

بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع فعال در بازار انرژی، رزروچرخان و توان راکتیو با استفاده از مفهوم نیروگاه مجازی

حسین نظام‌آبادی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، مهرداد ستایش نظر^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق - پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - h_nezamabadi@sbu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - m_setayesh@sbu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، مسئله بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع فعال (ADN)^۱ برای حضور در بازار انرژی همزمان با رزروچرخان و متوالی توان راکتیو با در نظر گرفتن مفهوم نیروگاه مجازی فنی بررسی شده است. نیروگاه مجازی فنی با لحاظ کردن قیود شبکه و منابع انرژی پراکنده (DER)^۲ تحت پوشش خود، امکان بهره‌برداری فعال شبکه توزیع را با هدف حداکثرسازی سود به‌منظور حضور در بازارهای مذکور فراهم می‌کند. به‌منظور پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در این بازارها، مدلی بر اساس در مدار قرار دادن قیمت بنیان واحدها مقید به قیود امنیت (SCPUBC)^۳ ارائه شده است که قیود امنیت آن مربوط به قید تعادل عرضه تقاضا و قیود بهره‌برداری شبکه توزیع است. نتایج حاصل از مدل ارائه‌شده نشان می‌دهد، شبکه توزیع فعال می‌تواند با استفاده از مفهوم نیروگاه مجازی علاوه بر پیشنهاددهی بهینه در بازار برق و کسب سود قابل توجه، به بهره‌برداری امن شبکه خود نیز بپردازد. مسئله پیشنهاددهی نیروگاه مجازی فنی یک بهینه‌سازی غیرمحدب غیرخطی آمیخته با عدد صحیح است که با استفاده از برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح (MINLP)^۴ حل شده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع فعال، نیروگاه مجازی فنی، خدمات جانبی، رزروچرخان، توان راکتیو، برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح.

Optimal Operation of Active Distribution Network in Energy, Spinning Reserve and Reactive power Markets Using Virtual Power Plants Concept

H. Nezamabadi¹ MSc. student, M. Setayesh Nazar², Associate professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, A.C, Tehran, Iran, Email: h_nezamabadi@sbu.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, A.C, Tehran, Iran, Email: m_setayesh@sbu.ac.ir

Abstract: In this paper, we propose a new method for solving of optimal operation problem of active distribution networks (ADNs) in energy, spinning reserve service, and reactive power service markets using technical virtual power plant (TVPP) concept. TVPP with considering network and its DER constraints provide active operation of distribution network in order to maximize its profit. A security constraints price-based unit commitment (SCPUBC) model, whose security constraints are related to the supply-demand balancing and to the operation of distribution network, is proposed. In addition to optimal bidding in the markets, the proposed model results show that ADN with using VPP concept can operate its network securely. The presented model is a non-convex nonlinear mixed-integer optimization solved by mixed-integer nonlinear programming (MINLP).

Keywords: Active distribution network, technical virtual power plant, ancillary service, spinning reserve, reactive power, mixed-integer nonlinear programming.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۴/۴/۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۴/۵/۱۵ و ۹۴/۶/۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲

نام نویسنده مسئول: مهرداد ستایش نظر

نشانی نویسنده مسئول: حکیمیه - پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران

۱- مقدمه

امروزه جامعه جهانی برای بهبود بازدهی انرژی و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، استفاده از منابع انرژی پراکنده (DER) شامل تولیدات پراکنده (DG)^۵ و ذخیره‌سازهای انرژی (ESS) و برنامه‌های پاسخ بار (DR)^۶ را سرلوحه فعالیت‌های خود قرار داده است و برای نیل به این منظور، قوانین حمایتی در داخل [۱] یا خارج از کشور [۲] برای حمایت از تولیدات پراکنده کنترل‌پذیر، تولیدات پراکنده تجدیدپذیر، تولیدات همزمان برق و حرارت به تصویب رسیده و اجرایی شده‌اند.

حضور گسترده منابع انرژی پراکنده، منجر به ایجاد مفهومی جدید با نام شبکه‌های توزیع فعال (ADN)^۸ گردید، که با در نظر گرفتن منابع انرژی پراکنده به منظور دسترسی به اهداف خاص بهره‌برداری، مدیریت و کنترل می‌شوند [۳-۵]. از جمله این اهداف می‌توان به بهره‌برداری بهینه DERها به منظور کاهش هزینه‌ها، کاهش تلفات، بهبود کنترل و لتاز، افزایش کیفیت توان و تأخیر در سرمایه‌گذاری اشاره کرد [۶-۹].

از سویی دیگر در یک چنین فضایی، اصطلاح نیروگاه مجازی (VPP)^۹ با مفهوم بنگاه مجازی در [۱۰] تعریف شد. در این تعریف، اولین نکته قابل توجه دستیابی به سیستم مدیریت انرژی بازار محور با استفاده از ارتباطات و فناوری اطلاعات پیشرفته است. نکته مهم دیگر اینکه با استفاده از تجمیع DERها، فراهم کردن انرژی و خدمات جانبی در نقطه اتصال مشترک (PCC)^{۱۰} برای بهره‌بردار شبکه‌های توزیع (DSO)^{۱۱} و در نقطه تغذیه شبکه (GSP)^{۱۲} برای بهره‌بردار شبکه انتقال یا بهره‌بردار مستقل سیستم (ISO)^{۱۳} است. بنابراین با استفاده از مفهوم نیروگاه مجازی، شبکه‌های توزیع فعال قادر خواهند شد علاوه بر بهره‌برداری شبکه، فرصت حضور در بازار را کسب نمایند تا از منابع سود موجود در بازارهای برق نیز بهره‌مند گردند.

در [۱۱]، VPP به DSO امکان بهره‌برداری بهینه تعدادی از DG و CHP را در شبکه توزیع غیرفعال را می‌دهد. در [۱۲]، با معرفی و بررسی دو نوع نیروگاه مجازی تجاری (CVPP)^{۱۴} و فنی (TVPP) فعالیت‌های اقتصادی و فنی شبکه توزیع از هم مجزا شده است. CVPP امکان حضور در بازارهای مختلف را فراهم می‌آورد و قیود فنی و جغرافیایی را مورد توجه قرار نمی‌دهد و TVPP با در نظر گرفتن قیود فنی، بهره‌برداری بهینه و امن شبکه توزیع فعال را امکان‌پذیر می‌نماید. در نتیجه، بهره‌بردار TVPP می‌تواند همان بهره‌بردار شبکه توزیع فعال باشد.

با مروری بر ادبیات موضوعی مسئله پیشنهاددهی در بازار برق را می‌توان به دو دسته تعادلی و غیرتعادلی تقسیم‌بندی کرد. در [۱۳-۱۵]، نویسنده با ارائه مدلی تعادلی با استفاده از تئوری بازی‌ها به پیشنهاددهی بهینه CVPP پرداخته است. همچنین در [۱۶] مسئله پیشنهاددهی CVPP با استفاده از یک روش تصادفی دوسطحی بررسی شده است.

در [۱۷-۱۸] مسئله تصمیم‌گیری TVPP متشکل از تعدادی تولید پراکنده کنترل‌پذیر، تولید پراکنده تجدیدپذیر و بار قطع‌پذیر، جهت

حضور در بازارهای کوتاه‌مدت و میان‌مدت با ارائه مدلی غیرتعادلی بر اساس SCPBUC مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۹-۲۰] با پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در یک بازار همزمان انرژی و خدمات جانبی رزروچرخان بر اساس مدل غیرتعادلی 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، برای TVPP تنها در [۱۹-۲۰] حضور در ارائه خدمت جانبی رزروچرخان همزمان با انرژی در نظر گرفته شده است و تاکنون مدلی برای ارائه همزمان انرژی، خدمات جانبی رزروچرخان و مدیریت توان راکتیو برای TVPP وجود ندارد. از سوی دیگر با توجه به این که توان راکتیو از اهمیت زیادی در پایداری سیستم قدرت برخوردار است و باید به صورت محلی تأمین گردد [۲۱]، فرصت مناسبی برای سودآوری TVPP ایجاد خواهد کرد. همچنین در مقالات اخیر، مدلی فنی و اقتصادی مناسب DERها برای ارائه خدمات انرژی، رزرو و توان راکتیو به صورت همزمان ارائه نشده است که این مقاله تلاش می‌نماید تا در این حوزه به ارائه نوآوری بپردازد.

بنابراین نوآوری این مقاله در بحث بهره‌برداری شبکه توزیع فعال موارد سه‌گانه زیر است:

۱. ارائه مدل غیرتعادلی بر اساس SCPBUC به منظور مدیریت توان اکتیو و راکتیو ADN برای حضور همزمان در بازار انرژی و خدمات جانبی رزروچرخان و توان راکتیو با در نظر گرفتن قید تعادل عرضه- تقاضا و قیود بهره‌برداری شبکه توزیع
 ۲. ارائه مدل بازاری که ADN امکان ارائه خدمات انرژی و جانبی رزرو و پشتیبانی توان راکتیو را داشته باشد.
 ۳. ارائه مدلی مناسب برای فراهم کردن خدمات انرژی و جانبی توان راکتیو در PCC برای دیگر DSOها و ارائه مدلی مناسب برای فراهم کردن خدمات انرژی و جانبی رزرو و توان راکتیو در یک یا چند GSP در شبکه بالادست برای ISO.
- ساختار این مقاله بدین گونه است که در بخش ۲ چالش‌های مرتبط با تشکیل نیروگاه مجازی فنی 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.

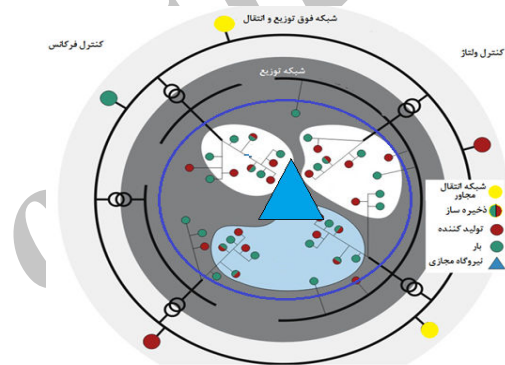
۲- مفهوم نیروگاه مجازی

به‌طور کلی با بررسی ادبیات موضوعی سه خصوصیت اساسی برای نیروگاه مجازی وجود دارد: (۱) نیروگاهی مانند دیگر شرکت‌های نیروگاهی، (۲) حاصل تجمیع تعدادی DER و (۳) با امکان حضور در بازارهای برق مختلف. بنابراین نیروگاه مجازی بر سر مسائل مهمی چالش‌هایی را به وجود می‌آورد که در ادامه آن‌ها را تشریح خواهیم کرد.

۱-۲ - چگونگی تجمیع و نوع خدمات جانبی

با معرفی CVPP و TVPP، تعریف و تقسیم‌بندی که توسط [۱۱] 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.

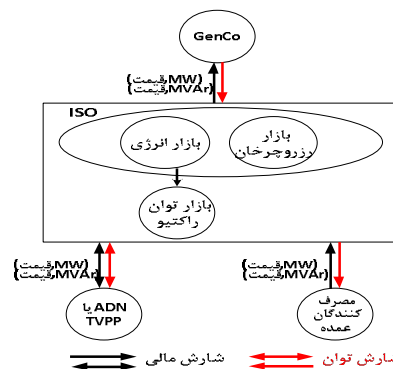
در سایه این مدل، TVPP طبق قراردادهایی ملزم به تأمین تقاضای بارهای شبکه توزیع در PCC می‌گردد. همچنین در این ساختار TVPP امکان تأمین خدمات موردنیاز شبکه فوق توزیع و انتقال را در نقاط GSP می‌یابد. در این مقاله منظور از خدمات جانبی، رزروچرخان و توان راکتیو بوده و کنترل فرکانس و کنترل ولتاژ مدنظر نمی‌باشد و ارائه مدلی برای کنترل فرکانس و کنترل ولتاژ به‌عنوان ادامه کار پیشنهاد می‌گردد.



شکل ۱: تجمیع واحدهای DER در قالب TVPP

۲-۲ - نحوه حضور VPP در بازار برق

در این مقاله نیروگاه مجازی می‌تواند در بازاری شرکت نماید که با قیمت‌گذاری یکنواخت یا پرداخت بابت پیشنهاد تسویه گردد. قالب بازار مورد نظر در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: قالب بازاری که ADN در آن شرکت می‌کند

در بازار، خدمات جانبی متفاوت می‌توانند به‌صورت متوالی یا همزمان با بازار انرژی، تسویه گردند [۲۳-۲۲]. در این مقاله، بازار انرژی به‌صورت همزمان با رزروچرخان تسویه می‌شود و سپس به‌صورت متوالی با توان راکتیو تسویه خواهد شد.

۲- تشریح مدل

۳-۱- مدل DERها

در [۲۴] به‌طور مفصل درباره هزینه DERها برای ارائه خدمات و قیود بهره‌برداری آن‌ها بحث شده است. در اینجا فرض شده است که ADN مالک تمامی DERها شبکه تحت پوشش خود 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. تولیدات پراکنده کنترل‌پذیر امکان ارائه خدمات جانبی رزروچرخان و توان راکتیو همچنین خدمات انرژی را دارا می‌باشند.

• هزینه بهره‌برداری

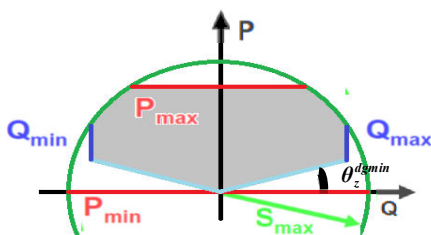
هزینه بهره‌برداری مجموع هزینه تولید توان اکتیو و راکتیو به‌صورت تابعی خطی بر اساس هزینه سرانه تولید برق، هزینه آمادگی توان اکتیو و راکتیو و هزینه روشن/خاموش شدن واحد تولید پراکنده تشکیل شده است:

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

در معادله (۱)، a_{zt}^{dg} و b_{zt}^{dg} ضرایب تابع هزینه تولید توان اکتیو است که به‌صورت رزرو (R_{ztc}^{dg}) یا غیررزرو (P_{zt}^{dg}) است. α_{zt}^{dg} و β_{zt}^{dg} ضرایب هزینه تولید توان راکتیو (Q_{zt}^{dg}) می‌باشند. SC_{zt}^{dg} هزینه مورد نیاز برای روشن کردن یا بالا آمدن و SHC_{zt}^{dg} هزینه خاموش کردن واحد است. J_{zt}^{dg} متغیر باینری نشان‌دهنده وضعیت روشن شدن واحد است. همچنین K_{zt}^{dg} متغیر باینری نشان‌دهنده وضعیت خاموش شدن واحد است.

• قیود بهره‌برداری

مولدهای تولید پراکنده دارای مبدل‌های انرژی در خروجی خود می‌باشند. این مبدل‌ها دارای منحنی بارگذاری به‌مانند شکل ۳ می‌باشند که تولید توان اکتیو، راکتیو و ظاهری را در آن‌ها محدود می‌کند.



شکل ۳: منحنی بارگذاری

۳-۱-۲- مدل بارهای قطع‌پذیر

بارهای قطع‌پذیر به صورت بار منفی مدل شده‌اند. بارهای قطع‌پذیر امکان حضور در بازار انرژی و خدمات جانبی رزروچرخان و توان راکتیو را کسب خواهند کرد.

• هزینه قطع‌بار

در صورت تأمین بارهای قطع‌پذیر از آن‌ها معادل نرخ خرده‌فروشی هزینه‌ای دریافت می‌شود و در صورت قطع بار جریمه‌ای به آن‌ها پرداخت می‌شود.

$$C_v^{int}(P_v^{int}, R_{vt}^{int}, Q_v^{int}) = a_v^{int} \cdot (P_v^{int} + R_{vt}^{int}) + b_v^{int} \cdot I_v^{int} \quad (13)$$

در معادله (۱۳)، b_v^{int} و a_v^{int} نشان‌دهنده ضرایب تابع جریمه قطع بار توان اکتیو که به صورت رزرو (R_{vt}^{int}) یا غیررزرو (P_v^{int}) است.

• قیود قطع‌بار

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

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

قید حداکثر زمان قطع بار در دوره برنامه‌ریزی (H_v^{intmax})

$$\sum_t I_{vt}^{int} \leq H_v^{intmax}, \forall v \quad (15)$$

۳-۱-۳- مدل ذخیره‌ساز

ذخیره‌ساز انرژی از نوع ذخیره‌سازهای شیمیایی است که امکان کنترل توان اکتیو و حضور در بازار را فراهم می‌آورد، مدلی که در این مقاله برای ذخیره‌ساز در نظر گرفته شده است، بر اساس مدل مرجع [۲۵] است.

• هزینه بهره‌برداری

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

$$C_{gt}^{str}(P_{gt}^{str}, I_{gt}^{str}) = \alpha_{gt}^{str} |P_{gt}^{str}| + \beta_{gt}^{str} I_{gt}^{str} \quad (16)$$

در معادله (۱۶)، مقدار انرژی ذخیره‌سازی شده است که در صورت شارژ، مثبت و در حالت دشارژ منفی است. 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 است.

• قیود بهره‌برداری

قید حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی (P_g^{strmax})

$$\sum_{k=1}^t P_{gk}^{str} \leq P_g^{strmax}, \forall g, \forall t \quad (17)$$

قید حداقل میزان ذخیره‌سازی شده (DOD_g^{str})

$$\sum_{k=1}^t P_{gk}^{str} \geq DOD_g^{str}, \forall g, \forall t \quad (18)$$

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})

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

قید حداکثر (P_z^{dgmax}) و حداقل (P_z^{dgmin}) توان اکتیو تولیدی

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

قید حداکثر (Q_z^{dgmax}) و حداقل (Q_z^{dgmin}) توان راکتیو تولیدی

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

قید باینری سنکرون بودن توان راکتیو

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

هنگامی که واحد خاموش باشد توان راکتیوی تولید نمی‌گردد. هنگامی که روشن باشد و توان راکتیو در یکی از دو بخش جذب یا تزریق بهره‌برداری می‌شود.

قید حداقل شیب بهره‌برداری ($\tan \theta_z^{dgmin}$)

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

در مبدل‌های الکترونیک قدرت برای کاهش هزینه ساخت و طراحی، معمولاً از تغذیه توان راکتیو با توان اکتیو کم چشم‌پوشی می‌گردد [۲۰].

قید حداکثر توان ظاهری (S_z^{dgmax})

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

قید نرخ افزایش تولید (RU_z^{dg})

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

قید نرخ کاهش تولید (RD_z^{dg})

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

قید حداکثر نرخ تولید برای رزروچرخان (MSR_z^{dg})

$$R_{zt}^{dg} \leq \min\{10 \cdot MSR_z^{dg}, P_z^{dgmax} \cdot I_{zt}^{dg} - P_{zt}^{dg}\}, \forall z, \forall t \quad (9)$$

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

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)

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

قید حداقل زمان خاموش بودن واحد (MDT_z)

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

۲-۳- راهبرد پیشنهاددهی VPP

VPP پیشنهادی شامل سه زوج قیمتی و توان برای تبادل در بازارهای انرژی، رزرو و توان راکتیو به‌وسیله پیش‌بینی قیمت آن بازارها می‌دهد و سپس DGها، وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها و گزینه‌های قطع بار 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 فروش برق به مصرف‌کنندگان است. در شکل ۴ مدل پیشنهاددهی نیروگاه مجازی با استفاده از SCPBUC ارائه شده است.



شکل ۴: روند پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در شبکه توزیع فعال بازار رزروچرخان فرض شده است که بر اساس پیشنهادات برای ظرفیت تسویه گردد. در برخی بازارها، برندگان بازار بر اساس مقدار انرژی فراخوانی شده پولی اضافه دریافت می‌کنند. چون که VPP نمی‌تواند مقدار انرژی که توسط بازار رزروچرخان فراخوانده می‌شود پیش‌بینی کند، در این مقاله، به‌مانند [۱۹]، مقدار درآمد واقعی حاصل

از بازار رزرو چرخان در نظر گرفته نشده است. همچنین بر اساس [۲۶] در بازار متوالی انرژی و توان راکتیو در آمدی بابت فرصت ازدست‌رفته تولید توان راکتیو به شرکت‌کنندگان در بازار پرداخت می‌شود که این بخش از سود نیروگاه مجازی نیز لحاظ نمی‌گردد. باید توجه کرد که نیروگاه مجازی حداقل سود مورد انتظار از این بازارها را بیشینه می‌نماید. نیروگاه مجازی با فراخوانی شدن یا نشدن رزروچرخان می‌بایستی اجزا تحت پوشش خود را به‌صورت ایمن و پایدار بهره‌برداری کند، به همین علت دو پیشامد در مسئله پیشنهاددهی در بازار انرژی و خدمات جانبی لحاظ شده است تا VPP از بهره‌برداری امن خود اطمینان حاصل نماید. $c \in \{0,1\}$ مجموعه این دو پیشامد است که اگر صفر باشد نشان‌دهنده فراخوانی نشدن و در صورت فراخوانی شدن یک است. در ادامه فرمول‌بندی مسئله توضیح داده خواهد شد.

• تابع هدف

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

• مجموعه قیود عبارت‌اند از:

- ✓ قیود واحدهای DER: (۲) - (۱۲) مربوط به تولیدات پراکنده، (۱۴) - (۱۵) مربوط به بارهای قطع‌پذیر و (۱۷) - (۲۰) مربوط به ذخیره‌ساز انرژی
- ✓ قیدکفایت نیروگاه مجازی و الزام ذخیره نیروگاه مجازی با توجه به عدم قطعیت واحدهای DER، قیود (۲۲) و (۲۳) را در هر ساعت برای کفایت نیروگاه مجازی و الزام ذخیره در نظر می‌گیرد.

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

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

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

$$\left\{ \begin{aligned} & \sum_{z \in \Psi_n^{VPP}} (P_{zt}^{dg} + R_{zt}^{dg}) - \sum_{i \in \Psi_n^{GSP}} (P_{it}^E + R_{it}^{SR}) - \sum_{g \in \Psi_n^{VPP}} \eta_g^{str} \cdot P_{gt}^{str} - \sum_{w \in \Psi_n^{VPP}} P_{wt}^D + \sum_{v \in \Psi_n^{VPP}} (P_{vt}^{int} + R_{vt}^{int}) \\ & - \sum_{m \in \Phi_n^{VPP}} |V_{ntc}| \cdot |V_{mtc}| \cdot |Y_{nm}| \cdot \cos(\theta_{nm}^{VPP} - \delta_{ntc}^{VPP} + \delta_{mtc}^{VPP}) = 0 \end{aligned} \right\} \forall n \in \Psi_n^{VPP}, \forall c, \forall t \quad (24)$$

$$\sum_{z \in \Psi_n^{VPP}} (Q_{zt}^{dg}) - \sum_{i \in \Psi_n^{GSP}} Q_{it}^R - \sum_{w \in \Psi_n^{VPP}} Q_{wt}^D + \sum_{v \in \Psi_n^{VPP}} (Q_{vt}^{int}) + \sum_{m \in \Phi_n^{VPP}} |V_{ntc}| \cdot |V_{mtc}| \cdot |Y_{nm}| \cdot \sin(\theta_{nm}^{VPP} - \delta_{ntc}^{VPP} + \delta_{mtc}^{VPP}) = 0, \quad \forall n \in \Psi_n^{VPP}, \forall c, \forall t \quad (25)$$

است که به شینه n نیروگاه مجازی متصل هستند. 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.

✓ تعادل عرضه-تقاضا

معادله (۲۴) و (۲۵) به ترتیب نشان‌دهنده تعادل توان اکتیو و راکتیو در هر شینه است. $z \in \Psi_n^{VPP}$ به معنی واحدهای تولید پراکنده z

می‌توان جواب‌های خروجی این حل‌کننده را با درجه اطمینان قابل قبولی نزدیک به پاسخ بهینه عمومی دانست [۲۳].

۴- مطالعات عددی

در این بخش ابتدا فرض می‌شود که TVPP تنها در نقاط GSP به شبکه بالا دست خدمات ارائه می‌کند، بنابراین نیروگاه مجازی با یک شبکه فوق توزیع مواجه است که معمولاً حلقوی است و از چند نقطه به شبکه بالادست متصل است (شکل ۵). سپس به منظور کاربردی بودن مدل بر روی شبکه‌های توزیع، مدل ارائه‌شده بر روی یک شبکه شعاعی شکل ۹ بررسی شده است.

۴-۱- مورد مطالعاتی اول

مدل ارائه‌شده بر روی سیستم شکل ۵ مورد بررسی قرار گرفته است، اطلاعات این سیستم در [۲۸] و ضمیمه الف آورده شده است. برای بررسی مدل ارائه‌شده، ابتدا VPP در یک GSP و سپس در دو GSP به ISO خدمات می‌دهد.

✓ قیود امنیت استاتیکی VPP

قید حداکثر توان ظاهری عبوری از خطوط (F_{nm}^{vppmax})

$$\sqrt{P_{nmc}^{vpp2}(V, \delta) + Q_{nmc}^{vpp2}(V, \delta)} \leq F_{nm}^{vppmax}, \forall n \in \Psi_n^{vpp}, \forall m \in \phi_n^{vpp}, \forall c, \forall t \quad (26)$$

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

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

✓ قید محدودیت زاویه شینه

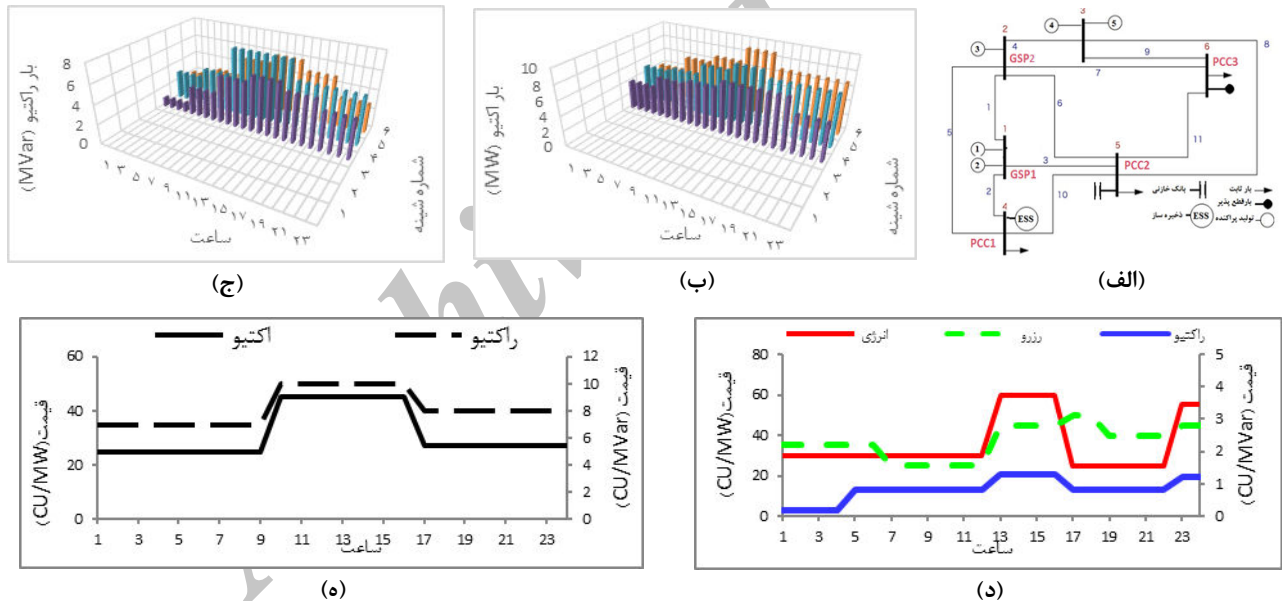
$$-\pi \leq \delta_{nmc}^{vpp} \leq \pi, \forall n \in \Psi_n^{vpp}, \forall c, \forall t \quad (28)$$

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

$$\sqrt{(P_{ii}^E + R_{ic}^{SR})^2 + Q_{ii}^{R2}} \leq F^{max-upstream}, \forall i \in \Psi_n^{vpp}, \forall c, \forall t \quad (29)$$

۳-۳- حل مسئله

مدل ارائه‌شده، مسئله‌ای بهینه‌سازی غیرمحدب غیرخطی توأم با اعداد صحیح است. برای حل این مسئله از برنامه GAMS/DICOPT استفاده شده است [۲۷]. DICOPT بر اساس یک الگوریتم ابتکاری، با تجزیه مسئله به دو زیربرنامه غیرخطی و خطی آمیخته با عدد صحیح، به حل بسیار کارا و مناسب این گونه مسائل می‌پردازد. با توجه به الگوریتم حل،



شکل ۵: (الف) سیستم مورد مطالعه [۲۸]، (ب) بار اکتیو، (ج) بار راکتیو، (د) قیمت پیش‌بینی شده بازار، (ه) قیمت خرده‌فروشی

در ساعات ۱۳ الی ۱۶ کلیه DGها توان خود را ارائه خواهند کرد. در ساعات ۱۷ الی ۲۲ به علت افت قیمت بازار انرژی و بیشتر بودن قیمت بازار رزرو DGها توانی در بازار انرژی ارائه نمی‌کنند. در ساعات ۲۳ الی ۲۴ با افزایش مجدد قیمت بازار انرژی DGها حداکثر توان خود را در بازار انرژی ارائه خواهند کرد. باید توجه داشت که DGها در ساعات ۱ الی ۶ و ۱۷ الی ۲۲ روشن هستند و حداقل تولید خود را تولید می‌کنند تا بتوانند تولید خود را به‌عنوان رزرو چرخان در بازار خدمات جانبی TSO که قیمت بالاتری نسبت به بازار انرژی دارد به فروش رسانند.

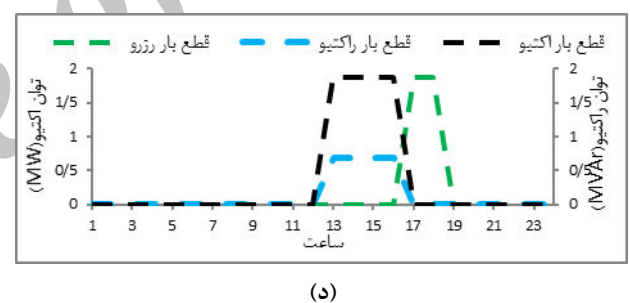
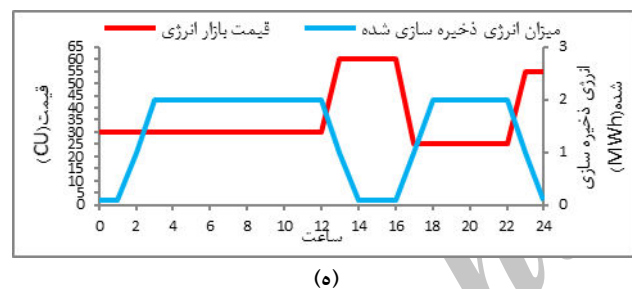
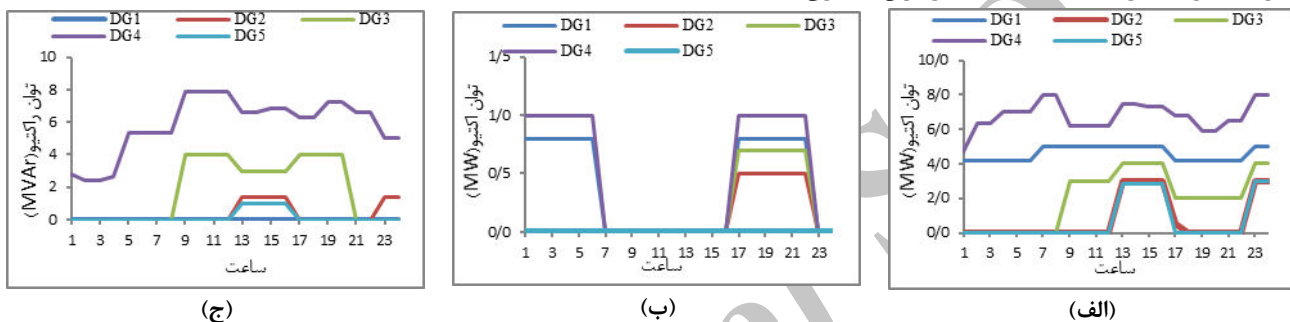
۴-۱-۱- ارائه خدمات در GSP1

نیروگاه مجازی تنها در GSP1 به ISO و در PCC1, PCC2, PCC3 به DSO خدمات می‌دهد. قیمت توان اکتیو، راکتیو و رزرو چرخان طبق شکل (۵-د) برحسب واحد پول (CU) است و قیمت تأمین تقاضای بار خرده‌فروشی شکل (۵-ه) نشان داده شده است. در شکل (۶-الف) تولید DGها در بازار انرژی به تفکیک نشان داده شده است. با توجه به قیمت پیش‌بینی شده بازار انرژی تنها DG4 و DG1 به علت هزینه پایین‌تر تولید نسبت به دیگر DGها در کل ساعات اقدام به تولید خواهند کرد. همچنین با پیک قیمت بازار انرژی

می‌باشد، نیروگاه مجازی در ساعات ۱۳ الی ۱۶ با توجه به اینکه قیمت توان راکتیو بسیار کم‌تر از توان اکتیو است، از تولید توان راکتیو واحد کاسته و بر مقدار تولید اکتیو می‌افزاید تا سود بیشتری را عاید خود و واحد تولید کننده نماید. DG2 و DG5 جزء گران‌ترین واحدهای تولید کننده توان راکتیو و توان اکتیو هستند که در ساعات ۱۳ الی ۱۶ با حداکثر قیمت بازار انرژی و خدمات جانبی، بخشی از حداکثر توان ظاهری خود را به صورت اکتیو در بازار انرژی و باقی مانده را در بازار راکتیو ارائه می‌کنند. همچنین DG2 با توجه به هزینه تولید راکتیو کم‌تر از قیمت بازار راکتیو در ساعات ۲۳ الی ۲۴ نیز اقدام به تولید توان راکتیو خواهد کرد. DG1 نیز به علت هزینه بالاتر یا مساوی با قیمت بازار در هیچ ساعتی توان راکتیو ارائه نخواهد کرد.

در شکل (۶-ب) میزان تولید DGها در بازار رزرو چرخان نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در ساعات ۱ الی ۶ DG1 و DG4 با هزینه تولید پایین‌تر اقدام به تولید می‌کنند. در ساعات ۱۷ الی 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 اینکه قیمت بازار رزرو بیشتر از ساعات اولیه ۱ الی ۶ است، DG3 و DG2 هم مزاد تولید خود را در بازار ارائه می‌کنند.

در شکل (۶-ج) تولید DGها در بازار راکتیو به تفکیک نشان داده شده است. DG4 با توجه به هزینه تولید توان راکتیو پایین‌تر نسبت به قیمت بازار راکتیو در کلیه ساعات توان راکتیو تولید خواهد کرد. DG3 دومین واحد ارزان است که در ساعات ۹ الی ۲۰ توان راکتیو تولید خواهد کرد. با توجه به اینکه حداکثر توان ظاهری DG3، 5MVA خواهد کرد.



شکل ۶: (الف) تولید DGها در بازار انرژی، (ب) تولید DGها در بازار رزرو چرخان، (ج) تولید DGها در بازار راکتیو، (د) قطع بار با توجه به قیمت بازار انرژی و خدمات جانبی، (ه) وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز

ذخیره‌ساز به واسطه نرخ شیب شارژ و دشارژ دو ساعت زمان برای این‌که حداکثر انرژی را ذخیره‌سازی نماید نیاز دارد.

در شکل (۷-الف) پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان همچنین تعادل عرضه-تقاضای اکتیو در نیروگاه مجازی نشان داده شده است. منحنی تولید توان اکتیو شامل مجموع تولید DGها، قطع بار صورت گرفته، دشارژ ذخیره‌ساز است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در ساعات ۱۳ الی ۱۶ و ۲۳ الی ۲۴ با توجه به قیمت بالای بازار انرژی تولید توان اکتیو داخلی نیروگاه مجازی به حداکثر میزان خود می‌رسد.

توان تبدالی مثبت نشان‌دهنده واردات توان از شبکه بالادست و علامت منفی نشان‌دهنده صادرات توان به شبکه بالادست است. اختلاف بین منحنی توان تبدالی با شبکه بالادست در بازار انرژی و منحنی مجموع توان تبدالی با بازار انرژی و رزرو چرخان، میزان رزرو چرخان ارائه‌شده به ISO را نشان می‌دهد. نیروگاه مجازی در

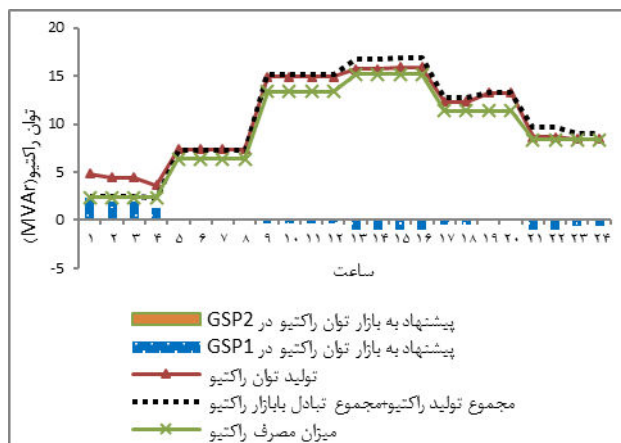
در شکل (۶-د) قطع بار برای ارائه در بازار انرژی و خدمات جانبی هم‌زمان با توجه به قیمت این بازارها نشان داده شده است. بار قطع‌پذیر ۶ ساعت در طول شبانه روز امکان قطع شدن را دارا است. در ساعات ۱۳ الی ۱۶ قیمت خرده‌فروشی انرژی و راکتیو از قیمت بازار انرژی و راکتیو کم‌تر است در نتیجه چهار ساعت قطع بار برای حضور در این بازارها صورت گرفته است. در ساعات ۱۷ الی 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 (۶-ه) مقدار انرژی ذخیره‌سازی شده بر اساس پیش‌بینی قیمت بازار انرژی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ذخیره‌ساز در ساعات ۲ الی ۳ با قیمت انرژی پایین شارژ می‌شود و در ساعات ۱۳ الی ۱۴ این انرژی را با بالا رفتن قیمت انرژی دشارژ می‌نماید. ذخیره‌ساز به همین ترتیب در ساعات ۱۷ الی ۱۸ شارژ و در ساعات ۲۳ الی ۲۴ دشارژ می‌شود. باید توجه داشت که

شده است. منحنی تولید توان راکتیو شامل مجموع تولید DGها، قطع بار صورت گرفته و میزان خازن در مدار است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در ساعات ۱۳ الی ۱۶ با توجه به قیمت بالای بازار توان راکتیو تولید توان راکتیو داخلی نیروگاه مجازی به حداکثر میزان خود می‌رسد.

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

طبق جدول ۱ سود کل نیروگاه مجازی در این حالت ۲۲۹۹/۱۹ واحد پول است. سهم درآمدی حضور در بازار توان راکتیو با توجه به اینکه نیروگاه مجازی بیشتر واردکننده توان راکتیو است، ناشی از خرده‌فروشی به تقاضای داخلی است.



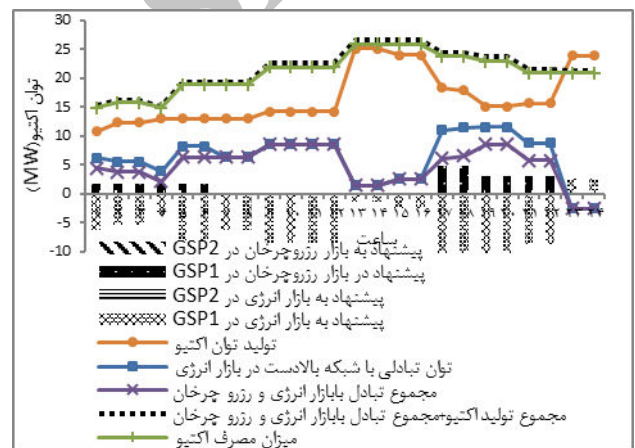
(ب)

ساعات ۱ الی ۶ و ۱۷ الی ۲۲ که قیمت بازار رزرو بیشتر از بازار انرژی است، 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 خط‌چین مشکی رنگ حاصل جمع دو منحنی مجموع تولید توان راکتیو و مجموع تبادل توان با بازار انرژی و رزرو چرخان است. اختلاف این منحنی با منحنی میزان مصرف راکتیو تلفات انرژی نیروگاه مجازی را نشان می‌دهد.

در نهایت میزان پیشنهاد به بازار انرژی و رزرو چرخان در GSP1 که همان توان تبدالی با شبکه بالادست با علامت معکوس است نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد نیروگاه مجازی با بالا رفتن قیمت بازار و همچنین با توجه به حداکثر ظرفیت توان راکتیو داخلی در ساعات ۱۳ الی ۱۶ کم‌ترین پیشنهاد خرید و در ساعات ۲۳ الی ۲۴ پیشنهاد فروش را به بازار انرژی می‌دهد.

در شکل (۷-ب) پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار توان راکتیو همچنین تعادل عرضه-تقاضای راکتیو در نیروگاه مجازی نشان داده



(الف)

شکل ۷: پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار برق، الف) بازار انرژی و رزرو چرخان و تعادل عرضه-تقاضای توان اکتیو، ب) بازار توان راکتیو و تعادل عرضه-تقاضای راکتیو

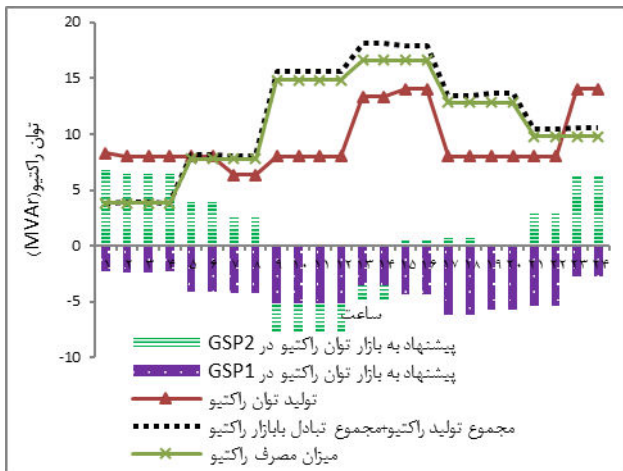
همچنین از طریق اختلاف قیمتی که در دو نقطه وجود دارد سودی را عاید خود می‌سازد. در ساعات ۵ الی ۶ با توجه به اینکه بار داخلی نسبت به چهار ساعت اول افزایش می‌یابد و با توجه به اینکه قیمت رزرو از قیمت بازار انرژی بالاتر است، در هر دو نقطه اتصال به صورت واردکننده است اما در ساعات ۷ الی ۸ با پایین آمدن قیمت 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 الی ۲۲ نیروگاه مجازی به طور خالص از دو نقطه اتصال واردکننده است، در صورتی که در ساعات ۲۳ الی ۲۴ به علت قیمت بالای بازار انرژی و همچنین بار داخلی کم اقدام به صادرات می‌کند.

۴-۱-۲- ارائه خدمات در GSP1 و GSP2

در این حالت نیروگاه مجازی در GSP1 و GSP2 به ISO و در PCC1، PCC2 و PCC3 به بارهای شبکه توزیع خدمات می‌دهد. قیمت توان اکتیو، راکتیو و رزرو چرخان در GSP1 مانند شکل (۵-د) و در GSP2 ۱۰٪ گران‌تر است و قیمت تأمین تقاضای بار خرده‌فروشی، برابر قیمت خرده‌فروشی توان اکتیو و راکتیو در شکل (۵-ه) نشان داده شده است.

در شکل (۸-الف) پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان همچنین تعادل عرضه-تقاضای اکتیو در نیروگاه مجازی نشان داده شده است. به‌طور کلی نیروگاه مجازی در بازار انرژی از GSP1 که ارزان‌تر است، پیشنهاد خرید می‌دهد. در برخی ساعات از جمله ۱ الی ۴، ۷ الی ۸ و ۱۳ الی ۱۶ با پیشنهاد فروش از GSP2 و پیشنهاد خرید به GSP1 هزینه‌های بهره‌برداری خود را کاهش می‌دهد.

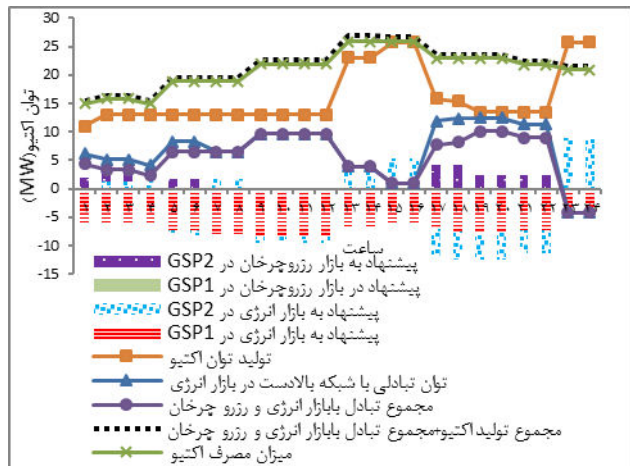
الی ۱۸ و ۲۳ الی ۲۴ با پیشنهاد فروش از GSP2 و پیشنهاد خرید به GSP1 هزینه‌های بهره‌برداری خود را کاهش می‌دهد و همچنین از طریق اختلاف قیمتی که در دو نقطه وجود دارد سودی را عاید خود می‌سازد. در ساعات ۵ الی ۲۲ نیروگاه مجازی به‌طور خالص از دو نقطه اتصال وارد کننده است، در صورتی که در ساعات ۱ الی ۴ و ۲۳ الی ۲۴ به علت قیمت بالای بازار توان راکتیو و همچنین بار داخلی کم اقدام به صادرات می‌کند.



(ب)

در شکل (۸-ب) پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار توان راکتیو همچنین تعادل عرضه-تقاضای راکتیو در نیروگاه مجازی نشان داده شده است. در منحنی تولید توان راکتیو نشان داده شده است که با افزایش ۱۰ درصدی قیمت توان راکتیو در GSP2 علاوه بر ساعات ۱۳ الی ۱۶ توان تولیدی در ساعت ۲۳ الی ۲۴ نیز به حداکثر میزان خود رسیده است.

به‌طور کلی در بازار توان راکتیو، نیروگاه مجازی از GSP1 که ارزان‌تر است، پیشنهاد خرید می‌دهد. در برخی ساعات از جمله ۱ الی ۸، ۱۵



(الف)

شکل ۸: پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار برق، الف) بازار انرژی و رزرو چرخان و تعادل عرضه-تقاضای توان راکتیو، ب) بازار توان راکتیو و تعادل عرضه-تقاضای راکتیو

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 ۲۵۷۹/۴۹ واحد، سود ۱۱۲/۵٪ را نسبت به حالت اول عاید نیروگاه مجازی می‌کند.

طبق جدول ۱ سود کل نیروگاه مجازی در این حالت ۲۵۹۱/۸۹۳ واحد پول است. هزینه‌های بهره‌برداری در این حالت کاهش می‌یابد. در این جدول در حالت اول سود مورد انتظار برای یک دوره حضور در بازار انرژی و خدمات جانبی برابر ۲۲۹۹/۱۹ واحد پول تخمین زده

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

سود کل (CU)	هزینه‌های بهره‌برداری (CU)	درآمد خرده‌فروشی راکتیو (CU)	درآمد خرده‌فروشی اکتیو (CU)	درآمد بازار راکتیو (CU)	درآمد بازار رزرو چرخان (CU)	درآمد بازار انرژی (CU)	نقطه اتصال	حالت
۲۲۹۹/۱۹	۱۳۳۴۰/۱۱۲	۲۸۰۰/۳۹۴	۱۵۸۲۱/۰۳۹	-۲۴/۶۸۵	۱۳۴۵/۹۳۹	-۴۳۰۳/۳۸۵	GSP1	حالت اول
۲۵۷۹/۴۹	۱۲۴۷۰/۸۹	۲۸۰۰/۳۹۴	۱۵۸۲۱/۰۳۹	-۸۴۹/۶۲	۰	-۵۹۱۴/۵۲	GSP1	حالت دوم
				۴۴۷/۲۳	۱۲۸۰/۳	۱۴۶۵/۵۶		

نقش خریدار را دارا است. بنابراین با افزایش قیمت بازار انرژی سود نیروگاه مجازی کاهش و با کاهش قیمت سود آن افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در بازار رزرو چرخان نقش فروشنده را دارا است، با افزایش قیمت این بازار سود این نیروگاه نیز افزایش می‌یابد. نهایتاً با توجه به اینکه در بازار توان راکتیو در اکثر اوقات نقش خریدار را دارد، افزایش قیمت بازار توان راکتیو سود نیروگاه مجازی را کاهش و برعکس.

۴-۲- بررسی عدم قطعیت قیمت بازار

به‌منظور بررسی اثرات عدم قطعیت قیمت بازارها بر روی سود انتظاری نیروگاه مجازی، سه سطح قیمتی بالا، متوسط و پایین در نظر گرفته شده است. احتمال وقوع هر یک از این سطوح قیمت به ترتیب ۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۲ است. سطح قیمتی متوسط دقیقاً برابر قیمت‌های در نظر گرفته شده در شکل (۵-د) است. سطوح قیمتی بالا و پایین نسبت به سطح متوسط به ترتیب ۱۰٪ بیش‌تر و کم‌تر در نظر گرفته شده است. بنابراین ۲۷ سناریو در نظر گرفته شده است.

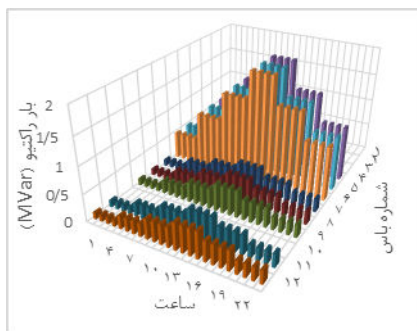
نتایج حاصله در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به بخش ۴-۱، نیروگاه مجازی در سطح قیمتی متوسط در اکثر اوقات در بازار انرژی،

۳-۴- مورد مطالعاتی دوم

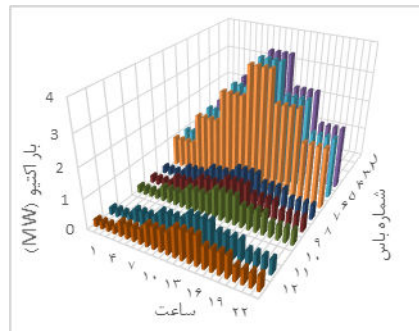
مدل ارائه شده بر روی سیستم توزیع شکل ۹ مورد بررسی قرار گرفته است، اطلاعات این سیستم در ضمیمه ب آورده شده است. قیمت پیش‌بینی بازارهای برق و خرده‌فروشی به مانند شکل ۵ است.

جدول ۲: سود نیروگاه مجازی در سطوح قیمتی مختلف

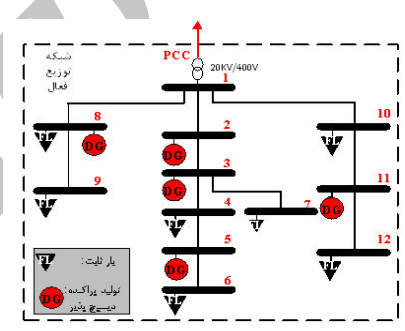
سطح قیمتی توان راکتیو	سطح قیمتی			سطح قیمتی انرژی
	پایین	متوسط	بالا	
پایین	۳۶۷۵/۸۷	۳۶۷۱/۴۶	۳۶۶۹/۲۷	پایین
متوسط	۳۷۵۸/۹۴	۳۸۲۹/۴۷	۳۸۲۸	متوسط
بالا	۴۱۰۹/۰۷	۴۱۰۷/۰۶	۴۱۰۶/۱۳	بالا
پایین	۲۵۵۵/۹۱	۲۵۵۴/۲۳	۲۵۵۲/۵۸	پایین
متوسط	۲۵۸۰/۵۷	۲۵۷۹/۴۹	۲۵۷۸/۷۸	متوسط
بالا	۲۸۷۴/۴۵	۲۸۷۲/۷۷	۲۸۷۱/۰۹	بالا
پایین	۱۵۳۱/۰۲	۱۵۲۷/۰۶	۱۵۲۴/۳۹	پایین
متوسط	۱۶۲۴/۶۲	۱۶۲۱/۰۲	۱۶۱۷/۹۹	متوسط
بالا	۱۷۵۶/۵۳	۱۷۵۴/۸۵	۱۷۵۳/۳۸	بالا
سود انتظاری نیروگاه مجازی ۲۷۵۰/۰۳۲				



(ج)



(ب)

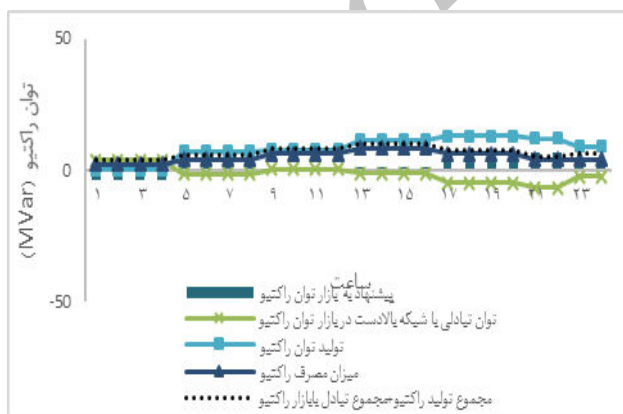


(الف)

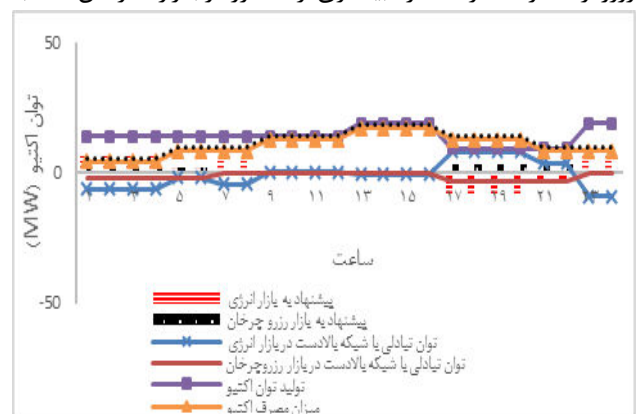
شکل ۹: (الف) سیستم توزیع مورد مطالعه، (ب) بار اکتیو، (ج) بار راکتیو

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.

در شکل ۱۰ نتایج مربوط به این مطالعه آمده است. نتایج نشان می‌دهد، نیروگاه مجازی در ساعاتی که قیمت پیش‌بینی شده بازار رزرو چرخان بیشتر از قیمت پیش‌بینی شده بازار انرژی است به‌عنوان 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



(ب)



(الف)

شکل ۱۰: پیشنهادی نیروگاه مجازی در بازار برق، (الف) بازار انرژی و رزرو چرخان و تعادل عرضه-تقاضای توان اکتیو، (ب) بازار توان راکتیو و تعادل عرضه-تقاضای راکتیو

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی برای بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع فعال در یک بازار همزمان انرژی و خدمات جانبی ارائه شده است. مطالعات عددی انجام شده است تا مدل ارائه شده ارزیابی گردد. نتایج نشان می‌دهد که نیروگاه مجازی می‌تواند به‌عنوان شبکه توزیع فعال، هم در سمت مصرف و هم در سمت تولید نقش ایفا کند. به‌عنوان خرده‌فروش می‌تواند تقاضای اکتیو و راکتیو شبکه توزیع را تأمین نماید. به‌عنوان یک جمع‌کننده می‌تواند با تجمیع DGها، بارهای قطع‌پذیر و ذخیره‌سازهای انرژی حضور این واحدها را در بازار انرژی و خدمات جانبی رزروچرخان و راکتیو فراهم آورد. و درنهایت به‌عنوان یک مشترک همانند 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 رزروچرخان بیشتر از قیمت پیش‌بینی شده بازار انرژی است، به‌عنوان یک مصرف‌کننده در بازار شرکت خواهد کرد و مازاد تولید خود را در بازار 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 فوق‌توزیع 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 بیشینه‌سازی سود خود بخشی از بیشینه توان ظاهری DGها را به‌صورت 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 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. درنهایت، مدل ارائه شده بر روی یک شبکه توزیع نیز بررسی گردید تا کاربردپذیری آن بر روی شبکه های شعاعی با یک نقطه اتصال به شبکه بالادست (یعنی یک GSP) بررسی گردد.

در این مقاله منابع عدم قطعیت موجود در شبکه توزیع فعال، از جمله عدم قطعیت در پیش‌بینی قیمت بازار و تولید تولیدات پراکنده در نظر گرفته نشده است که می‌تواند به‌عنوان ادامه کار پیشنهاد گردد.

علایم و اختصارات

اندیس‌ها:

z	تولیدات پراکنده
g	ذخیره‌ساز
c	پیشامد فراخوانی یا عدم فراخوانی رزروچرخان مجموعه‌ها:
Ψ_n^{VPP}	مجموعه کلیه شینه‌های نیروگاه مجازی
Ψ_n^{GSP}	باس‌های نیروگاه مجازی متصل به شبکه بالادست
Φ_n^{VPP}	مجموعه شینه‌های نیروگاه مجازی به جز شینه نام.
	پارامترها و ثابت‌ها:
λ_{nt}^E	قیمت بازار انرژی به CU/MW
λ_{nt}^R	قیمت بازار توان راکتیو به CU/MVar
λ_{nm}^{SR}	قیمت بازار رزروچرخان به CU/MW
$\rho_t^{active}, \rho_t^{reactive}$	نرخ خرده‌فروشی اکتیو و راکتیو به CU/MW
P_{wt}^D, Q_{wt}^D	تقاضای اکتیو و راکتیو بار غیرقابل قطع به MW و MVar
$P_v^{intmax}, P_v^{intmin}$	حداکثر و حداقل میزان بار قطع‌پذیر به MW
P_z^{dgmax}, P_z^{dgmin}	حداکثر و حداقل میزان تولید توان اکتیو DG به MW
Q_z^{dgmax}, Q_z^{dgmin}	حداکثر و حداقل میزان تولید توان راکتیو DG به MVar
S_z^{dgmax}	حداکثر توان ظاهری DG به MVA
RU_z^{dg}, RD_z^{dg}	نرخ شیب افزایشی یا کاهش‌ی تولید توان اکتیو DG به MW/hr
MSR_z^{dg}	شیب قابلیت تولید رزرو چرخان DG به MW/min
MUT_z^{dg}, MDT_z^{dg}	حداقل زمان روشن بودن یا خاموش ماندن DG به hr
H_v^{intmax}	حداکثر تعداد ساعات مجاز قطع بار قطع‌پذیر به hr
P_g^{strmax}	ظرفیت ذخیره سازی ESS به MWhr
DOD_g^{str}	حداقل میزان ذخیره‌سازی شده در ESS به MWhr
$P_g^{initial}$	میزان ذخیره‌سازی شده اولیه در ESS به MWhr
R_g^{str}	حداکثر شیب شارژ و دشارژ ESS به MW/hr
V_n^{max}, V_n^{min}	حداکثر و حداقل ولتاژ باس
F_{nm}^{VPP}	حداکثر ظرفیت خطوط به MVA
$F_{max-ustream}$	حداکثر توان ظاهری تبدیلی با شبکه بالادست به MVA
$AR^{active}, AR^{reactive}$	میزان ذخیره اکتیو و راکتیو داخلی جهت کفایت نیروگاه مجازی و الزام ذخیره به MW
$\theta_{nm}^{VPP}, Y_{nm}$	اندازه و زاویه ماتریس admittانس شبکه نیروگاه مجازی متغیرها:
$P_{zt}^{dg}, R_{zt}^{dg}, Q_{zt}^{dg}$	میزان تولید DG جهت انرژی و رزرو چرخان به MW و توان راکتیو به MVar
$P_{vt}^{int}, R_{vt}^{int}, Q_{vt}^{int}$	میزان قطع بار جهت بازار انرژی و رزرو چرخان به MW و توان راکتیو به MVar
P_{gt}^{str}	میزان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز (مثبت به معنی شارژ و منفی به معنی دشارژ) به MWhr
$P_{it}^E, R_{it}^{SR}, Q_{it}^R$	میزان پیشنهاد نیروگاه مجازی به بازارهای انرژی و رزرو چرخان به MW و توان راکتیو به MVar
$Q_{nmc}^{VPP}, P_{nmc}^{VPP}$	توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط nm
$V_{nmc}, \delta_{nmc}^{VPP}$	دامنه و زاویه ولتاژ (پریونیت)
I_{zt}^{dg}	متغیر دودویی نشان‌دهنده حالت روشن یا خاموش بودن DG
J_{zt}^{dg}	متغیر دودویی نشان‌دهنده حالت روشن شدن DG
K_{zt}^{dg}	متغیر دودویی نشان‌دهنده حالت خاموش شدن DG

m, n

شینه

شینه‌های نیروگاه مجازی که به شبکه بالادست خدمات

i

توان اکتیو، رزروچرخان و توان راکتیو ارائه می‌کند.

زمان برنامه‌ریزی

t

مشترکین غیرقابل قطع

w

مشترکین قطع‌پذیر

v

جدول ب-۲: اطلاعات فنی ظرفیت واحدهای تولید پراکنده

شینه	P_z^{dgmax} MW	P_z^{dgmin} MW	Q_z^{dgmax} MVar	Q_z^{dgmin} MVar	RU_z^{dg} MW/hr	RD_z^{dg} MW/hr	S_z^{dgmax} MVA	MSR_z^{dg} MW/min
۲	۵	۲	۵	-۳	۵	۵	۶/۵	۰/۰۸
۳	۴	۱	۳	-۳	۴	۴	-	۰/۰۷
۵	۳	۰/۵	۲	-۳	۳	۳	۳/۵	۰/۰۵
۸	۲	۰/۵	۱	-۳	۲	۲	-	۰/۰۵
۱۱	۵	۲	۵	-۳	۵	۵	۶/۵	۰/۰۸

مراجع

[۱] تارنمای دفتر خصوصی‌سازی صنعت برق ایران، انتشار آنلاین در:

<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, 2008.

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

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

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

[6] S. Abapour, K. Zare, B. Mohammadi-Ivatloo, "Evaluation of technical risks in distribution network along with distributed generation based on active management," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 4, pp. 609-618, 2014.

[۷] سعید عبّاپور، کاظم زارع و بهنام محمدی ایواتلو، «ارزیابی جنبه‌های فنی و اقتصادی شبکه توزیع با هدف توسعه DG بر مبنای کاربرد مدیریت اکتیو در شبکه»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۴، شماره ۴، صفحه ۳۵-۴۵، ۱۳۹۳.

[8] M. Marzband, A. Sumper, J. L. Dominguez-García, 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. 314-22, 2013.

[9] M. Nick, R. Cherkaoui, and M. Paolone, "Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 5, pp. 2300-2310, 2014.

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

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

[12] D. Pudjianto, C. Ramsay, and G. Strbac, "Virtual power plant and system integration of distributed energy resources," *IET Proc., Gen., Transm., Distrib.*, vol. 1, no.

متغیر دودویی نشان‌دهنده قطع یا تامین بودن بار قطع‌پذیر

متغیر دودویی نشان‌دهنده شارژ یا دشارژ شدن ESS
پیوست الف:

جدول الف-۱: اطلاعات تابع هزینه واحدهای تولید پراکنده

شینه	a_{zt}^{dg} CU/MW	b_{zt}^{dg} (CU)	SC_{zt}^{dg} (CU)	SHC_{zt}^{dg} (CU)	α_{zt}^{dg} CU/MVA	β_{zt}^{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 الف-۲: اطلاعات ذخیره‌ساز انرژی

شینه	α_{gt}^{str} CU/MWh	β_{gt}^{str} CU	SC_{gt}^{str} CU	SHC_{gt}^{str} CU	R_g^{str} MW/hr	P_g^{strmax} MW	DOD_g^{str} MW	η_g^{str} %
۴	۰/۱	۵	۵	۱۰	۱	۲	۰	۹۰

جدول الف-۳: اطلاعات بارهای قطع‌پذیر

شینه	a_{vt}^{str} CU/MW	b_{vt}^{str} CU	SC_{vt}^{str} CU	SHC_{vt}^{str} CU	S_v^{strmax} MVA	H_v^{strmax} hr
۶	۲۰	۵	۵	۵	۲	۶

جدول الف-۴: اطلاعات فنی ظرفیت واحدهای تولید پراکنده

شینه	P_z^{dgmax} MW	P_z^{dgmin} MW	Q_z^{dgmax} MVar	Q_z^{dgmin} MVar	RU_z^{dg} MW/hr	RD_z^{dg} MW/hr	S_z^{dgmax} MVA	MSR_z^{dg} 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

پیوست ب:

جدول ب-۱: اطلاعات تابع هزینه واحدهای تولید پراکنده

شینه	a_{zt}^{dg} CU/MW	b_{zt}^{dg} (CU)	SC_{zt}^{dg} (CU)	SHC_{zt}^{dg} (CU)	α_{zt}^{dg} CU/MVA	β_{zt}^{dg} (CU)
۲	۲۵	۵	۱۰	۲۰	۱/۳	۰/۱
۳	۲۵	۵	۱۰	۲۰	۱/۳	۰/۱
۵	۳۵	۲	۱۰	۲۰	۲/۸	۰/۲
۸	۳۵	۲	۱۰	۲۰	۲/۱	۰/۱
۱۱	۲۵	۵	۱۰	۲۰	۱/۳	۰/۱

- energy and reactive power market clearing considering power system security,” *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 907-915, 2009.
- [27] Generalized Algebraic Modeling Systems (GAMS), [Online], Available online at: <http://www.gams.com>.
- [28] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, and G. B. Sheblé, *Power Generation, Operation, and Control*, Wiley-IEEE Press, Wiley Publishing, 2013.
- 1, pp. 10-16, 2007.
- [13] 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,” *The 3rd Conference on Thermal Power Plant*, pp. 1-6, Tehran, Iran, 2011.

زیرنویس‌ها

- ¹Active Distribution Network
- ²Distributed Energy Resources
- ³Security-Constrained Price-Based Unit Commitment
- ⁴Mixed Integer Nonlinear Programming
- ⁵Distributed Generation
- ⁶Energy Storage System
- ⁷Demand Response
- ⁸Active Distribution Network
- ⁹Virtual Power Plant
- ¹⁰Point of Common Coupling
- ¹¹Distribution System Operator
- ¹²Grid Supply Point
- ¹³Independent System Operator
- ¹⁴Commercial VPP
- ¹⁵Currency Unit

[۱۴] حسین نظام‌آبادی، پرستو نظام‌آبادی، مهرداد ستایش‌نظر و گئورگ قره‌پتیان، «قیمت‌دهی بهینه نیروگاه‌های مجازی با استفاده از استراتژی تعادلی نش-SFE»، بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی برق ایران، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۹۰.

- [15] Y. Wang, X. Ai, Z. Tan, L. Yan, and S. Liu, “Interactive dispatch modes and bidding strategy of multiple virtual power plants based on demand response and game theory,” *IEEE Transaction. Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 510-519, 2015.
- [16] E. G. Kardakos, C. K. Simoglou, and A. G. Bakirtzis, “Optimal offering strategy of a virtual power plant: A stochastic bi-level approach,” *IEEE Transaction. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 794-806, 2016.
- [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,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 44, pp. 88-98, 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,” *Euro. Transaction. Electrical Power*, vol. 24, no. 1, pp. 43-63, 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 Transaction. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 949-956, 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 Transaction. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 957-964, 2011.
- [21] A. Rabiee, H. A. Shayanfar, and N. Amjady, “Reactive power pricing problems and a proposal for a competitive market,” *IEEE Power & Energy Magazine*, 2009.
- [22] M. Shahidehpour, H. Yamin, and L. Zuyi, *Market Operation in Electric Power Systems*, Wiley-IEEE Press, Wiley Publishing, 2002.
- [23] N. Amjady, J. Aghaei, and H. A. Shayanfar, “Stochastic multiobjective market clearing of joint energy and reserves auctions ensuring power system security,” *IEEE Transaction. Power Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 1841-1854, 2009.
- [24] M. Braun, *Provision of Ancillary Services by Distributed Generators*, Ph.D. Thesis, University of Kassel, 2008.
- [25] 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, 2010.
- [26] A. Rabiee, H. A. Shayanfar, and N. Amjady, “Coupled