بررسی تأثیر مدیریت خاموشی سلسله مراتبی در حفاظت ریز شبکه‌ها و افزایش تاب‌آوری سیستم‌های قدرت

جواد رشیدی[۱]، علی ابراهیمی[۲]، مجید عباسی [۳]، مصطفی عباسی[۴]

[۱] معاونت بهره‌برداری و دیسپاچینگ، شرکت توزیع نیروی برق استان البرز، کرج،
Rashidij20@yahoo.com

[۲] معاونت بهره‌برداری و دیسپاچینگ، شرکت توزیع نیروی برق استان البرز، کرج،
Aliebrahimi6990@gmail.com

[۳] معاونت بهره‌برداری و دیسپاچینگ، شرکت توزیع نیروی برق استان البرز، کرج،
Majidabasi2004@yahoo.com

[۴] معاونت بهره‌برداری و دیسپاچینگ، شرکت توزیع نیروی برق استان البرز، کرج،
Mostafaonline.abbasi@gmail.com

چکیده

در این مقاله یک طرح مدیریت خروج سلسله مراتبی برای افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع هوشمند شامل چند ریزشبکه به منظور حفاظت شبکه در مقابل حوادث شدید پیش‌بینی نشده، ارائه شده است. پس از تشخیص الزامات برای طرح مدیریت خروج، یک چارچوب مناسب طراحی شده و نقش واحدهای مدیریتی در سیستم چند ریزشبکه معرفی شده است. ریزشبکه‌ها منابع موجود را در گام اول با استفاده از الگوریتم کنترل پیش‌بین، برنامه‌ریزی می‌کنند و در مرحله دوم اپراتور، انتقال توان بین ریزشبکه‌ها را مطابق با سیستم حفاظت موجود هماهنگ کرده و از ظرفیت‌های استفاده نشده منابع ریزشبکه‌ها برای تغذیه بارهای تأمین‌نشده در گام اول استفاده می‌کند.

طرح بهینه‌سازی به‌صورت یک "مسئله برنامه‌ریزی خطی"، مدل‌سازی و یک شاخص جدید برای کمی‌سازی عملکرد ارائه شده است. این طرح در سیستم نمونه پیاده‌سازی شده و نتایج اثبات می‌کند که سیستم مدیریت خروج پیشنهادی می‌تواند از منابع موجود به‌صورت بهینه استفاده کند و تاثیرات نامطلوب بلایای طبیعی را کاهش دهد. همچنین، نقش منابع انرژی تجدیدپذیر در افزایش تاب‌آوری و بهبود حفاظت سیستم توزیع در برابر بحران‌ها، از طریق موارد مطالعاتی واقعی تشریح شده است.

کلمات کلیدی

تاب‌آوری، ریز شبکه، حفاظت

۱- مقدمه

با توجه به نقش حیاتی سیستم‌های زیرساختی از جمله شبکه‌های برق، سیستم‌های مخابراتی، سامانه‌های حمل و نقل، تراکنش‌های بانکی و تبادلات مالی و... در زندگی بشر امروزی، تاب آوری به عنوان یکی از مهم‌ترین ملاحظات، از دیرباز در طراحی این سیستم‌ها مدنظر قرار گرفته است [۱]. هدف از تاب آوری مقاوم نمودن یک سیستم در شرایط وقوع خرابی یک یا چند تجهیز است. در سیستم‌های بزرگ با تجهیزات فراوان که در هر لحظه برخی از آن‌ها ممکن است خارج از سرویس باشند و البته نقطهٔ کار سیستم نیز دائماً در حال تغییر است، مطالعات تحلیل پیشامد به صورت دوره ای انجام می پذیرد تا از حفظ امنیت سیستم در شرایط وقوع پیشامدهای خروج یگانه آن طمینان حاصل گردد؛ به عبارت دیگر، حفظ امنیت یک سیستم زیرساختی و مقاوم ساختن عملکرد آن در برابر حوادث با اثر کم و احتمال زیاد به عنوان یک ضرورت بهره برداری، از گذشته متداول بوده است[۲]. در سالهای اخیر، تغییرات آب و هوایی و گرم شدن کرهٔ زمین منجر به افزایش وقوع حوادث طبیعی شده است[۳]. تابستان های بسیار گرم و طولانی، زمستان های بسیار سرد همراه با یخبندان‌های شدید، سیلاب‌های ناگهانی و خسارت بار، طوفان‌های با سرعت بالا و مخرب، تندبادهای گسترده و فاجعه‌بار و ... همگی از رخدادهایی هستند که برای همگان آشنا بوده و در اقصی نقاط کرهٔ زمین مرتب در حال وقوع می باشند. بسته به موقعیت جغرافیایی یک منطقه، وقوع برخی از این حوادث محتمل‌تر و برخی دیگر بعید است؛ اما افزایش وقوع آن‌ها بر اساس مستندات موجود، واقعیتی انکارناپذیر است [۴]. حملات فیزیکی و سایبری نیز از جمله حوادث با اثر شدید و احتمال کم می باشند که در صورت وقوع می توانند خاموشی‌های گسترده‌ای را رقم بزنند [۵]. امروزه وقوع خاموشی‌های گسترده، هرچند کوتاه مدت نیز عواقب سنگین اقتصادی و انسانی به همراه دارد. از سوی دیگر به دلیل وابستگی عملکرد صحیح سیستم‌های زیرساختی به یکدیگر، با وقوع یک خاموشی چندین ساعته در یک منطقه، عملکرد سایر سیستم‌های زیرساختی مانند شبکه‌های آبرسانی یا سیستم‌های مخابراتی نیز مختل شده و عواقب وقوع خاموشی برق، گسترده تر می‌شود. بدیهی است در چنین شرایطی، حفظ امنیت بهره برداری یک سیستم قدرت در شرایط رخداد حوادث با اثر کم و احتمال زیاد دیگر کافی نبوده و باید یک ویژگی دیگر از این سیستم که رفتار آن به حوادث با اثر زیاد و احتمال کم را منعکس می نماید مد نظر قرار گیرد. این ویژگی که از آن به عنوان تاب آوری یاد می شود میزان استقامت، آسیب پذیری و برگشت پذیری یک سیستم زیرساختی را در برابر یک حادثه شدید نشان می دهد [۳].

در این راستا حوادث ممکن را می‌توان بر حسب شدت اثرگذاری و احتمال وقوع به سه دستهٔ زیر طبقه‌بندی نمود:

- دستهٔ اول حوادثی هستند که احتمال وقوع مشخص دارند و اثرات آن‌ها نیز محدود بوده و به راحتی قابل برآورد است.
- دستهٔدوم حوادثی را شامل می شوند که به ندرت رخ می دهند اما عواقب وقوع این حوادث قابل برآورد می باشد. [۶].
- دستهٔ سوم حوادث تجربه نشده ای می باشند. با توجه به اینکه در این موارد حتی یک نمونهٔ مشابه در گذشته وجود نداشته است، صحبت از احتمال وقوع این حوادث عملاً بی معنی است؛ هرچند که می‌توان در مورد امکان وقوع آن‌ها بحث نمود [۷].

۱-۱- تحلیل امنیت و قابلیت اطمینان

اگرچه از نظر تعاریف کلاسیک، امنیت زیر مجموعه تعریف جامع قابلیت اطمینان است، ولی عملاً تحلیل امنیت در حوزه بهره‌برداری و راهبری سیستم‌های قدرت و مطالعات قابلیت اطمینان در حوزه مطالعات و برنامه‌ریزی این سیستم‌ها به انجام می‌رسد و لذا می‌توان این دو تعریف را تفکیک نمود. ویژگی امنیت عموماً با عنوان معیار N-1 در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت شناخته می‌شود که در آن N تعداد تجهیزات سیستم است؛ به این معنی که اگر معیار N-1 در یک سیستم قدرت رعایت گردد، این سیستم می‌تواند در شرایط پیشامد خروج یگانه هر یک از تجهیزات، با N-1 تجهیز باقیمانده بدون هرگونه اختلالی به عملکرد خود ادامه دهد. یا اگر بهره‌برداری یک سیستم با رعایت معیار N-2 انجام گیرد، پیشامد خروج همزمان دو تجهیز در عملکرد صحیح این سیستم نقصی ایجاد نمی‌کند. در صورتی که در یک شرایط بهره‌برداری با ساختار متناظر با آن لحظه برخی از قیود بهره‌برداری یا الزامات تأمین بار شبکه نقض گردد، بهره‌بردار شبکه برحسب ریسک‌پذیری، ظرفیت موجود سیستم و قابلیت پذیرش افزایش هزینهٔ بهره‌برداری، دو رویکرد متفاوت پیش رو دارد؛ رویکرد اول که پیشگیرانه می‌باشد شامل جابجایی نقطه کار فعلی شبکه به نقطه‌ای است که در آن معیار N-1 ارضا گردد تا در صورت وقوع یک پیشامد، شرایط پس از حادثه همچنان از نظر قیود بهره‌برداری یا الزامات تأمین بار مجاز باشد. با فرض وجود ظرفیت کافی در سیستم، انتخاب این رویکرد به معنای پذیرش افزایش هزینهٔ بهره برداری به صورت دائمی و البته کاهش ریسک خاموشی در شرایط وقوع پیشامدها است. رویکرد دوم، اصلاحی است که در آن بهره‌بردار شبکه آمادگی دارد با بکارگیری ابزارهای مناسب اقدامات ضروری جهت برطرف نمودن نقض قیود پس از رخداد یک حادثه را پیاده نماید. باز توزیع توان بین واحدها پس از پیشامد خروج یک واحد تولید از جمله این اقدامات است. همچنین، برخی از اقدامات اصلاحی ممکن است پس از تشخیص وقوع حادثه به صورت خودکار اجرا

شـوند. برای مثال حذف بخشـی از بار شـبکه توسـط رله‌های حذف بار فرکانسـی مثال دیگری برای رویکرد اصـلاحی جهت ارضـای قیود بهره‌برداری فرکانس شـبکه اسـت. در این رویکرد، افزایش دائمی هزینهٔ بهره‌برداری مطرح نبوده ولی در مقابل، ریسـک نقض قیود شـبکه و امکان خاموشـی بار بالاتر اسـت [۲]. دیدگاه فوق جهت ارزیابی و تضـمین امنیت سـیسـتم‌های زیرسـاختی کاملاً بر یک تحلیل قطعی مبتنی اسـت و هیچ حساسیتی به احتمال وقوع حوادث ندارد و عملاً با حوادث با احتمال کم و یا زیاد به صورت مشابه برخورد می‌کند؛ در حالی که طراحی و برنامه‌ریزی توسـعه این سـیسـتم‌ها معمولاً توسـط روش‌های مبتنی بر تحلیل‌های احتمالاتی انجام می‌شوند. در مطالعات مبتنی بر روش‌های احتمالاتی که از آن‌ها با عنوان ارزیابی قابلیت اطمینان نیز یاد می‌شـود، احتمال خروج تجهیزات نیز در محاسبات وارد شده و میزان مقاوم ساختن سیستم در مقابل یک حادثه با احتمال زیاد، بیشتر از میزان مقاوم ساختن سیستم در برابر یک حادثه با احتمال کم است[۸]. روش‌های احتمالاتی با پذیرش بار محاسباتی سنگین‌تر و البته نیازمندی اطلاعاتی بیشتر، نتایجی نزدیک‌تر به مشـاهدات دنیای واقعی دارند. در حقیقت این روش‌ها امکان تخمین دقیق هزینه و سـود طرح‌های توسـعه و همچنین قابلیت مدلسـازی عدم قطعیت‌های مختلف را فراهم می‌کنند [۶].

۱-۲- تاب‌آوری در سیستم‌های زیرساختی

در این سـیسـتم‌ها، نگهداری و تعمیرات تجهیزات جزء جداناپذیری از فرآیند بهره‌برداری می‌باشـد. همچنین پس از وقوع یک حادثه و افت عملکرد سیستم، بازیابی سرویس و ترمیم ساختارش ضرورتی گریز ناپذیر و البته از نظر عملی امکان پذیر اسـت؛ بنابراین، تعریف تاب‌آوری در سـیسـتم‌های زیرسـاختی بایسـتی هر دو وجه اسـتقامت در برابر حادثه و بازیابی سـریع پس از حادثه را در کانون توجه خود قرار دهد. به عبارت دیگر، توانایی سیستم در پیش‌بینی، احتمال و تطبیق با اغتشاشات مختلف و بازیابی سریع، تاب‌آوری نامیده می‌شود [۹و۱۰].

۲-۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه تاب‌آوری شـبکه توزیع و روش‌های بهبود آن انجام شده است. در مرجع [۱۱] با مروری بر انواع حوادث طبیعی و مقایسـه درصـد وقوع آن‌ها، انواع مدل‌سـازی مختلف برای این رویدادها آورده شده و تأثیر راهکارهای سخت کردن تجهیزات شبکه و منابع تولید پراکنده بر روی بهبود تاب‌آوری شـبکه به صـورت کیفی مورد بحث قرار گرفته‌اسـت. در مرجع [۱۲] با اسـتفاده از یک مدل آماری چند متغیره به ارزیابی استراتژی‌های ارتقاء تاب‌آوری شبکه توزیع پرداخته شده است. در مرجع [۱۳] با اسـتفاده از شـاخص‌های قابلیت اطمینان و اصلاح و بازبینی این شاخص‌ها برای مطالعات تاب‌آوری، با استفاده از شبکه‌های هوشمند و تبدیل شـبکه توزیع به جزایر پایدار در جهت بهبود تاب‌آوری شـبکه تلاش شده‌است.

در مرجع [۱۴] بـا اسـتفاده از نظریـه‌ی گراف و بـا در نظر گرفتن معیارهای مختلف برای تاب‌آوری با استفاده از الگوریتم تجمع شاخص‌ها و با در نظر گرفتن ضـریب وزنی برای هر شـاخص، یک معیار کمی جهت محاسبه تاب‌آوری شبکه معرفی شده‌است.

عوامل مختلفی که بر مسـئله تاب‌آوری و حفاظت شـبکه تاثیرگذار هسـتند و در مقالات و مطالعات گذشـته مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند تحلیل و بررسـی شـد. یکی از مهم‌ترین عواملی که می‌تولند بر شـاخص‌های تاب‌آوری و حفاظت سـیسـتم تاثیر به‌سـزایی بگذارد، وجود منابع مختلف تولید توان در نزدیکی بارهای سـیسـتم اسـت که از آن‌ها به عنوان منابع تولید پراکنده نام برده می‌شـود. از این رو در بخش بعدی این مطالعه به بررسی این منابع بر تاب‌آوری و حفاظت شبکه توزیع پرداخته شده‌است. با توجه به اینکه با حضور منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع می‌توان شبکه را به ریزشبکه‌های مختلف تقسیم‌بندی نمود، دسته‌ای دیگر از مطالعات به افزایش تاب‌آوری سیستم بر اساس هماهنگی این ریزشبکه‌ها می‌ردازند و به پیکربندی مجدد شبکه با استفاده از کلیدزنی مختلف در شبکه مبادرت می‌ورزند؛ اما در هیچ یک از مطالعات گذشته هماهنگی بین ریزشبکه‌ها و اپراتور سیستم توزیع به عنوان یکی از عوامل مهم در مدیریت شبکه توزیع نمی‌پردازند. در پژوهش حاضر استراتژی معرفی شده در دو سطح سلسله مراتبی به مدیریت منابع تولید پراکنده که از منابع سـوخت فسـیلی و انرژی‌های نو تغذیه می‌شـوند و خروج بارها در صـورت لزوم می‌پردازند؛ در سـطح اول هر یک از ریزشـبکه‌ها برنامه خود را به صـورت جداگانه برای حداقل نمودن هزینه‌های تولید و کاهش بار تنظیم می‌کند. در سـطح دوم اپراتور شبکه توزیع با توجه به برنامه هر یک از ریزشبکه‌ها به اصلاح تولید و مصـرف ریزشـبکه‌ها برای حداقل نمودن هزینه تولید و کاهش بار شـبکه می‌پردازد؛ به عبارت دیگر، افزایش تاب‌آوری و بهبود حفاظت شـبکه توزیع در دو مرحله صـورت می‌گیرد. همچنین با توجه به برنامه‌ریزی هر یک از ریزشـبکه‌ها در سـطح اول، اسـتقلال آن‌ها حفظ می‌گردد و با امکان تبادل توان بین آن‌ها هزینه هر یک از آن‌ها کاهش می‌یابد.

در روش ارائه شده در این مقاله در مرحله اول یک روش مناسب برای مدل‌سازی یک طرح خروج سلسله مراتبی ارائه شده‌است. همچنین یک معیار و رابطه برای سـنجش میزان تاب‌آوری سـیسـتم معرفی شـده که توانایی سـیسـتم برای تاب‌آوری در مقابل حوادث مختلف را منعکس می‌نماید. در نهایت نیز تأثیر منابع تولید پراکنده و انرژی‌های نو نظیر انرژی خورشیدی و بادی بر روی سیستم در نظر گرفته شده است.

۲- روش تحقیق

در این مقاله یک طرح مدیریت خروج سلسله مراتبی (OMS[۱]) برای یک سیستم توزیع شامل چند ریزشبکه ارائه می‌شود. جهت شبیه‌سازی و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای MATLAB R2022a و GAMS 28.2.0 استفاده شده‌است. در این طرح پس از تشخیص ویژگی‌ها و الزامات اصلی یک سیستم مدیریت خروج منعطف بر پایه تجربیات فجایع طبیعی اخیر، این طرح می‌تواند توسط ریزشبکه ها با منابع انرژی توزیع شده چندگانه (DER[۲]) توسعه یابد. علاوه بر این هزینه خط ارتباطی معادل به تابع هدف به عنوان یک ابزار مؤثر برای مدیریت منعطف ریسک تلفات بار در سیستم‌های چند ریزشبکه اعمال می‌شود. یک شاخص جدید برای کمی سازی تأثیر سیستم مدیریت خروج توسعه یافته برای بهبود تاب آوری سیستم در مقابل اغتشاشات مختلف پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این عوامل مؤثر اصلی در تاب آوری سیستم‌های توزیع چند ریزشبکه از طریق موارد مطالعاتی توسعه یافته مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر این اساس نوآوری‌ها و روش‌های اصلی این مقاله می‌تواند به صورت زیر لیست شود:

• دراین مقاله یک طرح خروج سلسله مراتبی دو مرحله‌ای را برای عملکرد منعطف شبکه دارای چند ریز شبکه پیشنهاد شده‌است.

• استراتژی پیشنهادی استقلال ها را محدود نمی‌سازد و آن‌ها می‌توانند به صورت مستقل خود را مدیریت کنند.

• یک الگوریتم سازمان یافته بر پایه روش کنترل پیش بین مدل (MPC[۳]) برای برنامه ریزی منعطف ریزشبکه ها معرفی می‌شود.

• یک الگوریتم بهینه سازی پیشنهاد شده‌است که به وسیله آن اپراتور سیستم توزیع (DSO[۴]) به عنوان یک واحد غیرانتفاعی، بار کاهش یافته در کل سیستم را با استفاده از ظرفیت استفاده نشده از منابع ریزشبکه حداقل می‌سازد.

• سیستم مدیریت خروج پیشنهادی به صورت یک مسئله بهینه سازی برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط فرمول‌بندی شده که می‌تواند به طور موثری با استفاده از بسته‌های نرم افزاری حل شود.

• ویژگی‌های اصلی مدل پیشنهادی با استفاده از موارد مطالعاتی واقعی تشریح شده‌است.

در ادامه فرضیات اصلی و روش مدل‌سازی بیان می‌شود. یک سیستم قدرت منعطف باید قادر باشد به درستی با حوادث شدید و با احتمال کم مقابله کند. با استفاده از تجربیات حوادث طبیعی اخیر، خصوصیات اصلی این حوادث که آن‌ها را از دیگر پیشامدهای سیستم قدرت متمایز سازد می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

• زمان و دوره این اغتشاشات کاملاً نامشخص است و ممکن است چندین روز طول بکشد.

• دارای ماهیتی دینامیکی هستند و بینی حوادث آینده یا توالی وقوع آن‌ها به صورت مؤثر بسیار مشکل است.

• وقوع آن‌ها ممکن است منجر به خرابی تجهیزات زیادی در مدت زمانی کوتاه گردد. به طور مثال تجهیزات سیستم توزیع و انتقال نظیر پست‌ها خطوط انتقال و دکل‌ها ممکن است آسیب ببینند.

• منابع تولید توان ممکن است در دسترس یا موجود نباشند.

با در نظر گرفتن خصوصیات ذکر شده فوق، برای داشتن یک سیستم منعطف طرح مدیریت خروج باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

• به دلیل درجه بالای عدم قطعیت، تمام منابع تولید باید تا حد ممکن متنوع باشند و باید از تکیه بر مجموعه‌ای محدود از منابع تولید توان اجتناب نمود.

• این طرح باید به قدر کافی جهت عکس العمل سریع به حوادث و تنظیم استراتژی‌های عملکردی در مدت زمانی کوتاه منعطف باشد.

• به دلیل محدودیت در منابع موجود باید اولویت تغذیه بارها تعیین و تشخیص داده شود.

۲-۱- طرح مدیریت خروج سلسله مراتبی پیشنهادی

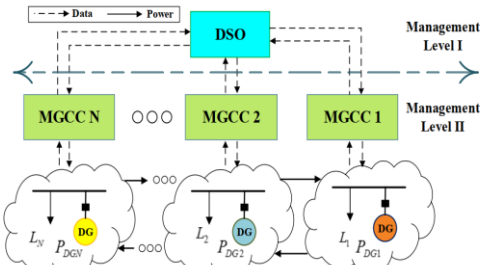
در یک سیستم دارای چند ریزشبکه، کاملاً محتمل است که ریزشبکه ها تحت نظر صاحبان مختلف مدیریت و عمل کنند؛ بنابراین هر طرح مدیریت خروجی که برای چنین سیستمی طراحی می‌شود باید استقلال ریزشبکه را تا جایی‌که ممکن است محدود نکند. چارچوب مدیریت خروج پیشنهادی در این مقاله شامل دو سطح سلسله مراتبی می‌باشد. کنترلرهای مرکزی ریزشبکه (MGCC[۵]) که در سطح پایین‌تر قرار گرفته‌است مسئول عملکرد و مدیریت ریزشبکه مربوط به خود است. در این زمینه، هر ریزشبکه به صورت مستقل توسط کنترلر مرکزی خود کنترل و مدیریت می‌شود. باید توجه داشت که استراتژی عملکردی و مدیریت هر ریزشبکه می‌تواند به روشی متمرکز [۱۰] یا غیر متمرکز[۱۵] باشد؛ اما در حالت مدیریت غیر متمرکز، کنترلر مرکزی به عنوان نماینده‌ی ریزشبکه در تبادل با شبکه بالادستی یا دیگر ریزشبکه ها عمل می‌کند. در این حالت به نظر می‌رسد عبارت کنترلر مرکزی مناسب نیست و باید با یک عبارت مناسب نظیر واحد هماهنگی ریزشبکه (MCA[۶]) جایگزین شود.

۲-۲- چهارچوب کلی طرح مدیریت خروج پیشنهادی

متنوع بودن منابع تولید توان و اشتراک‌گذاری منابع تولید و ذخیره‌سازهای موجود می‌تواند تاب‌آوری سیستم توزیع را افزایش دهد. جهت استفاده از این ظرفیت، در سیستم مدیریت خروج پیشنهادی، اپراتور سیستم توزیع نقش هماهنگ‌کننده در سطح بالاتر را برعهده می‌گیرد. در این چارچوب اپراتور سیستم توزیع مسئول حفظ امنیت منابع تولید در سیستم توزیع

می‌باشد. در نتیجه، زمانی که یک اغتشاش در شبکه بالا دست یا سیستم توزیع رخ می‌دهد اپراتور سیستم توزیع به‌عنوان یک واحد مستقل وظایف ریزشبکه‌ها را تنظیم کرده و سعی می‌کند قابلیت اطمینان سیستم و تاب‌آوری سیستم را با اشتراک‌گذاری بهینه منابع میان ریزشبکه‌ها افزایش دهد. پیاده‌سازی سیستم مدیریت خروج سلسله مراتبی پیشنهادی این امکان را برای ریزشبکه‌ها فراهم می‌کند که به صورت مستقل منابع خود را بر پایه استراتژی تطبیقی برنامه‌ریزی کنند؛ همانطور که ریزشبکه‌ها مسئول برنامه‌ریزی منابع خود هستند پیچیدگی بهینه‌سازی و کنترل برای اپراتور سیستم توزیع به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این طرح تبادل اطلاعات بین اپراتور سیستم توزیع و ریزشبکه‌ها را حداقل می‌سازد.

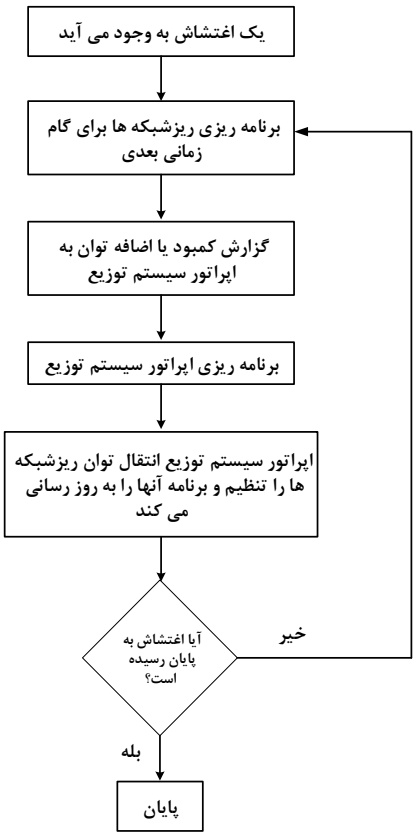
برای رسیدن به این هدف، اپراتور سیستم توزیع با اپراتورها یا مالکان ریزشبکه برای شرکت در عملیات اصلاحی پیشنهادی توسط سیستم مدیریت خروج توافق می‌نماید. به علاوه یک زیرساخت ارتباطی مطمئن و مؤثر برای تسهیل تبادل اطلاعات مورد نیاز بین ریزشبکه ها و اپراتور سیستم توزیع باید موجود باشد. شبکه ارتباطی مستحکم بین ریزشبکه‌ها برای تبادل مطمئن توان بین ریزشبکه‌ها نیز باید در دسترس باشد. ساختار کلی چنین سیستمی علاوه بر جهت انتقال توان و اطلاعات مربوطه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): ساختار کلی سیستم چند ریزشبکه‌ای

۲-۳- روش پیاده سازی گام به گام طرح مدیریت خروج پیشنهادی

زمانی که یک پیشامد در سیستم اتفاق می‌افتد، ریزشبکه‌ها منابع موجود خود را برنامه‌ریزی کرده و سعی می‌نمایند کاهش بار خود را در گام اول سیستم مدیریت خروج پیشنهادی حداقل سازند. بر پایه برنامه‌های به دست آمده در گام اول ریزشبکه‌ها، کمبود یا اضافه توان خود را برای گام زمانی بعدی تعیین می‌کنند و این مقادیر را به اپراتور سیستم توزیع اعلام می‌کنند. در گام دوم اپراتور سیستم توزیع تبادل توان ممکن بین ریزشبکه‌ها را تنظیم می‌کند و از توان اضافی منابع ریزشبکه‌ها برای تأمین بار تأمین نشده در گام اول استفاده می‌نماید. اپراتور نتایج بهینه سازی مرحله دوم را به ریزشبکه ها برای تنظیم مجدد برنامه تولیدشان اعلام می‌نماید. پس از پیاده سازی و بهینه سازی برنامه بدست آمده در هر گام زمانی اپراتور سیستم توزیع کنترل می‌کند که آیا شرایط اضطراری به‌پایان رسیده است یا خیر. دراین وضعیت، پایان شرایط اضطراری به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن شبکه اصلی بازیابی شده و تمام منابع انرژی توزیع شده در ریزشبکه ها در دسترس بوده و با روش مورد نظر عمل می‌کنند؛ بنابراین دیگر نیازی به مدیریت خروج و کاهش بار وجود ندارد. در غیراین‌صورت روش توسعه یافته در گام زمانی بعد پیاده‌سازی خواهدشد و روش ذکرشده تا زمانی که شرایط عادی به سیستم بازگردد ادامه پیداخواهدکرد. تمام مراحل طرح مدیریت خروج پیشنهادی به صورت خلاصه در شکل (۲) تشریح شده‌است.



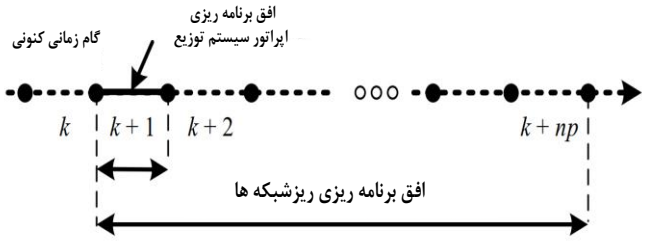
شکل (۲): ساختار کلی سیستم چند ریزشبکه‌ای

باید توجه داشت که در این مقاله، تمرکز بر روی استراتژی عملکرد سیستم‌های چند ریزشبکه در هنگام پیشامدهای خروج می‌باشد و مطالعه چنین سیستمی در شرایط عادی خارج از حیطه این مطالعه است.براساس مباحث مطرح شده می‌توان تأیید کرد که استراتژی پیشنهادی، الزامات یک سیستم مدیریت خروج منعطف را برآورده می‌سازد؛ به عبارت دیگر این سیستم از منابع مختلف برای تغذیه بارها استفاده می‌کند و منابع تأمین توان را متنوع می‌سازد. این سیستم می‌تواند به سرعت به تغییرات

از طریق پیاده‌سازی سیستم مدیریت خروج در فواصل زمانی کوتاه پاسخ‌دهد.

۲-۴- روش MPC برای برنامه‌ریزی ریزشبکه ها

مطابق با الزامات یک سیستم مدیریت خروج منعطف، یک روش کنترلی پیش بین برای برنامه‌ریزی ریزشبکه‌ها در گام اول پیشنهاد می‌شود. در این استراتژی پیش‌بینی‌های کوتاه مدت بار و منابع انرژی نو موجود برای تعیین برنامه بهینه هر ریزشبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت اصلی MPC این است که این روش عملکرد سیستم را برای گام زمانی بعدی بهینه می‌کند و به طور همزمان گام‌های زمانی آینده را در نظر می‌گیرد. از آنجایی که روش‌های بهینه سازی و پیش بینی در هر گام زمانی تکرار می‌شود این روش ریزشبکه‌ها را برای اتخاذ معیارهای عملکردی مناسب در پاسخ به تغییرات غیر قابل پیش بینی توانمند می‌سازد که منجر به انعطاف پذیری سیستم مدیریت خروجی پیشنهادی می‌شود. رویکرد اساسی MPC این است که یک مسئله بهینه سازی با افق زمانی محدود برای تعیین یک سری معیارهای عملکردی بهینه قبل از هر گام زمانی حل می‌شود، اما تنها فعالیت‌های مربوط به گام زمانی بعدی اجرا و پیاده سازی می‌شود [۱۶و۱۷]. این مفهوم به صورت شماتیکی در شکل (۳) تشریح شده است.



شکل (۳): شماتیک روش کنترلی پیش بین پیشنهادی

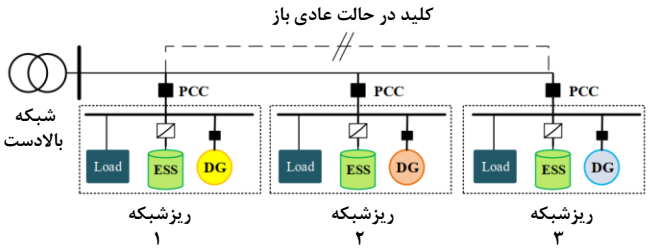
مطابق با طرح MPC محور پیشنهادی، در گام نخست، ریزشبکه‌ها مسئله برنامه ریزی گام اول را بر روی افق زمانی np گام زمانی بر پایه مقادیر پیش بینی شده از توان خروجی منابع انرژی نو و بارها در این دوره زمانی حل می‌کنند. متعاقباً آن‌ها مقدار کمبود یا اضافه توان برای گام زمانی k+1 را تعیین کرده و آن‌ها را به اپراتور سیستم توزیع گزارش می‌دهند. سپس اپراتور سیستم توزیع مسئله برنامه‌ریزی گام دوم را بر اساس این مقادیر اجرا کرده و نتایج را به ریزشبکه ها اعلام می‌کند تا آن‌ها بتوانند برنامه‌های خود را برای گام زمانی k+1 به روزرسانی کرده و پیاده سازی نمایند. این روش مدیریت خروج سلسله مراتبی در گام‌های زمانی بعدی برای تعیین معیارهای عملکردی در گام‌های زمانی k+2 و k+3 تکرار خواهد شد.

۲-۵- محاسبه شاخص تاب آوری

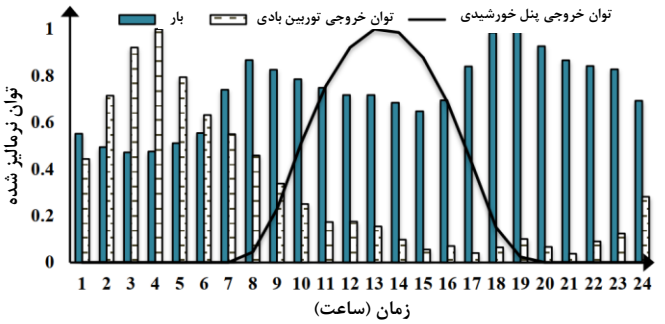
عملکرد طرح مدیریت خروج پیشنهادی با استفاده از یک شاخص تاب آوری مناسب ارزیابی شده‌است؛ اما هیچ معیار استانداردی در زمینه تاب آوری سیستم قدرت وجود ندارد و شاخص‌های مختلفی در این زمینه پیشنهاد شده است [3]. در پاسخ، ما یک شاخص تاب آوری مناسب تعریف کرده‌ایم که می‌تواند اثربخشی چارچوب پیشنهادی را برحسب کاهش انرژی مورد انتظار در هنگام یک اغتشاش با فرض احتمالات برابر برای زمان‌های وقوع مختلف، اندازه گیری کند. به این ترتیب پیشامدهای مختلف با زمان‌های آغاز مختلف تحلیل شده و میانگین این کاهش انرژی در سیستم چند ریزشبکه‌ای به عنوان شاخص تاب‌آوری ثبت می‌شود.

۲-۶- فرضیات اصلی و سیستم تست

برای ارزیابی عملکرد سیستم مدیریت خروج پیشنهادی، مدل توسعه یافته به یک سیستم توزیع شامل سه ریزشبکه همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است اعمال شد. باید توجه داشت که در شرایط عادی سیستم توزیع به شکل شعاعی با استفاده از کلید در حالت عادی باز (NO[۷]) بین ریزشبکه‌های ۱ و ۲ عمل می‌کند. ریزشبکه ها شامل ریزتوربین، توربین‌های بادی، سیستم‌های ذخیره سازی انرژی و بار می‌باشد که به بقیه سیستم از طریق یک نقطه اتصال مشترک متصل می‌شود. فرض می‌شود که پروفیل‌های بار سه ریزشبکه از نوع مسکونی بوده و پروفیل یکسانی را دنبال می‌کنند. به علاوه، بار پیک سالانه هر ریزشبکه 1 MW می‌باشد. پروفیل‌های روزانه توان خروجی توربین بادی از یک سایت بادی در ناحیه شمال ایران (منجیل)، استخراج شده است [18]. موارد مطالعاتی برای یک روز نمونه در ماه نوامبر انجام شده و پروفیل‌های نرمالیزه شده بار و تولید توان منابع انرژی نو در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۴): نمایش شماتیک سیستم تست



شکل (۵): پروفیل‌های نرمالیز شده بار و توان خروجی توربین بادی و پنل خورشیدی

دو حالت مختلف برای بررسی توانایی سیستم مدیریت خروج پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته‌است:

حالت اول:

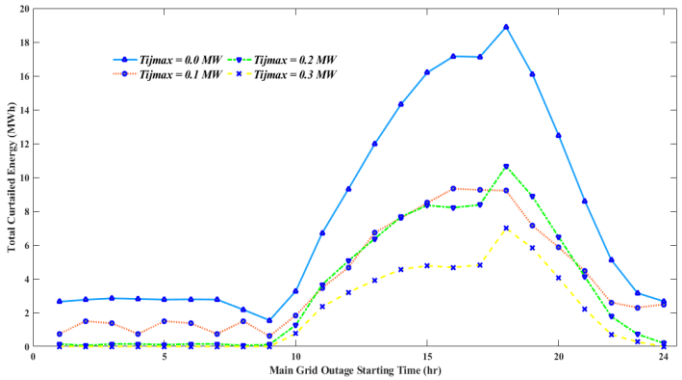
منبع تغذیه از شبکه اصلی برای ۱۰ ساعت متوالی قطع می‌شود. ریزشبکه‌ها به تغذیه بار بر پایه سیستم مدیریت خروج پیشنهادی ادامه می‌دهند.

حالت دوم:

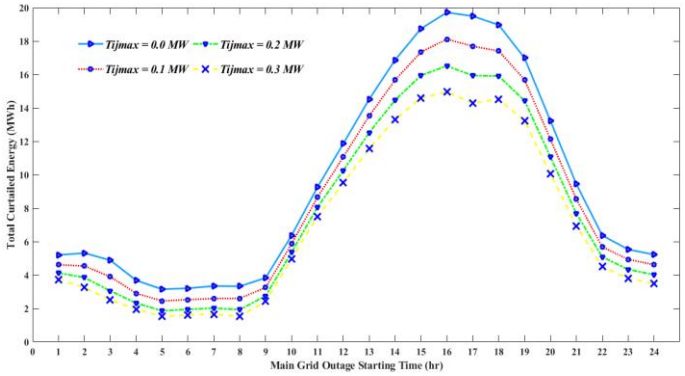
این حالت نیز همانند حالت اول است، به جز اینکه خطوط اتصالی که ریزشبکه ۳ را به ریزشبکه ۱ و ۲ متصل می‌کند، به ترتیب بعد از چهار و شش ساعت پس از قطع اتصال به شبکه بالادست قطع می‌شود. علاوه بر این خط لوله‌ای که ریزتوربین‌ها را تغذیه می‌کند دچار آسیب شده و تغذیه گاز طبیعی در ساعت نهم قطع می‌شود.

۵- نتایج و تحلیل

در این مقاله به معرفی طرح مدیریت خروج سلسله مراتبی پیشنهادی پرداخته شد و ویژگی‌ها و الزامات اصلی برای این طرح مطرح شد. در ادامه چارچوب کلی طرح، روش و برنامه‌ریزی ریزشبکه‌ها بیان شد. در مرحله بعد جهت ارزیابی، روش پیشنهادی جدیدی برای محاسبه شاخص تاب‌آوری ارائه شد. در انتها به پیاده‌سازی و شبیه‌سازی روش پیشنهادی در یک شبکه تست پرداخته شد. سناریوی ۲۴ ساعته که زمان خروج‌های مشخص شده را در حالت اول و دوم نشان می‌دهد شبیه سازی شده و مقادیر کاهش انرژی کلی به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) آورده شده است.



شکل (۶): کل انرژی کاهش یافته به صورت تابعی از ساعت آغاز شروع خروج در حالت اول



شکل (۷): کل انرژی کاهش یافته به صورت تابعی از ساعت آغاز شروع خروج در حالت دوم

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود پیاده‌سازی طرح پیشنهادی می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای تاب‌آوری سیستم کل سیستم را در مقابل قطع شبکه بالادست افزایش دهد.

برای نمونه، زمانی‌که $T_{ij}^{max} = 0.1MW$ انتخاب شود مقدار انرژی کاهش‌یافته برای سناریویی که در ساعت‌های میانی روز اتفاق می‌افتد می‌تواند انرژی کاهش یافته را تقریباً ۵۰ درصد در مقایسه با حالتی که انتقال توان میان ریزشبکه ها وجود ندارد کاهش دهد. این حالات با $T_{ij}^{max} = 0$ در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است و بطور مؤثر موقعیتی که ریزشبکه ها تنها بر روی منابع خود برای تأمین توان تکیه می‌کنند را مدل می‌کند. افزایش بیش‌تر حداکثر توان مبادله‌شده مجاز منجر به بهبود بیش‌تری می‌گردد؛ اما این بهبود زمانی که با افزایش T_{ij}^{max} به بیش از $0.3MW$ قابل اغماض بوده و منحنی‌های مربوط به $0.2MW$ و به‌خصوص در ساعات اولیه روز به همدیگر نزدیک می‌شوند. اثرگذاری طرح پیشنهادی می‌تواند به تنوع منابع موجود در ریزشبکه‌های مختلف منجر شود. برای مثال ریزشبکه‌ای که دارای ظرفیت توربین بادی بالا می‌باشد قادر به تغذیه بارهای خارجی، زمانی که تولید باد بالا است،

خواهد بود و ازطرف دیگر می‌تواند توان را از ریز شبکه‌هایی که دارای منابع تولید پراکنده قدیمی با ظرفیت بالا هستند در زمان‌های تولید بادی کم وارد نماید.

مقدار کاهش انرژی در حالت دوم به طور رقم قابل ملاحظه نسبت به حالت اول بالاتر است. پیاده سازی انتقال توان میان ریز شبکه‌ها در این حالت نیز می‌تواند موجب بهبود در تاب‌آوری سیستم گردد؛ اما این بهبود به اندازه حالت اول نیست. این واقعیت می‌تواند به از دست رفتن خطی که ریزشبکه سوم را به باقی سیستم وصل می‌کند مربوط شود. به علاوه از دست رفتن تغذیه گاز طبیعی اثربخشی طرح را بیشتر کاهش می‌دهند. یادآوری این نکته ارزشمند است که به دلیل ظرفیت بالای ریزتوربین، ریزشبکه سوم نقش بسیار مهمی در کاهش بار کاهش یافته در کل سیستم دارد زیرا این ریزشبکه قادر است مقدار تولید مورد نیاز را تأمین کرده و به دیگر ریزشبکه هایی که دارای کمبود توان هستند کمک کند.

مقادیر شاخص و تاب‌آوری مربوط به حالت‌های اول و دوم به ترتیب در جداول (۱) و (۲) برای حداکثر توان‌های قابل انتقال بین ریزشبکه‌ها (T_{ijmax}) آورده شده است. این مقادیر، کاهش انرژی مورد انتظار را برای یک اغتشاش با توالی حوادث مشخص شده در حالت‌های اول و دوم انعکاس می‌دهد.

جدول (۱): شاخص تاب آوری در حالت اول

حداکثر توان قابل انتقال بین ریز شبکه‌ها (T_{ijmax})	۰	۰.۱	۰.۲	۰.۳
شاخص تاب آوری	۴.۵۲۱	۳.۹۸۰۷	۳.۴۵۲۵	۲.۰۴۴۸

جدول (۲): شاخص تاب آوری در حالت دوم

حداکثر توان قابل انتقال بین ریز شبکه‌ها (T_{ijmax})	۰	۰.۱	۰.۲	۰.۳
شاخص تاب آوری	۹.۵۱۷۶	۸.۵۹۳۱	۷.۷۲۴۷	۶.۹۷۵۹

در زمینه این مطالعه موردی، سطح نفوذ بالاتر منابع انرژی نو در شبکه‌های تولید توزیع نه تنها بازدهی آن‌ها را افزایش می‌دهد بلکه موجب افزایش تاب‌آوری و بهبود حفاظت سیستم در مقابل حوادث طبیعی و اغتشاشات شدید می‌شود. درصورتی‌که پیاده‌سازی برنامه انتقال ممکن نباشد، ازدست رفتن غیرمنتظره خطوط ممکن است منجر به کاهش قابل ملاحظه بار در فواصل زمانی متناظر شود. خطر این حوادث می‌تواند از طریق انتخاب صحیح هزینه‌های مربوط به خطوط مختلف مدیریت شود. برای شرح بیشتر این حقیقت توان انتقالی از طریق خطوط مختلف در حالت اول در پی دو تغییر تحلیل می‌شود. حالت اول که در آن تمام خطوط هزینه ریسک معادل یکسانی دارند و حالت دوم که در آن هزینه مربوطه خط به اندازه ۵۰ درصد افزایش می‌یابد تا ریسک بالاتر آسیب دیدن را در مقایسه با خطوط دیگر انعکاس دهد. باید توجه شود که مقدار واقعی این هزینه‌ها مهم نیست و مقدار نسبی آن‌ها در مقایسه با دیگر هزینه‌ها عاملی است که بر برنامه‌ریزی بهینه تأثیر می‌گذارد. در این زمینه هزینه انتقال توان باید بر اساس اولویت‌های مورد توافق تنظیم شود تا اطمینان حاصل شود که قوانین عملکردی اپراتور سیستم توزیع در مرحله دوم مسئله بهینه سازی اعمال شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به شبیه‌سازی روش پیشنهادی و پیاده‌سازی طرح مدیریت خروج سلسله مراتبی در جهت حفاظت ریزشبکه‌ها و افزایش تاب‌آوری سیستم قدرت پرداخته شد. دو حالت برای بررسی توانایی سیستم مورد بررسی قرار گرفت. در حالت اول منبع تغذیه شبکه اصلی برای ۱۰ ساعت متوالی قطع شده و ریزشبکه‌ها بر اساس سیستم مدیریت خروج پیشنهادی به تغذیه بارها ادامه دادند. در حالت دوم نیز خط مواصلاتی که ریزشبکه سوم را به ریزشبکه‌های دیگر وصل می‌کند بعد از مدت زمانی قطع شد. همچنین تغذیه ریزتوربین‌ها دچار اختلال شده و تغذیه آن قطع شد.

در حالت اول امکان انتقال توان بین ریزشبکه‌های مختلف فراهم بوده و هر چه حداکثر توان انتقالی بین ریزشبکه‌ها بیشتر باشد مقدار انرژی کاهش یافته، محدود می‌شود. از آنجایی که در ساعات اولیه روز توان خروجی توربین بادی بالا و بار پایین می‌باشد مقدار کاهش انرژی در این ساعات پایین بوده اما با افزایش بار و کاهش انرژی‌های تجدید پذیر در ساعات میانی روز مقدار انرژی یافته به سرعت افزایش می‌یابد. در صورتی که امکان تبادل توان بین ریزشبکه‌های مختلف وجود نداشته باشد مقدار انرژی کاهش یافته به صورت فزاینده‌ای افزایش می‌یابد اما در صورتی که این امکان به وجود آید این مقدار انرژی کاهش یافته به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد؛ بنابراین در حالت اول که ارتباط با شبکه بالا دست قطع می‌شود دو عامل انرژی‌های تجدیدپذیر و تبادل توان بین ریزشبکه‌ها باعث کاهش انرژی کاهش یافته می‌شود. در حلت دوم مطابق با انتظار انرژی کاهش یافته به دلیل عدم امکان تبادل توان بین ریزشبکه‌ها به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد ولی با وجود امکان تبادل بین ریزشبکه اول و دوم، گرچه انرژی کاهش یافته کم می‌شود اما این کاهش محسوس نیست. بررسی انرژی کاهش یافته هر یک از ریزشبکه‌ها به صورت جداگانه نشان داد که در حالت اول به دلیل وجود منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزشبکه سوم و امکان تبادل توان در حداکثر مقدار خود باعث کاهش انرژی کاهش یافته در ریزشبکه سوم نسبت به ریزشبکه‌های دیگر شده، به طوری که هنگامی که قطع شبکه از بالادست در ساعات اولیه اتفاق افتاد، هیچ گونه انرژی کاهش یافته‌ای به وجود نیامد اما با کاهش حداکثر توان انتقالی بین ریزشبکه‌ها حتی در ساعات اولیه نیز انرژی کاهش یافته وجود

نداشت. نکته قابل تأمل در این وضعیت این است که ریزشبکه سوم که دارای بیشترین مقدار انرژی تجدیدپذیر است در ساعات اولیه نسبت به ریزشبکه‌های دیگر دارای انرژی کاهش یافته بیشتری است زیرا در این ساعات مقدار انرژی تجدیدپذیر کم است. در صورتی که در ساعات میانی روز که اغتشاش آغاز شود انرژی کاهش یافته این ریزشبکه نسبت به دیگر ریزشبکه‌ها کمتر است. در حالت دوم که امکان تبادل توان بین ریزشبکه سوم و ریزشبکه‌های دیگر وجود ندارد انرژی کاهش یافته این ریزشبکه در تمام ساعات نسبت به ریزشبکه‌های دیگر بالاتر است. این مسئله نشان داد که امکان تبادل توان بین ریزشبکه‌ها و همچنین وجود منابع انرژی تجدیدپذیر که امکان قطع تغذیه آن‌ها وجود ندارد دو عامل اساسی در کاهش انرژی کاهش یافته و افزایش تاب‌آوری و قابلیت اطمینان حفاظت در سیستم‌های قدرت می‌باشد.

به منظور ادامه کار و طراحی یک سیستم مدیریت خروج سلسله مراتبی بهینه‌تر در شبکه‌های توزیع پیشنهادات به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

- عدم دسترسی به منابع تولید انرژی نو نظیر ابری بودن هوا و کاهش وزش باد در سیستم مدیریت خروج در نظر گرفته شود.
- با توجه به ماهیت تصادفی بودن منابع انرژی نو، عدم قطعیت این منابع در نظر گرفته شود.
- می‌توان با روش‌های پاسخ تقاضا بخشی از بار را در ساعات پیک به ساعات کم باری انتقال داد تا انرژی کاهش یافته را کم نمود.

مراجع

[1] Billinton, R., & Allan, R. N., *Reliability evaluation of engineering systems, pp. 155-173, New York: Plenum press*, 1992.
[2] Shahidehpour, M., Tinney, F., & Fu, Y., Impact of security on power systems operation. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 93, No. 11, pp. 2013-2025, 2005.
[3] Gholami, A., Aminifar, F., & Shahidehpour, M., Front lines against the darkness: enhancing the resilience of the electricity grid through microgrid facilities. *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 4, No. 1, pp. 18-24, 2016.
[4] Wang, Y., Chen, C., Wang, J., & Baldick, R, Research on resilience of power systems under natural disasters—A review. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, No. 2, pp. 1604-1613, 2016.
[5] Madani, V., Das, R., Aminifar, F., McDonald, J., Venkata, S. S., Novosel, D., ... & Shahidehpour, M., Distribution automation strategies challenges and opportunities in a changing landscape. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 4, pp. 2157-2165, 2015.
[6] Billinton, Roy. *Power system reliability evaluation*. Taylor & Francis, 1970.
[7] Zadeh, L. A., Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 3- 28, 1978.
[۸] صالحی دوبخشری، احمد، و فتوحی فیروزآباد، محمود، **"برنامه ریزی توسعه واحد های تولیدی در حضور نیروگاه های بادی از نقطه نظر قابلیت اطمینان"**، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران (انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران)، ۵(۱)، ۴۲-۴۹، ۱۳۸۷.
[9] Brown, G., Carlyle, M., Salmerón, J., & Wood, K., Defending critical infrastructure. *Interfaces*, Vol. 36, No. 6, pp. 530-544, 2006.
[10] Arghandeh, R., Meier, A. V., Mehrmaneshb, L., & Mili, L., On the Definition of Cyber-Physical Resilience in Power Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, pp. 1060-1069, 2016.
[11] Torkashvand, A., Ghasemi, H., & Aminifar, F., Parameters Estimation of Classical Model of Generator Using PMU Data. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, Vol. 14, No. 1, pp. 73-82, 2017.
[12] Zhu, J., & Mostafavi, A., Performance Assessment in Complex Engineering Projects Using a System of Systems Framework. *IEEE Systems Journal*, Vol. 12, No. 1, pp. 262-273, 2017.
[13] Vaahedi, E., *Practical power System operation*. John Wiley & Sons, 2014.
[14] P. Bajpai, S. Chanda, K. Srivastava, " A novel metric to quantify and enable resilient distribution system using graph theory and choquet integral", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 9, no. 4, pp. 2918 – 2929, Nov 2018.
[15] Madni, A. M., & Jackson, S., Towards a conceptual framework for resilience engineering. *IEEE Systems Journal*, Vol. 3, No. 2, pp. 181-191, 2009.
[16] Y. Wang, C. Chen, J. Wang and R. Baldick, "Research on resilience of power systems under natural disasters-a review", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 1604–1613, Mar 2016.
[17] Nateghi, R., Multi-dimensional infrastructure resilience modeling: an application to hurricane-prone electric power distribution systems. *Ieee Access*, 6, pp.13478-13489, 2018.
[18] M. Panteli, D. N. Trakas, P. Mancarella, and N. D. Hatziargyriou, "Boosting the Power Grid Resilience to Extreme Weather Events Using Defensive Islanding", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 7, no. 6, pp. 2913 – 2922, Mar 2016.

[1] Outage Management Scheme
[2] Distributed Energy Resources
[3] Model Predictive Control
[4] Distribution System Operator
[5] Microgrid Central Controller
[6] Microgrid Coordinating Agent
[7] Normally Open