راهبرد پیشنهاددهی همزمان نیروگاه مجازی در بازار انرژی و خدمات جانبیِ رزرو چرخان و توان راکتیو

حسین نظام‌آبادی[1] مهرداد ستایش‌نظر[2]

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

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

چکیده: در این مقاله، مسئله پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار انرژی و خدمات جانبیِ رزرو چرخان و توان راکتیو به صورت همزمان بررسی شده‌است. بدین منظور مدلی غیرتعادلی بر اساس درمدار قرار دادن قیمت بنیان واحدها مقید به قیود امنیت (SCPBUC)[1] که تعادل عرضه- تقاضا و امنیت داخلی نیروگاه مجازی را به حساب می آورد، ارائه شده است. با استفاده از مدل ارائه شده نیروگاه مجازی از یک سو برای بهره‌بردار سیستم توزیع، خدمت توان راکتیو و تقاضای بارهای موجود در شبکه توزیع را فراهم می‌کند. از سوی دیگر به عنوان یک جمع‌کننده در بازار انرژی شرکت می‌کند و خدمات رزرو چرخان و توان راکتیو را برای بهره‌بردار سیستم انتقال فراهم می‌آورد. مسئله پیشنهاددهی نیروگاه مجازی یک بهینه‌سازی غیرمحدبِ غیرخطیِ آمیخته با عددصحیح می‌باشد که با استفاده از برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عددصحیح (MINLP)[2] حل شده است.

کلمات کلیدی: نیروگاه مجازی، راهبرد پیشنهاددهی، رزرو چرخان، توان راکتیو، برنامه ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۷/۲۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۳/۸/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهرداد ستایش‌نظر

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – حکیمیه – دانشگاه شهید بهشتی –پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور- دانشکده‌ی مهندسی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

۱- مقدمه

امروزه جامعه جهانی برای بهبود بازدهی انرژی، بسمت استفاده از منابع انرژی پراکنده (DER)[۳] شامل تولیدات پراکنده (DG)[۴] و ذخیره‌سازهای انرژی (ESS)[۵] و همچنین اجرای برنامه های پاسخ بار (DR)[۶] رفته است. به همین علت سیاست ها و قوانین حمایتی زیادی وضع گردیده است. قوانین حمایت تولیدات پراکنده کنترل‌پذیر (DDG)[۷]، تولیدات پراکنده تجدیدپذیر (RDG)[۸]، تولیدات همزمان برق و حرارت (CHP)[۹] کوچک در داخل [۲-۱] یا خارج از کشور[۳] عامل شتاب دهنده به رشد DERها می‌باشند.

با گسترش ایده نیروگاه مجازی (VPP)[۱۰] تعاریف مختلفی از نیروگاه مجازی صورت گرفت [۵,۴] و روش های مختلف تجمیع DERها برای ارائه خدمات به شبکه‌های انتقال و توزیع در [۶] ارائه شد. نیروگاه مجازی بواسطه تجمیع DERهای خود می‌تواند خدمات انرژی و جانبی مورد نیاز بهره‌بردار سیستم توزیع (DSO)[۱۱] و بهره‌بردار سیستم انتقال (TSO)[۱۲] را، جهت بهره‌برداری امن و قابل اطمینان شبکه‌های توزیع و انتقال، فراهم کند [۸,۷]. این خدمات در نقطه اتصال مشترک (PCC)[۱۳] شبکه‌های توزیع برای DSO و در نقطه تغذیه شبکه (GSP)[۱۴] انتقال برای TSO فراهم می‌شود.

در[۸] VPP امکان تامین بخشی از تقاضای توان اکتیو مورد نیاز DSO را با استفاده از DG های موجود در شبکه توزیع، ایجاد می‌کند و امکان تامین تقاضای راکتیو شبکه توزیع در نظر گرفته نشده است. در [۹] VPP با تجمیع تعدادی بار گرمایشی کنترل پذیر، در ساعات پرباری با پیشنهاد کاهش بار به TSO و DSO تنها خدمات انرژی ارائه می‌کند.

در [۱۱,۱۰] نویسنده با ارائه مدلی تعادلی[۱۵] با استفاده از تئوری بازیها به پیشنهاددهی بهینه نیروگاه مجازی متشکل از تعدادی بار قطع‌پذیر و DDG در بازار انرژی روز بعد پرداخته است. اما با توجه به وجود تعادل و همچنین مشکلات محاسباتی مدل‌های تعادلی، در [۱۲-۱۵] مدل غیر تعادلیِ[۱۶] درمدار قرار دادنِ قیمت بنیان واحدها (PBUC) برای مساله تصمیم‌گیری نیروگاه مجازی جهت حضور در بازارهای برق مورد بررسی قرار گرفته است.

PBUC یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای پیشنهاددهی در چند بازار همزمان از جمله انرژی و خدمات جانبی معرفی شده است [۱۴,۱۵]. بنابراین در [۱۴,۱۵] پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در یک بازار همزمان انرژی و خدمت جانبیِ رزرو چرخان بر اساس مدلِ غیرتعادلیِ SCPBUC که قیود تعادل عرضه- تقاضا و امنیت داخلی نیروگاه مجازی را به حساب می‌آورد، ارائه شده است.

با بررسی ادبیات موضوعی، مدلی برای ارائه همزمان انرژی، رزرو چرخان و توان راکتیو ارائه نشده است. با توجه به ماهیت محلی تامین توان راکتیو، نیروگاه مجازی علاوه بر حضور در بازار انرژی و خدمت جانبی رزرو چرخان که در [۱۴,۱۵] ارائه شده است، می‌تواند با حضور در بازار توان راکتیو و تامین تقاضای راکتیو شبکه توزیع، سود قابل ملاحظه‌ای کسب نماید. همچنین در مقالات اخیر مدل فنی و اقتصادی مناسب DERها برای ارائه خدمات انرژی، رزرو چرخان و توان راکتیو به طور همزمان ارائه نشده است.

بنابراین مشارکت این مقاله در بحث نیروگاه مجازی موارد چهارگانه زیر می‌باشد:

۱. ارائه مدل غیر تعادلی مبتنی بر SCPBUC که امکان ارائه خدمات انرژی، جانبیِ رزروچرخان و توان راکتیو را به صورت همزمان برای VPP فراهم می‌آورد.
۲. ارائه مدل فنی و اقتصادی مناسب برای حضور واحدهای DER در خدمات جانبی رزروچرخان و توان راکتیو علاوه بر خدمات انرژی.
۳. ارائه مدلی مناسب برای فراهم کردن خدمت جانبیِ توان راکتیو در PCC به DSO و خدمات جانبیِ رزرو و توان راکتیو درGSP به TSO.
۴. ارائه قالب بازاری مناسب برای حضور نیروگاه مجازی در بازارهای انرژی و خدمات جانبی.

ساختار این مقاله بدین‌گونه 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 بدست آمده تشریح شده است.

۲- نیروگاه مجازی(VPP)

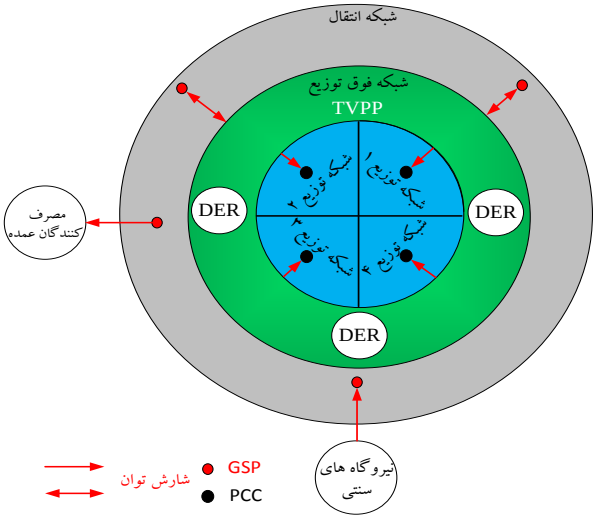
بر اساس [۶] توافق عامی بر سر تعریف نیروگاه مجازی وجود ندارد. اما *نیروگاه مجازی با تجمیع تعدادی منبع DER می تواند به عنوان یک نیروگاه بزرگ در بازارهای انرژی و خدمات جانبی شرکت کند خود را از سود حضور در بازار بهره‌مند سازد.* این تفسیر سه خصوصیت اساسی نیروگاه مجازی را بیان می کند: نیروگاهی می‌باشد مانند دیگر شرکت‌های نیروگاهی، حاصل تجمیع تعدادی DER، با امکان حضور در بازارهای برق مختلف. تعریف مذکور بر سر مسائل مهمی چالش‌هایی بوجود می‌آورد که در ادامه آنها را تشریح خواهیم کرد.

۲-۱- چگونگی تجمیع

در[۶] و [۱۶] با معرفی نیروگاه مجازی تجاری (CVPP)[۱۷] و فنی (TVPP)[۱۸] ، تجمیع تجاری و فنی VPP از هم مجزا گردیده است. CVPP امکان حضور در بازارهای مختلف را فراهم می‌آورد وقیود فنی و جغرافیایی را مورد توجه قرار نمی‌دهد ولی TVPP با در نظر گرفتن قیود فنی، بهره‌برداری بهینه و امن نیروگاه مجازی را امکان پذیر می‌کند. در شکل (۱ چگونگی تجمیع واحدهای DER در قالب نیروگاه مجازی برای ارائه خدمات در سطح شبکه توزیع و شبکه فوق‌توزیع و انتقال نشان داده شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]

بر اساس [۱۴] و [۱۵] در شبکه توزیع یکی از بهترین گزینه‌ها برای TVPP همان DSO می‌باشد، اما در این مقاله حوزه فعالیت TVPP شبکه فوق توزیع که معمولا ساختاری حلقوی دارند در نظر گرفته شده است. از نظر سلسله مراتبی این نوع جایگاه متناظر با مراکز کنترل ناحیه‌ای فوق توزیع می‌باشد. در نتیجه جایگاه TVPP بین شبکه توزیع و انتقال در نظر گرفته شده است، که طبق شکل ۱، از یکسو خدماتی را برای شبکه توزیع در نقطه اتصال شبکه توزیع (PCC) برای شبکه پایین دست خود و از سوی دیگر خدماتی را برای شبکه انتقال در نقطه تغذیه شبکه انتقال (GSP) برای شبکه بالادست خود فراهم می‌کند.



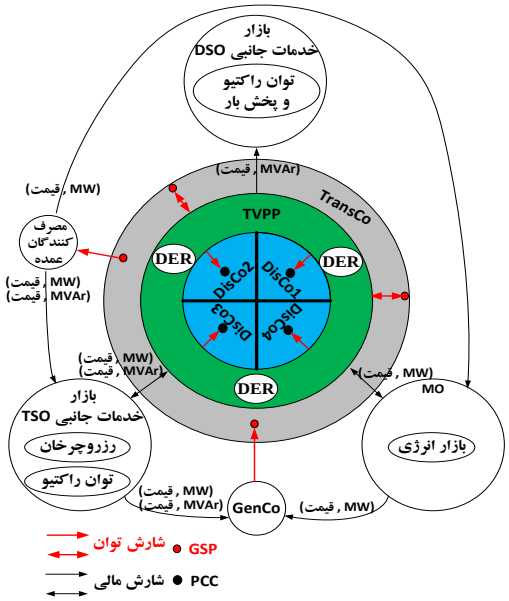
شکل (۱): تجمیع فنی DERها

۲-۲- نحوه حضور VPP در بازار برق

عناصر اصلی که در بازارهای برق مورد بحث واقع می‌شوند در [۲۰] به‌طور مفصل بحث شده‌اند. بهره‌بردار مستقل سیستم[۱۹] (ISO) وظیفه بهره برداری ایمن سیستم را بر عهده دارد. به طور کلی، دو ساختار ممکن برای ISO وجود دارد[۲۱]. اولین ساختار بهره‌بردار مستقل سیستم حداقلی[۲۰](MinISO) است. در این حالت ISO در بهره‌برداری بازار[۲۱] (MO) نقشی ندارد و تنها هدف آن بهره‌برداری امن سیستم توسط TSOها و DSOهای تحت نظارت خودش می‌باشد. ساختار دوم بهره‌بردار مستقل سیستم حداکثری[۲۲](MaxISO) می‌باشد. در این حالت ISO علاوه بر بهره‌بردار سیستم، MO نیز می‌باشد. در MaxISO شرکت کنندگان در بازار باید اطلاعات وسیعی ازجمله هزینه هر واحد تولیدی، شیب تولید، و تقاضای روزانه برای هر مشتری به ISO ارائه کنند. نیروگاه مجازی حاصل تجمیع تعدادی DER می‌باشد، برای ارائه اطلاعات تابع هزینه و قیود فنی در حالت MaxISO، ISO با حجم وسیعی از اطلاعات مواجه می‌گردد که امکان حضور نیروگاه مجازی را در بازار غیر ممکن می‌سازد. به همین علت در سایه مدل MinISO که فعالیت‌های بازاری از بهره‌برداری مجزاست، حضور نیروگاه مجازی در بازار امکان پذیر می‌باشد.

شرکت‌های تولیدکننده[۲۳] (GenCo)،شرکت‌های انتقال[۲۴] (TransCo)، شرکت‌های توزیع[۲۵] (DisCo)، خرده‌فروش[۲۶]، جمع‌کننده[۲۷] ، کارگزار[۲۸] و مشترکین از دیگر عناصر بازار می‌باشند[۲۰]. نیروگاه مجازی با کسب مجوزهای لازم می‌تواند به عنوان یک جمع‌کننده، خرده فروش و کارگزار هم در سمت مصرف و هم در سمت تولید در بازار های برق نقش ایفا نماید.

در این مقاله نیروگاه مجازی در بازاری با مدل قیمت‌گذاری یکنواخت[۲۹] شرکت خواهد کرد. تسویه بازار می تواند بر اساس پیشنهاد شرکت کنندگان[۳۰] یا نقطه تسویه بازار[۳۱] باشد [۱۸]. قالب بازار مورد نظر در شکل (۲ نشان داده شده است. با توجه به نحوه تجمیع که در بخش قبل نشان‌داده شده امکان ارائه این خدمات برای DSO و TSO وجود دارد. خدمات جانبی دودسته خدمت جانبی رزرو یا کنترل فرکانس و خدمت جانبی توان راکتیو یا کنترل ولتاژ تقسیم‌بندی شده است [۱۹-۱۷]. در این مقاله منظور از خدمات جانبی رزرو چرخان و توان راکتیو می‌باشد. VPP خدمات رزروچرخان و توان راکتیو را در GSP برای TSO و خدمت توان راکتیو را در PCC برای DSO فراهم می‌کند.



شکل (۲):قالب بازار

۳- تشریح مدل

۳-۱- مدل DERها برای ارائه خدمات انرژی و جانبی

در [۱۷] 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. در ادامه مدل اقتصادی و فنی در نظر گرفته شده آورده شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

۱-۱-۳- مدل تولیدات پراکنده

تولیدات پراکنده دامنه گسترده‌ای از فن‌آوری‌ها را در بر می‌گیرند که امکان کنترل پارامترهای خروجیشان را به آنها می دهد. DDGها امکان ارائه خدمات جانبی رزروچرخان و توان راکتیو همچنین خدمات انرژی را دارا می‌باشند.

- هزینه بهره‌برداری

بر اساس [۱۳,۱۲] هزینه های بهره‌برداری به صورت هزینه سرانه تولید[۳۲] در نظرگرفته شده است. هزینه تولید توان اکتیو به صورت تابعی خطی از هزینه آمادگی، هزینه متغیر تولید توان اکتیو و هزینه روشن/خاموش شدن واحد تولید پراکنده می‌باشد. بر اساس [۱۹] بخش دیگر هزینه بهره‌برداری متشکل از هزینه تولید توان راکتیو می‌باشد که از دو بخش تشکیل شده است: ۱) هزینه آمادگی ۲) هزینه متغیر. هزینه تولید توان راکتیو در یک سیستم قدرت بسته به نوع طراحی و تلفات در آن، می‌تواند حدود ۱٪ تا ۲۰٪ هزینه توان اکتیو باشد [۲۲]. لازم به ذکر است که بخش دیگری به عنوان هزینه فرصت از دست رفته نیز به واسطه تولید توان راکتیو بر مولد تحمیل می‌شود که در این مقاله در نظر گرفته نشده است.

$$C_{zt}^{dg}\left(P_{zt}^{dg}, R_{ztc}^{dg}, Q_{zt}^{dg}\right) = a_z^{dg}.\left(P_{zt}^{dg}+R_{ztc}^{dg}\right)+b_z^{dg}.I_{zt}^{dg} + \alpha_z^{dg}.\left|Q_{zt}^{dg}\right|+\beta_z^{dg}.I_{zt}^{dg-R} + SC_z^{dg}.J_{zt}^{dg}+SHC_z^{dg}.K_{zt}^{dg} \quad (۱)$$

در معادله (۱) ، z اندیس تولیدات پراکنده و t اندیس زمان برنامه‌ریزی می‌باشد. a_{zt}^{dg} و b_{zt}^{dg} ضرایب تابع هزینه تولید توان اکتیو که به صورت رزرو (R_{ztc}^{dg}) یا انرژی (P_{zt}^{dg}) است، می باشد. α_z^{dg} و β_z^{dg} ضرایب هزینه تولید توان راکتیو (Q_{zt}^{dg}) می باشند.

I_{zt}^{dg} متغیری باینری می باشد، هنگامی که تولیدکننده روشن باشد، یک و در غیر اینصورت صفر خواهد بود. I_{zt}^{dg-R} متغیر باینری است که در هنگام تولید یا جذب توان راکتیو یک می‌باشد و در غیر اینصورت صفر خواهد بود، باید توجه داشت که این متغیر هنگامی که واحد روشن می‌باشد (یعنی $I_{zt}^{dg}=1$) قادر به تولید یا جذب توان راکتیو می‌باشد. SC_z^{dg} هزینه مورد نیاز برای روشن کردن یا بالا آمدن[۳۳] و SHC_z^{dg} هزینه خاموش کردن[۳۴] واحد می‌باشد. J_{zt}^{dg} متغیر باینری نشان دهنده وضعیت روشن شدن واحد می باشد، این متغیر تنها هنگامی که واحد روشن می‌شود، یک و در غیر اینصورت صفر خواهد بود. همچنین K_{zt}^{dg} متغیر باینری نشان دهنده وضعیت خاموش شدن واحد می باشد، این متغیر تنها هنگامی که واحد خاموش می‌شود، یک و در غیر اینصورت صفر خواهد بود.

- قیود بهره‌برداری

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

$$P_z^{dgmin}.I_{zt}^{dg} \le P_{zt}^{dg}+R_{ztc}^{dg} \le P_z^{dgmax}.I_{zt}^{dg}, \quad \forall z, \forall t, \forall c \quad (۲)$$

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

$$Q_z^{dgmin}.I_{zt}^{dg-R} \le Q_{zt}^{dg} \le Q_z^{dgmax}.I_{zt}^{dg-R}, \forall z, \forall t \quad (۳)$$

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

قید باینری سنکرون بودن توان راکتیو :

$$I_{zt}^{dg-R} \le I_{zt}^{dg} \quad , \forall z, \forall t \quad (۴)$$

در این قید هنگامی که واحد خاموش باشد توان راکتیوی تولید نمی‌گردد ($0=0$)، هنگامی که واحد روشن باشد و توان راکتیو در بازه‌های $\left[Q_z^{dgmin}, 0\right]$ یا $\left[0, Q_z^{dgmax}\right]$ باشد ($1=1$)، در یکی از دو بخش جذب یا تزریق بهره‌برداری می‌گردد. و در صورتی که واحد توان اکتیو ارائه کند و راکتیو ارائه نکند ($1 \le 0$) می‌باشد.

قید حداکثر توان ظاهری (S_z^{dgmax}):

$$\left|Q_{zt}^{dg}\right| \le \sqrt{\left(S_z^{dgmax}\right)^2-\left(P_{zt}^{dg}+R_{ztc}^{dg}\right)^2} \quad (۵)$$
$$, \forall z, \forall t, \forall c$$

تولید توان راکتیو به میزان تولید توان اکتیو و حداکثر توان ظاهری (S_z^{dgmax}) مولد بستگی دارد که در [۱۷] توضیح داده شده است.

از دیگر قیود که می‌بایستی در بهره برداری تولیدات پراکنده کنترل پذیر در نظر گرفته شود، قیود نرخ شیب تولید توان اکتیو می باشد:

قید نرخ افزایش تولید (RU_z^{dg}):

$$\left(P_{z(t+1)}^{dg}\right)-\left(P_{zt}^{dg}\right) \ge RU_z^{dg} \quad , \forall z, \forall t \quad (۶)$$

قید نرخ کاهش تولید (RD_z^{dg}):

$$\left(P_{zt}^{dg}\right)-\left(P_{z(t+1)}^{dg}\right) \ge RD_z^{dg} \quad , \forall z, \forall t \quad (۷)$$

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

$$R_{ztc}^{dg} \le min\left\{10.MSR_z^{dg}, P_z^{dgmax}.I_{zt}^{dg}-P_{zt}^{dg}\right\} \quad (۸)$$
$$, \forall z, \forall t, \forall c$$

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

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

قیود باینری روشن/خاموش شدن واحد:

$$\left\{\begin{array}{c} I_{zt}^{dg}-I_{z(t-1)}^{dg} \le J_{zt}^{dg} \\ I_{z(t-1)}^{dg}-I_{zt}^{dg} \le K_{zt}^{dg} \\ I_{zt}^{dg}-I_{z(t-1)}^{dg} \le J_{zt}^{dg}-K_{zt}^{dg} \end{array}\right\} \quad , \forall z, \forall t \quad (۹)$$

قید حداقل زمان روشن بودن واحد[۳۵] (MUT_z):

$$\sum_{l=1}^{MUT} I_{z(t+l)}^{dg}-1 \ge MUT_z^{dg} \quad , \forall J_{zt}^{dg}=1, \forall z, \forall t \quad (۱۰)$$

قید حداقل زمان خاموش بودن واحد[۳۶] (MDT_z):

$$\sum_{l=1}^{MDT} 1-I_{z(t+l)}^{dg} \ge MDT_z^{dg}, \forall K_{zt}^{dg}=1, \forall z, \forall t \quad (۱۱)$$

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]

۲-۱-۳- مدل بارهای قطع‌پذیر

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

- هزینه قطع بار

در صورت تامین بارهای قطع‌پذیر از آنها معادل نرخ خرده فروشی هزینه‌ای دریافت می گردد و در صورت قطع بار جریمه‌ای به آنها پرداخت می‌گردد

$$C_{vt}^{int}\left(P_{vt}^{int},R_{vt}^{int}\right)=a_v^{int}.\left(P_{vt}^{int}+R_{vt}^{int}\right)+b_v^{int}.I_{vt}^{int} \qquad (۱۲)$$

در معادله (۱۲)، v اندیس بارهای قطع پذیر می‌باشد. a_v^{int} و b_v^{int} ضرایب تابع جریمه قطع بار توان اکتیو که به صورت رزرو(R_{vtc}^{int}) یا انرژی (P_{vt}^{int}) است، می باشد.

- قیود قطع بار

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

$$P_v^{intmin}\times I_{vt\gamma}^{int}\le P_{vt}^{int}+R_{vtc}^{int}\le P_v^{intmax}\times I_{vt}^{int},\forall v,\forall t,\forall c \qquad (۱۳)$$

باید توجه داشت که I_{vt}^{int} متغیر باینری نشان‌دهنده قطع بار بودن می‌باشد، یعنی بار، هنگامی که قطع شده باشد یک و در صورت تامین صفر می باشد.

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

$$Q_{vt}^{int}=\left(P_{vt}^{int}\right).\sqrt{\frac{1}{cos\varphi_v^{int}}-1}\ ,\forall v,\forall t \qquad (۱۴)$$

با توجه به اینکه معمولا در کنار مصرف‌کنندگان صنعتی در سطح فوق توزیع جبران‌کنندگان 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 با توجه به ضریب قدرت بار توان راکتیو نیز قطع خواهد شد. با توجه به زمان برنامه ریزی که به صورت ساعتی می‌باشد، می‌توان ضریب قدرت قطع بار را به صورت میانگین ساعتی در هر ساعت در نظر گرفت.

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

$$\sum_t I_{vt}^{int}\le H_v^{intmax}\qquad ,\forall v \qquad (۱۵)$$

۳-۱-۳- مدل ذخیره‌ساز

ذخیره‌ساز انرژی از نوع ذخیره‌سازهای شیمیایی به همراه یک مبدل الکترونیک قدرت می باشد که امکان کنترل توان اکتیو و حضور در بازار را در خروجی فراهم می‌آورد، مدلی که در این مقاله برای ذخیره‌ساز در نظر گرفته شده است، بر اساس مدل مرجع [۲۳] می‌باشد.

- هزینه بهره‌برداری

ذخیره‌سازعلاوه بر هزینه سرمایه‌گذاری که دربازه زمانی طول عمر آن سرشکن می شود، نیاز به تعمیرات و نگهداری دارد.

$$C_{gt}^{str}\left(P_{gt}^{str},I_{gt}^{str}\right)=\alpha_g^{str}\left|P_{gt}^{str}\right|+\beta_g^{str}.I_{gt}^{str} \qquad (۱۶)$$

در معادله (۱۶)، g اندیس ذخیره‌سازهای انرژی می‌باشد. P_{gt}^{str} مقدار انرژی ذخیره‌سازی شده می‌باشد که درصورت شارژ، مثبت و در حالت دشارژ منفی می‌باشد. هزینه های ذخیره ساز به صورت هزینه متغیر α_g^{str} به ازای مقدار انرژی شارژ یا دشارژ و هزینه ثابت β_g^{str} به ازای وضعیت شارژ یا دشارژ شدن می باشد. در ساعاتی که ذخیره‌ساز شارژ یا دشارژ می‌شود I_{gt}^{str} مقدار یک و در غیر اینصورت صفر می‌باشد.

- قیود بهره‌برداری

قید حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی (P_g^{strmax})

$$\sum_{k=1}^{t}P_{gk}^{str}\le P_g^{strmax}\qquad ,\forall g,\forall t \qquad (۱۷)$$

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

$$P_{g(t=1)}^{str}=P_g^{initial}\qquad ,\forall g,\forall t \qquad (۱۸)$$

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

$$\sum_{k=1}^{t}P_{gk}^{str}\ge DOD_g^{str}\qquad ,\forall g,\forall t \qquad (۱۹)$$

قید شیب شارژ و دشارژ (R_g^{str})

$$\left|P_{gt}^{str}\right|\le R_g^{str}.I_{gt}^{str}\qquad ,\forall g,\forall t \qquad (۲۰)$$

۲-۳- راهبرد پیشنهاد دهی VPP



شکل (۳):مدل پیشنهاد دهی نیروگاه مجازی

به منظور روشن شدن استراتژی پیشنهاددهی نیروگاه مجازی ابتدا در ادامه مبادلات مالی در بازاری که در بخش ۲-۲ معرفی شد بررسی می‌گردد و سپس مدل ارائه شده تشریح می‌شود. براساس [۱۴] در بازار رزرو چرخان معمولا دو دسته پرداخت صورت می‌گیرد: ۱) پرداخت بابت آمادگی به میزان ظرفیت (مگاوات) برنده شده. ۲) پرداخت بابت انرژی (مگاوات ساعت) فراخوانی شده توسط بهره‌بردار سیستم در زمان واقعی به نیروگاه. همچنین براساس [۱۹] و [۲۲] در بازار توان راکتیو نیز دو نوع پرداخت صورت می‌گیرد: ۱) پرداخت بابت تولید توان راکتیو (به صورت دو بخش آمادگی و هزینه متغیر) در محدوده‌ای که تولید توان راکتیو منجر به کاهش تولید در توان اکتیو مولد نمی‌گردد

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

(عدم ایجاد فرصت از دست رفته). ۲) پرداخت بابت فرصت از دست رفته در محدوده‌ای که تولید توان راکتیو منجر به کاهش تولید در توان اکتیو مولد می‌گردد (ایجاد فرصت از دست رفته برای مولد). در این مقاله، بمانند[۱۴]، مقدار درآمد ناشی از انرژی فراخوانی شده رزرو چرخان و فرصت از دست رفته تولید توان راکتیو به علت عدم توانایی VPP در پیش‌بینی وضعیت تسویه بازار، لحاظ نمی‌گردد. بنابراین باید توجه کرد که نیروگاه مجازی حداقل سود مورد انتظار از این بازارها را حداکثر می‌نماید.

در شکل مدل پیشنهاددهی نیروگاه مجازی ارائه شده است. نیروگاه مجازی برای پیشنهاددهی به بازار انرژی و خدمات جانبی و همچنین اطمینان از برنامه ریزی امن و پایا، با در نظر گرفتن پیشامد فراخوانی رزرو و قید تعادل عرضه-تقاضا و همچنین قیود شبکه داخلی خود یک SCPBUC اجرا می‌کند. نیروگاه مجازی پیشنهادی شامل سه زوج قیمتی و توان برای تبادل در بازارهای انرژی، رزرو و توان راکتیو به وسیله پیش بینی قیمت آن بازارها می دهد و سپس DGها، وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها و گزینه های قطع بار و کلیدزنی بانک خازنی را بر اساس قیمت پیش‌بینی شده با در نظر گرفتن جنبه های فنی و اقتصادی برنامه‌ریزی می‌کند. تابع هدف مسئله پیشنهاددهی، حداکثر سازی سود VPP (درآمد منهای هزینه) و همچنین فروش برق به مصرف کنندگان می‌باشد.

نیروگاه مجازی می بایستی با فراخوانی شدن یا نشدن رزرو چرخان اجزا تحت پوشش خود را به صورت ایمن و پایدار بهره‌برداری کند، به عبارت دیگر باید در صورت فراخوانی نشدن رزرو هم بتواند قیود خود را برقرار کند. به همین علت پیشامدی مبنی بر عدم فراخوانی شدن رزروچرخان در مسئله پیشنهاددهی در بازار انرژی و خدمات جانبی لحاظ شده است. c اندیس این پیشامد می‌باشد که مجموعه‌ای دو عضوی است ($c \in \{0,1\}$). صفر متناظر با وقوع این پیشامد است که بمعنای فراخوانی نشدن رزرو چرخان می‌باشد. یک متناظر با عدم وقوع این پیشامد است که بمعنای فراخوانی شدن رزرو چرخان می‌باشد. بنابراین قیود مرتبط با رخداد پیشامد یکبار با فراخوانی و یکبار بدون فراخوانی شدن رزروچرخان در نظر گرفته می‌شوند و در برنامه ریزی مسئله در نظر گرفته می‌شوند. این روش مدل کردن رخداد پیشامد و برنامه‌ریزی در سیستم قدرت به طور مفصل در [۲۴] توضیح داده شده است. در ادامه فرمولبندی مسئله توضیح داده خواهد شد:

$$\text{حداکثرسازی سود} = \sum_t \left\{ \sum_{(n\in\Psi^{GSP})} \lambda_{nt}^E \times P_{nt}^E + \sum_{(n\in\Psi^{GSP})} \lambda_{nt}^R \times Q_{nt}^R + \sum_{(n\in\Psi^{GSP})} \lambda_{nt}^{SR} \times R_{ntc}^{SR} + \sum_w \rho_t^{active} \times P_{wt}^D + \sum_w \rho_t^{reactive} \times Q_{wt}^D - \sum_z C_{zt}^{dg}\left(P_{zt}^{dg}, R_{ztc}^{dg} Q_{zt}^{dg}\right) - \sum_v C_{vt}^{int}\left(P_{vt}^{int}, R_{vtc}^{int}, Q_{vt}^{int}\right) - \sum_g C_{gt}^{str}\left(P_{gt}^{str}, I_{gt}^{str}\right) \right\} \quad ,\forall c = 1 \tag{۲۱}$$

$$\sum_z \left[P_z^{dgmax}.I_{zt}^{dg} - \left(P_{zt}^{dg} + R_{ztc}^{dg}\right)\right] + \sum_v \left[P_v^{intmax} - \left(P_{vt}^{int} + R_{vtc}^{int}\right)\right] + \eta_g^{str}.\sum_g \left[P_g^{initial} + \sum_{k=1}^{t} P_{gk}^{str}\right] - \sum_{(n\in\Psi^{GSP})} \left[P_{nt}^E + R_{ntc}^{SR}\right] \geq AR^A \,, \forall c \,, \forall t \tag{۲۲}$$

$$\sum_z \left[Q_z^{dgmax}.I_{zt}^{dg-R} - \left(Q_{zt}^{dg}\right)\right] + \sum_v \left[\left(Q_v^{intmax}\right) - \left(Q_{vt}^{int}\right)\right] - \sum_{(n\in\Psi^{GSP})} Q_{nt}^R \geq AR^R \quad ,\forall t \tag{۲۳}$$

$$\begin{Bmatrix} R_{vtc}^{int} = 0 & \forall v \\ R_{ztc}^{dg} = 0 & \forall z \\ R_{itc}^{SR} = 0 & \forall i \end{Bmatrix} \qquad \forall c = 0, \forall t \tag{۲۴}$$

$$\begin{cases} \sum_{z\in\Psi^{vpp}} \left(P_{zt}^{dg} + R_{ztc}^{dg}\right) - \sum_{n\in\Psi^{GSP}} \left(P_{nt}^E + R_{ntc}^{SR}\right) - \sum_{g\in\Psi^{vpp}} \eta_g^{str}.P_{gt}^{str} - \sum_{w\in\Psi^{vpp}} P_{wt}^D \\ + \sum_{v\in\Psi^{vpp}} \left(P_{vt}^{int} + R_{vtc}^{int}\right) - \sum_{m\in\Phi_n^{vpp}} |V_{ntc}|.|V_{mtc}|.|Y_{nm}|.cos\left(\theta_{nm}^{vpp} - \delta_{ntc}^{vpp} + \delta_{mtc}^{vpp}\right) = 0, \end{cases} \quad \forall n \in \Psi^{vpp}, \forall c, \forall t \tag{۲۵}$$

$$\begin{cases} \sum_{z\in\Psi_n^{vpp}} \left(Q_{zt}^{dg}\right) - \sum_{n\in\Psi^{GSP}} Q_{nt}^R - \sum_{w\in\Psi_n^{vpp}} Q_{wt}^D + \sum_{v\in\Psi_n^{vpp}} \left(Q_{vt}^{int}\right) \\ + \sum_{m\in\Phi_n^{vpp}} |V_{ntc}|.|V_{mtc}|.|Y_{nm}|.sin\left(\theta_{nm}^{vpp} - \delta_{ntc}^{vpp} + \delta_{mtc}^{vpp}\right) = 0, \end{cases} \quad \forall n \in \Psi^{vpp}, \forall c, \forall t \tag{۲۶}$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]

- تابع هدف:

در (۲۱) تابع هدف نشان‌داده شده است. λ_{nt}^{E} ، λ_{nt}^{R} و λ_{nt}^{SR} به ترتیب قیمت‌های پیش‌بینی شده بازارهای انرژی، راکتیو و رزرو برای TSO می‌باشد. همچنین ρ_t^{active} و $\rho_t^{reactive}$ قیمت تامین تقاضای اکتیو وراکتیو DSO می باشد. n و m اندیس باس‌های نیروگاه مجازی می‌باشد. Ψ^{vpp} مجموعه کلیه باس‌های نیروگاه مجازی و Ψ^{GSP} مجموعه‌ای از باسهای نیروگاه مجازی است که GSP می‌باشد، بنابراین Ψ^{GSP} زیر مجموعه Ψ^{vpp} است. $n \in \Psi^{GSP}$ به معنی باس‌های نیروگاه مجازی است که به شبکه خدمات توان اکتیو (P_{nt}^{E})، رزروچرخان (R_{ntc}^{SR}) و توان راکتیو (Q_{nt}^{R}) ارائه می‌کند و بعبارت دیگرGSP می‌باشند. در تابع هدف فرض شده است که رزرو فراخوانی شده است. برنامه ریزی اولیه به ازای $c = 1$ یعنی بر اساس فراخوانی شدن رزرو صورت می‌گیرد، بنابراین $R_{it(c=1)}^{SR}$ مقدار رزرو چرخانی است که نیروگاه مجازی در بازار رزرو چرخان برنده شده ، $R_{zt(c=1)}^{dg}$ مقدار رزروچرخان تولید شده توسط DG و $R_{vt(c=1)}^{int}$ رزرو چرخان ناشی از قطع بار می‌باشد.

- قیود:
- قیود واحدهای DER: (۲) - (۱۱) مربوط به تولیدات پراکنده ، (۱۳)-(۱۵) مربوط به بارهای قطع‌پذیر و (۱۷)-(۲۰) مربوط به ذخیره‌ساز انرژی
- قیدکفایت نیروگاه مجازی و الزام ذخیره

نیروگاه مجازی به دنبال اطمینان از اینکه مقدار تولیدات پراکنده، ظرفیت ذخیره ساز الکترو شیمیایی، بار قطع پذیر، و ظرفیت خریداری شده از شبکه اصلی برای در نظر گرفتن حدرزرو داخلی و خارجی در هر ساعت کافی باشد قیود (۲۲) و (۲۳) را برای کفایت نیروگاه مجازی و الزام ذخیره درنظر می‌گیرد. اما از سویی دیگر با وقوع پیشامد عدم فراخوانی رزرو در قید (۲۴)، نیروگاه مجازی میزان رزروی تولید نخواهد کرد.

- قیود پخش بار AC:

معادله (۲۵) تعادل توان اکتیو در هر باس می باشد. $z \in \Psi^{vpp}$ به معنی واحدهای تولید پراکنده z است که به باس n نیروگاه مجازی متصل هستند. w اندیس بارهای ثابت داخل شبکه نیروگاه مجازی می‌باشد که میزان بار اکتیو پیش بینی شده‌ای معادل P_{wt}^{D} دارد.

ذخیره ساز انرژی در زمان شارژ و دشارژ دارای راندمان η_g^{str} است که بخشی از انرژی ورودی ذخیره ساز صرف تلفات و تبدیل انرژی خواهد شد. همچنین Y_{nm} و θ_{nm}^{vpp} اندازه و زاویه ماتریس ادمیتانس شبکه و V_{ntc} و δ_{ntc}^{vpp} متغیر ولتاژ و زاویه باس n در زمان برنامه‌ریزی t و پیشامد c می‌باشد. لازم به ذکر است که ϕ_n^{vpp} مجموعه باس‌های نیروگاه مجازی به جز باس nام می باشد.

معادله (۲۶) تعادل توان راکتیو در هر باس می‌باشد. همچنین Q_{wt}^{D} میزان تقاضای پیش‌بینی شده بار راکتیو ثابت است.

- قیود امنیت استاتیکی VPP:

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

$$\sqrt{P_{nmct}^{vpp\ 2} + Q_{nmtc}^{vpp\ 2}} \le F_{nm}^{vpp} \quad (۲۷)$$
$$, \forall n \in \phi_m^{vpp}, \forall m \in \phi_n^{vpp}, \forall t, \forall c$$

P_{nmtc}^{vpp} و Q_{nmtc}^{vpp} توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط n به m می‌باشد و از روابط پخش بار قابل محاسبه است، که تابعی از ماتریس ادمیتانس شبکه، ولتاژ و زاویه باسهای n و m در زمان t و پیشامد c می‌باشد.

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

$$V_n^{min} \le \left|V_{ntc}^{vpp}\right| \le V_n^{max}, \forall n \in \Psi_n^{vpp}, \forall c, \forall t \quad (۲۸)$$

قید محدودیت زاویه باس

$$-\pi \le \delta_{ntc}^{vpp} \le \pi \quad , \forall n \in \Psi^{vpp}, \forall c, \forall t \quad (۲۹)$$

- قید حداکثر توان ظاهری تبادلی با شبکه بالادست ($F^{max-upstream}$)

$$\sqrt{(P_{nt}^{E} + R_{ntc}^{SR})^2 + Q_{it}^{R\ 2}} \le F^{max-upstream}, \quad (۳۰)$$
$$\forall n \in \Psi^{GSP}, \forall c, \forall t$$

۳-۳- حل مسئله

مدل ارائه شده، مسئله‌ای بهینه‌سازی غیر محدبِ غیرخطیِ توأم با اعداد صحیح است. برای حل این مسئله از برنامه GAMS/DICOPT استفاده شده است[۲۵]. DICOPT بر اساس یک الگوریتم ابتکاری، با تقسیم مسئله MINLP به دو زیر برنامه غیر خطی و خطی آمیخته با عدد صحیح، برای حل اینگونه مسائل بسیار کارا و مناسب می‌باشد.

۴- مطالعات عددی

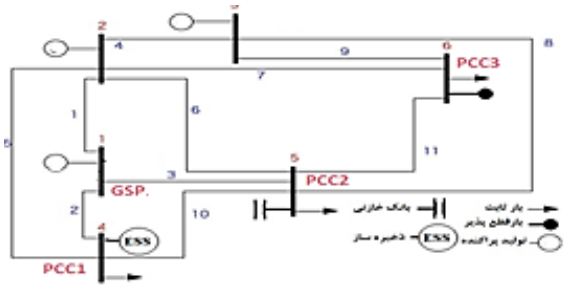
به منظور بررسی و تایید مدل ارائه شده، این مدل بر روی سیستم شکل(۱-آ) مورد آزمایش قرار گرفته است.

اطلاعات این سیستم در[۲۶] و ضمایم آورده شده است. همچنین با هدف مقایسه و بررسی مدل ارائه شده ابتدا فرض می‌شود که نیروگاه مجازی تنها قادر به ارائه انرژی و رزروچرخان می‌باشد (نیروگاه مجازی خدمت توان راکتیو ارائه نمی‌کند و نیاز توان راکتیو خود را تنها به عنوان مصرف‌کننده از شبکه انتقال تامین می‌کند؛ بمانند [۱۵,۱۴])، سپس در بخش بعد نیروگاه مجازی با ارائه انرژی، رزرو چرخان و توان راکتیو در به DSO و TSO خدمات ارائه می‌کند.

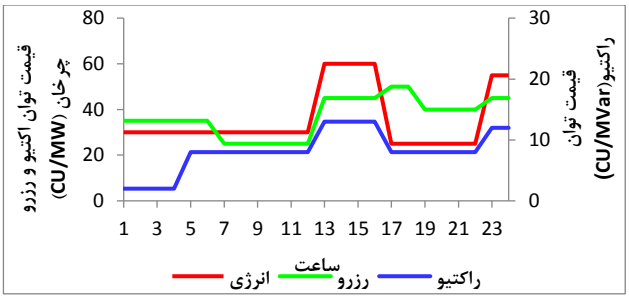
در انتها نیز آنالیز حساسیتی به قیمت‌های بازارهای انرژی، رزرو چرخان و توان راکتیو صورت گرفته است تا اثر تغییرات قیمت بر سود نیروگاه مجازی بررسی گردد.نیروگاه مجازی تنها در GSP به TSO و در PCC1،PCC2 و PCC3 به DSOها خدمات می‌دهد. به منظور ایجاد حالات مختلف از جمله وارونگی قیمت انرژی و رزروچرخان قیمت‌های پیش بینی شده بازارهای توان اکتیو، رزرو چرخان و راکتیو طبق شکل(۱-ب) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که دامنه تغییرات قیمت‌ها بر اساس [۱۵] و [۲۲] می‌باشد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

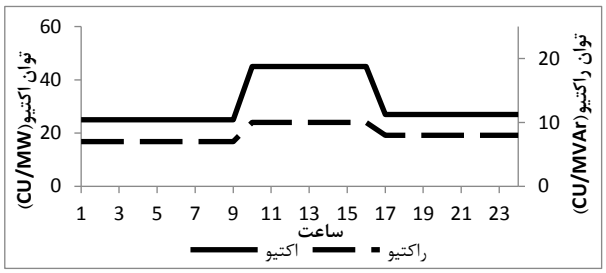
لازم به ذکر است که (CU)[۳۷] نشان‌دهنده واحدپول می‌باشد. قیمت تامین تقاضای DSO و بار قطع پذیر و همچنین میزان تقاضا، به ترتیب در اشکال (۱-پ) و (۱-ت) نشان داده شده‌اند.



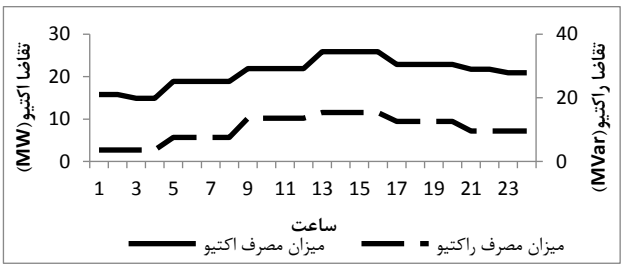
(آ)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل (۱): اطلاعات سیستم مورد مطالعه. (آ) دیاگرام تک خطی (ب) قیمت‌های بازار انرژی، رزرو چرخان و راکتیو، (پ) قیمت‌های خرده فروشی اکتیو و راکتیو (ت) تقاضای تجمعی اکتیو و راکتیو

۱-۴- بدون در نظر گرفتن ارائه خدمت توان راکتیو VPP

در این حالت فرض می‌شود VPP تمام نیاز خود را از طریق شبکه‌ی بالادست تامین می‌کند.

در اشکال (۲-آ) و (۲-ب) تولید DGها در بازار انرژی و رزرو چرخان به تفکیک نشان داده شده است. در ساعات ۱-۶ قیمت بازار رزرو (۳۵CU/MW) از قیمت بازار انرژی (۳۰CU/MW) بالاتر می‌باشد و همچنین قیمت این دو بازار از هزینه متغیر تولید DG2 و DG3 (CU/MW =$۲۰a_z^{dg}$) بالاتر می‌باشد. بنابراین این دو واحد حداکثر مقدار توان اکتیو خود را ابتدا در بازار رزرو ارائه می‌کنند و باقی‌مانده توان خود را در بازار انرژی ارائه می‌کنند. در ساعات ۷-۱۲ قیمت بازار رزرو افت‌میکند، بنابراین DG2 و DG3 حداکثر توان خود را در بازار انرژی ارائه می‌کنند. در ساعات ۱۳-۱۶ هزینه متغیر تولیدDG1 (یعنی CU/MW =$۳۵a_z^{dg}$) از قیمت بازار انرژی (۶۰CU/MW) کمتر می‌باشد، در نتیجه این واحد نیز در این ساعات حداکثر ظرفیت خود را در بازار انرژی ارائه می‌کند.

در ساعات ۱۷-۲۲ با افت قیمت انرژی، قیمت بازار رزرو از هزینه متغیر تولید هر سه DG بالاترمی‌رود. اما هزینه متغیر تولید DG1 بیشتر، و هزینه متغیر تولید DG2 وDG3 کمتر از قیمت بازار انرژی می‌باشد. بنابراین DG2 و DG3 حداکثر توان قابل ارائه خود را به بازار رزروچرخان و باقی‌مانده ظرفیت خود را به بازار انرژی تخصیص می‌دهند. اما در این ساعات، قیمت بازار رزروچرخان به‌حدی بالاتر از بازار انرژی است که DG1 حداقل ظرفیت خود را (۱مگاوات) در بازار انرژی تولید می‌کند تا حداکثر میزان ظرفیت قابل ارائه (۱/۵ مگاوات) خود را به بازار رزروچرخان تخصیص دهد. در این ساعات هزینه متغیر تولید ۱ مگاوات انرژی و ۱/۵ مگاوات رزرو چرخان ۵۲۵ واحد پول است. بعلاوه درآمد ناشی از فروش ۱ مگاوات انرژی در این ۶ ساعت، ۱۵۰ واحدپول و درآمد فروش ۱/۵ مگاوات رزرو، ۳۹۰ واحد پول می‌باشد. بنابراین با ارائه حداقل ظرفیت تولید در بازار انرژی و حداکثر ظرفیت قابل تولید در بازار رزرو چرخان، سود VPP، به میزان ۱۵CU افزایش می‌یابد. در ساعات ۲۳-۲۴ قیمت بازار انرژی از قیمت بازار رزرو چرخان و همچنین هزینه متغیر تولید هر سه DG بالاترمی‌رود. بنابراین هر سه DG حداکثر ظرفیت خود را در بازار انرژی ارائه خواهند کرد.

در شکل (۲-پ) قطع بار برای ارائه در بازار همزمان انرژی و خدمات جانبی با توجه به قیمت این بازارها نشان داده شده است. بار قطع پذیر ۶ ساعت در طول شبانه روز امکان قطع شدن را دارد. در ساعات ۱۵-۱۶ و ۲۳-۲۴ قیمت خرده فروشی انرژی اکتیو و راکتیو از قیمت بازار انرژی و راکتیو کمتر می‌باشد 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 خرده فروشی اکتیو نیروگاه مجازی مبادرت به قطع بار در این دو ساعت می‌نماید.

در شکل (۲-ت) مقدار انرژی ذخیره‌سازی شده نشان‌داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود ذخیره‌ساز در ساعات ۳-۴ با قیمت انرژی پایین شارژ می‌شود و در ساعات ۱۵-۱۶ این انرژی را با بالا رفتن قیمت انرژی دشارژ می نماید. ذخیره ساز به همین ترتیب در ساعات ۲۱-۲۲ شارژ و در ساعات ۲۳-۲۴ دشارژ می‌شود. باید توجه داشت که

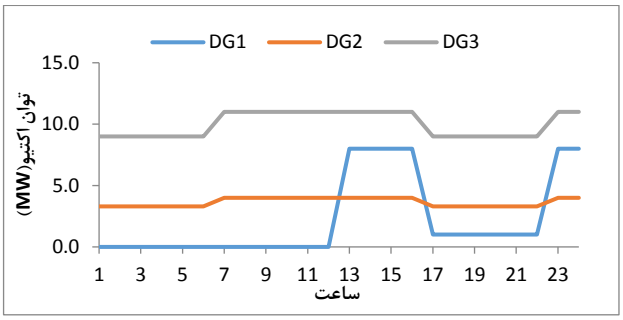
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]

ذخیره ساز به واسطه نرخ شیب شارژ و دشارژ دو ساعت زمان برای اینکه حداکثر انرژی را ذخیره‌سازی نماید نیاز دارد. همچنین به علت وجود قید حداقل میزان شارژ در تمام طول دوره ۲۴ ساعته، شارژ ذخیره سازی شده از ۰/۱MWh کمتر نشده است.

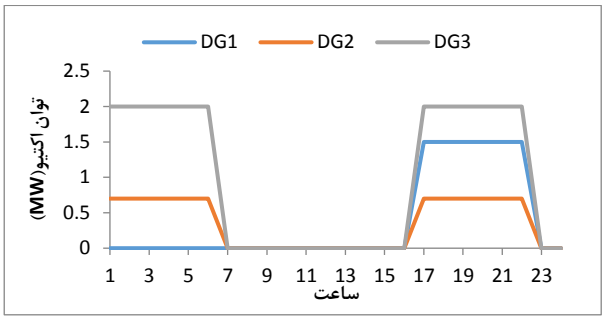
در شکل (۲-ث) پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان همچنین تعادل عرضه-تقاضای اکتیو در نیروگاه مجازی نشان‌داده شده است. منحنی تولید توان اکتیو شامل مجموع تولید DGها، قطع بار صورت گرفته، دشارژ ذخیره ساز می‌باشد.

توان تبادلی مثبت، واردات توان و منفی نشان‌دهنده صادرات توان به شبکه بالادست می‌باشد. اختلاف بین منحنی توان تبادلی با شبکه بالادست در بازار انرژی و منحنی مجموع توان تبادلی با بازار انرژی و رزرو چرخان، میزان رزروچرخان را نشان می‌دهد. در ساعات ۱-۶ و ۲۲-۱۷ که قیمت بازار رزرو بیشتر از بازار انرژی می‌باشد، بار داخلی خود را از بازار انرژی تامین می‌کند و مازاد تولیدات داخل و قطع بار را در بازار رزرو به فروش می‌رساند تا سود بیشتری را عاید خود سازد. پیشنهاددهی در بازار انرژی و رزرو چرخان همان توان تبادلی با شبکه بالادست به صورت انرژی و رزرو با علامت منفی می‌باشد.

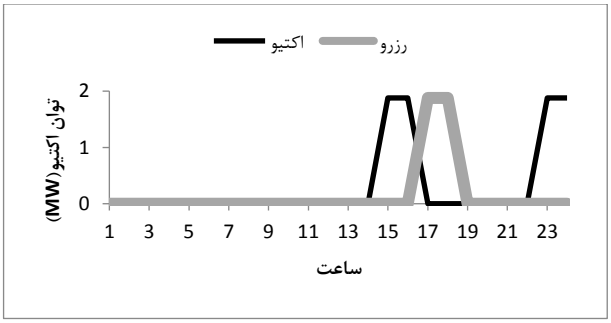
منحنی آبی خط چین حاصل جمع دو منحنیِ مجموع تولید توان اکتیو و مجموع تبادل توان با بازار انرژی و رزرو چرخان می‌باشد. اختلاف این منحنی با منحنی میزان مصرف اکتیو تلفات اکتیو نیروگاه مجازی را نشان می‌دهد.



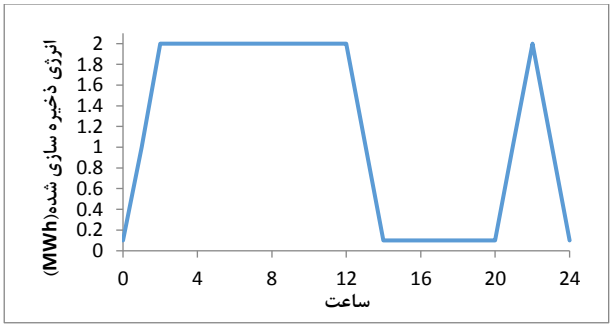
(آ)



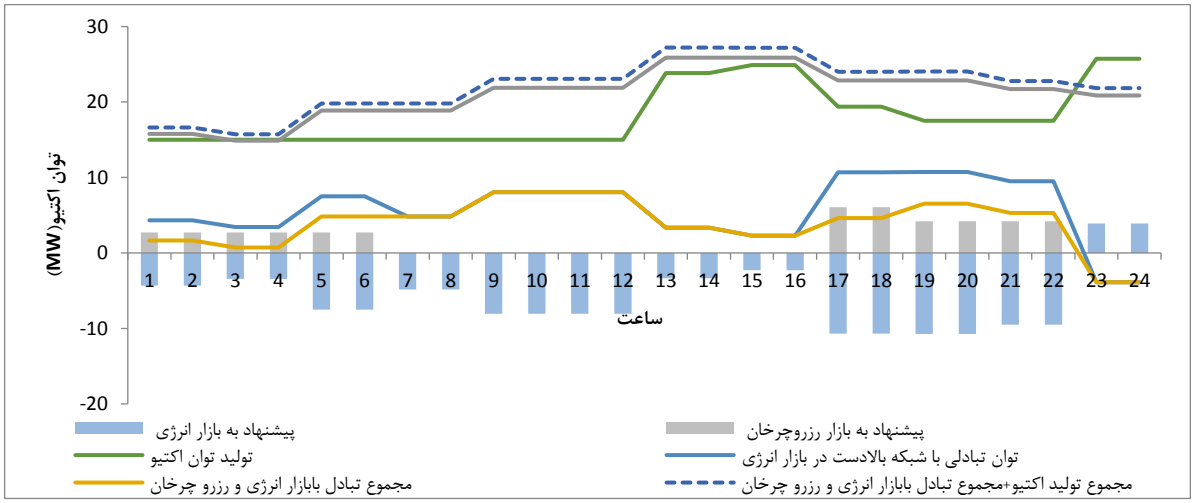
(ب)



(پ)



(ت)



(ث)

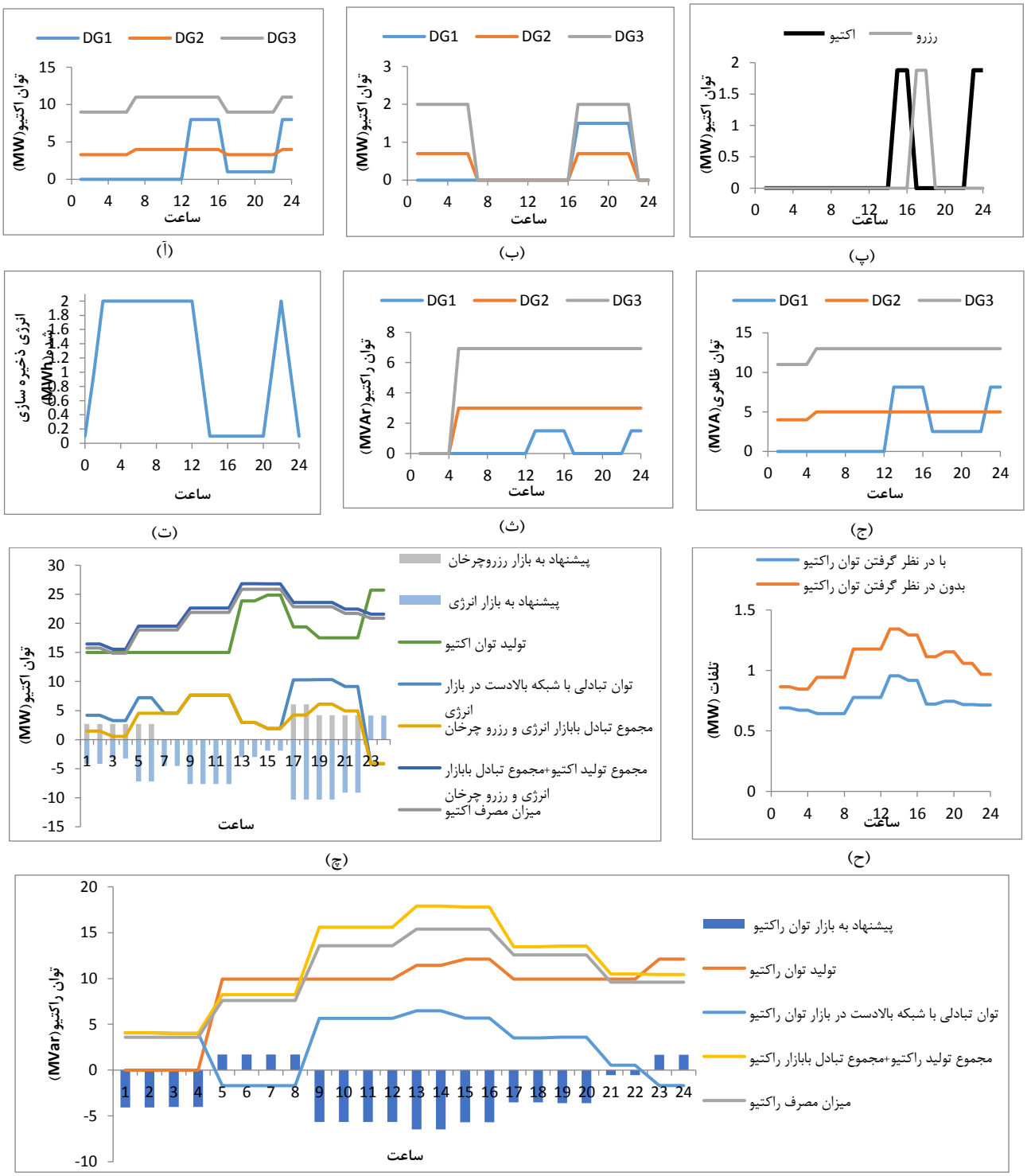
شکل (۲): برنامه ریزی نیروگاه مجازی بدون در نظر گرفتن ارائه خدمت توان راکتیو. (آ) تولید DGها در بازار انرژی، (ب) تولید DGها در بازار رزروچرخان، (پ) قطع بار در بازار انرژی و رزروچرخان، (ت) انرژی ذخیره سازی شده در ESS، (ث) پیشنهاددهی در بازار انرژی و رزرو چرخان و تعادل عرضه- تقاضای توان اکتیو

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

۲-۴- در نظر گرفتن ارائه خدمت توان راکتیو VPP

همانطور که ملاحظه می‌شود به علت اینکه قیمت توان راکتیو در مقابل توان اکتیو بسیار پایین می‌باشد، در میزان تولید اکتیو DG و قطع بار و همچنین میزان ذخیره سازی شده اثر گذار نمی‌باشد و اشکال (۳-آ) تا (۳-ت) کاملا با نتیجه بخش قبل منطبق می‌باشند.



شکل (۳): برنامه ریزی نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن ارائه خدمت توان راکتیو. (آ) تولید DGها در بازار انرژی، (ب) تولید DGها در بازار رزروچرخان، (پ) قطع بار در بازار انرژی و رزروچرخان، (ت) انرژی ذخیره سازی شده در ESS، (ث)تولید DGها در بازار راکتیو، (ج)توان ظاهری DGها، (چ) پیشنهاددهی در بازار انرژی و رزرو چرخان و تعادل عرضه- تقاضای توان اکتیو در نیروگاه مجازی، (ح) مقایسه تلفات نیروگاه مجازی با حالت بدون در نظر گرفتن ارائه خدمت توان راکتیو، (خ) پیشنهاددهی در بازار توان راکتیو و تعادل عرضه- تقاضای راکتیو در نیروگاه مجازی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]

جدول (۱): مقدار سهم خرده فروشی و شرکت در بازار همزمان انرژی و خدمات جانبی روز بعد در سود کل نیروگاه مجازی

ردیف	درآمد بازار انرژی (CU)	درآمد بازار رزروچرخان (CU)	درآمد بازار راکتیو (CU)	درآمد خرده‌فروشی اکتیو (CU)	درآمد خرده‌فروشی راکتیو (CU)	هزینه‌های بهره برداری (CU)	سودکل (CU)
۱	- ۳۹۷۰/۹۲	۱۸۴۶/۹۴	- ۱۵۸۱/۱۹	۱۵۸۹۸/۰۳	۲۸۰۳/۸۹	۱۰۰۹۶/۳۰	۴۹۰۰/۴۵
۲	- ۳۶۸۹/۳۲	۱۸۴۶/۹۴	- ۵۵۷/۷۲	۱۵۸۹۸/۰۳	۲۸۰۳/۸۹	۱۱۰۷۲/۵۵	۵۲۲۹/۲۷

در شکل (۳-ث) تولید DGها در بازار راکتیو نشان‌داده شده است. هزینه متغیر تولید توان راکتیو هر سه DG در ساعات ۱-۴ از قیمت بازار راکتیو بالاتر است، بنابراین هیچکدام از این واحدها توان راکتیوی تولید نخواهند کرد. DG2 و DG3 به ترتیب دارای محدودیت در توان ظاهری به میزان ۵MVA و ۱۳MVA دارند. در ساعات ۵-۲۴ هزینه متغیر تولید DG2 و DG3 از قیمت بازار توان راکتیو کمتر می‌باشد بنابراین در این ساعات به تولید حداکثر توان راکتیو در بازار خواهند پرداخت. اما بر اساس اشکال (۳-آ) و (۳-ب)، حداکثر تولید توان اکتیو خود را در بازار انرژی و رزروچرخان ارائه می‌کنند، بنابراین تولید توان راکتیو آنها محدود به حداکثر توان ظاهریشان که در شکل (۳-ج) نشان داده شده است، می‌گردد. یعنی به جای تولید حداکثر توان راکتیوشان (۴MVar و ۸MVar) به ترتیب (۳MVar و ۶/۹۳MVar) تولید می‌کنند. DG1 تنها در ساعات ۱۳-۱۶ و ۲۳-۲۴ که قیمت بازار توان راکتیو افزایش می‌یابد به تولید می‌پردازد. لازم به ذکر است که به علت عدم وجود محدودیت توان ظاهری برای DG1، قادر به تولید حداکثر توان راکتیو می‌باشد.

شکل (۳-چ) پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان همچنین تعادل عرضه-تقاضای اکتیو در نیروگاه مجازی نشان‌داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، تنها اختلاف شکل(۳-چ) و شکل (۲-ث) در میزان تلفات اکتیو می‌باشد که در شکل(۳-ح) مقایسه شده اند.

نهایتا در شکل (۳-خ) پیشنهاددهی نیروگاه مجازی در بازار توان راکتیو همچنین تعادل عرضه-تقاضای راکتیو در نیروگاه مجازی نشان‌داده شده است.

منحنی تولید توان راکتیو شامل مجموع تولید DGها و قطع بار صورت گرفته می‌باشد. در ساعات ۱-۴ به علت قیمت پایینِ بازار توان راکتیو میزان تولید داخلی صفر می‌باشد .در ساعات ۱۳-۱۶ و ۲۳-۲۴ با توجه به قیمت بالای بازار توان راکتیو تولید به حداکثر میزان خود می‌رسد.

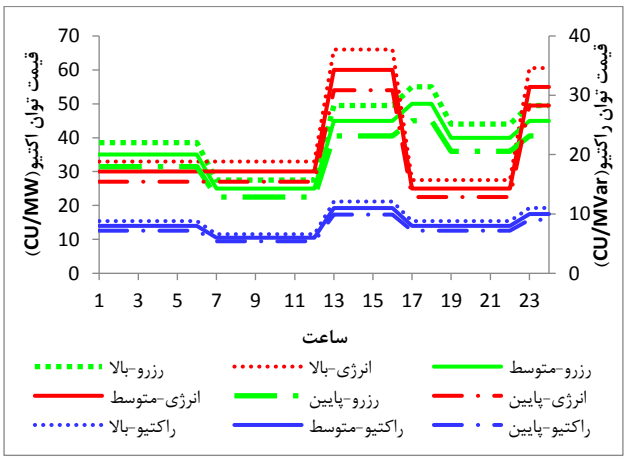
با توجه به منحنی توان تبادلی با شبکه بالادست در ساعات ۵-۸ و ۲۳-۲۴ به علت وجود ظرفیت تولید مازاد بر مصرف داخلی امکان صادرات وجود دارد. همچنین در ساعات۱-۴ و ۹-۲۲ نیروگاه مجازی وارد کننده توان راکتیو می‌باشد.

اختلاف منحنی مجموع تولید راکتیو بعلاوه مجموع تبادل با بازار(منحنی مشکی) با منحنی میزان مصرف راکتیو، تلفات راکتیو نیروگاه مجازی را نشان می‌دهد. در نهایت در این شکل میزان پیشنهاد به بازار توان راکتیو در GSP نشان‌داده شده است.

در جدول ۱مقادیر سهم درآمد از بازار انرژی، رزرو چرخان، توان راکتیو و خرده فروشی اکتیو و راکتیو، همچنین هزینه‌های بهره‌برداری و سود کل نیروگاه مجازی در دوحالت نشان‌داده شده است. حالت اول مربوط به عدم در نظر گرفتن خدمت توان راکتیو توسط VPP می‌باشد و حالت دوم مقادیر مربوط به در نظر گرفتن خدمت توان راکتیو توسط VPP را نشان می‌دهد. نیروگاه مجازی با مدیریت توان راکتیو سود بیشتری نسبت به حالتی که تمام نیاز خود را از شبکه بالادست تامین می‌کند بدست می‌آورد.

۳-۴- آنالیز حساسیت بر روی قیمت بازار

به منظور بررسی اثرات قیمت بازارها بر روی سود نیروگاه مجازی، سه سطح قیمتی بالا، متوسط و پایین در نظر گرفته شده است (شکل ۴). سطح قیمتی متوسط دقیقا برابر قیمت‌های در نظر گرفته شده در شکل (۱-ب) می‌باشد. سطوح قیمتی بالا و پایین نسبت به سطح متوسط به ترتیب ۱۰٪ بیشتر و کمتر در نظر گرفته شده است. بررسی اثر قیمت هر بازار با فرض اینکه قیمت دو بازار دیگر ثابت بماند انجام شده است.



شکل (۴): سطوح قیمتی بازار انرژی، رزرو چرخان و توان راکتیو

نتایج حاصله در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به بخش ۴-۲، نیروگاه مجازی در سطح قیمتی متوسط در اکثر اوقات در بازار انرژی، نقش خریدار را دارا می‌باشد. بنابراین با افزایش قیمت بازار انرژی سود

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

نیروگاه مجازی کاهش و با کاهش قیمت سود آن افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در بازار رزرو چرخان نقش فروشنده را داراست، با افزایش قیمت این بازار سود این نیروگاه نیز افزایش می‌یابد. نهایتا 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 با کاهش آن سود این نیروگاه افزایش می‌یابد.

جدول (۲): سود نیروگاه مجازی در سطوح قیمتی مختلف

سطح قیمتی انرژی	سطح قیمتی رزرو چرخان	سطح قیمتی توان راکتیو		
		بالا	متوسط	پایین
پایین	پایین	۶۳۱۹/۰۵	۶۳۲۱/۲۴	۶۳۲۵/۶۵
	متوسط	۶۴۷۷/۷۸	۶۴۷۹/۲۵	۶۴۰۸/۷۲
	بالا	۶۷۵۵/۹۱	۶۷۵۷/۳۸	۶۷۵۸/۸۵
متوسط	پایین	۵۲۰۲/۳۶	۵۲۰۴/۰۱	۵۲۰۵/۶۹
	متوسط	۵۲۲۸/۵۶	۵۲۲۹/۲۷	۵۲۳۰/۳۵
	بالا	۵۵۲۰/۸۷	۵۵۲۲/۵۵	۵۵۲۴/۲۳
بالا	پایین	۴۱۷۴/۱۷	۴۱۷۷/۳۸	۴۱۸۰/۸۰
	متوسط	۴۲۶۷/۷۷	۴۲۷۰/۹۸	۴۲۷۴/۴۰
	بالا	۴۴۰۳/۱۶	۴۴۰۴/۶۳	۴۴۰۶/۳۱

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی برای پیشنهاددهی نیروگاه مجازی 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 به عنوان یکی از مولفه‌های سیستم قدرت، هم در سمت مصرف و هم در سمت تولید نقش ایفا کند. به عنوان خرده‌فروش می‌تواند تقاضای اکتیو و راکتیو مورد نیاز بارهای شبکه توزیع پایین دست را تامین نماید. به عنوان یک جمع‌کننده می‌تواند با تجمیع DGها، بارهای قطع پذیر و ذخیره‌سازهای انرژی حضور این واحدها را در بازار انرژی و خدمات جانبی رزرو چرخان و راکتیو فراهم آورد. در نهایت به عنوان یک مشترک بمانند مصرف کنندگان عمده می‌تواند برای تامین 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 مصرف کننده در بازار انرژی 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 تامین محلی تقاضای راکتیو، حداقل تبادل توان راکتیو را با شبکه دارد و حتی در برخی ساعات توان راکتیو مازاد خود را به TSO برای بهره‌برداری شبکه انتقال می‌فروشد. مدیریت توان راکتیو نیروگاه مجازی سود بیشتر و تلفات کمتری را برای آن در پی خواهد داشت. همچنین در 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 است که می‌تواند به عنوان ادامه کار پیشنهاد گردد.

ضمائم

أ-علایم و اختصارات

اندیس ها:

n, m	باس
t	زمان برنامه ریزی
w	مشترکین غیر قابل قطع
v	مشترکین قطع پذیر
z	تولیدات پراکنده
g	ذخیره ساز
c	پیشامد فراخوانی یا عدم فراخوانی رزروچرخان

مجموعه ها:

Ψ^{vpp}	کلیه باس‌های نیروگاه مجازی
Ψ^{GSP}	باس‌های نیروگاه مجازی که به شبکه بالادست خدمات می‌دهد(GSP)
ϕ_n^{vpp}	باس‌های نیروگاه مجازی به جز باس nام

پارامترها و ثابت‌ها:

λ_{nt}^{E}	قیمت بازار انرژی به CU/MW
λ_{nt}^{R}	قیمت بازار توان راکتیو به CU/MVar
λ_{nt}^{SR}	قیمت بازار رزرو چرخان به CU/MW
$\rho_t^{active}, \rho_t^{reactive}$	نرخ خرده فروشی اکتیو به CU/MW و راکتیو به CU/MVar
P_{wt}^{D}, Q_{wt}^{D}	تقاضای اکتیو به MW و راکتیو به MVar بار غیر قابل قطع
$P_v^{intmax}, P_v^{intmin}$	حداکثر و حداقل میزان بار قطع پذیر 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 قطع پذیر به hr
P_g^{strmax}	ظرفیت ذخیره سازی ESS به MWhr
DOD_g^{str}	حداقل میزان ذخیره سازی شده در ESS به MWhr
$P_g^{initial}$	میزان ذخیره سازی 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

حداکثر توان ظاهری تبادلی با شبکه بالا دست به MVA	$F^{max-upstream}$
میزان ذخیره اکتیو و راکتیو داخلی جهت کفایت نیروگاه مجازی و الزام ذخیره به MW	$AR^{active}, AR^{reactive}$

متغیرها:

میزان تولید DG جهت انرژی و رزرو چرخان به MW و توان راکتیو به MVar	$P_{zt}^{dg}, R_{ztc}^{dg}, Q_{zt}^{dg}$
میزان قطع بار جهت بازار انرژی و رزرو چرخان به MW	$P_{vt}^{int}, R_{vt}^{int}$
میزان شارژ و دشارژ ذخیره ساز (مثبت به معنی شارژ و منفی به معنی دشارژ) به MWhr	P_{gt}^{str}
میزان پیشنهاد نیروگاه مجازی به بازارهای انرژی و رزرو چرخان به MW و توان راکتیو به MVar	$P_{nt}^{E}, R_{ntc}^{SR}, Q_{nt}^{R}$
دامنه و زاویه ولتاژ (پریونیت)	$\delta_{ntc}^{vpp} V_{ntc}$,
متغیر دودویی نشان دهنده حالت روشن یا خاموش بودن DG	I_{zt}^{dg}
متغیر دودویی نشان دهنده حالت روشن شدن DG	J_{zt}^{dg}
متغیر دودویی نشان دهنده حالت خاموش شدن DG	K_{zt}^{dg}
متغیر دودویی نشان دهنده قطع یا تامین بودن بار قطع پذیر	I_{vt}^{int}
متغیر دودویی نشان دهنده شارژ یا دشارژ شدن ESS	I_{gt}^{str}

ب-جداول

جدول ب-۱:اطلاعات ذخیره‌ساز انرژی

باس	a_{gt}^{str} (CU/MW)	β_{gt}^{str} (CU)	R_g^{str} (MW/hr)	P_g^{strmax} (MW)	η_g^{str} (%)
4	0.1	5	1	2	90

جدول ب-۲:اطلاعات بار قطع پذیر

باس	a_{vt}^{int} (CU/MW)	b_{vt}^{int} (CU)	$\alpha_{vt}^{int}\left(\frac{\text{CU}}{\text{MVAr}}\right)$	S_v^{intmax} (MVA)	H_v^{intmax} (hr)
6	20	5	4	2	6

جدول ب-۳:اطلاعات تابع هزینه واحدهای تولید پراکنده

باس	$a_{zt}^{dg}\left(\frac{\text{CU}}{\text{MW}}\right)$	b_{zt}^{dg} (CU)	SC_{zt}^{dg} (CU)	SHC_{zt}^{dg} (CU)	$\alpha_{zt}^{dg}\left(\frac{\text{CU}}{\text{MVAr}}\right)$	β_{zt}^{dg} (CU)
1	35	5	10	20	10	2
2	20	5	10	20	4	2
3	20	5	10	20	4	2

جدول ب-۴:اطلاعات فنی ظرفیت واحدهای تولید پراکنده

باس	P_z^{dgmax} (MW)	P_z^{dgmin} (MW)	Q_z^{dgmax} (MVAr)	Q_z^{dgmin} (MVAr)	S_z^{dgmax} (MVA)	MSR_z^{dg} (MW/min)
1	8	1	1.5	0	-	0.15
2	4	2	4	0	5	0.07
3	11	2	8	0	13	0.2

مراجع

[۱] تارنمای دفتر خصوصی سازی صنعت برق ایران، http://psp.moe.gov.ir

[۲] م. فرشاد، م.ح. جاویدی دشت بیاض، ج. ساده، "ارائه قانون تشویقی تولیدات پراکنده در سیستمی با قانون تسویه تمایزی و پیشنهاد الگوریتم جایابی و ظرفیت بهینه"، مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران- سال نهم- شماره دوم - پائیز و زمستان ۱۳۹۱

[۳] م. میردار، م.ک. شیخ‌الاسلامی، ح. سیفی، م.ا. لطیفی، "مشارکت هماهنگ نیروگاه مجازی تجاری و فنی برای شرکت در بازارهای انرژی و رزروچرخان"، مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران- سال سیزدهم- شماره اول - بهار ۱۳۹۵

[4]T.J. Hammons, "Integrating renewable energy sources into European grids", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 30, no. 8, pp. 462-475, 2008.

[5] Eko Adhi Setiawan," Concept and Controllability of Virtual Power Plant", Ph.d Dissertation, Dept. ECE, University of Kassel, 27th April 2007.

[6] S. You , "Developing Virtual Power Plant for Optimized Distributed Energy Resources Operation and Integration", PhD Thesis, Technical University of Denmark, September 2010.

[7]M.Braun, P. Strauss. "A Review on Aggregation Approaches of Controllable Distributed Energy Units in Electrical Power Systems", International Journal of Distributed Energy Resources, Vol. 4, no. 4, pp.297-319, 2008.

[8]J.A. Pecas Lopes, N. Hatziargyriou, J. Mutale, P. Djapic, N. Jenkins," Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities", Electric Power Systems Research,Vol. 77,pp. 1189–1203,2007.

[9]Roberto Caldon, Andrea Rossi Patria and Roberto 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, August 22-27, 2004.

[10]N. Ruiz, I. Cobelo, J. Oyarzabal, "A Direct Load Control Model for Virtual Power Plant Management", IEEE Transaction on power system, Vol. 24, no. 2,2009.

[11] Nezamabadi, H.; Nezamabadi, P.; Setayeshnazar, M.; Gharehpetian, G.B., "Participation of virtual power plants in energy market with optimal bidding based on Nash-SFE Equilibrium Strategy and considering interruptible load,", Proceedings of the 3rd Conference on Thermal Power Plants (CTPP), pp.1,6, 18-19,2011.

[۱۲] ح. نظام آبادی، پ. نظام آبادی،م. ستایش نظر،گ. قره پتیان، " قیمت دهی بهینه نیروگاه های مجازی با استفاده از استراتژی تعادلی نش-SFE"، بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق ایران، پژوهشگاه نیرو، آبان ۱۳۹۰.

[13]M. Peik-herfeh, H. Seifi, 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.

[14]M. Peik-herfeh, H. Seifi, M. Sheikh-El-Eslami, "Two-stage approach for optimal dispatch of distributed energy resources in distribution networks considering virtual power plant concept,", Euro. Trans. Electr. Power, doi: 10.1002/etep.1694. ,2012.

[15]E. Mashhour, S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Bidding strategy of virtual power plant for participating

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

in energy and spinning reserve markets— Part I: Problem formulation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 2, pp. 949–956, May 2011.

[16]E. Mashhour, 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.

[17]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. 1, pp. 10–16, 2007.

[18]M. Braun, "Provision of Ancillary Services by Distributed Generators ," Ph.d Dissertation, Dept. ECE,University of Kassel, 22th December 2008.

[19]N. Amjady, J. Aghaei, 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.

[20]A. Rabiee, H.A. Shayanfar, N. Amjady, "Coupled energy and reactive power market clearing considering power system security," Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 907–915, 2009.

[21]M. Shahidehpour, H. Yamin, and L. Zuyi, Market Operation in Electric Power Systems. New York: Wiley, 2002.

[22]P. Varaiya, F. Wu, "MinISO: a minimal independent system operator,", the Thirtieth Hawaii International Conference on System Sciences, Vol. 5, Pp. 602 – 607,1997.

[23] S. Hasanpour, R. Ghazi, M. H. Javidi, "A new approach for cost allocation and reactive power pricing in a deregulated environment", Electrical Engineering, Vol. 91, Pp. 27–34, 2009.

[24]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.

[25] K. W. Hedman, M. C. Ferris, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, S. Oren, "Co-Optimization of Generation Unit Commitment and Transmission Switching With N-1 Reliability", ," IEEE Trans. Power Syst., VOL. 25, NO. 2, pp. 1052–1063, MAY 2010.

[26]Generalized Algebraic Modeling Systems (GAMS). [Online]. Available: http://www.gams.com.

[27]Wood, Allen J. and Bruce F. Wollenberg. "Power Generation, Operation, and Control," New York: John Wiley & Sons, 1996, 2nd ed. ,P 104.

زیرنویس‌ها

[۱] Security Constraints Price-based Unit Commitment
[۲] Mixed Integer Nonlinear Programming
[۳] Distributed Energy Resources
[۴] Distributed Generation
[۵] Energy Storage System
[۶] Demand Response
[۷] Dispatchable Distributed Generation
[۸] Renewable Distributed Generation
[۹] Combined Heat and Power
[۱۰] Virtual Power Plant
[۱۱] Distribution System Operator
[۱۲] Transmission System Operator
[۱۳] Point of Common Coupling
[۱۴] Grid Supply Point
[۱۵] Equilibrium
[۱۶] Non-Equilibrium
[۱۷] Commercial VPP
[۱۸] Technical VPP
[۱۹] Independent System Operator
[۲۰] Minimal ISO
[۲۱] Market Operator
[۲۲] Maximal ISO
[۲۳] Generation Company
[۲۴] Transmission Company
[۲۵] Distribution Company
[۲۶] Retailer
[۲۷] Aggregator
[۲۸] Broker
[۲۹] Uniform Pricing
[۳۰] Pay as bid
[۳۱] Market clearing price
[۳۲] Levelized cost
[۳۳] Start-Up
[۳۴] Shut-Down
[۳۵] Minimum Up Time
[۳۶] Minimum Down Time
[۳۷] Currency Unit

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.12.0]