌های راه‌اندازی سرد و گرم استفاده شده است.

$$C_{ON_{it}}=\begin{cases} h-\cos t_{it}: & T_i^{off}\le X_{it}^{off}\le H_i^{off} \\ c-\cos t_{it}: & X_{it}^{off}>H_i^{off} \end{cases} \qquad (۱۴)$$

$h-\cos t_{it}$: هزینه راه‌اندازی گرم واحد i در زمان t

$c-\cos t_{it}$: هزینه راه‌اندازی سرد واحد i در زمان t

T_i^{off}: حداقل زمان توقف واحد i ،

X_{it}^{off}: مدت‌زمان توقف واحد i در زمان t (مدت‌زمانی که واحد i متوقف بوده است)،

H_i^{off}: ساعت انتقال

۵-۴- هزینه خاموش‌کردن واحد

هزینه خاموشی برای هر واحد حرارتی یک مقدار ثابت است و در سیستم‌های استاندارد مقدار آن صفر در نظر گرفته می‌شود.

۵-۵- تعادل توان حقیقی سیستم

در هـر ساعت برنامه‌ریزی توان تولیدی توسط تمام واحدهای برنامه‌ریزی شده بایستی تقاضای بار و تلفات سیستم را ارضاء نماید.

$$\sum_{i}^{n} P_{it}U_{it} = P_{Demand_t} + P_{Loss_t} \qquad t = 1,2,\ldots,T \qquad (۱۵)$$

$P_{Demand,t}$: میزان تقاضای سیستم در زمان

$P_{Loss,t}$: میزان تلفات سیستم در زمان

در این مقاله از تاثیر تلفات صرف‌نظر شده است.

۵-۶- ذخیره چرخان

ذخیره چرخان واژه‌ای است که به تفاوت بین کل ظرفیت بالقوه فعال سیستم و مجموع بار و تلفات اطـــلاق می‌شود. ذخیره چرخان باید در سیستم موجود باشد تا درصورتی‌که از دست رفتن یک یا چند واحد، افت شدیدی در فرکانس سیستم ایجاد نشود. به عبارتی در صورت از دست رفتن یک واحد، باید ذخیره کافی در سایر واحدها وجود داشته باشد تا در یک زمان مشخص کمبود را جبران نماید. قید ذخیره چرخان به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sum_{i}^{n} P_{it,\max}U_{it} \geq P_{Demand_t} + P_{Loss_t} + R_t \qquad t = 1,2,\ldots,T \qquad (۱۶)$$

$P_{it,\max}$:حداکثر توان تولیدی واحد در زمان

R_t : ذخیره چرخان سیستم در زمان

در این تحقیق ۱۰ درصد از کل تولید به‌عنوان ذخیره چرخان سیستم در نظر گرفته شده است.

۵-۷- حدود تولید واحدها

هر واحد تولیدی یک محدوده تولید توان اکتیو دارد که به‌صورت حداقل و حداکثر توان تولیدی واحد نشان داده می‌شود.

$$P_{i,\min}U_{it} \leq P_{it} \leq P_{i,\max}U_{it} \quad (i=1,2,\ldots,n)\ \&\ (t=1,2,\ldots,T) \qquad (۱۷)$$

۶- معرفی سیستم موردمطالعه

سیستم موردمطالعه پایه شبکه ۳۹ شینه IEEE با ۱۰ واحد حرارتی است. در ابتدا مسئله UC بدون حضور واحدهای تجدیدپذیر موردمطالعه قرار گرفته است تا بتوان نتایج به‌دست‌آمده را ازنقطه‌نظر کارایی الگوریتم بهینه‌سازی و زمان شبیه‌سازی با روش‌های و الگوریتم‌های دیگر مقایسه نمود. آنگاه با توسعه مسئله UC، حضور نیروگاه‌های تجدیدپذیر در سیستم ۱۰ واحدی موردمطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. در این مقاله به جهت محدودیت در حجم مطالب سیستم فوق با دو نیروگاه بادی و یک نیروگاه خورشیدی موردمطالعه قرار گرفته است.

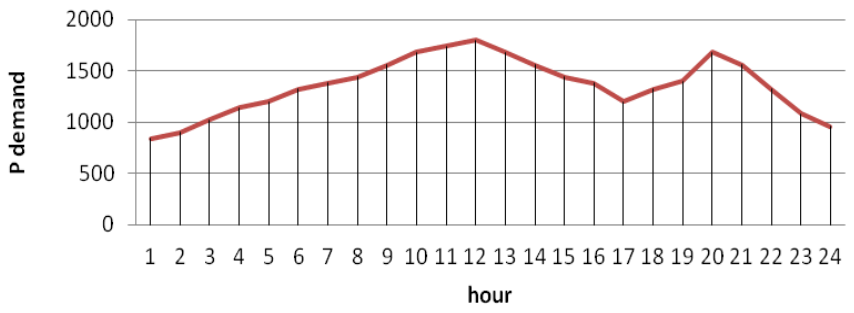
اطلاعات شبکه پایه بدون حضور واحدهای تجدیدپذیر در جدول (۳) نشان داده شده است. همچنین منحنی بار روزانه سیستم ۱۰ واحدی نیز در جدول (۴) و شکل (۱۰) ارائه شده است [۱۶].

جدول(۳): شبکه ۱۰ واحدی حرارتی با استاندارد IEEE

Units	Pmax	Pmin	MDT	MUT	a	b	c	Hcost	Ccost	Chour	SDT
Unit1	455	150	8	8	1000	16.19	0.00048	4500	9000	5	8
Unit2	455	150	8	8	970	17.26	0.0031	5000	10000	5	8
Unit3	130	20	5	5	700	16.16	0.002	550	1100	4	5
Unit4	130	20	5	5	680	16.5	0.00211	560	1120	4	5
Unit5	162	25	6	6	450	19.7	0.00398	900	1800	4	6
Unit6	80	20	3	3	370	22.26	0.00712	170	340	2	3
Unit7	85	25	3	3	480	27.74	0.0079	260	520	2	3
Unit8	55	10	1	1	660	25.92	0.00413	30	60	0	1
Unit9	55	10	1	1	665	27.27	.00222	30	60	0	1
Unit10	55	10	1	1	670	27.79	0.00173	30	60	0	1

جدول(۴): مشخصات بار درخواستی سیستم موردمطالعه در۲۴ ساعت

H	Load	H	Load	H	Load	H	Load	H	Load	H	Load
1	840	5	1200	9	1560	13	1680	17	1200	21	1560
2	900	6	1320	10	1680	14	1560	18	1320	22	1320
3	1020	7	1380	11	1740	15	1440	19	1400	23	1080
4	1140	8	1440	12	1800	16	1380	20	1680	24	960



شکل (۱۰): منحنی بار روزانه سیستم ۱۰ واحدی

۷- شبیه‌سازی و ارائه نتایج

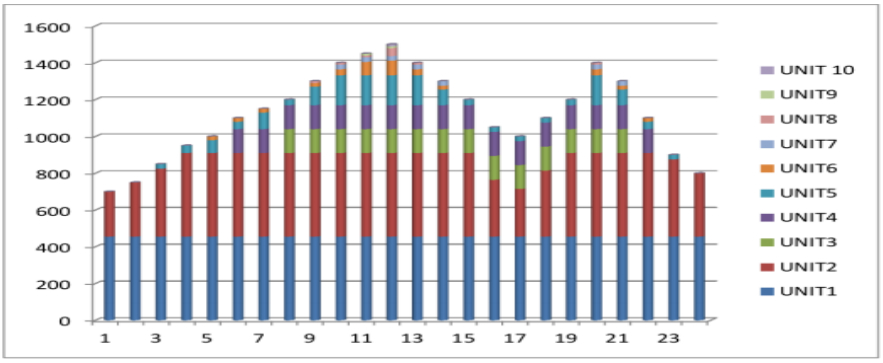
برای شبیه‌سازی سیستم از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. توجه داشته باشید که تابع هزینه واحدهای حرارتی، به‌این‌ترتیب از شماره ۱ تا شماره‌های ۱۰ (به‌جز واحد ۲ که پایین‌ترین تابع هزینه را دارد.) به ترتیب سیر صعودی از نظر هزینه دارند.

۷-۱- شبکه پایه بدون نیروگاه‌های بادی و خورشیدی

در این حالت سیستم ۱۰ واحدی IEEE موردمطالعه قرار گرفته و نتایج آن که شامل توان تولیدی نیروگاه‌ها و هزینه تولید است در جدول (۵) به‌طور کامل ارائه شده است. سهم هر کدام از واحدهای تولیدی در طول ۲۴ ساعت در تامین بار شبکه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در جدول (۶) نتایج به‌دست‌آمده برای سیستم ۱۰ واحدی در این مقاله برای شبکه پایه با نتایج تعدادی از مقالات مقایسه گردیده است همان‌طور که از جدول استنباط می‌گردد روش بهینه-سازی ارائه‌شده در مقاله حاضر به نتایج قابل قبولی منتهی گردیده است. به دلیل عدم وجود مدل‌سازی مشابه سیستم ۱۰ واحدی در حضور منابع تجدیدپذیر امکان مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با روش‌های دیگر وجود ندارد. ازاین‌رو نویسندگان مقاله کارایی الگوریتم در مقایسه جواب‌ها را به شبکه پایه محدود نموده‌اند.

جدول (۵): ترتیب در مدار قرار گرفتن ۱۰ واحد تولیدی حرارتی IEEE در ۲۴ ساعت

ساعت	شماره واحد									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0
2	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0
3	455	370	0	0	25	0	0	0	0	0
4	455	455	0	0	40	0	0	0	0	0
5	455	455	0	0	70	20	0	0	0	0
6	455	455	0	130	40	20	0	0	0	0
7	455	455	0	130	90	20	0	0	0	0
8	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0
9	455	455	130	130	99.9	20	0	10	0	0
10	455	455	130	130	162	32.9	25	10	0	0
11	455	455	130	130	162	73	25	10	10	0
12	455	455	130	130	162	80	25	43	10	10
13	455	455	130	130	162	32.9	25	10	0	0
14	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0
15	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0
16	455	310	130	130	25	0	0	0	0	0
17	455	260	130	130	25	0	0	0	0	0
18	455	360	130	130	25	0	0	0	0	0
19	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0
20	455	455	130	130	162	32.9	25	10	0	0
21	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0
22	455	455	0	130	40	20	0	0	0	0
23	455	425	0	0	20	0	0	0	0	0
24	455	345	0	0	0	0	0	0	0	0
هزینه کل بدون در نظر گرفتن هزینه راه‌اندازی واحدها					۵۵۹۸۴۷/۶۹					
هزینه راه‌اندازی سرد و گرم واحدها					۵۹۸۰					
هزینه کل با در نظر گرفتن هزینه راه‌اندازی سرد و گرم واحدها					۵۶۵۸۲۷/۶۹					



شکل (۱۱): منحنی مشارکت ۱۰ واحد حرارتی استاندارد IEEE

جدول (۶): مقایسه هزینه‌های به‌دست‌آمده با روش‌های دیگر

روش	هزینه بهره‌برداری بهینه ($)	زمان شبیه‌سازی (s)	مدل کامپیوتر	
LR [6]	565825	-	-	1996
PSO-LR [35]	565869	42	Dell Dim 4100	2004
GA [32]	565825	221	HP Apollo 720 Workstation	1996
GRASP [33]	565825	8.65	HP Apollo, 200 MHz Ultra SC	2008
BF [34]	565872	80	Pentium 4-2GHz, 512Mb of RAM	2009
MILP[36]	-	0.97	Dell Power Edge 6600, 1.60GHz & 2GB RAM	2006
DE [37]	563446	-	-	2012
HAS[38]	563977	-	-	2010
HAS[16]	565827.69	6.9	Sony VAIO FW57 2GB RAM & 2.8MHz	2012
BRABC[39]	563938	-	-	2012
SGA[31]	565825			
Proposed HS	565827.69	6.5		

۶-۳- شبکه پایه با نیروگاه‌های بادی و خورشیدی

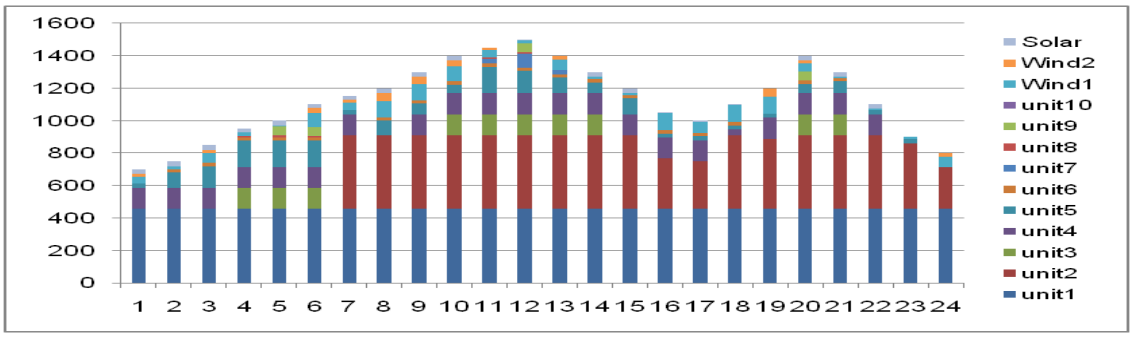
در این بخش دو واحد نیروگاه بادی که هر یک از نیروگاه‌ها در مناطقی قرار گرفته‌اند که در آن‌ها سرعت باد متفاوت است، هم‌چنین یک نیروگاه خورشیدی، به سیستم ۱۰ واحدی اضافه می‌شود. مهم‌ترین بحث در این قسمت تخمین هزینه‌های تولید نیروگاه‌های بادی و خورشیدی با یک معادله درجه دوم همانند نیروگاه‌های حرارتی است. در جدول (۷) ضرایب مربوط به معادله درجه‌دو برای دو واحد مزرعه بادی و یک واحد نیروگاه خورشیدی به همراه ظرفیت نامی آن‌ها محاسبه و ارائه شده است و به‌عنوان توابع هزینه برای این واحدها وارد مسئله پخش‌بار اقتصادی می‌گردند. در جدول (۸) نتایج مربوط به مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در حضور منابع تولید پراکنده نشان داده شده است. هم‌چنین در این جدول هزینه کل بهره‌برداری سیستم نیز ارائه شده است. در این جدول سه ستون آخر مربوط به توان‌های تولیدی بهینه برای هرکدام از واحدهای تجدیدپذیر است. در شکل (۱۲) مشارکت هرکدام از واحدهای حرارتی و تجدیدپذیر در هر ساعت بهره‌برداری نیز به‌صورت میله‌ای نشان داده شده است. با مقایسه جداول (۵) و (۸) چنین استنباط می‌گردد که سیستم فوق جهت تامین بار کل شبکه در حضور منابع تجدیدپذیر هزینه بهره‌برداری کم‌تری را متحمل می‌گردد. البته شایان ذکر است که مقایسه مناسب وقتی امکان‌پذیر خواهد بود که هزینه احداث و بهره‌برداری و نیز سود حاصل از توان تولیدی هر واحد در طول دوره عمر آن محاسبه و مقایسه گردد. یکی از معیارهای مقایسه هزینه‌های تولید در هر ساعت، هزینه افزایشی سیستم (λ) است. برای مقایسه هزینه‌های افزایشی سیستم مقادیر فوق برای ۲۴ ساعت و برای دو حالت مطالعه در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌گردد که در حالت کلی هزینه‌های افزایشی سیستم در حضور منابع تجدیدپذیر کم‌تر بوده است.

جدول (۷): شبکه ۱۰ واحدی حرارتی با استاندارد IEEE با ۲ واحد بادی و ۱ واحد خورشید

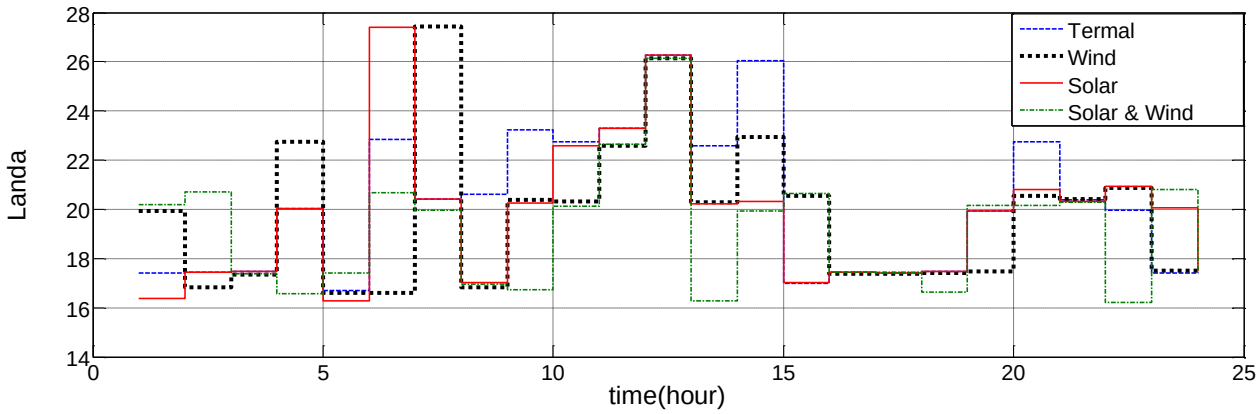
Unit	Pmax	Pmin	MDT	MUT	a	b	c	Hcost	Ccost	Chour	SDT
Wind1	105	5	1	1	100	-6.591	0.0032	0	0	0	0
Wind2	105	5	1	1	200	-8.131	0.00483	0	0	0	0
Solar	30	5	1	1	181	6.299	-0.00168	0	0	0	0

جدول (۸): ترتیب در مدار قرار گرفتن ۱۰ واحد تولیدی حرارتی IEEE با ۲ واحد بادی و ۱ واحد خورشیدی در ۲۴ ساعت

Hours (h)	شماره واحد												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Wind1	Wind2	Solar
1	455	0	0	130	59.8	0	0	0	0	0	40.2	15	0
2	455	0	0	130	125.3	20	0	0	0	0	19.7	0	0
3	455	0	0	130	155	30	0	0	0	0	60	20	0
4	455	0	130	130	162	20	0	10	0	0	20	0	23
5	455	0	130	130	162	21	0	10	55	0	7	0	30
6	455	0	130	130	162	20	0	10	55	0	83	33	22
7	455	455	0	130	25	0	0	0	0	0	45	17.5	22.5
8	455	455	0	0	89.8	20	0	0	0	0	100	50	30
9	455	455	0	130	66.6	20	0	0	0	0	97.1	46.3	30
10	455	455	130	130	52.7	20	0	0	0	0	92.2	35.1	30
11	455	455	130	130	162	22.3	25	10	0	0	44.5	16.2	0
12	455	455	130	130	137	20	85	10	55	0	18.1	0	5
13	455	455	130	130	95.4	20	25	0	0	0	67	22.5	0
14	455	455	130	130	64.9	20	0	0	0	0	15.1	0	30
15	455	455	0	130	96.8	20	0	0	0	0	13.1	0	30
16	455	311	0	130	25	20	0	0	0	0	104	0	5
17	455	294	0	130	25	20	0	0	0	0	70.1	0	5
18	455	455	0	35	25	20	0	0	0	0	105	0	5
19	455	434	0	130	25	0	0	0	0	0	102	53.1	0
20	455	455	130	130	57.2	20	0	0	55	0	50.1	17.7	30
21	455	455	130	130	71.2	20	0	0	0	0	8	0	30
22	455	455	0	130	25	0	0	0	0	0	9	0	26
23	455	405	0	0	25	0	0	0	0	0	15.1	0	0
24	455	259	0	0	0	0	0	0	0	0	63.8	22.3	0
هزینه کل بدون در نظر گرفتن هزینه راه‌اندازی واحدها						۵۴۹۱۷۴							
هزینه راه‌اندازی سرد و گرم واحدها						۵۹۸۰							
هزینه کل با در نظر گرفتن هزینه راه‌اندازی سرد و گرم واحدها						۵۵۵۱۵۴							



شکل (۱۲): منحنی مشارکت ۱۰ واحد حرارتی استاندارد IEEE با ۲ واحد بادی و ۱ واحد خورشیدی در ۲۴ ساعت



شکل (۱۳): منحنی هزینه افزایشی (λ) سیستم برای حالت‌های مختلف

۸- نتیجه‌گیری

مسئله مشارکت بهینه واحدهای تولیدی حرارتی با توجه به قیود و محدودیت‌های آن از مسائل پیچیده در برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت محسوب می‌گردد. در این میان مدل‌سازی منابع تجدیدپذیر و حل دوباره مسئله با حضور این منابع با توجه به رفتار احتمالی در توان تولیدی آن‌ها به پیچیدگی مسئله می‌افزاید. در این مقاله مسئله مشارکت واحدهای تولیدی یک‌بار بدون در نظرگیری منابع باد و خورشیدی و بار دیگر در حضور آن‌ها با استفاده از الگوریتم ابتکاری جستجوی هارمونی حل و نتایج آن مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده برای شبکه پایه با روش‌های مهم استفاده‌شده در این مبحث مقایسه شد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد کـه درمجموع بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت در حضور این منابع به هزینه‌های کم‌تری منجر می‌گردد. با در نظر گرفتن سایر مزایای این واحدها اهمیت بهره‌برداری از منابع تولید پـراکنده بیش‌تر نـیز می‌گـردد. نتـایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که باوجود هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا نسبت به منابع قدیمی در زمینه نیروگاه‌های تجدیدپذیر، با مشارکت این واحدها در تامین توان درخواستی، از هزینه‌ها نسبت به زمانی که فقط از منابع قدیمی استفاده گردد کاسته می‌شود و این منابع در درازمدت منافع زیادی را نصیب سرمایه‌گذار خواهند کرد.

مراجع

[1] T. Senjyu, K. Shimabukuro, K. Uezato and T. Funabashi, “A fast technique for unit commitment problem by extended priority list,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, pp, 882–88, 2003.

[2] K. Chandram, N. Subrahmanyam and M. Sydulu, “Unit commitment by improved pre-prepared power demand table and Muller method,” Electrical Power and Energy Systems, Vol. 33, pp. 106–14, 2011.

[3] Z. Ouyang and S. M. Shahidehpour, “An intelligent dynamic programming for unit commitment application,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 1203–1209, 1991.

[4] J. L. Lopez, J. L. Ceciliano-Meza, I. G. Moya and R. N. Gomez, “A MIQCP formulation to solve the unit commitment problem for large-scale power systems,” Electrical Power and Energy Systems, Vol. 36, pp. 68–75, 2012.

[5] S. Virmani, E. C. Adrian, K. Imhof and S. Mukherjee, “Implementation of a Lagrangian relaxation based unit commitment problem,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 4, pp. 1373–1380, 1989.

[6] F. Zhuang and F. D. Galiana, “Toward a more rigorous and practical unit commitment by Lagrangian relaxation,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 763–773, 1988.

[7] S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis and V. Petridis, “A genetic algorithm solution to the unit commitment problem,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 83–92, 1996.

[8] H. Mori and O. Matsuzaki, “Application of priority-list-embedded tabu search to unit commitment in power systems,” The Institution of Electrical Engineering of Japan, Vol. 121-B, No. 4, pp. 535–541, 2009.

[9] K. A. Juste, H. Kita, E. Tanaka and J. Hasegawa, “An evolutionary programming solution to the unit commitment problem,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 4, pp. 1452–1459, 1999.

[10] A. Y. Saber, T. Senjyu, T. Miyagi, N. Urasaki and T. Funabashi, “Fuzzy unit commitment scheduling using absolutely stochastic simulated annealing,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 2, pp. 955–964, 2006.

[11] C. C. A. Rajan and M. R. Mohan, “An evolutionary programming-based tabu search method for solving the unit commitment problem,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 3, pp. 577-785, 2004.

[12] T. Sum and W. Ongsakul, “Ant colony search algorithm for unit commitment,” IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 72–77, 2003.

[13] D. N. Simopoulos, S. D. Kavatza and C. D. Vournas, “Reliability constrained unit commitment using simulated annealing,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 4, pp. 1699-1606, 2006.

[14] K. Vaisakh and L. R. Srinivas, “Evolving ant colony optimization based unit commitment,” Applied Soft Computing, Vol. 11, pp. 2863–2870, 2011.

[15] T. Ming-Tang, G. Hong-Jey and L. Whei-Min, “Hybrid Taguchi-immune algorithm for the thermal unit commitment,” Electrical Power and Energy Systems, Vol. 33, pp. 1062-1069, 2011.

[16] S. Najafi and Y. Pourjamal, “A HS based solution to the unit commitment problem,” Electrical Power and Energy Systems, Vol. 46, pp. 211-220, 2013.

[17] Y. Zhu and K. Tomsovic, “Development of models for analyzing the load following performance of micro turbines and fuel cells,” Electric Power Systems Research, Vol. 62, No. 1, pp. 1–11, 2002.

[18] A. F. Farret and M. G. Simoes, *Integration of Alternative Sources of Energy*, John Wiley & Sons, Ltd, New Jersey, 2006.

[19] S. Paudyal and S. Dahal, “Impact of plug-in hybrid electric vehicles and their optimal deployment in smart grids,” Universities Power Engineering Conference (AUPEC), pp. 1-6, 2011.

[20] J. H. Talaq, F. El-Hawary and M. E. El-Hawary, “A summary of environmental/ economic dispatch algorithms,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4, pp. 1508–1516, Aug. 1994.

[21] Z. W. Geem and J. C. Williams, “Harmony search and ecological optimization,” International Journal of Energy and Environment, Vol. 1, No. 2, pp. 150-155, 2007.

[22] C. A. Hernandez-Aramburo, T. C. Green and N. Mugniot, “Fuel consumption minimization of a microgrid,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 3, pp. 673 – 681, May 2005.

[23] S. Häggmark, V. Neimane, U. Axelsson, P. Holmberg, G. Karlsson, K. Kauhaniemi, M. Olsson and C. Liljergren, “Aspects of different distributed generation technologies,” CODGUENT WP. March 2003. [Online].

[24] http://www.energia.fi/attachment.asp?Section=1353&Item=10792.

[25] http://www.mabena.com

[26] Rosas, P., ‘‘Dynamic influences of wind power on the power system’’, Orsted DTU, PhD Thesis, March 2003.

[27] http://www.wind-energy-the-facts.org

[28] J. Padulles, G. W. Ault, C. A. Smith and J. R. McDonald, “Fuel cell plant dynamic modeling for power systems simulation,” In Proceedings of 3rd Universities Power Engineering Conference, Vol. 34, pp. 21–25, 1999.

[29] F. M. Ishengoma, L. E. Norum "Design and implementation of digitally controlled stand-alone photovoltaic power supply," Department of Electrical Power Engineering, Norwegian University of Science and Technology., O.S. Bragstads Plass 2e, 7491 Trondheim, Norway.
[30] http://www.seekingalpha.com
[31] J. Valenzuela , A. E. Smith, "A seeded memetic algorithm for large unit commitment problems," Journal of Heuristics, Vol. 8, No. 2, pp. 173-195, March 2002.
[32] S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis and Petridis, "A genetic algorithm solution to the unit commitment problem," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 83-92, 1996.
[33] A. Viana, J. P. de Sous, M. A. Matos, "Fast solutions for UC problems by a new metaheuristic approach," Electric Power Systems Research, Vol. 78, No. 8, pp. 1385-1395, 2008.
[34] M. Eslamian, S. H. Hosseinian and B. Vahidi, "Bacterial foraging-based solution to the unit-commitment problem," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 3, pp. 1478-1488, 2009.
[35] H. H. Balci and J. F. Valenzuela, "Scheduling electric power generators using particle swarm optimization combined with the Lagrangian relaxation method," International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol. 14, No. 3, pp. 411-421, 2004.
[36] M. Carrión and J. M. Arroyo, "A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 3, pp. 1371-1378, 2006.
[37] D. Datta and S. Dutta, "A binary-real-coded differential evolution for unit commitment problem," International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 42, No. 1, pp. 517-524, 2012.
[38] M. Afkousi-Paqaleh, M. Rashidinejad and M. Pourakbari-Kasmaei, "An implementation of harmony search algorithm to unit commitment problem," Electrical Engineering, Vol. 92, No. 6, pp. 215–225, 2010.
[39] K. Chandrasekaran, S. Hemamalini, S. P. Simon and N. P. Padhy, "Thermal unit commitment using binary/real coded artificial bee colony algorithm," Electric Power Systems Research, Vol. 84 No. 1, pp. 109-119, 2012.