برنامه‌ریزی کوتاه مدت انرژی و توان راکتیو در میکروگرید چندگانه با درنظر گرفتن بازار بالادست

محمدمهدی بامدادیان[1] حسین سیفی[2] محمدکاظم شیخ‌الاسلامی[3]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران
mm.bamdadian@gmail.com
۲- استاد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران
seifi-ho@modares.ac.ir
۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت مدرس- تهران- ایران
aleslam@modares.ac.ir

چکیده: هدف از این مقاله، پیشنهاد مدلی برای برنامه‌ریزی کوتاه مدت میکروگرید چندگانه متشکل از میکروگریدهای ولتاژ پایین، منابع تولید پراکنده و بارهای قابل قطع از دیدگاه بهره‌بردار آن است. درمدل پیشنهادی، بهره‌بردار میکروگرید چندگانه نخست بازار داخلی انرژی را با بازیگران داخلی آن یعنی میکروگریدهای ولتاژ پایین، منابع تولید پراکنده و بارهای قابل قطع اجرا کرده و سپس با مدل‌سازی بازار بالادست در نقش بازیگری دوگانه، بازار نهایی داخلی را با قیمت‌گذاری محلی و لحاظ‌کردن تلفات اجرا می‌کند. در ادامه، این مدل با تعریف بازاری برای توان راکتیو در میکروگرید چندگانه، برای اجرای هم‌زمان بازارهای توان اکتیو و راکتیو با هدف بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی توسعه یافته است. در پایان به‌منظور پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج روش‌های پیشنهادی از شبکه‌ای نمونه استفاده شده است.

کلمات کلیدی: میکروگرید، میکروگریدچندگانه، خدمات جانبی، پخش بار بهینه، رفاه اجتماعی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۰۹/۲۱
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۰۲
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حسین سیفی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – بزرگ‌راه جلال آل احمد – پل نصر - دانشگاه تربیت مدرس - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

علائم

N مجموعه کل شین‌های میکروگرید چندگانه

N_G مجموعه شین‌های تولید (منابع تولید پراکنده و میکروگریدهای ولتاژ پایین)

N_L مجموعه شین‌های بار

N_{LC} مجموعه شین‌های بارهای قابل قطع

δ_i, V_i اندازه و زاویه ولتاژ شین i ام

θ_{ij}, Y_{ij} اندازه و زاویه عنصر (i,j) در ماتریس ادمیتانس شبکه

$Q_{G,n}, P_{G,n}$ توان اکتیو و راکتیو تولیدی در شین n ام

$Q_{LC,m}, P_{LC,m}$ توان اکتیو و راکتیو مصرفی بارهای قابل قطع در شین m ام

$P_{G,n}^{\min}, P_{G,n}^{\max}$ حد بیشینه و کمینه توان اکتیو تولیدی در شین n ام

$P_{LC,m}^{\min}, P_{LC,m}^{\max}$ حد بیشینه و کمینه توان اکتیو مصرفی بار قابل قطع در شین m ام

$Q_{G,n}^{\min}, Q_{G,n}^{\max}$ حد بیشینه و کمینه توان راکتیو تولیدی در شین n ام

$Q_{LC,m}^{\min}, Q_{LC,m}^{\max}$ حد بیشینه و کمینه توان راکتیو مصرفی بار قابل قطع در شین m ام

$S_{i-j}, S_{i-j}^{\max}$ توان ظاهری بیشینه و توان ظاهری عبوری از خط بین شین‌های i و j

$V_i^{\min}, V_i^{\max}$ حد بیشینه و کمینه مجاز دامنه ولتاژ در شین i ام

$U(P_{L,m})$ تابع پیشنهاد بار در شین m ام

$C(P_{G,n})$ تابع پیشنهاد تولید در شین n ام

λ هزینه افزایشی سیستم برای تحویل انرژی در شین مرجع

$\lambda_{Loss,i}$ ضریب مشارکت تلفات شین i ام

$\mu_{i,j}$ ضریب لاگرانژ ناشی از تراکم خط

P_N توان اکتیو مبادله شده با بازار بالادست

Q_N توان راکتیو مبادله شده با بازار بالادست

$U(\mathrm{P_N})$ تابع پیشنهاد بازار بالادست هنگامی که به صورت بار مدل می‌شود.

$C(P_N)$ تابع پیشنهاد بازار بالادست هنگامی که به صورت منبع تولید مدل می‌شود.

$£$ قیمت نهایی محلی توان اکتیو در هر شین

ξ قیمت نهایی محلی توان راکتیو در هر شین

۱- مقدمه

با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه‌های برق با فن‌آوری‌های مختلف، عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر و همچنین تبدیل شدن شبکه‌های توزیع غیرفعال به شبکه‌های توزیع فعال، چالش‌های عمده‌ای برای طراحی سیستم‌های قدرت در آینده مطرح می‌شود. یکی از روش‌های تجمیع منابع تولید پراکنده، مفهومی به نام میکروگرید است. میکروگریدها شبکه‌های توزیع فعال ولتاژ پایین و یا ولتاژ متوسطی هستند که از مجموعه‌ای متشکل از بارها، منابع تولید پراکنده و ادوات کنترلی تشکیل شده‌اند. به دلیل استقلال در بهره‌برداری، این شبکه‌ها می‌توانند از شبکه اصلی جدا شده و به صورت جزیره‌ای بهره‌برداری شوند[۳،۴،۱،۲].

بهره‌بردار میکروگرید موظف به اجرای مجموعه وظایفی است که ضمن تضمین امنیت سیستم، رضایت را برای اعضای شبکه خود به همراه آورد. به این منظور باید برنامه‌ریزی[۱] با هدف رضایت منابع و بارهای کل سیستم تحت کنترل، در نظرگرفتن تمامی قیود فنی و اقتصادی و همچنین ارتباط بالقوه با بازارهای بالادست، به اجرا درآید.

برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و بهره‌برداری از میکروگریدها نخست باید ساختار بهره‌برداری و کنترلی میکروگریدها که وظیفه بهره‌برداری از این شبکه‌ها را بر عهده دارند، مطرح شود. سه سطح کنترلی برای میکروگریدها تعریف می گردد[۵]:

۱- بهره‌بردار سیستم توزیع (DNO[۲]) یا (MO[۳])

۲- مدیریت یا کنترل‌کننده مرکزی میکروگرید (MGCC[۴])

۳- کنترل‌کننده‌های محلی(LC[۵])

بهره‌بردار سیستم توزیع در بالاترین سطح کنترلی قرار دارد که ناظر بر ناحیه‌ای متشکل از چند میکروگرید و منابع تولید پراکنده است. این نهاد، مسئولیت برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه توزیع مشتمل بر چندین میکروگرید را داراست. در تحقیقات اتحادیه اروپا این شبکه معادل میکروگرید ولتاژ متوسطی مدل می‌شود که مدیریت آن می‌تواند بهره‌بردار شبکه توزیع فعال باشد. شبکه توزیع با وجود منابعی چون میکروگریدهای ولتاژ پایین، منابع تولید پراکنده با اندازه بزرگ‌تر و مجموعه‌ای از بارهای قابل قطع و غیرقابل قطع با مفهومی چون میکروگریدچندگانه[۶] تعریف می‌شود[۶]. بنابراین میکروگریدچندگانه به شبکه توزیع فعالی اطلاق می‌شود که اجزای آن، میکروگریدهای ولتاژ پایین، منابع تولید پراکنده، بارهای ولتاژ متوسط قابل قطع، غیرقابل قطع و ادوات کنترلی و اندازه‌گیری باشند.

واسط میان میکروگرید چندگانه و میکروگریدهای ولتاژ پایین، MGCC است که متناسب با ساختار کنترلی مدنظر، وظایفی چون بیشینه‌سازی سود و هماهنگی کنترل‌های محلی را برعهده دارد. پایین‌ترین سطح کنترل شامل کنترل‌های محلی است. این کنترل‌ها در محل بار و منابع تولید پراکنده نصب

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.1 Spring 2016

می‌شوند، تا در صورت لزوم دستورات را از سطوح بالاتر دریافت کرده و اجرا کنند.

دو روش کنترلی غیرمتمرکز و دیگری روش کنترل متمرکز برای مدیریت میکروگریدها تعریف شده است.

کنترل غیرمتمرکز میکروگرید شرایطی را مهیا می‌کند تا منابع انرژی پراکنده و بارها در بالاترین سطح از استقلال در کنترل میکروگرید فعالیت کنند[۵].

در [۷]، جزییات برنامه‌ریزی یک میکروگرید بر پایه استراتژی غیرمتمرکز توضیح داده شده است. در [۸]، روش‌هایی برای شرکت و مدل‌سازی مکانیزم‌های بازار برای میکروگریدها ارائه شده است. در [۹]، با در نظر گرفتن هر میکروگرید به عنوان یک عامل در میکروگرید چندگانه جدا از شبکه، برنامه‌ای روزانه ابتدا با هدف کمینه‌کردن هزینه تولید و با لحاظ‌کردن تامین بار داخلی اجرا شده است. سپس مقادیر مناسب برای پیشنهاد در بازار میکروگرید چندگانه استخراج شده است.

در کنترل متمرکز میکروگریدها، بهره‌بردار میکروگرید وظیفه بهره‌برداری و برنامه‌ریزی بهینه از میکروگرید از طریق بهینه‌سازی و ارتباط با کنترل‌های محلی را دارد. از طرف دیگر وظیفه امنیت و رعایت قیود امنیتی میکروگرید بر عهده مدیریت متمرکز است[۵].

[۱۱،۱۰]، جزییات مدیریت متمرکز به منظور برنامه‌ریزی میکروگریدها را نشان می‌دهند و خط مشی این روش را بهینه‌سازی بر پایه منابع داخلی و با در نظرگیری قابلیت مبادله توان اکتیو و راکتیو با شبکه بالادست می‌دانند. در [۱۰]، مساله برنامه‌ریزی روزانه میکروگرید بر پایه دوهدف اجرا می‌شود. نخست کل تقاضای میکروگرید تا حد امکان توسط منابع محلی تامین می‌شود، بدون آن که تبادلی با شبکه بالادست لحاظ شود. بر این اساس بهره‌بردار میکروگرید باید هزینه بهره‌برداری از میکروگرید را در هر ساعت کمینه کند. دوم با شبکه بالادست برای تبادل توان در ارتباط باشد و بر این اساس سود انتظاری خود برای شرکت در بازار بالادست و با فروش انرژی به بارهای داخلی را بیشینه نماید.

در [۱۲]، مساله بهینه‌سازی در حالت جزیره‌ای برای یک بازه زمانی یک ساعته ارائه شده است. در [۱۳]، علاوه بر بیشینه‌سازی درآمد منابع تولید از فروش انرژی و مطالعات اقتصادی، بهینه‌سازی با اهداف کاهش آلودگی و در راستای اهداف زیست‌محیطی در میکروگرید اجرا شده است. در [۱۴]، میکروگریدی متشکل از تولیدات پراکنده تجدیدپذیر و باتری مدل شده است و به منظور کمینه‌کردن تامین توان در یک ناحیه بدون در نظر داشتن شبکه، بهینه‌سازی با در نظر داشتن قیود برابری بار و تولید و همچنین قیود فنی هر یک از منابع و ذخیره‌سازها اجرا شده است. در [۱۵]، میکروگریدی تجاری و کوچک معرفی شده و با لحاظ قیمت تجهیزات، ترکیب بهینه برای نصب منابع تولید پراکنده به دست آمده و در ادامه برنامه‌ریزی روزانه برای کمینه‌کردن هزینه تامین بارهای حرارتی و الکتریکی اجرا شده است.

در [۱۶]، بازاری داخلی در میکروگرید در حالت جزیره‌ای و بدون لحاظ‌کردن شبکه بالادست اجرا شده است. در این مقاله، پیشنهادات تولیدات پراکنده بر پایه تابعی خطی ارائه شده است. دو سناریو، یکی بدون مدل‌کردن پیشنهادات بار و دیگری با مدل‌سازی خطی پیشنهادات بار اجرا شده است.

نویسندگان مقاله [۱۷]، در یک میکروگرید جزیره‌ای و جریان مستقیم، رقابت میان منابع تولید پراکنده را با استفاده از تئوری بازی مدل کرده‌اند.

در [۱۸]، میکروگریدی چندگانه مدل شده و ابتدا بازار انرژی روز پیش با قیمت‌دهی منابع و بارها و با لحاظ‌کردن بازار بالادست به عنوان منبع اجرا شده است. در ادامه، بازار تنظیم نزدیک به زمان واقعی، با هدف کمینه‌کردن انحراف از برنامه اولیه ارائه شده است.

یکی از مزیت‌های میکروگریدها علاوه بر شرکت در بازار انرژی، شرکت در بازار خدمات جانبی است[۵،۲]. پاره‌ای از مقالات نیز، برنامه‌ریزی را با هدف شرکت در بازار انرژی و خدمات جانبی در نظر گرفته‌اند.

در [۱۹]، میکروگریدی با منابع PV در نظر گرفته شده و برنامه‌ریزی برای تولید انرژی و خدمات ذخیره انجام شده است. در [۲۱،۲۰]، توانایی و سودآوری ارائه خدمات جانبی توسط میکروگرید چندگانه به همراه تولید انرژی بررسی شده است. در [۲۲]، ساختار برنامه‌ریزی روزانه برای شرکت در بازار انرژی و ذخیره اولیه مطرح شده که قابل تعمیم به ارائه ذخیره ثانویه و ثالثیه است. در ادامه، برنامه‌ریزی برای بیشینه‌سازی سود این میکروگرید چندگانه در بازار انرژی و ذخیره اولیه ارائه شده است.

با در نظر داشتن مطالعات اشاره شده، مشاهده می‌شود به‌رغم اینکه، وظیفه امنیت میکروگرید به بهره‌بردار میکروگرید واگذار شده، در برنامه‌ریزی‌ها، قیود شبکه لحاظ نشده است. به دلیل مدل نشدن شبکه میکروگرید، تلفات و توان راکتیو نادیده گرفته می‌شوند، در حالی که در یک شبکه توزیع، لحاظ‌کردن تلفات در مطالعات ضروری است. از طرف دیگر تحلیلی برای ارزیابی اقتصادی خدمات جانبی توان راکتیو در برنامه‌ریزی‌ها

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

ارائه نشده است. در روش‌های ارائه شده برای اجرای بازار بر پایه پیشنهادات منابع و بارها، میکروگرید در حالت جزیره‌ای در نظر گرفته شده و بازار بالادست مدل نشده است و تنها در یک مرجع، بازار بالادست با دید منبع مدل می‌شود.

در این مقاله سعی می‌شود بر پایه پیشنهادات منابع و بارها در میکروگرید چندگانه، برنامه‌ای با هدف بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی ارائه شود. در این مدل روشی برای پیاده‌سازی بازاری متمرکز با لحاظ‌کردن قیود شبکه و بر اساس قیمت‌گذاری محلی و با مدل‌کردن نقش دوگانه منبع و بار برای بازار بالادست پیشنهاد می‌شود. در ادامه، پیشنهادی برای تشکیل بازار توان راکتیو در میکروگرید چندگانه و تبادل با بازار بالادست مطرح و سپس روندی به منظور بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی از این بازار تشریح می‌شود.

در بخش دوم، تعاملات بازار میکروگرید چندگانه در روش پیشنهادی تشریح می‌گردد. در بخش سوم، جزییات روش پیشنهادی به منظور شرکت میکروگرید چندگانه در بازار انرژی و در بخش چهارم این روش برای شرکت همزمان در بازار انرژی و توان راکتیو تعمیم می‌یابد. در بخش پنجم با استفاده از شبکه نمونه نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده می شود.

۲- تعاملات بازار در روش پیشنهادی

یک میکروگرید علاوه بر تجمیع منابع تولید پراکنده، می‌کوشد یک عضو انعطاف‌پذیر از شبکه بالادست باشد. برای نیل به این منظور، بهره‌بردار میکروگرید (میکروگرید چندگانه) می‌کوشد، در ساختارهای متفاوت از مالکیت، ضمن حفظ امنیت و برآوردن قیود شبکه در میکروگرید، پروفیل بهینه بهره‌برداری را ارائه کند.

برنامه‌ریزی میکروگریدها با اهداف یاد شده، در محیط تجدید ساختار یافته و در تعامل با بازار برق از محورهای حائز اهمیت این حوزه است که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود. در این مقاله یک میکروگرید چندگانه که شبکه‌ای متصل به ولتاژ متوسط است، مدل می‌شود. در این ساختار، بهره‌بردار میکروگرید چندگانه (میکروگرید ولتاژ متوسط)، که در واقع می‌تواند همان بهره‌بردار شبکه فعال توزیع باشد، وظیفه تامین امنیت و اجرای بازار داخلی در میکروگرید چندگانه را با حضور منابع تولید پراکنده با ظرفیت بالاتر، میکروگریدهای ولتاژ پایین و شبکه بالادست (بازار سطح انتقال) به عهده دارد.

بهره‌بردار متمرکز میکروگرید چندگانه باید نیاز بارهای خود را یا از بازارهای بالادستی (بازار عمده‌فروشی برای میکروگرید چندگانه) یا توسط تولیدکنندگان محلی تامین کند. علاوه بر تامین انرژی، بهره‌بردار میکروگرید چندگانه وظیفه تامین خدمات جانبی را که ماهیت محلی دارند و برای امنیت شبکه مورد نظر نیاز است، به عهده دارد. به عنوان مثال، بهره‌بردار میکروگرید چندگانه باید از تامین توان راکتیو مورد نیاز برای امنیت شبکه خود اطمینان حاصل کند. اگر بازارهای بالادستی مقررات و ساختارهای لازم برای قرارداد و تبادل این خدمات را داشته باشند، باید تبادل با آن‌ها را نیز در برنامه‌ریزی خود لحاظ کند. برای نمونه، میکروگرید چندگانه می‌تواند در بازارهای خدمات جانبی سراسری مانند ذخیره به بهره‌بردار انتقال پیشنهاد دهد. شکل ۱ تصویری از تعاملات بازار مورد نظر را ارائه می‌کند.

همان‌طور که در شکل نمایش داده شده، بهره‌بردار میکروگرید چندگانه ضمن اجرای بازار انرژی داخلی، می‌تواند خدمات جانبی سراسری نظیر ذخیره را به بهره‌بردار انتقال ارائه کند. همچنین می‌تواند بازار محلی توان راکتیو به عنوان خدمات جانبی محلی را برگزار کرده و چنانچه بهره‌بردار انتقال نیاز به توان راکتیو داشته باشد، آن‌را نیز در برنامه‌ریزی خود لحاظ کند. میکروگریدهای کوچک متصل به این شبکه نیز می‌توانند در بازار داخلی سطح توزیع (انرژی و توان راکتیو) شرکت کنند و با توجه به موقعیت منابع و بارهای داخلی، سود خود را از شرکت در این بازارها بیشینه کنند.

از آن‌جا که میکروگرید، شبکه‌ای محلی است و زیرساخت‌های اندازه‌گیری و کنترلی لازم را دارد، گزینه‌ای مناسب برای تشکیل بازار توان راکتیو است که ماهیتی ناحیه‌ای دارد. در این مقاله علاوه بر بازار انرژی، سازوکارهای لازم برای شرکت در بازارهای توان راکتیو هم مدنظر قرار می‌گیرد. به دلایل زیادی از جمله وابستگی توان اکتیو و راکتیو در معادلات پخش بار متناوب، همچنین وابستگی این دو در برآوردن قیود امنیتی شبکه چون قید حد حرارتی خطوط و وابستگی توان اکتیو و راکتیو در منحنی قابلیت منابع تولید پراکنده، پیشنهاد می‌شود چنانچه بسترهای محاسباتی لازم فراهم است بازارهای توان اکتیو و راکتیو به صورت هم‌زمان و به هم پیوسته اجرا شود. از دیدگاه تبادل توان اکتیو با شبکه بالادستی، یک میکروگرید در هر بازه زمانی با یک منبع تولید توان یا با باری کنترل‌پذیر مدل می‌شود. چنانچه جریان‌های مختلفی از تبادل توان اکتیو و راکتیو میکروگرید با شبکه بالادستی در نظر گرفته شود، سه وضعیت مختلف را می‌توان در نظر داشت.

چنانچه میکروگرید، توان اکتیو و راکتیو از شبکه دریافت کند، به صورت باری کنترل‌پذیر رویت می‌شود. اگر توان اکتیو به شبکه تزریق کند مشابه ژنراتور سنکرونی است که می‌تواند توان

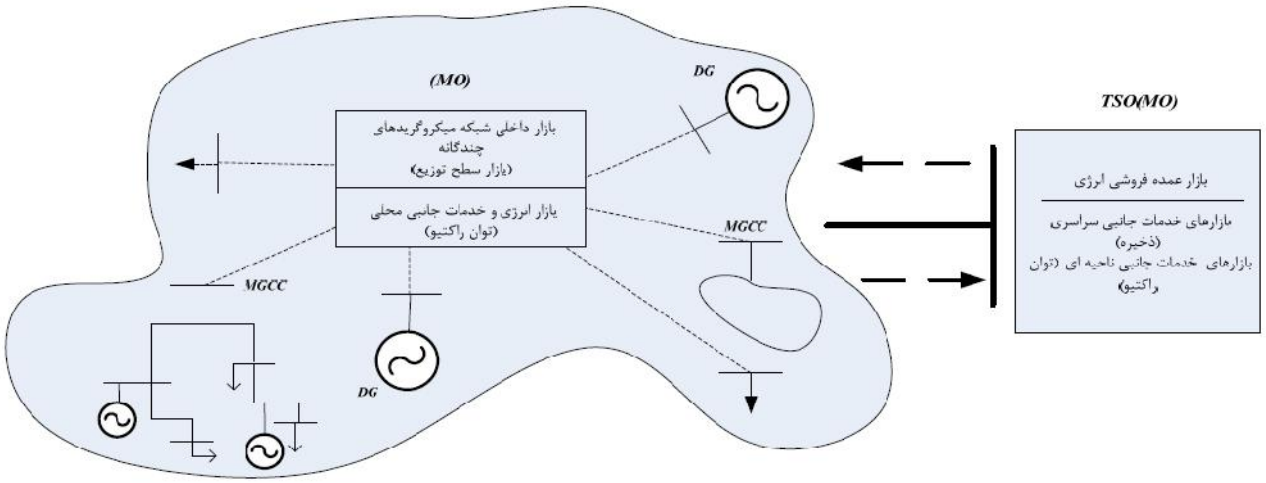
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.1 Spring 2016

راکتیو، جذب و یا تولید کند. اگر توان اکتیو دریافت و توان راکتیو به شبکه تزریق کند، از دید بالادست همچون کندانسور سنکرون رویت می‌شود.

از دیدگاه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری، ساختار میکروگرید چندگانه به گونه‌ای ترسیم می‌شود که در آن منابع تولید (تولیدات پراکنده و میکروگریدهای ولتاژ پایین) برای تامین انرژی و حتی خدمات جانبی مورد نیاز برای میکروگرید در یک بازار داخلی با یکدیگر رقابت کنند. همچنین بارهای قابل قطع و میکروگریدهای ولتاژ پایین در جایی‌که نقش بار دارند، می‌توانند در نقش بارهای حساس به قیمت در بازار داخلی شرکت کرده و یک بازار متمرکز دو طرفه را که هم سمت تولید و هم سمت تقاضا پیشنهاد می‌دهند، شکل دهند.

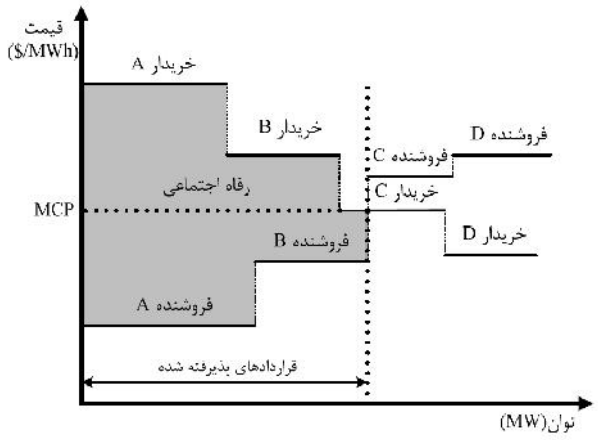
با این دیدگاه، بهره‌بردار این بازار داخلی، بهره‌بردار میکروگرید چندگانه است که علاوه بر بهره‌برداری ایمن از شبکه، وظیفه برنامه‌ریزی با هدف رضایت تمامی بازیگران را در فضای بازار بر عهده دارد. در این‌جا فرض می‌شود بازار داخلی میکروگرید چندگانه یک بازار ساعتی است که در هر ساعت منابع تولید میکروگریدچندگانه، پیشنهادهای تولید توان خود را در پله‌هایی از تولید با قیمت معین اعلام می‌دارند.

یک راه برای این پیشنهادها این است که تولیدات پراکنده براساس هزینه‌های حاشیه‌ای و میکروگریدهای ولتاژ پایین، بر پایه‌ی سود انتظاری خود این پیشنهادها را ارائه دهند. علاوه بر این منابع، بارهای قابل قطع نیز پیشنهادهای خود را در پله‌هایی از توان درخواستی و با قیمت معین به بهره‌بردار میکروگرید اعلام می‌کنند.



شکل (۱): تعاملات بازار در میکروگریدچندگانه

چنانچه میکروگرید چندگانه متصل به شبکه بالادست در نظر گرفته شود (در اغلب ساعت‌ها)، بهره‌بردار میکروگرید باید با در نظر گرفتن ظرفیت و قیمت اتصال به بازار بالادست و همچنین لزوم تامین بارهای غیرقابل قطع، برنامه‌ای برای یافتن ترکیب بهینه اجرا می‌کند. فرآیند تبادل اقتصادی این بازار داخلی را می‌توان به صورت بازار متمرکز با قیمت‌گذاری محلی یکنواخت برق[۷] مدل کرد که منابع تولید پراکنده به طور افزایشی قیمت‌دهی می‌کنند. در مقابل، بارهای قابل قطع براساس نیاز خود و به طور نزولی قیمت‌دهی می‌کنند. قیمت تسویه بازار (MCP[۸])، از تقاطع بالاترین قیمت تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به دست می‌آید. شکل ۲ فرآیند تسویه بازار با مبادلات متمرکز را نشان می‌دهد.



شکل (۲): فرآیند تسویه بازار متمرکز

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

۳- برنامه‌ریزی میکروگریدچندگانه در بازار انرژی

نخست حالتی در نظر گرفته می‌شود که بهره‌بردار میکروگرید چندگانه، صرفاً مجری بازار انرژی است. در قدم اول برای اجرای بازار، منابع تولید پراکنده، میکروگریدهای ولتاژ پایین و بارهای قابل قطع درون میکروگرید چندگانه، پیشنهادهای سمت تولید و تقاضا را در بلوک‌هایی با توان و قیمت معین به بهره‌بردار ارائه می‌کنند. بارهای قابل قطع با ضریب توان معین مدل می‌شوند.

بهره‌بردار این پیشنهادها را دریافت و بار درخواستی بارهای غیرقابل قطع را نیز به آن ضمیمه می‌کند. آنچه در این‌جا اهمیت می‌یابد، استفاده از ظرفیت بالقوه در بازار بالادست هنگام اتصال به شبکه بالادستی است. بهره‌بردار باید به‌گونه‌ای این ظرفیت را مدل کند که در مجموع، حقوق تمامی اجزای میکروگرید چندگانه رعایت شود. علاوه بر آن باید با در نظر داشتن تمامی جوانب، برنامه‌ریزی را با هدف حداکثرکردن رفاه اجتماعی در کل میکروگرید چندگانه ارائه کند. از دیدگاه بازار، رفاه اجتماعی به صورت مجموع مازاد خالص[۹] فروشندگان و خریداران تعریف می‌شود.

بر پایه مدلی که در ادامه به منظور برنامه‌ریزی میکروگریدهای چندگانه مطرح می‌شود، بهره‌بردار میکروگرید باید در مرحله اول بدون در نظر داشتن شبکه بالادست، بازار داخلی در میکروگرید را با در نظر داشتن شبکه و قیود امنیتی آن اجرا کند. از آن‌جا که هدف بهره‌بردار، برنامه‌ریزی بهینه اقتصادی با حفظ قیود امنیتی است، باید روی شبکه، پخش بار بهینه متناوب (ACOPF) را اجرا کند. با این کار اثر تلفات شبکه و توان راکتیو عناصر آن نیز در نظر گرفته می‌شود. در این صورت می‌توان قیمت نقطه‌ای هر شین را محاسبه و اثرات تلفات و تراکم را نیز در آن لحاظ کرد. در این مسئله اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها، توان‌های اکتیو و راکتیو منابع تولید و بارها به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته می شوند. روابط (۱) تا (۹) فرمول‌بندی ریاضی اجرای بازار داخلی را بیان می‌کند.

$$\text{Max SW}_1 = \sum_{m=1}^{N_L} U(P_{L,m}) - \sum_{n=1}^{N_G} C(P_{G,n}) \qquad (۱)$$

$$\text{Subject to:}$$

$$P_{G,i} - P_{L,i} - \sum V_i V_j Y_{i,j} \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = 0, \forall i \in N \qquad (۲)$$

$$Q_{G,i} - Q_{L,i} - \sum V_i V_j Y_{i,j} \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = 0, \forall i \in N \qquad (۳)$$

$$P_{G,n}^{Min} \le P_{G,n} \le P_{G,n}^{Max}, \forall n \in N_G \qquad (۴)$$

$$Q_{G,n}^{Min} \le Q_{G,n} \le Q_{G,n}^{Max}, \forall n \in N_G \qquad (۵)$$

$$P_{LC,m}^{Min} \le P_{LC,m} \le P_{LC,m}^{Max}, \forall m \in N_{LC} \qquad (۶)$$

$$Q_{LC,m}^{Min} \le Q_{LC,m} \le Q_{LC,m}^{Max}, \forall m \in N_{LC} \qquad (۷)$$

$$V_i^{Min} \le V_i \le V_i^{Max}, \forall i \in N \qquad (۸)$$

$$S_{i-j} \le S_{i-j}^{Max}, \forall i,j \in N \qquad (۹)$$

روابط (۲) و (۳) معادلات پخش بار متناوب (ACPF) در هر شین به عنوان قیود تساوی هستند. همچنین روابط (۴) تا (۷) به ترتیب مربوط به بازه مجاز توان اکتیو و راکتیو تولیدکنندگان و بارهای قابل قطع هستند. در نهایت روابط (۸) و (۹) قیود امنیتی میکروگرید، شامل حدود حرارتی خطوط شبکه و ولتاژ شین‌ها به عنوان قیود نامساوی هستند.

اگر مسئله با این تابع هدف حل شود، قیمت نهایی محلی در اجرای بازار داخلی ($LMP^{۱۰}$) برای تمامی شین‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$LMP_i = \lambda + \lambda \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_i} + \sum_{i,j=1}^{N_l} \mu_{i,j} \frac{\partial P_{i,j}}{\partial P_i} \qquad (۱۰)$$

$$LMP_i = \lambda + \lambda_{Loss,i} + \lambda_{C,i} \qquad (۱۱)$$

$\lambda_{C,i}$ حاصل‌ضرب حساسیت کمیت محدود شده به دلیل تراکم خط بین شین i ام و j ام در $\mu_{i,j}$ می‌باشد.

بعد از اجرای اولیه بازار، بهره‌بردار میکروگرید باید بازار بالادست را نیز مدل کرده و در برنامه‌ریزی نهایی لحاظ کند. چنانچه میکروگرید به تنهایی و با منابع موجود قادر به تامین بار داخلی خود نبوده یا قیمت شین متصل به شبکه بالادستی در اجرای بازار داخلی بیشتر از قیمت انرژی در بازار بالادست در آن ساعت باشد، شبکه بالادست با یک تولیدکننده و با یک پیشنهاد یک پله‌ای با ظرفیت برابر با حداکثر توان قابل انتقال به میکروگرید و قیمت انرژی در بازار بالادست مدل می‌شود.

اما چنانچه قیمت شین اتصال به شبکه بالادست در اجرای بازار داخلی کمتر از قیمت انرژی در بازار بالادستی باشد، شبکه بالادست به صورت یک بار قابل قطع با پیشنهاد باری با ظرفیت حداکثر توان انتقالی به شبکه اصلی و قیمتی برابر با قیمت انرژی در بازار بالادست مدل می‌شود. سپس بازار بر اساس این مدل‌سازی اجرا می‌شود. روند برنامه‌ریزی را می‌توان به شکل ۳ نمایش داد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]

(۱۲)

$$\lambda_N < \pi_N \Rightarrow I_N = 1$$

(۱۳)

$$\lambda_N > \pi_N \Rightarrow I_N = 0$$

که در آن I_N متغیر باینری نشان‌دهنده وضعیت مدل بازار بالادست است. در نهایت بهره‌بردار باید پخش بار بهینه را بار دیگر برای تابع هدف زیر با تمامی قیود (۲) تا (۹) به انضمام دو قید زیر حل کند.

$$\text{Max SW}_T = \sum_{m=1}^{N_L} U(P_{L,m}) + U(P_N).I_N - \sum_{n=1}^{N_G} C(P_{G,n}) - C(P_N).(1_I_N)$$

(۱۴)

Subject to:

(۱۵)

$$P_N \le P_N^{Max}$$

(۱۶)

$$Q_N \le Q_N^{Max}$$

تمامی اطلاعات فنی شبکه، توان عبوری از خطوط، قیمت نهایی محلی در تمام شین‌ها و قیمت و مقدار توان‌های پذیرفته شده تمامی بازیگران بازار از اجرای این بهینه‌سازی بدست می‌آید. در این مقاله برای شبیه‌سازی از نرم افزار MATLAB و از MIPS[۱۱] برای حل مسئله استفاده شده است[۲۳].

در پایان چنانچه قیمت نهایی محلی در هر شین با £ نمایش داده شود، دریافتی و پرداختی منابع و بارها در هر شین را می‌توان به صورت زیر نشان داد.

(۱۷)

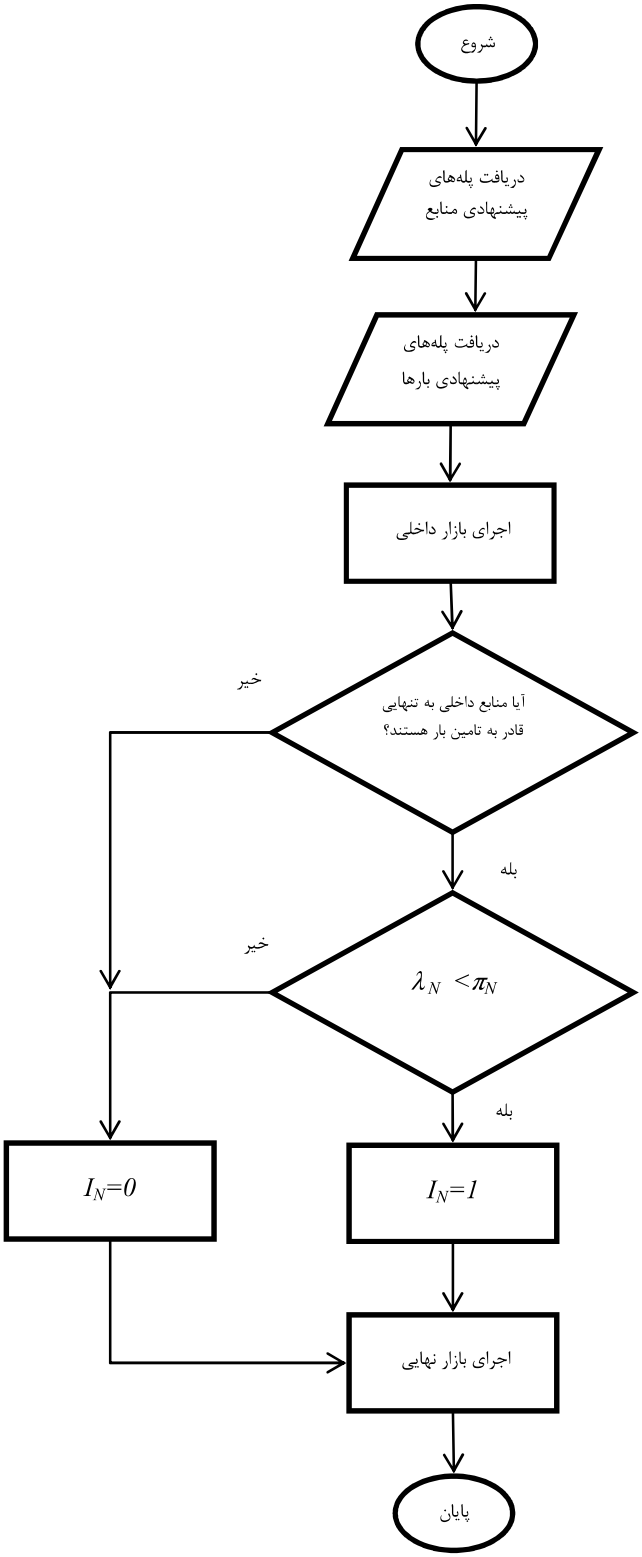
$$\text{Revenue}_{G,n} = £_n.P_{G,n}$$

(۱۸)

$$\text{Payment}_{L,m} = £_m.P_{L,m}$$

۴- برنامه‌ریزی میکروگریدچندگانه در بازار انرژی و توان راکتیو

در این حالت فرض می‌شود بهره‌بردار میکروگرید، مجری بازار انرژی و توان راکتیو درون میکروگرید است. یعنی علاوه بر بازار انرژی، بازار توان راکتیو هم درون میکروگرید چندگانه به اجرا گذاشته می‌شود. روند قیمت‌گذاری توان راکتیو همچون توان اکتیو، محلی در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۳): روند برنامه‌ریزی با مدل‌کردن بازار بالادست

اگر قیمت شین اتصال به بالادست در اجرای بازار داخلی با λ_N و قیمت انرژی در بالادست با π_N نشان داده شود، داریم:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

منابع تولید یعنی منابع تولید پراکنده و میکروگریدهای ولتاژ پایین علاوه بر بازار انرژی می‌توانند در بازار توان راکتیو هم پیشنهادهای خود را ارائه دهند. آن‌چه در این‌جا اهمیت می‌یابد این است که قیمت توان راکتیو به اندازه کافی کمتر از توان اکتیو در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر اجرای بازار توان راکتیو و محدودیت در تامین توان راکتیو توسط منابع داخلی نباید بر بازار توان اکتیو تاثیر گذارد.

از آن‌جا که بارهای قابل قطع، با ضریب توان ثابت مدل شده است، چنانچه برای اجرای بازار، برای آن‌ها هم پیشنهادی مدل شود، در آن صورت ممکن است توان اکتیو این بارها در بازار انرژی محدود شود. در واقع در عمل نیز توان راکتیو بارها وابسته به توان اکتیو است و مستقل از آن معنا پیدا نمی‌کند. به این منظور، بازار توان راکتیو به شکل بازاری با پیشنهاد در سمت تولید مدل شده است. در واقع ترکیب اصلی برای تامین بارهای غیرقابل قطع از بازار توان اکتیو محاسبه شده و بارهای راکتیو وابسته به آن‌ها برای بازار راکتیو به عنوان بار قطعی تلقی می‌شوند. تنها می‌توان شبکه را به عنوان بار قابل قطع توان راکتیو در نظر گرفت.

با این دید، بهره‌بردار میکروگرید چندگانه برای اجرای نهایی بازار باید مراحلی را طی کند. ابتدا همچون گذشته پیشنهادهای سمت تولید برای توان اکتیو و راکتیو و همچنین پیشنهادهای سمت مصرف برای توان اکتیو، را دریافت می‌کند. سپس بازار داخلی را بدون تبادل با بازار بالادست به اجرا می‌گذارد. بعد از اینکه قیمت توان اکتیو در شین بالادست محاسبه شد، بازار بالادست برای توان اکتیو به شکل منبع و یا بار قابل قطع مدل می‌شود. در این حالت فهرست بارهایی که باید تامین شوند، به دست می‌آید.

سپس در مرحله بعد، بازار با درنظر داشتن توان اکتیو اجرا شده و فقط پیشنهادهای توان راکتیو منابع داخلی برای تامین بارهای راکتیو در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر تبادل توان راکتیو با بازار بالادست مدل نمی‌شود. در این حال قیمت در شین بالادست برای توان راکتیو به‌دست می‌آید. چنانچه این قیمت با $\lambda_{N,Q}$ و همچنین قیمت بازار بالادست برای توان راکتیو با $\pi_{N,Q}$ نشان داده شوند، در روابط زیر داریم.

$$\lambda_{N,Q} < \pi_{N,Q} \Rightarrow I_{N,Q} = 1 \quad (۱۹)$$

$$\lambda_{N,Q} > \pi_{N,Q} \Rightarrow I_{N,Q} = 0 \quad (۲۰)$$

که در آن $I_{N,Q}$ متغیر باینری نشان‌دهنده وضعیت مدل بازار بالادست برای توان راکتیو است. چنانچه میکروگرید به تنهایی و با منابع موجود توان راکتیو قادر به تامین بار راکتیو خود نبوده یا قیمت شین متصل به شبکه بالادستی در اجرای بازار داخلی بیشتر از قیمت توان راکتیو در بازار بالادست در آن ساعت باشد، شبکه بالادست با یک تولیدکننده توان راکتیو با یک پیشنهاد یک پله‌ای با ظرفیت برابر با حداکثر توان راکتیو قابل انتقال به میکروگرید و قیمت توان راکتیو در بازار بالادست مدل می‌شود. اما چنانچه قیمت شین اتصال به شبکه بالادست کمتر از قیمت توان راکتیو در بازار بالادستی باشد، شبکه بالادست به صورت یک بار قابل قطع راکتیو با پیشنهاد باری با ظرفیت حداکثر توان راکتیو انتقالی به شبکه اصلی و قیمتی برابر با قیمت توان راکتیو در بازار بالادست مدل می‌شود. در نهایت بهره‌بردار باید پخش بار بهینه را بار دیگر با در نظر داشتن شبکه به عنوان منبع یا بار راکتیو مدل کند و سپس نتایج نهایی را از برنامه استخراج کند.

در پایان چنانچه قیمت نهایی محلی برای توان اکتیو در هر شین با $£$ و قیمت‌های محلی برای توان راکتیو با ξ نمایش داده شوند، دریافتی و پرداختی منابع و بارها در هر شین را می‌توان به صورت زیر نشان داد.

$$\text{Revenue}_{G,n} = £_n . P_{G,n} + \xi_n . Q_{G,n} \quad (۲۱)$$

$$\text{Payment}_{L,m} = £_m . P_{L,m} + \xi_m . Q_{G,m} \quad (۲۲)$$

۵- شبیه سازی و مطالعات عددی

برای مطالعه روش پیشنهای برنامه‌ریزی میکروگرید چندگانه از شبکه ۵۵ شینه که در [۱۸]، معرفی شده، استفاده شده است. شکل ۹ در پیوست ساختار شبکه مورد نظر را نشان می‌دهد. در شین‌های ۱۳، ۴۳، ۴۶، ۴۷ و ۴۸ منابع تولید پراکنده نصب شده‌اند. همچنین در شین‌های ۴۹، ۵۰، ۵۱، ۵۲ و ۵۳ میکروگریدهای ولتاژ پایین قرار دارند. بخشی یا تمامی بارهای متصل به شین‌های ۱۳، ۱۴،۱۵، ۱۶، ۱۷، ۳۶، ۴۰ و ۴۴ بارهای قابل قطع هستند. سایر بارهای این شبکه بارهای غیر قابل قطع می‌باشند.

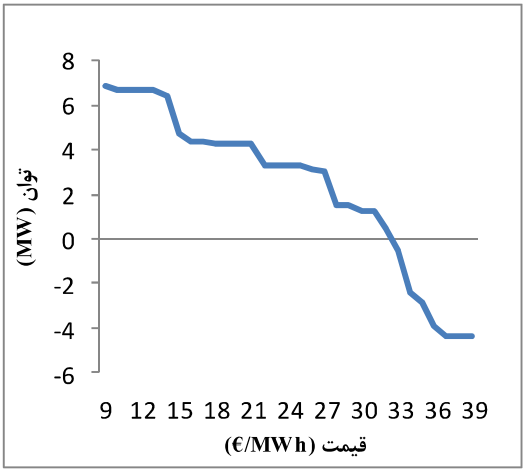
۵-۱- برنامه‌ریزی در بازار انرژی

جدول ۲ پیوست مشخصات پیشنهادهای سمت منابع و بارهای قابل قطع را برای یک ساعت نشان می‌دهد.

با اجرای برنامه برای ارزیابی مدل پیشنهادی در بازار انرژی، در گام اول بازار داخلی اجرا شده و مقادیر قیمت‌های محلی برای شین‌های مختلف استخراج می‌شود. قیمت شین متصل به شبکه بالادست از اجرای بازار داخلی معادل λ_N =۳۲/۹۵ €/MWh استخراج می‌شود. شکل ۴ تبادل با شبکه بالادست را در قیمت‌های مختلف بازار نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]

مقادیر کمتر از λ_N، شبکه بالادست به صورت منبع تولید و برای مقادیر بالای آن به صورت بار قابل قطع مدل شده است. در قیمت‌های پایین سهم بیشتری از تولید نصیب شبکه بالادست شده و تمامی بارهای غیرقابل قطع و قابل قطع را تامین می‌کند. با بالاتر رفتن قیمت، منابع تولید پراکنده نیز وارد مدار می‌شوند. همچنین برخی از بارهای قابل قطع، با توجه به قیمت پیشنهادی قطع میگردند.



شکل (۴): تبادل انرژی در قیمت‌های مختلف بازار بالادست

هنگامی که قیمت بازار بالادست از λ_N بیشتر شود، میکروگرید چندگانه توان به بالادست می‌فروشد. با بالا رفتن قیمت، تمامی منابع تولید وارد مدار می‌شوند و اغلب بارهای قابل قطع، قطع می‌شوند. تا جایی‌که تنها بارهای غیرقابل قطع، تامین شده و مابقی تولید به شبکه بالادست فروخته می‌شود.

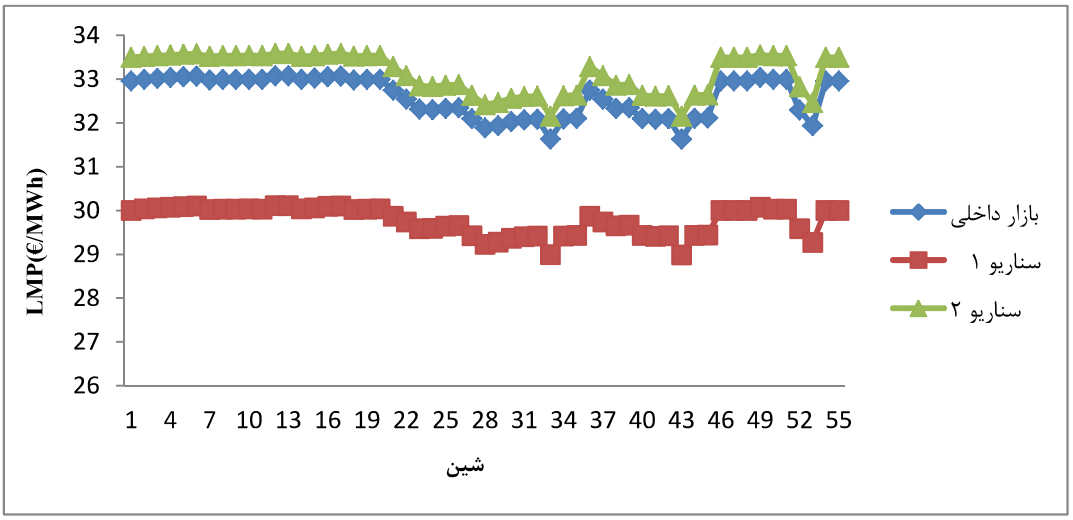
به طور خاص نتایج برای دو سناریو با قیمت بازار بالادست متفاوت نشان داده شده است. در سناریوی اول قیمت بازار بالادست π_N=۳۰€/MWh و در سناریوی دوم π_N=۳۳/۵ €/MWh در نظر گرفته شده است. در سناریو اول، شبکه بالادست به عنوان منبع تولید با پیشنهاد یک پله‌ای و با قیمت متناظر و در سناریوی دوم به صورت یک بار قابل قطع با پیشنهاد یک پله‌ای و با قیمت متناظر آن مدل شده است. جدول ۱ تغییر در ترکیب واحدها را در اجرای بازار داخلی و اجرای بازار نهایی در هر دو سناریو نشان می‌دهد.

جدول (۱): تغییر در ترکیب واحدها

شماره شین	توان تولیدی در اجرای بازاردخلی (MW)	توان تولیدی در اجرای بازارنهایی سناریوی اول (MW)	توان تولیدی در اجرای بازارنهایی سناریوی دوم (MW)
۴۳	۱/۵	۱/۵	۱/۵
۴۶	۱/۶	۱	۱/۶
۵۵	۰	۱/۲۱	-۱/۴۱
۱۴	-۰/۵۷	-۰/۸۳۸	۰
۱۵	-۰/۸۳۸	-۰/۸۳۸	۰
۳۸	۰	-۰/۱۳۵	۰
۴۰	۰	-۰/۲۱۶	۰

همان‌طور که از جدول مشاهده می‌گردد، در سناریوی اول تولیدکننده حاشیه‌ای همان شبکه بالادست است که ۱/۲۱ مگاوات توان از آن خریداری می‌گردد. در مقایسه با بازار داخلی از آنجا که سطح قیمت کاهش می‌یابد، تولید پراکنده متصل به شین ۴۶ قادر به تولید پله‌ی دوم خود نیست. از آنجا که با ورود بازار بالادست، قیمت‌ها نسبت به بازار داخلی کاهش یافته، بارهای قابل قطع متصل به شین‌های ۳۸ و ۴۰ که در بازار داخلی قطع شده بودند در این حالت تامین می‌شوند. همچنین بار قابل قطع متصل به شین ۱۴ در بازار داخلی به این دلیل که بار حاشیه‌ای است تنها ۰/۵۷ مگاوات آن تامین می‌شود که در اجرای بازار نهایی تمامی آن قابل تامین است. چنانچه سناریوی دوم مد نظر قرار گیرد، بار حاشیه‌ای در این حالت همان شبکه بالادست است که ۱/۴۱ مگاوات توان به آن فروخته می‌شود. در این حالت نسبت به بازار داخلی تغییری در ترکیب منابع دیده نمی‌شود. اما علاوه بر بارهای قابل قطع متصل به شین‌های ۳۶، ۳۸ و ۴۰، بار شین‌های ۱۴ و ۱۵ نیز به دلیل بالا رفتن قیمت قطع می‌شوند.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

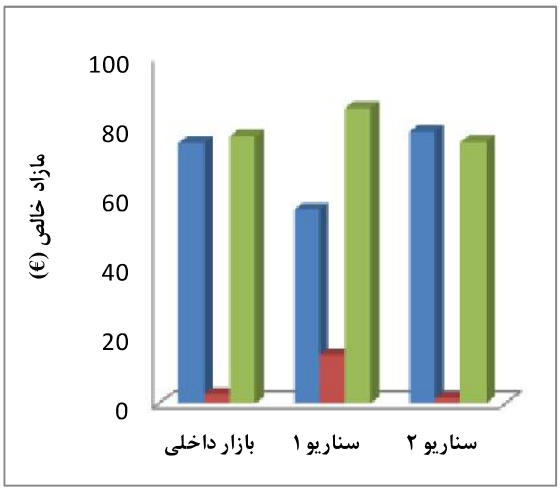


شکل (۵): قیمت محلی شین‌ها در اجرای بازار

شکل ۵ قیمت‌های حاشیه‌ای را برای تمامی شین‌ها در حالت اجرای بازار داخلی (در غیاب بازار بالادست) و در دو سناریوی اجرای بازار نهایی نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با مدل‌کردن شبکه بالادست به عنوان منبع انرژی، قیمت در شین‌های مختلف کاسته شده که در جهت حمایت از مصرف‌کنندگان است. در حالت دوم نیز با افزایش قیمت و قابلیت فروش به شبکه بالادست، سود منابع افزایش می‌یابد. از آن‌جا که در این دو سناریو تراکمی در خطوط اتفاق نیفتاده، این نوسانات قیمت در شین‌های مختلف، ناشی از تلفات در شبکه است.

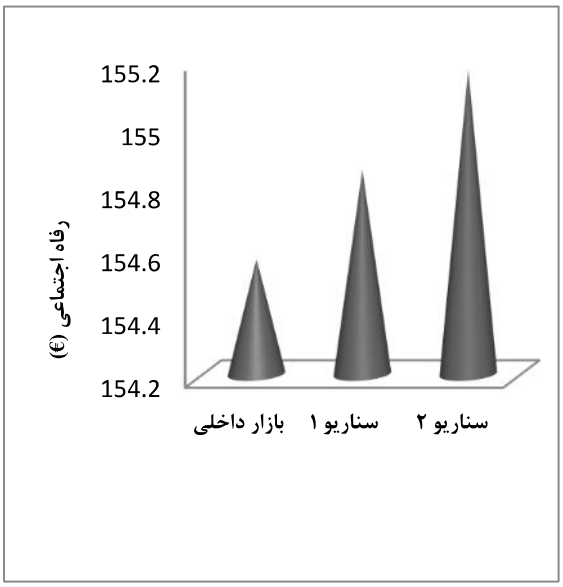
سقف قیمت تامین بارهای قطعی در بازار برابر $۶۰€/MWh$ فرض شده است (از آن‌جا که هدف مقایسه رفاه اجتماعی است، مستقل از انتخاب این قیمت است)، تا مازاد خالص منابع تولید، مازاد خالص بارهای قابل قطع و غیرقابل قطع در اجرای بازار داخلی و اجرای بازار نهایی مقایسه شود.



شکل (۶): مقایسه مازاد خالص منابع و بارها در اجرای بازار

در شکل ۶ ستون اول مازاد خالص منابع، ستون دوم مازاد خالص بارهای قابل قطع و ستون سوم مازاد خالص بارهای غیرقابل قطع را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل دیده می‌شود در سناریوی اول با مدل کردن شبکه به عنوان منبع، از سود دیگر منابع کاسته شده است، اما در عوض مازاد خالص بارها افزایش یافته است. همان‌طور که از جدول نیز مشاهده شد بارهای قابل قطع بیشتری هم تامین می‌شوند. در سناریوی دوم با مدل کردن شبکه به عنوان بار قابل قطع، مازاد خالص بارها اندکی کاهش یافته ولی در عوض سود منابع افزایش می‌یابد.

چنانچه در شکل ۷ نشان داده شده است، مجموع مازاد خالص بارها و منابع با هم مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود در هر دو سناریو با اتصال شبکه، رفاه اجتماعی افزایش یافته، که این همان هدف مطلوب بهره‌بردار میکروگرید چندگانه است.



شکل (۷): مقایسه رفاه اجتماعی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]

۵-۲- برنامه‌ریزی در بازار انرژی و توان راکتیو

مطابق با مدل برنامه‌ریزی برای اجرای هم‌زمان بازار توان اکتیو و راکتیو در میکروگرید چندگانه، منابع این شبکه علاوه بر پیشنهاد اکتیو، پیشنهاد راکتیو هم ارائه می‌کنند. جدول ۳ پیوست پیشنهاد منابع داخلی برای توان راکتیو را نشان می‌دهد.

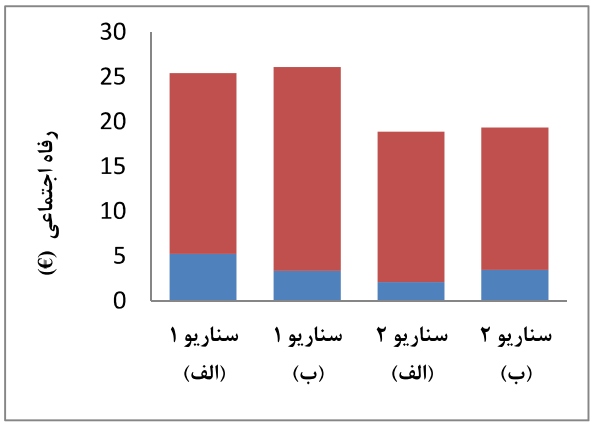
در این بخش سناریوهای بخش قبل با همان قیمت‌های بازار بالادست برای توان اکتیو در نظر گرفته می‌شوند. قیمت بازار بالادست برای توان راکتیو در هر دو سناریو، ۳ $€/MVarh$ فرض می‌شود. مطابق با بخش پیش، شبکه بالادست برای تبادل توان اکتیو، در سناریوی اول به شکل منبع و در سناریوی دوم به صورت بار قابل قطع مدل می‌شود. در گام اول بازار، بدون تبادل راکتیو با شبکه اجرا می‌شود. در این صورت شبکه بالادست صرفاً برای توان اکتیو مدل شده و قیمت توان راکتیو در شین اتصال به شبکه با احتساب این شرایط استخراج شده است.

در سناریوی اول و در حالت پایه یعنی اجرای بازار بدون تبادل توان راکتیو با شبکه، قیمت توان راکتیو برای شین اتصال معادل $\lambda_{N,Q}$ =۳/۶۹ $€/MVarh$ استخراج می‌شود. در این وضعیت بازار بالادست به صورت منبع توان راکتیو مدل شده است.

از اجرای بازار در حالت پایه، واحد حاشیه‌ای تولید توان راکتیو، واحد متصل به شین ۴۶ به دست می‌آید که از پله دوم پیشنهادی خود به میزان ۰/۵۲ مگاوار توان راکتیو تولید می‌کند. واحد متصل به شین ۵۱ نیز تمامی توان راکتیو متناظر با پیشنهاد پله اول خود را ارائه می‌کند. روشن است که با مدل‌کردن شبکه به عنوان منبع توان راکتیو، قیمت توان راکتیو در تمامی شین‌ها کاهش داشته است. با اضافه شدن بازار، شبکه واحد حاشیه‌ای تولید توان راکتیو شده است و قیمت را تا مرز ۳$€/MVarh$ کاهش می‌دهد. بنابراین واحد متصل به شین ۴۶، دیگر تولیدی از پله دوم پیشنهادی خود ندارد و علاوه بر آن با کاهش قیمت در شین ۵۱، از تولید توان راکتیو این واحد نیز کاسته می‌شود.

به شکل مشابه در سناریوی دوم، ابتدا شبکه بالادست برای توان اکتیو به شکل بار قابل قطع مدل‌شده و تبادلی برای توان راکتیو در نظر گرفته نمی‌شود. در این وضعیت از آن‌جا که قیمت توان اکتیو در میکروگرید تا قیمت بار قابل قطع (یعنی شبکه) بالا می‌رود، تعداد بیشتری از بارهای قابل قطع تامین نمی‌گردند. در نتیجه از میزان بار راکتیو در کل شبکه نیز کاسته می‌شود. در این حالت قیمت شین متصل به شبکه بالادست برای توان راکتیو ۲/۵۲$€/MVarh$ می‌شود. همین کاهش قیمت، خود موید کاهش تقاضا در بار راکتیو است. با مدل‌کردن شبکه به عنوان بار قابل قطع برای توان راکتیو، قیمت‌ها در تمامی شین‌ها تا قیمت شبکه برای توان راکتیو یعنی ۳ $€/MVarh$ افزایش می‌یابد. در حالت پایه، یعنی بدون مدل‌کردن شبکه برای تولید راکتیو، واحدهای حاشیه‌ای تولید توان راکتیو، واحدهای متصل به شین‌های ۴۳ و ۴۹ بود که به ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۰۶ مگاوار توان راکتیو تولید می‌کردند. اما در این‌جا تولید توان راکتیو را طبق پیشنهاد می‌برند و علاوه بر آن واحدهای متصل به شین‌های ۵۱ و ۵۳ که تولیدی نداشتند، در اجرای نهایی، توان راکتیو تولید می‌کنند. در این حالت میزان ۰/۳ مگاوار توان راکتیو به شبکه بالادست فروخته می‌شود.

حال رفاه اجتماعی در هر دو سناریو، در حال اجرای بازار نهایی در مقایسه با حالت پایه (مدل نکردن شبکه برای تبادل توان راکتیو) مقایسه می‌شود. برای این کار، اگر سقف قیمت بازار توان راکتیو ۱۰ $€/MVar$ در نظر گرفته شود (از آنجا که مقایسه مد نظر است، به این قیمت وابسته نیست)، شکل ۸ سود منابع برای تولید توان راکتیو و مازاد خالص بارهای راکتیو را در هر دو سناریو نشان می‌دهد. در هر سناریو، (الف) معرف حالتی است که فقط بازار داخلی توان راکتیو اجرا شده و (ب) حالتی است که شبکه هم درنظر گرفته شده است. در سناریوی اول سود منابع از بابت فروش توان راکتیو کاهش داشته است ولی مازاد خالص بارها افزایش می‌یابد. در سناریوی دوم، مازاد خالص بارها اندکی کاهش داشته، اما در عوض سود منابع افزایش می‌یابد. درمجموع با مدل‌کردن شبکه برای توان راکتیو، رفاه اجتماعی حاصل از بازار توان راکتیو افزایش داشته است که این همان هدف بهره‌بردار از برنامه‌ریزی بازار توان راکتیو است.



شکل (۸): مقایسه رفاه اجتماعی با مدل‌کردن بازار بالادست برای توان راکتیو

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی برای برنامه‌ریزی میکروگرید چندگانه در بازار انرژی و توان راکتیو درنظر گرفته شد. در این مدل، تولیدات پراکنده به همراه میکروگریدهای کوچک تولید خود را در بازار انرژی پیشنهاد می‌دهند. بارهای قابل قطع نیز به صورت بارهای حساس به قیمت مدل می‌شوند که پیشنهاد قیمت خود را به بهره‌بردار اعلام می‌کنند. بهره‌بردار، بازاری ساعتی بر پایه قیمت‌گذاری محلی و با حفظ قیود امنیت اجرا می‌کند. با این دیدگاه تخصیص هزینه تلفات نیز در این بازار در نظر گرفته می‌شود. فرمول‌بندی ریاضی برای روند دو مرحله‌ای اجرای بازار داخلی و اجرای بازار نهایی با درنظر گرفتن شبکه بالادست با نقش بازیگر دوگانه ارایه شد. با خروجی نتایج شبیه‌سازی در شرایط مختلف مشاهده شد که با لحاظ‌کردن این روند، رفاه اجتماعی در کل مجموعه میکروگرید چندگانه افزایش یافت. در اجرای همزمان بازار توان اکتیو و راکتیو در این ساختار پیشنهادات توان راکتیو در سمت تولید بوده و تنها شبکه بالادست با نقش دوگانه مدل شد. در این گام نیز با معرفی روندی سه مرحله‌ای، افزایش رفاه اجتماعی ناشی از اجرای هم‌زمان بازار توان راکتیو به همراه توان اکتیو برای تمامی اعضای میکروگرید چندگانه با نتایج شبیه‌سازی تایید شد.

با دقت در نتایج می‌توان گفت در چنین بازارهایی و با در نظرگیری تبادل با شبکه بالادست، منابع و بارهای قابل قطع باید دقت کافی در ارائه پیشنهادات خود داشته باشند. زیرا با توجه به حجم مبادله با شبکه بالادست در تمامی حالات، شبکه بالادست بازیگر حاشیه‌ای است و بدون دقت در پیشنهادات قیمت، امکان تامین نشدن بار یا عدم تولید منابع وجود دارد. از این رو پیشنهاد می‌شود در کارهای آینده با تمرکز بر این موضوع، مدل‌هایی برای پیشنهاددهی هر یک از بازیگران تخصیص یابد تا این نقصان را پوشش دهد.

از طرف دیگر مدل‌سازی انواع منابع تولید پراکنده با عدم قطعیت تولید نیز می‌تواند از دیگر زمینه‌های کاری برای توسعه مدل فوق باشد.

مراجع

[1] W. A. Lidula, A. D. Rajapakse, "Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, pp. 186-202, 2011.

[2] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, C. Marnay, "Microgrids", Power and Energy Magazine, IEEE, vol. 5, pp. 78-94, 2007.

[۳] حسامی نقش‌بندی، علی، حبی‌بی، فرشی‌د، بی‌ورانی، حسن، "**طراحی ی‌ک کنترل‌کننده مقاوم برای پای‌داری ولتاژ ی‌ک ری‌ز شبکه در حالات مختلف کاری**"، مجله انجمن مهندسی‌ن برق و الکترونی‌ک ای‌ران، سال دهم شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۲.

[۴] ستاره، محمد ، قاسمی، حسن، "**مدی‌ری‌ت توان در ری‌زشبکه متعادل جزی‌ره‌ای با در نظر گرفتن پای‌داری سی‌گنال کوچک و پاسخ دی‌نامی‌کی**"، مجله انجمن مهندسی‌ن برق و الکترونی‌ک ای‌ران، سال دوازدهم شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۴.

[5] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, A. Dimeas, "Microgrids management", Power and Energy Magazine, IEEE, vol. 6, pp. 54-65, 2008.

[6] J. A. Pecas Lopes, A. Madureira, …, "Advanced architectures and control concepts for more microgrids, Work Pacage D-DD1", INESC Porto, 2007.

[7] A. L. Dimeas , N. D. Hatziargyriou, "Operation of a multiagent system for microgrid control", Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 20, pp. 1447-1455, 2005.

[8] D. Rui , G. Deconinck, "Market mechanism of smart grids: Multi-agent model and interoperability", IEEE Conference Networking, Sensing and Control (ICNSC), pp. 8-13, 2011.

[9] T. Logenthiran, D. Srinivasan, A. M. Khambadkone, "Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system", Electric Power Systems Research, vol. 81, pp. 138-148, 2011.

[10] A. G. Tsikalakis , N. D. Hatziargyriou, "Centralized control for ooptimizing microgrids operation", Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 23, pp. 241-248, 2008.

[11] N. D. Hatziargyriou, A. Dimeas, A. G. Tsikalakis, J. A. P. Lopes, G. Karniotakis, J. Oyarzabal, "Management of microgrids in market environment", IEEE Conference Future Power Systems, 2006.

[12] C. A. Hernandez-Aramburo, T. C. Green, N. Mugniot, "Fuel consumption minimization of a microgrid", Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 41, pp. 673-681, 2005.

[13] N. D. Hatziargyriou, A. G. Anastasiadis, J. Vasiljevska, A. G. Tsikalakis, "Quantification of economic, environmental and operational benefits of Microgrids", IEEE PowerTech, pp. 1-8, 2009.

[14] H. Morais, P. Kadar, P. Faria, Z. A. Vale, H. M. Khodr, "Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming", Renewable Energy, vol. 35, pp. 151-156, 2010.

[15] C. Marnay, G. Venkataramanan, M. Stadler, A. S. Siddiqui, R. Firestone, B. Chandran, "Optimal technology selection and operation of commercial-building microgrids", Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 23, pp. 975-982, 2008.

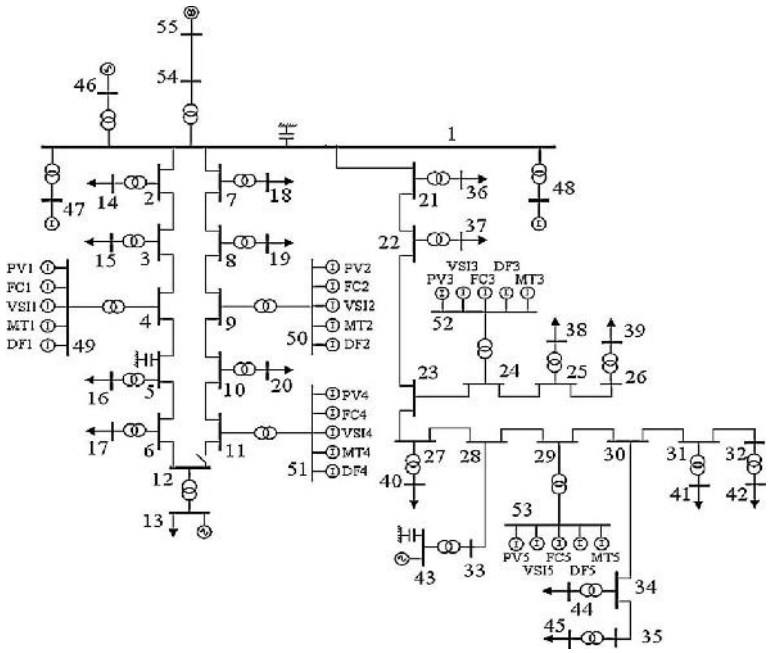
[16] A. Sinha, R. Lahiri, S. Byabortta, S. Chowdhury, P. Crussley, "Formulation of pricing mechanism for Microgrid energy", SmartGrids for Distribution, IET-CIRED, pp. 1-4 ,2008.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]

[17] W. W. Weaver , P. T. Krein, "Game-theoretic control of small-scale power systems", Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 24, pp. 1560-1567, 2009.
[18] M. H. Gomes , J. T. Saraiva, "Allocation of reactive power support, active loss balancing and demand interruption ancillary services in MicroGrids", Electric Power Systems Research, vol. 80, pp. 1267-1276, 2010.
[19] D. Lu , B. Francois, "Strategic framework of an energy management of a microgrid with a photovoltaic-based active generator", International Symposium Advanced Electromotion, pp. 1-6, 2009.
[20] J. T. Saraiva , M. H. Gomes, "Provision of some ancillary services by microgrid agents", International Conference on the European Energy Market (EEM), pp. 1-8 ,2010.
[21] C. Yuen , A. Oudalov, "The feasibility and profitability of ancillary services provision from multi-microgrids", IEEE Power Tech, pp. 598-603, 2007.
[22] C. Yuen, A. Oudalov , A. Timbus, "The provision of frequency control reserves from multiple microgrids", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 58, pp. 173-183, 2011.
[23] R. D. Zimmerman, "Draft-Matpower 4.0b1 user's manual", Power Systems Engineering Research Center (PSERC), Dec. 2009.

پیوست



شکل (۹): میکروگرید چندگانه مورد مطالعه

جدول(۲): پیشنهادهای سمت بار و منابع در میکروگرید چندگانه

بارهای قابل قطع			منابع تولید				
قیمت پیشنهادی پله بار *(€/MWh)*	پله پیشنهادی بار *(MW)*	شماره شین	قیمت پیشنهادی پله دوم *(€/MWh)*	پیشنهاد اکتیو پله دوم *(MW)*	قیمت پیشنهادی پله اول *(€/MWh)*	پیشنهاد اکتیو پله اول *(MW)*	شماره شین
۳۴	۰/۹	۱۳	۱۸	۰/۱	۱۰	۰/۳	۱۳
۳۳	۰/۸۳۸	۱۴	۲۷	۰/۵	۱۵	۱	۴۳
۳۳/۵	۰/۸۳۸	۱۵	۳۲	۰/۶	۱۵	۱	۴۶
۳۴/۵	۰/۴۱۹	۱۶	۳۵	۰/۶	۲۲	۱	۴۷
۳۵	۰/۴۱۹	۱۷			۲۸	۰/۸	۴۸
۲۹	۰/۲۱۶	۳۶			۳۶	۰/۲۵	۴۹
۳۱	۰/۱۳۵	۳۸			۲۸	۰/۱۱۶	۵۰
۳۲	۰/۲۱۶	۴۰	۳۶/۵	۰/۲	۲۶	۰/۲	۵۱
۳۳	۰/۱۳۵	۴۴			۲۷	۰/۲۵	۵۲
					۱۴	۰/۲۵	۵۳

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

جدول ۳: پیشنهادهای سمت تولید برای ارائه توان راکتیو

شماره شین	۱۳	۴۳	۴۶	۴۷	۴۸	۴۹	۵۱	۵۲	۵۳
پیشنهاد راکتیو پله اول (MVar)	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۷	۰/۴	۰/۱	۰/۲۵	۰/۱	۰/۱
قیمت پیشنهادی پله اول (€/MVar)	۲	۲/۲	۱	۱/۵	۴	۲/۵	۳	۱	۲/۵
پیشنهاد راکتیو پله دوم (MVar)		۰/۸	۰/۷	۰/۷			۰/۲۵		
قیمت پیشنهادی پله دوم (€/MVar)		۶/۵	۳/۵	۶			۵		

زیرنویس‌ها

[1] Scheduling
[2] Distribution Network Operator
[3] Market Operator
[4] Micro Grid Central Controller
[5] Local Controller
[6] Multi-Microgrid
[7] Uniform Locational Pricing
[8] Market Clearing Price
[9] Net Surplus
[10] Local Marginal Price
[11] Matlab Interior Point Solver

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-05-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.7.1]