

سوداگری نیروگاه مجازی در بازار برق

سعید سید مهدوی^۱، محمدحسین جاویدی دشت بیاض^۲، سمیه حسن پور^۳

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی - مشهد- ایران
Saeed.seyyedmahdavi@gmail.com

۲- آزمایشگاه تخصصی مطالعات سیستم و تجدید ساختار- دانشگاه فردوسی- مشهد- ایران
H-javidi @um.ac.ir

۳- موسسه آموزش عالی سجاد- مشهد- ایران
S_hasanpour@sadjad.ac.ir

چکیده: به گروهی از منابع انرژی پراکنده که تحت یک مدیریت و کنترل مرکزی قرار گرفته‌اند نیروگاه مجازی اطلاق می‌شود. یکی از بخش‌های تشکیل دهنده نیروگاه مجازی، منابع ذخیره ساز انرژی است که حضور و شرکت آن در بازار برق می‌تواند موقعیت‌های سوداگری را پدید آورد. در این مقاله، مدلی مبتنی بر ریاضیات برای شناسایی انواع سوداگری و موقعیت‌های سوداگری نیروگاه مجازی در بازار برق و کسب بیشترین سود پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی تمامی محدودیت‌های نیروگاه مجازی، محدودیت‌های شبکه و ساختار نیروگاه مجازی را در نظر می‌گیرد و آرایش واحدهای انرژی پراکنده، وضعیت شارژ یا دشارژ منابع ذخیره ساز انرژی و میزان بار قابل قطع شده را برای بازار روز بعد معین می‌سازد. با پیاده سازی مدل پیشنهاد شده بر روی شبکه نمونه، انواع سوداگری و موقعیت‌های مختلف سوداگری برای نیروگاه مجازی مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: نیروگاه مجازی، سوداگری، بازار برق، پیشنهاد قیمت

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۱۱/۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۲/۵/۱

نام نویسنده‌ی مسئول : سعید سید مهدوی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - مشهد - میدان آزادی- دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده‌ی مهندسی- آزمایشگاه تخصصی مطالعات سیستم و تجدید ساختار

۱- مقدمه

صاحبان تولیدات پراکنده تمایل دارند که مازاد تولید خود را به شبکه داده و در ساعاتی که تولید آن‌ها کافی نیست اضافی توان مورد نیاز را از شبکه دریافت کنند. در نتیجه جهت عبور توان در شبکه در ساعات مختلف شبانه روز بارها تغییر خواهد کرد. تبادل توان بین تولیدات پراکنده و شبکه باید به نحوی مدیریت شود. در حالت عادی تولیدات پراکنده به تنهایی به علت ظرفیت پایین آن‌ها و همچنین ماهیت غیر قابل پیش بینی بعضی از آن‌ها نظیر سلول خورشیدی و باد، قابلیت شرکت در بازار را ندارند. برای حل مشکلات مطرح شده، تولیدات پراکنده باید تحت یک مجموعه یکپارچه و مجتمع قرار بگیرند و از یک سیستم کنترلی و مدیریت مرکزی به منظور شرکت در بازار استفاده کنند. این مسئله با ایده نیروگاه مجازی قابل دستیابی است که در آن منابع انرژی پراکنده به منظور مبادلات توان با بازار و همچنین تأمین خدمات جانبی به صورت یک مجموعه واحد در می‌آیند [۱-۵].

یکی از بخش‌های تشکیل دهنده نیروگاه مجازی، منابع ذخیره ساز انرژی است که از آن برای از بین بردن عدم تعادل‌های حاصل از ماهیت غیر قابل پیش بینی تولیدات پراکنده استفاده می‌شود. نیروگاه‌های مجازی دارای مزارع بادی و منابع ذخیره ساز انرژی در مراجع [۶-۸] مورد بررسی قرار گرفته است. نیروگاه مجازی در [۶] با توجه به میزان باد در دسترس و قیمت لحظه‌ای پیش بینی شده، اقدام به برنامه ریزی منابع ذخیره ساز انرژی و پیشنهاد قیمت در بازار می‌کند. مرجع [۷]، از دیدگاه فنی و اقتصادی امکان حضور نیروگاه مجازی در حضور منابع ذخیره ساز انرژی را در بازار کنترل توان بررسی می‌کند. استراتژی پیشنهاد قیمت مقاوم و پایدار برای نیروگاه مجازی در [۸] ارائه شده است که این استراتژی از طریق بهینه سازی بهره برداری از منابع ذخیره ساز انرژی در کنار مزارع بادی و به منظور فایز آمدن بر نایقینی‌هایی نظیر قیمت بازار و میزان باد در دسترس تعیین می‌گردد.

حضور و شرکت منابع ذخیره ساز انرژی در بازار برق می‌تواند موقعیت‌های سوداگری را پدید آورد [۹-۱۰]. با هدف دستیابی به بیشترین سود ممکن، نیروگاه مجازی باید با در نظر گرفتن موقعیت‌های سوداگری، اقدام به برنامه ریزی برای خود و شرکت در بازار برق داشته باشد. سوداگری به معنی خرید و فروش همزمان کالاهای مشابه یا هم ارزش با سرمایه گذاری صفر و بدون ریسک است. مفهوم عمومی این واژه عبارت است از هر فعالیتی که در جهت خرید کالا زیر قیمت و فروش آن با قیمت بالاتر، برای کسب سود انجام می‌گیرد. دو نوع سوداگری که در بازار برق می‌تواند شکل بگیرد سوداگری کالا مشابه و سوداگری کالا پایاپای است. سوداگری کالا مشابه زمانی است که محصولات مشابه خرید و فروش شوند. سوداگری

کالا پایاپای در رابطه با خرید و فروش محصولات مختلف در یک بازار و یا بازارهای مختلف است [۱۱].

در سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه حضور و اثر منابع ذخیره ساز انرژی در بازارهای برق و سوداگری به واسطه آن‌ها صورت گرفته است. مرجع [۱۲] مدلی تحلیلی-اقتصادی برای تعیین ظرفیت و وضعیت منابع ذخیره ساز انرژی در بازار برق در محیط تجدید ساختار یافته ارائه می‌کند. در این مدل، ارزش امروزی هزینه‌های سرمایه گذاری و هزینه‌های جاری منابع ذخیره ساز انرژی در مقابل درآمدهای حاصل از سوداگری این منابع در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۳]، برنامه ریزی و بهره برداری خرده فروش برق و منبع ذخیره سازی وابسته به آن در بازار برق با در نظر گرفتن نایقینی‌ها در سمت مصرف کننده، مدل سازی شده است. گونه‌های مختلف منابع ذخیره ساز انرژی به منظور کاربرد در شبکه قدرت، از دیدگاهی اقتصادی در [۱۴] مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور مدلی مبتنی بر حضور منابع ذخیره ساز در بازار برق ارائه شده است که هدف مدل بهینه ساختن درآمد حاصل از بهره برداری از منبع ذخیره ساز انرژی است. در مرجع [۱۰]، راه حلی تحلیلی برای برنامه ریزی منابع ذخیره ساز انرژی در بازار برق، با صرف نظر از محدودیت نرخ افزایش توان این منابع، ارائه شده است. این کار با معرفی محدوده قیمت مجاز برای شرکت ذخیره ساز انرژی در بازار انجام می‌گیرد و روشی ساده نیز برای ارزیابی سوداگری انرژی فراهم شده است.

در این مقاله، مدلی ریاضی برای حضور و مشارکت منابع ذخیره-ساز انرژی در کنار سایر منابع پراکنده انرژی تشکیل دهنده نیروگاه مجازی در بازار برق پیشنهاد شده است. این مدل با سوداگری انرژی و سوداگری انرژی و رزرو، اقدام به افزایش سود خود در بازار برق می‌کند. نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن ظرفیت و وضعیت منابع انرژی پراکنده تشکیل دهنده آن، پیش بینی بار مصرفی نیروگاه مجازی و پیش بینی قیمت انرژی و رزرو در بازار برق، پیشنهاد قیمت و برنامه تولید خود برای بازار روز بعد را معین می‌سازد. مدل پیشنهاد شده محدودیت‌های منابع انرژی پراکنده، قیود تعادل توان تولیدی و مصرفی، قیود امنیت شبکه نیروگاه مجازی و تلفات توان در شبکه نیروگاه مجازی را شامل می‌شود. حل مسئله سوداگری نیروگاه مجازی به کمک تجزیه بندر که روشی مبتنی بر ریاضیات است، حل می‌شود. نتایج حاصل از حل مسئله سوداگری معین شده به وسیله مدل پیشنهادی، وضعیت و آرایش واحدهای انرژی پراکنده، وضعیت شارژ یا دشارژ منابع ذخیره ساز انرژی و میزان بار قطع شده در هر یک از ساعت‌های روز بعد را مشخص می‌سازد.

در بخش دوم این مقاله، شرایط نیروگاه مجازی در بازار برق معرفی می‌شود. مدل پیشنهادی برای نیروگاه مجازی به منظور سوداگری در بازار برق در بخش سوم معرفی می‌شود. بخش چهارم به

۳- مدل پیشنهادی برای سوداگری نیروگاه

مجازی در بازار برق

هدف نیروگاه مجازی از شرکت در بازار برق و سوداگری، به دست آوردن بیشترین سود از طریق تأمین بار مصرفی مشترکان خود و تبادل توان با بازار برق است. بر این اساس تابع هدف مسئله سوداگری نیروگاه مجازی در بازار برق به صورت رابطه (۴) است.

$$\begin{aligned} \text{profit} = & \sum_{t=1:24} (\lambda_{E,t} \times P_t + \lambda_{R,t} \times R_t + \lambda_{L,t} \times L_t) \\ & - \sum_{t=1:24} \left(\sum_{i \in N_{DG}} \left(c_{DG,i,t} (P_{DG,i,t} + R_{DG,i,t}) \right) \right) \\ & - \sum_{t=1:24} \left(\sum_{j \in N_{es}} (c_{es,j,t} (P_{es,j,t})) \right) \\ & - \sum_{t=1:24} \left(\sum_{k \in N_{us}} (c_{us,k,t} (P_{us,k,t} + R_{us,k,t})) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

در این رابطه، بخش اول نشان دهنده درآمد حاصل از تبادل توان با بازار برق (انرژی و رزرو) و تأمین توان برای مشترکین نیروگاه مجازی است. بخش دوم، سوم و چهارم رابطه (۴) نمایانگر هزینه واحدهای تولیدات پراکنده، هزینه واحدهای ذخیره ساز انرژی و هزینه قطع بار است. در اینجا، بازار برق می‌تواند به صورت پرداخت به اندازه پیشنهاد قیمت یا به صورت یکنواخت در نظر گرفته شود. بازار رزرو بر اساس پیشنهادهای ظرفیت بسته می‌شود.

تابع هدف پیشنهاد شده رابطه (۴) برای سوداگری در بازار برق، باید با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از قیود و محدودیت‌ها حل شود. بخشی از این قیود مربوط به تعادل انرژی و رزرو تولیدی و مصرفی هستند که به ترتیب در (۵) و (۶) آورده شده‌اند. در این روابط، تلفات توان در شبکه نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده است.

$$P_t + \sum_{i \in N_{DG}} P_{DG,i,t} + \sum_{j \in N_{es}} (\eta_{es,j} \times P_{es,j,t}) + \sum_{k \in N_{us}} P_{us,k,t} = Load_t + P_{Loss}_t \quad (5)$$

$$R_t + \sum_{i \in N_{DG}} R_{DG,i,t} + \sum_{j \in N_{es}} (\eta_{es,j} \times R_{es,j,t}) + \sum_{k \in N_{us}} R_{us,j,t} = Res_t + R_{Loss}_t \quad (6)$$

دسته دیگر قیود مرتبط با منابع انرژی پراکنده در نیروگاه مجازی می‌باشند که توسط روابط (۷) تا (۱۵) نشان داده شده‌اند. روابط (۷) تا (۱۲) محدودیت‌های واحدهای تولیدات پراکنده، روابط (۱۳) و (۱۴) محدودیت‌های واحدهای ذخیره ساز انرژی و رابطه (۱۵) محدودیت بارهای قابل قطع را مشخص می‌سازد.

$$P_{DG,i}^{\min} \leq P_{DG,i,t} + R_{DG,i,t} \leq P_{DG,i}^{\max} \quad (7)$$

$$R_{DG,i,t} \leq \min\left\{ (10 \times MSR_i), (P_{DG,i}^{\max} - P_{DG,i,t}) \right\} \quad (8)$$

$$[X^{on}(i,t) - T^{on}(i)] \times [y(i,t-1) - y(i,t)] \geq 0 \quad (9)$$

تجزیه بندر و به‌کارگیری آن در حل مسئله سوداگری نیروگاه مجازی می‌پردازد. در بخش پنجم شبکه مورد مطالعه معرفی و مدل پیشنهادی بر روی شبکه نمونه پیاده سازی می‌شود. در بخش پایانی نیز نتیجه‌گیری کار ارائه می‌گردد.

۲- نیروگاه مجازی در بازار برق

نیروگاه مجازی می‌تواند به عنوانی عضو از بازار در بازارهای انرژی و رزرو شرکت داشته باشد. برنامه‌ریزی و پیشنهاد قیمت نیروگاه مجازی در بازار برق دارای تفاوت‌های عمده‌ای با نیروگاه‌های سنتی است. علت این تفاوت‌ها در زیر آورده شده است [۴]:

- نیروگاه مجازی می‌تواند نقشی دوگانه (تولید کننده یا مصرف کننده) در بازار برق داشته باشد، در صورتی که نیروگاه‌های سنتی تنها در نقش تولید کننده در بازار برق ظاهر می‌شوند.
- نیروگاه‌های سنتی مجبور به تأمین بار مصرفی در محدوده کاری خود نمی‌باشند، این در حالی است که نیروگاه مجازی وظیفه دارد بارهای مصرفی خود را نیز پاسخگو باشد.
- نیروگاه مجازی می‌تواند از نقاط مختلفی با شبکه متصل باشد. به همین علت پیشنهاد قیمت نیروگاه مجازی می‌تواند متأثر از ساختار شبکه و محدودیت‌های شبکه داخل محدوده نیروگاه مجازی باشد.

با توجه به تفاوت‌های ذکر شده، نیروگاه مجازی به هنگام شرکت در بازار برق و پیشنهاد قیمت باید قیود امنیت شبکه داخل محدوده نیروگاه مجازی را نیز در کنار قیود واحدهای انرژی پراکنده و تعادل توان تولیدی و مصرفی خود را در نظر داشته باشد. علاوه بر این، نیروگاه مجازی باید اطلاعات دقیقی از وضعیت منابع انرژی پراکنده خود و میزان ظرفیت تولیدی هر واحد در اختیار داشته باشد. سپس با تخمین بار مصرفی مشترکین خود و قیمت انرژی و رزرو در بازار برق، مبادرت به پیشنهاد قیمت در بازار برق می‌کند.

برای پیشنهاد قیمت و سوداگری در بازار برق، نیروگاه مجازی باید هزینه تولید توان به وسیله منابع تولیدی انرژی خود را معین سازد. توابع هزینه برای هر یک از منابع انرژی پراکنده به صورت‌های زیر در نظر گرفته شده‌اند:

هزینه تأمین توان P_{us} به واسطه یک ساعت قطع بار [۱۶]:

$$c_{us}(P_{us}) = a_{us} \cdot P_{us}^2 + b_{us} \cdot P_{us} \quad (1)$$

هزینه تولید توان P_{DG} توسط تولیدات پراکنده [۱۵-۱۶]:

$$c_{DG}(P_{DG}) = a_{DG} \cdot P_{DG}^2 + b_{DG} \cdot P_{DG} \quad (2)$$

هزینه تولید توان P_{es} به وسیله منابع ذخیره ساز انرژی [۱۵]:

$$c_{es}(P_{es}) = a_{es} |P_{es}| + b_{es} \quad (3)$$

اصلی حل می‌شود تا حدود بالا و پایین در حضور تعداد محدودی از قیود حاصل شود. زیر مسئله‌ها از پاسخ مسئله اصلی استفاده می‌کنند تا قیود باقیمانده را برآورده سازند. با حل مسئله اصلی و زیر مسئله‌ها، تابع هدف جدیدی در صورت ممکن بودن جواب، در تکرار بعدی پدید می‌آید که حدود بالا و پایین آن در تکرار قبل مشخص شده‌اند. در صورتی که جواب‌ها ناممکن باشند، برش‌هایی از صفحه که به پاسخ‌های غیرممکن می‌انجامند، به مسئله اصلی معرفی می‌شوند. در تکرار بعد، مسئله اصلی با قیود قبل و قیود اضافه شده حل می‌شود. جواب نهایی الگوریتم تجزیه بندر از تکرار مسئله اصلی و زیر مسئله‌ها حاصل می‌شود. شرط پایان این الگوریتم به هم رسیدن حدود بالا و پایین جواب است [۱۱ و ۱۸].

برای حل مسئله سوداگری با کمک الگوریتم تجزیه بندر، متغیرهای باینری y که نشان دهنده وضعیت منابع انرژی پراکنده است را می‌توان به عنوان متغیرهای پیچیده در نظر گرفت. وضعیت در مدار بودن واحدهای تشکیل دهنده نیروگاه مجازی را به وسیله متغیرهای باینری y می‌توان نمایش داد. به این معنی که اگر $y_i = 0$ باشد آنگاه $P_i = 0$ بوده و در نتیجه واحد تولیدی در مدار قرار ندارد. پاسخ بهینه برای این مسئله مجموعه‌ای از واحدها می‌باشند که قیدهای مورد نظر را با کمترین هزینه یا بیشترین سود برآورده می‌سازند.

با به کارگیری تکنیک تجزیه بندر برای مسئله سوداگری نیروگاه مجازی، الگوریتم حل مسئله به صورت مراحل زیر پیگیری می‌شود:

گام صفر: مقداردهی اولیه. مقادیر اولیه در تکرار اول برای متغیر باینری (y) برابر ۱ مقداردهی می‌شوند. این بدین معنی است که در تکرار اول تمامی واحدهای تشکیل دهنده نیروگاه مجازی در مدار در نظر گرفته می‌شوند. حد پایین تابع هدف در تکرار اول ($z_{down}^{(1)}$) برابر α_{down} قرار داده می‌شود.

گام یک: حل زیر مسئله. در اینجا، ما برای مسئله سوداگری نیروگاه مجازی در بازار برق یک زیر مسئله در نظر گرفته‌ایم. این زیر مسئله به صورت کمینه ساختن هزینه نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن محدودیت‌های تعادل توان، نیازمندی‌های رزرو، قیود منابع انرژی پراکنده و محدودیت‌های امنیت شبکه فرمول بندی می‌شود. زیر مسئله با در نظر گرفتن مقادیر تعیین شده برای متغیر باینری در گام قبل حل می‌شود:

$$\begin{aligned} \min \text{ cost} \\ \text{s.t. supply - demand constraints (5) and (6)} \\ \text{DER constraints (7) to (15)} \\ \text{VPP grid security constraints (16) to (21)} \end{aligned} \quad (22)$$

در هر تکرار، حد بالای تابع هدف در انتهای گام اول به صورت $\text{cost}(\hat{y}) = z_{up}^{(Iteration)}$ به روز رسانی می‌شود. علاوه بر این، با استفاده از ضرایب سیمپلکس (π) محاسبه شده در زمان حل زیر مسئله، برش بندر (۲۳) به مسئله اصلی افزوده می‌شود.

$$[X^{off}(i, t-1) - T^{off}(i)] \times [y(i, t-1) - y(i, t)] \leq 0 \quad (10)$$

$$X^{on}(i, t) = [X^{on}(i, t-1) + 1] \times [y(i, t-1)] \quad (11)$$

$$X^{off}(i, t) = [X^{off}(i, t-1) + 1] \times [1 - y(i, t-1)] \quad (12)$$

$$P_{es,j}^{min} \leq P_{es,t,j} \leq P_{es,j}^{max} \quad (13)$$

$$|P_{es,t,j}| \leq R_{CH,j} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{us,t,k} + R_{us,t,k} \leq P_{us,k}^{max} \quad (15)$$

دسته آخر قیود مربوط به شبکه نیروگاه مجازی است که به وسیله معادلات (۱۶) تا (۱۹) معین شده‌اند [۱۷]. این روابط معادلات عبور توان در داخل یک شبکه توزیع شعاعی را نشان می‌دهند. علاوه بر روابط فوق، نامعادلات (۲۰) و (۲۱) قیود امنیت شبکه نیروگاه مجازی را بیان می‌کنند.

$$V_j^2 = - \left[r_{ij} P_j + x_{ij} Q_j - \frac{V_i^2}{2} \right] + \sqrt{\left[r_{ij} P_j + x_{ij} Q_j - \frac{V_i^2}{2} \right]^2 - [r_{ij}^2 + x_{ij}^2] [P_j^2 + Q_j^2]} \quad (16)$$

$$\sin(\delta_i - \delta_j) = \frac{x_{ij} P_j - r_{ij} Q_j}{V_i V_j} \quad (17)$$

$$P_{loss-ij} = r_{ij} \frac{(P_j^2 + Q_j^2)}{V_j^2} \quad (18)$$

$$Q_{loss-ij} = x_{ij} \frac{(P_j^2 + Q_j^2)}{V_j^2} \quad (19)$$

$$-P_{ij}^{max} \leq P_{ij}(t) \leq P_{ij}^{max} \quad (20)$$

$$V^{min} \leq V \leq V^{max} \quad (21)$$

۴- به کارگیری تجزیه بندر در حل مسئله

سوداگری نیروگاه مجازی

تجزیه بندر توسط جی.اف. بندر به منظور تحلیل مسایل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) با ابعاد بزرگ معرفی شده است. این روش معمولاً برای حل مسائل مرتبط با سیستم قدرت نظیر طراحی و برنامه ریزی شبکه قدرت، بهره برداری از شبکه قدرت و برخی بهینه سازی شبکه قدرت استفاده می‌شود. کاربردهای دیگر این روش در حل مشکلات در زمینه های حمل و نقل، استراتژی‌های جنگی، کاربردهای نظامی و ... است [۱۱ و ۱۸].

هنگام استفاده از تجزیه بندر، مسئله به یک مسئله اصلی و چند زیر مسئله تجزیه می‌شود. معمولاً مسئله اصلی یک مسئله عدد صحیح و زیر مسئله‌ها به صورت مسائل خطی هستند. در این روش مسئله

۵- شبکه نمونه و نتایج عددی

در این بخش، شبکه نمونه‌ای به منظور ارزیابی مدل پیشنهاد شده جهت سوداگری نیروگاه مجازی در بازار برق معرفی شده است. این شبکه، مشابه شبکه نمونه ای است که در [۴ و ۱۵] استفاده شده است. در این شبکه، یک نیروگاه مجازی متشکل از هشت واحد تولیدات پراکنده انرژی و دو منبع ذخیره ساز انرژی، به سوداگری در بازار برق می‌پردازد. ساختار شبکه و بار کل پیش بینی شده برای روز بعد نیروگاه مجازی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. به منظور در نظر گرفتن اثر ساختار شبکه در مدل پیشنهادی، بار کل شبکه در شش باس مختلف نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده‌اند. بخشی از بار در باس‌های ۴ و ۷ به عنوان بار قابل قطع فرض شده‌اند. بارهای باس ۴ و ۷ می‌توانند به ترتیب تا ۳۰ و ۴۰ کیلووات قطع شوند. هزینه ای که برای قطع بار در این باس‌ها در نظر گرفته شده است به وسیله روابط (۲۵) و (۲۶) مشخص شده است.

$$c_{us}(P_{us}) = 0.01 \times P_{us}^2 + 3 \times P_{us} \quad (25)$$

$$c_{us}(P_{us}) = 0.01 \times P_{us}^2 + 1.5 \times P_{us} \quad (26)$$

مشخصات و محدودیت‌های واحدهای تولیدات پراکنده نظیر محدودیت تولید، ضرایب تابع هزینه، حداقل زمان روشن یا خاموش بودن واحد و نرخ افزایش توان هر واحد در جدول (۱) به نمایش در آمده است.

جدول (۱): مشخصات و محدودیت‌های منابع تولیدات پراکنده

	Pmin (kW)	Pmax (kW)	a	b	MU (h)	MD (h)	MSR (kW/m)
DG1	20	85	0.01	10.5			3
DG2	35	115	0.01	8.5	4	4	
DG3	30	110	0.01	9.2	3	3	
DG4	20	75	0.01	12.6			2.5
DG5	25	80	0.01	7.2	2	2	
DG6	30	90	0.01	7	3	3	
DG7	30	100	0.01	10.1			
DG8	20	90	0.01	12.7			3.5

جدول (۲) مشخصات و محدودیت‌های منابع ذخیره ساز انرژی نظیر حداقل و حداکثر ظرفیت، حداکثر نرخ شارژ و دشارژ، ضریب تبدیل انرژی هر واحد را نشان می‌دهد. ظرفیت اولیه هر یک از منابع ذخیره ساز در اینجا ۲۰ کیلووات در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): مشخصات و محدودیت‌های منابع ذخیره ساز انرژی

ES2	ES1	
۴۰	۵۸	حداکثر ظرفیت (کیلووات)
۵	۵	حداقل ظرفیت (کیلووات)
۱۰	۱۲	نرخ شارژ (کیلووات بر ساعت)
۱۰	۱۲	نرخ دشارژ (کیلووات بر ساعت)
%۸۰	%۸۰	ضریب تبدیل انرژی

شکل ۴ نرخ خرده فروشی برای مشترکین نیروگاه مجازی و شکل ۵ قیمت‌های پیش بینی شده برای انرژی و رزرو در بازار برق را نشان

$$w(y) = \text{cost}(\hat{y}) + \sum_{i=1}^n \pi_i (y_i - \hat{y}_i) \quad (23)$$

گام دو: آزمون همگرایی. تا زمانی که

$$|z_{down}^{(Iteration)} - z_{down}^{(Iteration-1)}| \leq \epsilon$$

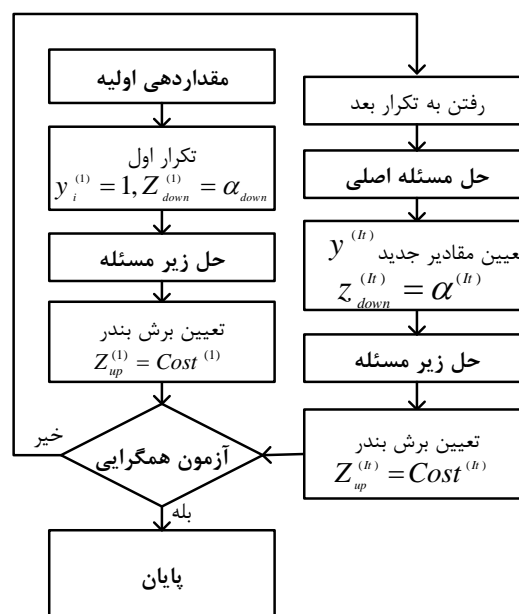
آغاز می‌شود. در غیر این صورت پاسخ بهینه حاصل شده است.

گام سه: حل مسئله اصلی. بر اساس نتایج به دست آمده از حل

زیر مسئله، مسئله اصلی به صورت زیر حل می‌شود:

$$\begin{aligned} \min \quad & \alpha \\ \text{s.t.} \quad & \alpha \geq \alpha_{down} \\ & w(y) \leq \alpha \\ & y_i \in \{0,1\} \end{aligned} \quad (24)$$

در رابطه (۲۴)، α تابعی است که تابع هدف بهینه را برای مسئله سوداگری نیروگاه مجازی فراهم می‌سازد و $w(y)$ مجموعه برش‌هایی است که از حل زیر مسئله در تکرارهای مختلف ایجاد می‌شود. با حل مسئله اصلی، مقادیر جدیدی برای متغیرهای باینری (y) تعیین می‌شود. مقدار حد پایین تابع هدف به صورت $z_{down}^{(It)} = \alpha^{(It)}$ به روز رسانی می‌شود. الگوریتم برای ادامه کار به گام اول بازمی‌گردد. شکل (۱) فلوچارت حل مسئله سوداگری با کمک الگوریتم تجزیه بندر را نشان می‌دهد. روش تجزیه بندر، یک روش مبتنی بر ریاضیات می‌باشد و نسبت به الگوریتم‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک، از زمان محاسبه بسیار کمتر و همگرایی بهتری برخوردار است [۱۹]. این امر باعث می‌شود که از این تکنیک برای حل مسایل با شبکه‌های بزرگ نیز بتوان استفاده کرد.

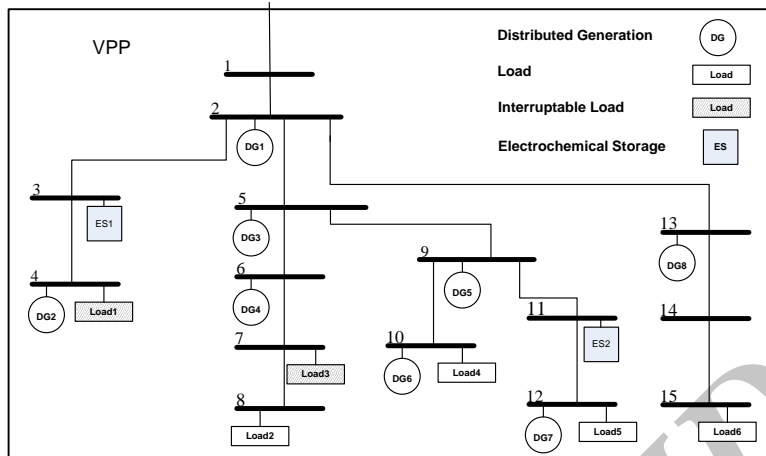


شکل (۱): فلوچارت حل مسئله سوداگری با کمک الگوریتم تجزیه

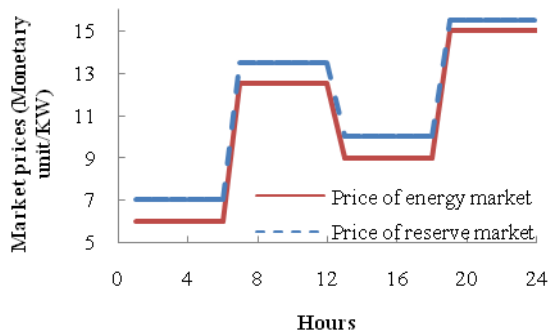
بندر

برای پیاده سازی مدل و حل مسئله سوداگری از نرم افزار GAMS و حل کننده مسئله CONOPT استفاده شده است.

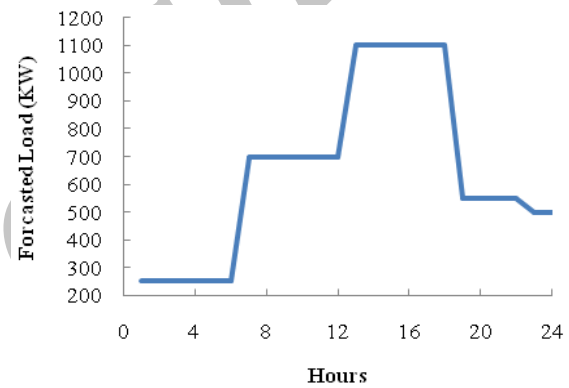
می دهد. منابع انرژی پراکنده شامل واحدهای تولید پراکنده DG1، DG4، DG8 و بارهای قابل قطع در باس های 4 و 7 دارای قابلیت تأمین رزرو فرض شده اند.



شکل ۲: ساختار نیروگاه مجازی استفاده شده برای ارزیابی مدل پیشنهادی برای سوداگری در بازار برق



شکل ۵: قیمت پیش بینی شده انرژی و رزرو در بازار ۲۴ ساعت آینده

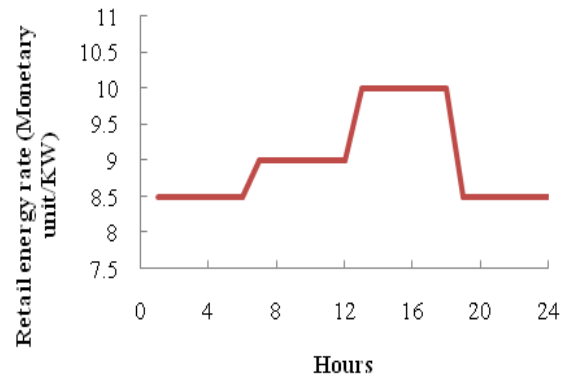


شکل ۳: بار کل پیش بینی شده نیروگاه مجازی در ۲۴ ساعت آینده

۵-۱- سوداگری نیروگاه مجازی بین انرژی و خدمات جانبی

سوداگری بین انرژی و خدمات جانبی نظیر رزرو می تواند سود بالاتری را نسبت به فروش تنها انرژی برای نیروگاه مجازی فراهم سازد. با استفاده از مدل پیشنهاد شده می توان سود حاصل از بازارهای انرژی و خدمات جانبی را بیشینه ساخت. اگر بهای خدمات جانبی نظیر رزرو بیشتر از انرژی باشد، کاهش فروش انرژی و افزایش فروش خدمات جانبی با در نظر گرفتن تمامی محدودیت ها، می تواند تصمیمی مناسب برای افزایش سود باشد. نتایج عددی حاصل از پیاده سازی مدل پیشنهادی و حل مسئله سوداگری به کمک روش تجزیه بندر، نشان می دهند که سوداگری بین انرژی و رزرو می تواند تحقق یابد. در ابتدا، تنها خرید و فروش انرژی را برای نیروگاه مجازی در بازار در نظر می گیریم. درآمد نیروگاه مجازی برای این حالت معادل ۹۴۲۲/۰۵۹ واحد پولی است.

در حالت دوم، نیروگاه مجازی می تواند به خرید و فروش انرژی در بازار برق پرداخته و همچنین امکان ارائه رزرو برای واحدهای آن در نظر گرفته می شود. این حالت معادل سوداگری کالا پایایی برای



شکل ۴: نرخ خرده فروشی نیروگاه مجازی به بارهای مصرفی خود در ساعات مختلف ۲۴ ساعت آینده

ساعت‌هایی که قیمت انرژی پایین‌تر است برق را خریداری کرده و منابع ذخیره ساز خود را شارژ می‌کند. سپس با در نظر گرفتن راندمان منابع ذخیره ساز و ضریب تبدیل این منابع، در ساعت‌هایی که قیمت انرژی بالاتر است آن‌را به بازار می‌فروشد. این حالت معادل سوداگری کالا مشابه است و با استفاده از مدل پیشنهاد شده، امکان این سوداگری نیز برای نیروگاه فراهم شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل پیشنهادی نمایانگر این است که سوداگری به کمک منابع ذخیره ساز انرژی نیز قابل تحقق است.

برای نشان دادن این سوداگری، دو حالت برای نیروگاه مجازی در بازار برق در نظر گرفته می‌شود. در حالت اول، نیروگاه مجازی دارای منابع ذخیره ساز انرژی معرفی شده در جدول (۲) می‌باشد. حالت دوم حداکثر نرخ شارژ و دشارژ منابع ذخیره ساز انرژی را کمتر از حالت اول و برابر به ترتیب ۶ و ۵ کیلووات در نظر می‌گیرد. نتایج مقایسه این دو حالت با حالت صفر که نیروگاه مجازی فاقد منابع ذخیره سازی انرژی است، در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۴): سوداگری نیروگاه مجازی در بازار برق به کمک منابع

ذخیره ساز انرژی

نیروگاه مجازی دارای ذخیره‌ساز انرژی حالت دوم	نیروگاه مجازی دارای ذخیره‌ساز انرژی حالت اول	نیروگاه مجازی بدون ذخیره‌ساز انرژی	
۱۰۵۳۰	۱۰۵۳۰	۱۰۵۰۰	کل توان تولید شده در نیروگاه مجازی (kW)
۶۶۳۱/۶۷	۶۶۳۲/۸۰۱	۶۶۵۹/۳	توان پیشنهاد شده به بازار انرژی (kW)
۱۵۴۵۶	۱۵۴۵۶	۱۵۴۵۶	بار کل (kW)
۱۴۵/۶۷	۱۴۶/۸۰۱	۱۴۳/۲۶	مجموع تلفات توان در نیروگاه مجازی (kW)
۸۴۰	۸۴۰	۸۴۰	کل بار قطع شده (kW)
۵۳۱۵۶/۷	۵۲۹۵۷	۵۴۱۸۵	هزینه خرید و فروش انرژی از بازار برق (واحد پولی)
۲۲۴۴۰	۲۲۴۴۰	۲۲۴۴۰	درآمد حاصل از بازار رزرو (واحد پولی)
۱۳۵۹۹۶	۱۳۵۹۹۶	۱۳۵۹۹۶	درآمد حاصل از فروش برق به مصرف کنندگان نیروگاه مجازی (واحد پولی)
۹۴۰۹۸	۹۴۰۹۸	۹۴۰۹۸	هزینه تولید انرژی (واحد پولی)
۱۱۱۸۱/۳۰۷	۱۱۳۸۱/۰۵	۱۰۱۵۳	سود (واحد پولی)

وضعیت شارژ و تخلیه منابع ذخیره ساز انرژی در هر یک از دو حالت مطرح شده در شکل ۶ نشان داده شده است.

نیروگاه مجازی است. درآمد نیروگاه مجازی برای این بازه زمانی معادل ۱۰۱۵۳ واحد پولی است. در هر دو حالت بالا، فرض شده است که نیروگاه فاقد منابع ذخیره ساز انرژی باشد. نقش و تأثیر منابع ذخیره‌ساز در قسمت بعدی مشاهده می‌شود. در جدول (۳) خلاصه خرید و فروش انرژی و رزرو، درآمدها و هزینه‌های نیروگاه مجازی را برای ساعات مختلف در این دو حالت نشان می‌دهد.

از مشاهده جدول (۳) این نتیجه حاصل می‌شود که ظرفیت کل عرضه انرژی و رزرو در هر دو حالت تقریباً یکسان بوده ولی در حالت دوم، سهم کمتری نسبت به حالت قبل به انرژی و سهم بیشتری به رزرو اختصاص داده شده است. نیروگاه مجازی با سوداگری انرژی و خدمات جانبی توانسته است سود بیشتری کسب کند. با مقایسه هزینه‌ها و درآمدهای دو حالت این نتیجه حاصل می‌شود که سود نهایی در حالت دوم به اندازه ۷۳۰/۹۴۱ واحد پولی نسبت به حالت اول افزایش یافته است که این امر از سوداگری بین انرژی و خدمات جانبی در حالت دوم حاصل شده است.

جدول (۳): نیروگاه مجازی در بازار انرژی در مقایسه با نیروگاه مجازی

در بازار انرژی و رزرو

نیروگاه مجازی فقط در بازار انرژی	نیروگاه مجازی فقط در بازار انرژی و رزرو	
۱۰۴۷۳/۶۷۵	۱۰۵۰۰	کل توان تولید شده در نیروگاه مجازی (kW)
۵۱۲۵/۶۰۸	۶۶۵۹/۳	توان پیشنهاد شده به بازار انرژی (kW)
.	۱۵۶۰	توان پیشنهاد شده در بازار رزرو (kW)
۱۵۴۵۶	۱۵۴۵۶	بار کل (kW)
۱۴۳/۲۸۴	۱۴۳/۲۶	مجموع تلفات توان در نیروگاه مجازی (kW)
۸۱۳/۶۷۵	۸۴۰	کل بار قطع شده (kW)
۹۴۰۰۴/۳۸۶	۹۴۰۹۸	هزینه تولید توان (واحد پولی)
.	۲۲۴۴۰	درآمد حاصل از رزرو (واحد پولی)
۳۲۸۰۶/۴۷۷	۵۴۱۸۵	هزینه خرید و فروش انرژی از بازار برق (واحد پولی)
۱۳۶۳۲/۹۲۲	۱۳۵۹۹۶	درآمد حاصل از فروش برق به مصرف کنندگان نیروگاه مجازی (واحد پولی)
۹۴۲۲/۰۵۹	۱۰۱۵۳	سود (واحد پولی)

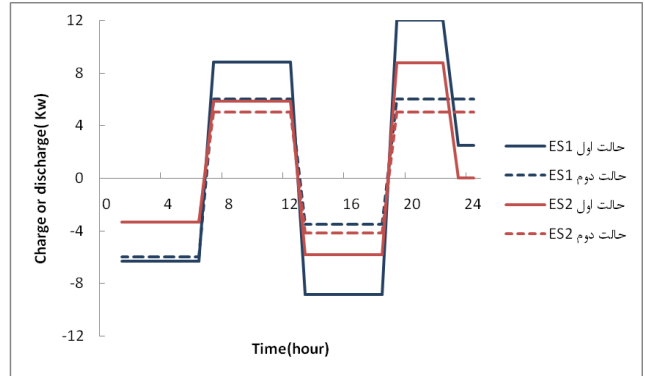
۵-۲- سوداگری نیروگاه مجازی با کمک منابع

ذخیره‌ساز انرژی

نیروگاه مجازی با توجه به داشتن منابع ذخیره ساز انرژی می‌تواند اقدام به سوداگری در بازار برق کند. بدین منظور نیروگاه مجازی در

فهرست علائم

$C_{us,k,t} (P_{us,k,t})$	هزینه قطع بار k در بازه t
$C_{DG,i,t} (P_{DG,i,t})$	هزینه تولید انرژی برای تولید پراکنده i در بازه t
$C_{es,j,t} (P_{es,j,t})$	هزینه منبع ذخیره ساز z در بازه t
$C_{sdDG,i,t}$	هزینه راه اندازی تولید پراکنده i در بازه t
$C_{shDG,i,t}$	هزینه خاموش کردن تولید پراکنده i در بازه t
$P_{us,k,t}$	بار قطع شده k در بازه t در بازار انرژی
$R_{us,k,t}$	بار قطع شده k در بازه t در بازار رزرو
$P_{DG,i,t}$	انرژی تولید شده توسط تولید پراکنده i در بازه t در بازار انرژی
$R_{DG,i,t}$	انرژی تولید شده توسط تولید پراکنده i در بازه t در بازار رزرو
$P_{es,j,t}$	ظرفیت شارژ یا دشارژ شده ذخیره ساز z در بازه t
$\lambda_{E,t}$	قیمت انرژی در بازار برق
P_t	ظرفیت پیشنهادی نیروگاه مجازی در بازار برق (خرید یا فروش)
$\lambda_{R,t}$	قیمت رزرو در بازار برق
R_t	ظرفیت رزرو پیشنهادی نیروگاه مجازی در بازار برق
$\lambda_{L,t}$	نرخ انرژی برای مصرف کنندگان نیروگاه مجازی
L_t	بار مصرف کنندگان نیروگاه مجازی
$Load_t$	بار تأمین شده توسط نیروگاه مجازی فقط در بازار انرژی
$PLoss_t$	تلفات توان در نیروگاه مجازی فقط در بازار انرژی
Res_t	بار تأمین شده توسط نیروگاه مجازی فقط در بازار رزرو
$RLoss_t$	تلفات توان در نیروگاه مجازی فقط در بازار رزرو
$P_{DG,i}^{min}, P_{DG,i}^{max}$	حد بالا و پایین تولید پراکنده i
MSR_i	نرخ افزایش توان تولید پراکنده i در بازار رزرو
N_{DG}	مجموعه تولیدات پراکنده
N_{es}	مجموعه منابع ذخیره ساز انرژی
N_{us}	مجموعه بارهای قابل قطع
$T^{on}(i), T^{off}(i)$	حداقل زمان روشن/خاموش بودن واحد i
$y(i,t)$	وضعیت آرایش واحد i در بازه t
$X^{on}(i,t)$	مدت زمان روشن بودن واحد i در زمان t
$X^{off}(i,t)$	مدت زمان خاموش بودن واحد i در زمان t
$P_{es,j}^{min}, P_{es,j}^{max}$	حد بالا و پایین منبع ذخیره ساز z
$R_{CH,j}$	بیشینه ظرفیت شارژ یا تخلیه ذخیره ساز z
$P_{us,k}^{max}$	حد بالای بار قابل قطع k
V^{min}, V^{max}	حد بالا و پایین ولتاژ
$P_{ij}^{min}, P_{ij}^{max}$	حد بالا و پایین توان خطوط بین i و j
α	تابع هدف مسئله اصلی
$w(y)$	قیود مسئله اصلی
$Z_{down}^{(It)}, Z_{up}^{(It)}$	حد بالا و پایین مسئله در تکرار It



شکل (۶): وضعیت شارژ و دشارژ منابع ذخیره ساز انرژی در هر یک از دو حالت مطرح شده برای ۲۴ ساعت آینده

جدول (۴) نشان می‌دهد که مجموع توان تولید شده توسط نیروگاه مجازی در دو حالت اول و دوم یکسان بوده است ولی در حالت اول به واسطه نرخ شارژ یا تخلیه بالاتر، امکان شارژ بیشتر منابع در ساعاتی که قیمت انرژی پایین تر بوده وجود داشته است. همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، منبع ذخیره ساز ES1 بین ساعات‌های ۱۳ تا ۱۸ در حالت اول میزان بیشتری انرژی نسبت به حالت دوم از شبکه دریافت و ذخیره سازی کرده است و با فروش این انرژی در ساعات‌های ۱۹ تا ۲۳ سود بیشتری را نسبت به حالت اول کسب کرده است.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، مدلی مبتنی بر ریاضیات برای سوداگری نیروگاه مجازی در بازار برق ارائه شده است که در آن تمامی محدودیت‌های واحدهای تولیدات پراکنده، ذخیره سازهای انرژی، ساختار نیروگاه مجازی و قیود شبکه در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی وضعیت آرایش منابع انرژی پراکنده، وضعیت شارژ یا دشارژ منابع ذخیره ساز انرژی، میزان بار قطع شده را جهت پیشنهاد انرژی و رزرو در بازار روز بعد معین می‌سازد. از الگوریتم تجزیه بندر برای حل مسئله سوداگری نیروگاه مجازی در بازار برق استفاده شده است.

با پیاده سازی مدل پیشنهاد شده بر روی شبکه نمونه، انواع سوداگری و موقعیت‌های مختلف سوداگری برای نیروگاه مجازی مورد بررسی قرار گرفته است. نیروگاه مجازی با سوداگری بین انرژی و خدمات جانبی و سوداگری با کمک منابع ذخیره ساز انرژی می‌تواند به سود بیشتری دست یابد.

مدل پیشنهاد شده می‌تواند در آینده به صورتی گسترش یابد که در آن نایقینی‌های تأثیر گذار در عملکرد نیروگاه‌های مجازی نیز لحاظ شوند. نیروگاه مجازی با نایقینی‌هایی نظیر وضعیت منابع تولیدات پراکنده و قیمت پیش بینی شده برای بازار سر و کار دارد. این عدم قطعیت‌ها را می‌توان با کمک روش‌های مبتنی بر سناریو، مونت کارلو، مدل‌های مبتنی بر منطق فازی و مدل‌های مبتنی بر تئوری تصمیم گیری با اطلاعات ناکامل (IGDT) در مدل پیشنهادی وارد کرد [۲۰-۲۱].

- [16] Palma-Behnke R., L. Cerda J., Jofre A., "A distribution company energy acquisition market model with integration of distributed generation and load curtailment options," IEEE Trans. Power System, vol. 20, no. 4, pp. 1718-1727, Nov. 2005.
- [17] Baran M. E., Wu F. F., "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 4, no. 1, pp. 735-743, Jan. 1989.
- [18] Conejo A. J., Castillo E., Mínguez R., García-Bertrand R., *Decomposition Techniques in Mathematical Programming: Engineering and Science Applications*, Heidelberg, Springer, 2006.
- [19] Seyyed Mahdavi S., Javidi M. H., "VPP decision making in power markets using Benders decomposition," International Transactions on Electrical Energy Systems, published online, Apr. 2013.
- [20] Mohammadi-Ivatloo B., Zareipour H., Amjady N., Ehsan M., "Application of Information-Gap Decision Theory to Risk-Constrained Self-Scheduling of GenCos," IEEE Trans. Power System, vol. 28, no. 2, pp. 1093 - 1102, May 2013.
- [21] Soroudi, A., Ehsan, M., "IGDT Based Robust Decision Making Tool for DNOs in Load Procurement Under Severe Uncertainty," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 4, no. 2, pp. 886 - 895, May 2013.
- [1] Pudjianto, D., C. Ramsay, G. Strbac. "Virtual power plant and system integration of distributed energy resources." Renewable Power Generation, IET 1, no. 1, pp. 10-16, 2007.
- [2] Braun M., Strauss P., "A review on aggregation approaches of controllable distributed energy units in electrical power system", International Journal of Distributed Energy Resource, vol. 4, no. 4, pp. 297-319, 2008.
- [3] Bakari, K. E., W. L. Kling. "Virtual power plants: An answer to increasing distributed generation", ISGT Europe, IEEE PES, pp. 1-6, 2010.
- [4] Mashhour E., Moghaddas-Tafreshi S.M., "Bidding Strategy of Virtual Power Plant for Participating in Energy and Spinning Reserve Markets—Part I: Problem Formulation", IEEE Trans. Power Systems, Vol 26, pp 949-956, 2011.
- [5] Mashhour E., Moghaddas-Tafreshi S.M., "Bidding Strategy of Virtual Power Plant for Participating in Energy and Spinning Reserve Markets—Part II: Problem Formulation", IEEE Trans. Power Systems, Vol 26, pp 957-964, 2011.
- [6] L. Costa, F. Bourry, J. Juban, and G. Kariniotakis, "Management of energy storage coordinated with wind power under electricity market conditions," in Proc. 10th Int. Conf. Probability Methods Appl. Power Syst. (PMAPS'08), pp. 1-8, 2008.
- [7] Voller S., Al-Awaad A., Verstege J., "Wind farms with energy storage integrated at control power market," IEEE Symposium on Integration of Wide-Scale Renewable Resources into the Power Delivery System, pp. 1-13, 2009.
- [8] Thatte, A. A., Viassolo, D. E., Xie, L., "Robust bidding strategy for wind power plants and energy storage in electricity markets," Power and Energy Society General Meeting, IEEE, pp. 1-7, 2012.
- [9] Walawalkar R., Apt J., Mancini R., "Economics of electric energy storage for energy arbitrage and regulation in New York." Energy Policy, 35(4):2558-2568, April 2007.
- [10] Qin, Junjie, Sevlian R., Varodayan D., Rajagopal R., "Optimal electric energy storage operation." In Power and Energy Society General Meeting, IEEE, pp. 1-6., 2012.
- [11] Shahidehpour M., Yamin H., Z. Li, *Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling, and Risk Management*. Piscataway, NJ: IEEE-Wiley-Interscience, 2002.
- [12] Rong-Ceng L., "An economic analysis model for the energy storage systems in a deregulated market." IEEE International Conference, pp. 744-749. IEEE, 2008.
- [13] Xu, Y., Xie, L., Singh, C., "Optimal scheduling and operation of load aggregator with electric energy storage in power markets." In North American Power Symposium, pp. 1-7. IEEE. 2010,
- [14] Kloess, M. "Electric storage technologies for the future power system-an economic assessment." EEM International Conference, pp. 1-8. IEEE, 2012.
- [15] Mashhour E., Moghaddas-Tafreshi S.M., "Mathematical modeling of electrochemical storage for incorporation in methods to optimize the operational planning of an interconnected micro grid," J. Zhejiang Univ. SCIENCE C (Computer and Electronics), vol. 11, no. 4, pp. 737-750, Sep. 2010.