مدیریت انرژی با تمرکز بر تاب آوری برای ائتلاف چندین شبکه خرد بر اساس یک مدل نظریه بازی همکارانه

سیده مهسا سرحدی[۱]، سودابه سلیمانی*[۲]، سید بابک مظفری[۳]

۱-دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
mahsa.sarhadi@srbiau.ac.ir
*۲- دکتری تخصصی، گروه مهندسی برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
s.soleymani@srbiau.ac.ir
۳- دکتری تخصصی، گروه مهندسی برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
mozafari@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۲۰

چکیده: در این مقاله، مدیریت انرژی با تمرکز بر تاب‌آوری چندین ریز شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور، یک مدل مبتنی بر نظریه بازی سه سطحی برای مدیریت انرژی ریز شبکه طراحی شد. در این مدل، ائتلافی بین ریزشبکه‌ها برای رسیدن به مدیریت انرژی جمعی بهینه با در نظر گرفتن مفهوم تاب‌آوری شکل می‌گیرد. ابتدا یک مسئله دوسطحی از دیدگاه اپراتور مرکزی برای تعیین میزان بهینه مبادله انرژی بین شبکه اصلی و چندین ریز شبکه مطرح می‌شود. مدل دوسطحی پیشنهادی به‌عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی با محدودیت‌های تعادلی (MPEC) مطرح شد. در مسئله دوسطحی،یک مسئله بهینه‌سازی از دیدگاه کلی ائتلاف مطرح می‌شود. بنابراین، کمینه کردن هزینه عملیاتی کل ائتلاف به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. همچنین، سطح پایین مسئله نیز از دیدگاه هر ریزشبکه مدل‌سازی می‌شود.برای مدل‌سازی مسئله مدیریت انرژی با تمرکز بر تاب‌آوری، امکان قطع ارتباط احتمالی بین ائتلاف و شبکه اصلی بر اساس سناریوها مدل‌سازی می‌شود. پس از حل مسئله MPEC و تعیین تبادل انرژی، ریزشبکه‌های محلی از نظر اپراتور محلی در سطح سوم به صورت جداگانه عملیاتی می‌شوند و وضعیت عملیاتی واحدهای الکتریکی و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی تعیین می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها با نرم‌افزار GAMS نشان می‌دهد که با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله، با در نظر گرفتن سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، بار قطع شده و همچنین هزینه عملیاتی در حالت تاب‌آور برابر با حالت عادی خواهد بود. همچنین مطالعات نشان می‌دهد که با استفاده از مدل سه سطحی پیشنهادی، کل هزینه تا حدود ۵/۷ درصد در حالت عادی و حدود ۷ درصد در حالت تاب آوری نسبت به مدل دوسطحی سنتی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: ریز شبکه چندگانه،تاب آوری، ائتلاف، نظریه بازی.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

نامگذاری

شاخصها

شاخص ریز شبکه	j
شاخص ساعات	t
شاخص سناریوها	s

ثوابت

تعداد سناریوها	Ns
تعداد کل ریز شبکه ها	Nm
هزینه حاشیه ای واحد تولید متداول(CGU)	MC_j^c
زمان حادثه	t_s^I
مدت حادثه	T^I
احتمال سناریو s	ω_s
هزینه حاشیه ای شارژ کردن سیستم ذخیره انرژی (ESS)	MC_j^{ch}
هزینه حاشیه ای دشارژ ESS	MC_j^{dis}
هزینه دریافت شده توسط بار منعطف در ازای هر واحد انرژی در ریز شبکه j	β_j^{DR}
قیمت انرژی مبادله شده در زمان t	α_t
حداکثر ظرفیت CGU	$\overline{P_j^c}$
حداقل محدودیت تولید در CGU	$\underline{P_j^c}$
افزایش CGU	RU_j^c
کاهش CGU	RD_j^c
حداکثر محدودیت انرژی ESS	$\overline{P_j^s}$
بهره وری شارژ کردن در ESS	$\eta_j^{s,ch}$
بهره وری دشارز کردن در ESS	$\eta_j^{s,dis}$
حداکثر محدودیت انرژی ESS	$\overline{E_j^s}$
حداقل محدودیت انرژی ESS	$\underline{E_j^s}$
انرژی مورد نیاز برای پاسخ به تقاضا	$\overline{P_j^{DR}}$
ظرفیت انرژی قابل مبادله	$\overline{P_j^{trade}}$
حداکثر انرژی قابل مبادله با شبکه بالادستی	$\overline{P^{c,trade}}$

متغیرها

تولید CGU	P_{jst}^c
انرژی شارژ ESS	P_{jst}^{ch}
انرژی دشارژ ESS	P_{jst}^{dis}
کاهش انرژی توسط ESS منعطف	P_{jst}^{DR}
انرژِ خریداری شده توسط ریز شبکه j در ساعت t	P_{jt}^{buy}
انرژی فروخته شده توسط ریز شبکه j در ساعت t	P_{jt}^{sell}
Energy sold by microgrid *j*at hour *t*	
وضعیت شارژ ESS	E_{jst}^s
تقاضای انرژی غیر منعطف	P_{jst}^{fl}
تقاضای انرژی منعطف	P_{jst}^{vl}
انرژِ فروخته شده به بالا دست	$P_t^{c,sell}$
انرژی خریداری شده از بالا دست	$P_t^{c,buy}$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

۱- مقدمه

مدیریت انرژی یک کارکرد مهم برای ریزشبکه چندگانه است. معمولاً مدیریت انرژی در هر ریز شبکه توسط اپراتورهای محلی انجام می‌شود تا با در نظر گرفتن وضعیت اقتصادی و فنی،نیازهای محلی را تامین کنند. همچنین، اپراتور مرکزی، علی‌رغم تصمیمات هر اپراتور محلی، محدودیت‌های تمام ریزشبکه چندگانه را بررسی میکند [۱].

به همین دلیل، تصمیم‌گیری مناسب با در نظر گرفتن اهداف اپراتور مرکزی و محلی به طور همزمان یکی از چالش‌های مهم است. تصمیم‌گیری مناسب در مدیریت انرژی از دیدگاه اپراتور سیستم مرکزی، علی‌رغم تصمیم‌گیری‌های مستقل اپراتورهای محلی،یکی از مهم‌ترین مسائل پیشرو است که در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

از سوی دیگر، رخدادهای با احتمال کم و تأثیر بالا، مانند فجایع طبیعی،یکی از چالش‌هایی است که باید در مطالعات مختلف سیستم‌های قدرت مد و همچنین در مدیریت ریز شبکه ها مورد توجه قرار گیرد. این موضوع به عنوان هدف اصلی این مقاله در نظر گرفته شده است.بسیاری از مطالعات مدل‌های جدیدی برای مدیریت انرژی ریز شبکه ارائه کرده‌اند. در [۲] یک روش دوسطحی جدید برای مدیریت سیستم ریزشبکه چندگانه ارائه شده است. سطح بالایی به هماهنگی میان ریزشبکه با یکدیگر و شبکه اصلی می پردازد و سطح پایین برای برنامه‌ریزی عملیاتی ریز شبکه های محلی تنظیم می‌شود.

در [۳]، یک الگوریتم بهینه‌سازی دومرحله‌ای برای مدیریت انرژی ریزشبکه چندگانه ارائه شده است. تابع هدف سطح بالا عبارت است از در نظر گرفتن کاهش، نوسانات قدرت و انحراف‌های ولتاژی است، در حالی که در سطح پایین، کمینه کردن کل هزینه شبکه های خرد پیگیری می‌شود.

در [۴]، همکاری بین چندین ریزشبکه برای افزایش کارایی انرژی و سودآوری عملیاتی مدل‌سازی شده است. در این مقاله، روش پیشنهادی برای برنامه‌ریزی عملیاتی ریزشبکه چندگانه بر اساس نظریه بازی است.

در [۵]، مدل دوسطحی احتمالی برای برنامه‌ریزی عملیاتی و گسترش ریزشبکه چندگانه در یک سیستم توزیع فعال ارائه شده است. هزینه تبادل بین شبکه اصلی و ریزشبکه چندگانه به عنوان تابع هدف سطح بالا تعریف شد و در سطح پایین، شاخص‌های فنی برای ارزیابی نتایج سطح بالا در نظر گرفته شد.

علاوه بر این، در [۶] روش چند هدفی برای ارزیابی تأثیرات پروفایل ولتاژ، کارایی، کفایت، قابلیت اطمینان و همچنین هزینه پاسخ به تقاضا در برنامه‌ریزی عملیاتی ریزشبکه پیشنهاد شد.

در [۷] یک روش جدید برای ایجاد همکاری بین ریزشبکه ارائه شده است. برای این منظور، از نظریه بازی استکلبرگ برای مدل‌سازی همکاری ریزشبکه ها استفاده می‌شود.

و در نهایت، در [۸]، یک روش یادگیری تقویتی برای بهینه‌سازی مدیریت انرژی سیستم ریزشبکه چندگانه ارائه شده است.

در [۹]، یک روش تعاملی برای دستیابی به مدیریت انرژی در ریزشبکه چندگانه ارائه شده است. در این روش پیشنهادی، انرژی تامین نشده، هزینه روزانه سیستم و استقلال ریزشبکه ها در نظر گرفته شده‌اند.

در [۱۰]، یک الگوریتم چند لایه احتمالی برای مدل‌سازی مدیریت انرژی با در نظر گرفتن پاسخ بار، کاهش قدرت، کاهش انتشارات، و عدم قطعیت‌های بارها و تولید انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد شده است.

در [۱۱]، یک روش کنترل توالی غیرمتمرکز برای مدیریت ریزشبکه چندگانه در وضعیت‌های متصل و قطع شده معرفی شد. هدف مدل پیشنهادی دستیابی به مدیریت انرژی پایدار و بهینه ریزشبکه است.

در [۱۲]، یک راهبرد جدید برای برنامه‌ریزی عملیاتی ریزشبکه چندگانه در دوره‌های بی باری، بار معمولی و اوج بار پیشنهاد شده است. استراتژی مدیریت انرژی ارائه شده در [۱۳] بر اساس برآورد نقطه‌ای و الگوریتم بهینه‌سازی مقاوم است.

برنامه‌ریزی عملیاتی احتمالی با در نظر گرفتن پاسخ به تقاضا در [۱۴] ارائه شده است. برنامه‌ریزی عملیاتی منابع تولید تجدیدپذیر و پاسخ به تقاضا در [۱۵] مدل‌سازی شده‌اند.

در مقالات مورد بررسی در بالا، مسئله مدیریت هماهنگ شده ریزشبکه از دیدگاه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. در اکثر این مطالعات، تعامل بین ریزشبکه ها برای بیشینه‌سازی سود همزمان ریزشبکه با استفاده از نظریه بازی مدل‌سازی شده‌اند. اما در این مطالعات، احتمال تغییر تصمیمات داخلی ریزشبکه ها پس از تصمیم کلی ر ریزشبکه چندگانه در نظر گرفته نشده است. از سوی دیگر، مسئله تاب آوری در این مدل‌ها مورد توجه قرار نگرفته است.

در سال‌های اخیر، تعدادی مطالعه به بررسی مسئله تاب آوری درریز شبکه ها پرداخته‌اند [۱۹-۱۶]. اما در این مطالعات، مسئله تاب آوری با در نظر گرفتن مسئله رقابت بین ریز شبکه ها و شکل‌گیری ائتلاف بین آن‌ها مدل‌سازی نشده است.

در این مقاله، با هدف در نظر گرفتن تاب آوری در ایجاد ائتلاف بهینه بین ریز شبکه ها و با در نظر گرفتن امکان تغییر تصمیمات ریز شبکه ها پس از تصمیم ائتلاف، یک روش جدید مبتنی بر نظریه بازی سه سطحی برای مدیریت انرژی سیستم ریزشبکه چندگانه با تمرکز بر تاب آوری ارائه شده است.

در واقع، هرریز شبکه نقش یک بازیکن را ایفا می‌کند. اما فعالیت‌های خاصی به ویژه مدیریت توسط اپراتور مرکزی انجام می‌شود. نوآوری‌های این روش به طور خلاصه در زیر ارائه می‌شود:

- مدل‌سازی مفهوم تاب آوری در مدل مدیریت انرژی.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

• مدل‌سازی تشکیل ائتلاف بهینه با استفاده از روش مسئله برنامه ریاضی با محدودیت‌های تعادل (MPEC).

• مدل‌سازی امکان تغییر تصمیمات ریزشبکه‌ها در سطح سوم مسئله.

در ادامه، ابتدا روش پیشنهادی برای مدیریت انرژی در بخش ۲ معرفی می‌شود. فرمول‌بندی این روش نیز در همین بخش ارائه می‌شود. در بخش ۳، نتایج پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در سیستم آزمایشی بررسی می‌شود. در بخش ۴، خلاصه مطالعات ارائه می‌شود.

۲- رویکرد پیشنهادی

۲-۱- ساختار مدل پیشنهادی

در این مقاله، یک مدل جدید برای برنامه‌ریزی بهینه مدیریت انرژی با تمرکز بر تاب آوری برای ربزشبکه چندگانه ارائه شده است. ساختار کلی سیستم مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است.ریز شبکه شامل سیستم ذخیره انرژی (ESS)، واحد بادی (WU)، بار تعامی (RL)، و بار غیرتعاملی (UL) و واحد تولیدعادی (CGU) است. ریز شبکه ها به همراه یکدیگر ائتلاف تشکیل می‌دهند تا سودآوری خود را افزایش دهند.

هدف تشکیل ائتلاف رسیدن به مدیریت انرژی بهینه با تمرکز بر تاب آوری برای همه شرکت‌کنندگان ائتلاف است.

در حالت عملیاتی عادی، امکان تبادل انرژی بین ائتلاف و شبکه بالا وجود دارد. اما در حالت عملیات تاب آوری، هیچ تبادلی با سیستم بالا وجود ندارد و در واقع بارها در داخل ائتلاف باید توسط منابع تولید داخلی تامین شوند.

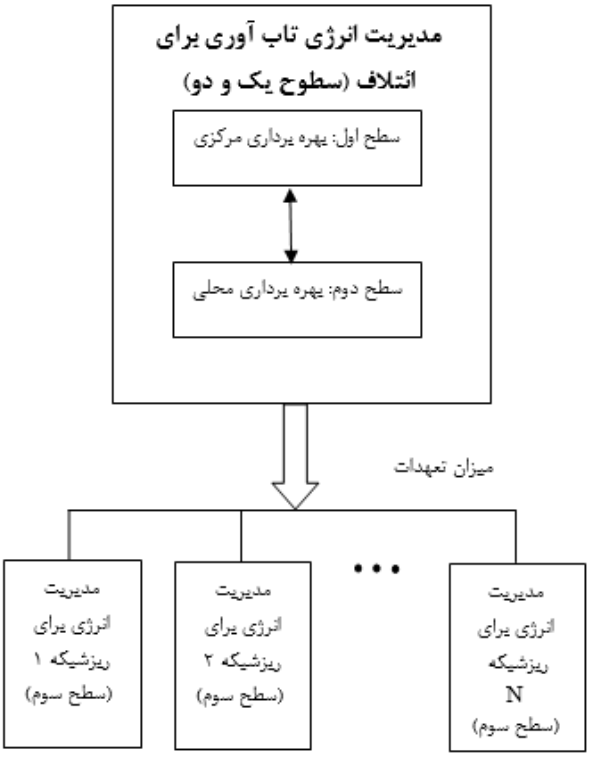
مدیریت انرژی با تمرکز بر تاب آوری شرکت‌کنندگان ائتلاف توسط اپراتور مرکزی انجام می‌شود. تعیین تبادلات بهینه بین سیستم بالا و شرکت‌کنندگان ائتلاف با در نظر گرفتن امکان رخداد حادثه برای خط اصلی با شبکه بالادر این تابع انجام می‌شود.

در مدل پیشنهادی، نظریه بازی برای مدل‌سازی مدیریت انرژی با تمرکز بر تاب آوری از دیدگاه اپراتور مرکزی استفاده می‌شود. به این منظور، روش ائتلاف بازی‌همکاری برای یافتن یک استراتژی مشترک برای بازیکنان به منظور بیشینه‌سازی سود ائتلاف به کار گرفته می‌شود.

ائتلاف شامل N بازیکن (ریزشبکه) است.

به منظور مدل‌سازی مدیریت انرژی برای ائتلاف ساختار نشان داده شده در شکل (۱) به کار گرفته می‌شود. بر اساس شکل (۱)، این مدل به صورت سه سطح مدل‌سازی می‌شود. ابتدا یک مسئله دو سطحی حل می‌شود تا تعهدات هر ریز شبکه مشخص شود. مقادیر انرژی تبادل شده بین ریز شبکه ها و سیستم بالادست به عنوان تعهدات در نظر گرفته می‌شوند.

پس از تعیین تعهدات ریز شبکه ها، وضعیت عملیات تجهیزات در هر ریز شبکه به وسیله سطح سوم مسئله تعیین می‌شود. این فرآیند به صورت مستقل برای هر ریز شبکه انجام می‌شود. بنابراین، مسئله‌های بهینه‌سازی مستقل در سطح سوم حل می‌شوند.



شکل (۱): ساختار مدیریت انرژی با تمرکز بر تاب آوری

۲-۲- فرمول‌بندی مدل پیشنهادی

مدیریت انرژی با تمرکز بر تاب آوری به عنوان یک مدل سه سطحی مدل‌سازی می‌شود. ابتدا یک مدل دو سطحی طراحی میشود تا مقادیر تبادل انرژی بین شبکه بالا و شبکه های خرد را تعیین کند. سپس یک مسئله یک سطحی حل می‌شود تا شرایط عملیاتی شبکه های خرد مجزا مشخص گردد. مدل مدیریت پیشنهادی بر اساس سناریوها شکل می گیرد. سناریوها با هدف مشخص کردن وضعیت خط اتصال با شبکه بالا استفاده میشوند. در مدل پیشنهادی از روش مونت‌کارلو برای تولید سناریوها استفاده شده است. همچنین، فرآیند کاهش سناریوها بر اساس الگوریتم انتخاب پیشرو سریع انجام شده است تا تعداد مناسبی از سناریوها حاصل شود [۲۰]. فرآیند تولید / کاهش سناریوها بر اساس تفاوت بین سناریوها در حالت حادثه مبتنی بر زمان شروع حادثه است. در ادامه، در ابتدا فرمول‌بندی دو سطحی ارائه می‌شود تا تعیین تبادل بهینه بین سیستم بالا و ریزشبکه ها انجام شود. سپس روابط مرتبط با عملکرد هر ریز شبکه در سطح سوم مسئله ارائه می‌شوند.

۲-۲-۱- فرمول‌بندی دو سطحی

در مسئله دو سطحی،یک مسئله بهینه‌سازی از دیدگاه کلی ائتلاف ارائه می‌شود. بنابراین، کمینه کردن هزینه عملیاتی کل ائتلاف به عنوان تابع هدف به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

$$min \sum_{s=1}^{Ns} \omega_s \sum_{t=1}^{24} \left[\sum_{j=1}^{Nm} \left[\begin{array}{c} MC_j^C \times P_{jst}^C + \\ MC_j^{Ch} \times P_{jst}^{Ch} + \\ MC_j^{dis} \times P_{jst}^{dis} + \\ \beta_j^{DR} \times P_{jst}^{DR} \\ +\alpha_t \times \left(p_{jt}^{buy} - p_{jt}^{sell}\right) + \\ \sum_{t \in (t_S^I, t_S^I+1, \ldots, t_S^I+T^I,} \alpha_t \times \left(P_t^{c,buy} - P_t^{c,sell}\right) \end{array} \right] \right] \quad (۱)$$

در (۱)، هزینه تولید واحدهای تولید معمولی در عبارت اول مدل‌سازی شده است. عبارت دوم هزینه شارژ و تخلیه سیستم ذخیره انرژی را محاسبه می‌کند. هزینه کاهش بارهای قابل تنظیم توسط عبارت سوم محاسبه می‌شود. هزینه تبادل بین ریز شبکه های محلی در عبارت چهارم تعیین می‌شود. همچنین، هزینه تبادل با سیستم بالا در عبارت پنجم تعیین می‌شود. محدودیت‌های سطح بالا به شرح زیر اعلام می‌شود.در حالت عملیاتی عادی، محدودیت تعادل توان کل ائتلاف به شرح زیر خواهد بود:

$$\sum_{j=I}^{Nm} \left(\begin{array}{c} P_{jst}^C + \\ P_{jst}^{dis} + P_{jst}^w + \\ P_{jst}^{DR} + p_{jt}^{buy} \end{array} \right) + P_t^{c,buy} = \sum_{j=I}^{Nm} \left(P_{jst}^{Ch} + P_{jst}^{fl} + P_{jst}^{vl} + p_{jt}^{sell} \right) + P_t^{c,sell} \quad (۲)$$

$$\forall t \in \{t_s^I, t_s^I + 1, \ldots, t_s^I + T^I\}, \forall s = 1 : N_s$$

این محدودیت در حالت بروز حادثه به شکل زیر خواهد بود:

$$\sum_{j=I}^{Nm} \left(P_{jst}^C + P_{jst}^{dis} + P_{jst}^w + P_{jst}^{DR} + p_{jt}^{buy} \right) = \sum_{j=I}^{Nm} \left(P_{jst}^{Ch} + P_{jst}^{fl} + P_{jst}^{vl} + p_{jt}^{sell} \right)$$

$$\forall t \in \{t_s^I, t_s^I + 1, \ldots, t_s^I + T^I\}, \forall s = 1 : N_s \quad (۳)$$

توانایی مبادله انرژی با شبکه بالایی در حالت نرمال با محدودیت زیر کنترل می‌شود:

$$0 \le P_t^{c,buy}, P_t^{c,sell} \le \overline{P^{c,trade}}$$
$$\forall t \notin \{t_s^I, t_s^I + 1, \ldots, t_s^I + T^I\}, \forall s = 1 : N_s \quad (۴)$$

در حالت بروز حادثه، تبادل انرژی با شبکه بالادستی برابر با صفر است. هزینه عملیاتی هر ریزشبکه در سطح پایینی مساله دو سطحی به‌صورت رابطه (۵) به حداقل رسانده می‌شود؛

$$min \sum_{s=1}^{N_S} \sum_{t=1}^{24} \left\{ \overbrace{MC_j^c \times P_{jst}^c}^{1} + \overbrace{MC_j^{ch} \times P_{jst}^{ch} + MC_j^{dis} \times P_{jst}^{dis}}^{2} + \overbrace{\beta_j^{DR} \times P_{jst}^{DR}}^{3} + \overbrace{\alpha_t \times \left(P_{jt}^{buy} - P_{jt}^{sell}\right)}^{4} \right\} \quad (۵)$$

عبارات ۱ تا ۴ در معادله ۱ شرح داده شده‌اند. در ادامه، محدودیت سطح پایین تر مسئله ارائه شده است.

محدودیت‌های CGU

محدودیت تولید CGU به شکل زیر است [۲۱]:

$$\underline{P_j^c} \le P_{jst}^c \le \overline{P_j^c} \qquad \forall j, \forall s, \forall t \quad (۶)$$

نرخ تغییر انرژی CGU در ریز شبکه j به شکل زیر بیان میشود:

$$P_{jst}^c - P_{jst-1}^c \le RU_j^c \qquad \forall j, \forall s, \forall t \quad (۷)$$

$$P_{jst-1}^c - P_{jst}^c \le RD_j^c \qquad \forall j, \forall s, \forall t \quad (۸)$$

محدودیت های ذخیره انرژی

انرژی ذخیره شده در ESS در هر زمان به شکل زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$E_{jst}^s = E_{jst-1}^s + \eta_j^{s,ch} \times P_{jst}^{ch} - \frac{1}{\eta_j^{s,dis}} \times P_{jst}^{dis} \qquad \forall j, \forall s, \forall t \quad (۹)$$

حالت شارژ در پایان روز به شکل زیر مشخص می‌شود:

$$E_{js24}^s = E_{js0}^s \qquad \forall j, \forall s \quad (۱۰)$$

رابطه زیر مانده انرژی در سیستم ذخیره سازی را نشان می‌دهد:

$$\sum_{t=1}^{24} \eta_j^{s,ch} \times P_{jst}^{ch} = \sum_{t=1}^{24} \frac{1}{\eta_j^{s,dis}} \times P_{jst}^{dis} \forall j, \forall s \quad (۱۱)$$

انرژی ذخیره شده در سیستم ذخیره سازی به شکل زیر محدود است:

$$\underline{E_j^s} \le E_{jst}^s \le \overline{E_j^s} \qquad \forall j, \forall s, \forall t \quad (۱۲)$$

قابلیت شارژ/دشارژ در ESS با استفاده از محدودیت زیر اعمال میشود:

$$0 \le P_{jst}^{ch}, P_{jst}^{dis} \le \overline{P_j^s} \qquad \forall j, \forall s, \forall t \quad (۱۳)$$

محدودیت بار منعطف

قابلیت پاسخ به تقاضای بار منعطف به شکل زیر محدود می‌شود:

$$0 \le P_{jst}^{DR} \le \overline{P_j^{DR}} \qquad \forall j, \forall s, \forall t \quad (۱۴)$$

محدودیت‌های ریزشبکه

رابطه تعادل انرژی در هر شبکه خرد به شکل زیر است:

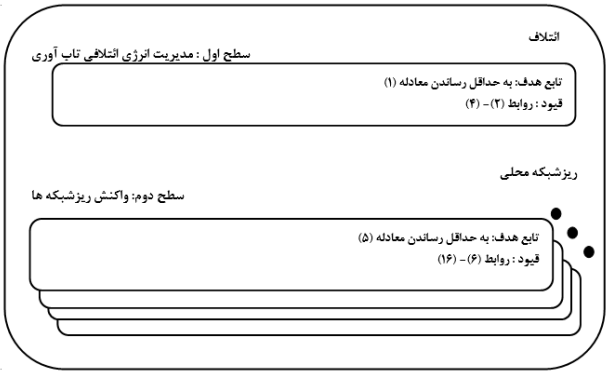
$$P_{jst}^c + P_{jst}^{dis} + P_{jst}^w + P_{jst}^{DR} + P_{jt}^{buy} = P_{jst}^{ch} + P_{jst}^{fl} + P_{jst}^{vl} + P_{jt}^{sell} \forall j, \forall s, \forall t \quad (۱۵)$$

قابلیت تبادل برای هر ریزشبکه با استفاده از محدودیت زیر محدود می‌شود:

$$0 \le P_{jt}^{buy}, P_{jt}^{sell} \le \overline{P_j^{trade}} \forall j, \forall t, \forall s \quad (۱۶)$$

در این متن، تولید واحدبادی با استفاده از تابع توزیع شده احتمالاتی ویبال محاسبه می‌شود [۱۰].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

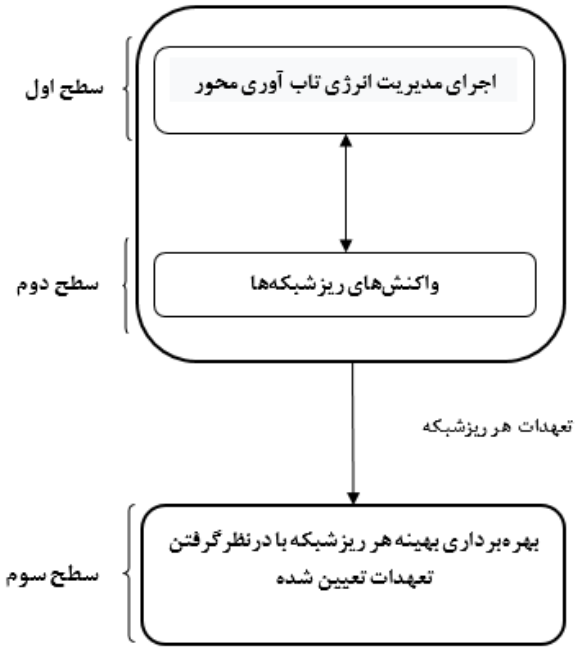


شکل (۲): روش ارائه شده برای مدیریت انرژی ائتلاف

در این مقاله، مدل مدیریت ائتلاف با تمرکز بر تاب آوری به عنوان یک مسئله دو سطحی همانند شکل (۲) فرمول‌بندی می‌شود. مقادیر تبادل انرژی به عنوان خروجی‌های سطح بالایی هستند. وضعیت عملیات ریزشبکه ها در سطح پایینی تعیین می‌شود. بنابراین،یک برنامه ریاضی با محدودیت تعادل (MPEC) ایجادشد. چارچوب مدل دو سطحی شامل تابع‌های هدف و محدودیت‌ها در شکل (۲) ارائه شده است. این مسئله با روش تبدیل اصلی دوگانی [۲۳] حل می‌شود.

۲-۲-۲- فرمول‌بندی سطح سوم مدل پیشنهادی

ساختار مدل پیشنهادی در شکل (۳) نشان داده شده است. در ابتدا، مدل MPEC معرفی‌شده در بخش قبل، ایجاد می‌شود. تبادل انرژی توسط بازیکنان شرکت‌کننده در ائتلاف با استفاده از مدل MPEC مشخص می‌شود. پس از تعیین تعهدات ریز شبکه ها، وضعیت عملیاتی هر ریزشبکه در سطح سوم مشخص می‌شود. برای این کار از یک مسئله بهینه‌سازی یک سطحی استفاده می‌شود.



شکل(۳): ساختار مسئله ائتلاف

۳- شبیه‌سازی و نتایج

برای نشان دادن قابلیت روش پیشنهادی در این مقاله، یک ریزشبکه چندگانه با سه ریز شبکه به عنوان مطالعه موردی مد نظر قرار می‌گیرد. هر ریز شبکه شامل یک واحد تولید معمولی، یک سیستم ذخیره انرژی و یک واحد بادی است. ویژگی‌های واحدهای تولید معمولی در جدول (۱) ارائه شده است. جدول (۲) مشخصات سیستم‌های ذخیره انرژی در ریزشبکه‌های مختلف را نشان می‌دهد. بارهای الکتریکی در ریز شبکه ها در شکل (۴) نمایش داده شده است. در مدل پیشنهادی در این مقاله، امکان پاسخ به تقاضا نیز در نظر گرفته شده است. در واقع، برخی از بارها می‌توانند مصرف خود را کاهش دهند تا به اپراتور کمک کنند. این بارها به دلیل کاهش مصرف خود هزینه‌ای دریافت خواهند کرد. شکل (۵) حداکثر بار کاهش یافته برای هر ریزشبکه را نشان می‌دهد. تولیدات واحدهای بادی در هر ریزشبکه در یک روز عادی در شکل (۶) نشان داده شده است.

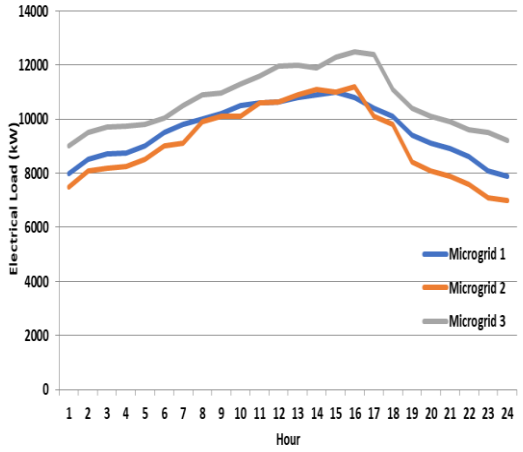
ظرفیت تبادل بین ریزشبکه‌ها ۳ مگاوات درنظرگرفته‌شده‌است. همچنین، ظرفیت تبادل با شبکه اصلی نیز ۴ مگاوات درنظرگرفته می‌شود.

جدول (۱): ویژگیهای واحدهای تولید متداول[۲۴]

ریزشبکه	P_i^c (kW)	$\overline{P_i^c}$ (kW)	MC_i^c ($/kW)	RU_i^c (kW/h)	RD_i^c (kW/h)
۱	۰	۱۲۰۰۰	۰/۱۲	۵۰۰۰	۵۰۰۰
۲	۰	۹۰۰۰	۰/۱۵	۴۰۰۰	۴۰۰۰
۳	۰	۹۰۰۰	۰/۱	۴۰۰۰	۴۰۰۰

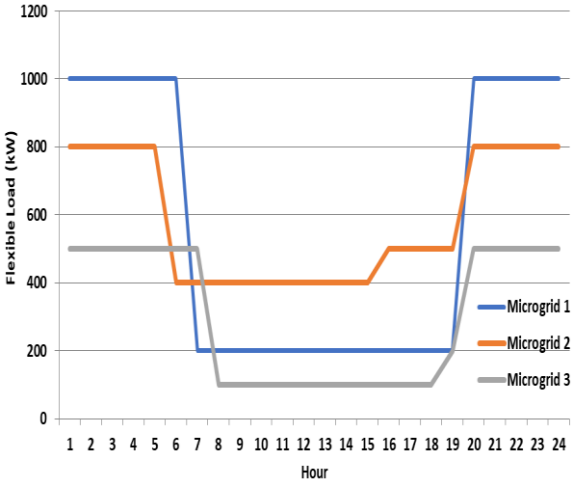
جدول (۲): ویژگی های تجهیزات ذخیره انرژی[۲۵]

ریزشبکه	$\overline{P_i^s}$ (MW)	$\overline{E_i^s}$ (MWh)	E_i^s (MWh)	$\eta_i^{s,dis}$ (%)	$\eta_i^{s,ch}$ (%)	MC_i^{dis} ($/kW)	MC_i^{ch} ($/kW)
۱	۰/۱	۰/۵	۰	۹۵	۹۵	۰/۰۱	۰/۰۱
۲	۰/۱	۰/۴	۰	۹۵	۹۵	۰/۰۱	۰/۰۱
۳	۰/۱۵	۰/۶	۰	۹۵	۹۵	۰/۰۱	۰/۰۱

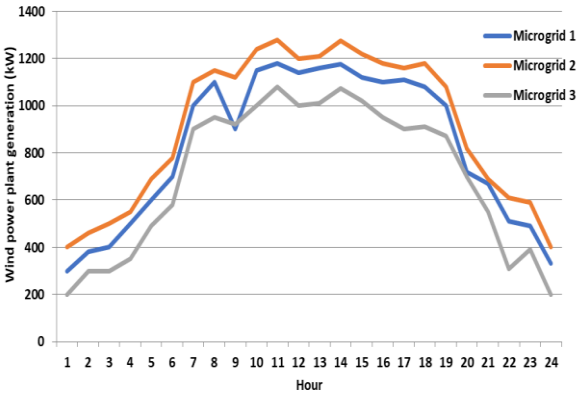


شکل(۴): بار الکتریکی در ریز شبکه‌ها [۲۶]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023



شکل (۵): بار قابل تنظیم در ریز شبکه‌ها



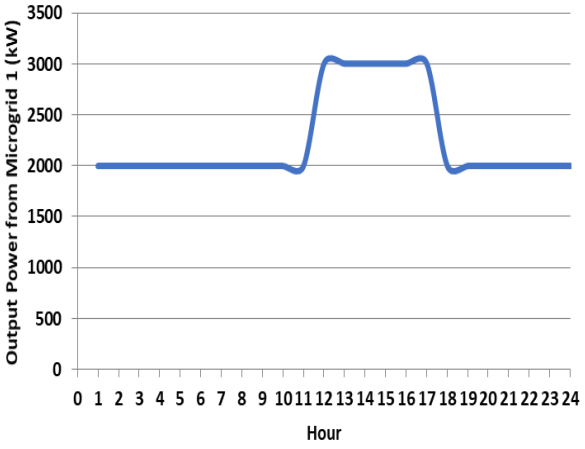
شکل (۶): تولید واحدهای بادی در ریزشبکه‌ها [۲۷]

برای مدل‌سازی ماهیت احتمالی قطع خط اتصال با شبکه بالا، از روش مونت‌کارلو استفاده شده است. به این ترتیب، سناریوهای قطع ارتباط، یعنی زمان رخداد حادثه، توسط روش مونت‌کارلو تولید می‌شوند، همان‌طور که در بخش ۱ توضیح داده شده است. فرض می‌شود که احتمال رخداد حادثه در روز مورد نظر ۵٪ است. همچنین، فرض می‌شود که احتمال رخداد حادثه در ساعت‌های ۹:۰۰ تا ۱۷:۰۰ دو برابر سایر ساعت‌ها است. زمان تعمیر خط اتصال و بازگرداندن آن به حالت عادی۶ ساعت در نظر گرفته می‌شود. در عمل، این احتمالات می‌تواند بر اساس تجربیات گذشته و داده‌های تاریخی تعیین شود.پس از تولید سناریوها، الگوریتم انتخاب پیشرو سریع برای کاهش سناریوها استفاده می‌شود. فرآیند تولید/کاهش سناریوها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام می‌شود. فرآیند کاهش سناریوها برای رسیدن به ده سناریو انجام می‌شود.

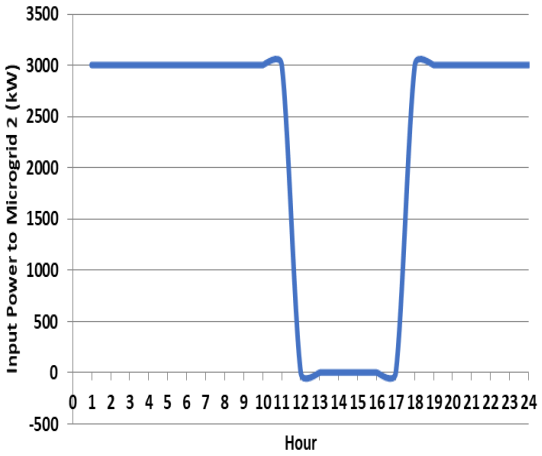
برای پیاده‌سازی مدل پیشنهادی، ابتدا مدل دو سطحی به عنوان مسئله MPEC فرمول‌بندی شد و، با استفاده از نرم‌افزار GAMs حل می‌شود. نتایج مدل دو سطحی شامل تبادل‌های ساعتی بین ریز شبکه های چندگانه در ائتلاف و سیستم بالادست هستند.

شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ریزشبکه های دوم و سوم انرژی دریافت می‌کنند و ریزشبکه اول انرژی ارسال می‌کند. مقدار انرژی ارسالی توسط ریز شبکه اول در شکل (۷) ارائه شده است. بر اساس این شکل، این ریز شبکه از ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۷:۰۰ ۳۰۰۰ کیلووات انرژی ارسال می‌کند و در ساعات دیگر۲۰۰۰ کیلووات. همچنین، انرژی دریافتی توسط ریز شبکه های دوم و سوم در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. ریز شبکه دو، در ساعات ۱۲:۰۰ تا ۱۷:۰۰ انرژی دریافتی ندارد، اما در ساعات دیگر۲۰۰۰ کیلووات دریافت می‌کند تا نیاز داخلی انرژی خود را تأمین کند. ریز شبکه سه در تمام ساعات ۳۰۰۰ کیلووات انرژی دریافت می‌کند. نتایج همچنین نشان می‌دهند که ائتلاف در اکثر ساعات انرژی از شبکه بالادست دریافت می‌کند. انرژی دریافتی از شبکه بالادست در شکل (۱۰) ارائه شده است. بر اساس این شکل، ریز شبکه در باقی‌مانده روز و شب، به جز ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۷:۰۰، کمبود ۴۰۰۰ کیلووات تولید داخلی دارد که باید از شبکه بالادست دریافت شود.

این شبیه‌سازی‌ها برای وضعیتی انجام می‌شوند که طبق شبیه‌سازی مونت‌کارلو، خط اتصال در ساعت ۱۲ قطع می‌شود و تبادل انرژی با شبکه بالادست به مدت ۶ ساعت برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

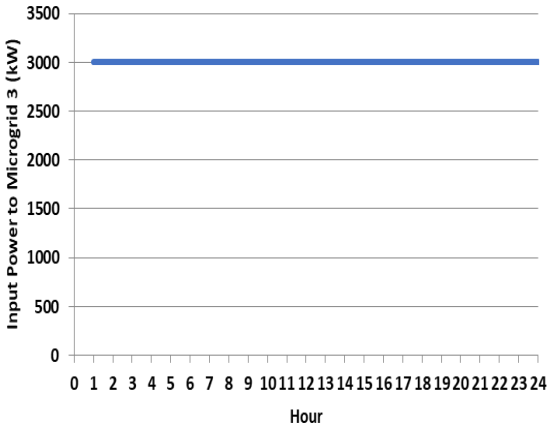


شکل (۷): توان خروجی از ریزشبکه ۱

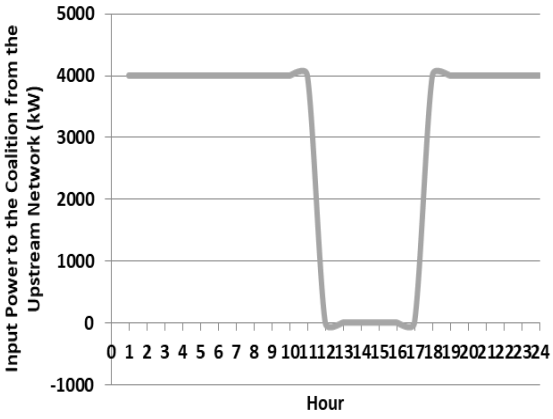


شکل (۸): توان ورودی به ریز شبکه ۲

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023



شکل(۹): توان ورودی به ریز شبکه ۳



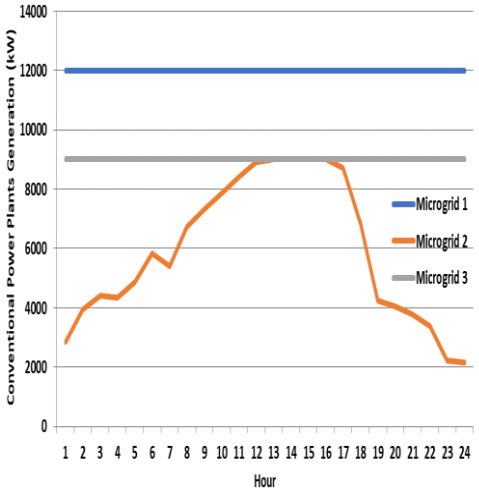
شکل(۱۰): توان خروجی ائتلاف برای شبکه بالا دستی

خروجی‌های مدل MPEC به‌عنوان ورودی‌های سطح سوم مدل پیشنهادی محسوب می‌شود. مسئله بهینه‌سازی یک سطحی از دیدگاه اپراتورهای محلی در سطح سوم حل می‌شود. بنابراین، تبادل انرژی بین ریزشبکه‌ها به‌عنوان ورودی مسئله سطح سوم در نظر گرفته می‌شود. به این منظور، با تعدادی برابر با تعداد ریزشبکه های در ائتلاف، مسئله بهینه‌سازی تک سطح با استفاده از نرم‌افزار GAMs حل می‌شود. تولید انرژی واحدهای تولید انرژی ثابت برای یک سناریو با احتمال بالا در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

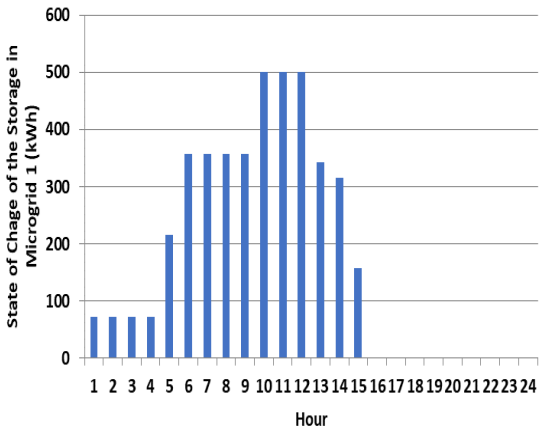
نتایج نشان می‌دهند که واحد تولید انرژی ثابت درریز شبکه های ۱ و ۳ باید به طور کامل انرژی تولید کنند، اما در ریز شبکه ۲، مقدار انرژی تولید شده متغیر است، اما در ساعات ۱۲:۰۰ تا ۱۷:۰۰، هنگامی که خط اتصال با شبکه بالا قطع می‌شود، نیروگاه برق متعارف در این ریز شبکه همچنان با ظرفیت کامل خود انرژی تولید می‌کند.

همچنین، وضعیت شارژ باتری‌های ذخیره انرژی در ریز شبکه ها برای سناریو با احتمال بالا در شکل‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است. نتایج در شکل (۱۴) نشان می‌دهند که باتری در ریز شبکه ۱ در ساعات ۱:۰۰، ۵:۰۰، ۶:۰۰ و ۱۰:۰۰ شارژ می‌شود و در ساعات ۱۳:۰۰ تا ۱۶:۰۰ تخلیه می‌شود.

همچنین، بر اساس شکل (۱۵)، باتری در ریزشبکه ۲ در ساعات ۱:۰۰، ۸:۰۰ و ۱۱:۰۰ شارژ می‌شود و در ساعات ۱۴:۰۰ تا ۱۶:۰۰ تخلیه می‌شود. نتایج در شکل (۱۶) نشان می‌دهند که باتری در ریزشبکه ۳ در ساعات ۱:۰۰، ۵:۰۰، ۶:۰۰ و ۱۰:۰۰ شارژ می‌شود و در ساعات ۱۳:۰۰، ۱۴:۰۰ و ۱۶:۰۰ تخلیه می‌شود. نتایج مطالعات نشان می‌دهند که انرژی ذخیره شده در سیستم‌های ذخیره انرژی در ریزشبکه‌ها در ساعاتی که اتصال به شبکه بالا قطع می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای ارزیابی مدل پیشنهادی و اهمیت نقش سیستم‌های ذخیره انرژی، تعداد بارهای قطع شده به لحاظ تاب‌آوری و قطعی از شبکه بالا در ساعت‌های ۱۲:۰۰ تا ۱۶:۰۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) تعداد بارهای قطع شده با و بدون سیستم‌های ذخیره انرژی را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند که با وجود سیستم‌های ذخیره انرژی و استفاده از مدل پیشنهادی، قطع بارها تنها در ساعت‌های ۱۴:۰۰ تا ۱۷:۰۰ و به میزان کم رخ می‌دهد. اما بدون وجود سیستم‌های ذخیره انرژی، کاهش قابل‌توجهی رخ داده است.

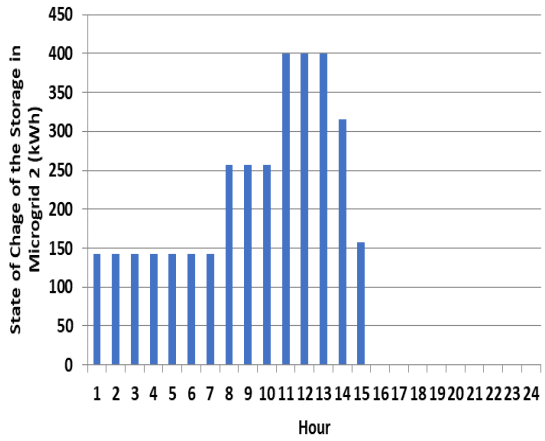


شکل(۱۱): خروجی‌هایCGUs در ریزشبکه ها

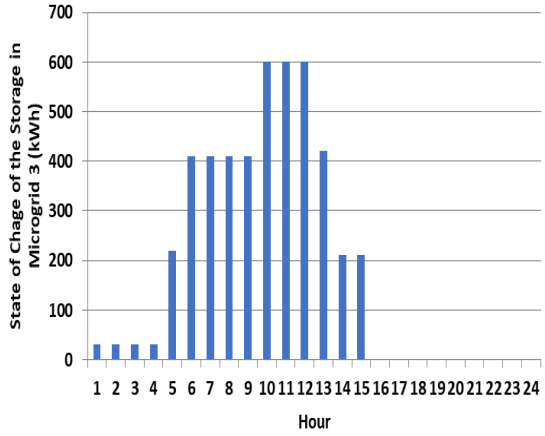


شکل (۱۲):. وضعیت شارژ باتری‌های ذخیره انرژی در ریزشبکه ۱

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

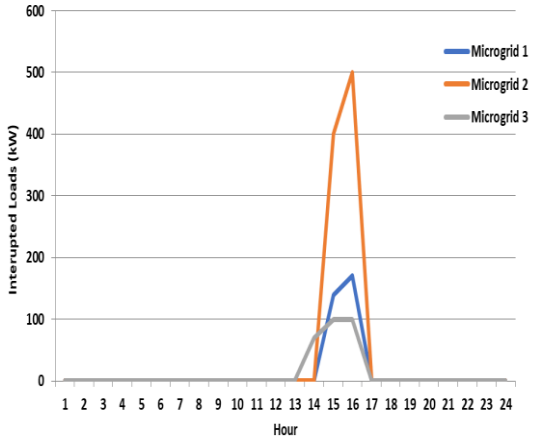


شکل (۱۳): وضعیت شارژ باتری‌های ذخیره انرژی در ریزشبکه ۲

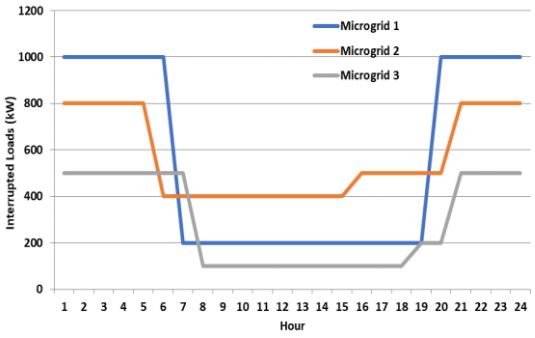


شکل (۱۴): وضعیت شارژ باتری‌های ذخیره انرژی در ریزشبکه ۳

برای نمایش قابلیت مدل پیشنهادی در این مقاله، وضعیت عملیاتی سیستم از نظر بار قطعی و همچنین هزینه‌های عملیاتی در شرایط نرمال و تاب‌آوری بررسی و با استفاده از مدل ارائه‌شده در جداول (۳) و (۴) مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل(۱۵): بارهای قطع شده در حضور سیستم‌های ذخیره انرژی



شکل (۱۶): بارهای قطع شده بدون سیستم‌های ذخیره انرژی

برای بررسی بهتر، جدول (۳) نسبت درصد بارهای قطعی نسبت به بارهای قابل تنظیم و کل بارهای سیستم در شرایط عملیاتی مختلف سیستم را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها برای ۳حالت عملیاتی سیستم انجام شده است که شامل عملیات نرمال با سیستم‌های ذخیره انرژی، عملیات تاب‌آوری با سیستم‌های ذخیره انرژی و عملیات تاب‌آوری بدون سیستم‌های ذخیره انرژی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از مدل پیشنهادی، نسبت بارهای قطعی در حالت عملیات تاب‌آوری مشابه حالت عملیات نرمال است اما بدون وجود سیستم‌های ذخیره انرژی، این نسبت به‌طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

هزینه‌های عملیاتی چند شبکه خرد در شرایط عملیاتی مختلف با هم مقایسه شده است که نتایج آنها در جدول (۴) آمده است. نتایج نشان می‌دهند که با وجود سیستم‌های ذخیره انرژی و استفاده از مدل پیشنهادی، هزینه‌های عملیاتی در شرایط تاب‌آوری به‌طور کمی افزایش می‌یابد. اما بدون وجود سیستم‌های ذخیره انرژی، این افزایش به‌طرز چشم‌گیری بیشتر است.

در این مقاله، یک مدل سه سطحی برای مدیریت انرژی تاب‌آوری ارائه شده است. به‌منظور بررسی توانمندی این مدل در مقایسه با حالتی که مسئله به دو سطح حل شود، شکل (۱۷) کل هزینه ائتلاف در دو حالت دو سطحی و سه سطحی برای حالات عملیاتی مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از مدل پیشنهادی، هزینه کلی در حالت تاب‌آوری نسبت به حالت نرمال به طور کمی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، در حالت تاب‌آوری، هزینه اعمال به کل ائتلاف، کمی نسبت به حالت نرمال افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، در مدل سه سطحی، هزینه کلی در حالت نرمال حدود ۵,۷٪ و در حالت تاب‌آوری حدود ۷٪ نسبت به مدل دو سطحی کاهش می‌یابد.

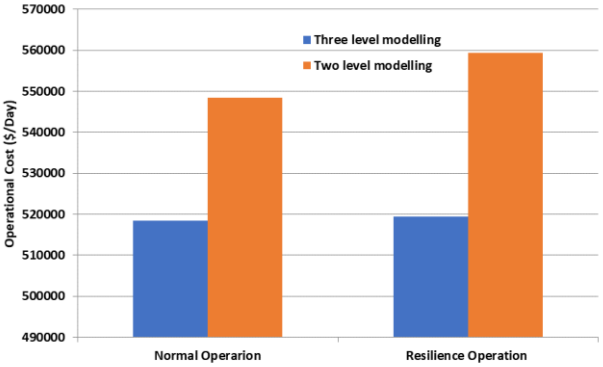
جدول (۳) : مقدار نسبی بارهای قطع شده

مورد مطالعاتی	نسبت بارهای قطع شده به بارهای واکنشی (٪)	نسبت بارهای قطع شده به کل بار (٪)
حالت عادی با وجود سیستمهای ذخیره انرژی	۴/۶۲	۰/۲
حالت تاب آور با سیستمهای ذخیره انرژی	۴/۷	۰/۲
حالت تاب آور بدون سیستمهای ذخیره انرژی	۹۸	۵

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

جدول (۴): هزینه روزانه شبکه های ائتلافی

مورد مطالعاتی	هزینه بهره برداری روزانه
حالت عادی با وجود سیستم‌های ذخیره انرژی	۵۱۸۴۹۴
حالت تاب آور با سیستم‌های ذخیره انرژی	۵۱۹۳۳۴
حالت تاب آور بدون سیستم‌های ذخیره انرژی	۱۰۵۴۳۶۷۰



شکل(۱۷): بارهای قطع شده بدون سیستم‌های ذخیره انرژی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل نوآورانه احتمال‌گرا برای برنامه‌ریزی عملیات تاب‌آور ریزشبکه‌های چندگانه ارائه شده است. ریزشبکه‌ها شامل واحدهای تولیدی متعارف، واحدهای بادی و سیستم‌های ذخیره انرژی هستند. برای مدل‌سازی استقلال تصمیم‌گیری اپراتورهای محلی شبکه های خرد، مدلی ارائه شد. به عبارت دیگر، هر یک از ریزشبکه‌ها به عنوان بازیکنان اصلی ائتلافی در نظر گرفته می‌شوند و سیستم‌های خود را مدیریت می‌کنند. به این منظور، یک مدل مسئله سه سطحی فرموله می‌شود تا مقدار تبادل انرژی بین ریزشبکه‌ها و سیستم بالادست و وضعیت عملیاتی دستگاه‌ها در هر یک از ریزشبکه‌ها تعیین شود. در روش پیشنهادی، وضعیت اتصال شبکه بالا به عنوان پارامتری مدل می‌شود تا مفهوم تاب‌آوری در مدل مدیریت انرژی در نظر گرفته شود. از این طریق و با استفاده از روش ارائه‌شده، هزینه عملیات ائتلاف در حالت تاب‌آوری به طور کاملاً نزدیک به حالت نرمال باقی می‌ماند. همچنین، هزینه عملیات ائتلاف در حالت سه سطحی حدود ۷٪ نسبت به حالت دو سطحی کاهش می‌یابد.

مراجع

[1] Karthik, N., et al., A review of optimal operation of microgrids, *International Journal of Electrical and computer engineering*, 2019. 14(1): 1-8.

[2] Minciardi, R., Robba, M., A bilevel approach for the stochastic optimal operation of interconnected microgrids, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016. 14(2): 482-493.

[3] Lu, T., et al., Interactive model for energy management of clustered microgrids, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017. 53(3): 1739-1750.

[4] Du, Y., et al., A cooperative game approach for coordinating multi-microgrid operation within distribution systems, *Applied Energy*, 2018. 222: 383-395.

[5] Haddadian, H. and Noroozian, R., Multi-microgrids approach for design and operation of future distribution networks based on novel technical indices, *Applied Energy*, 2017. 185: 650-663.

[6] Haddadian, H. and Noroozian, R., Multi-Microgrid-based Operation of Active Distribution Networks Considering Demand Response Programs, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018. 10(4): 1804-1812.

[7] Zhu, X., ., et al., A Game Theoretic Approach to Energy Trading in Multi-Microgrid Systems. in *2019 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. 2019.

[8]. Yin, L., Li, S., Hybrid metaheuristic multi-layer reinforcement learning approach for two-level energy management strategy framework of multi-microgrid systems, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2021, 104.

[9]. Karimi, H., Jadid, S., and Makui, A., Stochastic energy scheduling of multi-microgrid systems considering independence performance index and energy storage systems, *Journal of Energy Storage*, 2021, 33.

[10] Aghdam, F.H., S. Ghaemi, and N.T.J.J.o.c.p. Kalantari, Evaluation of loss minimization on the energy management of multi-microgrid based smart distribution network in the presence of emission constraints and clean productions, *Journal of Cleaner Production*. 2018. 196:185-201.

[11] Sofla, M. A., and King.R., Control method for multi-microgrid connected to distribution network during peak, flat and velley period, *In 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2014, IEEE.

[12] Zhang, C., et al. The output optimization of multi-microgrids connected to distribution network during peak, flat and valley periods. in *2014 IEEE PES Asia- Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. 2014. IEEE.

[13] Alavi, S.A., et al., Optimal probabilistic energy management in a typical micro-grid based-on robust optimization and point estimate method, *Energy Conversion and Management*. 2015. 95: 314-325.

[14] Gazijahani, F.S., et al. A new point estimate method for stochastic optimal operation of smart distribution systems considering demand response programs. in *2017Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC)*. 2017.IEEE.

[15] Mazidi, M., H. Monsef, and P.J.A.e. Siano, Robust day-ahead scheduling of smart distribution networks considering demand response programs, *Applied Energy*. 2016. 178: 929-942.

[16]A. Mohamed, M., Chen, T., Su, W., and Jin, T., Proactive Resilience of Power Systems Against Natural Disasters: A Literature Review, *IEEE Access*, 2019. 7: 163778-163795.

[17]Wang, H., Wang, B., Luo, P., Ma, F., Zhou, Y., and A. Mohamed, M., Chen, T., Su, W., and Jin, T., State Evaluation Based on Feature Identification of Measurement Data: for Resilient Power System,*CSEE*

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Power and Energy Systems, 2022. 8 (4): 983-992.

[18]Yin, F., Hajjiah, A., Jermsittiparsert, k., Saad Al-Sumaiti, A., K. Elsayed, S., S. M. Ghoneim, S., and A. Mohamed, M., A Secured Social-Economic Framework Based on PEM-Blockchain for Optimal Scheduling of Reconfigurable Interconnected Microgrids, *IEEE Access*, 2019. 9: 40797-40810.

[19]Chen, J., Alnowibet, K., Annuk, A., and A. Mohamed, M., An effective distributed approach based machine learning for energy negotiation in networked microgrids, *Energy Strategy Reviews*, 2021. 38.

[20] Sheibani, M. R., Yousefi, G. R, and Latify, M. A., Economics of energy storage options to support a conventional power plant: A stochastic approach for optimal energy storage sizing, *Journal of Energy Storage*, 2021, 33.

[21] Aminifar, F., Fotuhi-Firuzabad, M., and Shahidehpour, M. Unit commitment with probabilistic spinning reserve and interruptible load considerations, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009. 24 (1): 388-397.

[22] Hajipour, E., Bozorg, and Fotuhi-Firuzabad, M., Stochastic Capacity Expansion Planning of Remote Microgrids With Wind Farms and Energy Storage, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015. 6 (2): 491-498.

[23] Conejo, A.J., Baringo Morales, L., Jalal, K., Siddiqui, A.S., Investment in Electricity Generation and Transmission: Decision Making under Uncertainty, *Springer International Publishing*, 2016.

[24] Peik-Herfeh, M., Seifi, H., and Sheikh-El-Eslami, M. K., 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*, 2013. 44: 88-98.

[25] Luo, X., et al., Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, *Applied Energy*, 2015. 137: 511-536.

[26] Kia, M., et al.Optimal day ahead scheduling of combined heat and power units with electrical and thermal storage considering security constraint of power system, Energy, 2017. 120: 241-252.

[27] Heredia, F., D. Cuadrado, M, and Corchero, C., On optimal participation in the electricity markets of wind power plants with battery energy storage systems, *Computers and Operations Research*, 2018. 96: 316-329.

رزومه



سیده مهسا سرحدی در زاهدان متولد شده است (۱۳۶۶). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه آزاد زاهدان(۱۳۸۸)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه سیستان و بلوچستان (۱۳۹۲) سپری کرده است و دانشجوی دکتری مهندسی برق-قدرت از دانشگاه علوم تحقیقات تهران(۱۳۹۶) می باشد.فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است.



سودابه سلیمانی تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی کارشناسی ارشد و دکتری تخصصی مهندسی برق- قدرت در دانشگاه صنعتی شریف سپری کرده است و در حال حاضر عضو هیات علمی دانشگاه علوم تحقیقات تهران می باشد.فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت و بازار برق است.



سید بابک مظفری تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق قدرت از دانشگاه علم وصنعت ایران(۱۳۷۶)، کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت از دانشگاه صنعتی شریف(۱۳۷۹) و دکتری تخصصی مهندسی برق-قدرت از دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۸۵)سپری کرده است و در حال حاضر عضو هیات علمی دانشگاه علوم تحقیقات تهران می باشد.فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Resilience-Oriented Energy Management for Multiple Microgrids Coalition Based on a Cooperative Game Theory Model

Seyede Mahsa Sarhaddi [1], Soodabeh Soleymani [* 2], Seyed Babak Mozaffari [3]

1- Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
*2- Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. s.soleymani@srbiau.ac.ir
3- Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract: In this paper, the resilience-oriented energy management of the multiple microgrids is followed. For this purpose, a three levelgame theory based model is developed for energy management of microgrids. In this model, the coalition between the microgrids is formed to achieve optimal cumulative energy management considering the resilience concept. In this model, at first, a bi-level problem is developed from the perspective of the central operator to determine the optimal energy trading between the upstream network and multiple microgrids. The proposed bi-level model is formulated as a mathematical program with equilibrium constraints (MPEC) problem. In the bi-level problem, an optimization problem is formulated in the upper level from the perspective of the whole coalition. Therefore, minimizing the operating cost of the entire coalition is considered as the objective function. The lower level of the problem is also modeled from the point of view of each microgrid. In order to resilience-oriented model the energy management problem, the possibility of disconnecting the coalition connection line with the upstream network is probabilistically modeled based on the scenarios. After solving the MPEC problem and determining the energy exchanges, the local microgrids are operated separately from the perspective of the local operator in the third level.In this way, the operational statues of the electrical units as well as the energy storage systems are determined.The results of the simulations show that by using the method proposed in this article, with the presence of energy storage systems, the interrupted load and also the operating cost in the resilient mode will be equal to the normal mode.Also, the studies demonstrate using the proposed three-level model, the total cost is reduced by about 5.7 for the normal mode and about 7% for the resilience mode compared to the conventional two-level model.

Keywords: Multi microgrid, Resilience, Coalition, Game theory.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023