

ارائه رویکرد تسویه بازار توان راکتیو مستقل مبتنی بر شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو

الهه صحرائی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، علیرضا حسن نژاد مرزونی^۲، دانشجو کارشناسی ارشد، علیرضا ذکریازاده^۳، استادیار، مصطفی غلامی^۴، استادیار

۱-دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و فناوری مازندران- بهشهر- ایران

E.sahraie@mazust.ac.ir

۲-دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و فناوری مازندران- بهشهر- ایران

alireza.hassannejad@mazust.ac.ir

۳-دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و فناوری مازندران- بهشهر- ایران

zakaria@mazust.ac.ir

۴-دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و فناوری مازندران- بهشهر- ایران

m.gholami@mazust.ac.ir

چکیده: توان راکتیو یکی از مهم‌ترین خدمات جانبی است که کنترل آن در شبکه برای حفظ پایداری ولتاژ و قابلیت اطمینان تأمین بار ضروری است. با این حال بازار مستقل توان راکتیو اغلب با اهداف مرسوم شامل کمینه کردن هزینه‌های نهایی جبران راکتیو شبکه و بیشینه کردن سود مشارکت‌کنندگان در جبران راکتیو تسویه می‌شود. این در حالی است که در تسویه بازار توان راکتیو مستقل علاوه بر لحاظ توابع هدف مرسوم می‌توان جنبه‌های دیگری شامل سوددهی بازار، توزیع سود، تعداد مشارکت‌کنندگان و سطح رقابتی بازار را در نظر گرفت تا تقاضای مشارکت در این بازار افزایش یافته و توان راکتیو موردنیاز شبکه در محیطی رقابتی تأمین گردد. از این رو تأمین هم‌زمان مقادیر بهینه شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو متناسب با شرایط شبکه یکی از اولویت‌های بهبود شرایط جبران راکتیو در شبکه است. لذا در این مقاله یک رویکرد جدید برای تسویه بازار توان راکتیو مستقل به منظور تأمین هم‌زمان مقادیر بهینه برخی شاخص‌های کیفیت جبران توان راکتیو و اهداف مرسوم پیشنهاد شده است. رویکرد تسویه مبتنی بر شاخص پیشنهادی برای بازار توان راکتیو مستقل، در شبکه ۲۴ شین IEEE RTS با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی بهبود رقابت در جبران توان راکتیو، رشد تمایل به مشارکت بازار توان راکتیو، توزیع سود عادلانه، کاهش هزینه‌های جبران توان راکتیو شبکه و افزایش سطح سود مشارکت‌کنندگان در بازار توان راکتیو را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: خدمات جانبی، بازار توان راکتیو مستقل، سطح رقابتی بازار، توزیع عادلانه سود، شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۷/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۱/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مصطفی غلامی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و فناوری مازندران- بهشهر- ایران - m.gholami@mazust.ac.ir

| مخفف‌ها | | |
|---------|-----------------------------------------------------------|---------------|
| OZ | ناحیه فرصت | $\pi_2^{i,u}$ |
| LOC | هزینه فرصت از دست رفته | $\pi_3^{i,u}$ |
| MCP | قیمت تسویه بازار | Q_A, Q_B |
| RPCC | هزینه جبران توان راکتیو | |
| NS | مازاد خالص | |
| UPR | نرخ مشارکت تولیدکنندگان | |
| MPR | نرخ سوددهی بازار | |
| PPNR | نرخ تعداد سودکنندگان در بازار | |
| NSDR | نرخ توزیع مازاد خالص | |
| GSR | نرخ سهم تولید | |
| RWCL | ریسک کار در نزدیکی محدوده ظرفیت | |
| CRLO | نرخ پرداخت برای تولید برای فرصت از دست رفته در ناحیه فرصت | |
| NGO | تعداد تولیدکنندگان توان در ناحیه فرصت | |
| HHI | شاخص هرفیندال-هریمن | |
| i, j | شاخص شماره شین‌ها. | |

۱- مقدمه

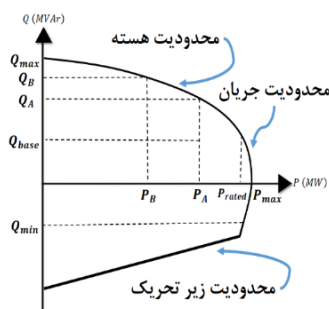
انتخاب توابع هدف مناسب برای تسویه بازار توان راکتیو با توجه به اهمیت کنترل توان راکتیو در حفظ ثبات و پایداری شبکه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نمونه‌هایی از توابع هدف تسویه بازار توان راکتیو به شرح زیر است:

کمیته کردن هزینه‌های رزرو توان اکتیو و راکتیو و به حداقل رساندن انرژی تأمین نشده ناشی از سطوح نامناسب توان راکتیو در شبکه [1]، کمیته کردن هزینه‌های جبران توان راکتیو در بازار [2]، کمیته کردن هزینه نهایی جبران توان راکتیو توسط منابع تولید پراکنده (DGs)، کمیته کردن اختلاف قرارداد معامله توان اکتیو با مقادیر واقعی معامله توان اکتیو بین سیستم توزیع و DGs، کمیته کردن تلفات اکتیو در خطوط شبکه و کمیته کردن شاخص ناهمگنی ولتاژ [3]، کمیته کردن هزینه نهایی جبران توان راکتیو و هزینه‌های انتقال انرژی به‌طور هم‌زمان با بیشینه کردن حاشیه امنیت ولتاژ و ذخیره توان راکتیو [4]، کمیته کردن هزینه نهایی جبران توان راکتیو و تلفات شبکه هم‌زمان با افزایش تأمین بار و شاخص پایداری ولتاژ [5]، کمیته کردن هزینه نهایی بازار هم‌زمان توان اکتیو - راکتیو [6]، کمیته کردن هزینه‌های بازار شامل هزینه‌های خریداری انرژی از منابع انرژی پراکنده و شرکت‌های توزیع، هزینه‌های احتمالی مربوط به انتشار آلاینده CO₂، هزینه‌های جبران توان راکتیو از طریق منابع انرژی پراکنده و شرکت‌های توزیع [7]، کمیته کردن هزینه نهایی جبران توان راکتیو و کمیته کردن هزینه پرداختی برای در دسترس بودن واحدها [8]، کمیته کردن هزینه نهایی جبران توان راکتیو و تلفات مدل شده ناشی از توان راکتیو [9,10]، کمیته کردن هزینه بازار توان راکتیو و رزرو توان راکتیو هم‌زمان با بیشینه کردن حاشیه امنیت ولتاژ [11]، کمیته کردن هزینه نهایی بازار توان اکتیو و راکتیو مستقل و بازار هم‌زمان توان اکتیو-راکتیو با در نظر گرفتن هزینه آلاینده‌های محیطی و پیاده‌سازی بازار منطقه‌ای [12]، با مروری بر توابع هدف تسویه بازار توان راکتیو، می‌توان دریافت که در اکثر مراجع بازار توان راکتیو با هدف کمیته کردن هزینه‌های بازار، کمیته کردن تلفات ناشی از انتقال توان و همین‌طور حفظ محدوده پایداری و امنیت ولتاژ تسویه شده است. این در حالی است که پارامترهایی نظیر سوددهی بازار، توزیع سود عادلانه، میزان مشارکت منابع تولیدی، پتانسیل اعمال قدرت بازار، سطح رقابتی بازار و توزیع عادلانه سهم تولید که همگی از پارامترهای

شاخص واحدهای تولیدکننده، تعداد کل شین‌های شبکه، تعداد کل واحدهای تولیدی متصل به شین i ، حداقل و حداکثر توان راکتیو در دسترس برای یک واحد تولیدی، حداقل و حداکثر توان راکتیو ارائه‌شده توسط یک واحد، تقاضای توان راکتیو در شین i ، تقاضای توان اکتیو در شین i ، نقطه‌ای در منحنی قابلیت ژنراتور سنکرون که تولید راکتیو تا آن نقطه برای حفظ تجهیزات کمکی صرف شده و جزء خدمات جانبی حساب نمی‌شود. پیشنهاد قیمت برای هزینه در دسترس بودن واحد u متصل به شین i [\\$]، پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای جذب راکتیو در ناحیه $(Q_{min}, 0)$ توسط واحد u متصل به شین i [\$/MVar - h]، پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای تولید در ناحیه (Q_{base}, Q_A) توسط واحد u متصل به شین i [\$/MVar - h]، پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای تولید در ناحیه (Q_A, Q_B) توسط واحد u متصل به شین i [\$/ (MVar - h)^2]، توان راکتیو تولید یا جذب‌شده توسط ژنراتور u متصل به شین i [Mvar]، توان راکتیو جذب‌شده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه $(Q_{min}, 0)$ ، توان راکتیو تولیدشده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه (Q_{base}, Q_A) ، توان راکتیو تولیدشده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه (Q_A, Q_B) ، متغیر باینری نشان‌دهنده تولید یا جذب واحد u متصل به شین i ، متغیرهای باینری نشان‌دهنده جذب راکتیو در ناحیه ۱ $(Q_{min}, 0)$ تولید در ناحیه ۲ (Q_{base}, Q_A) ، و تولید در ناحیه ۳ (Q_A, Q_B) توسط واحد u متصل به شین i ، متغیر باینری نشان‌دهنده تولید یا جذب واحد u متصل به شین i در یکی از نواحی جبران راکتیو شبکه، ادیتمانس بین شین i و شین j ، زاویه ادیتمانس، زاویه ادیتمانس خطوط، توان منتقل‌شده توسط خط بین شین i و شین j ، اندازه و زاویه ولتاژ در شین j ، قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه در دسترس بودن، به‌طور یکسان برای همه واحدها، قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه جذب توان راکتیو در ناحیه $(Q_{min}, 0)$ ، به‌طور یکسان برای همه واحدها.

علائم و اختصارات

| | |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| u | شاخص واحدهای تولیدکننده. |
| NB | تعداد کل شین‌های شبکه. |
| NU_i | تعداد کل واحدهای تولیدی متصل به شین i . |
| Q_{avmaxG} | حداقل و حداکثر توان راکتیو در دسترس برای یک واحد تولیدی. |
| Q_{avminG} | |
| Q_{minG} | |
| Q_{maxG} | |
| Q_{Di} | تقاضای توان راکتیو در شین i . |
| P_{Di} | تقاضای توان اکتیو در شین i . |
| Q_{base} | نقطه‌ای در منحنی قابلیت ژنراتور سنکرون که تولید راکتیو تا آن نقطه برای حفظ تجهیزات کمکی صرف شده و جزء خدمات جانبی حساب نمی‌شود. |
| $a_i^{i,u}$ | پیشنهاد قیمت برای هزینه در دسترس بودن واحد u متصل به شین i [\\$]. |
| $M_1^{i,u}$ | پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای جذب راکتیو در ناحیه $(Q_{min}, 0)$ توسط واحد u متصل به شین i [\$/MVar - h]. |
| $M_2^{i,u}$ | پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای تولید در ناحیه (Q_{base}, Q_A) توسط واحد u متصل به شین i [\$/MVar - h]. |
| $M_3^{i,u}$ | پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی برای تولید در ناحیه (Q_A, Q_B) توسط واحد u متصل به شین i [\$/ (MVar - h)^2]. |
| $Q_G^{i,u}$ | توان راکتیو تولید یا جذب‌شده توسط ژنراتور u متصل به شین i [Mvar]. |
| $Q_{1G}^{i,u}$ | توان راکتیو جذب‌شده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه $(Q_{min}, 0)$. |
| $Q_{2G}^{i,u}$ | توان راکتیو تولیدشده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه (Q_{base}, Q_A) . |
| $Q_{3G}^{i,u}$ | توان راکتیو تولیدشده توسط واحد u متصل به شین i در ناحیه (Q_A, Q_B) . |
| $B_p^{i,u}$ | متغیر باینری نشان‌دهنده تولید یا جذب واحد u متصل به شین i . |
| $B_1^{i,u}$ | متغیرهای باینری نشان‌دهنده جذب راکتیو در ناحیه ۱ $(Q_{min}, 0)$ تولید در ناحیه ۲ (Q_{base}, Q_A) ، و تولید در ناحیه ۳ (Q_A, Q_B) توسط واحد u متصل به شین i . |
| $B_2^{i,u}$ | |
| $B_3^{i,u}$ | |
| $B_p^{i,u}$ | متغیر باینری نشان‌دهنده تولید یا جذب واحد u متصل به شین i در یکی از نواحی جبران راکتیو شبکه. |
| $Y_{i,j}$ | ادیتمانس بین شین i و شین j . |
| θ_{ij} | زاویه ادیتمانس. |
| δ | زاویه ادیتمانس خطوط. |
| $S_{i,j}$ | توان منتقل‌شده توسط خط بین شین i و شین j . |
| δ_j, V_j | اندازه و زاویه ولتاژ در شین j . |
| $\pi_0^{i,u}$ | قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه در دسترس بودن، به‌طور یکسان برای همه واحدها. |
| $\pi_1^{i,u}$ | قیمت تسویه بازار (MCP) برای هزینه جذب توان راکتیو در ناحیه $(Q_{min}, 0)$ ، به‌طور یکسان برای همه واحدها. |



شکل (۱): منحنی قابلیت ژنراتور سنکرون

لذا جبران توان راکتیو در این دو ناحیه به عنوان خدمات جانبی تلقی می گردد که واحدهای تولیدی می توانند بابت ارائه این خدمات هزینه دریافت کنند [13]. همین طور طبق شکل (۱) تولید توان راکتیو در ناحیه $(Q_A - Q_B)$ موجب کاهش تولید توان اکتیو و خارج شدن ژنراتور از نقطه بهینه تولید توان اکتیو می شود. از همین رو تولیدکنندگان برای جبران خسارت های ناشی از کاهش سطح تولید توان اکتیو و خسارت های تولید راکتیو در نزدیکی مرز حداکثر ظرفیت، پیشنهاد قیمت های بالاتری برای تولید توان در این ناحیه موسوم به ناحیه فرصت^۱ (OZ) ارائه می دهند [12]. پیشنهاد قیمت های بالا در ناحیه فرصت موجب افزایش هزینه تولید راکتیو در این ناحیه موسوم به هزینه فرصت ازدست رفته^۲ (LOC) می شود از این رو واحدهای تولیدی قیمت های پیشنهادی خود را برای جبران راکتیو در سه ناحیه $(0 - Q_{min})$ به عنوان ناحیه شماره ۱، ناحیه $(Q_{base} - Q_A)$ به عنوان ناحیه شماره ۲ و ناحیه $(Q_A - Q_B)$ به عنوان ناحیه شماره ۳ به بازار ISO^۳ پیشنهاد می دهند [13]. لازم به ذکر است که Q_{base} در شکل (۱) آستانه توان راکتیو مورد نیاز برای تجهیزات کمکی ژنراتورهاست و Q_A و Q_B آستانه حداکثر توان راکتیو تولیدی مجاز ژنراتور در نواحی $(Q_{base} - Q_A)$ و $(Q_A - Q_B)$ هستند [9].

قیمت های پیشنهادی ارائه شده به بازار ISO از طرف تولیدکنندگان و مشخصات منحنی قابلیت تولید هر یک از ژنراتورهای تولیدکننده به عنوان ورودی های مسئله تسویه بازار توان راکتیو شناخته می شوند. این اطلاعات همراه با توابع هدف تسویه بازار توان راکتیو و قیود تسویه بازار در الگوریتم های بهینه سازی قرار گرفته و سهم تولید و جذب راکتیو واحدها به همراه قیمت تسویه بازار^۵ (MCP) به ازای نواحی جبران توان راکتیو به عنوان خروجی های تسویه بازار توان راکتیو در اختیار مشارکت کنندگان قرار می گیرند.

بازار توان راکتیو عموماً با هدف کاهش هزینه های نهایی بازار تسویه می شود. هزینه جبران توان راکتیو^۶ (RPCC) طبق رابطه (۱) محاسبه می شود. طبق رابطه (۱) هزینه جبران توان راکتیو شامل سه بخش: هزینه در دسترس بودن $(a_{0,i})$ ، هزینه عملکرد $(\int_{Q_{min}}^0 M_{1i} dQ_i)$ و هزینه فرصت ازدست رفته $(\int_{Q_{base}}^{Q_A} M_{2i} dQ_i)$ است [13].

مهم و مؤثر در جبران توان راکتیو هستند به طور مستقیم مدنظر نبوده اند. به این ترتیب عدم کنترل مستقیم شاخص های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو و صرف پرداختن به اهداف مرسوم تسویه این بازار موجب عدم رضایت بازیگران بازار و عدم بهره وری مناسب تسویه بازار توان راکتیو به نفع بهبود شرایط شبکه شده است.

لذا در این مقاله با پیشنهاد رویکردی نو در تسویه بازار توان راکتیو که امکان کنترل هم زمان چندین شاخص و تابع هدف را فراهم می کند، فقدان امکان بهبود همه جانبه شرایط شبکه توسط کنترل کیفیت جبران توان راکتیو شبکه برطرف گردیده است. رویکرد پیشنهادی برای تسویه بازار توان راکتیو دارای نوآوری هایی به شرح زیر است.

۱- رویکرد پیشنهادی امکان بهبود شاخص های کیفیت جبران توان راکتیو را که شماری از آن ها در این مقاله پیشنهاد شده اند به طور هم زمان با اهداف مرسوم تسویه بازار توان راکتیو فراهم می کند.

۲- قابلیت کنترل هم زمان چندین پارامتر در رویکرد پیشنهادی این امکان را فراهم می کند تا با اعمال ضرایب وزنی به هر یک از توابع هدف، تسویه بازار توان راکتیو متناسب با شرایط شبکه منعطف باشد.

۳- طرح پیشنهادی امکان ارائه مشوق های مشارکتی را بدون اختصاص هزینه هایی مازاد بر هزینه های جبران توان راکتیو فراهم می کند.

۴- امکان جایگذاری انواع اهداف و شاخص ها در رویکرد پیشنهادی وجود دارد که این امر موجب کارایی طرح پیشنهادی در مواجهه با ارائه شاخص ها و توابع هدف نو برای تسویه بازار توان راکتیو می گردد. ساختار مقاله پیش رو عبارت است از: مکانیزم تسویه بازار توان راکتیو مستقل (۲) رویکرد پیشنهادی برای تسویه بازار توان راکتیو (۳) و تحلیل نتایج (۴) و جمع بندی (۵) است.

۲- مکانیزم تسویه بازار توان راکتیو مستقل

بازار توان راکتیو بازاری مستقل از بازار انرژی است که در آن سهم تولید و جذب راکتیو برای واحدهای تولیدی مشخص می گردد. جبران توان راکتیو متناسب با منحنی قابلیت تولید ژنراتورها که در شکل (۱) نمایش داده شده انجام می شود. توان راکتیو تولید شده در ناحیه $(0 - Q_{base})$ صرف تجهیزات کمکی ژنراتور می شود [13]. لذا تولید راکتیو در این ناحیه به عنوان خدمات جانبی محسوب نشده و مشمول دریافت هزینه از بازار نمی گردد [13]. این در حالی است که جذب راکتیو در ناحیه $(0 - Q_{min})$ و تولید راکتیو در ناحیه $(Q_{base} - Q_A)$ موجب تحمیل هزینه هایی ناشی تلفات می شود [13].

$$B_p^{i,u} \begin{pmatrix} (\pi_0^{i,u} - a_0^{i,u})(Q_{avmaxG} - Q_{avminG}) \\ -B_1^{i,u}(\pi_1^{i,u} - M_1^{i,u})Q_{1G}^{i,u} \\ +B_2^{i,u}(\pi_2^{i,u} - M_2^{i,u})(Q_{2G}^{i,u} - Q_{baseG}^{i,u}) \\ +B_3^{i,u}(\pi_3^{i,u} - M_3^{i,u})(Q_{3G}^{i,u} - Q_{baseG}^{i,u}) \\ +\frac{1}{2}B_3^{i,u}(\pi_3^{i,u} - M_3^{i,u})((Q_{3G}^{i,u})^2 - (Q_{AG}^{i,u})^2) \end{pmatrix}$$

۲-۲- قیود جبران توان راکتیو

قیود جبران توان راکتیو در بازار توان راکتیو مستقل طبق روابط (۱۰) تا (۱۶) هستند [12].

$$B_1^{i,u}, B_2^{i,u}, B_3^{i,u} \in \{0,1\} \quad (10)$$

$$B_1^{i,u} + B_2^{i,u} + B_3^{i,u} \leq 1 \quad (11)$$

$$B_p^{i,u} = B_1^{i,u} + B_2^{i,u} + B_3^{i,u} \quad (12)$$

$$Q_G^{i,u} = Q_{1G}^{i,u} + Q_{2G}^{i,u} + Q_{3G}^{i,u} \quad (13)$$

$$B_1^{i,u} Q_{minG}^{i,u} \leq Q_{1G}^{i,u} \leq 0 \quad (14)$$

$$B_2^{i,u} Q_{baseG}^{i,u} \leq Q_{2G}^{i,u} \leq B_2^{i,u} Q_{AG}^{i,u} \quad (15)$$

$$B_3^{i,u} Q_{AG}^{i,u} \leq Q_{3G}^{i,u} \leq B_3^{i,u} Q_{BG}^{i,u} \quad (16)$$

قید (۱۰) ناحیه جبران راکتیو را با ضرایب باینری مشخص می‌کند. طبق قید (۱۱) هر واحد تولیدی در یک‌زمان (هر بار تسویه بازار)، تنها می‌تواند در یکی از سه ناحیه جذب و عملکرد و فرصت باشد. طبق تعریف ارائه‌شده از ضریب $B_p^{i,u}$ در رابطه (۱۲)، تنها واحدهایی واجد شرایط دریافت هزینه در دسترس بودن است که در یکی از سه ناحیه معرفی‌شده در شکل (۱)، در جبران توان راکتیو شرکت داده شده باشند. قیود (۱۳)–(۱۶) محدوده‌ی تولید و جذب توان راکتیو هر واحد را در هر ناحیه طبق شکل (۱) نشان می‌دهد.

۲-۳- قیود پخش بار

$$\sum_{u=1}^{NU_i} Q_{Gi}^{i,u} - Q_{Di} = \sum_{i=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (17)$$

$$\sum_{u=1}^{NU_i} P_{Gi}^{i,u} - P_{Di} = \sum_{j=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (18)$$

$$S_{i,j} \leq S_{i,j}^{max} \quad (19)$$

$$V_j^{min} \leq V_j \leq V_j^{max}, \quad \forall j \in \text{loadedbuses} \quad (20)$$

روابط (۱۷) و (۱۸) قیود تعادل بار شبکه می‌باشند [12]. روابط (۱۹) و (۲۰) محدودیت‌های جریان خطوط و ولتاژ شین‌ها هستند [12].

۳- رویکرد پیشنهادی برای تسویه بازار توان راکتیو

برای ارائه رویکرد تسویه پیشنهادی چندین شاخص سنجش کیفیت جبران توان راکتیو معرفی شده است. شاخص‌های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو مستقل شامل: نرخ مشارکت واحدها، نرخ سوددهی بازار، نرخ پخش سود، نرخ سهم از تولید و نرخ تولید و پرداخت برای ناحیه فرصت، در بهینه‌سازی تابع هدف این مقاله استفاده شده‌اند. این شاخص‌ها طی روابط (۲۱) تا (۲۸) معرفی شده‌اند.

$$RPCC_i = a_{0,i} + \int_{Q_{min}}^0 M_{1i} dQ_i + \int_{Q_{base}}^{Q_A} M_{2i} dQ_i + \int_{Q_A}^{Q_B} (M_{3i} Q_i) dQ_i \quad (1)$$

نویسندگان مرجع [12]، با اشاره به این موضوع که پرداخت هزینه در دسترس بودن باید متناسب با ظرفیت در دسترس واحدها برای جبران توان راکتیو باشد، رابطه (۱) را به شکل رابطه (۲) ارتقاء بخشیدند.

$$RPCC_i = a_{0,i}(Q_{avmaxG} - Q_{avminG}) + \int_{Q_{min}}^0 M_{1i} dQ_i + \int_{Q_{base}}^{Q_A} M_{2i} dQ_i + \int_{Q_A}^{Q_B} (M_{3i} Q_i) dQ_i \quad (2)$$

در رابطه (۲) ضریب $(Q_{avmaxG} - Q_{avminG})$ به‌عنوان ظرفیت در دسترس واحدها برای جبران توان راکتیو در محاسبه هزینه در دسترس بودن لحاظ شده است. لذا هزینه در دسترس بودن واحدها در رابطه (۲) به‌جای \$ برحسب \$/ MVar - h خواهد بود. تسویه بازار توان راکتیو مستقل با قیودی شامل قیود تسویه، قیود پخش بار و قیود جبران توان راکتیو همراه است. این قیود به شرح زیر به مسئله بهینه‌سازی تسویه بازار توان راکتیو اضافه می‌شوند.

۲-۱- قیود تسویه

قیمت‌های تسویه بازار طبق قیود (۳) تا (۶) با عنوان قیود تسویه یکسان^۷ (UP) قابل محاسبه هستند.

$$B_0^{i,u} a_0^{i,u} \leq \pi_0 \quad (3)$$

$$B_1^{i,u} M_1^{i,u} \leq \pi_1 \quad (4)$$

$$(B_2^{i,u} + B_3^{i,u}) M_2^{i,u} \leq \pi_2 \quad (5)$$

$$B_3^{i,u} M_3^{i,u} \leq \pi_3 \quad (6)$$

در تسویه یکسان بالاترین قیمت پیشنهادشده توسط واحدهای تولیدی، به ازای هر ناحیه جبران توان راکتیو، به‌عنوان قیمت تسویه بازار به‌طور برابر برای تمامی بازیگران بازار در نواحی یکسان تعیین می‌گردد [13]. طرح پرداخت یکسان موجب ایجاد انگیزه برای پیشنهاد قیمت بر اساس هزینه حدی می‌گردد [14].

پس از تسویه بازار و جایگذاری قیمت‌های تسویه به جای قیمت‌های پیشنهادی واحدهای تولیدی در رابطه (۲) هزینه جبران راکتیو شبکه به‌صورت رابطه (۷) تغییر می‌کند. هزینه فرصت ازدست‌رفته به‌عنوان بخشی از هزینه نهایی جبران راکتیو طبق رابطه (۸) قابل محاسبه است. مزاد خالص^۸ (NS) واحدهای تولیدی به‌صورت اختلاف درآمد آن‌ها از هزینه‌های حدی تولید توان راکتیو طبق رابطه (۹) قابل محاسبه است.

$$RPCC^{i,u} = B_p^{i,u} \begin{pmatrix} \pi_0^{i,u} (Q_{avmaxG} - Q_{avminG}) - B_1^{i,u} \pi_1^{i,u} Q_{1G}^{i,u} \\ + B_2^{i,u} \pi_2^{i,u} (Q_{2G}^{i,u} - Q_{baseG}^{i,u}) \\ + B_3^{i,u} \pi_3^{i,u} (Q_{3G}^{i,u} - Q_{baseG}^{i,u}) \\ + \frac{1}{2} B_3^{i,u} \pi_3^{i,u} ((Q_{3G}^{i,u})^2 - (Q_{AG}^{i,u})^2) \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$LOC^{i,u} = \frac{1}{2} B_3^{i,u} \pi_3^{i,u} ((Q_{3G}^{i,u})^2 - (Q_{AG}^{i,u})^2) \quad (8)$$

$$NS^{i,u} = \quad (9)$$

هزینه های بازار توان راکتیو مستقل می گردد. در رویکرد تسویه پیشنهادی بهینه سازی مقادیر شاخص های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو شبکه به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. به این ترتیب در رویکرد پیشنهادی شاخص های MAXIND بیشینه و شاخص های MININD کمینه خواهند شد.

طبق (۲۹)، MAXIND ماتریسی شامل شاخص هایی است که بیشینه شدن آن ها مطلوب مسئله است. از سوی دیگر، MININD طبق (۳۰)، ماتریسی شامل شاخص هایی است که کمینه شدن آن ها طبق تعاریف ارائه شده از شاخص های پیشنهادی در بخش گذشته مطلوب مسئله است.

$$MAXIND_{1 \times n} = [UPR, MPR, PPNR] \quad (29)$$

$$MININD_{1 \times k} = [NSDR, GSR, RWCL, CRLO, NGO] \quad (30)$$

تابع هدف پیشنهادی برای تسویه بازار توان راکتیو مستقل طبق رابطه (۳۱) متشکل از دو هدف کمینه کردن MININD و بیشینه کردن MAXIND است. در رابطه (۳۱)، ضرایب وزنی $W(i)^{MAXIND}$ و $W(i)^{MININD}$ به شاخص های سنجش کیفیت عملکرد تسویه بازار اعمال شده اند تا تأثیر هر شاخص در تابع هدف، قابل تنظیم باشد. اعمال ضرایب وزنی به شاخص ها، موجب تنظیم نتایج بازار متناسب با ترتیب اولویت ضرایب اعمالی به شاخص ها می گردد. وزن دهی به هر یک از شاخص ها به عنوان توابع هدف، مطلوب رویکرد پیشنهادی برای انعطاف تابع هدف تسویه بازار توان راکتیو متناسب با شرایط و اضطرار شبکه است.

$$OF = \left[\begin{array}{l} \max \left(\sum_{i=1}^n W(i)^{MAXIND} \times MAXIND(i) \right), \\ \min \left(\sum_{i=1}^k W(i)^{MININD} \times MININD(i) \right) \end{array} \right] \quad (31)$$

$$W^{MAXIND} = [W_{UPR}, W_{MPR}, W_{PPNR}] \quad (32)$$

$$W^{MININD} = [W_{NSDR}, W_{GSR}, W_{RWCL}, W_{CRLO}, W_{NGO}] \quad (33)$$

$W(i)^{MAXIND}$ و $W(i)^{MININD}$ در (۳۲) و (۳۳) ماتریس ضرایب وزنی اعمالی به شاخص های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو هستند. رویکرد تسویه پیشنهادی با سه طرح وزن دهی به شاخص ها، برای تسویه بازار توان راکتیو مستقل در نظر گرفته شده است.

۳-۱- وزن دهی یکسان

در وزن دهی یکسان^{۱۸} (EW) با اعمال مقادیر ضریب وزنی یکسان به هر کدام از درایه های ماتریس W^{MAXIND} و W^{MININD} همه شاخص ها با تأثیر یکسان در پیاده سازی رویکرد تسویه پیشنهادی شرکت داده شده اند. به عبارتی تأثیر هر کدام از شاخص ها در تسویه بازار، با سایر شاخص ها یکسان در نظر گرفته شده است.

(۱) نرخ مشارکت واحدها^۹ (UPR) طبق رابطه (۲۱)، نسبت مجموع تعداد واحدهای مشارکت کننده در جبران توان راکتیو شبکه به تعداد کل واحدهای شبکه است.

$$UPR = \frac{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_p^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} NU_i} \times 100 \quad (21)$$

(۲) نرخ سوددهی بازار^{۱۱} (MPR) و نرخ واحدهای سودکننده^{۱۱} (PPNR) طبق روابط (۲۲) و (۲۳) محاسبه می شوند.

$$MPR = \frac{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} NS^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} RPCC^{i,u}} \times 100 \quad (22)$$

$$PPNR = \frac{\text{تعداد واحدهایی که سود دریافت کرده اند}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_p^{i,u}} \times 100 \quad (23)$$

MPR نسبت مجموع مازاد خالص واحدهای مشارکت کننده در جبران توان راکتیو شبکه به مجموع هزینه های نهایی بازار و PPNR نسبت تعداد واحدهای سودکننده به تعداد کل واحدهای جبران کننده توان راکتیو در شبکه است.

(۳) نرخ پخش سود^{۱۲} (NSDR) طبق رابطه (۲۴) انحراف معیار^{۱۳} (Std) نسبت سود هر واحد به مجموع سود جبران کنندگان توان راکتیو است. مقدار این شاخص، اختلاف سهم سود هر واحد را از میانگین سهم سود واحدها نشان می دهد.

$$NSDR = Std \left(\frac{NS^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} NS^{i,u}} \right) \times 100 \quad (24)$$

(۴) نرخ سهم تولید^{۱۴} (GSR) طبق رابطه (۲۵) انحراف معیار نسبت جبران توان راکتیو هر واحد به مجموع توان راکتیو جبران شده توسط واحدها است. کنترل شاخص GSR، موجب توزیع سهم جبران توان راکتیو واحدها می شود.

$$GSR = Std \left(\frac{|Q_G^{i,u}|}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} |Q_G^{i,u}|} \right) \times 100 \quad (25)$$

(۵) نرخ ریسک کار در مرز ظرفیت^{۱۵} (RWCL) طبق رابطه (۲۶) محاسبه می گردد.

$$RWCL = \frac{\text{تعداد واحدهایی که در 90\% ظرفیت بیشینه خود کار کنند}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_p^{i,u}} \times 100 \quad (26)$$

کنترل شاخص RWCL، موجب مدیریت هزینه های اضافی ناشی از خسارت های فنی و مالی تولید توان راکتیو در مرزهای حداکثر ظرفیت می شود.

(۶) رابطه (۲۷) نرخ پرداخت برای ناحیه فرصت^{۱۶} (CRLO) و رابطه (۲۸) نرخ تعداد واحدهای جبران کننده توان راکتیو در ناحیه فرصت^{۱۷} (NPO) است.

$$CRLO = \frac{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_3^{i,u} \times RPCC^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} RPCC^{i,u}} \times 100 \quad (27)$$

$$NPO = \frac{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_3^{i,u}}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} B_p^{i,u}} \times 100 \quad (28)$$

کنترل شاخص های CRLO و NPO موجب کنترل هزینه های ناشی از خسارت های وارده بر واحدها در ناحیه فرصت و نهایتاً مدیریت

۳-۲- وزن دهی مجزا

در وزن دهی مجزا^{۱۹} (SW)، هر بار یکی از شاخص‌ها با وزن بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها در تسویه بازار، شرکت داده می‌شود. سناریوهای وزن دهی مجزا طبق جدول (۱) پیشنهاد شده‌اند. اعمال وزن بسیار اندک در حد ۰.۱٪ به شاخص‌ها و اجتناب از اعمال وزن ۰٪ در سناریوهای جدول (۱) به منظور تأکید بر رویکرد تأمین هم‌زمان چند شاخص بوده است.

۳-۳- وزن دهی تبعیضی

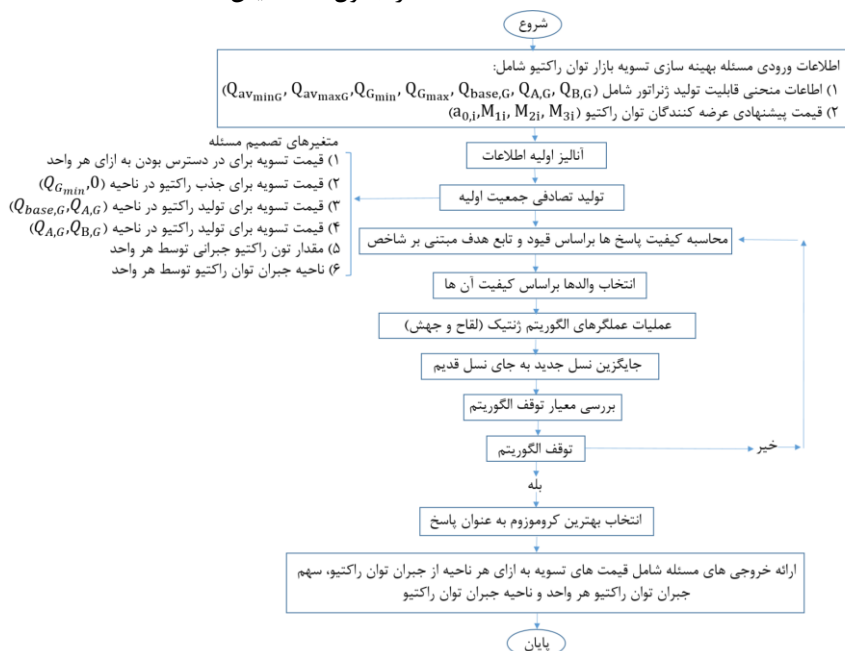
طبق تعریف ارائه شده از شاخص MPR در رابطه (۲۲)، مقدار این شاخص مستقیماً با هزینه نهایی بازار و مازاد خالص واحدهای تولیدی در ارتباط است. تأمین اهداف معمول تسویه بازار توان راکتیو نظیر کمینه کردن هزینه نهایی و تشویق مشارکت کنندگان به مداوم مشارکت از طریق بهبود سوددهی، مستقیماً با وزن دهی به شاخص MPR امکان پذیر است. برای وزن دهی به شاخص MPR، ضرایب W_{max} و W_{min} به ترتیب برای کنترل مجموع مازاد خالص واحدها و کنترل مجموع هزینه نهایی بازار طبق رابطه (۳۴) به شاخص MPR اعمال شده‌اند. وزن دهی تبعیضی به شاخص MPR، کنترل مازاد خالص و هزینه‌های نهایی بازار را به صورت مستقیم و به عنوان اهدافی مجزا فراهم می‌کند. این وزن دهی تبعیضی به منظور انعطاف رویکرد تسویه پیشنهادی در شرایط مختلف شبکه و بازار پیشنهاد شده است.

سناریوهای جدول (۲) به منظور اعمال وزن دهی تبعیضی تنظیم شده‌اند. طبق جدول (۲) هر بار NS و RPCC با تأثیر بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها در تأمین MPR_{DW} شرکت داده شده‌اند.

$$MPR_{DW} = \frac{w_{max} \left(\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} (NS^i, u) \right)}{w_{min} \left(\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} (RPCC^i, u) \right)} \times 100 \quad (34)$$

۴- تحلیل نتایج

رویکرد تسویه پیشنهادی در این مقاله بر روی شبکه ۲۴ شینه IEEE RTS تست شده است. این شبکه شامل ۳۲ واحد تولیدی و یک کندانسور سنکرون متصل به شین ۱۴ است [15]. قابل توجه است که هیچ LOC برای کندانسور سنکرون متصل به گره ۱۴ در نظر گرفته نمی‌شود [12]. به عبارتی برای کندانسور سنکرون متصل به شین ۱۴ $M_3 = 0$ است. بهینه‌سازی تابع هدف پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است. روند نمای مسئله تسویه بازار توسط الگوریتم ژنتیک به شرح شکل (۲) است. شبیه‌سازی‌ها مجموعاً در ۱۱ سناریو طبق جدول (۳) برای سه حالت وزن دهی یکسان، مجزا و تبعیضی صورت گرفته است. مقادیر ضرایب وزنی اعمالی به شاخص‌ها در هر سناریو طبق جدول (۱) و جدول (۲) می‌باشند. در ادامه مقادیر شاخص‌های به دست آمده از تسویه بازار توان راکتیو مستقل، در سناریوهای وزن دهی یکسان، مجزا و تبعیضی به صورت دقیق مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. مقادیر شاخص‌ها در سناریوهای مختلف در جدول (۳) نمایش داده شده‌اند.



شکل (۲): روند نمایه حل مسئله تسویه بازار توان راکتیو با رویکرد تسویه پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک

جدول (۱): سناریوهای وزن دهی مجزا

| سناریو | W_{NGO} | W_{CRLO} | W_{RWCL} | W_{GSR} | W_{NSDR} | W_{PPNR} | W_{MPR} | W_{UPR} |
|--------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|
| ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۹۳ |
| ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۹۳ | ۱ |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۳ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۴ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۵ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۶ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۷ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۸ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |

جدول (۲): سناریوهای وزن دهی تبعیضی به MPR

| سناریو | $[W_{max} \ W_{min}]$ | $[W_{NSDR} \ W_{GSR} \ W_{RWCL} \ W_{CRLO} \ W_{NGO}]$ | $[W_{UPR} \ W_{MPR_{DW}} \ W_{PPNR}]$ |
|--------|-----------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| ۱ | $[10 \ 90]$ | $[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$ | $[1 \ 93 \ 1]$ |
| ۲ | $[90 \ 10]$ | $[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$ | $[1 \ 93 \ 1]$ |

جهت دهی به نتایج تسویه بازار را نشان می دهد. سابقه سوددهی بازار از جمله مهم ترین عامل های مشوق در جلب مشارکت واحدهای تولیدی است؛ به این ترتیب که ارائه داده های تاریخی از شاخص های سوددهی بازار، مشوق خوبی برای ایجاد اطمینان از سودده بودن بازار است. تمرکز رویکرد پیشنهادی بر روی شاخص های سوددهی بازار با ایجاد امکان بهینه سازی مستقیم به این شاخص ها در تابع هدف، زمینه بهبود سوددهی و تشویق به مشارکت در بازار را به خوبی فراهم می کند. میانگین MPR طبق جدول (۳) برای سناریوهایی با $W_{MPR} = 1\%$ در حالت وزن دهی مجزا، $24/55\%$ است. این مقدار تأثیرگذاری وزن دهی به شاخص MPR را حتی در ضریب وزنی های اندک تأیید می کند. میانگین PPNR در تمامی سناریوهای وزنی طبق جدول (۳) همواره 100% است که این موضوع، اطمینان از دریافت سود را به عنوان رزومه ای مثبت برای بازار تأیید می کند.

شاخص NSDR طبق (۲۴) ملاکی برای سنجش توزیع عادلانه سود است. با توجه به اعمال ضرایب وزنی به شاخص NSDR، کمترین مقدار این شاخص (مقدار ایده آل) در سناریو ۴ از حالت وزن دهی مجزا با W_{NSDR} بزرگ تر نسبت به سایر ضرایب وزنی به دست آمده است. میانگین NSDR طبق جدول (۳) برای سناریوهایی با $W_{PDR} = 1\%$ در حالت وزن دهی مجزا، $3/31\%$ است. این مقدار توزیع عادلانه سود را به نفع کاهش پتانسیل رقابت گریزی و انگیزه تباری بازیگران نشان می دهد. بهبود مقادیر شاخص NSDR، ضمن تضمین توزیع عادلانه سود، موجب بهبود مقدار شاخص ضریب تغییرات (پراکندگی) CV سود می شود. CV که نسبت انحراف معیار (Std) به میانگین حسابی CV (AM) داده ها است برای اندازه گیری توزیع پراکندگی داده های آماری به کار می رود.

جدول (۳): مقادیر شاخص ها در وزن دهی های یکسان، مجزا و تبعیضی (%).

| وزن دهی | سناریو | NGO | CRLO | RWCL | GSR | NSDR | PPNR | MPR | UPR |
|---------|--------|-----|------|------|------|------|------|-------|-------|
| یکسان | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۳۰۳۱ | ۳۰۳۵ | ۱۰۰ | ۲۶،۲۳ | ۱۰۰ |
| مجزا | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲۰۹۸ | ۳۰۱۵ | ۱۰۰ | ۲۵،۱۲ | ۱۰۰ |
| | ۲ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲۰۵۶ | ۳۰۹۴ | ۱۰۰ | ۳۱،۳۵ | ۷۸،۷۹ |
| | ۳ | ۰ | ۰ | ۰ | ۳۰۲۴ | ۳۰۳۵ | ۱۰۰ | ۲۶،۹۷ | ۱۰۰ |
| | ۴ | ۰ | ۰ | ۰ | ۳۰۷۳ | ۲۰۰۳ | ۱۰۰ | ۱۸،۴۵ | ۹۶،۹۷ |

| | | | | | | | | |
|-------|-------|-----|------|------|---|---|---|---|
| ۹۶,۹۷ | ۲۴,۰۵ | ۱۰۰ | ۳,۰۵ | ۲,۲۷ | . | . | . | ۵ |
| ۱۰۰ | ۲۳,۱۴ | ۱۰۰ | ۲,۹۲ | ۳,۳۷ | . | . | . | ۶ |
| ۱۰۰ | ۲۷,۰۴ | ۱۰۰ | ۳,۳۷ | ۳,۳۲ | . | . | . | ۷ |
| ۱۰۰ | ۲۷,۱۱ | ۱۰۰ | ۳,۴ | ۳,۲۹ | . | . | . | ۸ |
| ۹۳,۹۴ | ۳۱,۰۴ | ۱۰۰ | ۳,۷۵ | ۳,۲۴ | . | . | . | ۱ |
| ۷۵,۷۶ | ۳۱,۸۷ | ۱۰۰ | ۳,۷۸ | ۳,۶۷ | . | . | . | ۲ |

قیمت‌های بالای تولیدکنندگان برای تولید توان راکتیو در این ناحیه رخ می‌دهد، می‌توان تأثیر بهینه‌سازی تولید در ناحیه فرصت را در کنترل هزینه‌های نهایی بازار توجیه نمود. جزئیات مقادیر هزینه نهایی بازار توان راکتیو و LOC در جدول (۵) به‌خوبی توانایی رویکرد تسویه مبتنی بر شاخص را در بهینه‌سازی هزینه‌های تولید در ناحیه فرصت نشان می‌دهد. مقادیر شاخص‌های NGO، CRLO و RWCL طبق جدول (۳) در تمامی سناریوها ۰٪ به دست آمده است.

۴-۵- تحلیل نتایج وزن‌دهی تبعیضی

سناریوهای تبعیضی برای شاخص MPR برای تسویه بازار توان راکتیو با اهداف مرسوم نظیر کمینه‌کردن هزینه نهایی بازار و بیشینه کردن سود واحدهای تولیدی در نظر گرفته شده است. طبق نتایج ارائه شده در جدول (۳) بیشترین مقدار شاخص MPR در سناریو شماره ۲ از وزن‌دهی تبعیضی که دارای W_{max} بزرگ‌تری است محقق شده است. به‌این ترتیب در رویکرد تسویه پیشنهادی امکان بهینه‌سازی انواع شاخص‌ها با ضرایب وزنی متفاوت به همراه بهینه‌سازی توابع هدف مجزا فراهم شده است که این امر موجب انعطاف رویکرد تسویه پیشنهادی در پشتیبانی از انواع توابع هدف می‌گردد.

۴-۶- کنترل پتانسیل رقابت‌گریزی

برای سنجش پتانسیل رقابت‌گریزی در بازار ضمن مطالعه مقادیر شاخص‌هایی نظیر CV_{NS} ، CV_Q و CV_{RPCC} می‌توان از چند شاخص سنجش تمرکز بازار شامل: شاخص سهم بازار و شاخص تمرکز هرفیندال - هریشمن استفاده نمود.

جدول (۴): پراکندگی مازاد خالص، درآمد و سهم جبران توان راکتیو

| وزن دهی | سناریو | CV_{RPCC} | CV_{NS} | CV_Q |
|---------|--------|-------------|-----------|---------|
| یکسان | ۱ | ۱,۰۴۳۵ | ۱,۰۱۰۶۶ | ۱,۰۰۹۲۳ |
| | ۱ | ۰,۹۵۱۶ | ۱,۰۰۳۹۸ | ۰,۹۸۲۰ |
| | ۲ | ۱,۰۱۹۶۶ | ۱,۰۳۰۰۱ | ۱,۰۱۷۵۳ |
| | ۳ | ۱,۰۰۵۷۰ | ۱,۰۱۰۶۶ | ۱,۰۰۷۰۵ |
| | ۴ | ۱,۰۱۵۵۶ | ۰,۶۶۸۳ | ۱,۰۲۳۰۰ |
| مجزا | ۵ | ۰,۷۷۹۹ | ۱,۰۰۰۵۴ | ۰,۷۴۸۳ |
| | ۶ | ۱,۰۱۰۶۵ | ۰,۹۶۲۰ | ۱,۰۱۱۲۹ |
| | ۷ | ۱,۰۰۶۷۶ | ۱,۰۱۱۲۵ | ۱,۰۰۹۶۱ |
| | ۸ | ۰,۹۴۸۶ | ۱,۰۱۲۱۲ | ۱,۰۰۸۶۲ |
| تبعیضی | ۱ | ۱,۰۰۸۴۲ | ۱,۰۲۳۷۰ | ۱,۰۰۶۹۲ |
| | ۲ | ۱,۰۲۳۹۷ | ۱,۰۲۴۷۹ | ۱,۰۲۱۱۲ |

جدول (۵): درآمد و سود بازیگران و LOC در سناریوهای متفاوت وزن‌دهی

| وزن دهی | سناریو | هزینه نهایی | مجموع سود | LOC |
|---------|--------|-------------|-----------|-----|
| | | | | |

روابط (۳۵) تا (۳۷) به ترتیب پراکندگی سود، پراکندگی توان راکتیو تولیدی واحدها و پراکندگی هزینه جبران توان راکتیو هستند.

$$CV_{PP} = \frac{Std(NS^{i,u})}{AM(NS^{i,u})} \quad (35)$$

$$CV_Q = \frac{Std|Q^{i,u}|}{AM|Q^{i,u}|} \quad (36)$$

$$CV_{RPCC} = \frac{Std(RPCC^{i,u})}{AM(RPCC^{i,u})} \quad (37)$$

توجه مستقیم به شاخص NSDR به‌عنوان هدف پراکندگی سود را کاهش می‌دهد. طبق مقادیر CV_{NS} در جدول (۴)، کمترین مقدار CV_{NS} مربوط به سناریو ۴ در وزن‌دهی مجزا با بیشترین وزن شاخص NSDR در تابع هدف است. کاهش پراکندگی سود با اعمال ضرایب وزنی بزرگ‌تر به شاخص NSDR موجب کاهش پتانسیل رقابت‌گریزی بازیگران و کاهش میل به تبانی می‌گردد.

۴-۳- تحلیل نتایج شاخص GSR

شاخص GSR، ملاکی برای سنجش توزیع عادلانه سهم جبران توان راکتیو در میان مشارکت‌کنندگان و البته سنجش سطح رقابتی بازار است. توانایی رویکرد تسویه پیشنهادی در پشتیبانی از کنترل سهم جبران توان راکتیو با دسترسی مستقیم به کمینه کردن شاخص GSR، منجر به توزیع سهم جبران توان راکتیو می‌شود؛ به‌طوری‌که کمترین مقدار CV_Q در سناریو شماره ۵ از وزن‌دهی مجزا که در آن ضریب شاخص GSR نسبت به سایر شاخص‌ها بیشتر است، رخ داده است. بهینه‌سازی مستقیم شاخص GSR ضمن کنترل مستقیم پراکندگی مقادیر جبران توان راکتیو واحدها (CV_Q)، موجب توزیع پرداخت به تولیدکنندگان یا به عبارتی توزیع درآمد تولیدکنندگان می‌گردد؛ زیرا پرداخت به واحدها کاملاً متناسب با مقدار توان راکتیو جبرانی آن‌ها است. مقدار CV_{RPCC} در سناریو ۵ از وزن‌دهی مجزا طبق جدول (۴) در مقایسه با سایر سناریوها کمتر است که این امر به‌خوبی تأثیر بهینه‌سازی مستقیم شاخص GSR را در توزیع عادلانه درآمد واحدها نشان می‌دهد.

۴-۴- تحلیل نتایج شاخص‌های تولید و پرداخت در OZ

مقادیر شاخص‌های NGO، CRLO و RWCL که با تعداد واحدهای تولیدکننده در ناحیه فرصت و پرداخت برای تولید در ناحیه فرصت ارتباط هستند، ملاک‌های مناسبی برای سنجش توانایی رویکرد تسویه مبتنی بر شاخص پیشنهادی در بهینه‌سازی تولید و پرداخت در ناحیه فرصت هستند. با اشاره مجدد به رابطه افزایش هزینه نهایی بازار متناسب با افزایش تولید در ناحیه فرصت که به علت پیشنهاد

آزمایشی و M تعداد واحدهایی با سهم بازار معلوم، می باشد. سایر پارامترهای جدول (۶) طی روابط (۴۱) تا (۴۳) ارائه شده اند. S_M طبق رابطه (۴۲)، کمترین مقدار سهم بازار بازیگرانی با سهم بازار معلوم، است. آستانه‌ی ۰/۱ برای شاخص HHI به عنوان عدم تمرکز بازار (محیط رقابتی بازار)، ۰/۱ تا ۰/۱۸ تا حدودی متمرکز و بالاتر از ۰/۱۸ به عنوان بازارهای متمرکز شناخته می شوند.

$$S_i = \left(\frac{|Q_G^{i,u}|}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} |Q_G^{i,u}|} \right) \quad (39)$$

$$HHI = \sum_{i=1}^M S_i^2 + \Delta \quad (40)$$

$$R = 1 - \sum_{i=1}^M S_i^2 \quad (41)$$

$$S_M = \text{Min}(S_i) \quad 1 \leq i \leq M \quad (42)$$

$$Q = \frac{R}{S_M} \quad (43)$$

با توجه به آستانه معرفی شده برای شاخص HHI برای سنجش پتانسیل رقابت‌گریزی در بازار، نمونه‌ای از مقادیر HHI برای سناریوهای مختلف محاسبه شده و نتایج در شکل (۴) ارائه شده است. مقایسه مقادیر HHI سناریوهای مختلف با آستانه‌ی رقابتی بودن بازار طبق شکل (۴)، حفظ حریم رقابتی بازار را در تمامی سناریوها تأیید می کند. به عبارتی طبق شکل (۴)، در تمامی سناریوهای رویکرد پیشنهادی، بازار در محدوده عدم تمرکز قرار دارد. جزئیات مقادیر HHI در جدول (۷) ارائه شده است. طبق انتظار از تأثیر شاخص GSR در توزیع عادلانه سهم تولید که موجب کنترل سطح رقابتی بازار می گردد، کمترین مقدار HHI در سناریو شماره ۵ از SW رخ داده است. به طور کلی طبق جدول (۷) تمامی سناریوها در محدوده مجاز رقابتی هستند. برای درک تأثیر تعدد واحدهایی با سهم بازار معلوم در تعیین مقدار دقیق HHI و درک محدوده تغییر HHI در رویکرد پیشنهادی، مقادیر HHI_{\max} ، HHI_{\min} و $HHIR$ طبق (۴۴) برای حالت وزن دهی یکسان و با در نظر گرفتن سناریوهای مختلفی برای تعداد واحدهایی با سهم بازار معلوم در جدول (۸) ارائه شده است. برای مثال در سناریو شماره ۱ از جدول (۸)، تعداد واحدهایی با سهم بازار معلوم ۵ واحد و در سناریو ۶، ۳۰ واحد در نظر گرفته شده است. N برای تمامی سناریوها ۳۳ است. HHI_{\max} ، باند بالای HHI و HHI_{\min} باند پایین HHI است که طبق روابط ارائه شده در جدول (۶) محاسبه شده اند. مقادیر ارائه شده در جدول (۸) در شکل (۵) نمایش داده شده است. مطالعه مقادیر دقیق HHI_{\min} ، HHI_{\max} و $HHIR$ در هر کدام از سناریوهای جدول (۸)، افزایش دقت محاسبه HHI را با افزایش تعداد واحدهایی با سهم بازار معلوم نشان می دهد.

همگرایی باندهای HHI در مقداری کمتر از ۰/۱ در شکل (۵) رقابتی بودن بازار با رویکرد تسویه پیشنهادی را در سناریو وزن دهی یکسان تأیید می کند. با بررسی مقادیر شاخص های ارزیابی رقابتی بودن بازار

| | بازار (\$) | واحدها (\$) | | |
|--------|------------|-------------|---|---|
| یکسان | ۷۰۳,۱۷۷ | ۱۸۴,۴۳۸ | ۱ | ۰ |
| | ۶۷۳,۵۱۴ | ۱۶۹,۱۵۴ | ۱ | ۰ |
| | ۵۱۳,۹۷۴ | ۱۶۱,۱۱۳ | ۲ | ۰ |
| | ۷۰۳,۰۴۵ | ۱۸۹,۶۲۵ | ۳ | ۰ |
| | ۶۴۲,۷۸۴ | ۱۱۸,۵۸۳ | ۴ | ۰ |
| مجزا | ۶۶۳,۷۳ | ۱۵۹,۶۲۱ | ۵ | ۰ |
| | ۷۲۹,۹۳۵ | ۱۶۸,۹۲۱ | ۶ | ۰ |
| | ۶۸۵,۳۱۸ | ۱۸۵,۳۲۹ | ۷ | ۰ |
| | ۶۴۸,۸۸۶ | ۱۷۵,۹۲۸ | ۸ | ۰ |
| تبعیضی | ۵۴۰,۵۳۵ | ۱۶۷,۷۸۷ | ۱ | ۰ |
| | ۵۳۴,۲۸ | ۱۷۰,۲۹۳ | ۲ | ۰ |

جزئیات روابط و مفاهیم شاخص های تمرکز بازار به شرح زیر است.

۱) سهم بازار

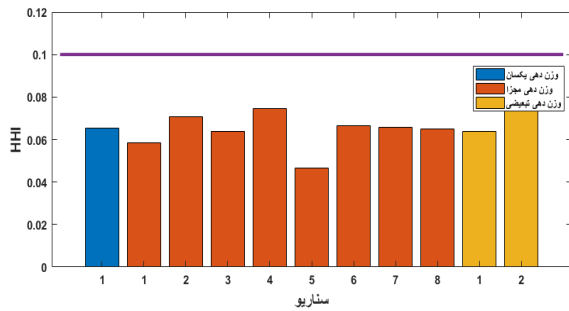
شاخص سهم بازار MS^{22} (۳۸) ملاکی برای سنجش توزیع عادلانه تولید و سنجش پتانسیل رقابت‌گریزی در بازار است. بر اساس اصول این شاخص، می توان نشان داد که سهم بازار نسبت معکوسی از کشش قیمتی تقاضای بازار است [16]. کمیته‌ی قانون گذاری انرژی امریکا^{۲۳} حد نهایی سهم بازار را ۲۰ درصد و اتحادیه‌ی اروپا ۲۵ درصد معرفی کرده اند. مقادیر استاندارد ارائه شده برای حد نهایی سهم بازار به عنوان معیار اندازه گیری آستانه رقابتی بودن بازار شناخته می شوند.

$$MS = \left(\frac{|Q_G^{i,u}|}{\sum_{i=1}^{NB} \sum_{u=1}^{NU_i} |Q_G^{i,u}|} \right) \times 100 \quad (38)$$

مقادیر سهم بازار واحدها در سناریو ۵ از وزن دهی مجزا، در شکل (۳) نمایش داده شده است. مقادیر سهم بازار طبق شکل (۳) همواره کمتر از ۷٪ و در محدوده مجاز بازار غیرمتمرکز (رقابتی) هستند. بر اساس تعریف ارائه شده از GSR در رابطه (۲۵)، بهینه سازی مستقیم این شاخص توسط رویکرد تسویه پیشنهادی، موجب توزیع سهم تولید واحدها می گردد. لذا طبق مقادیر شاخص GSR در جدول (۳)، CV_Q در جدول (۴) و مقادیر سهم بازار در شکل (۳)، سناریو ۵ از وزن دهی مجزا به عنوان بهترین سناریوی رقابتی است. به عبارتی رویکرد تسویه پیشنهادی قادر به کنترل سطح رقابتی بازار با کنترل ضریب وزنی شاخص GSR می باشد. به عنوان نتیجه، دسترسی مستقیم رویکرد تسویه پیشنهادی به شاخص GSR موجب بهبود مقادیر سهم بازار، توزیع عادلانه تولید و ایجاد محیط رقابتی در بازار شده است.

۲) شاخص تمرکز هرفیندال – هریشمن

یکی دیگر از شاخص هایی که در این مقاله برای سنجش پتانسیل رقابت‌گریزی بازیگران استفاده شده، شاخص تمرکز هرفیندال – هریشمن^{۲۴} (HHI) [17] است. بهبود یافته HHI طبق تغییرات اعمال شده توسط نویسندگان مرجع [18]، به صورت رابطه (۴۰) است. طبق (۴۰)، HHI مجموع مربعات سهم بازار بنگاه های فعال به انضمام مقادیر Δ است. مقادیر HHI با لحاظ مقادیر Δ در جدول (۶) ارائه شده اند. در رابطه (۴۰) i سهم بازار تولید کننده i ام است که در رابطه (۳۹) ارائه شده است. در جدول (۶)، N تعداد کل واحدهای شبکه



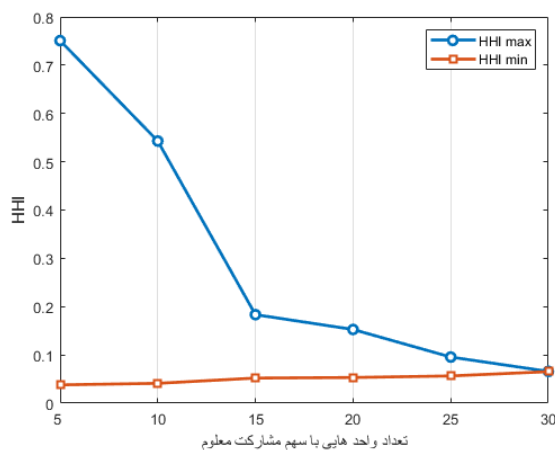
شکل (۴): HHI در سناریوهای وزن دهی یکسان، مجزا و تبعیضی

جدول (۷) مقادیر شاخص HHI

| وزن دهی | سناریو | HHI |
|---------|--------|--------|
| یکسان | ۱ | ۰،۰۶۵۴ |
| | ۱ | ۰،۰۵۸۶ |
| | ۲ | ۰،۰۷۰۹ |
| | ۳ | ۰،۰۶۴ |
| | ۴ | ۰،۰۷۴۸ |
| مجزا | ۵ | ۰،۰۴۶۸ |
| | ۶ | ۰،۰۶۶۷ |
| | ۷ | ۰،۰۶۵۶ |
| | ۸ | ۰،۰۶۵ |
| تبعیضی | ۱ | ۰،۰۶۳۹ |
| | ۲ | ۰،۰۷۳۴ |

جدول (۸): دامنه تغییرات HHI در سناریو وزن دهی یکسان (N=33)

| سناریو | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ |
|--------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| M | ۵ | ۱۰ | ۱۵ | ۲۰ | ۲۵ | ۳۰ |
| HHI _{max} | ۰،۰۷۵۱ | ۰،۰۵۴۳ | ۰،۱۸۳ | ۰،۱۵۳ | ۰،۰۹۶ | ۰،۰۶۶ |
| HHI _{min} | ۰،۰۳۸ | ۰،۰۴۱ | ۰،۰۵۲ | ۰،۰۵۳ | ۰،۰۵۶ | ۰،۰۶۵ |
| HHIR | ۰،۰۷۱۳ | ۰،۰۵۰۲ | ۰،۱۳۱ | ۰،۰۹۹ | ۰،۰۳۹ | ۰،۰۰۱ |



شکل (۵): دامنه تغییرات HHI در سناریو وزن دهی یکسان

جدول (۹): مقایسه نتایج طرح پیشنهادی با نتایج طرح مرجع [12]

| وزن دهی | سناریو | NGO | CRLO | RWCL | PSR | PDR | MPR | PUPR | UAR |
|---------|--------|-----|------|------|-----|-----|-----|------|-----|
| | | | | | | | | | |

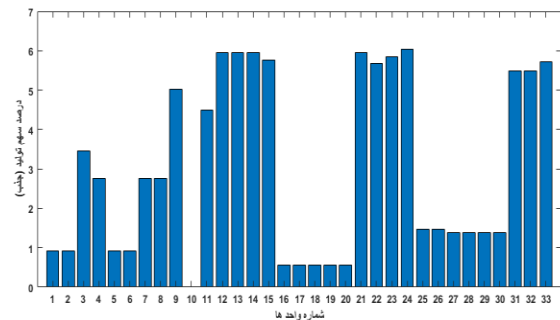
می توان به حفظ محدوده رقابتی بازار در تمام سناریوهای رویکرد تسویه پیشنهادی پی برد.

$$HHIR = HHI_{max} - HHI_{min} \quad (۴۴)$$

به عنوان نتیجه، تأثیر بیشتر شاخص GSR که با اعمال ضریب وزنی بیشتر به این شاخص قابل تحقق است ($w_{GSR} = 93\%$)، موجب بهینه سازی متمرکزتر قدرت بازار و مدیریت فضای رقابتی خواهد شد.

۷-۴- مقایسه نتایج با روش های مرسوم تسویه

برای بررسی کیفیت نتایج رویکرد تسویه پیشنهادی، سناریو شماره ۱ از وزن دهی تبعیضی به عنوان سناریویی با بیشترین نزدیکی به هدف کمینه کردن هزینه نهایی بازار ($w_{min} = 90\%$)، با نتایج مرجع [12] که تسویه بازار را با هدف کمینه کردن هزینه نهایی بازار انجام داده، مقایسه می شود. نتایج مقایسه در جدول (۹) ارائه شده است. طبق نتایج جدول (۹)، با وجود عدم توجه صدهدرصدی به هدف کمینه کردن هزینه نهایی بازار در سناریو شماره ۱ از وزن دهی تبعیضی، اختلاف مقادیر شاخص ها در روش پیشنهادی و روش مرجع [12] در مواردی بسیار زیاد است. این اختلاف به خصوص در مورد شاخص های مرتبط با کنترل تولید و پرداخت در ناحیه فرصت قابل مشاهده است.



شکل (۳): سهم بازار در سناریو شماره ۵ از وزن دهی مجزا

جدول (۶): مقادیر شاخص HHI

| نوع باند | روابط محاسبه محدوده باند HHI |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Lower | $\sum_{i=1}^M S_i^2 + \frac{(1 - \sum_{i=1}^M S_i)^2}{N - M}$ |
| Upper ($R \leq S_M$) | $\sum_{i=1}^M S_i^2 + \left(1 - \sum_{i=1}^M S_i\right)^2$ |
| Upper ($R > S_M$) | $\sum_{i=1}^M S_i^2 + S_M^2 Q + \left(1 - \sum_{i=1}^M S_i - S_M Q\right)^2$ |

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|-----|-------|------|--------|-------|--------|---|--------|
| ۹۳,۹۴ | ۳۱,۰۰۴ | ۱۰۰ | ۳,۷۵ | ۳,۲۴ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | تبعیضی |
| ۴۲,۴۲۴ | ۳۰,۷۷۲ | ۱۰۰ | ۶,۳۷۱ | ۶,۴۲ | ۸۵,۷۱۴ | ۲۴,۵۵ | ۴۲,۸۵۷ | - | [12] |

جمع بندی

رویکرد تسویه پیشنهادی در این مقاله مبتنی بر شاخص های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو در بازار شامل: شاخص مشارکت، سوددهی بازار، تولید و پرداخت برای ناحیه فرصت و توزیع تولید و سود است. به طور کلی بنابر اصول رویکرد تسویه پیشنهادی، شاخص های سنجش کیفیت جبران توان راکتیو به طور مستقیم و در مواردی به طور غیرمستقیم و متأثر از سایر عوامل و شاخص ها در بازار، قابل کنترل هستند. توانایی اعمال ضرایب وزنی به شاخص ها در طرح پیشنهادی موجب پویایی رویکرد تسویه پیشنهادی متناسب با شرایط و الزامات شبکه می گردد. نتایج به دست آمده از شبیه سازی ها ضمن تأیید تأمین مقادیر بهینه شاخص های سنجش کیفیت عملکرد تسویه بازار توان راکتیو مستقل توسط رویکرد تسویه پیشنهادی، توانایی آن را در کنترل پتانسیل رقابت گریزی در بازار نشان می دهد. با توجه به اهمیت تعداد مشارکت کنندگان در بازار توان راکتیو در بهبود سطح رقابتی بازار، طرح پیشنهادی به طور مستقیم و غیرمستقیم موجب افزایش انگیزه مشارکت شده است که این امر موجب بهبود سطح رقابتی بازار توان راکتیو مستقل شده است.

مراجع

- [6] Shamani, Morteza, Hamed Ahmadi, and Mohammadreza Ramezani. "Probabilistic framework of cooperative disperse generation resources scheme for producing required reactive power through simultaneous active and reactive power markets." CIREC-Open Access Proceedings Journal 2017.1 (2017): 2837-2841.
- [7] Samimi, Abouzar, Mehdi Nikzad, and Pierluigi Siano. "Scenario-based stochastic framework for coupled active and reactive power market in smart distribution systems with demand response programs." Renewable Energy 109 (2017): 22-40.
- [8] Ahmadi, Hamed, and Asghar Akbari Foroud. "A stochastic framework for reactive power procurement market, based on nodal price model." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 49 (2013): 104-113.
- [9] Ahmadimanesh, A., and M. Kalantar. "A novel cost reducing reactive power market structure for modifying mandatory generation regions of producers." Energy Policy 108 (2017): 702-711.
- [10] Homaei, Omid, and Shahram Jadid. "Investigation of synchronous generator in reactive power market—an accurate view." IET Generation, Transmission & Distribution 8.11 (2014): 1881-1890.
- [11] Khandani, Ali, and Asghar Akbari Foroud. "Design of reactive power and reactive power reserve market." IET Generation, Transmission & Distribution 11.6 (2017): 1443-1452.
- [12] Ahmadi, Hamed, and Asghar Akbari Foroud. "Improvement of the simultaneous active and reactive power markets pricing and structure." IET Generation, Transmission & Distribution 10.1 (2016): 81-92.
- [13] Zhong, Jin, and Kankar Bhattacharya. "Toward a competitive market for reactive power." IEEE Transactions on Power Systems 17.4 (2002): 1206-1215.
- [14] D. S. Kirschen and G. Strbac, *Fundamentals of Power System Economics*: Copyright © 2004 John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [15] Wong, P., Albrecht, P., Allan, R., et al.: 'The IEEE reliability test system-1996', IEEE Trans. Power Syst., 1999, 14, (3), pp. 1010-1020.
- [16] Shapiro, Carl. "The theory of business strategy." The Rand journal of economics 20.1 (1989): 125-137.
- [17] Nauenberg, Eric, Kisalaya Basu, and Harish Chand. "Hirschman-Herfindahl index determination under incomplete information." Applied Economics Letters 4.10 (1997): 639-642.
- [18] Naldi, Maurizio, and Marta Flamini. "Interval estimation of the Herfindahl-Hirschman index under incomplete market information." Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on. IEEE, 2014.
- [1] Ahmadi, Hamed, and Asghar Akbari Foroud. "Design of joint active and reactive power reserve market: a multi-objective approach using NSGA II." IET Generation, Transmission & Distribution 10.1 (2016): 31-40.
- [2] Amjady, N., A. Rabiee, and H. A. Shayanfar. "A stochastic framework for clearing of reactive power market", Energy, 35.1 (2010), pp. 239-245.
- [3] Rueda-Medina, Augusto C., and Antonio Padilha-Feltrin. "Distributed generators as providers of reactive power support—A market approach." IEEE Transactions on Power Systems 28.1 (2013): 490-502.
- [4] Kargarian, A., M. Raoufat, and M. Mohammadi. "Reactive power market management considering voltage control area reserve and system security." Applied energy 88.11 (2011): 3832-3840.
- [5] Reddy, S. Surender, A. R. Abhyankar, and P. R. Bijwe. "Market clearing of joint active and reactive power using multi objective optimization considering voltage dependent load models." Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. IEEE, 2011.

زیر نویس ها

- ³ Lost Opportunities Cost
⁴ Independent System Operator
⁵ Market Clearing Price
⁶ Reactive Power Compensation Cost
⁷ Uniform Pricing

- ¹ Distributed Generators
² Opportunity Zone

-
- 8 Net Surplus
 - 9 Units Participation Rate
 - 10 Market Profitability Rate
 - 11 Profitable Player Number Rate
 - 12 Net Surplus Distribution Rate
 - 13 Standard Deviation
 - 14 Generation Sharing Rate
 - 15 Risk of Work In Capacity Limits
 - 16 Cost Rate for Lost Opportunity
 - 17 Number of Generating Units in Opportunity Zone
 - 18 Equalized Weighting
 - 19 Separate Weighting
 - 20 Coefficient of Variation
 - 21 Arithmetic Mean
 - 22 Market Shares
 - 23 Federal Energy Regulatory Commission
 - 24 Herfindahl-Hirschman Index