

راهبرد پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار انرژی و خدمات جانبی رزرو چرخان و توان راکتیو با در نظر گرفتن چند نقطه اتصال

حسین نظام‌آبادی و مهرداد ستایش نظر

اولین بار با عنوان بنگاه مجازی مطرح و به منظور ایجاد سیستم مدیریت انرژی بازار محور در همه سطوح سیستم قدرت و همچنین تأمین خدمات پربازده انرژی و خدمات جانبی معرفی شد. بنابراین نیروگاه مجازی به واسطه تجمیع DERهای خود می‌تواند خدمات انرژی و جانبی مورد نیاز بهره‌بردار مستقل سیستم^۶ (ISO) را جهت بهره‌برداری امن و قابل اطمینان شبکه‌های توزیع و انتقال فراهم کند و از سوی دیگر امکان حضور این نیروگاه‌ها به مانند دیگر نیروگاه‌های متعارف را در بازارهای برق فراهم کند [۷] تا [۱۲]. این خدمات در نقطه اتصال مشترک^۷ (PCC) شبکه‌های توزیع و در نقطه تغذیه شبکه^۸ (GSP) انتقال فراهم می‌شود.

در [۱۳] و [۱۴] با معرفی و بررسی دو نوع نیروگاه مجازی تجاری^۹ (CVPP) و فنی^{۱۰} (TVPP) فعالیت‌های اقتصادی و فنی VPP از هم مجزا شده است و بنابراین در [۱۵] و [۱۶] نویسنده با ارائه مدلی با استفاده از تئوری بازی‌ها به پیشنهاددهی بهینه CVPP متشکل از تعدادی بار قطع‌پذیر و DG در بازار انرژی روز بعد پرداخته است. در [۱۷] و [۱۸] مسأله تصمیم‌گیری TVPP متشکل از تعدادی DG و بار قطع‌پذیر تحت شرایط عدم قطعیت تنها در بازار انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. ذکر این نکته ضروری است که در [۱۸] با استفاده از یک مدل دومرحله‌ای توان راکتیو به منظور کاهش تلفات شبکه توزیع توسط DGها و یا شبکه بالادست تأمین می‌شود. در [۱۹] و [۲۰] با پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در یک بازار هم‌زمان انرژی و خدمت جانبی رزرو چرخان بر اساس مدل^{۱۱} SCPBUC که قیود تعادل عرضه- تقاضا و امنیت داخلی نیروگاه مجازی را به حساب می‌آورد، امکان سودآوری بیشتر نیروگاه مجازی بررسی شده است. با بررسی ادبیات موضوعی، تا کنون مدلی برای حضور نیروگاه مجازی به صورت هم‌زمان در بازار انرژی، خدمات جانبی رزرو چرخان و توان راکتیو ارائه نشده است. با توجه به این که توان راکتیو از اهمیت زیادی در پایداری سیستم قدرت برخوردار است و همچنین می‌بایستی به صورت محلی تأمین گردد [۲۱]، فرصت مناسبی برای سودآوری نیروگاه مجازی ایجاد خواهد کرد. همچنین در مقالات اخیر مدل فنی و اقتصادی مناسب DERها برای ارائه خدمات انرژی، رزرو و توان راکتیو به صورت هم‌زمان ارائه نشده است.

ذکر این نکته ضروری است که در کارهای گذشته حضور نیروگاه مجازی به صورت هم‌زمان در بازار انرژی، رزرو چرخان و توان راکتیو در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این در کارهای گذشته تمرکز بیشتر بر روی مدیریت توان راکتیو بوده، در حالی که در این مقاله مدیریت هم‌زمان

چکیده: در این مقاله، مسئله پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار انرژی و هم‌زمان رزرو چرخان و متوالی توان راکتیو بررسی شده است. بدین منظور مدلی غیر تعادلی بر اساس در مدار قرار دادن قیمت بنیان واحدها مقید به قیود امنیت (SCPBUC) که تعادل عرضه- تقاضا و امنیت داخلی نیروگاه مجازی را به حساب می‌آورد، ارائه شده است. با استفاده از مدل ارائه‌شده نیروگاه مجازی علاوه بر حضور در بازار انرژی برای بهره‌بردار سیستم قدرت، خدمات رزرو چرخان و راکتیو را فراهم می‌آورد. مسئله پیشنهاددهی نیروگاه مجازی یک بهینه‌سازی غیر محدب غیر خطی آمیخته با عدد صحیح می‌باشد که با استفاده از برنامه‌ریزی غیر خطی آمیخته با عدد صحیح (MINLP) حل شده است.

کلیدواژه: برنامه‌ریزی غیر خطی آمیخته با عدد صحیح، توان راکتیو، خدمات جانبی، رزرو چرخان، نیروگاه مجازی.

۱- مقدمه

امروزه جامعه جهانی به منظور بهبود بازدهی انرژی به سمت استفاده از منابع انرژی پراکنده^۱ (DER) شامل تولیدات پراکنده^۲ (DG)، ذخیره‌سازهای انرژی^۳ (ESS) و همچنین اجرای برنامه‌های پاسخ بار^۴ (DR) رفته است که در همین راستا سیاست‌ها و قوانین حمایتی زیادی وضع گردیده است [۱] و [۲].

با ظهور مفاهیم نوینی همچون شبکه توزیع فعال و ریزشبکه‌ها و نیروگاه مجازی، امکان بهره‌برداری فعال از منابع DER با اهداف مختلف صورت گرفت. مدیریت فعال شبکه توزیع به عنوان روشی مؤثر برای تقویت شبکه با هدف اتصال و بهره‌برداری از DG بیان شده است [۳]. در [۳] مدلی به منظور کاهش تلفات شبکه توزیع با بهره‌برداری از DGها ارائه شده و در [۴] و [۵] برنامه‌ریزی خرید شبکه توزیع فعال با حضور DERها در بازارهای روز بعد و خرده‌فروشی بررسی شده است. در [۶] اهداف ریزشبکه‌ها دسترسی به کاهش تلفات، بهبود کنترل ولتاژ، افزایش کیفیت توان و تأخیر در سرمایه‌گذاری بیان شده است. بنابراین شبکه توزیع فعال و ریزشبکه ابعاد فنی مسئله بهره‌برداری شبکه توزیع را مورد بررسی قرار می‌دهند. در صورتی که اصطلاح نیروگاه مجازی^۵ (VPP)،

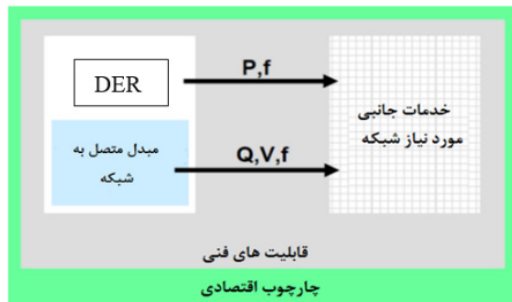
این مقاله در تاریخ ۷ مهر ماه ۱۳۹۲ دریافت و در تاریخ ۱۲ مهر ماه ۱۳۹۴ بازنگری شد.

حسین نظام‌آبادی، دانشکده مهندسی برق، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، (email: h_nezamabadi@sbu.ac.ir).

مهرداد ستایش نظر، دانشکده مهندسی برق، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، (email: m_setayesh@sbu.ac.ir).

6. Independent System Operator
7. Point of Common Coupling
8. Grid Supply Point
9. Commercial VPP
10. Technical VPP
11. Security-Constrained Price-Based Unit Commitment

1. Distributed Energy Resources
2. Distributed Generation
3. Energy Storage System
4. Demand Response
5. Virtual Power Plant



شکل ۲: قابلیت‌های کنترلی DERها.

در سایه این مدل، TVPP طبق قراردادهایی ملزم به تأمین تقاضای بارهای شبکه توزیع در PCC می‌گردد. همچنین در این ساختار TVPP امکان تأمین خدمات مورد نیاز شبکه فوق توزیع و انتقال را در نقاط GSP می‌یابد.

نوع و چگونگی ارائه خدمات DERها

همان طور که قبلاً گفته شد، خدمات VPP به شبکه به دو دسته خدمات انرژی و جانبی تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به نحوه تجمیع که در بخش قبل نشان داده شده امکان ارائه این خدمات به ISO وجود دارد. خدمات مورد نیاز ISO برای بهره‌برداری امن سیستم به دو دسته خدمت جانبی رزرو یا کنترل فرکانس و خدمت جانبی توان راکتیو یا کنترل ولتاژ تقسیم‌بندی شده است [۲۲]. در شکل ۲ قابلیت‌های کنترلی DERها در چارچوب فنی اقتصادی برای تأمین خدمات جانبی نشان داده شده است. در این شکل نشان داده شده که DERها به همراه یک میدل قادر به ارائه خدمات کنترل فرکانس و کنترل ولتاژ به صورت هم‌زمان می‌باشند. میدل‌ها توان ورودی را به توان خروجی با مشخصه‌ای متفاوت تبدیل می‌کنند.

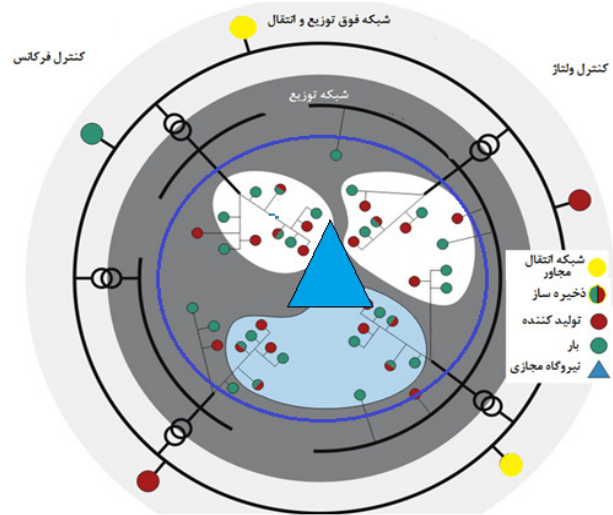
کنترل توان راکتیو برای ارائه خدمات انرژی و رزرو چرخان به وسیله محرک اولیه انجام می‌شود و این بدان معنی است که مثلاً در بار قطع‌پذیر، با قطع کردن بار یا در DGها با تنظیم شیر سوخت کنترل توان راکتیو صورت می‌گیرد. تنها قابلیت‌های کنترل فرکانس و کنترل ولتاژ به وسیله میدل‌ها امکان‌پذیر می‌باشد. در این مقاله منظور از خدمات جانبی، رزرو چرخان و توان راکتیو می‌باشد و ماهیت کنترلی این میدل‌ها در کنترل فرکانس و کنترل ولتاژ مد نظر نمی‌باشد و ارائه مدلی برای کنترل فرکانس و کنترل ولتاژ به عنوان ادامه کار پیشنهاد می‌گردد.

۲-۲ نحوه حضور VPP در بازار برق

عناصر اصلی که در بازارهای برق مورد بحث واقع می‌شوند در [۲۳] به طور مفصل آورده شده‌اند. بهره‌بردار مستقل سیستم وظیفه بهره‌برداری ایمن سیستم را بر عهده دارد. شرکت‌های تولیدکننده، شرکت‌های انتقال، شرکت‌های توزیع، خرده‌فروش، جمع‌کننده، کارگزار^۳ و مشترکین از دیگر عناصر بازار می‌باشند [۲۳]. نیروگاه مجازی با کسب مجوزهای لازم می‌تواند به عنوان یک جمع‌کننده، خرده‌فروش و کارگزار هم در سمت مصرف و هم در سمت تولید در بازارهای برق نقش ایفا نماید.

در این مقاله نیروگاه مجازی می‌تواند در بازاری شرکت نماید که با قیمت‌گذاری یکنواخت^۴ یا پرداخت بابت پیشنهاد^۱ تسویه گردد.

1. Retailer
2. Aggregator
3. Broker
4. Uniform Pricing



شکل ۱: تجمیع واحدهای DER در قالب TVPP.

توان اکتیو و راکتیو در نیروگاه مجازی مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین نوآوری‌های این مقاله در بحث نیروگاه مجازی موارد پنج‌گانه زیر می‌باشد:

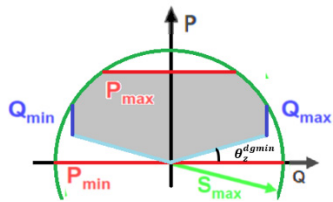
- ۱) ارائه مدل غیر تعادلی بر اساس SCPBUC برای حضور هم‌زمان در بازار انرژی و خدمات جانبی رزرو چرخان و توان راکتیو.
 - ۲) ارائه مدل فنی و اقتصادی مناسب برای حضور واحدهای DER در خدمات جانبی رزرو و پشتیبانی توان راکتیو علاوه بر خدمات انرژی.
 - ۳) ارائه مدل بازاری که VPP امکان ارائه خدمات انرژی و جانبی رزرو و پشتیبانی توان راکتیو را داشته باشد.
 - ۴) ارائه مدلی مناسب برای فراهم کردن خدمات انرژی و جانبی توان راکتیو در PCC.
 - ۵) ارائه مدلی مناسب برای فراهم کردن خدمات انرژی و جانبی رزرو و توان راکتیو در یک یا چند GSP برای ISO.
- ساختار این مقاله بدین گونه است که در بخش ۲ چالش‌های مرتبط با تشکیل نیروگاه مجازی بررسی شده است. در بخش ۳ مدل نیروگاه مجازی برای ارائه خدمات انرژی و جانبی ارائه شده است. در بخش ۴ مطالعات عددی بر روی یک سیستم نمونه انجام شده و در نهایت در بخش ۵ نتایج به دست آمده تشریح شده است.

۲- نیروگاه مجازی (VPP)

بر اساس [۹] توافق عامی بر سر تعریف نیروگاه مجازی وجود ندارد اما به طور کلی با بررسی ادبیات موضوعی سه خصوصیت اساسی برای نیروگاه مجازی وجود دارد: نیروگاهی مانند دیگر شرکت‌های نیروگاهی، حاصل تجمیع تعدادی DER با امکان حضور در بازارهای برق مختلف. بنابراین نیروگاه مجازی بر سر مسایل مهمی چالش‌هایی را به وجود می‌آورد که در ادامه آنها را تشریح خواهیم کرد.

۱-۲ چگونگی تجمیع

با معرفی CVPP و TVPP، تعریف و تقسیم‌بندی که توسط [۱۳] و [۱۴] انجام شده است، دو جنبه تجاری و فنی برای تجمیع VPP در نظر گرفته شده است اما با استفاده از روش تجمیع فنی، DERها می‌توانند در دو سطح شبکه توزیع و شبکه فوق توزیع و انتقال به ارائه خدمات بپردازند. در شکل ۱ تجمیع واحدهای DER در قالب TVPP نشان داده شده است.



شکل ۴: منحنی بارگذاری.

متغیری باینری است و هنگامی که تولیدکننده روشن باشد، یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود. I_{zt}^{dg-R} متغیر باینری است که در هنگام تولید یا جذب توان راکتیو یک می‌باشد و در غیر این صورت صفر خواهد بود و باید توجه داشت که این متغیر هنگامی که واحد روشن است (یعنی $I_{zt}^{dg} = 1$) قادر به تولید یا جذب توان راکتیو می‌باشد. SC_{zt}^{dg} هزینه مورد نیاز برای روشن کردن یا بالآمدن^۲ و SHC_{zt}^{dg} هزینه خاموش کردن^۳ واحد می‌باشد. J_{zt}^{dg} متغیر باینری نشان‌دهنده وضعیت روشن شدن واحد می‌باشد، این متغیر تنها هنگامی که واحد روشن می‌شود، یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود. همچنین K_{zt}^{dg} متغیر باینری نشان‌دهنده وضعیت خاموش شدن واحد می‌باشد، این متغیر تنها هنگامی که واحد خاموش می‌شود، یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود.

– قیود بهره‌برداری

مولدهای تولید پراکنده دارای مبدل‌های انرژی در خروجی خود می‌باشند. این مبدل‌ها دارای منحنی بارگذاری به مانند شکل ۴ هستند که تولید توان اکتیو، راکتیو و ظاهری را در آنها محدود می‌کند. قید حداکثر $(P_z^{dg\ max})$ و حداقل $(P_z^{dg\ min})$ توان اکتیو تولیدی (خطوط قرمز)

$$P_z^{dg\ min} \cdot I_{zt}^{dg} \leq P_{zt}^{dg} + R_{zt}^{dg} \leq P_z^{dg\ max} \cdot I_{zt}^{dg}, \quad \forall z, \forall t \quad (2)$$

قید حداکثر $(Q_z^{dg\ max})$ و حداقل $(Q_z^{dg\ min})$ توان راکتیو تولیدی (خطوط آبی پررنگ)

$$Q_z^{dg\ min} \cdot I_{zt}^{dg-R} \leq Q_{zt}^{dg} \leq Q_z^{dg\ max} \cdot I_{zt}^{dg-R}, \quad \forall z, \forall t \quad (3)$$

با تعریف I_{zt}^{dg-R} و با توجه به این که واحد در هنگام ارائه خدمت توان راکتیو باید با شبکه سنکرون باشد قید زیر باید برقرار باشد.

قید باینری سنکرون بودن توان راکتیو

$$I_{zt}^{dg-Reactive} \leq I_{zt}^{dg}, \quad \forall z, \forall t \quad (4)$$

قید حداقل شیب بهره‌برداری $(\tan \theta_z^{dg\ min})$ - (خطوط آبی کم‌رنگ)

$$P_{zt}^{dg} + R_{zt}^{dg} \geq \tan \theta_z^{dg\ min} |Q_{zt}^{dg}|, \quad \forall z, \forall t \quad (5)$$

در مبدل‌های الکترونیک قدرت برای کاهش هزینه ساخت و طراحی، معمولاً از تغذیه توان راکتیو با توان اکتیو کم چشم‌پوشی می‌گردد که توان تولیدی را به واسطه خطوط آبی کم‌رنگ محدود می‌کند.

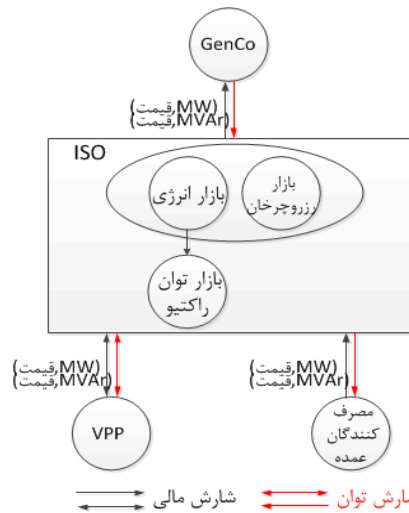
قید حداکثر توان ظاهری $(S_z^{dg\ max})$ - (خطوط سبزنگ)

$$\sqrt{(Q_{zt}^{dg})^2 + (P_{zt}^{dg} + R_{zt}^{dg})^2} \leq S_z^{dg\ max}, \quad \forall z, \forall t \quad (6)$$

از دیگر قیود که می‌بایستی در بهره‌برداری تولیدات پراکنده کنترل‌پذیر در نظر گرفته شود، قیود نرخ شیب تولید توان اکتیو می‌باشد:

$$(RU_z^{dg})^4$$

- 2. Start-Up
- 3. Shut-Down
- 4. Ramp Up



شکل ۳: قالب بازار.

در بازار، خدمات جانبی متفاوت می‌تواند متوالی یا هم‌زمان، تسویه گردد. در روش متوالی، بازار بر اساس بالاترین کیفیت خدمات به ترتیب تسویه می‌گردد. در روش هم‌زمان، شرکت کنندگان، تمام پیشنهادات قیمت خدمات جانبی را یک باره ارائه می‌دهند و ISO با حل یک مسئله بهینه‌سازی به طور هم‌زمان تسویه می‌کند. در اینجا بازار انرژی و خدمات جانبی رزروچرخان و توان راکتیو در نظر گرفته شده است که در آن خدمت جانبی رزروچرخان به صورت هم‌زمان با بازار انرژی و خدمت توان راکتیو به صورت متوالی با بازار انرژی تسویه می‌شود. مزایای این مدل تسویه بازار در [۲۴] و [۲۵] بررسی شده است.

۳- تشریح مدل

۳-۱ مدل DERها برای ارائه انرژی و خدمات جانبی

در [۲۲] به طور مفصل درباره هزینه DERها برای ارائه خدمات و قیود بهره‌برداری مبدل‌های موجود در DERها که توسط آن به شبکه متصل شده‌اند، بحث شده است.

۳-۱-۱ مدل تولیدات پراکنده

تولیدات پراکنده دامنه گسترده‌ای از فن‌آوری‌ها را در بر می‌گیرند که امکان کنترل پارامترهای خروجیشان را به آنها می‌دهد. DGها امکان ارائه خدمات جانبی رزرو چرخان و توان راکتیو همچنین خدمات انرژی را دارا می‌باشند.

– هزینه بهره‌برداری

هزینه بهره‌برداری مجموع هزینه تولید توان اکتیو و راکتیو است و از تابعی خطی بر اساس هزینه سرانه تولید برق، هزینه آمادگی توان اکتیو و راکتیو و هزینه روشن/ خاموش شدن واحد تولید پراکنده تشکیل شده است

$$C_{zt}^{dg}(P_{zt}^{dg}, R_{zt}^{dg}, Q_{zt}^{dg}) = a_{zt}^{dg} \cdot (P_{zt}^{dg} + R_{zt}^{dg}) + b_{zt}^{dg} \cdot I_{zt}^{dg} + \alpha_{zt}^{dg} \cdot |Q_{zt}^{dg}| + \beta_{zt}^{dg} \cdot I_{zt}^{dg-R} + SC_{zt}^{dg} \cdot J_{zt}^{dg} + SHC_{zt}^{dg} \cdot K_{zt}^{dg} \quad (1)$$

در (۱) z مجموعه تولیدات پراکنده، t مجموعه زمان برنامه‌ریزی و a_{zt}^{dg} و b_{zt}^{dg} ضرایب تابع هزینه تولید توان اکتیو که به صورت رزرو (R_{zt}^{dg}) یا غیر رزرو (P_{zt}^{dg}) است، می‌باشند. α_{zt}^{dg} و β_{zt}^{dg} ضرایب هزینه تولید توان راکتیو (Q_{zt}^{dg}) هستند.

بازار انرژی

$$(P_{z(t+1)}^{dg}) - (P_{zt}^{dg}) \geq RU_z^{dg}, \forall z, \forall t \quad (7)$$

قید نرخ کاهش تولید $(RD_z^{dg})^1$

$$(P_{zt}^{dg}) - (P_{z(t+1)}^{dg}) \geq RD_z^{dg}, \forall z, \forall t \quad (8)$$

قید حداکثر نرخ تولید برای رزرو چرخان $(MSR_z^{dg})^2$

$$R_{ztc}^{dg} \leq \min \{1 \cdot MSR_z^{dg}, P_z^{dgmax} \cdot I_{zt}^{dg} - P_{zt}^{dg}\}, \forall z, \forall t \quad (9)$$

MSR_z^{dg} حداکثر شیب تولید واحد بر حسب (MW/min) برای ارائه رزرو چرخان ده دقیقه می‌باشد.

اما قیود باینری مشخص کننده روشن/خاموش شدن واحد و حداقل زمان روشن/خاموش ماندن به صورت دسته معادلات زیر می‌باشد:

قیود باینری روشن/خاموش شدن واحد

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{zt}^{dg} - I_{z(t-1)}^{dg} \leq J_{zt}^{dg} \\ I_{z(t-1)}^{dg} - I_{zt}^{dg} \leq K_{zt}^{dg} \\ I_{zt}^{dg} - I_{z(t-1)}^{dg} \leq J_{zt}^{dg} - K_{zt}^{dg} \end{array} \right\}, \forall z, \forall t \quad (10)$$

قید حداقل زمان روشن بودن واحد $(MUT_z)^3$

$$\sum_{l=1}^{MUT} (I_{z(t+l)}^{dg} - 1) \geq MUT_z^{dg}, \forall J_{zt}^{dg} = 1, \forall z, \forall t \quad (11)$$

قید حداقل زمان خاموش بودن واحد $(MDT_z)^4$

$$\sum_{l=1}^{MDT} (1 - I_{z(t+l)}^{dg}) \geq MDT_z^{dg}, \forall K_{zt}^{dg} = 1, \forall z, \forall t \quad (12)$$

۳-۱-۲ مدل بارهای قطع پذیر

بارهای قطع پذیر هنگامی که قطع می‌شوند به صورت بار منفی مدل شده‌اند. بارهای قطع پذیر امکان حضور در بازار انرژی و خدمات جانبی رزرو چرخان و توان راکتیو را کسب خواهند کرد.

– هزینه قطع بار

در صورت تأمین بارهای قطع پذیر از آنها معادل نرخ خرده‌فروشی هزینه‌ای دریافت می‌گردد و در صورت قطع بار جریمه‌ای به آنها پرداخت می‌گردد

$$C_{vt}^{int}(P_{vt}^{int}, R_{vt}^{int}, Q_{vt}^{int}) = \quad (13)$$

$$a_{vt}^{int} \cdot (P_{vt}^{int} + R_{vtc}^{int}) + b_{vt}^{int} \cdot I_{vt}^{int} + \alpha_{vt}^{int} Q_{vt}^{int}$$

در (۱۳) مجموعه بارهای قطع پذیر، a_{vt}^{int} و b_{vt}^{int} ضرایب تابع جریمه قطع بار توان اکتیو که به صورت رزرو (R_{vtc}^{int}) یا غیر رزرو (P_{vt}^{int}) است و α_{vt}^{int} ضریب جریمه قطع بار توان راکتیو (Q_{vt}^{int}) می‌باشد.

– قیود قطع بار

قید حداکثر (P_v^{intmax}) و حداقل (P_v^{intmin}) توان قابل قطع برای ارائه در بازار انرژی و رزرو چرخان

$$P_v^{intmin} \times I_{vt\gamma}^{int} \leq P_{vt}^{int} + R_{vtc}^{int} \leq P_v^{intmax} \times I_{vt}^{int}, \forall v, \forall t \quad (14)$$

باید توجه داشت که I_{vt}^{int} متغیر باینری نشان دهنده قطع بار می‌باشد یعنی بار، هنگامی که قطع شده باشد یک و در صورت تأمین صفر است.

قید ضریب قدرت قطع بار $(\cos \phi_v^{int})$ برای توان راکتیو قابل قطع در

$$Q_{vt}^{int} = (P_{vt}^{int}) \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos \phi_v^{int}} - 1}, \forall v, \forall t \quad (15)$$

با توجه به این که معمولاً در کنار مصرف کنندگان صنعتی در سطح فوق توزیع جبران کنندگان توان راکتیو (از جمله خازن موازی و یا مبدل‌های الکترونیک قدرت برای تصحیح کیفیت توان) وجود دارد امکان تصحیح ضریب توان بر روی مقادیری از پیش تعیین شده وجود دارد. بنابراین با قطع توان اکتیو متناسب با ضریب قدرت بار $(\cos \phi_v^{int})$ توان راکتیو نیز قطع خواهد شد. با توجه به زمان برنامه‌ریزی که به صورت ساعتی می‌باشد، می‌توان ضریب قدرت قطع بار را به صورت میانگین ساعتی در هر ساعت در نظر گرفت.

$$\text{قید حداکثر زمان قطع بار در دوره برنامه‌ریزی } (H_v^{intmax}) \\ \sum_t I_{vt}^{int} \leq H_v^{intmax}, \forall v \quad (16)$$

۳-۱-۳ مدل ذخیره‌ساز

ذخیره‌ساز انرژی از نوع ذخیره‌سازهای شیمیایی به همراه یک مبدل الکترونیک قدرت می‌باشد که امکان کنترل توان اکتیو و حضور در بازار را در خروجی فراهم می‌آورد و مدلی که در این مقاله برای ذخیره‌ساز در نظر گرفته شده است، بر اساس مدل [۲۶] می‌باشد.

– هزینه بهره‌برداری

ذخیره‌ساز علاوه بر هزینه سرمایه‌گذاری که در بازه زمانی طول عمر آن سرشکن می‌شود، نیاز به تعمیرات و نگهداری دارد

$$C_{gt}^{str}(P_{gt}^{str}, I_{gt}^{str}) = \alpha_{gt}^{str} |P_{gt}^{str}| + \beta_{gt}^{str} \cdot I_{gt}^{str} \quad (17)$$

در (۱۷) g مجموعه ذخیره‌سازهای انرژی می‌باشد. P_{gt}^{str} مقدار انرژی ذخیره‌سازی شده می‌باشد که در صورت شارژ، مثبت و در حالت دشارژ منفی می‌باشد. هزینه‌های ذخیره‌ساز به صورت هزینه متغیر α_{gt}^{str} به ازای مقدار انرژی شارژ یا دشارژ و هزینه ثابت β_{gt}^{str} به ازای وضعیت شارژ یا دشارژ شدن می‌باشد. در ساعاتی که ذخیره‌ساز شارژ یا دشارژ می‌شود I_{gt}^{str} مقدار یک و در غیر این صورت صفر می‌باشد.

– قیود بهره‌برداری

قید حداکثر و حداقل ظرفیت ذخیره‌سازی

$$P_g^{strmin} \leq \sum_{k=1}^t P_{gk}^{str} \leq P_g^{strmax}, \forall g, \forall t \quad (18)$$

قید شارژ اولیه ذخیره‌سازی $(P_g^{initial})$

$$P_{g(t=1)}^{str} = P_g^{initial}, \forall g, \forall t \quad (19)$$

قید شیب شارژ و دشارژ (R_g^{str})

$$|P_{gt}^{str}| \leq R_g^{str} \cdot I_{gt}^{str}, \forall g, \forall t \quad (20)$$

۳-۲ راهبرد پیشنهاددهی VPP

VPP پیشنهادی شامل سه زوج قیمتی و توان برای تبادل در بازارهای انرژی، رزرو و توان راکتیو به وسیله پیش‌بینی قیمت آن بازارها می‌دهد و سپس DGها، وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها و گزینه‌های قطع بار و کلیدزنی بانک خازنی را بر اساس قیمت پیش‌بینی شده با در نظر گرفتن جنبه‌های فنی و اقتصادی برنامه‌ریزی می‌کند. تابع هدف مسئله پیشنهاددهی، حداکثرسازی سود VPP (درآمد منهای هزینه) و همچنین

1. Ramp Down
2. Maximum Sustained Ramp Rate
3. Minimum Up Time
4. Minimum Down Time

- تابع هدف:

در (۲۱) تابع هدف نیروگاه مجازی نشان داده شده است. λ_{it}^R و λ_{it}^E به ترتیب قیمت‌های پیش‌بینی شده بازارهای انرژی، راکتو و رزرو برای ISO می‌باشد. همچنین ρ_t^{active} و $\rho_t^{reactive}$ قیمت تأمین تقاضای اکتیو و راکتو بار خرده‌فروشی می‌باشد. i مجموعه‌ای از شینه‌های نیروگاه مجازی است که به شبکه خدمات توان اکتیو (P_{it}^E)، رزرو چرخان (R_{it}^{SR}) و توان راکتو (Q_{it}^R) ارائه می‌کند.

- قیود:

- قیود واحدهای DER: (۲)-(۱۲) مربوط به تولیدات پراکنده، (۱۴) - (۱۶) مربوط به بارهای قطع‌پذیر و (۱۸)-(۲۰) مربوط به ذخیره‌ساز انرژی.

- قید کفایت نیروگاه مجازی و الزام ذخیره

نیروگاه مجازی به دنبال اطمینان از این که مقدار تولیدات پراکنده، ظرفیت ذخیره‌ساز الکتروشیمیایی، بار قطع‌پذیر و ظرفیت خریداری شده از شبکه اصلی برای در نظر گرفتن حد رزرو داخلی و خارجی در هر ساعت کافی باشد قیود (۲۲) و (۲۳) را برای کفایت نیروگاه مجازی و الزام ذخیره در نظر می‌گیرد.

- قیود پخش بار AC:

معادله (۲۴) تعادل توان اکتیو در هر شینه می‌باشد. n و m مجموعه شینه‌های نیروگاه مجازی است. Ψ_n^{VPP} مجموعه کلیه شینه‌های نیروگاه مجازی و Ψ_n^{GSP} مجموعه‌ای از شینه‌های نیروگاه مجازی است که GSP می‌باشد (Ψ_n^{GSP} زیر مجموعه Ψ_n^{VPP} است). $z \in \Psi_n^{VPP}$ به معنی واحدهای تولید پراکنده z است که به شینه n نیروگاه مجازی متصل هستند.

i مجموعه‌ای از شینه‌های نیروگاه مجازی است که به شبکه خدمات توان اکتیو (P_{it}^E)، رزرو چرخان (R_{it}^{SR}) و توان راکتو (Q_{it}^R) ارائه می‌کند. w مجموعه بارهای داخل شبکه نیروگاه مجازی می‌باشد که میزان بار اکتیو پیش‌بینی شده‌ای معادل P_{wt}^D دارد.

ذخیره‌ساز انرژی در زمان شارژ و دشارژ دارای راندمان η_g^{str} است که بخشی از انرژی ورودی ذخیره‌ساز صرف تلفات و تبدیل انرژی خواهد شد. همچنین Y_{nm} و θ_{nm}^{VPP} اندازه و زاویه ماتریس ادmittانس شبکه و V_{nt} و δ_{nt}^{VPP} متغیر ولتاژ و زاویه شینه n در زمان برنامه‌ریزی t می‌باشد.

معادله (۲۵) تعادل توان راکتو در هر شینه می‌باشد. همچنین Q_{wt}^D میزان تقاضای پیش‌بینی شده بار راکتو است.



شکل ۵: مدل پیشنهاددهی نیروگاه مجازی.

فروش برق به مصرف‌کنندگان می‌باشد. بازار انرژی می‌تواند هم به صورت یکنواخت و هم به صورت پرداخت برابر پیشنهاد تسویه گردد. بازار رزرو چرخان فرض شده که بر اساس پیشنهادات برای ظرفیت تسویه گردد. در برخی بازارها، برندگان بازار بر اساس مقدار انرژی فراخوانی شده پولی اضافه دریافت می‌کنند. چون VPP نمی‌تواند مقدار انرژی را که توسط بازار رزرو چرخان فرا خوانده می‌شود پیش‌بینی کند، در این مقاله مقدار درآمد واقعی حاصل از بازار رزرو چرخان در نظر گرفته نشده است. همچنین بر اساس [۲۵] در بازار متوالی انرژی و توان راکتو درآمدی بابت فرصت از دست رفته تولید توان راکتو به شرکت‌کنندگان در بازار پرداخت می‌شود که به علت عدم توانایی VPP در پیش‌بینی وضعیت تسویه بازار، این بخش از سود نیروگاه مجازی نیز لحاظ نمی‌گردد. باید توجه کرد که نیروگاه مجازی حداقل سود مورد انتظار از این بازارها را حداکثر می‌نماید. نیروگاه مجازی با فراخوانی شدن یا نشدن رزرو چرخان می‌بایستی اجزای تحت پوشش خود را به صورت ایمن و پایدار بهره‌برداری کند و به همین علت دو پیشامد در مسئله پیشنهاددهی در بازار انرژی و خدمات جانبی لحاظ شده تا VPP از بهره‌برداری امن خود اطمینان حاصل نماید. $C \in \{0, 1\}$ مجموعه این دو پیشامد می‌باشد که اگر صفر باشد نشان‌دهنده فراخوانی‌نشدن و در صورت فراخوانی‌شدن یک می‌باشد. عدم اطمینان پیش‌بینی بار و قیمت در این پروژه در نظر گرفته نشده و به عنوان موضوعی برای کارهای آینده می‌تواند در نظر گرفته شود. در شکل ۵ مدل پیشنهاددهی نیروگاه مجازی با استفاده از SCPBUC ارائه شده است.

در ادامه فرمول‌بندی مسئله توضیح داده خواهد شد.

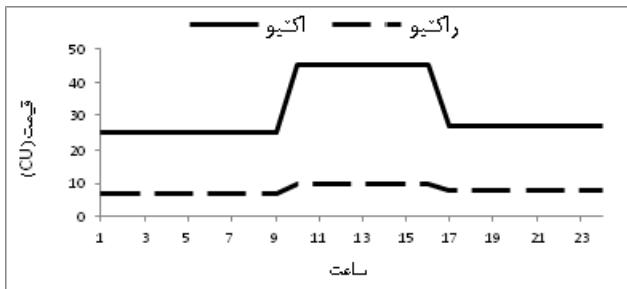
$$\text{حداکثرسازی سود} = \sum_t \left\{ \begin{aligned} & \sum_{(i \in \Psi_n^{GSP})} \lambda_{it}^E \times P_{it}^E + \sum_{(i \in \Psi_n^{GSP})} \lambda_{it}^R \times Q_{it}^R + \sum_{(i \in \Psi_n^{GSP})} \lambda_{it}^{SR} \times R_{it(c=1)}^{SR} + \sum_w \rho_t^{active} \times P_{wt}^D + \sum_w \rho_t^{reactive} \times Q_{wt}^D - \\ & \sum_z C_{zt}^{dg} (P_{zt}^{dg}, R_{zt(c=1)}^{dg}, Q_{zt}^{dg}) - \sum_v C_{vt}^{int} (P_{vt}^{int}, R_{vt(c=1)}^{int}, Q_{vt}^{int}) - \sum_g C_{gt}^{str} (P_{gt}^{str}, J_{gt}^{str}) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\sum_z [P_z^{dgmax} J_{zt}^{dg} - (P_{zt}^{dg} + R_{zt}^{dg})] + \sum_v [P_v^{intmax} - (P_{vt}^{int} + R_{vt}^{int})] + \eta_g^{str} \cdot \sum_{g \in \Psi_n^{VPP}} [P_g^{initial} + \sum_{k=1}^t P_{gk}^{str}] - \sum_{(i \in \Psi_n^{GSP})} [P_{it}^E + R_{it}^{SR}] \geq AR, \forall c, \forall t \quad (22)$$

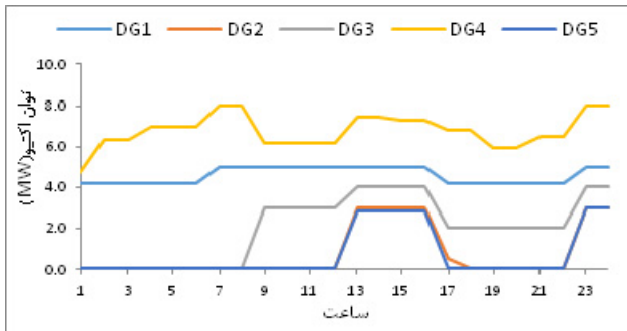
$$\sum_z [Q_z^{dgmax} J_{zt}^{dg-R} - Q_{zt}^{dg}] + \sum_v [Q_v^{intmax} - Q_{vt}^{int}] - \sum_{(i \in \Psi_n^{GSP})} Q_{it}^R \geq AR, \forall t \quad (23)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \sum_{z \in \Psi_n^{VPP}} (P_{zt}^{dg} + R_{zt}^{dg}) - \sum_{i \in \Psi_n^{GSP}} (P_{it}^E + R_{it}^{SR}) - \sum_{g \in \Psi_n^{VPP}} \eta_g^{str} \cdot P_{gt}^{str} - \sum_{w \in \Psi_n^{VPP}} P_{wt}^D + \sum_{v \in \Psi_n^{VPP}} (P_{vt}^{int} + R_{vt}^{int}) - \\ & \sum_{m \in \Phi_n^{VPP}} |V_{ntc}| \cdot |V_{mtc}| \cdot |Y_{nm}| \cdot \cos(\theta_{nm}^{VPP} - \delta_{ntc}^{VPP} + \delta_{mtc}^{VPP}) = \cdot \end{aligned} \right\} \forall n \in \Psi_n^{VPP}, \forall c, \forall t \quad (24)$$

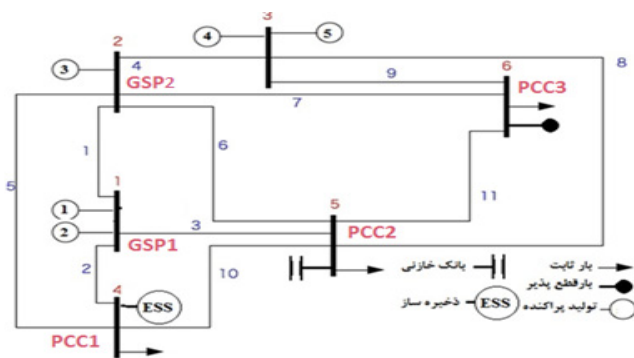
$$\sum_{z \in \Psi_n^{VPP}} Q_{zt}^{dg} - \sum_{i \in \Psi_n^{GSP}} Q_{it}^R - \sum_{w \in \Psi_n^{VPP}} Q_{wt}^D + \sum_{v \in \Psi_n^{VPP}} Q_{vt}^{int} + \sum_{m \in \Phi_n^{VPP}} |V_{ntc}| \cdot |V_{mtc}| \cdot |Y_{nm}| \cdot \sin(\theta_{nm}^{VPP} - \delta_{ntc}^{VPP} + \delta_{mtc}^{VPP}) = \cdot, \forall n \in \Psi_n^{VPP}, \forall c, \forall t \quad (25)$$



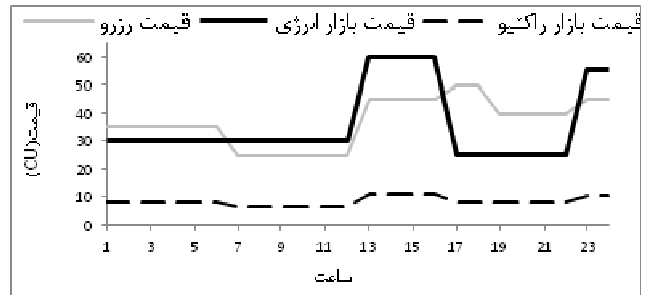
شکل ۸: قیمت تأمین تقاضای اکتیو و راکتیو DSO.



شکل ۹: تولید DGها در بازار انرژی.



شکل ۶: سیستم عَشینه مورد مطالعه.



شکل ۷: قیمت پیش‌بینی شده بازارهای انرژی، رزرو و راکتیو.

انرژی و رزرو چرخان و همچنین نشان‌دادن حالات مختلف برای بار قطع‌پذیر، ذخیره‌ساز و تولیدات پراکنده، قیمت‌های پیش‌بینی شده بازارهای توان انرژی، رزرو چرخان و راکتیو طبق شکل‌های ۷ و ۸ در نظر گرفته شده است اما به منظور واقعی‌بودن هزینه تولید توان اکتیو و راکتیو از حدود قیمتی موجود در [۱۹] و [۲۵] استفاده شده است.

۴-۱ ارائه خدمات در GSP1

نیروگاه مجازی تنها در GSP1 به ISO و در PCC1، PCC2 و PCC3 به بارهای شبکه توزیع خدمات می‌دهد. قیمت توان اکتیو، راکتیو و رزرو چرخان طبق شکل ۷ بر حسب واحد پول (CU)^۲ می‌باشد و قیمت تأمین تقاضای بار خرده‌فروشی در شکل ۸ نشان داده شده است.

در شکل ۹ تولید DGها در بازار انرژی به تفکیک نشان داده شده است. با توجه به قیمت پیش‌بینی شده بازار انرژی تنها DG1 و DG4 به علت هزینه پایین‌تر تولید نسبت به دیگر DGها در کل ساعات اقدام به تولید خواهند کرد. همچنین با پیک قیمت بازار انرژی در ساعات ۱۳-۱۶ کلیه DGها توان خود را ارائه خواهند کرد. در ساعات ۱۷-۲۲ به علت افت قیمت بازار انرژی و بیشتربودن قیمت بازار رزرو DGها توانی در بازار انرژی ارائه نمی‌کنند. در ساعات ۲۳-۲۴ با افزایش مجدد قیمت بازار انرژی DGها حداکثر توان خود را در بازار انرژی خواهند کرد. باید توجه داشت که DGها در ساعات ۱-۶ و ۱۷-۲۲ روشن می‌باشند و حداقل تولید خود را تولید می‌کنند تا بتوانند تولید خود را به عنوان رزرو چرخان در بازار خدمات جانبی TSO که قیمت بالاتری نسبت به بازار انرژی دارد به فروش رسانند.

در شکل ۱۰ میزان تولید DGها در بازار رزرو چرخان نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در ساعات ۱-۶ DG1 و DG4 با هزینه تولید پایین‌تر اقدام به تولید می‌کنند. در ساعات ۱۷-۲۲ به علت افزایش قیمت بازار رزرو نسبت به بازار انرژی دوباره DGها تولید خود را در بازار رزرو ارائه می‌کنند. در این ساعات با توجه به این که قیمت بازار

- قیود امنیت استاتیکی VPP:

قید حداکثر توان ظاهری عبوری از خطوط $(F_{nm}^{vpp\max})$

$$\sqrt{P_{nmc}^{vpp\gamma}(V, \delta) + Q_{nmc}^{vpp\gamma}(V, \delta)} \leq F_{nm}^{vpp}, \quad \forall n \in \Psi_n^{vpp}, \forall m \in \phi_n^{vpp}, \forall c, \forall t \quad (26)$$

قید حداکثر (V_n^{\max}) و حداقل (V_n^{\min}) اندازه ولتاژ شینه

$$V_n^{\min} \leq |V_{nmc}^{vpp}| \leq V_n^{\max}, \quad \forall n \in \Psi_n^{vpp}, \forall c, \forall t \quad (27)$$

- قید محدودیت زاویه شینه

$$-\pi \leq \delta_{nmc}^{vpp} \leq \pi, \quad \forall n \in \Psi_n^{vpp}, \forall c, \forall t \quad (28)$$

- قید حداکثر تبادل با شبکه بالادست $(F^{\max-upstream})$

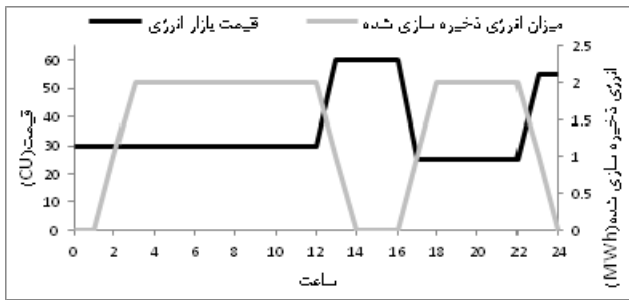
$$\sqrt{(P_{it}^E + R_{it}^{SR})^2 + Q_{it}^{RV}} \leq F^{\max-upstream}, \quad \forall i \in \Psi_n^{vpp}, \forall c, \forall t \quad (29)$$

۳-۳ حل مسئله

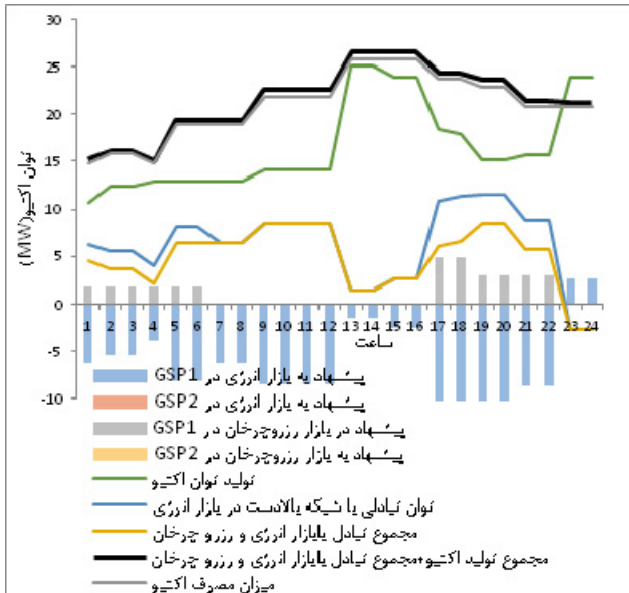
مدل ارائه‌شده، مسئله بهینه‌سازی غیر محدب غیر خطی توأم با اعداد صحیح است. برای حل این مسئله از برنامه GAMS/DICOPT استفاده شده است [۲۷]. DICOPT بر اساس یک الگوریتم ابتکاری با تقسیم مسئله^۱ MINLP به دو زیربرنامه غیر خطی و خطی آمیخته با عدد صحیح، برای حل این گونه مسایل بسیار کارا و مناسب می‌باشد.

۴- مطالعات عددی

مدل ارائه‌شده بر روی سیستم شکل ۶ مورد بررسی قرار گرفته و اطلاعات این سیستم در [۲۸] و پیوست آورده شده است. برای بررسی مدل ارائه‌شده ابتدا VPP در یک GSP و سپس در دو GSP به ISO خدمات می‌دهد. به منظور ایجاد حالات مختلف از جمله وارونگی قیمت



شکل ۱۳: وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز.



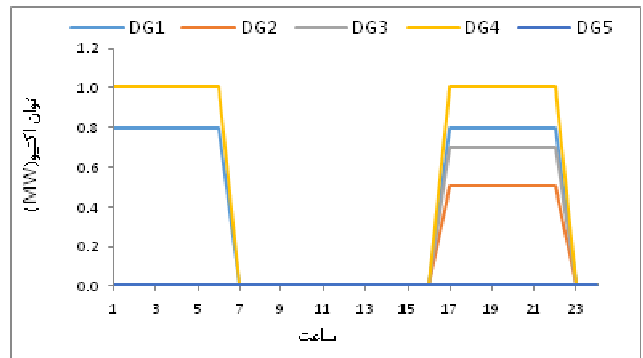
شکل ۱۴: پیشنهادی در بازار انرژی و رزرو چرخان و تعادل عرضه- تقاضای توان اکتیو در نیروگاه مجازی.

۶ ساعت در طول شبانه‌روز امکان قطع شدن را داراست. در ساعات ۱۳-۱۶ قیمت خرده‌فروشی انرژی اکتیو و راکتیو از قیمت بازار انرژی و راکتیو کمتر می‌باشد و در نتیجه چهار ساعت قطع بار برای حضور در این بازارها صورت گرفته است. در ساعات ۱۷-۱۸ نیز با توجه به قیمت بالاتر بازار رزرو نسبت به قیمت خرده‌فروشی اکتیو نیروگاه مجازی مبادرت به قطع بار در این دو ساعت می‌نماید.

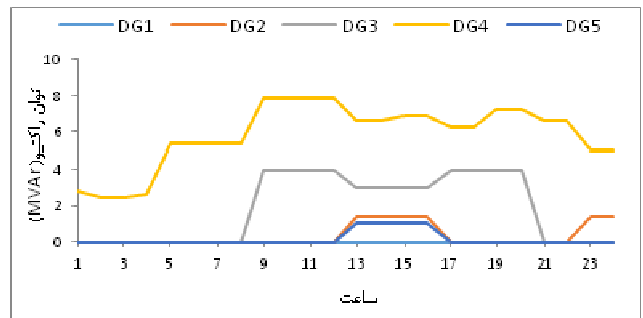
در شکل ۱۳ مقدار انرژی ذخیره‌سازی شده بر اساس پیش‌بینی قیمت بازار انرژی نشان داده شده و همان‌طور که ملاحظه می‌شود ذخیره‌ساز در ساعات ۲-۳ با قیمت انرژی پایین شارژ می‌شود و در ساعات ۱۳-۱۴ این انرژی را با بالا رفتن قیمت انرژی دشارژ می‌نماید. ذخیره‌ساز به همین ترتیب در ساعات ۱۷-۱۸ شارژ و در ساعات ۲۳-۲۴ دشارژ می‌شود. باید توجه داشت که ذخیره‌ساز به واسطه نرخ شیب شارژ و دشارژ دو ساعت زمان برای این که حداکثر انرژی را ذخیره‌سازی نماید نیاز دارد.

در شکل ۱۴ پیشنهادی نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان و همچنین تعادل عرضه- تقاضای اکتیو در نیروگاه مجازی نشان داده شده است. منحنی تولید توان اکتیو شامل مجموع تولید DGها، قطع بار صورت گرفته و دشارژ ذخیره‌ساز می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در ساعات ۱۳-۱۶ و ۲۳-۲۴ با توجه به قیمت بالای بازار انرژی تولید توان اکتیو داخلی نیروگاه مجازی به حداکثر میزان خود می‌رسد.

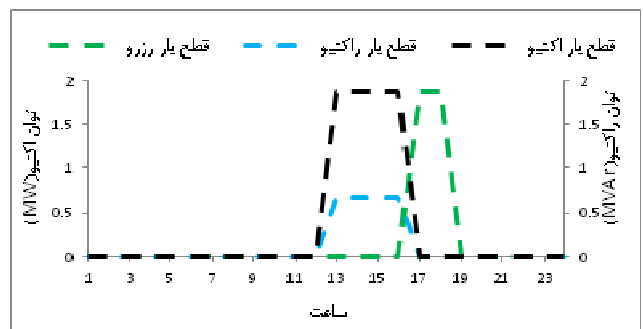
توان تبدیلی مثبت نشان‌دهنده واردات توان از شبکه بالادست و علامت منفی نشان‌دهنده صادرات توان به شبکه بالادست می‌باشد. اختلاف بین منحنی توان تبدیلی با شبکه بالادست در بازار انرژی و منحنی مجموع



شکل ۱۰: تولید DGها در بازار رزرو چرخان.



شکل ۱۱: تولید DGها در بازار راکتیو.

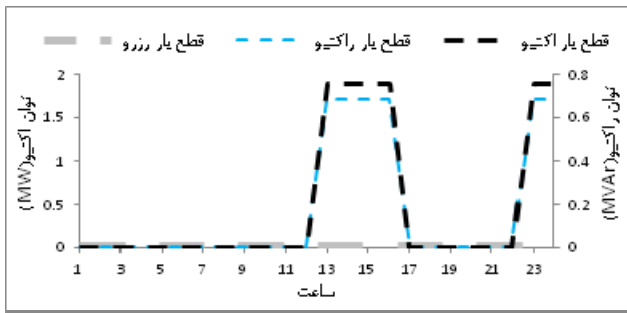


شکل ۱۲: قطع بار با توجه به قیمت بازار انرژی و خدمات جانبی.

رزرو بیشتر از ساعات اولیه ۱-۶ می‌باشد، DG۳ و DG۲ هم‌مازاد تولید خود را در بازار ارائه می‌کنند.

در شکل ۱۱ تولید DGها در بازار راکتیو به تفکیک نشان داده شده است. DG۴ با توجه به هزینه تولید توان راکتیو پایین‌تر نسبت به قیمت بازار راکتیو در کلیه ساعات توان راکتیو تولید خواهد کرد. DG۳ دومین واحد ارزان می‌باشد که در ساعات ۹-۲۰ توان راکتیو تولید خواهد کرد. با توجه به این که حداکثر توان ظاهری DG۳، ۵ MVA می‌باشد، نیروگاه مجازی در ساعات ۱۳-۱۶ با توجه به این که قیمت توان راکتیو بسیار کمتر از توان اکتیو می‌باشد، از تولید توان راکتیو واحد کاسته و بر مقدار تولید اکتیو می‌افزاید تا سود بیشتری را عاید خود و واحد تولیدکننده نماید. DG۲ و DG۵ جزء گران‌ترین واحدهای تولیدکننده توان راکتیو و توان اکتیو می‌باشند که در ساعات ۱۳-۱۶ با حداکثر قیمت بازار انرژی و خدمات جانبی، بخشی از حداکثر توان ظاهری خود را به صورت اکتیو در بازار انرژی و باقی‌مانده را در بازار راکتیو ارائه می‌کنند. همچنین DG۲ با توجه به هزینه تولید راکتیو کمتر از قیمت بازار راکتیو در ساعات ۲۳-۲۴ نیز اقدام به تولید توان راکتیو خواهد کرد. DG۱ نیز به علت هزینه بالاتر یا مساوی با قیمت بازار در هیچ ساعتی توان راکتیو ارائه نخواهد کرد.

در شکل ۱۲ قطع بار برای ارائه در بازار انرژی و خدمات جانبی هم‌زمان با توجه به قیمت این بازارها نشان داده شده است. بار قطع‌پذیر



شکل ۱۶: قطع بار با توجه به قیمت بازار انرژی و خدمات جانبی.



شکل ۱۷: وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز.

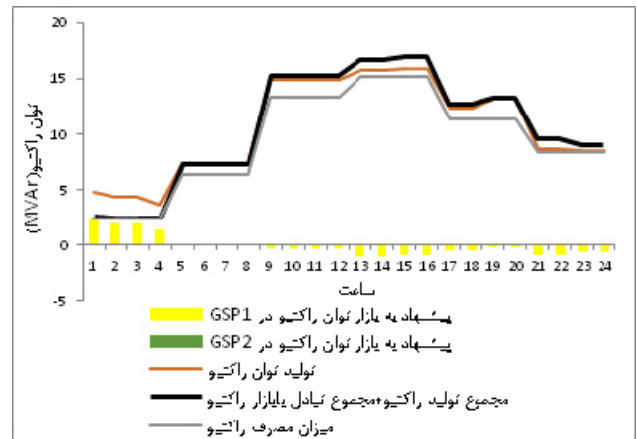
توان اکتیو، راکتیو و رزرو چرخان در GSP1 مانند شکل ۷ و در GSP2 ۱۰٪ گران‌تر می‌باشد و قیمت تأمین تقاضای بار خرده‌فروشی برابر قیمت خرده‌فروشی توان اکتیو و راکتیو در شکل ۸ نشان داده شده است.

در شکل ۱۶ قطع بار برای ارائه در بازار انرژی و خدمات جانبی هم‌زمان با توجه به قیمت این بازارها نشان داده شده است. قیمت پیش‌بینی شده GSP2 به میزان ۱۰٪ از GSP1 بیشتر می‌باشد، بنابراین قطع بار مؤثر از حداکثر قیمت پیش‌بینی شده یعنی GSP2 می‌باشد. قیمت انرژی در GSP2 طی ساعات ۱۳-۱۶ به حداکثر خود یعنی ۶۶ واحد پول می‌رسد، در نتیجه در این ساعات با توجه به قیمت پایین خرده‌فروشی قطع بار صورت می‌گیرد. در ساعات ۲۳-۲۴ نیز در GSP2 به ۶۰/۵ واحد پول می‌رسد. از سوی دیگر پیش‌بینی قیمت رزرو چرخان در GSP2 در گران‌ترین ساعات (۱۷-۱۸) به ۵۵ واحد پول خواهد رسید، بنابراین نیروگاه مجازی ترجیح می‌دهد تا قطع بار در ساعات ۲۳-۲۴ در بازار انرژی و خدمات جانبی راکتیو صورت گیرد.

در شکل ۱۷ مقدار انرژی ذخیره‌سازی شده بر اساس پیش‌بینی قیمت بازار انرژی نشان داده شده است.

در شکل ۱۸ پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان و همچنین تعادل عرضه-تقاضای اکتیو در نیروگاه مجازی نشان داده شده است.

به طور کلی نیروگاه مجازی در بازار انرژی از GSP1 که ارزان‌تر می‌باشد پیشنهاد خرید می‌دهد. در برخی ساعات از جمله ۱-۴، ۷-۸ و ۱۳-۱۶ با پیشنهاد فروش از GSP2 و پیشنهاد خرید به GSP1 هزینه‌های بهره‌برداری خود را کاهش می‌دهد و همچنین از طریق اختلاف قیمتی که در دو نقطه وجود دارد سودی را عاید خود می‌سازد. در ساعات ۵-۶ با توجه به این که بار داخلی نسبت به چهار ساعت اول افزایش می‌یابد و با توجه به این که قیمت رزرو از قیمت بازار انرژی بالاتر است، در هر دو نقطه اتصال به صورت واردکننده می‌باشد اما در ساعات ۷-۸ با پایین آمدن قیمت بازار رزرو از بازار انرژی و آزاد شدن ظرفیت تولید داخل، با توجه به آنچه که در قبل گفته شد برای کاهش هزینه بهره‌برداری و افزایش سود از نقطه گران‌تر پیشنهاد به فروش (GSP2) و از نقطه ارزان‌تر (GSP1) پیشنهاد به خرید می‌کند. در ساعات ۱-۲۲ نیروگاه مجازی به طور خالص



شکل ۱۸: پیشنهاددهی در بازار توان راکتیو و تعادل عرضه-تقاضای راکتیو در نیروگاه مجازی.

توان تبدیلی با بازار انرژی و رزرو چرخان، میزان رزرو چرخان ارائه‌شده به ISO را نشان می‌دهد. نیروگاه مجازی در ساعات ۱-۶ و ۱۷-۲۲ که قیمت بازار رزرو بیشتر از بازار انرژی می‌باشد، بار داخلی خود را از بازار انرژی تأمین می‌کند و مازاد تولیدات داخل و قطع بار را در بازار رزرو به فروش می‌رساند تا سود بیشتری را عاید خود سازد.

منحنی مشکی‌رنگ حاصل جمع دو منحنی مجموع تولید توان اکتیو و مجموع تبادل توان با بازار انرژی و رزرو چرخان می‌باشد. اختلاف این منحنی با منحنی میزان مصرف اکتیو تلفات اکتیو نیروگاه مجازی را نشان می‌دهد.

در نهایت میزان پیشنهاد به بازار انرژی و رزرو چرخان در GSP1 که همان توان تبدیلی با شبکه بالادست با علامت معکوس می‌باشد نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد نیروگاه مجازی با بالارفتن قیمت بازار و همچنین با توجه به حداکثر ظرفیت توان اکتیو داخلی در ساعات ۱۳-۱۶ کمترین پیشنهاد خرید و در ساعات ۲۳-۲۴ پیشنهاد فروش را به بازار انرژی می‌دهد.

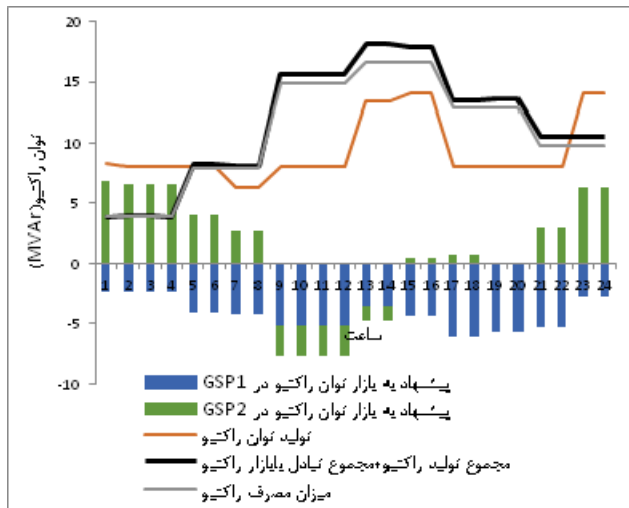
در شکل ۱۵ پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار توان راکتیو و همچنین تعادل عرضه-تقاضای راکتیو در نیروگاه مجازی نشان داده شده است. منحنی تولید توان راکتیو شامل مجموع تولید DGها، قطع بار صورت‌گرفته و میزان خازن در مدار می‌باشد. همان طور که ملاحظه می‌گردد در ساعات ۱۳-۱۶ با توجه به قیمت بالای بازار توان راکتیو تولید توان اکتیو داخلی نیروگاه مجازی به حداکثر میزان خود می‌رسد.

در نهایت میزان پیشنهاد به بازار توان راکتیو در GSP1 که همان توان تبدیلی با شبکه بالادست با علامت معکوس می‌باشد نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد نیروگاه مجازی در ساعات ۱-۸ با تقاضای راکتیو داخلی کم امکان پیشنهاد فروش توان راکتیو را خواهد داشت. با بالارفتن تقاضای اکتیو و راکتیو تلفات توان راکتیو نیز افزایش می‌یابد که منجر به واردات بیشتر در ساعات ۱۳-۱۶ می‌گردد.

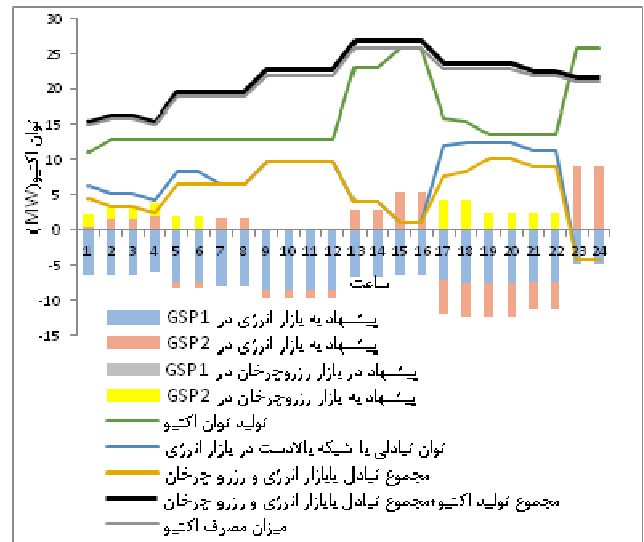
طبق جدول ۱ سود کل نیروگاه مجازی در این حالت ۲۳۰۴ واحد پول می‌باشد. سهم درآمدی حضور در بازار توان راکتیو ۲۷۷۵ در درآمد کل ۱۵۶۴۸.۴۶۱ واحدی نیروگاه مجازی می‌باشد. این سهم درآمدی با توجه به این که نیروگاه مجازی بیشتر واردکننده توان راکتیو است ناشی از خرده‌فروشی به تقاضای داخلی می‌باشد.

۴-۲ ارائه خدمات در GSP1 و GSP2

در این حالت نیروگاه مجازی در GSP1 و GSP2 به ISO و در PCC2، PCC3 و PCC3 به بارهای شبکه توزیع خدمات می‌دهد. قیمت



شکل ۱۹: پیشنهاددهی در بازار توان راکتیو و تعادل عرضه- تقاضای راکتیو در نیروگاه مجازی.



شکل ۱۸: پیشنهاددهی در بازار انرژی و رزرو چرخان و تعادل عرضه- تقاضای توان اکتیو در نیروگاه مجازی.

جدول ۱: مقدار سهم خرده‌فروشی و شرکت در بازار هم‌زمان انرژی و خدمات جانبی روز بعد در دو حالت مطالعاتی.

| نقطه اتصال | درآمد بازار (انرژی (CU) | درآمد بازار رزرو (چرخان (CU) | درآمد بازار راکتیو (CU) | درآمد خرده‌فروشی اکتیو (CU) | درآمد خرده‌فروشی راکتیو (CU) | هزینه‌های بهره‌برداری (CU) | سود کل (CU) |
|------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------|
| حالت اول | GSP1 -۴۲۴۹ | ۱۳۴۵ | -۲۴ | ۱۵۸۲۰ | ۲۸۰۰ | ۱۳۳۴۳ | ۲۳۰۴ |
| حالت دوم | GSP1 -۵۹۰۴ | ۰ | -۸۴۹ | ۱۵۸۲۰ | ۲۸۰۰ | ۱۲۴۶۶ | ۲۵۹۱ |
| | GSP2 ۱۴۶۴ | ۱۲۸۰ | ۴۴۷ | | | | |

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی برای پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در یک بازار هم‌زمان انرژی و خدمات جانبی ارائه شده و مطالعاتی عددی انجام شده است تا مدل ارائه‌شده ارزیابی گردد. نتایج نشان می‌دهد که نیروگاه مجازی می‌تواند به عنوان یکی از مؤلفه‌های سیستم قدرت، هم در سمت مصرف و هم در سمت تولید نقش ایفا کند. به عنوان خرده‌فروش می‌تواند تقاضای اکتیو و راکتیو شبکه توزیع را تأمین نماید، به عنوان یک جمع‌کننده می‌تواند با تجمیع DGها، بارهای قطع‌پذیر، بانک‌های خازنی و ذخیره‌سازهای انرژی حضور این واحدها را در بازار انرژی و خدمات جانبی رزرو چرخان و راکتیو فراهم آورد و در نهایت به عنوان یک مشترک مانند مصرف‌کنندگان عمده می‌تواند برای تأمین تقاضای اکتیو و راکتیو خود در بازار برق شرکت کند. نتایج نشان می‌دهد نیروگاه مجازی در ساعاتی که قیمت پیش‌بینی شده بازار رزرو چرخان بیشتر از قیمت پیش‌بینی شده بازار انرژی می‌باشد به عنوان یک مصرف‌کننده در بازار شرکت خواهد کرد و مازاد تولید خود را در بازار رزرو ارائه خواهد کرد تا سود بیشتری از حضور در بازار هم‌زمان کسب نماید. همچنین نشان داده شد که نیروگاه مجازی با تأمین محلی تقاضای راکتیو، حداقل تبادل توان راکتیو را با شبکه دارد و حتی در برخی ساعات توان راکتیو مازاد خود را به ISO برای بهره‌برداری شبکه انتقال و فوق توزیع می‌فروشد. نیروگاه مجازی در ساعات پیک تقاضای اکتیو و راکتیو با توجه به قیمت بازار انرژی (توان اکتیو) و بازار خدمات جانبی (توان راکتیو) برای حداکثرسازی سود خود بخشی از حداکثر توان ظاهری DGها را به صورت اکتیو در بازار انرژی و باقی‌مانده را در بازار راکتیو ارائه می‌کنند.

در صورتی که نیروگاه مجازی در بیش از یک نقطه به شبکه متصل باشد با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش سود، از نقطه‌ای که

از دو نقطه اتصال واردکننده می‌باشد در صورتی که در ساعات ۲۳-۲۴ به علت قیمت بالای بازار انرژی و همچنین بار داخلی کم اقدام به صادرات می‌کند.

در شکل ۱۹ پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار توان راکتیو و همچنین تعادل عرضه- تقاضای راکتیو در نیروگاه مجازی نشان داده شده است. در منحنی تولید توان راکتیو آمده که با افزایش ۱۰٪ قیمت توان راکتیو در GSP2 علاوه بر ساعات ۱۳-۱۶ توان تولیدی در ساعات ۲۳-۲۴ نیز به حداکثر میزان خود رسیده است.

به طور کلی در بازار توان راکتیو، نیروگاه مجازی از GSP1 که ارزان‌تر می‌باشد، پیشنهاد خرید می‌دهد. در برخی ساعات از جمله ۱-۸، ۱۵-۱۸ و ۲۳-۲۴ با پیشنهاد فروش از GSP2 و پیشنهاد خرید به GSP1 هزینه‌های بهره‌برداری خود را کاهش می‌دهد و همچنین از طریق اختلاف قیمتی که در دو نقطه وجود دارد سودی را عاید خود می‌سازد. در ساعات ۵-۲۲ نیروگاه مجازی به طور خالص از دو نقطه اتصال واردکننده می‌باشد در صورتی که در ساعات ۱-۴ و ۲۳-۲۴ به علت قیمت بالای بازار توان راکتیو و همچنین بار داخلی کم اقدام به صادرات می‌کند.

طبق جدول ۱ سود کل نیروگاه مجازی در این حالت ۲۵۹۱ واحد پول می‌باشد و هزینه‌های بهره‌برداری در این حالت ۸۷۷ واحد پول کاهش می‌یابد. در این جدول در حالت اول سود مورد انتظار برای یک دوره حضور در بازار انرژی و خدمات جانبی برابر ۲۳۰۴ واحد پول تخمین زده شده است در صورتی که در حالت دوم با شرکت در بازاری با دو نقطه اتصال (GSP1 هم قیمت حالت اول و GSP2 ۱۰٪ گران‌تر) با افزایش سود به ۲۵۹۱ واحد، سود ۱۱۲/۵٪ را نسبت به حالت اول عاید نیروگاه مجازی می‌کند.

جدول پ-۱: اطلاعات تابع هزینه واحدهای تولید پراکنده.

| شینه | $a_{gr}^{dg} (\frac{CU}{MW})$ | $b_{gr}^{dg} (CU)$ | $SC_{gr}^{dg} (CU)$ | $SHC_{gr}^{dg} (CU)$ | $\alpha_{gr}^{dg} (\frac{CU}{MVAr})$ | $\beta_{gr}^{dg} (CU)$ |
|------|-------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|--------------------------------------|------------------------|
| ۱ | ۲۴ | ۱۰ | ۱۰ | ۲۰ | ۰٫۶ | ۰٫۳ |
| ۱ | ۳۲ | ۵ | ۱۰ | ۲۰ | ۰٫۷ | ۰٫۳۵ |
| ۲ | ۳۵ | ۳ | ۱۰ | ۲۰ | ۰٫۸ | ۰٫۴ |
| ۳ | ۲۵ | ۱۵ | ۱۰ | ۲۰ | ۰٫۶ | ۰٫۳ |
| ۳ | ۴۰ | ۲ | ۱۰ | ۲۰ | ۰٫۹ | ۰٫۴۵ |

جدول پ-۲: اطلاعات ذخیره‌ساز انرژی.

| شینه | $\alpha_{gr}^{str} (\frac{CU}{MWh})$ | $\beta_{gr}^{str} (CU)$ | $SC_{gr}^{str} (CU)$ | $SHC_{gr}^{str} (CU)$ | $R_g^{str} (\frac{MW}{hr})$ | $P_g^{str,max} (MW)$ | $DOD_g^{str} (MW)$ | $\eta_g^{str} \%$ |
|------|--------------------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| ۴ | ۰٫۱ | ۵ | ۵ | ۱۰ | ۱ | ۲ | ۰ | ۹۰ |

جدول پ-۳: اطلاعات بارهای قطع‌پذیر.

| شینه | $a_{vt}^{int} (\frac{CU}{MW})$ | $b_{vt}^{int} (CU)$ | $SC_{vt}^{int} (CU)$ | $SHC_{vt}^{int} (CU)$ | $S_v^{int,max} (MVA)$ | $H_v^{int,max} (hr)$ |
|------|--------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| ۶ | ۲۰ | ۵ | ۵ | ۵ | ۲ | ۶ |

جدول پ-۴: اطلاعات فنی ظرفیت واحدهای تولید پراکنده.

| واحد | $P_z^{dg,max} (MW)$ | $P_z^{dg,min} (MW)$ | $Q_z^{dg,max} (MVar)$ | $Q_z^{dg,min} (MVar)$ | $RU_z^{dg} (\frac{MW}{hr})$ | $RD_z^{dg} (\frac{MW}{hr})$ | $S_z^{dg,max} (MVA)$ | $MSR_z^{dg} (\frac{MW}{min})$ |
|------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------------|
| ۱ | ۵ | ۲ | ۱ | -۲٫۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۰٫۰۸ |
| ۲ | ۳ | ۰ | ۱٫۵ | ۰ | ۳ | ۳ | ۳٫۳ | ۰٫۰۵ |
| ۳ | ۴ | ۲ | ۴ | ۰ | ۴ | ۴ | ۵ | ۰٫۰۷ |
| ۴ | ۸ | ۲ | ۸ | -۶ | ۶ | ۶ | ۱۰ | ۰٫۱ |
| ۵ | ۳ | ۱ | ۱ | ۰ | ۳ | ۳ | ۳ | ۰٫۰۵ |

[7] S. Awerbuch and A. Preston, *The Virtual Utility: Accounting, Technology & Competitive Aspects of the Emerging Industry*, Kluwer Academic Publisher, Massachusetts, Apr. 1997.

[8] K. Dielmann and A. van der Velden, "Virtual power plants (VPPs): a new perspective for energy generation?," in *Proc. 9th Int. Scientific and Practical Conf. of Students, Post-Graduates and Young Scientists, Proc. Modern Techniques and Technologies, MTT'03*, pp. 18-20, Apr. 2003.

[9] E. A. Setiawan, *Concept and Controllability of Virtual Power Plant*, Ph. D Dissertation, Dept. ECE, University of Kassel, 2007.

[10] S. You, *Developing Virtual Power Plant for Optimized Distributed Energy Resources Operation and Integration*, Ph. D Thesis, Technical University of Denmark, Sep. 2010.

[11] M. Braun and P. Strauss, "A review on aggregation approaches of controllable distributed energy units in electrical power systems," *International J. of Distributed Energy Resources*, vol. 4, no. 4, pp. 297-319, Jun. 2008.

[12] J. A. Pecas Lopes, N. Hatziaargyriou, J. Mutale, P. Djapic, and N. Jenkins, "Integrating distributed generation into electric power systems: a review of drivers, challenges and opportunities," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 9, pp. 1189-1203, Jul. 2007.

[13] R. Caldon, A. Rossi Patria, and R. Turri, "Optimal control of a distribution system with a virtual power plant," in *Proc. 6th Conf. of Bulk Power System Dynamics and Control*, pp. 4625-4630, Cortina d'Ampezzo, Italy, Aug. 2004.

[14] D. Pudjianto, C. Ramsay, and G. Strbac, "Virtual power plant and system integration of distributed energy resources," *IET Renewable Power Generation*, vol. 1, no. 1, pp. 10-16, Mar. 2007.

[15] H. Nezamabadi, P. Nezamabadi, M. Setayeshnazar, and G. B. Gharehpetian, "Participation of virtual power plants in energy market with optimal bidding based on nash-SFE equilibrium strategy and considering interruptible load," in *Proc. the 3rd Conf. on Thermal Power Plant*, 7 pp., Tehran, Iran, Oct. 2011.

[۱۶] ح. نظام‌آبادی، پ. نظام‌آبادی، م. ستایش نظر و گ. قره پتیان، "قیمت‌دهی بهینه نیروگاه‌های مجازی با استفاده از استراتژی تعادلی نش-SFE"، بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق ایران، پژوهشگاه نیرو، ۷ صص. آبان ۱۳۹۰.

پیشنهاد قیمتی گران‌تر است صادرات بیشتر و واردات کمتر و از نقطه‌ای که پیشنهاد قیمتی ارزان‌تر است صادرات کمتر و واردات بیشتری انجام خواهد داد. در این مقاله منابع عدم قطعیت موجود در نیروگاه مجازی از جمله عدم قطعیت در پیش‌بینی قیمت بازار و تولید تولیدات پراکنده در نظر گرفته نشده که می‌تواند به عنوان ادامه کار پیشنهاد گردد.

پیوست

اطلاعات و داده‌های مسأله در جداول پ-۱ تا پ-۴ و بار تجمعی اکتیو و راکتیو در شکل پ-۱ آمده است.

مراجع

[۱] تارنمای دفتر خصوصی‌سازی صنعت برق ایران، <http://psp.moe.gov.ir>

[2] T. J. Hammons, "Integrating renewable energy sources into european grids," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 30, no. 8, pp. 462-475, Oct. 2008.

[3] A. A. S. Algarni and K. Bhattacharya, "Disco operation considering DG units and their goodness factors," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 1831-1840, Nov. 2009.

[4] A. A. S. Algarni and K. Bhattacharya, "A generic operations framework for discos in retail electricity markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 1, pp. 356-367, Feb. 2009.

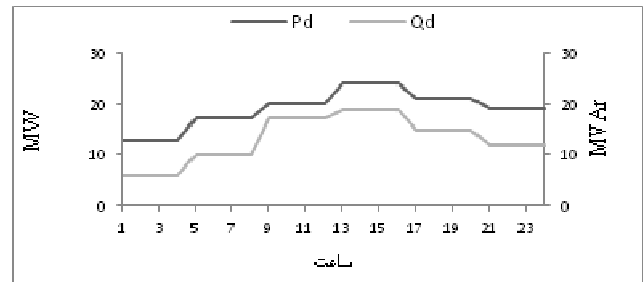
[5] S. Golshannavaz, S. Afsharnia, and F. Aminifar, "Smart distribution grid: optimal day-ahead scheduling with reconfigurable topology," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2402-2411, Aug. 2014.

[6] M. Marzband, A. Sumper, J. L. Dominguez-Garcia, and R. Gumara-Ferret, "Experimental evaluation of a real time energy management system for stand-alone micro grids in day-ahead markets," *Energy Conversion and Management*, vol. 76, pp. 314-322, 2013.

- [23] M. Shahidehpour, H. Yamin, and L. Zuyi, *Market Operation in Electric Power Systems*, New York: Wiley, 2002.
- [24] N. Amjady, J. Aghaei, and H. A. Shayanfar, "Stochastic multiobjective market clearing of joint energy and reserves auctions ensuring power system security," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 1841-1854, Nov. 2009.
- [25] A. Rabiee, H. A. Shayanfar, and N. Amjady, "Coupled energy and reactive power market clearing considering power system security," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 4, pp. 907-915, Apr. 2009.
- [26] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "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.
- [27] Generalized Algebraic Modeling Systems (GAMS), [Online]. Available: <http://www.gams.com>.
- [28] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, New York: John Wiley & Sons, 2nd Ed., p. 104, 1996.

حسین نظام‌آبادی در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید عباسپور و در سال ۱۳۹۳ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید بهشتی دریافت نموده و هم اکنون دانشجوی دکتری مهندسی برق دانشگاه شهید بهشتی می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بازارهای برق، انرژی‌های تجدیدپذیر، شبکه‌های هوشمند و بهینه‌سازی ریاضی.

مهرداد ستایش‌نظر در سال ۱۳۷۳ مدرک کارشناسی مهندسی برق قدرت خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و در سال ۱۳۷۵ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود و در سال ۱۳۷۹ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق قدرت از دانشگاه مذکور گردید. دکتر ستایش نظر از سال ۱۳۷۸ در دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعت آب و برق تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز دانشیار دانشگاه شهید بهشتی می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده شامل بازار برق، مدیریت انرژی الکتریکی و شبکه‌های هوشمند می‌باشد.



شکل پ-۱: بار تجمعی اکتیو و راکتیو.

- [17] M. Peik-Herfeh, H. Seifi, and M. Sheikh-El-Eslami, "Decision making of a virtual power plant under uncertainties for bidding in a day-ahead market using point estimate method," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 88-98, Jan. 2013.
- [18] M. Peik-Herfeh, H. Seifi, and M. Sheikh-El-Eslami, "Two-stage approach for optimal dispatch of distributed energy resources in distribution networks considering virtual power plant concept," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 43-63, Jan. 2012.
- [19] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets-part i: problem formulation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 949-956, May 2011.
- [20] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets-part ii: numerical analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 957-964, May 2011.
- [21] A. Rabiee, H. A. Shayanfar, and N. Amjady, "Reactive power pricing problems & a proposal for a competitive market," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 7, no. 1, pp. 18-32, Jan 2009.
- [22] M. Braun, *Provision of Ancillary Services by Distributed Generators*, Ph.D Dissertation, Dept. ECE, University of Kassel, Dec. 2008.