سیزدهمین کنفرانس شبکه های توزیع نیروی برق
۱۱و ۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۷- گیلان

بررسی تاثیرپیشنهادات ذخیره سمت تقاضا در بازارهای انرژی و ذخیره همزمان

رزم‌آرا ذاکری‌فر[1و2] شهرام جدید[1]
rzakerifar@yahoo.com jadid@iust.ac.ir
1- قطب علمی اتوماسیون وبهره برداری سیستمهای قدرت، دانشگاه علم و صنعت ایران
2- برق منطقه‌ای مازندران

واژه های کلیدی : بازار برق، ذخیره، مشارکت سمت تقاضا، برنامه ریزی خطی عدد صحیح

چکیده:
با تجدید ساختار در صنعت برق، فرصتهای جدیدی برای مشتریان برق جهت همکاری با شرکتهای برق یا تولیدکنندگان انرژی خرده فروش[1] ایجاد شده تا تقاضایشان را در پاسخ به نیازهای قابلیت اطمینان سیستم قدرت یا قیمتهای زیاد تغییر دهند. مزایا و فوائد کافی برای سیستم قدرت وجود دارد، اگر مشتریان مایل باشند بارهایشان را در مواقع بحرانی یا در شرایط قیمت بالا، کاهش دهند. مشارکت مصرف کننده در بازارهای انرژی عمده فروشی به افزایش قابلیت اطمینان سیستم قدرت، کاهش تغییر پذیری زیاد قیمت وپرداخت کمتر هزینه برق توسط مشتری، منجر می‌شود.
این مقاله به بررسی مدلی از بازار برق می‌پردازد که درآن از پیشنهادات سمت تقاضا برای تهیه خدمات ذخیره مورد نیاز بهره‌بردار سیستم استفاده می‌شود. در این بازار، انرژی و ذخیره که توسط واحدهای تولیدی و سمت تقاضا فراهم می‌شوند، بطور همزمان بهینه سازی و توزیع می‌گردند. در این مدل، تولید کنندگان و مصرف کنندگان، پیشنهادات فروش و خرید خود را در دو دسته تولیدات مجزا و مشخص ارائه می‌کنند که عبارتند از: انرژی و ذخیره . 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، نشان می‌دهند که نه تنها مصرف کنندگان با حضورشان در بازار سود خود را افزایش می‌دهند بلکه قدرت بازار تولیدکنندگان نیز کاهش می یابد.

فهرست واژه ها و اصطلاحات:

n: تعداد واحدهای تولیدی

P_{gi}: توان خروجی تولید کننده i ام بر حسب مگاوات.

P_{gi}^{min} : حد پایینی P_{gi} بر حسب مگاوات

P_{gi}^{max} : حد بالایی P_{gi} بر حسب مگاوات

a_i, b_i, c_i : ضرائب منحنی درجه دوم تابع هزینه واحدهای تولیدی

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

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

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

$\overline{q}_{gi}$: نرخ پیشنهاد شده توسط i امین واحد تولیدی جهت فراهم کردن ذخیره چرخان برحسب دلار بر مگاوات ساعت

[1] Retail Energy Supplier

m: تعداد بارها

P_{dj}: توان مصرفی مصرف کننده j ام بر حسب مگاوات

$\underline{P}_{dj}$: حد انعطاف پذیر پایینی Pdj بر حسب مگاوات

$\overline{P}_{dj}$: حد انعطاف پذیر بالایی Pdj بر حسب مگاوات

$\overline{\overline{P}}_{dj}$: حد پایینی سطح کاهش داده شده Pdj برای تهیه ذخیره چرخان

$\overline{q}_{dj}$: نرخ پیشنهاد شده بوسیله j امین مصرف کننده جهت فراهم کردن ذخیره چرخان بر حسب دلار بر مگاوات ساعت

nl: تعداد بلوک های خطی سازی تکه ای تابع هزینه (سود)

$C_i\ (u_i\ ,\ P_{gi})$: تابع هزینه پیشنهاد شده بوسیله i امین واحد تولیدی جهت تولید P_{gi} بر حسب دلار بر مگاوات ساعت

$B_j\ (P_{dj})$: تابع سود پیشنهاد بوسیله j امین مصرف کننده جهت مصرف کردن P_{dj} بر حسب دلار بر مگاوات ساعت

$\overline{R}$: کل ذخیره چرخان مورد نیاز سیستم بر حسب مگاوات،

$\overline{R}_{gi}$: ذخیره چرخان فراهم شده توسط i امین تولیدکننده بر حسب مگاوات،

u_i: متغیر باینری که اگر تولید کننده i ام در مدار باشد برابر یک و در غیر این صورت صفر است.

P^r_{gi} : سود پایه بدست آمده توسط i امین تولید کننده

$\overline{R}_{dj}$: ذخیره چرخان فراهم شده توسط j امین مصرف کننده بر حسب مگاوات،

P^r_{dj} : سود پایه بدست آمده توسط j امین مصرف کننده

l : قیمت تسویه شده انرژی در بازار،

m : قیمت ذخیره چرخان .

Ξ: بردار همه متغیرهای تصمیم

1- 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. در اغلب بازارهای برق، برنامه‌ریزی و تجارت انرژی و ذخیره در بازارهای جداگانه انجام می شود [1]. در چنین وضعیت‌هایی، فقط ژنراتورها برای مقدار مورد نیاز معین شده بهره بردار سیستم، پیشنهادهای ذخیره ارائه می‌کنند که معمولاً بعد از بازار انرژی تسویه می‌شود. به منظور جلوگیری از ناکار آمدی بازار ایجاد شده بوسیله این نوع مدل ترتیبی، امروزه ازبرنامه‌ریزی تولید و ذخیره بصورت همزمان استفاده می‌شود. این بهینه سازی همزمان بدین دلیل نیاز است که یک تعامل قوی بین تغذیه انرژی وفراهم‌آوری ذخیره وجود دارد چراکه جهت تهیه ذخیره چرخان، ژنراتورها باید در بار کمتر از بار نامی کار کنند. این حالت بهره برداری، جندین پی‌آمد دارد:

- ژنراتورها با بارگذاری غیر نامی، کمتر از میزان توانایی تولیدشان، انرژی خواهند فروخت.
- به منظور پاسخگویی به تقاضا، ژنراتورهای دیگری، که اغلب گران قیمت تر می باشند، باید انرژی بیشتری تولید کنند.
- ممکن است بازده ژنراتورهای فراهم کننده ذخیره چرخان، از بازده بهره برداری بار کاملشان، کمتر باشد.بنابراین، ممکن است نیاز باشد به این ژنراتورها بیش از میزان انرژی تولیدیشان پرداخت شود.

بنابراین پاسخگویی به نیازهای ذخیره، قیمت انرژی الکتریکی را افزایش خواهد داد[2].

تمایل سمت تقاضا برای ارائه ذخیره، نه تنها کنترل سیستم را تسهیل می کند و هزینه بهره برداری را پایین می آورد بلکه مصرف کنندگان را قادر می سازد تا سودشان را که ازبازار برق بدست می آید، حداکثر نمایند. تجربه در سنگاپور، نیوزیلند واسترالیا نشان می‌دهد که این روش تأمین ذخیره کافی را تضمین نموده و همچنین در کاهش کل هزینهٔ تولید مطمئن برق موفق بوده است[3].

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.

سرویس جانبی ذخیره چرخان شامل فراهم‌سازی ظرفیت فعال برای پاسخگویی بی‌وقفه به کاهش ناخواسته در تولید یا افزایش ناگهانی در بار می‌باشد که به علت قطع تولید واحدها یا خطوط انتقال است[4]. از آنجاییکه سیستمهای

قدرت بزرگ باید بطور مداوم ولحظه‌ای تعادل بین تولید و بار را حفظ کنند، ذخیره عملیاتی، سیستمهای قدرت را از نامتعادلی‌های ناخواسته محافظت می‌کند.

در این مقاله، فرض بر این است که در ازای یک قیمت، بارها ذخیره اضطراری را با اصلاح کردن مصرفشان، فراهم خواهند کرد.

این مقاله پنج بخش دارد. بعد از مقدمه، بخش دو به تشریح کامل مدل پیشنهادی می‌پردازد. در بخش سوم، نحوه تبدیل مساله به مساله‌ای که بتوان آن را با روش برنامه‌ریزی خطی عددصحیح حل نمود، تشریح و در ادامه مطالعه موردی و در نهایت نتیجه گیری ارائه می‌گردد.

2- مدل بازار انرژی وذخیره همزمان

تولید کنندگان و مصرف کنندگان 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 می کنند. همچنین بارها می توانند برای مصرف انرژی بعلاوه جهت تأمین ذخیره چرخان قیمت‌های پیشنهادی خود را ارائه دهند. توجه به این نکته لازم است که نیازی نیست نرخ های پیشنهاد شده برای محصولات ذخیره فوق‌الذکر 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 تولید کننده یک نرخ یکنواخت منفرد را برای کل محدوده هر محصول پیشنهاد ارائه می کند.

وظیفه اصلی بهره بردار بازار، حداقل کردن هزینه ترکیبی کل انرژی تولید شده و ذخیره فراهم شده بوسیله تولیدکنندگان و مصرف کنندگان، بعلاوه حداکثر نمودن کل سود بدست آمده بوسیله بارها است. تابع هدف ترکیبی شامل کل سود منهای کل هزینه که به عنوان رضایت اجتماعی شناخته شده است، می باشد. به منظور تحلیل ساده تر مشخصه های مهم مشارکت سمت تقاضا جهت تامین ذخیره در بازار از یک زمان بندی یک دوره‌ای استفاده شده است.

تابع هدف مساله مطرح شده عبارتست از:

$$\min_{\Xi}\left\{\sum_{i=1}^{n}\left[\begin{matrix}C_i\left(u_i,p_{gi}\right)\\+\bar{q}_{gi}\bar{R}_{gi}\end{matrix}\right]+\sum_{j=1}^{m}\left[-B_j\left(p_{dj}\right)+\bar{q}_{dj}\bar{R}_{dj}\right]\right\} \quad (1)$$

قیود این مساله عبارتند از:

$$\sum_{i=1}^{n}P_{gi}=\sum_{j=1}^{n}P_{dj} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\bar{R}_{gi}+\sum_{j=1}^{m}\bar{R}_{dj}=\bar{R} \quad (3)$$

$$\bar{R}\geq P_{gi}+\bar{R}gi\,;\ \mathrm{i=1,\ldots,n} \quad (4)$$

$$u_iP_{gi}^{\min}\leq P_{gi}\leq u_iP_{gi}^{\max},i=1,\ldots,n \quad (5)$$

$$P_{dj}^{\min}\leq P_{dj}\leq u_iP_{dj}^{\max},\ j=1,\ldots,m \quad (6)$$

$$0\leq\bar{R}_{gi}\leq u_iP_{gi}^{\max}-P_{gi},i=1,\ldots,n \quad (7)$$

$$0\leq\bar{R}_{dj}\leq P_{dj}-u_iP_{dj}^{\min},\ j=1,\ldots,m \quad (8)$$

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

$$C_i\left(u_i,P_{gi}\right)=u_i.C_{0i}+a_jP_{gi}+b_jP_{gi}^2 \quad (9)$$

$$B_j\left(P_{dj}\right)=-B_{0j}+X_j.P_{dj}-Y_j.P_{dj}^2 \quad (10)$$

درروابط (2) تا (8)، سه قید اول، توازن انرژی و ذخیره چرخان را تاکید می‌کند.

حد اقل ذخیره مورد نیاز سیستم با استفاده از معیار امنیت n -2 و n-1 ، تعیین می‌شود طوریکه 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 (4) مقید می کند که ذخیره چرخان بایستی از دست رفتن بزرگترین ژنراتور را بپوشاند.

حدود انرژی تولیدی و مصرفی بوسیله تولید کننده ها و بارها، بعلاوه حدود ذخیره در قیود (5) تا (8) نشان داده شده‌اند. مرز $\bar{p}_{dj}^{\min}$ ، نشانگر حداکثر کاهش باری است که j امین بار می‌تواند انجام دهد تا ذخیره چرخان مورد نیاز را فراهم کند. به همین ترتیب مرز $\bar{p}_{dj}^{\max}$، محدوده بالایی مصرف را که jامین بار مایل است تا ذخیره را فراهم کند، نشان می دهد.

سود اصلی[2] تولید کننده i ام ، تفاوت بین درآمد ترکیبی در هزینه های حدی برای فروش تولیدات مختلف منهای هزینه‌های تولید انرژی و ذخیره است:

$$Pr_{gi} = \left(\lambda P_{gi} + \overline{\mu}.\overline{R}_{gi}\right) - \left(C_i\left(u_i, P_{gi}\right) + \overline{q}_{gi}\,\overline{R}_{gi}\right) \quad (11)$$

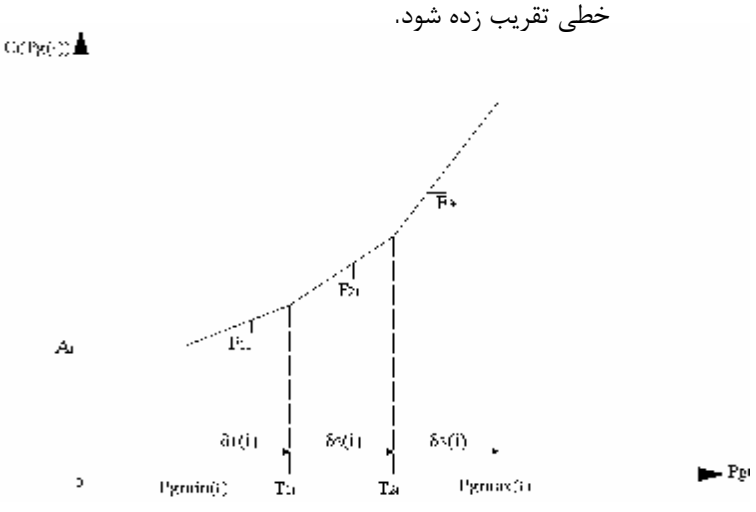
همچنین سود مصرف کننده j ام، تفاوت بین سود بعلاوه درآمدها در هزینه‌های حدی برای فروش ذخیره منهای هزینه انرژی مصرفی بعلاوه هزینه برای ذخیره پیشنهاد شده است، یعنی:

(12)

$$Pr_{dj} = \left(B_j(P_{dj}) + \overline{\overline{m}.R}_{dj}\right) - \left(l P_{dj} + \overline{q}_{dj}\,\overline{R}_{dj}\right)$$

3- روش حل مساله:

برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته[3] چنانکه در بسته نرم‌افزاری GAMS [6] قابل دسترس هستند، می تواند مساله فرموله شده فوق را بگونه‌ای کاملاً کارآمد و موثر تحلیل نماید. از آنجائیکه تابع هدف در رابطه (1)، تابعی غیر خطی از P_{dj} و P_{gi} است لذا بایستی بوسیله یک تابع خطی تقریب زده شود.



شکل(1): تابع هزینه تولید تکه‌ای خطی

همانطوریکه در شکل(1) نشان داده شده است، تابع هزینه واحدهای تولیدی در رابطه(9) می‌تواند بوسیله تعدادی بلوک تکه‌ای خطی بصورت قابل قبولی تقریب زده شود[6]. در صورتی که منحنی درجه دوم تابع هزینه با تعداد مناسبی بلوک، تقریب زده شود، آنگاه به منظور تحلیهای کاربردی، تابع خطی‌سازی شده تکه‌ای در شکل(1) با مدل غیرخطی آن تمایز چندانی نخواهد داشت . البته در اکثر بازارها، پیشنهادات خرید و فروش بصورت منحنی‌های خطی تکه‌ای ارائه می‌شوند که در این مورد هیچ تقریبی نیاز نیست.

روابط ریاضی این تقریب‌سازی خطی بصورت زیر است[6]:

$$C_i\left(u_i, P_{gi}\right) = A_i.u_i + \sum_{l=1}^{nl} F_{li}\,\delta_l(i), \quad i = 1,\ldots,n \quad (13)$$

$$P(i) = \sum_{l=1}^{nl} \delta_l(i) + P_{gi}^{min}.u(i), \; i = 1,\ldots,n \quad (14)$$

$$\delta_1(i) \le T_{1i} - P_{gi}^{min} \quad (15)$$

$$\delta_l(i) \le T_{li} - T_{(l-1)i}, \quad l = 2,\ldots,nl_i - 1, i = 1,\ldots,n \quad (16)$$

$$\delta_{nl_i}(i) \le P_{gi}^{max} - T_{nl_i - 1i} \quad (17)$$

$$\delta_l(i) \ge 0, \; l = 1,\ldots,nl, i = 1,\ldots,n \quad (18)$$

که در آن:

$$A_i = c_{0i} + a_i.p_{gi}^{min} + b_i.p_{gi}^{min\,2} \quad (19)$$

4- مطالعه موردی:

به منظور نشان دادن برخی آز آثار پیشنهادات ذخیره سمت تقاضا در یک بازار انرژی و ذخیره همزمان، از یک سیستم 24 شینه و همچنین از یک برنامه UC[4] یک‌دوره‌ای بدون ملاحظات شبکه از قبیل تراکم یا تلفات استفاده شده است.

سیستم شامل 26 ژنراتور حرارتی و 6 واحد آبی و 24 بار است که در شبیه سازی، بارها را بصورت مجتمع و به عنوان یک مصرف کننده مجزا در نظر گرفته شده‌اند. واحدهای آبی در ماکزیمم خروجی‌شان عمل می‌کنند و در این حراج شرکت نمی کنند.

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 ضمیمه 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 می شوند ولی ممکن است به ازاء یک قیمت مناسب مایل

---

[2] Basic profit

[3] Mixed-Integer linear programming(MILP)

[4] Unit Commitment

باشند تا با کاهش مصرفشان بصورت اضطراری، بخشی از ذخیره سیستم را فراهم سازند. در شبیه سازی این عمل از طریق پیشنهاد پارامتر $\overline{q}_d$ ، منعکس خواهد شد.

بمنظور محدود کردن تعداد قیود تأثیرگذار در حل مساله زمان بندی بهینه، ذخیره چرخان مورد نیاز سیستم طوری در نظرگرفته شده است که در صورت ازدست رفتن بزرگترین واحد تولیدی در مدار، بتواند آن را تامین نماید. در این مثال، صرف نظر از پیشنهادات سمت تقاضا برای ذخیره ، کل دیماند همیشه 2750MW است . قابل توجه است که با این وجود همانطوریکه در جدول(2) مشاهده می‌شود UC بطور قابل توجهی با پیشنهادات مختلف ذخیره چرخان بار تغییر می‌کند. برای مثال، وقتی بار مقادیر زیادی را برای ذخیره پیشنهاد می‌نماید($/MWh) $\overline{q}_d$=52 که بیانگر آن است بارها تمایلی به فراهم کردن ذخیره ندارند)، UC بهینه، همه واحدهای تولیدی را روشن می کند. 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 400MW است که در نزدیکی خروجی حداکثرش بهره‌برداری می‌شود. بنابراین، به منظور یافتن نیازمندی‌های ذخیره، برخی واحدهای گران در حداقل خروجی‌شان بهره‌برداری می‌شوند. هرچه قدر $\overline{q}_d$ کاهش یابد(نشانگر آن است که مصرف کنندگان برای فراهم کردن ذخیره تمایل دارند) برخی از واحدهای تولیدی خیلی گران‌قیمت خاموش می‌شوند.

جدول (2) و شکلهای (2) ، (3) و(4) جزئیات بیشتری از اثر $\overline{q}_d$های مختلف را نشان می دهند. جدول(2) وشکل(4) افزایش در رفاه اجتماعی را با کاهش $\overline{q}_d$ نشان می‌دهند. این نتیجه از آنجا حاصل می‌شود که چون واحدهای تولیدی از فراهم‌کردن ذخیره به موجب مشارکت سمت تقاضا ترخیص شده‌اند لذا انعطاف‌پذیری‌شان در تخصیص انرژی افزایش خواهد یافت. تأثیر مهیج‌تر پیشنهادات ذخیره سمت تقاضا در قیمت‌های انرژی و ذخیره مشاهده می‌شود که از 62/83 و 52 دلار بر مگاوات ساعت به 34/48 و صفر دلار بر مگاوات ساعت تغییر می‌کند. در ابتدا با یک $\overline{q}_d$ بالا، تولید کننده‌های خیلی گران روشن هستند که در نتیجه موجب قیمت‌های بالا برای انرژی و ذخیره می‌شوند. متناوباً مقادیر $\overline{q}_d$ 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 $\overline{q}_d$، همیشه قیمت ذخیره μ را تعیین می نمایند ولو اینکه پیشنهادات ذخیره تولید کننده ($\overline{q}_{gi}$) پایین‌تر از $\overline{q}_d$ باشد. علت این امر آنست که اگر تولیدکنندگان ذخیره بیشتری فراهم کنند، مجبور خواهند بود که با راندمان اقتصادی کمتری بهره برداری شوند.

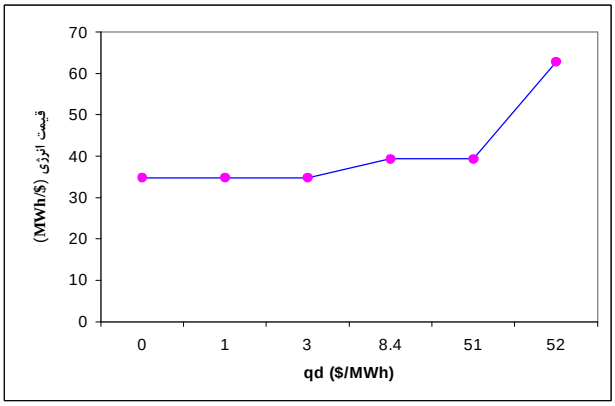
جدول(1):تعداد واحدهای در مدار برحسب پیشنهادات ذخیره سمت تقاضا

نوع و حداکثر تعداد واحدهای تولیدی	q_d=52 ($/MWh)	q_d=51 ($/MWh)	q_d=8/4 ($/MWh)	q_d=3 ($/MWh)	q_d=0 ($/MWh)
12MW(5)	5	5	5	0	0
20MW(4)	4	0	0	0	0
76MW(4)	4	4	4	4	4
100MW(3)	3	3	3	3	3
155MW(4)	4	4	4	4	4
197MW(3)	3	3	3	3	3
350MW(1)	1	1	1	1	1
400MW(2)	2	2	2	2	2

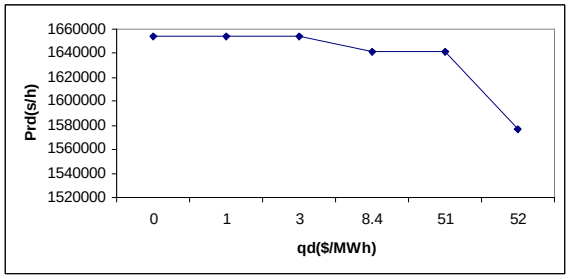
جدول(2): تغییرات پارامترهای اقتصادی در برنامه ریزی بهینه در برابر پیشنهادات ذخیره سمت تقاضا بر حسب ($/MWh)

	λ ($/MWh)	μ ($/MWh)	هزینه ذخیره (k$/h)	Pr_d (k$/h)	رفاه اجتماعی (k$/h)
q_d=52	62/83	52	20/8	1577/2	1691/2
q_d=35	39/38	35	14	1641/7	1695/2
q_d=8/4	39/38	8/4	3/36	1641/7	1695/2
q_d=3	34/84	3	1/2	1641/9	1695/7
q_d=0	34/84	0	0	1641/9	1696/4

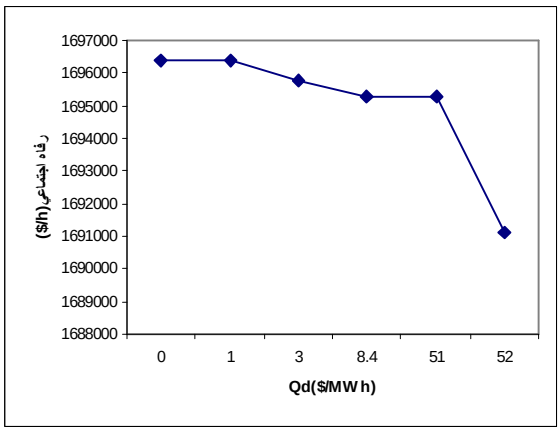
همچنین در جدول (2) و شکل (3) دیده می‌شودکه اگرچه هزینه ذخیره μ با پیشنهاد $\overline{q}_d$ کاهش می یابد ولی به علت کاهش قیمت انرژی به همان نسبت، منفعت بار روند افزایشی خود را حفظ خواهد نمود.



شکل(2): تغییرات قیمت انرژی با پیشنهادات قیمت ذخیره سمت تقاضا



شکل(3): تغییرات میزان سود بار با پیشنهادات قیمت ذخیره سمت تقاضا



شکل(4): تغییرات میزان رفاه اجتماعی با پیشنهادات قیمت ذخیره سمت تقاضا

در شکل (2) ، وقتی که $\overline{q}_d$ از $52 \$/MWh$ به $51 \$/MWh$ می‌رسد، قیمت انرژی کاهش شدیدی را نشان می‌دهد. این کاهش، به علت خاموش‌شدن برخی ژنراتورها موجب شده است. با توجه به مطالب گفته شده، از قبل مشخص بود که هر اندازه که $\overline{q}_d$ کاهش یابد، ذخیره نه تنها بوسیله ژنراتورها بلکه بوسیله بارها فراهم می‌شود. در نقطه‌ای که $\overline{q}_d$ به $51 \$/MWh$ می‌رسد بر اساس برنامه‌ریزی بهینه، ژنراتورهای گران‌قیمت 20 مگاواتی خاموش شده‌اند و به منظور ایفاکردن توازن قدرت، برخی از ژنراتورهایی که روشن باقی می‌مانند(شامل ژنراتورهای 22،21،15،14و23) انرژی خروجی‌شان را افزایش می‌دهند. بنابراین، قیمت انرژی تا 59/5 % کاهش می‌یابد.

علاوه بر مطالب فوق شبیه سازی های دیگری نیز در این مطالعه انجام شده است . برای مثال، اگر بار انعطاف پذیر[5] باشد، همچنانکه ژنراتورها آزاد می شوند، این منجر به کم‌شدن قیمت انرژی می‌شود. انعطاف پذیری بار قدرت بازار بارها را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، از آنجائیکه با یک دیماند غیر انعطاف پذیر 2750^{mw}، پیشنهاد ذخیره چرخان سمت تقاضا $\overline{q}_d$ یک تأثیر بزرگ در بازار دارد. با ایجاد انعطاف پذیری 5% این تأثیر بطور قابل توجهی کاهش می یابد. 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 می شود. علاوه بر این اثر بارهای مجزا نیز بررسی شده است و مشاهده گردید که اگر یک زیر مجموعه به اندازه کافی بزرگ از بارها جمع شوند تا ذخیره را پیشنهاد بدهند، اثرشان روی قیمت بازار، قابل توجه‌تر می‌شود.

5-نتیجه گیری

دراین مقاله مدلی از بازار برق ارائه شد که درآن ضمن بهینه‌سازی همزمان انرژی وذخیره، 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 وذخیره از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته 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. مشترکین، نه تنها سودشان را از طریق کاهش یافتن قیمت انرژی،

[5] Elastic

افزایش می‌دهند بلکه موجب کاهش قدرت بـازار واحـدهای تولیدی می‌شوند.

مراجع

[1] 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

[2] D. Kirthchen, G. Strbac," Fundamental of Power System Economics," first ed.,Jon Wiley& Sons, West Sussex,2004

[3]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.

[4] ن.حضرتی، م.رشیدی نژاد، ع.قره‌ویسی،" دیسپاچینگ تـوام انـرژی و ذخیـره در سیـستمهای قـدرت تجدیـد ساختاریافته،" بیست ویکمین کنفرانس بـین المللـی بـرق، تهران1385

[5] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, and R. Raman, GAMS: A User's Guide, 1998

[6] 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

[7] RTS Task Force of APM Subcommittee IEEE, " IEEE reliability test system-1996," IEEE Trans. Power Syst., vol.14, pp.1010-1020,Aug.1999

ضمیمه

مشخصات واحدهای تولیدی

Unit no.	p^{min}	p^{max}	a	b	c	q_g
1	2	12	38.9	0.08	56	3.02
2	2	12	38.9	0.08	56	3.09
3	2	12	38.9	0.08	56	2.98
4	2	12	38.9	0.08	56	2.96
5	2	12	38.9	0.08	56	3
6	16	20	48.4	0.44	633	5
7	16	20	48.4	0.44	633	5.03
8	16	20	48.4	0.44	633	4.97
9	16	20	48.4	0.44	633	4.95
10	15	76	11	0.01	145	0.99
11	15	76	11	0.01	145	0.95
12	15	76	11	0.01	145	1.03
13	15	76	11	0.01	145	0.97
14	25	100	25.4	0.07	615	2.89
15	25	100	25.4	0.07	615	2.92
16	25	100	25.4	0.07	615	2.87
17	54	155	9.3	0.01	220	0.89
18	54	155	9.3	0.01	220	0.92
19	54	155	9.3	0.01	220	0.86
20	54	155	9.3	0.01	220	0.90
21	69	197	28.5	0.02	739	2.56
22	69	197	28.5	0.02	739	2.62
23	69	197	28.5	0.02	739	2.49
24	140	350	8.6	0.01	440	0.85
25	100	400	13.5	0	621	0.35
26	100	400	13.5	0	621	0.34

مشخصات بار

	$\overline{P}_d^{min}$ (MW)	$\overline{P}_d^{max}$ (MW)	X ($/MWh)	Y ($/MWh)	B_0 (K$/h)
1	0	2750	1000	0	1000