



بهینه‌سازی همزمان انرژی و ذخیره در بازارهای برق با مشارکت سمت تقاضا در ارائه خدمات ذخیره

رزم‌آرا ذاکری فر^۱، شهرام جدید^۲، لادن هاشمی تهرانی^۳

چکیده:

این مقاله مدلی از بازار برق را با بهینه‌سازی همزمان انرژی و ذخیره که توسط واحدهای تولیدی و سمت تقاضا فراهم می‌شوند، پیشنهاد و تحلیل می‌نماید. در این مدل، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، پیشنهادات فروش و خرید خود را در دو دسته تولیدات مجزا و مشخص شامل انرژی و ذخیره، ارائه می‌کنند. انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی که از طریق پیشنهادات ذخیره سمت تقاضا ایجاد می‌شود، منجر به اثرات قابل توجهی در کارایی اقتصادی سیستم می‌گردد. نتایج بدست آمده از بهینه‌سازی با استفاده از دو روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته و الگوریتم ژنتیک، آثار جالب توجهی از تغییر نرخ قیمت ذخیره سمت تقاضا بر پارامترهایی از قبیل قیمت‌های بازار انرژی، رفاه اجتماعی و برنامه‌ریزی واحدهای تولید را نشان داده است. همچنین مطالعات نشان داده است که مصرف‌کنندگان با حضورشان در بازار، ضمن افزایش سود خود، منجر به کاهش قدرت بازار تولیدکنندگان می‌شوند. ضمناً با کاهش میزان تقاضا در بازار که از طریق برنامه‌های متنوع پاسخ تقاضا قابل دستیابی است، آثار قابل توجه مورد بحث، کاهش خواهد یافت.

تاریخ دریافت مقاله:

۸۷/۶/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله:

۸۷/۸/۶

کلمات کلیدی:

الگوریتم ژنتیک، بازار برق، برنامه ریزی خطی عدد صحیح، ذخیره، مشارکت سمت تقاضا.

۱) شرکت برق منطقه‌ای مازندران و دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده برق rzakerifar@gmail.com

۲) دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده برق jadid@iust.ac.ir

۳) شرکت برق منطقه‌ای مازندران L_hashemi2003@yahoo.co.uk

مقدمه

امکان و احتمال خطای تصادفی در هر جز مهم از سیستم قدرت، به همراه رفتار غیر قابل پیش بینی تقاضا، ایجاد ذخیره را به عنوان راهی برای کاهش خطر خاموشی ناگزیر ساخته است. همچنین پذیرفته شده است که در دهه آینده، مقدار انرژی تولیدشده به وسیله منابع انرژی تجدیدپذیر (نظیر باد، امواج و فتوولتائیک) بطور قابل توجهی رو به افزایش است. طبیعت تناوبی منابع انرژی تجدیدپذیر، میزان و دفعات عدم تعادل بین کل قدرت تولید شده بوسیله تولیدکنندگان و کل قدرت مصرف شده بوسیله بار را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، واحدهای تولیدی انرژی تجدیدپذیر، توانایی محدودی برای کنترل قدرت خروجی‌شان دارند. بنابراین سهم و نسبت کل ظرفیت تولیدی که قادر است خروجی‌اش را برای تعادل بار و انرژی تولیدی تنظیم کند، کاهش خواهد یافت. لذا کنترل فرکانس و نگهداری امنیت سیستم فقط با استفاده از ابزارهای سمت تولید، از نظر فنی خیلی دشوار و گران‌تر خواهد شد. مضافاً اینکه، فقط استفاده از منابع سمت تولید به واحدهای تولیدی فسیلی بیشتری نیاز خواهد داشت که در بخشی از توان نامی خود کار کنند و بنابراین از منافع زیست محیطی که از بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر بدست می‌آیند، کاسته خواهد شد [۱].

لذا تحقیق بر روی این مسأله که بخش زیادی از کنترل، توسط سمت تقاضا صورت گیرد، از اهمیت خاصی برخوردار است. به خاطر پیشرفت‌هایی که در صنعت کنترل و ارتباطات از راه دور صورت گرفته است، امروزه برای سمت تقاضا، پاسخ دادن به هشدارهای سریع بهره‌بردار شبکه و فراهم نمودن بخشی از ذخیره مورد نیاز سیستم، کار دشواری نخواهد بود.

تمایل سمت تقاضا برای ارائه ذخیره، نه تنها کنترل سیستم قدرت را تسهیل می‌کند و هزینه بهره‌برداری را پایین می‌آورد بلکه مصرف‌کنندگان را قادر می‌سازد تا سودشان را که از بازار برق بدست می‌آید، حداکثر نمایند.

در اغلب بازارهای برق، برنامه‌ریزی و تجارت انرژی و ذخیره در بازارهای جداگانه انجام می‌شود. در چنین وضعیت‌هایی، فقط ژنراتورها برای مقدار مورد نیاز معین شده بهره‌بردار سیستم، پیشنهادهای ذخیره ارائه می‌کنند که معمولاً بعد از بازار انرژی تسویه می‌شود. به منظور جلوگیری از ناکارآمدی بازار ایجاد شده بوسیله این نوع مدل ترتیبی، امروزه از برنامه‌ریزی تولید و ذخیره بصورت همزمان استفاده می‌شود [۲]. این بهینه‌سازی همزمان بدین دلیل نیاز است که یک تعامل قوی بین تغذیه انرژی و فراهم‌آوری ذخیره وجود دارد چرا که جهت تهیه ذخیره چرخان، ژنراتورها باید در باری کمتر از بار نامی کار کنند [۳]. تجربه در سنگاپور، نیوزیلند و استرالیا نشان می‌دهد که این روش تأمین ذخیره کافی را تضمین نموده و همچنین در کاهش کل هزینه تولید مطمئن برق موفق بوده است [۴].



در این مقاله، یک مدل بازار، که در آن هم تولیدکننده‌ها و هم سمت تقاضا در بازار انرژی و ذخیره همزمان مشارکت می‌کنند ارائه و آثار مشارکت سمت تقاضا در تامین خدمات ذخیره بر روی بازار تحلیل شده است. اولین سری از مطالعات شامل برنامه‌ریزی برای یک دوره و بدون در نظر گرفتن ملاحظات شبکه از قبیل تلفات یا تراکم می‌باشند و برای نشان دادن مشخصه اصلی مشارکت سمت تقاضا در تهیه خدمات ذخیره طراحی شده است که برای تجزیه و تحلیل نمودن نیز ساده می‌باشد. سپس مطالعات برای چند دوره انجام شده است تا آثار قیود بین زمانی ژنراتورها را روی مشارکت سمت تقاضا نشان دهد. در این مقاله، فرض بر این است که در ازای یک قیمت، بارها ذخیره اضطراری را با اصلاح کردن مصرفشان، فراهم خواهند کرد. برای ارزیابی صحت نتایج بدست آمده از دو روش شبیه‌سازی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح^۱ و الگوریتم ژنتیک^۲ استفاده شده است.

این مقاله از هفت بخش تشکیل شده است. بعد از مقدمه، بخش دوم به تشریح کامل مدل پیشنهادی پرداخته است. بخش سوم و چهارم به تشریح نحوه حل مساله با روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و مطالعه موردی می‌پردازد. در بخش پنجم نیز مطالعه موردی بر اساس روش الگوریتم ژنتیک انجام شده است. مطالعات بر اساس برنامه‌ریزی چند دوره‌ای در بخش ششم مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت نتیجه‌گیری ارائه شده است.

مدل بازار انرژی و ذخیره همزمان

تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان در این بازار جهت خرید و فروش انرژی، پیشنهادات خود را به بهره بردار بازار ارائه می‌کنند. در بازار مطالعه شده در این مقاله، تولیدکنندگان انرژی و ذخیره چرخان را فراهم می‌کنند. همچنین بارها می‌توانند برای مصرف انرژی به علاوه جهت تأمین ذخیره چرخان قیمت‌های پیشنهادی خود را ارائه دهند. توجه به این نکته لازم است که نیازی نیست نرخ‌های پیشنهاد شده برای ذخیره صاف و یکنواخت باشد اما بطور کلی می‌تواند به عنوان توابعی از مقدار ذخیره فراهم شده تعریف شود. با این وجود در این مقاله فرض شده است که هر تولیدکننده یک نرخ یکنواخت منفرد را برای کل محدوده هر محصول ارائه می‌کند.

وظیفه اصلی بهره بردار بازار، حداقل کردن هزینه ترکیبی کل انرژی تولید شده و ذخیره فراهم شده بوسیله تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان است.

تابع هدف مساله مطرح شده عبارتست از:

- 1) Mixed Integer Linear Programming (MILP)
- 2) Genetic Algorithm (GA)

$$\min \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{aligned} & \left[\sum_{i=1}^{Ng} [C(u_{it}, Pg_{it}) + u_{it} \cdot Nl_i + S_i \cdot u_{it} + Qg_{it} Rg_{it}] \right] \\ & + \sum_{k=1}^{Nd} -B(Pd_{kt}) + Qd_{kt} \cdot Rd_{kt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

قیود این مساله عبارتند از:

$$\sum_{i=1}^{Ng} Pg_{it} = \sum_{k=1}^{Nd} Pd_{kt} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{Ng} Rg_{it} + \sum_{k=1}^{Nd} Rd_{kt} = R_t \quad (3)$$

$$R_t \geq Pg_{it} + Rg_{it}, i = 1, \dots, Ng \quad (4)$$

$$u_{it} \cdot Pg_i^{\min} \leq Pg_{it} \leq u_{it} \cdot Pg_i^{\max} \quad (5)$$

$$Pd_{kt}^{\min} \leq Pd_{kt} \leq Pd_{kt}^{\max}, k = 1, \dots, Nd \quad (6)$$

$$0 \leq Rg_{it} \leq u_{it} \cdot Pg_{it}^{\max} - Pg_{it}, i = 1, \dots, Ng \quad (7)$$

$$0 \leq Rd_{kt} \leq Pd_{kt} - Pd_{kt}^{\min}, k = 1, \dots, Nd \quad (8)$$

$$Pg_{it} - Pg_{i(t-1)} \leq [1 - u_{it}(1 - u_{i(t-1)})] \times 60RR_i + u_{it}(1 - u_{i(t-1)})Pg_i^{\min} \quad (9)$$

$$Pg_{i(t-1)} - Pg_{it} \leq [1 - u_{i(t-1)}(1 - u_{it})] \times 60RR_i + u_{i(t-1)}(1 - u_{it})Pg_i^{\min} \quad (10)$$

$$[x_{i(t-1)}^{\text{on}} - T_i^{\text{on}}] * [u_{i(t-1)} - u_{it}] \geq 0 \quad (11)$$

$$[x_{i(t-1)}^{\text{off}} - T_i^{\text{off}}] * [u_{it} - u_{i(t-1)}] \geq 0 \quad (12)$$

$$S_{it} \geq K_i^m (u_{it} - \sum_{x=1}^m u_{i(t-x)}), m = 1, \dots, ND_i \quad (13)$$

$$S_{it} \geq 0 \quad (14)$$



تابع هزینه قدرت ارائه شده برای واحدهای تولیدی و تابع سود قدرت خریداری شده توسط بارها بوسیله تابع درجه دوم ذیل تعریف شده‌اند:

$$C[(u_{it}, Pg_{it})] = c_i \cdot u_{it} + a_i \cdot Pg_{it} + b_i \cdot Pg_{it}^2 \quad (15)$$

$$B_k(Pd_{kt}) = -B_{0k} + X_k \cdot Pd_{kt} - Y_k \cdot Pd_{kt}^2 \quad (16)$$

در روابط (۲) تا (۱۴)، سه قید اول، توازن انرژی و ذخیره چرخان را تاکید می‌کند.

حداقل ذخیره مورد نیاز سیستم با استفاده از معیار امنیت $n-1$ و $n-2$ ، تعیین می‌شود طوری که از دست رفتن یک یا دو ژنراتور می‌تواند از طریق واحدهای تولیدی موجود، بدون اینکه باری از دست برود، تامین گردد. مضافاً اینکه، زمان‌بندی بهینه بایستی قادر باشد تا یک تغییر غیر منتظره در کل تقاضا را تنظیم کند. بنابراین رابطه (۴) مقید می‌کند که ذخیره چرخان بایستی از دست رفتن بزرگترین ژنراتور را بپوشاند.

حدود انرژی تولیدی و مصرفی بوسیله تولیدکننده‌ها و بارها، به علاوه حدود ذخیره در قیود (۵) تا (۸) نشان داده شده‌اند. مرز Pd_{kt}^{\min} ، نشانگر حداکثر کاهش باری است که زمین بار می‌تواند انجام دهد تا ذخیره چرخان مورد نیاز را فراهم کند. به همین ترتیب مرز Pd_{kt}^{\max} ، محدوده بالایی مصرف را که زمین بار مایل است تا ذخیره را فراهم کند، نشان می‌دهد. روابط (۹) و (۱۰) قیود افزایشی و کاهش‌ی توان تولیدی واحدها و روابط (۱۱) و (۱۲) نیز قیود حداقل زمان روشن و خاموش بودن واحدها را بیان می‌کنند.

سود اصلی تولیدکننده Δ ، تفاوت بین درآمد ناشی از فروش تولیدات مختلف در هزینه‌های حدى منهای هزینه‌های تولید انرژی و ذخیره است:

$$Pr_{g_{it}} = (\lambda Pg_{it} + \mu R_{g_{it}}) - (C_i(u_{it}, Pg_{it}) + Q_{g_{it}} R_{g_{it}}) \quad (17)$$

همچنین سود مصرف کننده Δ ، تفاوت بین مجموع سود و درآمد حاصل از فروش ذخیره در هزینه‌های حدى و مجموع هزینه انرژی مصرفی و هزینه ذخیره پیشنهاد شده است، یعنی:

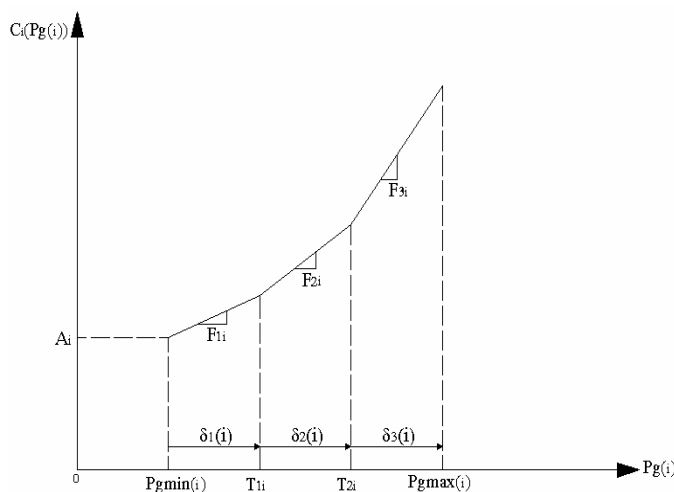
$$Pr_{d_{kt}} = (B_k(Pd_{kt}) + \mu R_{d_{kt}}) - (\lambda Pd_{kt} + Q_{d_{kt}} R_{d_{kt}}) \quad (18)$$

حل مسأله با استفاده از روش MILP

برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته که در بسته نرم‌افزاری GAMS [۴] قابل دسترس می‌باشد، می‌تواند مسأله فرموله شده فوق را بگونه‌ای کاملاً کارآمد و موثر تحلیل نماید. از آنجائیکه تابع هدف در رابطه (۱)، تابعی غیرخطی از Pd_{kt} و Pg_{it} است لذا بایستی بوسیله یک تابع خطی تقریب زده شود.

همانطوریکه در شکل (۱) نشان داده شده است، تابع هزینه واحدهای تولیدی در رابطه (۱۵) می‌تواند بوسیله تعدادی بلوک تکه‌ای خطی بصورت قابل قبولی تقریب زده شود [۵]. در صورتی که منحنی درجه دوم تابع هزینه با تعداد مناسبی بلوک، تقریب زده شود، آنگاه به منظور تحلیل‌های کاربردی، تابع خطی‌سازی شده تکه‌ای در شکل (۱) با مدل غیرخطی آن تمایز چندانی نخواهد داشت. البته در اکثر بازارها، پیشنهادات خرید و فروش بصورت منحنی‌های تکه‌ای خطی ارائه می‌شوند که در این مورد هیچ تقریبی نیاز نیست. روابط ریاضی این تقریب‌سازی خطی بصورت زیر است [۵]:

$$C_i(u_i, P_{gi}) = A_i \cdot u_i + \sum_{l=1}^{nl} F_{li} \delta_l(i), \quad i=1, \dots, n \quad (19)$$



شکل (۱): تابع هزینه تولید تکه‌ای خطی

$$P(i) = \sum_{l=1}^{nl} \delta_l(i) + P_{gi}^{min} \cdot u(i), \quad i=1, \dots, n \quad (20)$$

$$\delta_l(i) \leq T_{li} - P_{gi}^{min} \quad (21)$$

$$\delta_l(i) \leq T_{li} - T_{(l-1)i}, \quad l=2, \dots, n, \quad i=1, \dots, n \quad (22)$$

$$\delta_{n_l}(i) \leq P_{gi}^{\max} - T_{n_l-1i} \quad (23)$$

$$\delta_l(i) \geq 0, \quad l=1, \dots, n, \quad i=1, \dots, n \quad (24)$$

که در آن:

$$A_i = c_{oi} + a_i \cdot p_{gi}^{\min} + b_i \cdot p_{gi}^{\min^2} \quad (25)$$

F_{li} شیب منحنی در هر تکه از منحنی است و سایر پارامترها نیز روی شکل (۱) نشان داده شده‌اند. برای بدست آوردن شیب منحنی در هر تکه مثلاً تکه اول، محاسباتی به شرح ذیل مورد نیاز است. شیب منحنی در تکه اول (F_{1i}) برابر است با:

$$F_{1i} = \frac{C(Pg|_{T_{1i}}) - A_i}{T_{1i} - Pg_i^{\min}} = \frac{C(Pg|_{T_{1i}}) - A_i}{\delta_1(i)} \quad (26)$$

که در رابطه فوق، $C(Pg|_{T_{1i}})$ مقدار تابع هزینه در نقطه T_{1i} و A_i ، مقدار تابع هزینه در نقطه Pg_i^{\min} است. مقدار $C(Pg|_{T_{1i}})$ در نقطه مورد نظر عبارت است از:

$$\begin{aligned} C(Pg|_{T_{1i}}) &= c_i + a_i \cdot (Pg_i^{\min} + \delta_1(i)) + b_i \cdot (Pg_i^{\min} + \delta_1(i))^2 \quad (27) \\ &= c_i + a_i \cdot Pg_i^{\min} + a_i \cdot \delta_1(i) + b_i \cdot Pg_i^{\min^2} + 2b_i \cdot \delta_1(i) \cdot Pg_i^{\min} + b_i \cdot \delta_1^2(i) \\ &= [c_i + a_i \cdot Pg_i^{\min} + b_i \cdot Pg_i^{\min^2}] + \delta_1(i) [a_i + 2b_i \cdot Pg_i^{\min} + b_i \cdot \delta_1(i)] \\ &= A_i + \delta_1(i) [a_i + 2b_i \cdot Pg_i^{\min} + b_i \cdot \delta_1(i)] \end{aligned}$$

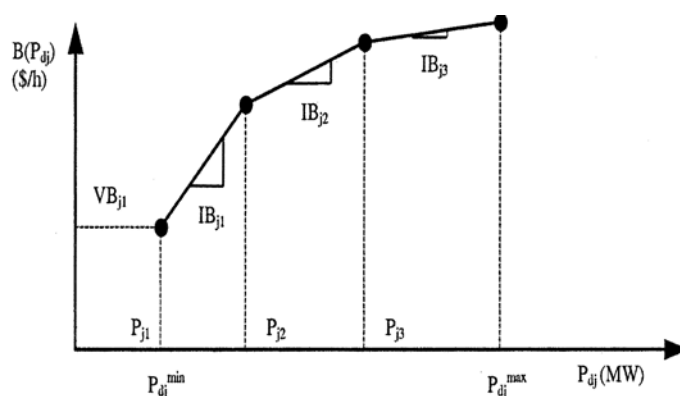
با جایگزینی مقادیر اخیر در رابطه (۲۰) شیب منحنی در تکه اول بصورت ذیل بدست خواهد آمد:

$$F_{1i} = a_i + 2b_i \cdot Pg_i^{\min} + b_i \cdot \delta_1(i) \quad (28)$$

همچنین تابع سود مشتری می‌تواند بصورت زیر تقریب زده شود [۶]:

$$B_k(Pd_{kt}) \approx \min_{l=1, \dots, m} [VB_{kl} + IB_{kl}(Pd_{kt} - P_{kl})] \quad (29)$$

که در آن، IB_{kl} شیب منحنی سود در نقطه P_{kl} و VB_{kl} سود در نقطه P_{kl} است.



شکل (۲): تابع سود قدرت خریداری شده توسط بارها

مطالعه موردی

مطالعات شبیه‌سازی بر روی سیستمی با ۲۶ واحد تولیدی [۷] انجام شده است تا آثار مشارکت سمت تقاضا را در تهیه خدمات ذخیره در یک بازار برق بررسی نماید.

اولین سری از مطالعات شامل برنامه‌ریزی برای یک دوره و بدون در نظر گرفتن ملاحظات شبکه از قبیل تلفات یا تراکم می‌باشند و برای نشان دادن مشخصه اصلی مشارکت سمت تقاضا در تهیه خدمات ذخیره طراحی شده است که برای تجزیه و تحلیل نمودن نیز ساده می‌باشد. سپس مطالعات برای چند دوره انجام شده است تا آثار قیود بین زمانی ژنراتورها را روی مشارکت سمت تقاضا نشان دهد. در این مطالعات موردی، بارها در قالب یک مصرف‌کننده متراکم شده‌اند. چون در این مقاله قصد بر این است که اثر پیشنهادات ذخیره سمت تقاضا مطالعه گردد لذا، پیشنهادات قیمت ارائه شده توسط بار، به‌گونه‌ای تنظیم شده است که حداکثر مصرف را به همراه داشته باشد. به این دلیل، همانطوری‌که در جدول (۲) پیوست نشان داده شده است پارامترهای X و B_0 در پیشنهاد قیمت انرژی بار، مقادیر بزرگی در نظر گرفته شده‌اند.

علی‌رغم اینکه بارها در حداکثر تقاضای خود بهره برداری می‌شوند ولی ممکن است به ازاء یک قیمت مناسب مایل باشند تا با کاهش مصرفشان بصورت اضطراری، بخشی از ذخیره سیستم را فراهم سازند. در شبیه‌سازی این عمل از طریق پیشنهاد پارامتر Q_d ، منعکس خواهد شد.



به منظور محدود کردن تعداد قیود تأثیرگذار در حل مساله زمان بندی بهینه، ذخیره چرخان مورد نیاز سیستم طوری در نظر گرفته شده است که در صورت ازدست رفتن بزرگترین واحد تولیدی در مدار، بتواند آن را تامین نماید.

نتایج شبیه سازی بر روی سیستم با استفاده از روش MILP: در این سیستم قدرت که مشخصات کامل واحدهای آن در جدول (۱) پیوست ارائه شده است، مجموع توان تولیدی واحدها ۳۲۰۵ مگاوات بوده و صرف نظر از پیشنهادات سمت تقاضا برای ذخیره، کل دیماند ۲۷۵۰ مگاوات است. در واقع شرایط به گونه ای طراحی شده است که بهره بردار می تواند همه نیازهای ذخیره خود را فقط با استفاده از واحدهای تولیدی تامین کند، به عبارت دیگر بهره بردار در استفاده از پیشنهادات سمت تقاضا هیچگونه اجباری نداشته و فقط بر اساس برنامه ریزی بهینه می تواند میزان ذخیره مورد نیاز سیستم را تامین نماید. قابل توجه است که با این وجود همانطوری که در جدول (۱) مشاهده می شود UC^1 بطور قابل توجهی با پیشنهادات مختلف ذخیره چرخان بار تغییر می کند.

برای مثال، وقتی بار مقادیر زیادی را برای ذخیره پیشنهاد می نماید $Qd = 53\$/MWh$ که بیانگر آن است بارها تمایلی به فراهم کردن ذخیره ندارند، UC بهینه تعداد ۲۳ واحد از کل ۲۶ واحد تولیدی را روشن می نماید. این نکته از این امر نتیجه می شود که میزان ذخیره مورد نیاز سیستم براساس بزرگترین تولید کننده در مدار تعیین می شود که یک واحد ۴۵۰ مگاواتی است که در نزدیکی خروجی حداکثرش بهره برداری می شود. بنابراین، به منظور یافتن نیازمندی های ذخیره، برخی واحدهای گران در حداقل خروجی شان بهره برداری می شوند. همزمان با کاهش مقدار Qd ، (که نشانگر آن است که مصرف کنندگان برای فراهم کردن ذخیره تمایل دارند) همانطوری که در جدول (۱) نشان داده شده است، برخی واحدهای گران قیمت از مدار خارج شده که منجر به کاهش میزان قیمت تسویه شده انرژی می گردد بطوریکه به ازای $Qd = 2\$/MWh$ کلیه واحدهای ۱۲،۲۰ و ۱۰۰ مگاواتی (جمعاً ۱۲ واحد) از مدار خارج می شوند و قیمت تسویه شده انرژی به مقدار ۳۵/۸۶ دلار بر مگاوات ساعت می رسد.

در همین راستا، با افزایش تمایل بار جهت مشارکت در تامین ذخیره (کاهش مقدار Qd) رفاه اجتماعی و میزان سود بار افزایش یافته است که در اشکال (۳) و (۴) جزئیات دقیق تر آن نشان داده شده است. افزایش رفاه اجتماعی از آنجا حاصل می شود که چون واحدهای تولیدی از فراهم کردن ذخیره به موجب مشارکت سمت تقاضا ترخیص شده اند لذا انعطاف پذیری شان در تخصیص انرژی افزایش خواهد یافت. همچنین افزایش میزان سود بار با وجود کاهش مقدار Qd ، ناشی از کم شدن قیمت انرژی در بازار به همان نسبت می باشد.

تأثیر مهیج تر پیشنهادات ذخیره سمت تقاضا در قیمت های انرژی و ذخیره مشاهده می شود که به ترتیب از ۶۲/۸۳ و ۵۳ دلار بر مگاوات ساعت به ۳۴/۴۸ و صفر دلار بر مگاوات ساعت تغییر می کند. در ابتدا با یک Qd بالا، تولیدکننده های

1) Unit commitment

خیلی گران روشن هستند که در نتیجه موجب قیمت‌های بالا برای انرژی و ذخیره می‌شوند. متناوباً مقادیر Q_d پایین، واحدهای گران را از مدار خارج می‌کند و قیمت‌های پایین‌تر را موجب می‌شود. همچنین قابل توجه است که سمت تقاضا قدرت بازار بیشتری در پیشنهادات ذخیره‌اش نسبت به تولیدکنندگان دارد. این نکته می‌تواند بدین صورت دیده شود که پیشنهادات ذخیره سمت تقاضا Q_d ، همیشه قیمت ذخیره μ را تعیین می‌نمایند ولو اینکه پیشنهادات ذخیره تولید کننده ($Q_g(i)$) پایین‌تر از Q_d باشند. علت این امر آن است که اگر تولیدکنندگان ذخیره بیشتری فراهم کنند، مجبور خواهند بود که با راندمان اقتصادی کمتری بهره برداری شوند.

در شکل (۳)، وقتی که Q_d از $53 \$/MWh$ به $51 \$/MWh$ می‌رسد، قیمت انرژی کاهش شدیدی را نشان می‌دهد که به علت خاموش شدن برخی از ژنراتورها موجب شده است. در نقطه‌ای که Q_d به $51 \$/MWh$ می‌رسد بر اساس برنامه‌ریزی بهینه، ژنراتورهای گران قیمت ۲۰ مگاواتی خاموش شده‌اند و به منظور ایفا کردن توازن قدرت، برخی از ژنراتورهایی که روشن باقی می‌مانند انرژی خروجی‌شان را افزایش می‌دهند. بنابراین، قیمت انرژی تا $59/5\%$ کاهش می‌یابد.

همچنین در جدول (۲) و شکل (۳) وقتی که قیمت ذخیره Q_d از $4/8$ به $4/5$ دلار بر مگاوات ساعت تقلیل می‌یابد یک ناپیوستگی در قیمت انرژی مشاهده می‌گردد. این جهش، به واسطه خاموش شدن چند ژنراتور اتفاق افتاده که در ادامه به تشریح آن پرداخته خواهد شد.

از قبل مشخص شده بود که هر اندازه Q_d کاهش یابد، ذخیره نه تنها بوسیله ژنراتورها بلکه بوسیله بارها فراهم می‌شود. در نقطه‌ای که $Q_d=4/8$ دلار بر مگاوات ساعت بوده است، قیمت تسویه انرژی برابر $34/15$ دلار بر مگاوات ساعت بوده که منشعب از بالاترین پیشنهاد قیمت پذیرفته شده در بازار است که مربوط به واحدهای ۱۰۰ مگاواتی می‌باشد. وقتی بارها قیمت ذخیره را به $4/5$ دلار بر مگاوات ساعت کاهش دادند، بر اساس برنامه‌ریزی بهینه، واحدهای ۱۰۰ مگاواتی از مدار خارج شده و قیمت تسویه شده انرژی در بازار بر اساس بالاترین پیشنهاد قیمت پذیرفته شده برابر $35/86$ دلار بر مگاوات ساعت می‌گردد که در واقع برگرفته از پیشنهاد قیمت واحدهای ۱۹۷ مگاواتی است. لازم به ذکر است که پیشنهاد قیمت ذخیره واحدهای ۱۰۰ مگاواتی بیشتر از واحدهای ۱۹۷ مگاواتی است.

همانطوری که در جدول (۳) دیده می‌شود، به منظور ایفا کردن توازن قدرت، برخی از واحدهایی که روشن باقی می‌مانند (شامل ژنراتورهای تقریباً گران قیمت ۱۹۷ مگاواتی) انرژی خروجی‌شان را افزایش می‌دهند. بنابراین قیمت انرژی تا $4/8\%$ بالا می‌رود.

بررسی آثار کاهش میزان تقاضا بر روی پارامترهای مختلف بازار: این بخش از مطالعات به منظور بررسی آثار کاهش میزان تقاضا که ممکن است از طریق برنامه‌های مختلف پاسخ تقاضا بدست آید، بر روی پارامترهای مختلف در بازار انجام یافته است که در طی آن ملاحظه گردید، اگر بار انعطاف پذیر باشد، همچنانکه ژنراتورها آزاد می‌شوند، این منجر به کم شدن قیمت انرژی می‌شود. همچنین انعطاف‌پذیری بار، قدرت بازار بارها را کاهش می‌دهد.

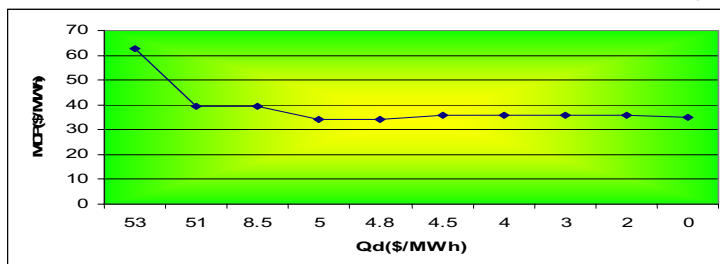
جدول (۱): تعداد واحدهای در مدار برحسب پیشنهادات ذخیره سمت تقاضا (\$/MWh)

| تولیدی | تعداد واحدهای | نوع و حداکثر | $\lambda = P0$ | $\lambda = P0$ | $\lambda = P0$ | $\lambda = P0$ | $\lambda = P0$ | $\lambda = P0$ | $\lambda = P0$ |
|--------|---------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | ۵ | ۱۲MW | ۵ | ۵ | ۴ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| | ۴ | ۲۰-MW | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| | ۴ | ۷۶MW | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| | ۳ | ۱۰۰-MW | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ |
| | ۴ | ۱۵۵MW | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۴ |
| | ۳ | ۱۹۷MW | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۳ |
| | ۱ | ۳۵۰-MW | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| | ۲ | ۴۵۰-MW | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ |

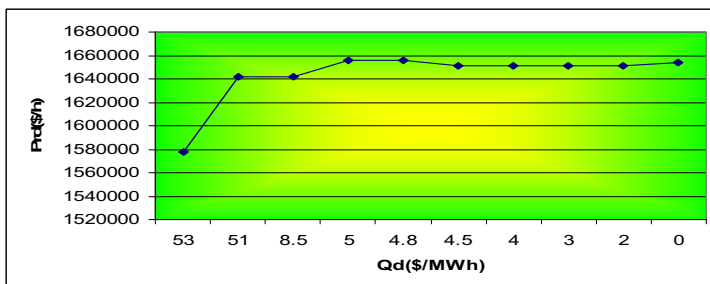
جدول (۲): تغییرات پارامترهای اقتصادی در برنامه ریزی بهینه در برابر پیشنهادات ذخیره سمت تقاضا

| رفاه اجتماعی (k\$/h) | Pr_d (k\$/h) | هزینه ذخیره (k\$/h) | μ (\$/MWh) | λ (\$/MWh) | |
|----------------------|----------------|---------------------|----------------|--------------------|--------|
| ۱۶۹۶/۰۴ | ۱۵۷۷/۲۱ | ۲۱/۲ | ۵۳ | ۶۲/۸۳ | Qd=۵۳ |
| ۱۶۹۷/۰۸ | ۱۶۴۱/۷۱ | ۲۰/۴ | ۵۱ | ۳۹/۳۸ | Qd=۵۱ |
| ۱۶۹۷/۱۸ | ۱۶۴۱/۷۱ | ۳/۴ | ۸/۵ | ۳۹/۳۸ | Qd=۸/۵ |
| ۱۶۹۷/۵۸ | ۱۶۵۶/۰۹ | ۲ | ۵ | ۳۴/۱۵ | Qd=۵ |
| ۱۶۹۷/۵۸ | ۱۶۵۶/۰۹ | ۱/۹۲ | ۴/۸ | ۳۴/۱۵ | Qd=۴/۸ |
| ۱۶۹۹/۲۸ | ۱۶۵۱/۳۶ | ۱/۸ | ۴/۵ | ۳۵/۸۶ | Qd=۴/۵ |
| ۱۶۹۹/۲۸ | ۱۶۵۱/۳۶ | ۱/۶ | ۴ | ۳۵/۸۶ | Qd=۴ |
| ۱۶۹۹/۳۲ | ۱۶۵۱/۳۶ | ۰/۸ | ۲ | ۳۵/۸۶ | Qd=۲ |
| ۱۶۹۹/۳۲ | ۱۶۵۴/۱۷ | ۰ | ۰ | ۳۴/۸۴ | Qd=۰ |

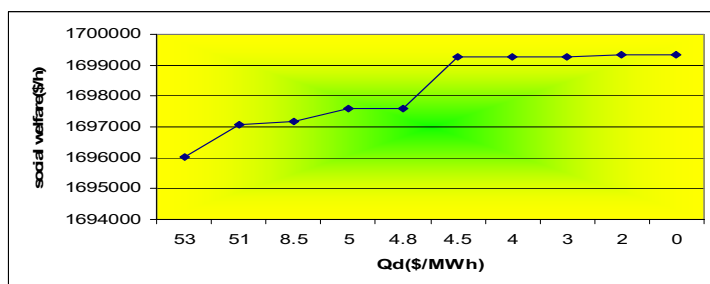
بدین منظور فرض شد که میزان بار در بازار در یک گستره ۱۱۰۰ مگاواتی از ۳۱۰۰ مگاوات تا ۲۰۰۰ مگاوات تقلیل یابد. همانطوری که از جدول (۴) پیداست، وقتی که تقاضای بار در بازار ۳۱۰۰ مگاوات است، مقدار قیمت انرژی در حالتی که بارها تمایلی برای مشارکت در ارائه ذخیره ندارند و قیمت بالایی را پیشنهاد می‌نمایند، حدود ۶۲/۸۳ دلار بر مگاوات ساعت است و برنامه‌ریزی بهینه برای تامین چنین تقاضایی مجبور به روشن کردن همه واحدهای تولیدی خود شده و ناچار است که قسمت اعظم ذخیره مورد نیاز خود را از سمت تقاضا تامین کند که این مساله قدرت بازار بارها را در این شرایط به وضوح نشان می‌دهد.



شکل (۳): تغییرات قیمت انرژی با پیشنهادات قیمت ذخیره سمت تقاضا



شکل(۴): تغییرات میزان سود بار با پیشنهادات قیمت ذخیره سمت تقاضا



شکل(۵): تغییرات میزان رفاه اجتماعی با پیشنهادات قیمت ذخیره سمت تقاضا

با فرض انعطاف پذیر بودن تقاضا و کاهش مقدار آن تا ۲۶۰۰ مگاوات، مقدار قیمت تسویه انرژی با یک کاهش ۶۰٪ مواجه شده و به ۳۹/۳۸ دلار بر مگاوات ساعت می‌رسد. این کاهش قیمت در انرژی ناشی از خاموش شدن واحدهای گران قیمت ۲۰ مگاواتی یعنی واحدهای ۶، ۷، ۸ و ۹ می‌باشد و قیمت تسویه بازار بر اساس پیشنهاد قیمت زنراتورهای ۱۲ مگاواتی تعیین می‌گردد.

همانطوریکه با یک دیماند غیر انعطاف‌پذیر مثلاً ۳۱۰۰ مگاواتی، پیشنهاد ذخیره چرخان سمت تقاضا یک تأثیر بزرگ در بازار دارد لیکن با ایجاد انعطاف‌پذیری و کاهش آن تا حدود ۲۶۰۰ مگاوات، این تأثیر بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، کاهش در تقاضا به علت انعطاف‌پذیری، منجر به کاهش تولید و به همان نسبت سود کمتر با کم شدن رفاه اجتماعی قابل توجه می‌شود.

جدول(۳): پاسخ بهینه به ازای $Q_d=4/8$ و $Q_d=4/5$ دلار بر مگاوات ساعت

| $P_g(16)$ | $P_g(15)$ | $P_g(14)$ | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ۵۵ | ۷۰ | ۶۴/۸ | $Q_d=4/8$ |
| . | . | . | $Q_d=4/5$ |
| $P_g(23)$ | $P_g(22)$ | $P_g(21)$ | |
| ۱۲۰/۲ | ۱۴۵/۸ | ۱۲۰ | $Q_d=4/8$ |
| ۱۸۲ | ۱۹۷ | ۱۹۷ | $Q_d=4/5$ |



جدول (۴): مقایسه قیمت انرژی (MCP) و میزان ذخیره ارائه شده (Rd) توسط سمت تقاضا در دو حالت

| Qd=∞ | | Qd=0 | | میزان تقاضا |
|------|-------|------|-------|-------------|
| Rd | MCP | Rd | MCP | |
| ۳۴۵ | ۶۲/۸۳ | ۴۵۰ | ۴۰/۰۲ | ۳۱۰۰ |
| ۱۴۵ | ۶۲/۸۳ | ۴۵۰ | ۳۹/۳۸ | ۲۹۰۰ |
| . | ۶۲/۸۳ | ۴۵۰ | ۳۴/۸۴ | ۲۷۵۰ |
| . | ۳۹/۳۸ | ۴۵۰ | ۳۳/۸۲ | ۲۶۰۰ |
| . | ۳۹/۳۸ | ۴۵۰ | ۳۲/۷۹ | ۲۳۰۰ |
| . | ۳۱/۷۷ | ۴۵۰ | ۱۴/۳۴ | ۲۰۰۰ |

نتایج شبیه سازی بر روی سیستم با الگوریتم ژنتیک

در این بخش بازار پیشنهادی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک پیاده سازی و نتایج آن ارائه شده است. چون هدف از انجام این کار، مقایسه نتایج بدست آمده توسط دو روش بهینه سازی و نشان دادن صحت جواب های مسئله انجام شده بود، لذا از ذکر جزئیات روش الگوریتم ژنتیک صرف نظر گردیده است. با توجه به جدول (۵) دیده می شود که نتایج روش الگوریتم ژنتیک تقریباً مشابه روش قبلی است ولی از حساسیت بیشتری نسبت به تغییر قیمت میزان ذخیره ارائه شده توسط سمت تقاضا برخوردار است.

در اینجا هم همانطوریکه از قبل انتظار می رفت، قیمت انرژی همزمان با کاهش مقادیر پیشنهادی قیمت ذخیره توسط سمت تقاضا روندی نزولی داشته است و روند رو به رشد میزان سود بار و رفاه اجتماعی همچنان حفظ شده است.

نتایج شبیه سازی بازار پیشنهادی با استفاده از برنامه ریزی چند دوره ای

برای مطالعات برنامه ریزی چند دوره ای، شبیه سازی در یک دوره هشت ساعتی انجام شده است. مقادیر بار در طول دوره مذکور از ۱۶۵۰ تا ۲۹۵۰ مگاوات متغیر بوده است. شکل (۶) پروفیل بار را نشان می دهد.

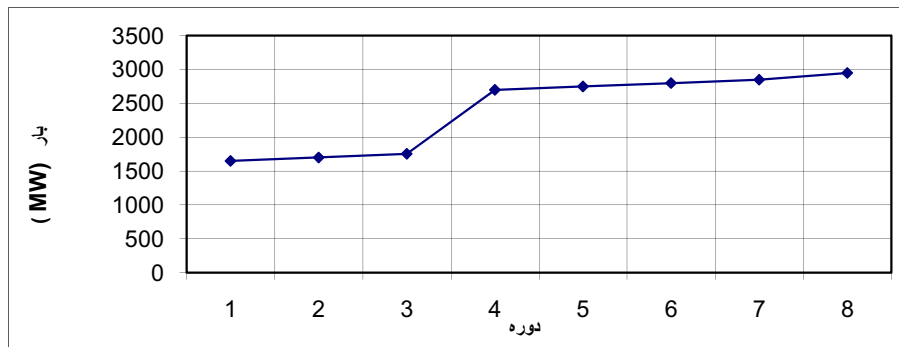
شکل (۷) کل هزینه تولید در هر ساعت را برای مقادیر مختلف Qd نشان می دهد. روشن است که کل هزینه تولید، از الگوی پروفیل بار طبیعت می کند. همانطور که از شکل مذکور پیداست، هزینه تولید

با افزایش یافتن قیمت پیشنهادات ذخیره سمت تقاضا، هزینه تولید افزایش می یابد و مطالعات نشان داده است که این هزینه، وقتی که هیچ مشارکتی از سوی بار در فراهم کردن ذخیره صورت نگیرد، بیشترین مقدار را دارد. شکل (۸)، کل ذخیره فراهم شده توسط واحدهای تولیدی، ذخیره فراهم شده توسط سمت تقاضا و قیمت تسویه بازار را در هر ساعت نشان می دهد.

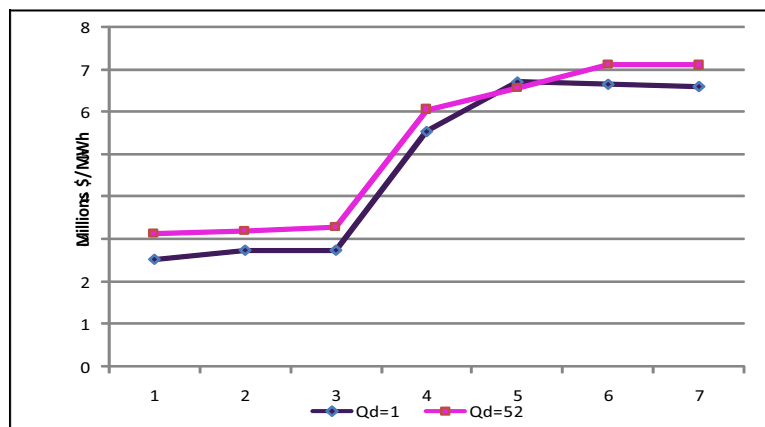


جدول (۵): تغییر پارامترهای اقتصادی در برابر پیشنهادات قیمت ذخیره سمت تقاضا بر اساس روش GA

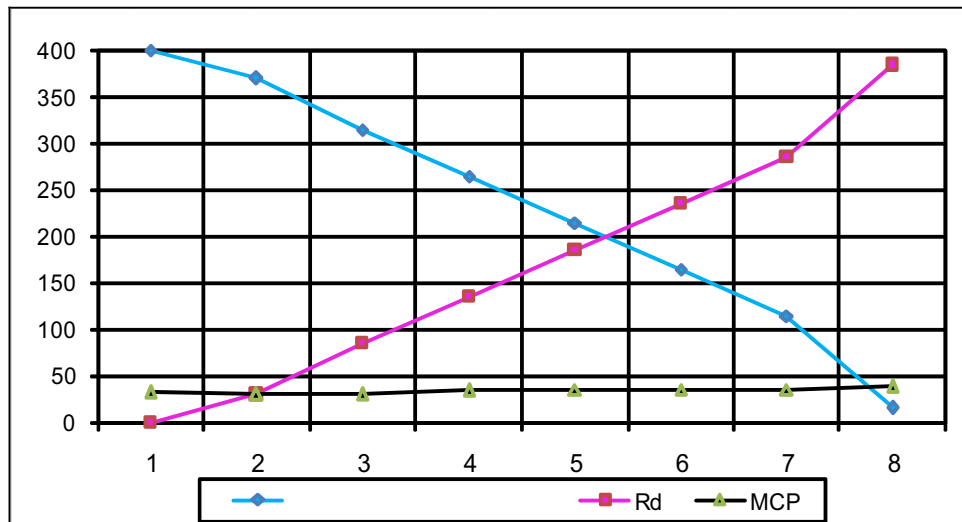
| رفاه اجتماعی (k\$/h) | Pr_d (k\$/h) | μ (\$/MWh) | MCP (\$/MWh) | |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------|
| ۱۶۹۲/۶ | ۱۵۷۳/۳ | ۵۳ | ۶۴/۲۴ | $Q_d=۵۳$ |
| ۱۶۹۶/۸ | ۱۶۳۷/۷ | ۵۱ | ۴۰/۵ | $Q_d=۵۱$ |
| ۱۶۹۸/۱ | ۱۶۴۴/۳ | ۸/۵ | ۳۸/۴ | $Q_d=۸/۵$ |
| ۱۶۹۸/۳ | ۱۶۴۹/۸ | ۵ | ۳۶/۴ | $Q_d=۵$ |
| ۱۶۹۸/۴ | ۱۶۵۵/۱ | ۴/۸ | ۳۵/۳ | $Q_d=۴/۸$ |
| ۱۶۹۸/۴۵ | ۱۶۵۲/۸ | ۴/۵ | ۳۶/۵ | $Q_d=۴/۵$ |
| ۱۶۹۸/۴۵ | ۱۶۵۲/۸ | ۴ | ۳۵ | $Q_d=۴$ |
| ۱۶۹۸/۵ | ۱۶۵۲/۸ | ۳ | ۳۵ | $Q_d=۳$ |
| ۱۶۹۸/۵۲ | ۱۶۵۳/۵ | ۲ | ۳۴/۷ | $Q_d=۲$ |
| ۱۶۹۸/۶ | ۱۶۵۴/۱ | ۰ | ۳۳/۶ | $Q_d=۰$ |



شکل (۶): پروفیل باردر طی دوره مورد مطالعه



شکل (۷): هزینه تولید در هر ساعت برای مقادیر مختلف Qd



شکل (۸): کل ذخیره فراهم شده توسط واحدهای تولیدی، ذخیره فراهم شده توسط سمت تقاضا و قیمت تسویه بازار

مقدار ذخیره ارائه شده توسط واحدهای تولیدی، همزمان با افزایش بار، بطور قابل توجهی افت می‌کند زیرا قیود افزایشی توان تولیدی^۱ مقدار ذخیره‌ای که آنها می‌توانند فراهم کنند را محدود می‌کند. بنابراین همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده است، مقدار ذخیره ارائه شده به وسیله سمت تقاضا افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر، وقتی که میزان تقاضا کم است، ژنراتورها ذخیره مورد نیاز سیستم را فراهم می‌نمایند و هنگامی که میزان بار افزایش می‌یابد، ذخیره توسط سمت تقاضا فراهم می‌شود. نکته قابل توجه دیگر در شکل (۸)، کاهش قیمت تسویه بازار در ساعت دوم ($29/95 \$/MWh$) نسبت به ساعت اول ($32/05 \$/MWh$)، علی‌رغم افزایش میزان بار است. با تحلیل نتیجه حل مساله UC بهینه، علت این امر در ادامه تشریح می‌گردد.

با توجه به میزان بار مورد تقاضا و مقدار ذخیره ارائه شده توسط سمت تولید و سمت تقاضا در ساعت اول، این واحدهای تولیدی ۱۰۰ مگاواتی هستند که مشخص کننده قیمت تسویه بازار در این ساعت می‌باشند.

در ساعت اول برنامه، به علت کم بودن مقدار بار، کل ذخیره مورد نیاز توسط واحدهای تولیدی تامین شده است و بر این اساس میزان توان تولیدی واحدهای ۱۴، ۱۵ و ۱۶ به ترتیب برابر ۴۷، ۴۰ و ۴۰ مگاوات گردیده است که منجر به آن شده است تا این واحدها پیشنهاد قیمتشان را بر اساس پله دوم منحنی هزینه‌شان ارائه نمایند. در ساعت دوم با افزایش در

1) Ramp up

میزان بار سیستم و تامین بخشی از ذخیره مورد نیاز توسط سمت تقاضا، جهت تامین بار مصرفی، میزان توان تولیدی برخی واحدهای روشن، کاهش یافته است طوری که مقدار توان تولیدی واحدهای ۱۴، ۱۵ و ۱۶ به ۲۵ مگاوات یعنی حداقل میزان توان قابل تولیدشان تقلیل یافته است. بنابراین این واحدها بر اساس پله اول منحنی هزینه‌شان قیمت ارائه کرده‌اند که برابر $29/95 \$/MWh$ می‌باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله مدلی از بازار برق ارائه شد که در آن ضمن بهینه‌سازی همزمان انرژی و ذخیره، از پیشنهادات سمت تقاضا جهت ارائه خدمات ذخیره استفاده گردید. تولیدکنندگان و مصرف کنندگان در این بازار، پیشنهادات فروش و خریدشان را در دو دسته تولیدات مجزا و مشخص ارائه می‌کنند که عبارتند از: انرژی و ذخیره چرخان. در انجام این بهینه‌سازی همزمان منابع انرژی و ذخیره از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته و الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نتایج مطالعه موردی ارائه شده، آثار و فوائد پیشنهادات ذخیره سمت تقاضا را به وضوح نشان می‌دهند.

مهمترین اثر حضور سمت تقاضا در ارائه خدمات ذخیره در بازار، انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی واحدهای تولیدی است که خود منجر به افزایش رفاه اجتماعی می‌گردد. مشتریان، نه تنها سودشان را از طریق کاهش یافتن قیمت انرژی، افزایش می‌دهند بلکه موجب کاهش قدرت بازار واحدهای تولیدی می‌شوند. نکته قابل تأمل دیگر، نیاز به ذخیره سمت تقاضا در زمان‌هایی که میزان بار سیستم بالا است، می‌باشد طوری که علی‌رغم اینکه قیمت پیشنهادی سمت تقاضا برای ارائه ذخیره فوق العاده زیاد است، باز هم ISO برای تامین امنیت سیستم مجبور به خرید ذخیره از سمت تقاضا می‌گردد. این نکته نشانگر نقش حیاتی منابع سمت تقاضا در مواقع اوج بار و بحرانی است. مطالعات انجام شده به منظور بررسی آثار قیود بین زمانی ژنراتورها بر روی مشارکت سمت تقاضا، نشان داده است که مقدار ذخیره ارائه شده توسط واحدهای تولیدی، همزمان با افزایش بار در طول دوره، بطور قابل توجهی افت می‌کند زیرا قیود افزایشی توان واحدهای تولیدی، مقدار ذخیره‌ای که آنها می‌توانند فراهم کنند را محدود می‌کند. بنابراین مقدار ذخیره ارائه شده به وسیله سمت تقاضا افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر، وقتی که میزان تقاضا کم است، ژنراتورها ذخیره مورد نیاز سیستم را فراهم می‌نمایند و هنگامی که میزان بار افزایش می‌یابد، ذخیره توسط سمت تقاضا فراهم می‌شود.

همچنین به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی بدست آمده از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته، مساله با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک نیز شبیه‌سازی شد که نتایج نشان داده است که از منظر سرعت حل مسئله، این الگوریتم کمی کندتر و از منظر دقت نیز از دقت کمتری برخوردار می‌باشد.



منابع

- [1] Yun Tiam Tan, D. Kirthchen, " Co-optimization of Energy and Reserve in Electricity Markets with Demand-Side Participation in Reserve Service," IEEE PSEC, pp.1182-1189, Oct.2006.
- [۲] ن.حضرتی، م.رشیدی نژاد، ع.قره‌ویسی، " دیسپاچینگ توام انرژی و ذخیره در سیستم‌های قدرت تجدید ساختاریافته، " بیست و یکمین کنفرانس بین المللی برق، تهران ۱۳۸۵
- [3] D. Kirthchen, G. Strbac," Fundamental of Power System Economics," first ed.,Jon Wiley& Sons, West Sussex,2004
- [4] Online: www.gams.com .
- [5] Miguel Carrion, Jose M. Arroyo, "A Computationally Efficient Mixed-Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem," IEEE Trans. Power Syst, vol.21, No.3, Aug.2006.
- [6] Jing Wang, Nuria Encinas Redondo, and Francisco D. Galiana, "Demand-Side Reserve Offers in Joint Energy Reserve Electricity Markets." IEEE Trans. Power Syst, vol.18. No.4. Nov.2003.
- [7] RTS Task Force of APM Subcommittee IEEE, " IEEE reliability test system-1996," IEEE Trans. Power Syst., vol.14, pp.1010-1020, Aug.1999.



پیوستها

جدول (۱): مشخصات واحدهای تولیدی

| Ramp up | Ramp down | St. cost | Ini-power | Ini-state | Min Off | Min ON | NL | c | b | a | P _{min} | P _{max} | ردیف |
|---------|-----------|----------|-----------|-----------|---------|--------|--------|-----|-------|------|------------------|------------------|---------|
| ۴۸ | ۶۰ | ۰ | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۵۵/۱۵ | ۵۶ | -/۰.۸ | ۳۸/۹ | ۲ | ۱۲ | واحد ۱ |
| ۴۸ | ۶۰ | ۰ | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۵۵/۱۵ | ۵۶ | -/۰.۸ | ۳۸/۹ | ۲ | ۱۲ | واحد ۲ |
| ۴۸ | ۶۰ | ۰ | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۵۵/۱۵ | ۵۶ | -/۰.۸ | ۳۸/۹ | ۲ | ۱۲ | واحد ۳ |
| ۴۸ | ۶۰ | ۰ | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۵۵/۱۵ | ۵۶ | -/۰.۸ | ۳۸/۹ | ۲ | ۱۲ | واحد ۴ |
| ۴۸ | ۶۰ | ۰ | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۵۵/۱۵ | ۵۶ | -/۰.۸ | ۳۸/۹ | ۲ | ۱۲ | واحد ۵ |
| ۳۰/۵ | ۷۰ | ۲۰ | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۵۱۰/۹۷ | ۶۳۳ | -/۴۴ | ۴۸/۴ | ۱۶ | ۲۰ | واحد ۶ |
| ۳۰/۵ | ۷۰ | ۲۰ | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۵۱۰/۹۷ | ۶۳۳ | -/۴۴ | ۴۸/۴ | ۱۶ | ۲۰ | واحد ۷ |
| ۳۰/۵ | ۷۰ | ۲۰ | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۵۱۰/۹۷ | ۶۳۳ | -/۴۴ | ۴۸/۴ | ۱۶ | ۲۰ | واحد ۸ |
| ۳۰/۵ | ۷۰ | ۲۰ | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۵۱۰/۹۷ | ۶۳۳ | -/۴۴ | ۴۸/۴ | ۱۶ | ۲۰ | واحد ۹ |
| ۳۸/۵ | ۸۰ | ۵۰ | ۱۵/۲ | ۳ | ۲ | ۳ | ۱۳۹/۷۰ | ۱۴۵ | -/۰.۱ | ۱۱ | ۱۵ | ۷۶ | واحد ۱۰ |
| ۳۸/۵ | ۸۰ | ۵۰ | ۱۵/۲ | ۳ | ۲ | ۳ | ۱۳۹/۷۰ | ۱۴۵ | -/۰.۱ | ۱۱ | ۱۵ | ۷۶ | واحد ۱۱ |
| ۳۸/۵ | ۸۰ | ۵۰ | ۱۵/۲ | ۳ | ۲ | ۳ | ۱۳۹/۷۰ | ۱۴۵ | -/۰.۱ | ۱۱ | ۱۵ | ۷۶ | واحد ۱۲ |
| ۳۸/۵ | ۸۰ | ۵۰ | ۱۵/۲ | ۳ | ۲ | ۳ | ۱۳۹/۷۰ | ۱۴۵ | -/۰.۱ | ۱۱ | ۱۵ | ۷۶ | واحد ۱۳ |
| ۵۱ | ۷۴ | ۷۰ | ۰ | -۳ | ۲ | ۴ | ۵۳۷/۵۰ | ۶۱۵ | -/۰.۷ | ۲۵/۴ | ۲۵ | ۱۰۰ | واحد ۱۴ |
| ۵۱ | ۷۴ | ۷۰ | ۰ | -۳ | ۲ | ۴ | ۵۳۷/۵۰ | ۶۱۵ | -/۰.۷ | ۲۵/۴ | ۲۵ | ۱۰۰ | واحد ۱۵ |
| ۵۱ | ۷۴ | ۷۰ | ۰ | -۳ | ۲ | ۴ | ۵۳۷/۵۰ | ۶۱۵ | -/۰.۷ | ۲۵/۴ | ۲۵ | ۱۰۰ | واحد ۱۶ |
| ۵۵ | ۷۸ | ۱۵۰ | ۱۳۱ | ۵ | ۳ | ۵ | ۱۷۲/۶۶ | ۲۲۰ | -/۰.۱ | ۹/۳ | ۵۴ | ۱۵۵ | واحد ۱۷ |
| ۵۵ | ۷۸ | ۱۵۰ | ۱۲۶ | ۵ | ۳ | ۵ | ۱۷۲/۶۶ | ۲۲۰ | -/۰.۱ | ۹/۳ | ۵۴ | ۱۵۵ | واحد ۱۸ |
| ۵۵ | ۷۸ | ۱۵۰ | ۱۲۲ | ۵ | ۳ | ۵ | ۱۷۲/۶۶ | ۲۲۰ | -/۰.۱ | ۹/۳ | ۵۴ | ۱۵۵ | واحد ۱۹ |
| ۵۵ | ۷۸ | ۱۵۰ | ۱۱۸ | ۵ | ۳ | ۵ | ۱۷۲/۶۶ | ۲۲۰ | -/۰.۱ | ۹/۳ | ۵۴ | ۱۵۵ | واحد ۲۰ |
| ۵۵ | ۹۹ | ۲۰۰ | ۰ | -۴ | ۴ | ۵ | ۵۸۴/۹۰ | ۷۳۹ | -/۰.۲ | ۲۸/۵ | ۶۹ | ۱۹۷ | واحد ۲۱ |
| ۵۵ | ۹۹ | ۲۰۰ | ۰ | -۴ | ۴ | ۵ | ۵۸۴/۹۰ | ۷۳۹ | -/۰.۲ | ۲۸/۵ | ۶۹ | ۱۹۷ | واحد ۲۲ |
| ۵۵ | ۹۹ | ۲۰۰ | ۰ | -۴ | ۴ | ۵ | ۵۸۴/۹۰ | ۷۳۹ | -/۰.۲ | ۲۸/۵ | ۶۹ | ۱۹۷ | واحد ۲۳ |
| ۷۰ | ۱۲۰ | ۳۰۰ | ۳۴۲ | ۱۰ | ۵ | ۸ | ۱۴۶ | ۴۴۰ | -/۰.۱ | ۸/۶ | ۱۴۰ | ۲۵۰ | واحد ۲۴ |
| ۵۰/۵ | ۱۰۰ | ۵۰۰ | ۴۰۰ | ۱۰ | ۵ | ۸ | ۶۲۱ | ۶۲۱ | ۰ | ۱۳/۵ | ۱۰۰ | ۴۵۰ | واحد ۲۵ |
| ۵۰/۵ | ۱۰۰ | ۵۰۰ | ۴۰۰ | ۱۰ | ۵ | ۸ | ۶۲۱ | ۶۲۱ | ۰ | ۱۳/۵ | ۱۰۰ | ۴۵۰ | واحد ۲۶ |



جدول (۲): مشخصات بار

| ردیف | P_d^{\min} (MW) | P_d^{\max} (MW) | X (\$/MWh) | Y (\$/MWh) | B_0 (\$/h) | Qd (\$/MWh) |
|------|----------------------|----------------------|---------------|---------------|-----------------|----------------|
| ۱ | ۰ | ۲۷۵۰ | ۱۰۰۰ | ۰ | ۱۰۰۰ | متغیر |

جدول (۳): قیمت پیشنهادی واحدهای تولیدی برای ذخیره

| شماره واحد | Qg (\$/MWh) | شماره واحد | Qg (\$/MWh) | شماره واحد | Qg (\$/MWh) | شماره واحد | Qg (\$/MWh) |
|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|
| ۱ | ۳/۰۲ | ۸ | ۴/۹۷ | ۱۵ | ۲/۹۲ | ۲۲ | ۲/۶۲ |
| ۲ | ۳/۰۹ | ۹ | ۴/۹۵ | ۱۶ | ۲/۸۷ | ۲۳ | ۲/۴۹ |
| ۳ | ۲/۹۸ | ۱۰ | ۰/۹۹ | ۱۷ | ۰/۸۹ | ۲۴ | ۰/۸۵ |
| ۴ | ۲/۹۶ | ۱۱ | ۰/۹۵ | ۱۸ | ۰/۹۲ | ۲۵ | ۰/۳۵ |
| ۵ | ۳ | ۱۲ | ۱/۰۳ | ۱۹ | ۰/۸۶ | ۲۶ | ۰/۳۴ |
| ۶ | ۵ | ۱۳ | ۰/۹۷ | ۲۰ | ۰/۹۰ | | |
| ۷ | ۵/۰۳ | ۱۴ | ۲/۸۹ | ۲۱ | ۲/۵۶ | | |

علائم و اختصارات

N_g : تعداد واحدهای تولیدی

N_d : تعداد بارها

T : دوره برنامه‌ریزی

$C_i(u_{it}, Pg_{it})$: تابع هزینه پیشنهاد شده بوسیله i امین واحد تولیدی جهت تولید Pg_{it} بر حسب دلار بر مگاوات ساعت

Pg_{it} : توان خروجی تولید کننده i ام (MW).

u_{it} : متغیر باینری که اگر تولید کننده i ام در دوره t ام در مدار باشد برابر یک و در غیر این صورت صفر است.

NL_i : هزینه بی‌باری واحد i ام



S_i : هزینه راه‌اندازی واحد i ام

Qg_{it} : نرخ پیشنهادی i امین واحد تولیدی جهت فراهم کردن ذخیره چرخان بر حسب دلار بر مگاوات ساعت

Rg_{it} : ذخیره چرخان فراهم شده توسط i امین تولیدکننده (MW)

$B(Pd_{kt})$: تابع سود پیشنهاد بوسیله k امین مصرف‌کننده جهت مصرف کردن Pd_{kt} بر حسب دلار بر مگاوات ساعت

Qd_{kt} : نرخ پیشنهاد شده بوسیله k امین مصرف‌کننده جهت فراهم کردن ذخیره چرخان بر حسب دلار بر مگاوات ساعت

Rd_{kt} : ذخیره چرخان فراهم شده توسط k امین مصرف‌کننده (MW)

R_t : کل ذخیره چرخان مورد نیاز در ساعت t ام سیستم (MW)

Pg_i^{\min} : حد پایینی Pg_i (MW)

Pd_{kt}^{\min} : حد پایین سطح کاهش داده شده Pd_{kt} برای تهیه ذخیره چرخان

Pd_{kt}^{\max} : حد بالای سطح کاهش داده شده Pd_{kt} برای تهیه ذخیره چرخان

RR_i : نرخ شیب واحد i ام بر حسب مگاوات بر دقیقه

$x_{i(t-1)}^{off}$: مدت زمان خاموش بودن واحد i ام تا دوره $(t-1)$ ام

T_i^{on} : حداقل زمان روشن بودن واحد i ام

T_i^{off} : حداقل زمان خاموش بودن واحد i ام

$x_{i(t-1)}^{on}$: مدت زمان روشن بودن واحد i ام تا دوره $(t-1)$ ام

ND_i : تعداد فاصله‌های زمانی تابع هزینه راه‌اندازی پله‌ای واحد i

a_i ، b_i و c_i : ضرایب منحنی درجه دوم تابع هزینه واحدهای تولیدی

F_{li} : شیب تکه l ام از تابع هزینه خطی شده واحدهای تولیدی

$\delta_l(i)$: توان تولیدشده در تکه l ام تابع هزینه خطی شده واحدها

T_{li} : مرز بالایی تکه l ام از تابع هزینه خطی شده واحدهای تولیدی

$Pr d_{kt}$: سود پایه بدست آمده توسط k امین مصرف‌کننده

λ (MCP): قیمت تسویه شده انرژی در بازار.

l : قیمت ذخیره چرخان.

nl : تعداد بلوک‌های خطی‌سازی تکه l ام تابع هزینه (سود)

$Pr g_{it}$: سود پایه بدست آمده توسط i امین تولیدکننده