

روشی غیرمتمرکز برای بازیابی شبکه توزیع فعال در حضور ریزشبکه‌های مجاور متصل به هم

مجتبی خدرزاده^۱ دامون محمدظاهری^۲

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهیدبهشتی- تهران- ایران

m_khederzadeh@sbu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهیدبهشتی- تهران- ایران

D_mohammadzaheri@sbu.ac.ir

چکیده: این مقاله یک روش غیرمتمرکز مبتنی بر سیستم‌های چند عامله را برای بازیابی شبکه توزیع با در نظر گرفتن ریزشبکه‌های مجاور متصل به هم که در آن منابع انرژی تجدیدپذیر، خودروهای برقی، سیستم ذخیره‌سازی باتری و بار مدل‌سازی شده است، بیان می‌کند. رویکرد سیستم‌های چند عامله می‌تواند مسیر بازیابی مناسب را به ازای عامل‌های منطقه‌ای مختلف توزیع شده در طول شبکه به دست آورد و همچنین ریزشبکه‌های دارای اضافه بار ناشی از عدم تعادل میان منابع انرژی تجدیدپذیر، خودروهای برقی، سیستم ذخیره‌سازی باتری و بار را با استفاده از اتصال این ریزشبکه‌ها به ریزشبکه‌های مجاور که دچار اضافه بار نیستند، مدیریت کند. این استراتژی، روش جدیدی مبتنی بر قوانین سیستم خبره بوده که محدودیت‌های عملیاتی سیستم همچون محدودیت‌های جریان خط و ولتاژ را در نظر می‌گیرد. این روش بر روی شبکه توزیع شعاعی ۳۳ شینه و ۱۲/۶۶ کیلوولت اعمال شده است، و در آن عامل‌ها برای تصمیم‌گیری در محیط MATLAB شبیه‌سازی شده و از طریق محاسبات پخش بار اعتبار تصمیم‌گیری عامل‌ها راستی آزمائی شده است.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه‌های مجاور متصل به هم، روش غیرمتمرکز، بازیابی شبکه توزیع، سیستم چند عامله.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.213

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۱۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مجتبی خدرزاده

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - حکیمیه - خیابان بهار - دانشگاه شهید بهشتی پردیس شهید عباسپور - دانشکده‌ی برق

۱- مقدمه

در ریزشبهکه ایزوله شده تقاضای بار توسط منابع انرژی تجدیدپذیری همچون سیستم‌های خورشیدی و بادی تامین می‌شود. اما در ریزشبهکه به دلیل عدم قطعیت توان خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر و بار، احتمال رخ دادن اضافه بار وجود دارد. به منظور غلبه بر این مشکل، استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی، منابع انرژی تجدیدناپذیری همچون دیزل ژنراتور، میکروتوربین و غیره، ریزشبهکه متصل به شبکه و ریزشبهکه‌های مجاور متصل به هم در مقالات مختلف پیشنهاد شده است [۵]-[۱]. لازم به ذکر است که استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی یا منابع تجدیدناپذیر در ریزشبهکه ایزوله ممکن است به دلیل هزینه عملیاتی این تجهیزات، سبب افزایش قیمت انرژی شود [۶]. علاوه بر این، در ریزشبهکه متصل به شبکه نسبت به ریزشبهکه ایزوله، افزایش تقاضای بار در شبکه توزیع سبب کاهش انعطاف‌پذیری سیستم به دلیل افزایش پارامترهای نامعلوم، افزایش هزینه بهره‌برداری از شبکه توزیع می‌گردد [۷]. اما اتصال ریزشبهکه‌های مجاور به هم برای مدیریت اضافه بار ریزشبهکه‌ها بر اساس [۸] مناسب و ثمربخش است. این روش در [۸] معرفی شده است و براساس آن، هر ریزشبهکه در طی شرایط اضافه‌باری می‌تواند توسط یک یا تعدادی از ریزشبهکه‌های مجاور تغذیه شود. شایان ذکر است که کلید استاتیکی اتصال داخلی به طور معمول میان هر دو ریزشبهکه مجاور قرار گرفته است؛ از این روی، اتصال ریزشبهکه‌های مجاور را می‌توان با بستن کلیدهای مجاور در شرایط اضافه‌بار تحقق بخشید.

نویسندگان [۹] یک معماری جدید را برای 1^{CNMG} ‌ها، به منظور بهبود خود ترمیمی سیستم توزیع در صورت وقوع خطاهای اتصال کوتاه در شبکه بیان کرده‌اند. همچنین، تکنیک مدیریت اضافه‌بار ارائه شده در [۱۰] مبتنی بر 1^{CNMG} ‌ها است و از یک الگوریتم تصمیم‌گیری چندمعیاره پویا استفاده می‌کند. علاوه بر این، بهره‌برداری دینامیکی 2^{DG} در 1^{CNMG} ‌ها در [۱۱] ارائه شده است و امنیت دینامیکی 1^{CNMG} ‌ها در [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است. نویسندگان [۱۳] یک روش کنترل نظارتی را برای تسهیل اتصال ریزشبهکه‌های (MGs) دارای تنظیم دروپ از راه دور در طی کمبود توان ارائه می‌دهند.

علاوه بر این، براساس گزارش دپارتمان انرژی ایالات متحده بیش از ۸۰٪ از خروجی‌های سیستم قدرت در شبکه توزیع رخ می‌دهد [۱۴]. از اینرو، بازیابی شبکه توزیع می‌تواند به یافتن مسیری خوب برای بازگرداندن حداکثر بارهای خارج از سرویس یک فیدر دچار خطا شده، کمک کند [۱۵]. تکنیک‌های بازیابی مبتنی بر روش‌های هماهنگی متمرکز و غیرمتمرکز هستند. استراتژی متمرکز شامل روش بهینه‌سازی است که یک مسیر بازیابی بهینه را پیدا می‌کند [۱۶]، اما این استراتژی برای تصمیم‌گیری وابسته به واحد مرکزی است؛ از اینرو

فرآیندی سریع و مطمئن نیست [۱۷]. با این وجود، روش غیرمتمرکز مبتنی بر الگوریتم ابتکاری یا قوانین سیستم خبره است و به طراحی دقیق نیاز دارد، از اینرو می‌توان این روش را به عنوان یک روش سریع بازیابی معرفی کرد [۱۸].

تحقیقات و مطالعات مختلفی در رابطه با روش‌های بازیابی در شبکه توزیع وجود دارد. سیستم چند عامله (2^{MAS}) که یک استراتژی غیرمتمرکز است، در [۱۹] ارائه شده است؛ که در آن برای یافتن مسیر بازیابی از قوانین سیستم مختص به خود استفاده می‌کند. علاوه بر این، این روش متشکل از عامل‌های مختلفی است که در طول شبکه، توزیع یافته است و برای یافتن تصمیم‌گیری مناسب با یکدیگر در ارتباط هستند [۱۹]. نویسندگان [۲۰] با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل (ABC^{C}) به ازای پنج نوع از عامل‌ها، مسیر بازیابی مناسب را به دست می‌آورند. همچنین، استراتژی غیرمتمرکز مبتنی بر 2^{MAS} برای بازیابی شبکه توزیع در حضور 2^{DG} ‌ها و خودروهای برقی (5^{EV}) در [۲۱] ارائه شده است. علاوه بر این، نویسندگان [۲۲] یک استراتژی هماهنگی سلسله مراتبی را برای بازیابی شبکه توزیع با فرض 2^{DG} ‌ها و اولویت بار در شبکه‌های توزیع بیان می‌کند. در [۲۳]، 2^{MAS} مبتنی بر قوانین سیستم خبره، به منظور یافتن مسیر بازیابی مناسب، به ازای چهار عامل منطقه‌ای توزیع شده در طول هر فیدر، ارائه شده است. استراتژی 2^{MAS} غیرمتمرکز برای بازیابی شبکه توزیع در محیط‌های دارای عدم قطعیت در [۲۴] ارائه شده است. حتی پس از مرحله تکاملی شبکه هوشمند، خطوط انتقال، فیدرهای توزیع، کلیدها، بریکرها و ترانسفورمرها به عنوان تجهیزات اصلی سیستم انتقال و توزیع باقی می‌مانند.

سیستم انتقال و توزیع با پیشرفت‌هایی در نظارت، کنترل حفاظت تجهیزات اصلی به سیستمی هوشمند تبدیل شده است. روش‌های حفاظت و اتوماسیون به ساختار توزیع یافته و مخابراتی تغییر یافته اند که کاربردهای بهره‌برداری سیستم در توانایی خود برای هماهنگی هوش توزیع یافته در پست‌ها و فیدرها با اطمینان یافتن از شاخص‌های بالای قابلیت اطمینان، بازده و امنیت پیشرفته تر هستند. این پیشرفت‌های کاربردی از کاربردهای خود ترمیم‌کنندگی که قطعی سرویس را از طریق بکارگیری تکنولوژی‌های مدرن که می‌توانند با جمع‌آوری داده‌ها، اجرای الگوریتم‌های پشتیبانی-تصمیم‌گیری، قطعی‌ها را محدود کرده و شارش توان را به صورت دینامیکی کنترل نموده و سرویس را به سرعت بازیابی کنند، سرچشمه می‌گیرند [۲۵].

جدول (۱): طبقه‌بندی کارهای مطالعاتی اخیر

| شماره مرجع | ریزشبکه‌های مجاور متصل به هم | روش بازیابی | | محدودیت‌های شبکه توزیع | |
|------------|------------------------------|----------------|-------------------------------|------------------------|----------|
| | | متمرکز | غیرمتمرکز | ولتاژ | جریان خط |
| [5]-[10] | RES و بار | خیر | خیر | بله | بله |
| [13]-[14] | خیر | روش بهینه‌سازی | خیر | خیر | خیر |
| [16] | خیر | خیر | MAS | خیر | خیر |
| [17] | خیر | خیر | الگوریتم مبتنی بر MAS | خیر | خیر |
| [18] | خیر | خیر | MAS | خیر | خیر |
| [19] | خیر | خیر | استراتژی هماهنگی سلسله مراتبی | خیر | خیر |
| [20]-[21] | خیر | خیر | MAS | بله | بله |
| | روش پیشنهادی RES، EV و بار | خیر | MAS | بله | بله |

با توجه به تحقیقات ذکر شده در بالا و جدول ۱، سه شکاف تحقیقاتی اصلی مقالات موجود در رابطه با برنامه‌ریزی سیستم بازیابی به شرح زیر است:

- در بسیاری از تحقیقات [۱۶]-[۲۴]، تکنیک بازیابی اعمال شده بر شبکه توزیع بدون در نظر گرفتن CNMGها است. بنابراین مسیرهای بازیابی صرفاً از طریق کلیدهای طول فیدر قابل اجرا خواهد بود اما با تعبیه کلیدهای کوپلاژ میان ریزشبکه‌ها و استفاده از سیستم MAS در کنترل تمام کلیدها می‌توان بار حداکثری را بازیابی کرد.
- لازم به ذکر است که CNMGها بر روی طرح کلی مربوط به آینده شبکه توزیع پیاده‌سازی شده‌اند [۱۲]، از اینرو سرویس بازیابی برای سیستم پیشنهادی در طی شرایط خطا برای افزایش قابلیت اطمینان ریزشبکه‌ها و شبکه توزیع لازم است.
- در بسیاری از تحقیقات [۸]-[۱۳] ریزشبکه شامل RES^۱ و بار است، اما لازم به ذکر است که در ریزشبکه‌های مربوط به آینده EVها و سیستم‌های ذخیره انرژی نیز وجود دارند. بنابراین، مدل ریزشبکه با در نظر گرفتن RES، EVها و بار برای طرح CNMGها الزامی است.
- در بسیاری از تحقیقات [۱۹] و [۲۰]، محدودیت‌های سیستم توزیع همچون محدودیت‌های جریان خط و ولتاژ در نظر گرفته نشده است. اما، این محدودیت‌ها در سیستم‌های قدرت یا توزیع حائز اهمیت هستند.

به منظور برطرف ساختن خلأهای فوق الذکر، این مقاله از یک روش غیرمتمرکز مبتنی بر MAS برای بازیابی شبکه توزیع فعال در حضور CNMGها استفاده می‌کند؛ در این CNMGها مدل‌های RES، EV، ESS^۲ و بار همانند شکل ۱ در نظر گرفته شده است. روش بازیابی پیشنهادی متشکل از چندین عامل منطقه‌ای است که بین دو کلید در فیدرهای اصلی محدود شده است:

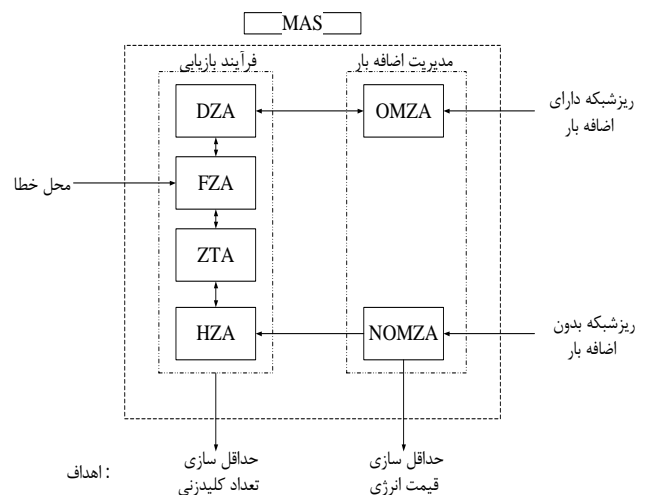
- عامل منطقه دچار خطا شده (FZA^۳): یک عامل تصمیم‌گیری است و برای عامل منطقه دچار خطا شده مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- عامل منطقه پایین دست (DZA^۴): این عامل برای مناطقی که به علت خطا دچار خاموشی شده‌اند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- عامل اتصال منطقه (ZTA^۵): عامل منطقه سالمی است که حاوی یک کلید اتصال است.
- عامل منطقه سالم (HZA^۶): که عاملی برای مناطق موجود در فیدر سالم در طول مسیر بازیابی است.

که در آن محدودیت‌های شبکه توزیع در HZA و FZA در نظر گرفته شده است. در نهایت، روش مدیریت اضافه‌بار در CNMGها مورد استفاده قرار گرفته است؛ یعنی ریزشبکه‌های دارای اضافه‌بار با استفاده از کلیدهای مبتنی بر رویکرد MAS به دیگر ریزشبکه‌هایی که دارای اضافه‌بار نیستند، متصل شده است. به علاوه، هر ریزشبکه حاوی یک عامل منطقه‌ای است که عامل منطقه ریزشبکه (MZA^۷) نامیده می‌شود و این عامل در عین حال MZA دارای اضافه‌بار (OMZA^۸) و MZA که دارای اضافه‌بار نیست (NOMZA^۹) می‌باشد. با توجه به شکل ۱، OMZA (NOMZA) با DZA (HZA) هماهنگ شده است تا مسیر بازیابی مناسب موجود در شبکه توزیع را در حضور CNMGها و مدیریت مناسب ریزشبکه‌های دارای اضافه‌بار به وسیله ریزشبکه‌های که دچار اضافه‌بار نیستند، را به دست آورد. بنابراین، براساس شکل ۱، MAS شامل فرآیند بازیابی و مدیریت اضافه‌بار است تا عملکرد کلیدها و قیمت انرژی را حداقل سازد. در نهایت، مشارکت و سهم اصلی این مقاله را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- پیاده‌سازی استراتژی غیرمتمرکز مبتنی بر MAS برای بازیابی شبکه توزیع در حضور CNMGها.
- در نظر گرفتن مدل ریزشبکه‌های مربوط به آینده که حاوی RES، EV، ESS و بار است.
- در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم توزیع شعاعی در فرآیند بازیابی
- کاهش نرخ حذف بار به علت مدیریت ریزشبکه‌های دارای اضافه‌بار با استفاده از ریزشبکه‌هایی که دچار اضافه‌بار نیستند. که این امر در هنگام بازیابی بر روی تصمیم‌گیری عامل‌ها در انتخاب بهترین مسیر بازیابی با بیشترین بار قابل بازیابی تاثیر گذار می‌باشد.

رود لذا استفاده از معماری عامل ها به صورت همسطح در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. عامل های هوشمند باید اعمال انعطاف پذیر و مستقلی را برای دستیابی به اهداف طراحی خود انجام دهند. انعطاف پذیری عامل از واکنش پذیر بودن، فعال بودن و توانایی ارتباطی تشکیل می شود. بنابراین، MAS بهترین روش برای طراحی سیستم های محاسباتی توزیع یافته را که توسط شبکه های خودترمیم کننده مورد نیاز هستند را ارائه می دهند [۲۵].

فرآیند بازیابی با آگاهی از یک خطای داخلی در منطقه و فرمان تریپ کلید قدرت فیدر شروع شده است. در گام اول، وضعیت مناطق نسبت به مکان خطا مشخص می شود و در نتیجه آنها نقش خود را براساس تکنیک MAS که شامل اهداف بازیابی مورد نیاز و محدودیت های فنی می شود، شناسایی می کنند. لازم به ذکر است که تکنیک MAS متشکل از چهار عامل منطقه ای برای شبکه توزیع موجود در مقاله می شود که آنها عبارتند از DZA، FZA، ZTA و HZA. عامل مربوط به منطقه دچار خطا شده FZA است که عامل تصمیم گیری است. همچنین DZA برای منطقه ای که در اثر خطا توانش را از دست داده است، مورد استفاده قرار می گیرد. منطقه سالم در مسیر بازیابی HZA است و منطقه سالم با کلید اتصال ZTA است. علاوه بر این، هر ریزشکده قرار گرفته در باس های مختلف شبکه متشکل از یک عامل منطقه ای یا MZA است؛ که این عامل منطقه ای دارای دو حالت یکی دارای اضافه بار (OMZA) و دیگری بدون اضافه بار (NOMZA) می باشد. همانگونه که در شکل ۲ دیده می شود، منطقه Z2 به دلیل وقوع خطا در نقطه A عامل منطقه دچار خطا شده یا FZA است و Z10 به دلیل وقوع اضافه بار در ریزشکده موجود در این منطقه OMZA است. بنابراین، مناطق Z3 و Z4 با توجه به تعریف عامل منطقه پایین دست DZA است. منطقه Z8 در فیدر سالم قرار گرفته است و به خط اتصال متصل شده است، در نتیجه یک ZTA است. در نهایت، Z5 تا Z7 بر روی فیدر سالم قرار گرفته است، پس این مناطق عامل های HZA هستند. همچنین، Z9 به دلیل رخ ندادن اضافه بار در این منطقه است. علاوه بر این، با توجه به شکل ۲، ارتباط دوطرفه ای میان FZA و DZA، FZA و ZTA، ZTA و HZA، NOMZA و OMZA، OMZA و MZA یا DZA وجود دارد. در فرآیند بازیابی، FZA اطلاعات و داده های تقاضای مربوط به DZA را دریافت می کند و این داده ها را به ZTA ارسال می کند، تقاضای DZA شامل بار منطقه، تقاضای دریافتی از OMZA و توان تولیدی دریافتی از NOMZA است. بنابراین، ZTA با توجه به محدودیت ها، یعنی محدودیت های جریان خط و ولتاژ، مربوط به مسیر بازیابی یعنی منطقه HZA به وسیله کلیدهای بسته در نقاط B و C به DZA متصل می شود؛ همچنین FZA، Z2 را از فیدر دچار خطا شده ایزوله می کند. لازم به ذکر است که HZA نوع خود را براساس بار منطقه، تقاضای دریافتی از OMZA و توان تولیدی دریافتی از NOMZA تعیین می کند.



شکل (۱): روش پیشنهادی

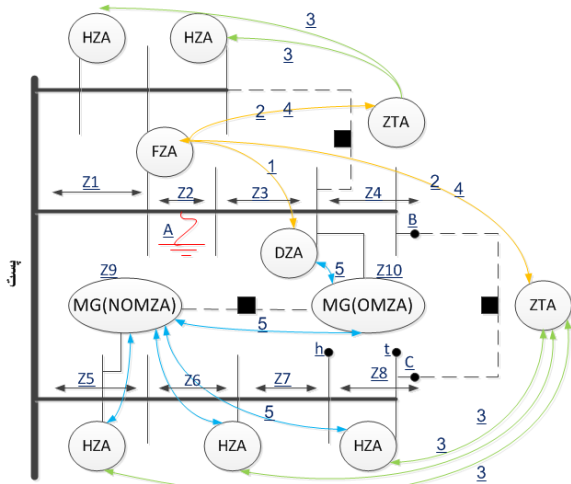
ادامه مقاله به شرح زیر است: بخش ۲ طرح پیشنهادی MAS غیرمتمرکز را برای بازیابی شبکه توزیع در حضور CNMGها تشریح می کند. بخش ۳ شبیه سازی های عددی را نشان می دهد و نتیجه گیری اصلی و نوآوری روش پیشنهادی در بخش ۴ مشخص شده است.

۲- مدل سازی مسئله

۲-۱- معماری MAS برای بازیابی شبکه توزیع

سیستم چندعاملی به سیستمی گفته می شود که تعدادی عامل در تمام محیط توزیع شده است که هر کدام به نوبه خود محاسباتی داخلی جهت یافتن مقدار بهینه بر طبق برنامه مربوط به خود دارند و در محیط خارج نیز با یکدیگر ارتباط دارند. در دست بندی ساده ای از عامل ها می توان به دو نوع عامل اشاره کرد، یکی عامل های ساده و کم اهمیت تر و دوم عامل های هوشمند که در واقع همان برنامه کامپیوتری است که در بعضی محیطها قادر به انجام اعمال خودمختار و انعطاف پذیر است [۲۶]. منظور از عامل در این مقاله، نوع دوم می باشد که نحوه واکنش این عامل ها به رویدادهای مختلف وابسته به وضعیت آن است که در ادامه بیان می شود. در روش های متمرکز مرسوم تمامی محاسبات بر روی یک سیستم مرکزی صورت می گیرد و با از دست رفتن این سیستم عملاً امکان بازیابی شبکه نیز از بین می رود [۲۳]. با این حال امروزه روش های غیرمتمرکز (MAS) نیز ارائه شده اند که از چندین سطح عامل بهره می برند که اساساً دارای دو مشکل اساسی می باشند.

مشکل اول اینکه به دلیل وجود چندین عامل در هر سطح و با توجه به وسعت شبکه های توزیع این نوع روش ها کاربردی نخواهند بود [۲۳] و مشکل دوم اینکه با وجود نام غیرمتمرکز در معماری های هرمی، بازم محاسبات در نقطه ای انتهایی وابسته به یک سیستم می باشد که در راس هرم عامل ها است [۲۴]. بنابراین در صورت رخداد مشکل برای عامل راس هرم، عملاً امکان تحلیل و بازیابی شبکه از بین می



شکل (۲): فرآیند بازیابی مبتنی بر روش MAS

بنابراین، FZA فرآیند بازیابی را آغاز می‌کند و پس از فرمان تریپ فیذر، با استفاده از کلیدهای قرار گرفته در این منطقه، خطا را جداسازی می‌کند. علاوه بر این، FZA یک سیگنال اطلاعاتی را به منظور بازیابی مناطق بالادست FZA در گام بعدی، به کلید قدرت فیذر ارسال می‌کند. سپس، به منظور محاسبه تقاضای توان این مناطق با DZAها ارتباط برقرار می‌کند و برای محاسبه توان عرضه‌شده موجود با استفاده از خطوط اتصال، با ZTAها ارتباط برقرار می‌کند. در نتیجه این عامل منطقه‌ای، عامل تصمیم‌گیری است و فهرست عملکرد آن به شرح زیر است:

گام اول: FZA پیام درخواست اطلاعات (RFI) را به منظور دریافت امپدانس و تقاضای توان مناطق پایین دست به DZAها ارسال می‌کند و در نتیجه، DZAها این داده‌ها را برای FZA ارسال می‌کنند.

گام دوم: FZA فراخوانی را برای پیغام‌های پیشنهادی (CFP) به ZTAها ارسال می‌کند و در نتیجه، هر ZTA مقدار V_{bt} ، Z_{pt} و توان مجاز بازیابی به‌ازای نقض نکردن محدودیت ولتاژ در فیذر سالم (AP_h) که در عملکرد ZTA توضیح داده شده است را ارسال می‌کند.

گام سوم: محاسبه توان مجاز بازیابی ناشی از هر اتصال از فیذرهای سالم به‌ازای نقض نکردن محدودیت ولتاژ در مناطق بازیابی شده (AP_f) که به صورت (۵) توضیح داده شده است، و حداکثر توان مجاز بازیابی ناشی از اتصال فیذر سالم i مربوط، به‌ازای نقض نکردن محدودیت ولتاژ در هر دو مناطق سالم و بازیابی شده (APT_i) که با استفاده از FZA به صورت (۶) توضیح داده شده است.

$$AP_f = |V| \times |I_{vf}| \quad (5)$$

$$APT_i = \min(AP_{hi}, AP_{fi}) \quad (6)$$

که در آن $|V|$ دامنه ولتاژ است که برابر با 1 pu در نظر گرفته شده است. در نهایت، FZA با مقایسه AP_f و مقدار کل تقاضای توان مناطق پایین دست، بازیابی گروهی مناطق از دست رفته را با توجه به (۷) به دست می‌آورد و عملیات کلیدزنی مربوطه را تعیین می‌نماید.

علاوه بر این، محدودیت‌های فنی موجود در فرآیند MAS به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

- محدودیت شعاعی شبکه توزیع

$$N_{line} = N_{bus} - 1 \quad (1)$$

که در آن N_{bus} و N_{line} تعداد خطوط فیذر و باس‌های فیذر است.

- محدودیت جریان برای تمامی خطوط موجود در فیذر

$$|I_j| \leq I_{maxj} \quad (2)$$

که در آن I_j و I_{maxj} برابر با جریان خط فیذر و حداکثر ظرفیت خط فیذر است.

- محدودیت ولتاژ مربوط به تمامی باس‌ها: محدودیت ولتاژ باید برای باس‌های فیذر سالم و دچار خطا شده برآورده گردد؛ از اینرو، محدودیت جریان متناظر محدودیت ولتاژ در فیذر سالم (I_{vh}) و فیذر دچار خطا شده (I_{vf}) در این مقاله به صورت معادله (۳) و (۴) محاسبه شده است [27,28]:

$$I_{vh} = \frac{V_h - V_{min}}{Z_h} \quad (3)$$

$$I_{vf} = \frac{V_t - V_{min}}{Z_f} \quad (4)$$

که در آن I_{vh} و I_{vf} به ترتیب برابر با حداکثر جریانی است که می‌تواند از طریق فیذر سالم و دچار خطا شده جریان یابد، بدون آنکه از محدودیت ولتاژ آنها تجاوز کند. همچنین، V_h برابر با کمترین مقدار دامنه ولتاژ برای فیذر سالم موجود در باس h است و V_t برابر با دامنه ولتاژ در باس اتصال برای فیذر سالم است؛ همانند شکل ۱. لفظ V_{min} برابر با حداقل دامنه ولتاژ مجاز است که عموماً برابر با 0.9 پیرونیت (pu) است [29,30]. بزرگی امپدانس Z_h نشان‌دهنده بزرگی امپدانس بین پست و باس h است، همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است. علاوه بر این، بزرگی امپدانس Z_f برابر با $|Z_{st} + 0.5 \times Z_t|$ است که در آن Z_{st} برابر با امپدانس بین پست و باس t و Z_t برابر با امپدانس بخش بازیابی شده در شکل ۲ است [28].

در نهایت، جزئیات بیشتر در مورد عملکرد عامل‌های منطقه‌ای به شرح زیر است:

الف) عامل منطقه دچار خطا شده (FZA): عملکرد FZA در صورتی آغاز می‌گردد که شرایط زیر به‌علت یک خطای داخلی رخ دهد:

- جریان واردشده از بالادست (پایین‌دست) نسبت به شرایط عادی (یا نزدیک به عادی) بسیار بیشتر باشد.
- جریان وارد شده از بالادست و پایین‌دست نسبت به شرایط عادی بسیار بیشتر باشد.

در نتیجه، مقدار AP_h برای هر ZTA توسط معادله زیر حاصل می‌شود:

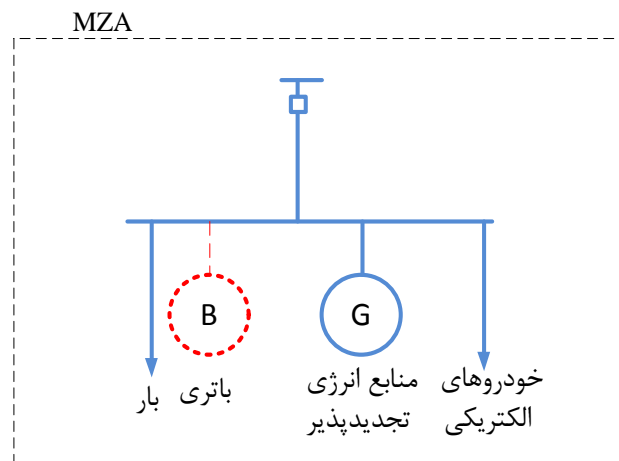
$$AP_h = |V| \times |I_{spare}| \quad \forall I_{spare} = \min(I_{vh}, I_{ch}) \quad (11)$$

که در آن $|V|$ برابر با 1 pu است و I_{spare} برابر با جریان مازاد در دسترس بازیابی متناسب با محدودیت های ولتاژ فیدر سالم است. در نهایت، مقدار ZTA، V_t ، Z_{st} ، AP_h را به FZA ارسال می کند و در نتیجه ZTA چنانچه برای بازیابی گروهی انتخاب شده باشد، تا هنگامی که پیغام پذیرش پیشنهاد را از FZA دریافت کند، برای بستن کلیدش صبر می کند.

ت) عامل منطقه سالم (HZA): در عملکرد HZA، در گام نخست HZA پیغام RFI را از ZTA دریافت می کند و در نتیجه، مقدار $I_{ava j}$ را از روی معادله (9) محاسبه می کند. در نهایت، HZA اطلاعات مربوط به V_h ، V_{min} ، Z_h و $I_{ava j}$ را به ZTA ارسال می کند. علاوه بر این، چنانچه CNMG نیاز به مدیریت اضافه بار داشته باشد، HZA پیغام RFI را به منظور به دست آوردن تقاضای منطقه یا تولید توان ریزشبهه به MZA ارسال می کند.

۲-۲- مدیریت اضافه بار CNMG ها

در این مقاله، چارچوب پیشنهادی ریزشبهه (MG) در شکل ۳ نشان داده شده است، که در آن ریزشبهه متشکل از منابع انرژی تجدیدپذیر (RESها)، خودروهای الکتریکی (EVها)، سیستم ذخیره ساز باتری (BSS) و بار است. همچنین، RES متشکل از سیستم فتوولتائیک و واحد بادی است. علاوه بر این، هر ریزشبهه دارای یک عامل منطقه ای است که عامل منطقه ریزشبهه (MZA) نامیده می شود و این عامل با MZA مربوط به سایر ریزشبهه ها و عامل ها منطقه ای شبکه توزیع همچون FZA، DZA، ZTA و HZA هماهنگ است. در نهایت، طرح مدیریت اضافه بار CNMG با استفاده از قابلیت همکاری پذیری عامل های منطقه ای مختلف پیاده سازی می شود.



شکل (۳): چارچوب پیشنهادی ریزشبهه

الف) مدل مربوط به عناصر ریزشبهه: در ریزشبهه پیشنهادی، سیستم RES منبع توان است، که در آن توان خروجی اش برای واحد بادی و

$$\max_{i \in n_T} (AP_{Ti}) \geq \sum_{j=1}^{n_z} |S_j| \quad (7)$$

که در آن n_z و n_T به ترتیب برابر با تعداد اتصال و تعداد مناطق پایین دست است. چنانچه شرایط گام بعد برآورده گردد، در نتیجه FZA پیغام پذیرش پیشنهاد را در ازای حداکثر مقدار AP_T در مقایسه با دیگر ZTA های نزدیک به کلید آن، به ZTA ارسال می کند.

گام چهارم: چنانچه بازیابی گروهی امکان پذیر نباشد، یعنی مقدار کل تقاضای توان مناطق پایین دست بیشتر از حداکثر مقدار AP_T باشد، فرآیند بازیابی منطقه بر روی مسیر بازیابی پیاده سازی می گردد. به عبارت دیگر، در این شرایط، هر کدام از اتصالات کوپلاژ سالم تعدادی از مناطق پایین دست را تغذیه می کند، همچنانکه معادله (۸) برآورده می گردد.

$$AP_{Ti} \geq \sum_{j=1}^n |S_j| \quad (8)$$

که در آن n تعداد مناطق پایین دست است که می تواند توسط اتصال سالم i تغذیه گردد. در نهایت، FZA پیغام پذیرش پیشنهاد را به برخی از ZTA های نزدیک به کلیدهایشان ارسال می کند و هر ZTA نیز سیگنال را به برخی از مناطق پایین دست ارسال می کند تا کلید خود را باز کنند.

ب) عامل منطقه پایین (FZA): در عملکرد DZA، در گام نخست DZA پیغام RFI را از FZA دریافت می کند و در نتیجه، اطلاعات تقاضای توان خود و امپدانس خود را به FZA ارسال می کند. علاوه بر این، در برخی موارد، DZA سیگنالی را از FZA دریافت می کند تا کلیدش را در بازیابی منطقه باز کند. علاوه بر این، چنانچه CNMG نیاز به مدیریت اضافه بار داشته باشد، DZA پیغام RFI را به منظور به دست آوردن تقاضای منطقه یا تولید توان ریزشبهه به MZA ارسال می کند.

پ) عامل اتصال منطقه (ZTA): عملکرد ZTA به شرح زیر است:

گام اول: دریافت پیغام CFP از FZA.

گام دوم: ZTA پیغام RFI را به HZA هایی که در طول مسیر بازیابی فیدر سالم خودش قرار دارند، ارسال می کند. سپس، HZA مقدار V_h ، V_{min} ، Z_h و ظرفیت مازاد هر کدام از مناطق سالم، که به صورت زیر محاسبه می گردد، را ارسال می کند.

$$I_{ava j} = \min_k (I_{max k-j} - I_{k-j}) \quad (9)$$

که در آن $I_{ava j}$ ، $I_{max k-j}$ و I_{k-j} به ترتیب برابر با مقدار جریان مازاد در دسترس منطقه j، حداکثر ظرفیت حمل جریان مربوط به شاخه k موجود در منطقه j و مقدار جریان جاری در شاخه k منطقه j است.

گام سوم: ZTA مقدار V_h را از روی معادله (۳) و حداقل مقدار I_{ava} را که به صورت I_{ch} نشان داده شده و از روی معادله (۱۰) به دست می آید محاسبه می کند:

$$I_{ch} = \min_j (I_{ava j}) \quad (10)$$

E_{min} (حداقل انرژی ذخیره شده که به طور استاندارد ۳۰ درصد ظرفیت کل در نظر گرفته می شود) است. بنابراین، چنانچه توان دشارژ کردن باتری نتواند مقدار کل کمبود تقاضا را تامین کند، ریزش شبکه توان را از CNMGها دریافت می کند.

ب) عملکرد عامل منطقه ای ریزش شبکه (MZA): این عامل منطقه ای دارای دو نوع از جمله MZA دارای اضافه بار (OMZA) و MZA که بدون اضافه بار (NOMZA) می باشد. چنانچه در برخی از ریزش شبکه ها اضافه بار رخ دهد، یعنی $P_{RES} + P_{dch} \leq L_{MG}$ ، در این صورت MZA مربوط به این ریزش شبکه ها به عنوان OMZA است و MZA مربوط به دیگر ریزش شبکه ها NOMZA است. از اینرو در گام نخست، هر OMZA مقدار اضافه بار مربوط به هر ریزش شبکه (P_{over}) را با استفاده از معادله (۱۶) محاسبه می کند:

$$P_{over} = L_{MG} - P_{RES} - P_{dch} \quad (16)$$

در گام بعدی، OMZAها پیغام RFI را به NOMZAها ارسال می کنند و در نتیجه، NOMZA مقدار تولید مازاد هر کدام از ریزش شبکه ها (P_{exc}) را که دارای اضافه بار نیستند را محاسبه می کند. همچنین، گزاره P_{exc} به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$P_{exc} = P_{RES} - P_{ch} - L_{MG} \quad (17)$$

در نهایت، مقدار P_{over} و P_{exc} در NOMZA مورد مقایسه قرار می گیرد، چنانچه برای دو CNMG داشته باشیم که $P_{exc} \geq P_{over}$ ، در این صورت NOMZA کلید خود را می بندد و پیغامی را برای بستن کلید به OMZA ارسال می کند. علاوه بر این، چنانچه لازم باشد که فرآیند بازیابی و مدیریت اضافه بار به صورت همزمان انجام گیرد، MZA با DZA و HZA هماهنگ می گردد.

۴- نتایج عددی

۴-۱- مطالعه موردی

در این مقاله، روش پیشنهادی برای مسئله بازیابی بر روی شبکه توزیع شعاعی ۳۳ شینه IEEE اعمال شده، همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است. داده های مربوط به خطوط و بارهای این شبکه در ارائه شده است و ولتاژ و توان پایه برای این شبکه به ترتیب برابر با ۱ MW و ۱۲,۶۶ kV می باشد [۳۳]. همچنین، حداقل و حداکثر مقدار ولتاژ برای هر باس برابر با ۰,۹ و ۱,۰۵ پریونیت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در شکل ۴، هر شین بین دو کلید قرار می گیرد؛ از اینرو هر شین یک عامل منطقه ای است. علاوه بر این، [۳۳] برای چک کردن محدودیت جریان خط و ولتاژ، به منظور حل محاسبات پخش بار در نرم افزار MATLAB از روش پیشرو-پسرو استفاده شده است.

سیستم فتوولتائیک به ترتیب وابسته به سرعت باد و شدت تابش خورشید است. به عبارت دیگر، توان واحد بادی (P_W) به صورت (۱۲)، و توان سیستم فتوولتائیک (P_{PV}) به صورت (۱۳) فرمول بندی شده است [31].

$$P_W = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci} \\ P_r \cdot \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v \end{cases} \quad (12)$$

$$P_{PV} = R \times A \times \eta \quad (13)$$

که در آن v ، v_{ci} ، v_r و v_{co} به ترتیب برابر با سرعت باد، سرعت باد راه انداز، سرعت باد نامی و مدیریت شده است. همچنین P_r نامی واحد بادی می باشد. علاوه بر این R ، A و η برابر با شدت تابش خورشید، مساحت فتوولتائیک و راندمان کلی پنل های فتوولتائیک و مبدل های DC/DC است [31]. در نهایت، مقدار توان خروجی RES (P_{RES}) برابر با $P_W + P_{PV}$ است.

تقاضای توان ریزش شبکه برابر با بار (L) و توان EVها (L_{EV}) است. لازم به ذکر است که دو روش برای شارژ کردن EVها وجود دارد که شامل روش شارژ مدیریت نشده و مدیریت شده است. در شارژ مدیریت نشده، EVها در زمان های پیک بار شارژ می گردند و در روش شارژ مدیریت شده، EVها در زمان های کم باری شارژ می گردند [32]. در نهایت، مقدار تقاضای توان ریزش شبکه (L_{MG}) برابر با $L + L_{EV}$ است. علاوه بر این، دو وضعیت برای ریزش شبکه وجود دارد که به شرح زیر است:

- چنانچه $P_{RES} \geq L_{MG}$ ، در نتیجه مازاد تولید، به عبارت بهتر مقدار $P_{RES} - L_{MG}$ ، دارای سه حالت است یا در باتری ذخیره شده است، یا به دیگر CNMGها ارسال شده است و یا هم در باتری ذخیره شده و هم به دیگر CNMGها ارسال شده است. بنابراین، انرژی ذخیره شده در باتری (E) در زمان t از طریق معادله (۱۴) محاسبه می گردد.

$$E_t = E_{t-1} + \eta_{ch} P_{ch} \quad \forall 0 \leq P_{ch} \leq P_{RES} - L_{MG} \quad (14)$$

که در آن P_{ch} برابر با توان شارژ کردن باتری است.

- چنانچه $P_{RES} \leq L_{MG}$ ، در نتیجه کمبود تقاضا، یعنی $L_{MG} - P_{RES}$ ، توسط باتری یا دیگر CNMGها تامین می گردد. در نتیجه انرژی ذخیره شده باتری از طریق رابطه (۱۵) محاسبه می گردد.

$$E_t = E_{t-1} - \frac{1}{\eta_{dch}} P_{dch} \quad \forall 0 \leq P_{dch} \leq L_{MG} - P_{RES} \quad (15)$$

که در آن η_{ch} و η_{dch} به ترتیب برابر با راندمان باتری در حالت شارژ کردن و دشارژ کردن است. همچنین P_{dch} برابر با توان دشارژ کردن باتری است. لازم به ذکر است که ظرفیت باتری برابر با E_{max} است که در آن، بطور کلی انرژی ذخیره شده باتری کمتر از E_{max} و بیشتر از

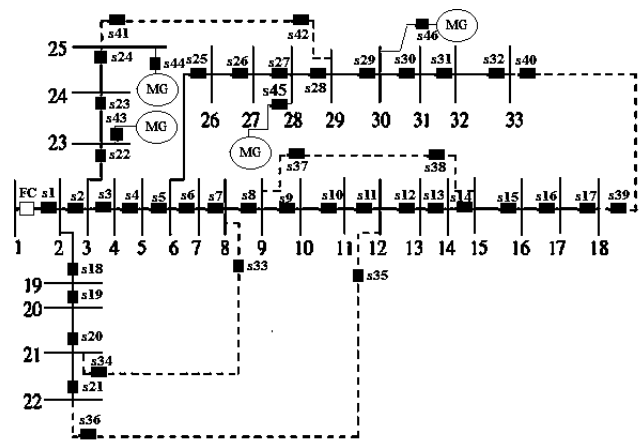
دهد، فرآیند بازیابی لازم نیست. از آنجاییکه در این حالت DZA وجود ندارد، در نتیجه بار آن برابر با صفر است. علاوه بر این، لازم به ذکر است که چنانچه FZA در منطقه (باس) ۲۰، ۱۶ و ۱۱ در نظر گرفته شود، مقدار کل بار DZA به ترتیب برابر با ۱۹۰۷، ۱۶۰۹ و ۵۶٫۶۷ کیلوولت آمپر است. بنابراین، فرآیند بازیابی بر روی شبکه اجرا شده است و خط اتصال میان باس‌های (۱۸،۳۳)، خطوط اتصال (۸،۲۱) و (۱۲،۲۲) و خطوط اتصال (۹،۱۵)، (۲۲،۱۲) و (۳۳،۱۸) به ترتیب برای FZA ۲۰، ۱۶ و ۱۱ در دسترس است.

جدول (۲): داده‌های مربوط به FZA و DZA

| منطقه (باس) دچار خطاشده | DZA | کل توان ظاهری DZA | اتصال بازیابی در دسترس |
|-------------------------|---------|-------------------|---------------------------------|
| ۳۳ | - | ۰ | - |
| ۲۰ | ۲۲ و ۲۱ | KVA ۱۹٫۷ | (۸،۲۱) و (۱۲،۲۲) |
| ۱۶ | ۱۸ و ۱۷ | KVA ۱۶۰٫۹ | (۳۳،۱۸) |
| ۱۱ | ۱۸ و ۱۲ | KVA ۵۶٫۶۷ | (۹،۱۵)، (۲۲،۱۲) و (۳۳،۱۸) |

به منظور انتخاب اتصال مناسب، FZA پیغام CFP^{15} را به منظور به دست آوردن توان در دسترس خودش بر اساس محدودیت‌های جریان خط و ولتاژ باس، به ZTA ارسال می‌کند و در نتیجه، پیغام RFI^{16} را به منظور دریافت V_{bh} ، V_{min} و Z_{ph} و I_{ava} به HZA ارسال می‌کند. در نهایت، نتایج مربوط به این بخش در جدول ۳ ارائه شده است و با توجه به آن، یک خط اتصال برای مکان خطا ۲۰ و ۱۶ انتخاب شده است. اما بر اساس پروسه محاسبات موجود در (۵) تا (۱۲)، سه خط اتصال برای FZA ۱۱ به دست آمده است. بنابراین کلیدهای باز شده/بسته شده برای مکان‌های خطای مختلف در جدول ۳ بیان شده است.

برای FZA ۲۰ و ۱۶، دو کلید باز و بسته شده است؛ اما برای مکان خطای ۱۱، ۶ (۶) کلید باز (بسته) شده است. همچنین لازم به ذکر است که در حالت‌هایی که مکان خطا در ۲۰ و ۱۶ قرار دارد، فرآیند بازیابی می‌تواند تعادل میان تولید و بار را برآورده و حفظ کند. با این حال، در خطای منطقه ۱۱ به منظور برآورده ساختن تعادل میان تولید و بارها در طی فرآیند بازیابی، ۱۹۳۱ kVA از بار DZA تامین نمی‌گردد. به عبارت دیگر فرآیند بازیابی، یک روش بازیابی گروهی برای FZA ۲۰ و ۱۶ و روش بازیابی منطقه‌ای برای مکان خطای ۱۱ است. به منظور نمایش حداکثر انحراف ولتاژ و حداقل جریان مجازی که می‌تواند پس از فرآیند بازیابی از طریق خطوط انتقال جریان یابد، نتایج



شکل (۴): شبکه توزیع شعاعی ۳۳ باسه

در این شبکه، فرض شده است که چهار ریزشکبه وجود دارد که در باس‌های ۲۳، ۲۵، ۲۸ و ۳۰ قرار گرفته‌اند. بار هریک از ریزشکبه‌ها برابر با بار باسی است که ریزشکبه در آن قرار دارد. همچنین، برای ریزشکبه‌های موجود در باس‌های ۲۳، ۲۵، ۲۸ و ۳۰ تعداد EV به ترتیب برابر با ۲۱، ۶۰، ۲۱ و ۳۰ است، که در آن نرخ شارژ EV برابر با ۳ kW است [32]. علاوه بر این، برای این ریزشکبه‌ها باتری‌های ۴۰۰، ۹۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلووات ساعتی با راندمان ۰٫۸۸ در نظر گرفته شده است [34]. ظرفیت سیستم بادی به ترتیب برابر با ۳۳۰، ۸۰۰، ۳۳۰ و ۵۱۰ کیلووات است و ظرفیت سیستم خورشیدی برای این ریزشکبه‌ها به ترتیب برابر با ۲۶۰، ۷۲۰، ۲۶۰ و ۳۳۰ کیلووات است.

۴-۲- نتایج

به منظور بررسی قابلیت مسئله بازیابی پیشنهادی در حالت‌های مختلف، این مسئله بر روی MATLAB 2015b کدنویسی شده است. الف) بازیابی شبکه بدون در نظر گرفتن CNMGها: در این بخش، قابلیت روش بازیابی پیشنهادی که بر روی شبکه ۳۳ شینه اعمال شده است، بدون در نظر گرفتن CNMGها مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین معنا که کلیدهای تعبیه شده میان ریزشکبه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود لذا تاثیر این اتصال در بخش‌های بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که چنانچه یک خطا در شبکه ۳۳ باسه رخ دهد، در ابتدا بریکر FC عمل می‌کند و در نتیجه کلیدهای محل خطا که FZA است، برای ایزوله کردن FZA از شبکه باز می‌شوند. در گام بعدی، FZA یک سیگنال را به FC ارسال می‌کند و FC مناطق FC بلا دست FZA را دوباره می‌بندد. در نتیجه، FZA فرآیند بازیابی را آغاز می‌کند و پیغام RFI را به منظور محاسبه مقدار کل بار DZA در گام نخست، به DZA ارسال می‌کند. نتایج مربوط به گام نخست در جدول ۲ نشان داده شده است؛ که با توجه به این جدول، چنانچه یک خطا در منطقه انتهایی فیدر همچون باس ۳۳ در شبکه پیشنهادی رخ

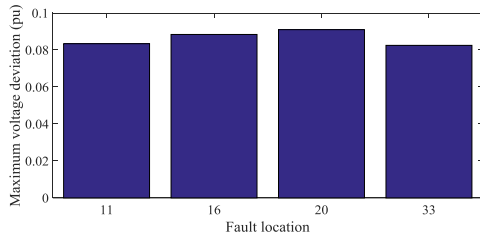
پخش بار پس از فرآیند بازیابی در شکل ۵ نشان داده شده است. این عامل ها به صورت زیر محاسبه شده اند:

$$D_{Max} = 1 - V_{BMax} \quad (18)$$

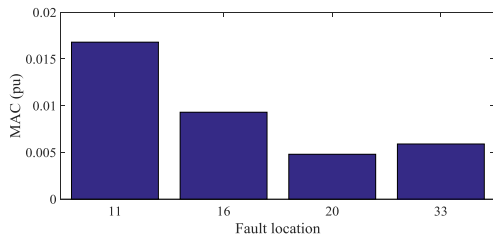
که در آن D_{Max} حداکثر انحراف ولتاژ بر حسب پریونیت و V_{BMax} کمینه ولتاژ تمام باس ها می باشد همچنین:

$$MAC = \text{Min}(\text{حداکثر جریان خط} - \text{شارش جریان خط}) \quad (19)$$

لازم به ذکر است که مقدار حداقل و حداکثر ولتاژ برابر با ۰.۹ و ۱.۰۵ پریونیت در نظر گرفته شده است، از اینرو انحراف ولتاژ مجاز می تواند برابر با ۰.۱ pu باشد ($1-0.9=0.1$). با توجه به شکل ۵، حداکثر مقدار انحراف ولتاژ برای مکان های خطای ۱۱، ۱۶، ۲۰ و ۳۳ به ترتیب برابر با ۰.۰۸۸۴، ۰.۰۹۱، ۰.۰۸۲۵ و ۰.۰۹۱ پریونیت است. علاوه بر این، این مقادیر نسبت به مقادیر مجاز انحراف ولتاژ کمتر است. در نتیجه، روش بازیابی پیشنهادی محدودیت های ولتاژ را در شبکه ۳۳ با سه برآورده می کند. علاوه بر این، مقدار مجاز MAC برابر صفر است. به عبارت دیگر چنانچه $MAC \leq 0$ باشد، اضافه بار در خطوط توزیع رخ می دهد؛ که در آن محدودیت جریان در این شرایط برآورده نمی شود. اما لازم به ذکر است که در طی فرآیند بازیابی، مقدار MAC برای مکان خطای ۱۱، ۱۶، ۲۰ و ۳۳ به ترتیب برابر با ۰.۰۱۶۸، ۰.۰۰۹۳، ۰.۰۰۴۸ و ۰.۰۰۵۹ پریونیت است. بنابراین، این مقادیر مثبت است و در نتیجه روش بازیابی پیشنهادی محدودیت جریان خط را برای شبکه ۳۳ با سه برآورده می کند.



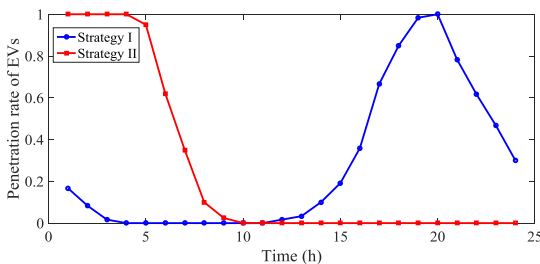
(a)



(b)

شکل ۵: نتایج پخش بار پس از فرآیند بازیابی، (a) حداکثر مقدار انحراف ولتاژ، (b) حداقل جریان مجازی که پس از فرآیند بازیابی می تواند در خطوط توزیع جریان یابد

- روش ۱: EVها پس از اینکه به شبکه متصل شدند، شروع به عمل شارژ شدن می کنند و در نتیجه چنانچه باتری EVها به صورت کامل شارژ شود از شبکه جدا می شوند.
- روش ۲: EVها براساس قیمت انرژی و محدودیت های بهره برداری شبکه که به ترتیب به منظور به دست آوردن هزینه شارژ شدن پایین و افزایش ضریب نفوذ EVها در شبکه انجام گرفته اند، شارژ می شوند.



شکل ۶: منحنی روزانه مربوط به ضریب نفوذ EVها

در نتیجه، با توجه به [۳۰]، EVها برای استراتژی های ۱ و ۲ به ترتیب در زمان های پیک بار و زمان های کم باری شارژ شده اند. از اینرو، با توجه به نتایج [۳۰]، منحنی روزانه مربوط به ضریب نفوذ EVها برای استراتژی های پیشنهادی به صورت شکل ۶ است.

علاوه بر این، پروفیل مربوط به بار و فتولتائیک و همچنین توربین بادی در [۳۵] ارائه شده است. در نهایت، نتایج مربوط به این بخش در شکل های ۷ و ۸ و جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول (۳): نتایج بازیابی برای حالات مختلف

| بار تامین نشده بدون FZA بار | تعداد باس | کلیدهای بسته شده | کلیدهای باز شده | اتصال انتخاب شده / توان مجاز | FZA |
|-----------------------------|-----------|------------------|------------------|---|-----|
| 0 | ۳۲ | - | s32 | - | ۳۳ |
| 0 | ۳۲ | s34 و s33 | s19 و s16 | (۸.۲۱) / ۲۱,۲۳kVA | ۲۰ |
| 0 | ۳۲ | s40 و s39 | s15 و s16 | (۳۳.۱۸) / ۱۷,۱۹kVA | ۱۶ |
| kVA ۱۹,۳۱ | ۳۰ | s35 تا s40 | s10 تا s14 و s16 | (۹.۱۵) و (۲۲.۱۲) / (۳۳.۱۸) / ۱۰,۳۵، ۱۸,۰۳ و ۱۷,۰۹ kVA | ۱۱ |

ب) مدیریت اضافه بار CNMGها: در این مورد مطالعاتی خطایی در شبکه رخ نداده است و فقط بحث مدیریت بار توسط CNMGها در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی مدیریت اضافه بار CNMGها، براساس [28, 29] همانطور که پیش تر نیز اشاره شد دو روش برای شارژ شدن EVها در این بخش وجود دارد:

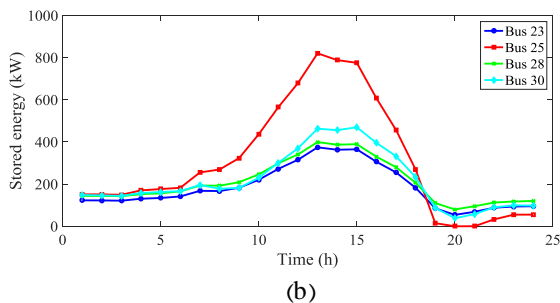
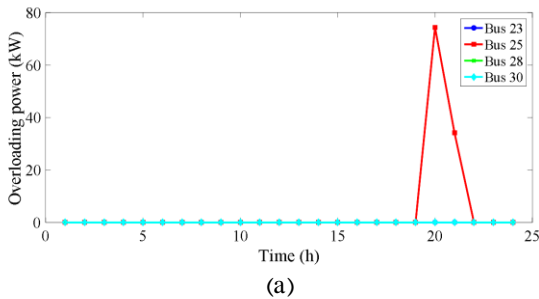
جدول (۵): مدیریت اضافه بار CNMGها با در نظر گرفتن فرآیند بازیابی

| استراتژی | FZA | DZA | OMZA | توان اضافه باری | کل توان ظاهری DZA | NOMZA در دسترس | اتصال بازیابی در دسترس |
|----------|------------------|------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|----------------|--------------------------------|
| ۱ | ۲۴ | ۲۵ | ۲۵ | ۷۴,۴۳ kVA, kW | ۷۴,۴۳ kVA, kW | ۳۰ و ۲۸ | (۲۵,۲۹) |
| ۲ | ۲۴ | ۲۵ | ۲۵ | ۷,۱۸ kVA, kW | ۷,۱۸ kVA, kW | ۳۰ و ۲۸ | (۲۵,۲۹) |
| استراتژی | NOMZA انتخاب شده | اتصال انتخاب شده | کلیدهای باز شده | کلیدهای بسته شده | بار تامین نشده بدون بار FZA | MAC (پریونیت) | حداکثر مقدار انحراف ولتاژ (pu) |
| ۱ | ۲۸ | (۲۵,۲۹) | s24 و s23 | s41, s42, s44 و s45 | . | ۰,۰۰۹۲ | ۰,۰۷۱۵ |
| ۲ | ۲۸ | (۲۵,۲۹) | s24 و s23 | s41, s42, s44 و s45 | . | ۰,۰۰۹۲ | ۰,۰۷۱۵ |

جدول (۴): مدیریت اضافه بار CNMGها

| روش | | ۱ | ۲ |
|--|--|------------|------------|
| ریزشبکه دارای اضافه بار پیش از مدیریت CNMG | مکان (باس) | ۲۵ | ۲۵ |
| | انرژی تامین نشده (kWh) | ۱۰۸,۶۳ | ۷,۱۸ |
| ریزشبکه هایی که دارای اضافه بار نیست | مکان (باس) | ۲۳, ۲۸, ۳۰ | ۲۳, ۲۸, ۳۰ |
| | حداقل انرژی ذخیره شده (kWh) | ۵۴,۱ | ۶۶,۸ |
| ریزشبکه دارای اضافه بار نیست | کل انرژی ذخیره شده در این ریزشبکه ها (kWh) | ۱۷۱,۹ | ۲۲۱,۲ |
| | مکان (باس) | ۲۵ | ۲۵ |
| ریزشبکه دارای اضافه بار پس از مدیریت CNMG | انرژی تامین نشده (kWh) | . | . |

مقدار بالایی است. اما براساس شکل ۷- (b)، انرژی ذخیره شده در ریزشبکه ها در باس های ۲۳، ۲۸ و ۳۰ در بازه زمانی ۲۰:۰۰ تا ۲۴:۰۰ بیش از ۵۰ kWh است. بنابراین پیش بینی شده است که توان اضافه-باری در ریزشبکه ۲۵ توسط توان ذخیره شده دیگر ریزشبکه ها تامین گردد.



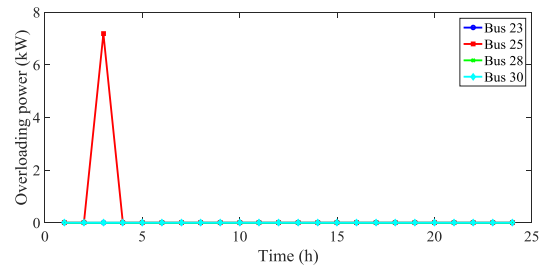
شکل (۷): مدیریت اضافه بار CNMGها به ازای در نظر گرفتن

استراتژی ۱، (a) منحنی روزانه توان اضافه باری مربوط به هر ریزشبکه، (b) منحنی روزانه انرژی ذخیره شده در باتری هر ریزشبکه

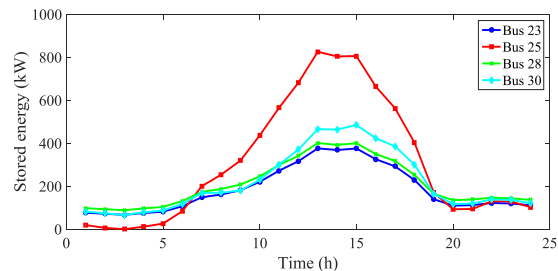
در شکل های ۷ و ۸، مقدار توان اضافه باری و انرژی ذخیره شده هر یک از ریزشبکه ها برای روش های ۱ و ۲ بیان شده است، که در آن مقادیر این عامل ها براساس معادلات (۱۴) تا (۱۵) محاسبه شده است. در روش ۱ با توجه به شکل ۷- (a)، برای ریزشبکه ای که در باس ۲۵ قرار دارد، در ساعت های ۲۰:۰۰ و ۲۱:۰۰ توان اضافه باری وجود دارد. با توجه به اینکه پیک بار شبکه در ساعات ۱۷:۰۰ تا ۲۲:۰۰ است [34]، EVها با توجه به شکل ۶ در این زمان شارژ شده اند. همچنین، ریزشبکه موجود در باس ۲۵ حاوی EVها و بارهای با مقدار بالا است [30]، از اینرو در ساعات ۲۰:۰۰ و ۲۱:۰۰ بار برای این ریزشبکه

مربوط به ریزشبهه واقع در ۲۵ را تامین کند. بنابراین روش پیشنهادی برای مدیریت اضافه بار در CNMGها به منظور به دست آوردن انرژی تامین نشده کم، مناسب تر است.

پ) بازیابی شبکه به ازای در نظر گرفتن CNMGها: در این بخش فرض شده است که برای روش های ۱ و ۲ شارژ شدن EVها، یک خطا در منطقه یا باس ۲۴ در ساعت ۲۰:۰۰ و ۳:۰۰ رخ داده است. بنابراین، عمل می کند و در نتیجه عامل منطقه ۲۴ FZA را مشخص می کند. از اینرو، s23 و s24 به منظور جدا کردن منطقه ۲۴ از شبکه ۳۳ باسه باز می شوند. در گام بعدی، FZA به منظور بستن مجدد مناطق بالادست FZA، یعنی منطقه ۲، ۳ و ۲۳، یک سیگنال به FC ارسال می کند. بنابراین، FZA فرآیند بازیابی را با ارسال پیغام RFI به DZA یا منطقه واقع در باس ۲۵ آغاز می کند. لازم به ذکر است که یک ریزشبهه در باس ۲۵ وجود دارد، که براساس جدول ۴ برای روش های ۱ و ۲ در ساعت ۲۰:۰۰ و ۳:۰۰ دچار اضافه بار می شود. بنابراین، DZA پیغام RFI را به OMZA ارسال می کند و در نتیجه تقاضای مربوط به ریزشبهه واقع در باس ۲۵ را دریافت می کند. علاوه بر این OMZA به منظور تامین توان اضافه باری به وسیله ریزشبهه های واقع در باس های ۲۳، ۲۸ و ۳۰، پیغام RFI را به NOMZA، یعنی باس ۲۳، ۲۸ و ۳۰، ارسال می کند. با این حال، به علت بازبودن کلیدهای s23 و s24، ریزشبهه واقع در باس ۲۳ قادر به تامین توان اضافه باری ریزشبهه ۲۵ نمی باشد. همچنین از آنجاییکه توان اضافه باری ریزشبهه واقع در باس ۲۵ باید توسط توان ذخیره شده سایر ریزشبهه ها تامین گردد، در نتیجه خط اتصال در دسترس، خط میان باس ۲۵ و ۲۹ است. بنابراین، FZA پیغام CFP را به ZTA واقع در باس ۲۹ ارسال می کند. این امر به منظور محاسبه توان مجاز آن براساس محدودیت های جریان خط و ولتاژ و داده های دریافتی، یعنی V_{min} ، V_h ، Z_h ، I_{ava} ، از HZA واقع در باس های ۱ تا ۶، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۳۰، ۳۱، ۳۲ و ۳۳ انجام می گیرد. براساس نتایج جدول ۵، FZA پیغام پذیرش پیشنهاد را به ZTA واقع در باس ۲۹ و MZA واقع در باس های ۲۵ و ۲۸ ارسال می کند تا کلیدهایشان، یعنی s41، s42، s44 و s45، را ببندد. علاوه بر این، با توجه به جدول ۵، حداکثر مقدار انحراف ولتاژ در استراتیژی ۱ و ۲ کمتر از 0.1 pu است و MAC مثبت است. از اینرو، روش بازیابی پیشنهادی می تواند محدودیت های بهره برداری شبکه را برآورده کند. که در مقایسه با روش های ارائه شده در [36] به دلیل اینکه ریزشبهه ها به صورت جزیره ای در نظر گرفته شده اند و ریزشبهه های مجاور امکان اتصال با یکدیگر را ندارند، بارهای بیشتری مورد بازیابی قرار خواهند گرفت. همچنین اتصال میان ریزشبهه ها که در این مقاله برای بازیابی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است، می تواند در بحث مدیریت انرژی و کاهش هزینه برق در پژوهش های آتی مورد مطالعه قرار گیرد.



(a)



(b)

شکل (۸): مدیریت اضافه بار CNMGها به ازای در نظر گرفتن استراتیژی ۲. (a) منحنی روزانه توان اضافه باری مربوط به هر ریزشبهه، (b) منحنی روزانه انرژی ذخیره شده در باتری هر ریزشبهه

علاوه بر این، در روش ۲ برای ریزشبهه واقع شده در باس ۲۵ در ساعت ۳:۰۰ اضافه بار رخ داده است. به همین دلیل در این استراتیژی، با توجه به شکل ۶، تعداد زیادی از EVها در ساعات کم باری، یعنی ۱:۰۰ تا ۷:۰۰ شارژ شده اند. اما، توان اضافه باری این ریزشبهه در ۱۸ kW، اما انرژی ذخیره شده ریزشبهه های موجود در باس های ۲۳، ۲۸ و ۳۰ بیشتر از ۲۰۰ kWh است. بنابراین توان ذخیره شده مربوط به این ریزشبهه ها، می تواند توان اضافه باری ریزشبهه باس ۲۵ را تامین کند.

جدول ۴ نتایج مربوط به مدیریت اضافه بار CNMGها را نشان می دهد. براساس این جدول، انرژی اضافه باری یا انرژی تامین نشده (ENS^{EV}) در ریزشبهه موجود در باس ۲۵ برای روش های ۱ و ۲، به ترتیب برابر با 108.63 kWh و 7.18 kWh است. توجه داشته باشید که مدیریت شارژ شدن EVها نسبت به عدم مدیریت شارژ شدن EVها می تواند ENS کمتری را نتیجه دهد. علاوه بر این، حداقل مقدار کل انرژی ذخیره شده در سایر ریزشبهه ها برای روش ۱ و ۲ به ترتیب برابر با 171.9 kWh و 221.2 kWh است. در نتیجه برای دو روش، مقدار این انرژی نسبت به ENS بیشتر است؛ بنابراین ریزشبهه های موجود در باس های ۲۳، ۲۸ و ۳۰ می تواند ENS مربوط به باس ۲۵ را تامین کند. براساس جدول ۴؛ برای روش ۱، ریزشبهه های واقع در باس های ۲۳ و ۲۸ می توانند ENS مربوط به ریزشبهه واقع در ۲۵ را تامین کند و برای روش ۲، ریزشبهه واقع در باس ۲۳ نیز ENS

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، روشی غیرمتمرکز مبتنی بر MAS به منظور بازیابی شبکه توزیع به ازای درنظر گرفتن CNMGها مورد استفاده قرار گرفته است. در CNMG، مدیریت اضافه بار با استفاده از مدل RES، EV، BSS و بار برای هر ریزش شبکه مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، چهار عامل منطقه‌ای برای فرآیند بازیابی مورد استفاده قرار گرفته است و یک عامل منطقه‌ای برای مدیریت اضافه بار CNMGها استفاده شده است، که در آن همه عامل‌ها منطقه‌ای بایکدیگر هماهنگ شده‌اند. لازم به ذکر است که رویکرد MAS می‌تواند مسیر بازیابی مناسب را به ازای عامل‌های منطقه‌ای مختلف که در طول شبکه توزیع شده است، به دست آورد و می‌تواند ریزش‌های دارای اضافه بار را که ناشی از عدم تعادل میان RES، BSS، EV و بار است را با استفاده از اتصال داخلی این ریزش‌ها به ریزش‌های مجاور که دچار اضافه بار نیستند، مدیریت کند. در نهایت، براساس نتایج عددی، در صورت وقوع خطا، روش بازیابی پیشنهادی می‌تواند محدودیت‌های جریان خط و ولتاژهای باس شبکه توزیع را برآورده کند. علاوه بر این، این روش می‌تواند انرژی تامین نشده پایینی برای شبکه توزیع و ریزش‌ها را به دست آورد.

منابع

- dynamic multicriteria decision-making," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 8, no. 2, pp. 969-983, 2017.
- [11] F. Shahnia, R. P. S. Chandrasena, S. Rajakaruna, and A. Ghosh, "Primary control level of parallel distributed energy resources converters in system of multiple interconnected autonomous microgrids within self-healing networks," IET Gener. Transm. Distrib., vol. 8, no. 2, pp. 203-222, Feb. 2014.
- [12] Y. Zhang and L. Xie, "Online dynamic security assessment of microgrid interconnections in smart distribution systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 30, no. 6, pp. 3246-3254, Nov. 2015.
- [13] E. Pashajavid, A. Ghosh, F. Zare, "A multimode supervisory control scheme for coupling remote droop-regulated microgrids," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 9, no. 5, pp. 5381-5392, 2018.
- [14] L. Xu, M.-Y. Chow, J. Timmis, and L. Taylor, "Power distribution outage cause identification with imbalanced data using artificial immune recognition system (AIRS) algorithm," IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 1, pp. 198-204, Feb. 2007.
- [15] W. Chen, "Quantitative decision-making model for distribution system restoration," IEEE Transactions on power systems, vol. 25, no. 1, Feb. 2010.
- [16] T. Nagata, and H. Sasaki, "An efficient algorithm for distribution network restoration," IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, Vancouver, BC, Canada, vol. 1, pp. 54-59, 2001.
- [17] K. Nara, T. Satoh, M. Kitagawa, "Distribution system loss minimum reconfiguration by genetic algorithm," Proceeding of the third symposium expert systems application to power systems (ESAPS), Tokyo and Kobe, Japan, pp. 724-30, 1991.
- [18] M. Eriksson, et al., "Multiagent-based distribution automation solution for self-healing grids," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 4, pp. 2620-2628, April 2015.
- [19] T. Nagata, K. Okamoto, "A decentralized distribution power system restoration by using multi-agent Approach," International Electrical Engineering Congress (IEECON), vol., no., pp.1-4, 19-21 March 2014.
- [20] A. Felix, H.S.V.S. Kumar Nunna, S. Doolla, A. Shukla, "Multi agent based restoration for smart distribution system with microgrids," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), vol., no., pp.2341-2347, 20-24 Sept. 2015.
- [21] A. Sharma, D. Srinivasan, A. Trivedi, "A decentralized multiagent system approach for service restoration using DG islanding," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 6, pp. 2784-2793, Nov. 2015.
- [22] M.J. Ghorbani, M.A. Choudhry and A. Feliachi, "A multiagent design for power distribution systems automation," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 1, pp. 329-339, Jan. 2016.
- [23] A. Abel Hafez, W.A. Omran, Y.G. Hegazy, "A Decentralized Technique for Autonomous Service Restoration in Active Radial Distribution Networks," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 9, no. 3, pp. 1911-1919, 2018.
- [24] A. Sharma, D. Srinivasan, A. Trivedi, "A decentralized multi-agent approach for service restoration in uncertain environment," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 9, no. 4, pp. 3393-3405, 2018.
- [25] Leite, Jónatas Boás, and José Roberto Sanches Mantovani. "Development of a self-healing strategy with multiagent systems for distribution networks." IEEE Transactions on Smart Grid 8.5 (2016): 2198-2206.
- [1] Y.Y. Hong, M.C. Hsiao, Y.R. Chang, Y.D. Lee, and H.C. Huang, "Multi scenario under frequency load shedding in a microgrid consisting of intermittent renewables," IEEE Trans. Power Del., vol. 28, no. 3, pp. 1610-1617, Jul. 2013.
- [2] Nosratpoor H, Zanganeh A. Optimal Self-healing of Smart Distribution Grids Based on Spanning Trees to Improve System Reliability. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. 2019; 16 (1) :91-101
- [3] Golkar M A, Hosseinzadeh S, Hajizadeh A. Optimal Multi-Objective Planning of Distribution System with Distributed Generation. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. 2008; 5 (2) :41-48
- [4] Salmani S, Jadid S. Optimal Operation of Smart Distribution Network in Presence of Distributed Energy Resources . Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. 2016; 13 (3) :1-10
- [5] S.A. Arefifar and Y.A.R.I. Mohamed, "DG mix, reactive sources and energy storage units for optimizing microgrid reliability and supply security," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 5, no. 4, pp. 1835-1844, Jul. 2014.
- [6] J. Xiao, P. Wang, L. Setyawan, and Q. Xu, "Multi-level energy management system for real-time scheduling of DC microgrids with multiple slack terminals," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 4, pp. 1-9, 2016.
- [7] A. Kavousi-Fard, A. Khodaei, "Efficient integration of plug-in electric vehicles via reconfigurable microgrids," Energy, vol. 111, pp. 653-663, 2016.
- [8] R. H. Lasseter, "Smart distribution: Coupled microgrids," Proc. IEEE, vol. 99, no. 6, pp. 1074-1082, Jun. 2011.
- [9] Z. Wang, B. Chen, J. Wang, and C. Chen, "Networked microgrids for self-healing power systems," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 7, no. 1, pp. 310-319, 2016.
- [10] F. Shahnia, S. Bourbour, and A. Ghosh, "Coupling neighboring microgrids for overload management based on

زیرنویس ها

- ¹ Coupling neighboring microgrid
- ² Distributed generator
- ³ Multi-agent system
- ⁴ Artificial bee colony
- ⁵ Electric vehicle
- ⁶ Renewable energy source
- ⁷ Energy storage system
- ⁸ Fault zone agent
- ⁹ Down zone agent
- ¹⁰ Zone tie agent
- ¹¹ Healthy zone agent
- ¹² Microgrid zone agent
- ¹³ Overloaded microgrid zone agent
- ¹⁴ Non-overload microgrid zone agent
- ¹⁵ Call for proposal
- ¹⁶ Request for information
- ¹⁷ Energy Not Supplied

- [26] M.baldoni, J.P.Muller, I.Nunes,"Engineering Multi-Agent Systems," 4th International Workshop, EMAS 2016, Singapore, Singapore, May 9-10, 2016
- [27] R. Ciric, D. Popovic, "Multi-objective distribution network restoration using heuristic approach and mix integer programming method," *Electr. Power Energy Syst.*, pp. 497-505, 2000.
- [28] W.H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [29] S. Pirouzi, J. Aghaei, M. Shafie-khah, G.J. Osório, J.P.S. Catalão, "Evaluating the security of electrical energy distribution networks in the presence of electric vehicles," in *Proc. PowerTech Conf, IEEE Manchester*, pp. 1-6, 2017.
- [30] S. Pirouzi, J. Aghaei, "Mathematical Modeling of Electric Vehicles Contributions in Voltage Security of Smart Distribution Networks," *SIMULATION: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, (article in press), 2018.
- [31] A. Maleki, A. Askarzadeh, "Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 7, pp. 147-153, 2014.
- [32] S. Pirouzi, J. Aghaei, M.A. Latify, G.R. Yousefi, and G. Mokryani, "A robust optimization approach for active and reactive power management in smart distribution networks using electric vehicles," *IEEE System Journal*, pp. 1-12, 2017.
- [33] P. R. Babu, C. P. Rakesh, G. Srikanth, M. N. Kumar, and D. P. Reddy, "A novel approach for solving distribution networks," *India Conference (INDICON), 2009 Annual IEEE*, pp. 1-5, Dec. 2009.
- [34] P. Fortenbacher, A. Ulbig, and G. Andersson, "Optimal Placement and Sizing of Distributed Battery Storage in Low Voltage Grids using Receding Horizon Control Strategies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 3, May 2017.
- [35] A. Maleki, A. Askarzadeh, "Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 7, pp. 147-153, 2014.
- [36] A. Rao RS, Ravindra K, Satish K, Narasimham S. "Power loss minimization indistribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation." *IEEE Transaction Power System* 2013;28:317-25.
- [37] Nosratpoor H, Zanganeh A. "Optimal Self-healing of Smart Distribution Grids Based on Spanning Trees to Improve System Reliability." *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*. 2019; 16 (1) :91-101
- [38] Golkar M A, Hosseinzadeh S, Hajizadeh A. "Optimal Multi-Objective Planning of Distribution System with Distributed Generation." *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*. 2008; 5 (2) :41-48
- [39] Salmani S, Jadid S. "Optimal Operation of Smart Distribution Network in Presence of Distributed Energy Resources." *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*. 2016; 13 (3) :1-10