

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 ریز شبکه 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 ریز شبکه معرفی شده است. ریز شبکه‌ها منابع موجود را در گام اول با استفاده از الگوریتم کنترل پیش‌بین، برنامه‌ریزی می‌کنند و در مرحله دوم اپراتور، انتقال توان بین ریز شبکه‌ها را مطابق با سیستم حفاظت موجود هماهنگ کرده و از ظرفیت‌های استفاده نشده منابع ریز شبکه‌ها برای تغذیه بارهای تأمین‌نشده در گام اول استفاده می‌کند. طرح بهینه‌سازی به صورت 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 به صورت بهینه استفاده کند و تأثیرات 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 [1]. 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 نقطه 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 [2]. در سالهای اخیر، تغییرات آب و هوایی و گرم شدن کره زمین منجر به افزایش وقوع حوادث طبیعی شده است [3]. تابستان های بسیار گرم و طولانی، زمستان های بسیار سرد همراه با یخبندان های شدید، سیلاب های ناگهانی و خسارت بار، طوفان های با سرعت بالا و مخرب، تندباد های گسترده و فاجعه بار و ... همگی از رخدادهایی هستند که برای همگان آشنا بوده و در اقصی نقاط کره زمین مرتب در حال وقوع می باشند. بسته به موقعیت جغرافیایی یک منطقه، وقوع برخی از این حوادث محتمل تر و برخی دیگر بعید است؛ اما افزایش وقوع آن ها بر اساس مستندات موجود، واقعیتی انکارناپذیر است [4]. حملات فیزیکی و سایبری نیز از جمله حوادث با اثر شدید و احتمال کم می باشند که در صورت وقوع می توانند خاموشی های گسترده ای را رقم بزنند [5]. امروزه وقوع خاموشی های گسترده، هر چند کوتاه مدت نیز عواقب سنگین اقتصادی و انسانی به همراه دارد. از سوی دیگر به دلیل وابستگی عملکرد صحیح سیستم های زیرساختی به یکدیگر، با وقوع یک خاموشی چندین ساعته در یک منطقه، عملکرد سایر سیستم های زیرساختی مانند شبکه های آبرسانی یا سیستم های مخابراتی نیز مختل شده و عواقب وقوع خاموشی برق، گسترده تر می شود. 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 [3].

در این راستا حوادث ممکن را می توان بر حسب شدت اثرگذاری و احتمال وقوع به سه دسته زیر طبقه بندی نمود:

- دسته اول حوادثی هستند که احتمال وقوع مشخص دارند و اثرات آن ها نیز محدود بوده و به راحتی قابل برآورد است.
- دسته دوم حوادثی را شامل می شوند که به ندرت رخ می دهند اما عواقب وقوع این حوادث قابل برآورد می باشد. [6].
- دسته سوم حوادث تجربه نشده ای می باشند. با توجه به اینکه در این موارد حتی یک نمونه مشابه در گذشته وجود نداشته است، صحبت از احتمال وقوع این حوادث عملاً بی معنی است؛ هر چند که می توان در مورد امکان وقوع آن ها بحث نمود [7].

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 بهره برداری و راهبری سیستم های قدرت و مطالعات قابلیت اطمینان در حوزه مطالعات و برنامه ریزی این سیستم ها به انجام می رسد و لذا می توان این دو تعریف را تفکیک نمود. ویژگی امنیت عموماً با عنوان معیار N-1 در بهره برداری سیستم های قدرت شناخته می شود که در آن N تعداد تجهیزات سیستم است؛ به این معنی که اگر معیار N-1 در یک سیستم قدرت رعایت گردد، این سیستم می تواند در شرایط پیشامد خروج یگانه هر یک از تجهیزات، با N-1 تجهیز باقیمانده بدون هرگونه اختلالی به عملکرد خود ادامه دهد. یا اگر بهره برداری یک سیستم با رعایت معیار N-2 انجام گیرد، پیشامد خروج همزمان دو تجهیز در عملکرد صحیح این سیستم نقضی ایجاد نمی کند. در صورتی که در یک شرایط بهره برداری با ساختار متناظر با آن لحظه برخی از قیود بهره برداری یا الزامات تأمین بار شبکه نقض گردد، بهره بردار شبکه برحسب ریسک پذیری، ظرفیت موجود سیستم و قابلیت پذیرش افزایش هزینه بهره برداری، دو رویکرد متفاوت پیش رو دارد؛ رویکرد اول که پیشگیرانه می باشد شامل جابجایی نقطه کار فعلی شبکه به نقطه ای است که در آن معیار N-1 ارضا گردد تا در صورت وقوع یک پیشامد، شرایط پس از حادثه همچنان از نظر قیود بهره برداری یا الزامات تأمین بار مجاز باشد. با فرض وجود ظرفیت کافی در سیستم، انتخاب این رویکرد به معنای پذیرش افزایش هزینه بهره برداری به صورت دائمی و البته کاهش ریسک خاموشی در شرایط وقوع پیشامدها است. رویکرد دوم، اصلاحی است که در آن بهره بردار 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

مرجع [13] با استفاده از شاخص‌های قابلیت اطمینان و اصلاح و بازبینی این شاخص‌ها برای مطالعات تاب‌آوری، با استفاده از شبکه‌های هوشمند و تبدیل شبکه توزیع به جزایر پایدار در جهت بهبود تاب‌آوری شبکه تلاش شده‌است.

در مرجع [14] با استفاده از نظریه‌ی گراف و با در نظر گرفتن معیارهای مختلف برای تاب‌آوری با استفاده از الگوریتم تجمع شاخص‌ها و با در نظر گرفتن ضریب وزنی برای هر شاخص، یک معیار کمی جهت محاسبه تاب‌آوری شبکه معرفی شده‌است.

عوامل مختلفی که بر مسئله تاب‌آوری و حفاظت شبکه تاثیرگذار هستند و در مقالات و مطالعات گذشته مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند تحلیل و بررسی شد. یکی از مهم‌ترین عواملی که می‌تولند بر شاخص‌های تاب‌آوری و حفاظت سیستم تاثیر به‌سزایی بگذارد، وجود منابع مختلف تولید توان در نزدیکی بارهای سیستم است که از آن‌ها به عنوان منابع تولید پراکنده نام برده می‌شود. 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 می‌پردازند 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 سوخت فسیلی و انرژی‌های نو تغذیه می‌شوند و خروج بارها در صورت لزوم می‌پردازند؛ در سطح اول هر یک از ریزشبکه‌ها برنامه خود را به صورت جداگانه برای حداقل نمودن هزینه‌های تولید و کاهش بار تنظیم می‌کند. در سطح دوم اپراتور شبکه توزیع با توجه به برنامه هر یک از ریزشبکه‌ها به اصلاح تولید و مصرف ریزشبکه‌ها برای حداقل نمودن هزینه تولید و کاهش بار شبکه می‌پردازد؛ به عبارت دیگر، افزایش تاب‌آوری و بهبود حفاظت شبکه توزیع در دو مرحله صورت می‌گیرد. همچنین با توجه به برنامه‌ریزی هر یک از ریزشبکه‌ها در سطح اول، استقلال 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 سنجش میزان تاب‌آوری سیستم معرفی شده که توانایی سیستم برای تاب‌آوری در مقابل حوادث مختلف را منعکس می‌نماید. در نهایت نیز تاثیر منابع تولید پراکنده و انرژی‌های نو نظیر انرژی خورشیدی و بادی بر روی سیستم در نظر گرفته شده‌است.

شوند. برای مثال حذف بخشی از بار شبکه توسط رله‌های حذف بار فرانسی مثال دیگری برای رویکرد اصلاحی جهت ارضای قیود بهره‌برداری فرانکس شبکه است. در این رویکرد، افزایش دائمی هزینه بهره‌برداری مطرح نبوده ولی در مقابل، ریسک نقض قیود شبکه و امکان خاموشی بار بالاتر است [2]. دیدگاه فوق جهت ارزیابی و تضمین امنیت سیستم‌های زیرساختی کاملاً بر یک تحلیل قطعی مبتنی است 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 توسعه این سیستم‌ها معمولاً توسط روش‌های مبتنی بر تحلیل‌های احتمالاتی انجام می‌شوند. در مطالعات مبتنی بر روش‌های احتمالاتی که از آن‌ها با عنوان ارزیابی قابلیت اطمینان نیز یاد می‌شود، 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 [8]. روش‌های احتمالاتی با پذیرش بار محاسباتی سنگین‌تر و البته نیازمندی اطلاعاتی بیشتر، نتایجی نزدیک‌تر به مشاهدات دنیای واقعی دارند. در حقیقت این روش‌ها امکان تخمین دقیق هزینه و سود طرح‌های توسعه و همچنین قابلیت مدلسازی عدم قطعیت‌های مختلف را فراهم می‌کنند [6].

۱-۲- تاب‌آوری در سیستم‌های زیرساختی

در این سیستم‌ها، نگهداری و تعمیرات تجهیزات جزء جداناپذیری از فرآیند بهره‌برداری می‌باشد. 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 است؛ بنابراین، تعریف تاب‌آوری در سیستم‌های زیرساختی بایستی هر دو وجه استقامت در برابر حادثه و بازیابی سریع 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 [9,10].

۱-۳- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه تاب‌آوری شبکه توزیع و روش‌های بهبود آن انجام شده است. در مرجع [11] با مروری بر انواع حوادث طبیعی و مقایسه درصد وقوع آن‌ها، انواع مدل‌سازی مختلف برای این رویدادها آورده شده و تاثیر راهکارهای سخت کردن تجهیزات شبکه و منابع تولید پراکنده بر روی بهبود تاب‌آوری شبکه به صورت کیفی مورد بحث قرار گرفته‌است. در مرجع [12] با استفاده از یک مدل آماری چند متغیره به ارزیابی استراتژی‌های ارتقاء تاب‌آوری شبکه توزیع پرداخته شده است. در

۲- روش تحقیق

- 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 ریزش شبکه، کاملاً محتمل است که ریزش شبکه‌ها تحت نظر صاحبان مختلف مدیریت و عمل کنند؛ بنابراین هر طرح مدیریت خروجی که برای چنین سیستمی طراحی می‌شود باید استقلال ریزش شبکه را تا جایی که ممکن است محدود نکند. چارچوب مدیریت خروج پیشنهادی در این مقاله شامل دو سطح سلسله مراتبی می‌باشد. کنترلرهای مرکزی ریزش شبکه (MGCC^۱) که در سطح پایین‌تر قرار گرفته‌اند مسئول عملکرد و مدیریت ریزش شبکه مربوط به خود است. در این زمینه، هر ریزش شبکه به صورت مستقل توسط کنترلر مرکزی خود کنترل و مدیریت می‌شود. باید توجه داشت که استراتژی عملکردی و مدیریت هر ریزش شبکه می‌تواند به روشی متمرکز [10] یا غیر متمرکز [15] باشد؛ اما در حالت مدیریت غیر متمرکز، کنترلر مرکزی به عنوان نماینده‌ی ریزش شبکه در تبادل با شبکه بالادستی یا دیگر ریزش شبکه‌ها عمل می‌کند. در این حالت به نظر می‌رسد عبارت کنترلر مرکزی مناسب نیست و باید با یک عبارت مناسب نظیر واحد هماهنگی ریزش شبکه (MCA^۲) 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

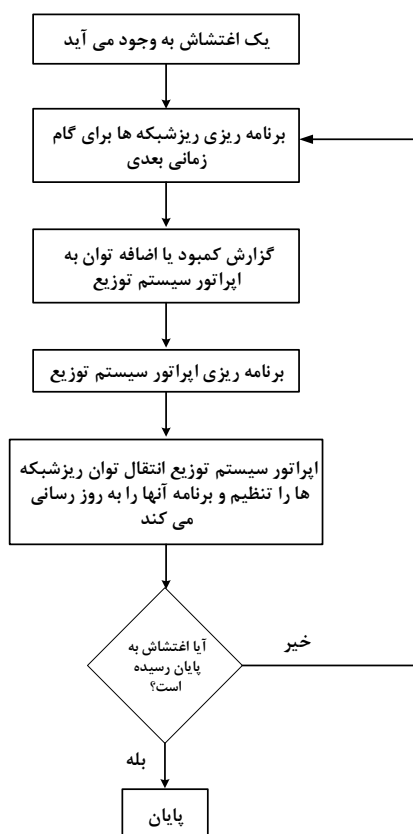
در این مقاله یک طرح مدیریت خروج سلسله مراتبی (OMS^۳) برای یک سیستم توزیع شامل چند ریزش شبکه ارائه می‌شود. جهت شبیه‌سازی و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای MATLAB R2022a و GAMS 28.2.0 استفاده شده‌است. در این طرح پس از تشخیص ویژگی‌ها و الزامات اصلی یک سیستم مدیریت خروج منعطف بر پایه تجربیات فجایع طبیعی اخیر، این طرح می‌تواند توسط ریزش شبکه‌ها با منابع انرژی توزیع شده چندگانه (DER^۴) 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 ریزش شبکه اعمال می‌شود. یک شاخص جدید برای کمی سازی تأثیر سیستم مدیریت خروج توسعه یافته برای بهبود تاب‌آوری سیستم در مقابل اغتشاشات مختلف پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این عوامل مؤثر اصلی در تاب‌آوری سیستم‌های توزیع چند ریزش شبکه 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:

- در این مقاله یک طرح خروج سلسله مراتبی دو مرحله‌ای را برای عملکرد منعطف شبکه دارای چند ریز شبکه پیشنهاد شده‌است.
- استراتژی پیشنهادی استقلال 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^۵) برای برنامه ریزی منعطف ریزش شبکه‌ها معرفی می‌شود.
- یک الگوریتم بهینه سازی پیشنهاد شده‌است که به وسیله آن اپراتور سیستم توزیع (DSO^۶) به عنوان یک واحد غیرانتفاعی، بار کاهش یافته در کل سیستم را با استفاده از ظرفیت استفاده نشده از منابع ریزش شبکه حداقل می‌سازد.
- سیستم مدیریت خروج پیشنهادی به صورت یک مسئله بهینه سازی برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط فرمول بندی شده که می‌تواند به طور مؤثری 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 مدل سازی 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.

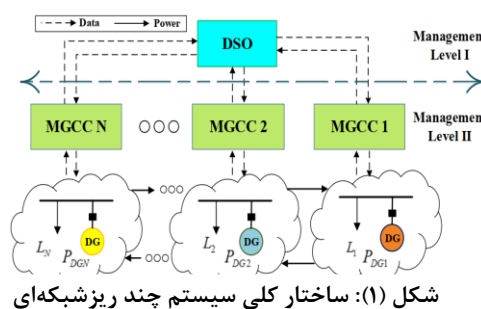
مرحله دوم را به ریزشبهه‌ها برای تنظیم مجدد برنامه تولیدشان اعلام می‌نماید. پس از پیاده‌سازی و بهینه‌سازی برنامه بدست آمده در هر گام زمانی اپراتور سیستم توزیع کنترل می‌کند که آیا شرایط اضطراری به پایان رسیده است یا خیر. در این وضعیت، پایان شرایط اضطراری به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن شبکه اصلی بازبایی شده و تمام منابع انرژی توزیع شده در ریزشبهه‌ها 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 خواهد شد و روش ذکرشده تا زمانی که شرایط عادی به سیستم بازگردد ادامه پیدا خواهد کرد. تمام مراحل طرح مدیریت خروج پیشنهادی به صورت خلاصه در شکل (۲) تشریح شده‌است.



شکل (۲): ساختار کلی سیستم چند ریزشبهه‌ای

باید توجه داشت که در این مقاله، تمرکز بر روی استراتژی عملکرد سیستم‌های چند ریزشبهه 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

اپراتور سیستم توزیع مسئول حفظ امنیت منابع تولید در سیستم می‌باشد. در نتیجه، زمانی که یک اغتشاش در شبکه بالا دست یا سیستم توزیع رخ می‌دهد اپراتور سیستم توزیع به‌عنوان یک واحد مستقل وظایف ریزشبهه‌ها را تنظیم کرده و سعی می‌کند قابلیت اطمینان سیستم و تاب‌آوری سیستم را با اشتراک‌گذاری بهینه منابع میان ریزشبهه‌ها افزایش دهد. پیاده‌سازی سیستم مدیریت خروج سلسله‌مراتبی پیشنهادی این امکان را برای ریزشبهه‌ها فراهم می‌کند که به صورت مستقل منابع خود را بر پایه استراتژی تطبیقی برنامه‌ریزی کنند؛ همانطور که ریزشبهه‌ها 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 ریزشبهه‌ها را حداقل می‌سازد. برای رسیدن به این هدف، اپراتور سیستم توزیع با اپراتورها یا مالکان ریزشبهه 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 ریزشبهه‌ها و اپراتور سیستم توزیع باید موجود باشد. شبکه ارتباطی مستحکم بین ریزشبهه‌ها برای تبادل مطمئن توان بین ریزشبهه‌ها 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 ریزشبهه‌ای

۳-۲- روش پیاده‌سازی گام به گام طرح مدیریت خروج

پیشنهادی

زمانی که یک پیشامد در سیستم اتفاق می‌افتد، ریزشبهه‌ها 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 ریزشبهه‌ها، 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 ریزشبهه‌ها را تنظیم می‌کند و از توان اضافی منابع ریزشبهه‌ها برای تأمین بار تأمین نشده در گام اول استفاده می‌نماید. اپراتور نتایج بهینه‌سازی

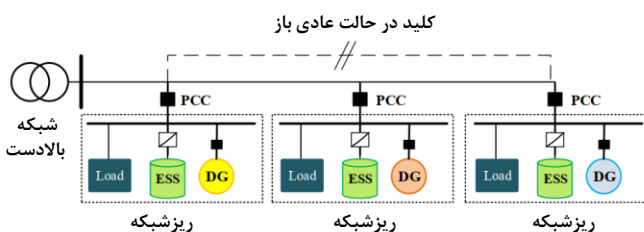
بعدی برای تعیین معیارهای عملکردی در گام‌های زمانی $k+2$ و $k+3$ تکرار خواهد شد.

۵-۲- محاسبه شاخص تاب آوری

عملکرد طرح مدیریت خروج پیشنهادی با استفاده از یک شاخص تاب آوری مناسب ارزیابی شده است؛ اما هیچ معیار استاندارد 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 ریزشکه‌ای به عنوان شاخص تاب آوری ثبت می‌شود.

۶-۲- فرضیات اصلی و سیستم تست

برای ارزیابی عملکرد سیستم مدیریت خروج پیشنهادی، مدل توسعه یافته به یک سیستم توزیع شامل سه ریزشکه 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) بین ریزشکه‌های ۱ و ۲ عمل می‌کند. ریزشکه‌ها 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 ریزشکه از نوع مسکونی بوده و پروفیل یکسانی را دنبال می‌کنند. به علاوه، بار پیک سالانه هر ریزشکه 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.

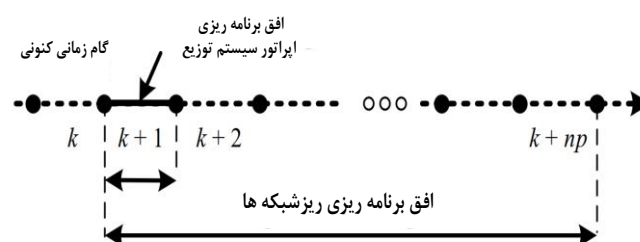


شکل (۴): نمایش شماتیک سیستم تست

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 پاسخ دهد.

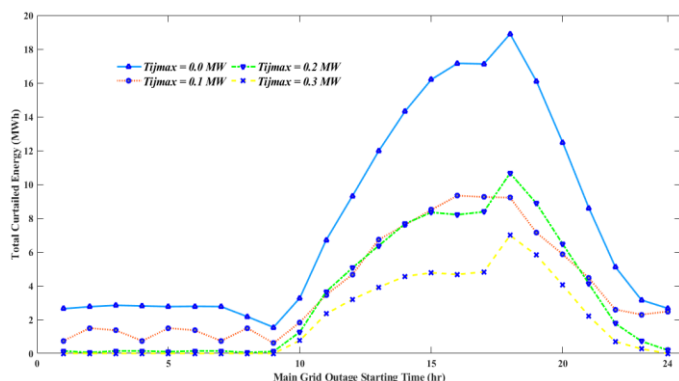
۴-۲- روش MPC برای برنامه‌ریزی ریزشکه‌ها

مطابق با الزامات یک سیستم مدیریت خروج منعطف، یک روش کنترلی پیش بین برای برنامه‌ریزی ریزشکه‌ها در گام اول پیشنهاد می‌شود. در این استراتژی پیش‌بینی‌های کوتاه مدت بار و منابع انرژی نو موجود برای تعیین برنامه بهینه هر ریزشکه 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 ریزشکه‌ها 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 [16,17]. این مفهوم به صورت شماتیکی در شکل (۳) تشریح شده است.

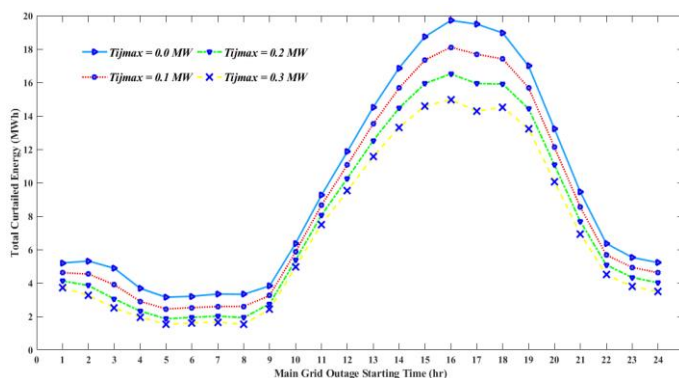


شکل (۳): شماتیک روش کنترلی پیش بین پیشنهادی

مطابق با طرح MPC محور پیشنهادی، در گام نخست، ریزشکه‌ها 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 ریزشکه‌ها 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



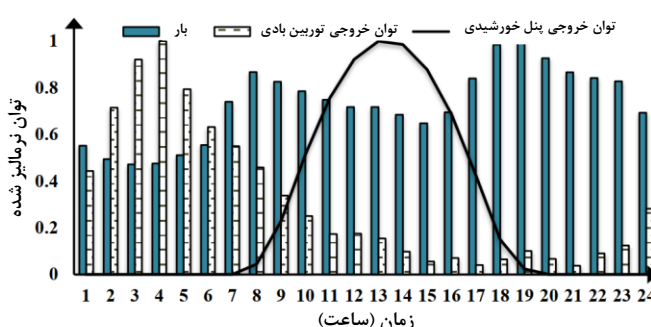
شکل (۶): کل انرژی کاهش یافته به صورت تابعی از ساعت آغاز شروع خروج در حالت اول



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، زمانی که $T_{ij}^{max} = 0.1 MW$ انتخاب شود مقدار انرژی کاهش یافته برای سناریویی که در ساعات‌های میانی روز اتفاق می‌افتد می‌تواند انرژی کاهش یافته را تقریباً ۵۰ درصد در مقایسه با حالتی که انتقال توان میان ریزش‌بکه‌ها 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 ریزش‌بکه‌ها 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 $0.3 MW$ قابل اغماض بوده و منحنی‌های مربوط به $0.2 MW$ 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،



شکل (۸): 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 ریزش‌بکه‌ها را تغذیه می‌کند دچار آسیب شده و تغذیه گاز طبیعی در ساعت نهم قطع می‌شود.

۵- نتیجه

۵-۱- 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 شبیه‌سازی شده و مقادیر کاهش انرژی کلی به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) آورده شده است.

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.

۵-۲- 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 ریزش‌بکه‌ها 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 تجدیدپذیر 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 حالت 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

خواهد بود و از طرف دیگر می‌تواند توان را از ریزش‌بکه‌هایی 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 ریزش‌بکه‌ها 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 ریزش‌توربین، 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 ریزش‌بکه‌هایی 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 قبل 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 تاب‌آوری در حالت اول

حداکثر توان قابل انتقال بین ریزش‌بکه‌ها (T_{ijmax})	۰	۰.۱	۰.۲	۰.۳
شاخص تاب‌آوری	۴.۵۲۱	۳.۹۸۰۷	۳.۴۵۲۵	۲.۰۴۴۸

جدول (۲): شاخص تاب‌آوری در حالت دوم

حداکثر توان قابل انتقال بین ریزش‌بکه‌ها (T_{ijmax})	۰	۰.۱	۰.۲	۰.۳
شاخص تاب‌آوری	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. در صورتی که پیاده‌سازی برنامه انتقال ممکن نباشد، از دست 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

- [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 مهندسين برق و الکترونیک ایران)، ۱۵(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.

زیر نویس ها

- ⁵ Microgrid Central Controller
- ⁶ Microgrid Coordinating Agent
- ⁷ Normally Open

انتقالی بین ریزشکبه‌ها حتی در ساعات اولیه نیز انرژی کاهش یافته وجود نداشت. نکته قابل تأمل در این وضعیت این است که ریزشکبه سوم که دارای بیشترین مقدار انرژی تجدیدپذیر است در ساعات اولیه نسبت به ریزشکبه‌های 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 ریزشکبه نسبت به دیگر ریزشکبه‌ها کمتر است. در حالت دوم که امکان تبادل توان بین ریزشکبه سوم و ریزشکبه‌های دیگر وجود ندارد انرژی کاهش یافته این ریزشکبه در تمام ساعات نسبت به ریزشکبه‌های دیگر بالاتر است. این مسئله نشان داد که امکان تبادل توان بین ریزشکبه‌ها 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.

۳-۵- پیشنهاد

- 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.

- ¹ Outage Management Scheme
- ² Distributed Energy Resources
- ³ Model Predictive Control
- ⁴ Distribution System Operator