

# طرح حفاظت سلسله مراتبی مبتنی بر سیستم‌های چندعاملی در شبکه‌های توزیع و در حضور منابع تولید پراکنده

عباس جزایری<sup>۱</sup> غضنفر شاهقلیان<sup>۲</sup> بهادر فانی<sup>۲</sup> مجید معظمی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

[s.abbasj@yahoo.com](mailto:s.abbasj@yahoo.com)

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

[shahgholian@iaun.ac.ir](mailto:shahgholian@iaun.ac.ir)

۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

[b.fani@pel.iaun.ac.ir](mailto:b.fani@pel.iaun.ac.ir)

۴- استادیار- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

[majid.moazzami@gmail.com](mailto:majid.moazzami@gmail.com)

چکیده: در این مقاله الگوریتمی برای بهبود عملکرد سیستم حفاظت شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با استفاده از تجهیزات هوشمند پیشنهاد شده است. این الگوریتم که بر روی یک ساختار چندعاملی سلسله مراتبی پیاده‌سازی می‌گردد، به کمک استفاده از بستر مخابراتی مبتنی بر مدل اطلاعاتی استاندارد IEC-61850 قادر است تا مشکلات مربوط به از دست رفتن هماهنگی بین رله‌های جریان زیاد را بهبود بخشد. در این روش طرح حفاظتی در سه سطح بر روی رله‌ها پیاده‌سازی می‌گردد. هر سطح وظایفی دارد که با توجه به قرارگیری شبکه در شرایطی مشخص بر روی یکی از لایه‌های ساختار سیستم چندعاملی پیاده‌سازی می‌گردد. در سطح حفاظتی اول که توسط عامل‌های رله انجام می‌شود از منحنی مشخصه حفاظتی رله‌ها به همراه توابع تعریف شده بر روی تجهیزات هوشمند استفاده می‌شود. در سطح دوم به منظور جلوگیری از گردش اطلاعات در شبکه و همچنین تسریع بخشیدن به عملکرد سیستم حفاظتی از یک پایگاه داده به منظور ثبت رویدادها و الگوی رفتار انتخاب شده متناسب با آنها استفاده شده است. الگوهای عملکردی ثبت شده در پایگاه داده این امکان را فراهم می‌کنند تا در صورت وقوع شرایط مشابه، عامل‌ها تنظیمات مناسب را بدون ارسال اطلاعات به واحد مرکزی دریافت نمایند. در سطح حفاظتی سوم، در صورت عدم وجود الگوی مشابه، تنظیمات جدید رله‌ها متناسب با شرایط شبکه توسط واحد نظارت شبکه محاسبه شده و برای آنها ارسال می‌گردد. در انتها به منظور بررسی و آشکارسازی صحت روش پیشنهادی، طرح ارائه شده بر روی یک شبکه تست در نرم‌افزار ETAP شبیه‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع، منابع تولید پراکنده، حفاظت سلسله مراتبی، استاندارد IEC-61850

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.18.2.93

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۳/۲۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: غضنفر شاهقلیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - نجف‌آباد - دانشگاه آزاد اسلامی - دانشکده مهندسی برق

## ۱- مقدمه

یکی از چالش‌هایی که در ارتباط با اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه وجود دارد، حفاظت از سیستم در زمان وقوع یک خطا است [۲،۱]. حضور این منابع می‌تواند شرایطی را که شبکه بر اساس آن طراحی شده را تغییر دهد. به عنوان مثال سیستم حفاظت سنتی که با توجه به اطلاعات شبکه شامل محاسبات پخش بار، بیشترین و کمترین جریان خطای شبکه برنامه‌ریزی شده است در حضور این منابع با مشکلاتی همراه می‌گردد. حضور منابع تولید پراکنده شرایط بهره‌برداری شبکه را تغییر داده به‌طوری‌که جهت جریان و نیز سطح اتصال کوتاه شبکه تحت تأثیر این منابع قرار می‌گیرد. از دست رفتن هماهنگی حفاظتی و عملکرد غیر ضروری آنها به علت افزایش میزان جریان خطا از جمله مشکلات ناشی از اتصال این منابع در سطح سیستم توزیع است [۳]. روش‌های زیادی به‌عنوان راه حل برای بهبود عملکرد سیستم حفاظتی در حضور منابع تولید پراکنده پیشنهاد شده است [۵،۴]. این روش‌ها را می‌توان به صورت کلی به طرح‌های مربوط به مدیریت و برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده و طرح‌های ارائه شده به منظور تغییر سیستم حفاظتی، دسته‌بندی نمود. بر این اساس روش‌های پیشنهادی به شش گروه تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارتند از: محدودسازی ظرفیت منابع تولید پراکنده، خروج منابع تولید پراکنده بعد از رخداد خطا، تغییر سیستم حفاظتی، نصب محدودکننده‌های جریان خطا، استفاده از استراتژیهای گذر از خطا و روش‌های حفاظت

در مقاله [۶] روشی برای یافتن مقدار آستانه ظرفیت DGها برای حفظ هماهنگی بین ریکلوزر- فیوز پیشنهاد شده است. در این مقاله معادلات ریاضی برای محاسبه‌ی تنظیمات تجهیزات حفاظتی که برای آن هماهنگی سیستم حفاظتی برقرار می‌گردد، محاسبه شده است. در مقاله [۷]، دو الگوریتم محدودسازی به‌منظور بهینه‌سازی ظرفیت توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی در شرایط اتصال به شبکه‌ی اصلی پیشنهاد شده است. در مقاله [۸] بر اساس تحلیل اثر DGها، موقعیت و ظرفیت‌های آنها بر روی جریان اتصال کوتاه، یک روش مکان‌یابی جهت نصب منابع تولید پراکنده ارائه شده است. این روش برای به حداکثر رساندن سطح نفوذ DG در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی بدون تغییر طرح‌های حفاظت اولیه‌ی شبکه پیشنهاد شده است. این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای یافتن مکان و اندازه‌ی مطلوب DG در شبکه‌های توزیع استفاده می‌نماید. باید توجه داشت که محدودکردن ظرفیت منابع تولید پراکنده یک راه حل موقتی است، به همین علت باید آن را به‌صورتی مدیریت نمود که از همه مزایای آن استفاده گردد. در مقاله‌های [۹] و [۱۰] راه حلی مبنی بر خروج منابع تولید پراکنده در زمان وقوع خطا پیشنهاد شده است. در این روش با خروج منابع تولید پراکنده جریان اتصال کوتاه ناشی از اتصال منابع بی‌اثر شده و سیستم حفاظت سنتی می‌تواند بدون مشکل عمل نماید. اگر چه این روش‌ها می‌توانند به‌طور مناسب اثرات منفی ناشی از

ضریب نفوذ DGها را بر عملکرد رله‌های حفاظتی کاهش دهند، اما دارای محدودیت‌هایی نیز هستند. قطع اتصال DGهای با ظرفیت تولید زیاد بلافاصله پس از تشخیص خطا می‌تواند منجر به افت شدید ولتاژ گردد زیرا در این شرایط سهم توان راکتیو تزریقی به شبکه حاصل از اتصال DGها به سیستم توزیع از بین خواهد رفت. علاوه بر این اغلب خطاهای شبکه به‌صورت موقتی هستند، بنابراین قطع ارتباط DGها از لحاظ اقتصادی نیز سودمند نخواهد بود.

تغییر سیستم حفاظت شبکه با بکارگیری تجهیزات حفاظتی اضافی مثل کلیدها، رله‌های جهتی یا رله‌های دیستانس که در شبکه توزیع متداول نیستند، یکی از روش‌های مطرح شده در رفع مشکلات مربوط به حضور منابع تولید پراکنده در شبکه است. مرجع [۱۱] طرح حفاظتی رله‌های جریان زیاد موجود در یک فیدر شعاعی را بررسی می‌کند تا مشکلات ناشی از حضور منابع تولید پراکنده را برطرف سازد. در این مرجع فیوزهای خطوط جانبی که منابع تولید پراکنده به آنها متصل هستند حذف شده و رله‌هایی با عملکرد چند منظوره برای رفع مشکلات مربوط به رله‌های جریان زیاد جایگزین آنها می‌شوند. در مقاله [۱۲] استفاده از رله‌های دیستانس در طول فیدر همراه با رله‌های جریان زیاد و فیوز پیشنهاد شده است. در این مرجع نشان داده می‌شود که حفاظت از فیدر شبکه در حضور منابع تولید پراکنده با استفاده از رله‌های دیستانس می‌تواند پیچیدگی در تنظیمات رله‌های جریان زیاد را کاهش دهد. مرجع [۱۳] یک طرح حفاظتی با بکارگیری رله‌های جریان زیاد جهتی را پیشنهاد می‌کند. این روش با هدف تشخیص خطاهای با سطح جریان اتصال کوتاه پایین که ممکن است بر اثر حضور منابع تولید پراکنده اتفاق افتد، پیشنهاد شده است. مسئله ای که لازم است در اینگونه روش‌ها مورد توجه قرار گیرد این است که اصلاح طرح حفاظتی با نصب تعداد بیشتر کلیدها برای ناحیه‌بندی شبکه، پیکربندی مجدد شبکه‌ها و یا تغییر تجهیزات حفاظتی بسیار پرهزینه است. همچنین استفاده از حفاظت‌های متعدد در یک ناحیه خاص از سیستم قدرت ممکن است منجر به پیچیده‌تر شدن سناریوی هماهنگی حفاظتی و سخت شدن تجزیه و تحلیل رویدادها پس از وقوع آن شود. نصب محدودکننده‌های جریان برای حفظ تنظیمات ابتدایی سیستم حفاظتی راه حل دیگری است که در برخی مراجع به آن پرداخته شده است. محدودکننده‌های جریان در شرایط نرمال شبکه دارای امپدانس نزدیک به صفر بوده و در شرایط خطا قادرند تا امپدانس بسیار زیادی را از خود نشان دهند تا بتوانند مقدار جریان خطا را به اندازه‌ی شرایط قبل از اتصال منابع تولید پراکنده محدود نمایند. اما این موضوع نیازمند محاسبه امپدانس بهینه و همچنین محل نصب مناسب این محدودکننده‌ها است. اشکال عمده‌ی اجرای گسترده‌ی FCLها هزینه‌ی اضافی و بالایی است که همیشه مطلوب نیست.

در [۱۴] یک محدودکننده‌ی جریان خطای نوع مقاومتی به‌عنوان یک راه حل کارآمد برای دستیابی به حداکثر قابلیت گذر از خطا در توربین‌های بادی در خطاهای مختلف شبکه ارائه شده است. در [۱۵]

هماهنگی سیستم حفاظتی به علت استفاده از محدودکننده‌های جریان در یک سیستم توزیع برق که منابع تولید پراکنده به آن متصل شده، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. استراتژی کنترلی گذر از خطا مبتنی بر منابع تولید پراکنده اینورتری دارای هزینه کمتری نسبت به راه حل های ارائه شده قبلی هستند. این روش ها به کمک کنترل جریان خروجی، اثر این منابع را بر روی جریان خطا محدود می کنند. قابل توجه است که این دسته از راه حل ها نمی توانند به عنوان یک راه حل اصلی برای رفع مشکلات سیستم حفاظتی مطرح شوند زیرا تنها برای منابع تولید پراکنده اینورتری قابل پیاده سازی خواهند بود [۱۶].

در طرح حفاظتی روش های وفقی، تجهیزات حفاظتی با توجه به تغییرات شبکه توسط الگوریتم از پیش برنامه ریزی شده در طرح حفاظتی شرکت می کنند. برای به کارگیری این روش ضروری است تمامی تغییرات شبکه پیش بینی و به ازای همه ی آنها محاسبات لازم انجام شود، در آخر نیز برای هر تغییر یک گروه از تنظیمات در نظر گرفته می شود. روش های پیشنهاد شده در این مقالات به سه دسته تقسیم بندی می شوند که عبارتند از: یافتن تنظیمات بهینه برای عملکرد مناسب سیستم حفاظتی در زمان رخداد خطا [۱۷]، استفاده از واحد پردازش مرکزی به منظور جمع آوری اطلاعات شبکه و محاسبه تنظیمات جدید [۱۸] و مشخص کردن دسته تنظیمات مختلف بر روی سیستم حفاظتی با توجه به شرایط پیش بینی شده [۱۹]. در هر یک از این روش ها سعی شده تا به کمک تغییر تنظیمات رله ها، عملکرد درست سیستم حفاظت شبکه تضمین گردد. اما یک سوال اصلی مطرح می شود، آیا در صورت گسترش شبکه ی توزیع و یا در شرایط تغییر سطح ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر مثل نیروگاه های بادی و پنل های خورشیدی، می توان عملکرد روش های فوق را همچنان تضمین نمود؟

یکی دیگر از روش هایی که در سال های اخیر به منظور حفاظت شبکه های توزیع انرژی الکتریکی معرفی شده است، بکارگیری تجهیزات هوشمند است. در این روش ها مفهومی به نام عامل که در واقع یک تجهیز هوشمند الکترونیکی است در شبکه ی توزیع قرار گرفته و با ایجاد ارتباط بین این عامل ها مفهومی به نام سیستم چندعاملی معرفی می شود. سیستم چندعاملی یک بستر ارتباطی است که با توجه به سیاست گذاری مورد نیاز شبکه طراحی شده و در آن به کمک اطلاعات جمع آوری شده از سطح شبکه، می توان برای مدیریت عملکرد سایر بخش های آن تصمیم گیری نمود. در مقاله [۲۰] یک طرح حفاظتی مبتنی بر ساختار سیستم های چندعاملی پیشنهاد شده است. این طرح به منظور برقراری هماهنگی حفاظتی ساختار پیشنهادی از سه لایه مخابراتی تشکیل شده است. لایه اول شامل عامل های رله، عامل های بار، عامل های کلید و عامل های تولید پراکنده است. لایه دوم متشکل از عامل هایی است که اطلاعات لایه اول را دریافت کرده و به واحد پردازشگر مرکزی در لایه سوم انتقال می دهند. در ساختار سیستم چندعاملی چند لایه پیشنهاد شده در این مرجع به منظور

دستیابی به یک طرح حفاظت وفقی پنج مرحله زمانی طی می گردد. مرحله اول، زمان دریافت اطلاعات توسط عامل لایه اول و ارسال اطلاعات به لایه بالاتر می باشد. مرحله دوم مدت زمان لازم جهت ارسال اطلاعات از لایه اول به لایه سوم خواهد بود. در مرحله سوم، زمانی طول خواهد انجامید تا بر روی اطلاعات جمع آوری شده محاسبات لازم صورت گرفته، تنظیمات مناسب اتخاذ گردد. در مرحله چهارم، زمان مورد نیاز برای بازگشت اطلاعات به لایه اول و دریافت آن توسط عامل ها می باشد. در مرحله پنجم، مدت زمان لازم برای بارگذاری این تنظیمات بر روی رله ها می باشد. با توجه به این مراحل که به عنوان راه حل پیشنهادی برای یک سیستم حفاظت شبکه در مقاله [۱۶] از آن استفاده شده است، زمان زیادی نیاز است تا رله ها در شرایط عملکرد مناسبی قرار گیرند. با توجه به این موضوع نویسندگان به بیان این مشکل در روش پیشنهادی خود در زمان وقوع خطا پرداخته اند، و راه حلی که برای آن در نظر گرفته اند استفاده از یک رله کمکی اضافه در مکان هر رله به منظور پوشش ضعف طرح پیشنهادی می باشد، که از لحاظ هزینه به صرفه نخواهد بود. علاوه بر این موضوع طرح حفاظتی پیشنهادی کاملاً وابسته به عملکرد واحد پردازش مرکزی خواهد بود و در صورتی ایجاد مشکل بر روی آن عملکرد سیستم حفاظتی با مشکل مواجه خواهد شد.

طرح پیشنهادی در این مقاله به دنبال راه حلی است تا بتواند ضعف های بررسی شده را پوشش داده و عملکرد سیستم چندعاملی را از لحاظ اطمینان در صحت عملکرد بهبود دهد. طرح پیشنهادی بر خلاف ساختار سیستم چند عاملی معمول، قادر است تا طرح حفاظتی را مستقل از واحد پردازش مرکزی اجرا نماید. به بیان کاملتر، در این روش خود عامل های رله قادرند تا در زمان وقوع خطا تصمیم گیری نموده و منتظر دریافت فرمان از واحد پردازش مرکزی نباشند. این عملکرد که به کمک استفاده از خصوصیات و گره های منطقی تعریف شده در استاندارد IEC-61850 بر روی رله ها پیاده سازی می شود، زمان عملکرد طرح حفاظتی را کاهش می دهد. از طرفی دیگر روش پیشنهادی این مقاله یک ساختار حفاظتی سلسله مراتبی را معرفی می کند که به کمک آن می توان هماهنگی از دست رفته رله های حفاظتی را در حضور منابع تولید پراکنده اعاده نمود. در الگوریتم پیشنهادی با اتصال تجهیزات هوشمند در شبکه و در کنار هم قرار گرفتن عامل های رله و عامل های تولید پراکنده، و با اشتراک گذاری اطلاعات بر روی بستر مخابراتی و مدل اطلاعاتی استاندارد IEC-61850، یک طرح حفاظتی سلسله مراتبی پیاده سازی می گردد. این طرح عملکرد حفاظتی بر روی ساختار سیستم چندعاملی را به سه سطح تقسیم بندی می کند که هر سطح بر اساس اطلاعات جمع آوری شده از شبکه اجرا می گردد. در سطح حفاظتی اول از منحنی مشخصه حفاظتی رله ها به همراه توابع تعریف شده بر روی تجهیزات هوشمند استفاده می شود. در سطح دوم به منظور جلوگیری از گردش اطلاعات در شبکه و همچنین تسریع بخشیدن به عملکرد سیستم حفاظتی از

بر روی این رله‌ها، میزان  $t_R$  محاسبه شده و زمان عملکرد رله مشخص می‌شود. این تنظیمات با توجه به محاسبات پخش بار شبکه و همچنین محاسبات اتصال کوتاه بنحوی مشخص می‌گردند که رله‌های اصلی و پشتیبان بتوانند در فاصله زمانی هماهنگی مناسبی نسبت به هم عمل نمایند. در این مقاله فاصله زمانی هماهنگی در نظر گرفته شده مابین حفاظت اصلی و پشتیبان در بازه زمانی ۳۰۰ تا ۴۰۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است [۲۲]. این بازه هماهنگی تا زمانی که سطح جریان اتصال کوتاه شبکه تغییر نکند، حفظ شده و رله‌ها عملکرد مناسبی خواهند داشت. اما زمانی که این جریان تحت تاثیر منابع تولید پراکنده دچار تغییر گردد، سیستم حفاظتی را با چالش‌هایی مواجه می‌کند. در ادامه به بررسی تاثیر این منابع بر عملکرد سیستم حفاظتی اشاره می‌شود.

## ۲-۲- عملکرد سیستم حفاظتی با اتصال DG

شکل (۲) به بررسی تغییرات جریان خطای اتصال کوتاه سه فاز در ناحیه حفاظتی رله‌ها در شرایط اتصال و عدم اتصال این منابع می‌پردازد. با توجه به این شکل، رله‌های R4, R6, R10 با توجه به مکان قرارگیری منابع کمترین تغییرات جریان را بر روی خود مشاهده نموده اند. علت این موضوع کاهش مقدار جریان خطای تزریق شده توسط این منابع به علت افزایش امپدانس خط تا نقطه خطا می‌باشد. بنابراین هرچه مکان منبع تولید پراکنده از محل خطا دورتر باشد، به علت اینکه اثر کمتری بر روی جریان خطای شبکه داشته است میزان تغییرات جریان خطای مشاهده شده بر روی رله‌ها محسوس نیست. با مشخص شدن تغییرات جریان بر روی حفاظت‌های شبکه نحوه عملکرد سیستم حفاظتی در زمان حضور و عدم حضور منابع تولید پراکنده در شرایط مختلف در این قسمت بررسی می‌شود. شکل (۳) زمان عملکرد حفاظت‌های اصلی و پشتیبان را برای خطای ایجاد شده بر روی رله‌های ۵، ۱۰ و ۱۳ نشان می‌دهد. با توجه به این شکل برای خطای ایجاد شده بر روی رله شماره ۵، میزان حاشیه هماهنگی بین حفاظت اصلی و پشتیبان در شرایط قبل از اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه برابر ۳۰۷ میلی ثانیه بوده است که با توجه به محدوده استاندارد تعریف شده، در وضعیت مناسبی قرار دارند.

یک پایگاه داده استفاده می‌شود. الگوهای عملکردی ثبت شده در پایگاه داده این امکان را فراهم می‌کنند تا در صورت وقوع شرایط مشابه، عمل‌ها تنظیمات مناسب را بدون ارسال اطلاعات به واحد مرکزی دریافت نمایند. در سطح حفاظتی سوم، در صورت عدم وجود الگوی مشابه، تنظیمات جدید رله‌ها متناسب با شرایط شبکه محاسبه شده و برای آنها ارسال می‌گردد.

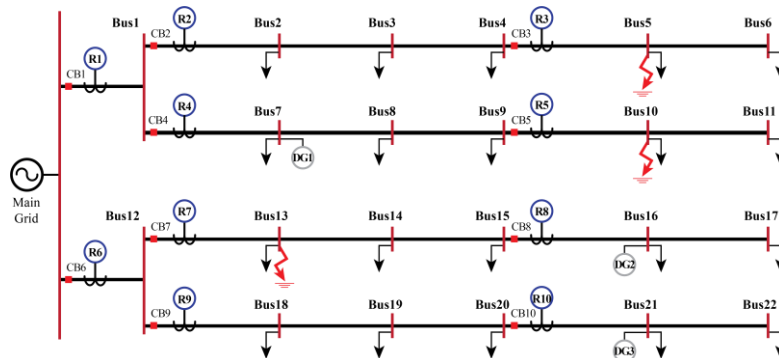
## ۲- اثر DGها بر روی حفاظت‌های جریان زیاد

### ۲-۱- بررسی شبکه‌ی تست مورد مطالعه

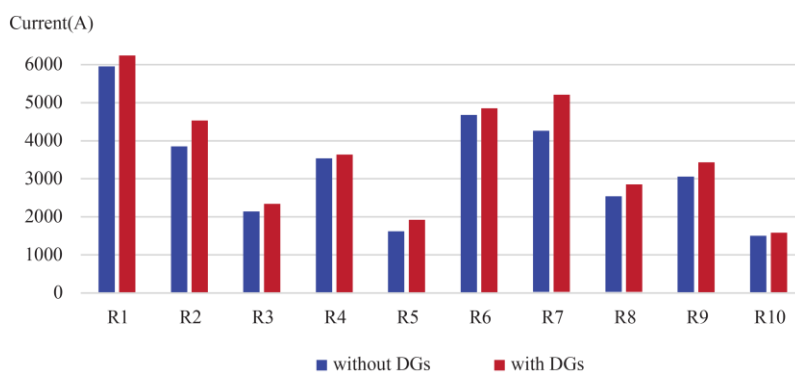
دیگرام تک خطی شبکه‌ی تست مورد مطالعه در این مقاله در شکل (۱) نشان داده شده است. این شبکه از دو فیدر اصلی F1 و F2 تشکیل شده که به صورت شعاعی پیاده‌سازی شده‌اند و هر فیدر بصورت مستقل بارهای خود را تغذیه می‌نماید. شبکه از تعداد ۲۲ گره تشکیل شده و منابع تولید پراکنده DG1, DG2, DG3 که از نوع توربین‌های بادی هستند به ترتیب با ظرفیت ۱۰، ۵ و ۱۰ مگاوات به این شبکه متصل می‌شوند. سیستم حفاظتی در نظر گرفته شده برای این شبکه‌ی تست از نوع رله‌های جریان زیاد بوده و به صورتی طراحی شده است که هر خط موجود بر روی فیدرها دارای یک رله اصلی و یک رله پشتیبان است. همچنین در ورودی هر فیدر یک رله پشتیبان برای رله‌های ابتدای هر خط در نظر گرفته شده است. تنظیمات این رله به صورتی مشخص شده است که بطور همزمان با دو رله ابتدایی خط هماهنگ است. منحنی مشخصه رله‌های جریان زیاد از نوع زمان معکوس بوده و مطابق با استاندارد IEC-60255 بصورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد [۲۱]:

$$t_R = \frac{A \times TMS}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^n - 1} \quad (1)$$

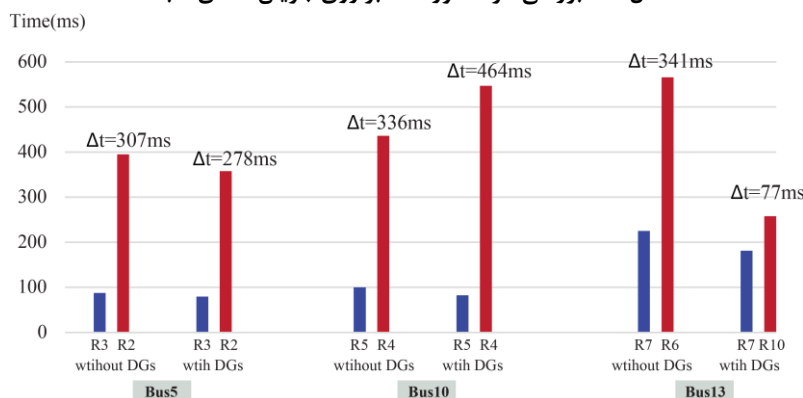
که در آن  $t_R$  زمان عملکرد رله در شرایط خطا است و  $A$  و  $n$  ضرایب ثابتی هستند که با توجه به نوع منحنی حفاظتی رله مشخص می‌گردند. در این شبکه رله‌ها دارای منحنی مشخصه‌ی خیلی معکوس و معکوس بوده که این مقادیر به ترتیب برابر ۱۳/۵ و ۱ برای رله‌های خیلی معکوس و ۰/۱۴ و ۰/۰۲ برای رله‌ی معکوس در نظر گرفته شده است. TMS ثابت زمانی رله بوده و پارامترهای  $I_F$  و  $I_P$  به ترتیب برابر جریان خطا و جریان تحریک رله هستند. با توجه به تنظیمات موجود



شکل (۱): شبکه‌ی تست مورد مطالعه



شکل (۲): بررسی اثر حضور DG بر روی جریان خطای شبکه



شکل (۳): اختلاف زمانی عملکرد رله‌ها در هنگام وقوع خطا

رخداد خطای سه فاز بر روی این گره نشان می‌دهد. باتوجه به این شکل مشخص است که در زمان قبل از اتصال منابع تولید پراکنده مقدار جریان خطای عبوری از رله R7 برابر ۴۲۳۰ آمپر است و این رله این خطا را در زمان ۲۲۵ میلی ثانیه برطرف می‌سازد. رله‌ی R6 به‌عنوان پشتیبان عملکرد این رله همین مقدار جریان خطا را در زمان ۵۶۶ میلی ثانیه رفع می‌نماید. مشخص است که این دو رله برای وقوع خطای ایجاد شده عملکرد مناسبی دارند. زمانی که منابع تولید پراکنده به شبکه متصل می‌گردند، در صورت وقوع خطا بر روی این گره، عملکرد سیستم حفاظتی با مشکلاتی مواجه می‌گردد. در این شرایط به علت وجود منابع تولید پراکنده‌ی DG2 و DG3، رله‌های R8، R9 و R10 جریان برگشتی خطا را بر روی خود مشاهده می‌کنند. در این شرایط همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود در عملکرد سیستم حفاظتی تغییری ایجاد شده است. رله‌ی R10 با توجه به اینکه جریان خطای برگشتی را بر روی خود مشاهده می‌کند، به اشتباه به‌عنوان پشتیبان رله R7 در نظر گرفته شده است و با حاشیه زمانی کوتاهی نسبت به رله‌ی R7 فرمان باز شدن کلید را صادر می‌کند. با توجه به شکل (۴)، جریان عبوری از رله‌های R6، R8، R10 و R7 به ترتیب برابر ۴۲۳۰، ۹۱۴۰، ۸۰۰ و ۵۱۸۰ آمپر است. رله R7 پس از وقوع خطا در زمان ۱۸۱ میلی ثانیه خطا را تشخیص داده و فرمان قطع کلید را صادر می‌کند. در صورتی که این رله موفق به عملکرد به موقع نگردد، لازم است تا رله R6 و رله R9 به صورت همزمان عمل نمایند. با توجه به شکل (۳)، این دو رله خطا را در زمان ۵۶۴ و ۹۶۰ میلی ثانیه

با اتصال منبع تولید پراکنده، با توجه به شکل (۱) مشخص است که جریان هر دو رله در زمان وقوع خطا افزایش می‌یابد که نتیجه آن کاهش زمان عملکرد هر دو رله R2 و R3 خواهد بود. در این شرایط حاشیه هماهنگی بین دو رله به مقدار ۲۷۸ میلی ثانیه کاهش یافته است. با توجه به اینکه حاشیه هماهنگی از محدوده‌ی مجاز خارج شده و به مقداری کمتر از ۳۰۰ میلی ثانیه رسیده است، بنابراین در صورتی که رله R3 در بازکردن کلید خود تاخیر داشته باشد، ممکن است رله R2 به اشتباه عمل کند. در صورت وقوع خطا بر روی گره شماره‌ی ۱۰، در زمان قبل از اتصال منابع تولید پراکنده دو رله‌ی R4 و R5 با یکدیگر هماهنگ بوده و حاشیه‌ی هماهنگی آنها برابر ۳۳۶ میلی ثانیه است. با اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه مقدار جریان رله‌ی اصلی افزایش یافته که نتیجه آن، کاهش زمان عملکرد آن رله بوده و در ادامه جریان رله‌ی پشتیبان کاهش یافته که نتیجه آن عملکرد کندتر این رله نسبت به شرایط قبل از حضور منابع تولید پراکنده است. در این شرایط میزان حاشیه‌ی هماهنگی این دو رله از بازه استاندارد خارج شده و به مقدار ۴۶۴ میلی ثانیه افزایش یافته است. با تاخیر در عملکرد رله‌ی پشتیبان ممکن است تا مدت زمانی که خطا بر روی شبکه قرار می‌گیرد به زمانی برسد که منجر به عبور از مرز حد حرارتی قابل تحمل هادی شبکه شده که سبب آسیب دیدن تجهیزات شبکه می‌شود [۲۳]. در صورتی که خطایی بر روی گره شماره‌ی ۱۳ اتفاق بیفتد، حاشیه‌ی هماهنگی بین رله‌ی اصلی R7 و رله‌ی پشتیبان R6 قبل از اتصال منابع تولید پراکنده برابر ۳۴۱ میلی ثانیه است. شکل (۴) منحنی مشخصه‌ی مربوط به زمان عملکرد این دو رله را برای

تشخیص وضعیت سیستم در شرایط مختلف باشد. استفاده از تجهیزات هوشمند الکترونیکی بر اساس یک ساختار حفاظتی سلسله مراتبی روشی است که در این مقاله به منظور رفع مشکلات سیستم حفاظتی مطرح شده است.

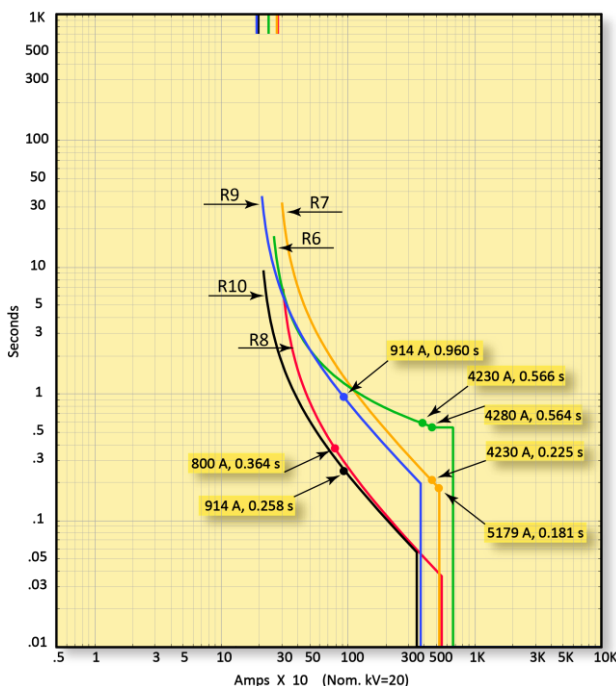
### ۳- طرح حفاظتی سلسله مراتبی چندعاملی

#### ۳-۱- معرفی ساختار چندعاملی در طرح پیشنهادی

ساختار طرح پیشنهادی در شکل (۵) نشان داده شده است. این ساختار که متشکل از سه لایه مخابراتی است، بر روی معماری سیستم چندعاملی پیاده سازی شده است. در این ساختار عامل یک مفهوم سخت افزاری یا نرم افزاری بوده که بر روی یک تجهیز الکترونیکی هوشمند قرار می گیرد [۲۴]. هر عامل قادر است تا نسبت به تغییرات محیط پیرامون خود واکنش نشان دهد. بنابراین هر تغییری که در شبکه رخ دهد، توسط عامل ها تشخیص داده شده و اطلاعات مربوط به رویداد پیش آمده را بر روی بستر مخابراتی منتقل می نمایند [۲۵] و [۲۶]. با توجه به شکل (۵)، در طرح پیشنهادی عامل های رله و عامل های تولید پراکنده لایه اول این ساختار را تشکیل می دهند. در این ساختار عامل های رله اطلاعات مربوط به تغییرات جریان مشاهده شده بر روی خود به همراه اطلاعات دریافتی از سایر عامل ها را به سطوح بالاتر ارسال می نماید. در همین لایه عامل های تولید پراکنده وضعیت اتصال یا عدم اتصال خود را به شبکه گزارش می دهند تا بر اساس آن بتوان از وضعیت عملکردی این منابع در شبکه مطلع گردید. در لایه دوم این ساختار، واحدهای ناظر بر عملکرد عامل های لایه اول به همراه یک پایگاه داده به منظور ذخیره ی اطلاعات شبکه قرار گرفته اند. این لایه وظیفه برقراری ارتباط میان عامل های لایه اول را به جهت دستیابی به یک همکاری موثر ایجاد می کند. علاوه بر این، هر واحد نظارتی وظیفه جمع آوری اطلاعات مربوط به عامل های دسته خود را خواهد داشت. اطلاعات دریافت شده از لایه اول بررسی شده و در پایگاه داده ذخیره می شوند. در ادامه، این اطلاعات به منظور پردازش و محاسبات لازم به لایه بالاتر ارسال می گردند. در لایه سوم این ساختار واحد نظارت بر شبکه قرار گرفته است. این لایه سه وظیفه مهم بر عهده دارد که عبارتند از جمع آوری اطلاعات شبکه توسط عامل های لایه اول به صورت لحظه ای، تشخیص وضعیت شبکه با توجه به اطلاعات دریافت شده از شبکه و سازماندهی و برقراری هماهنگی بین عامل های لایه اول به منظور حضور در طرح حفاظتی پیشنهادی با دریافت اطلاعات شبکه، پردازش اطلاعات بر روی آنها صورت گرفته و وضعیت شبکه مشخص می گردد. سپس در صورت تشخیص رویداد، تصمیم صحیح با توجه به شرایط شبکه گرفته شده و به لایه دوم یعنی واحدهای ناظر بر عامل ها ارسال می شود. واحدهای ناظر با توجه به اطلاعات دریافت شده، تصمیم گرفته شده برای شرایط جدید را بر روی اطلاعات ثبت شده در پایگاه داده ذخیره کرده تا بتوانند در صورت وقوع شرایط مشابه از آن استفاده کنند. در انتها فرمان مناسب

تشخیص می دهند. مشخص است که این زمان طولانی تر از زمانی است که مانع از عملکرد اشتباه رله ی R10 گردد.

جدول (۱) اطلاعات مربوط به جریان و زمان عملکرد سیستم حفاظت شبکه در شرایط رخداد خطا را نمایش می دهد. با توجه به جدول مشخص است که در شرایط حضور منابع تولید پراکنده تغییرات جریان خطای بوجود آمده چه تاثیری بر روی زمان عملکرد رله ها داشته است.



شکل (۴): عملکرد حفاظت سنتی در زمان وقوع خطای در گره ۱۳

جدول (۱): اطلاعات مربوط به عملکرد سیستم حفاظت شبکه در

شرایط خطا

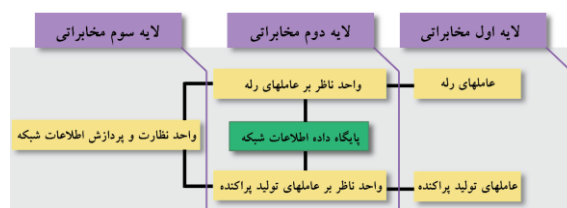
faulted bus	without DG			with DG			
	current (A)	time (ms)		current (A)	time (ms)		
bus5	$I_{FR3}$	$t_{R2}$	$t_{R3}$	$I_{FR2}$	$I_{FR3}$	$t_{R2}$	$t_{R3}$
	2140	395	87.6	2340	2340	358	79.5
bus10	$I_{FR5}$	$t_{R4}$	$t_{R5}$	$I_{FR4}$	$I_{FR5}$	$t_{R4}$	$t_{R5}$
	1620	436	100	1330	1920	547	82.6
bus13	$I_{FR7}$	$t_{R6}$	$t_{R7}$	$I_{FR10}$	$I_{FR7}$	$t_{R10}$	$t_{R7}$
	4230	566	225	914	5180	258	181

پس می توان گفت که حضور منابع تولید پراکنده با توجه به مکان قرار گیری آنها نسبت به نقطه خطا می تواند هم موجب عملکرد اشتباه و بی برق کردن ناحیه سالم گردد و هم می تواند فاصله زمانی هماهنگی را افزایش و یا کاهش دهد که در صورت موجب ایجاد مشکلاتی می گردد. با توجه به اینکه عملکرد سیستم حفاظت سنتی قادر به عملکرد مناسب در چنین شرایطی نمی باشد، لازم است تا یک طرح حفاظتی جایگزین در شبکه پیشنهاد گردد. این طرح حفاظتی باید قادر به

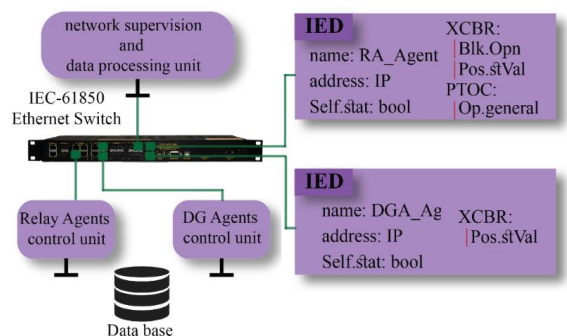
در اختیار لایه‌ی اول قرار گرفته و عامل‌ها بر اساس آن عملکرد خود را مشخص می‌کنند.

### ۲-۳- مدل ارتباطی در استاندارد IEC-61850

استاندارد IEC-61850 امکان برقراری ارتباط بین تجهیزات مختلف را بر روی بستر TCP/IP فراهم می‌آورد که در آن همه‌ی تجهیزات به-عنوان یک شی در نظر گرفته شده و بدون توجه به ماهیت آنها می-توانند به اشتراک اطلاعات در شبکه بپردازند [۲۷]. پروتکل GOOSE و SMV به منظور انتقال سیگنال‌های وضعیت و اطلاعات شبکه این امکان را فراهم می‌کنند تا عامل‌ها به کمک آنها از تغییرات ایجاد شده در شبکه آگاه شوند.



شکل (۵): ساختار ارتباطی در سیستم چندعاملی پیشنهادی



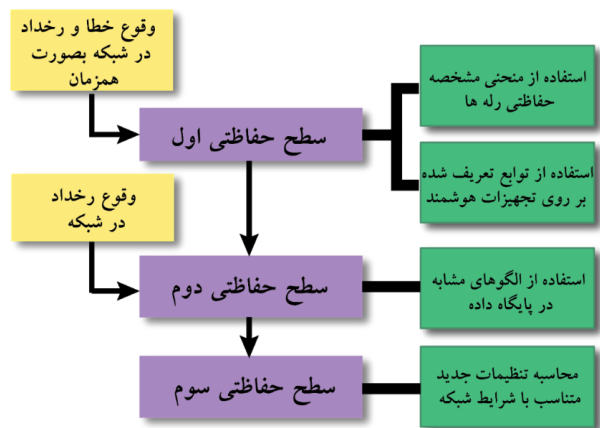
شکل (۶): عملکرد تجهیزات هوشمند در ساختار روش پیشنهادی

هر تجهیز هوشمند در استاندارد IEC-61850 قادر است تا به شبکه متصل شده و به کمک آدرس دهی مناسب توسط همسایگان در دسترس قرار گیرد. علاوه بر آن هر تجهیز هوشمند توسط تعدادی گروهی منطقی وظیفه‌ی کنترل بخش‌های مختلف یک سیستم را بر عهده دارد. شکل (۶) ارتباط تجهیزات هوشمند را بر روی ساختار پیشنهادی نشان می‌دهد [۲۸ و ۲۹]. با توجه به این شکل، هر تجهیز هوشمند به کمک یک "name" در شبکه شناخته می‌شود، که مشخص کننده‌ی ماهیت عملکرد آن است و در طرح پیشنهادی به-عنوان عامل رله (RA) و عامل تولید پراکنده (DGA) شناخته می-شوند. این دو عامل به کمک یک آدرس IP درون شبکه به تبادل اطلاعات با قسمت‌های مختلف می‌پردازند. این ارتباط توسط لینک‌های اترنت و توسط سوئیچ اترنت IEC-61850 شکل می‌گیرد. ورودی دیگری که بر روی این عامل‌ها تعریف می‌شود، متغیر Self.stat است که تعیین کننده‌ی وضعیت سلامت عملکرد یک عامل در شبکه است. این متغیر به صورت صفر و یک مقدار دهی می‌شود. برای یک عامل رله، دو گروهی منطقی XCBR و PTOC تعریف می‌شود. گروهی

منطقی XCBR وظیفه‌ی کنترل عملکرد کلید قدرت را بر عهده دارد. این گروه شامل دو مشخصه‌ی Blk.Opn و Pos.stVal است که به منظور جلوگیری از عملکرد کلید قدرت عامل همسایه از مشخصه‌ی Blk.Opn استفاده شده و Pos.stVal مشخص کننده‌ی وضعیت کلید قدرت تحت فرمان رله است. دیگر گروهی منطقی، PTOC بوده که به کنترل عملکرد حفاظت جریان زیاد مربوط می‌گردد. این گروه یک مشخصه‌ی با عنوان Op.general داشته که وظیفه دارد تا با توجه به تنظیمات رله در لحظه خطا عمل نماید [۳۰]. برای یک عامل تولید پراکنده گروه منطقی XCBR وظیفه دارد تا در هر لحظه وضعیت اتصال و یا عدم اتصال منبع به شبکه را بررسی کرده و گزارش دهد. پروتکل GOOSE وظیفه انتقال سیگنال‌های عملکردی کلید قدرت در شبکه را داشته که مدت در نظر گرفته شده برای آن در زمانی کمتر از ۴ میلی ثانیه است [۱۶]. علاوه بر این در این استاندارد اطلاعات مربوط به داده‌های جریانی بر روی پروتکل SMV بر روی لایه‌های مختلف به اشتراک گذاشته می‌شود، بصورتی که عامل‌های رله در صورت مشاهده تغییر بر روی خود اطلاعات لازم را برای سطوح بالاتر ارسال می‌کنند. مدت زمان ارسال اطلاعات بر روی این پروتکل زمانی کمتر از ۲۰۸ میکروثانیه است.

### ۳-۳- معرفی مدل حفاظتی سلسله مراتبی

با مشخص شدن مدل سیستم چندعاملی، در این بخش به معرفی ساختار حفاظتی پیشنهادی پرداخته می‌شود. طرح پیشنهادی با توجه به نوع عملکرد عامل‌های رله در زمان وقوع تغییرات شبکه به سه سطح طبقه‌بندی می‌شود. در این طرح ساختار حفاظتی به گونه‌ای است که سطوح بالاتر وظیفه اصلاح عملکرد سطوح پایین‌تر را بر عهده خواهند داشت. شکل (۷) ساختار حفاظتی پیشنهادی را نشان می‌دهد که در ادامه توضیح داده می‌شود:



شکل (۷): مدل حفاظتی سلسله مراتبی پیشنهادی

الف- سطح حفاظتی اول: با توجه به اینکه اولویت عملکرد یک سیستم حفاظتی بر طرف کردن خطا در کوتاه‌ترین زمان ممکن است، این سطح سعی دارد تا با استفاده از دو حالت عملکردی، به کمک عامل‌های رله بتواند خطا را برطرف سازد. حالت عملکردی اول بر

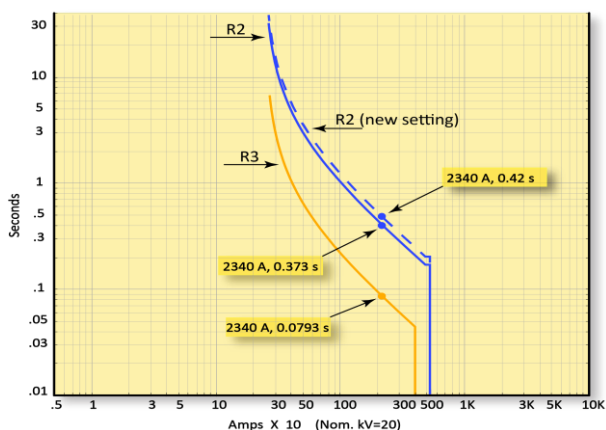
را برای رله‌ی پشتیبان ارسال می‌نماید، تا این رله را از وضعیت عدم عملکرد خود در زمان وقوع خطا با خبر سازد. رله‌ی پشتیبان در هر دو وضعیت پیش آمده، بدون در نظر داشتن تابع تنظیمات حفاظتی به صورت فوری عمل می‌نماید. حالت عملکردی سطح حفاظتی اول به منظور رفع فوری خطا است. حال با توجه به اینکه در این شرایط ممکن است تا در اثر وقوع تغییراتی در شبکه مثل اتصال منابع تولید پراکنده و یا تغییر سطح ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر به علت تغییر شرایط آب و هوایی عملکرد سیستم حفاظتی تحت تاثیر قرار گیرد، لازم است نحوه‌ی عملکرد رله‌های حفاظت شبکه مشخص گردند. در صورتی که هماهنگی حفاظتی برقرار باشد، رله‌ها با توجه به مشخصه عملکردیشان خطا را در زمان مناسب برطرف می‌سازند. در شرایطی که هماهنگی حفاظتی در زمان وقوع خطا از دست رفته باشد و فرصت کافی برای بروزرسانی تنظیمات حفاظتی نیز وجود نداشته باشد، عاملها با استفاده از گره‌های منطقی تعریف شده بر روی آنها می‌توانند هماهنگی حفاظتی را با استفاده از بستر مخابراتی فراهم آورند. فلوجارت طرح حفاظتی سطح اول را در زمان وقوع خطا در شکل (۸) آمده است.

ب- سطح حفاظتی دوم: این سطح که متشکل از واحدهای ناظر بر عملکرد عامل‌های لایه‌ی اول سیستم چندعاملی است، وظیفه دارد تا اطلاعات عامل‌های هر دسته را جمع‌آوری نمایند. واحدهای ناظر با توجه به اطلاعات دریافتی از شبکه، آنها را بر روی پایگاه داده ذخیره می‌نمایند. این اطلاعات شامل اطلاعات جریانی رله‌ها و وضعیت اتصال منابع به شبکه است. در صورتی که تغییری در شرایط شبکه مثل اتصال منابع جدید، تغییر ظرفیت ضریب نفوذ منابع و یا رخداد خطا اتفاق بیفتد، این واحدها به دنبال شرایط عملکرد مشابهی که ممکن است بر روی پایگاه داده وجود داشته باشد، خواهند بود. ذخیره‌ی اطلاعات در پایگاه داده و استفاده از آن، این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان بدون نیاز به ارتباط گرفتن با لایه‌ی مخابراتی بالاتر، تنظیمات مناسب را برای عامل‌های رله ارسال نمود. این شرایط کمک خواهد کرد که سرعت دریافت تنظیمات رله‌ها افزایش یافته و دیگر نیازی به قرارگرفتن بار ترافیکی زیاد بر روی واحد نظارت شبکه وجود نداشته باشد. در واقع سطح حفاظتی دوم در هر بار تغییر و یا وقوع خطا بر روی شبکه بدنبال الگوهای مشابه و نزدیک به شرایط بهره‌برداری شبکه در پایگاه داده است.

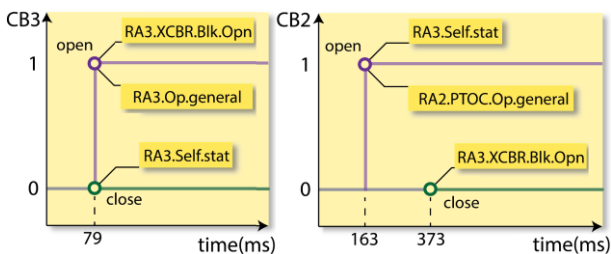
ج- سطح حفاظتی سوم: پس از وقوع رویداد در شبکه که می‌تواند منجر به تغییر شرایط بهره‌برداری شبکه گردد، اطلاعات شبکه توسط واحد نظارت پردازش شده تا با توجه به اطلاعات دریافتی شرایط شبکه و نحوه‌ی ارتباط عامل‌ها با یکدیگر مشخص گردد. سپس محاسبات لازم انجام شده و تنظیمات مناسب مشخص می‌گردند. در ادامه این واحد اطلاعات لازم را در اختیار واحد متناظر با عامل‌های هر بخش قرار خواهد داد. لایه‌ی دوم، با توجه به تصمیم گرفته شده، نحوه‌ی عملکرد در این شرایط را برای اطلاعات ثبت شده متناظر با آن

اساس شیوه عملکرد معمول یک رله بوده که بر اساس نوع تنظیمات، خطا را در زمان مشخص برطرف می‌سازد. در طرح پیشنهادی، این حالت عملکردی زمانی فعال می‌شود که هماهنگی بین رله‌ها برقرار باشد و رله‌ها در حاشیه زمانی مناسب نسبت به هم عمل نمایند. قابل ذکر است که حاشیه زمانی عملکرد رله اصلی و پشتیبان در زمان وقوع خطا مرجع تشخیص این هماهنگی می‌باشد که با توجه به تنظیمات حفاظتی خود که بر اساس محاسبات پخش بار و محاسبات اتصال کوتاه شبکه مشخص می‌گردند، خطا را در زمان مشخصی تشخیص می‌دهند. در این شرایط بدون برقراری ارتباط با لایه‌ی بالاتر، هماهنگی در لایه‌ی اول مخابراتی بررسی شده و این سطح حفاظتی خطا را به کمک عامل‌های رله برطرف می‌سازد. عامل‌های رله برای اینکه بتوانند عملکرد مناسبی داشته باشند در ابتدا تنظیمات و اطلاعات سایر عامل‌های رله را در شرایط قبل از وقوع خطا در شبکه دریافت می‌نمایند. با توجه به داشتن اطلاعات رله‌های حفاظتی زمان عملکرد آنها را در شرایط خطا محاسبه می‌کنند. عامل‌های رله با داشتن این اطلاعات می‌توانند وضعیت هماهنگی را بررسی نمایند. با توجه به اینکه در حضور منابع تولید پراکنده مقدار جریان خطای عبوری از رله‌ی اصلی افزایش می‌یابد، بنابراین عامل رله‌ی پشتیبان در نظر خواهد داشت که عملکرد رله اصلی در زمانی سریعتر از شرایط قبل از اتصال منبع تولید پراکنده صورت می‌پذیرد. بنابراین عامل رله‌ی پشتیبان با مقایسه جریان عبوری از خود و زمان عملکرد متناسب با آن می‌تواند شرایط هماهنگی را با توجه به تنظیمات خود، مشخص نماید. در صورتی که حاشیه هماهنگی استاندارد برقرار باشد دو رله هماهنگ بوده و مشخصه Op.general فعال می‌گردد، در غیر اینصورت لازم است تا دو رله عملکرد خود را در این وضعیت تغییر دهند. در صورتی که هماهنگی بین رله‌ی اصلی و رله‌ی پشتیبان نقض شده باشد و فرصت کافی برای بروزرسانی تنظیمات وجود نداشته باشد، لازم است تا با استفاده از توابع عملکردی گره منطقی XCBR مشکل سیستم حفاظتی برطرف شود. در این شرایط عامل‌های رله با استفاده از ارسال پیام‌های وضعیت GOOSE بروی شبکه مانع از عملکرد عامل‌های پشتیبان خود در شبکه می‌شوند. در این شرایط گره منطقی XCBR وظیفه‌ی مدیریت عملکرد کلید قدرت را بر عهده دارد و قادر است تا با ارسال سیگنال XCBR.Blk.Opn مانع از عملکرد عامل‌های پشتیبان بر روی شبکه گردد. در صورتی که به هر علت عامل رله‌ی اصلی موفق به قطع کلید نگردد، این بار ضروری است تا عامل رله‌ی پشتیبان در زمان خیلی کوتاهی جایگزین آن شود. این شرایط در دو حالت اتفاق می‌افتد. زمانی که وضعیت سلامت عملکرد عامل رله که از متغیر Self.stat خوانده می‌شود، رخداد مشکل را نمایش دهد، لازم است تا رله‌ی اصلی با ارسال مقدار تغییر یافته این متغیر به رله‌ی پشتیبان، آن را از شرایط عملکرد فوری با خبر سازد. در حالتی دیگر اگر مشکل عدم عملکرد درست کلید قدرت رله‌ی اصلی باشد، این رله با مشاهده وضعیت کلید خود توسط بخش XCBR.Pos.stVal مقدار این متغیر

داده خود الگوی مشابه با شرایط پیش آمده را جستجو می کند، در حالی که سطح سوم تنظیمات جدید را با توجه به وضعیت شبکه محاسبه می کند. با توجه به جدول (۲) مشخص است که سطح حفاظتی دوم چه اطلاعاتی را ذخیره کرده است. این سطح با توجه به اطلاعات که از شبکه دریافت می کند، وضعیت عامل های تولید پراکنده را مشخص کرده و متناسب با آن اطلاعات مربوط به جریان عامل های رله و تنظیمات مورد نیاز آنها در این شرایط را بر روی پایگاه داده ذخیره می کند. فرض کنیم در حالت اول همه منابع تولید پراکنده به شبکه متصل شده و وضعیت حضور خود در شبکه را به سایر عامل ها اطلاع می دهند. در صورتی که در این هنگام خطایی بر روی گره شماره ۵ در شبکه اتفاق بیفتد، در ابتدا وضعیت هماهنگی میان عامل های RA3 و RA2 بررسی می گردد. در این شرایط با توجه به اینکه هماهنگی بین این دو رله کمتر از ۳۰۰ میلی ثانیه گشته، لازم است تا طرح حفاظتی سطح اول اجرایی گردد. شکل (۱۱) وضعیت عملکرد رله ها را برای این خطا نمایش می دهد. با توجه به افزایش جریان هر دو رله ممکن است تا زمان کافی برای بروزرسانی تنظیمات حفاظتی وجود نداشته باشد.

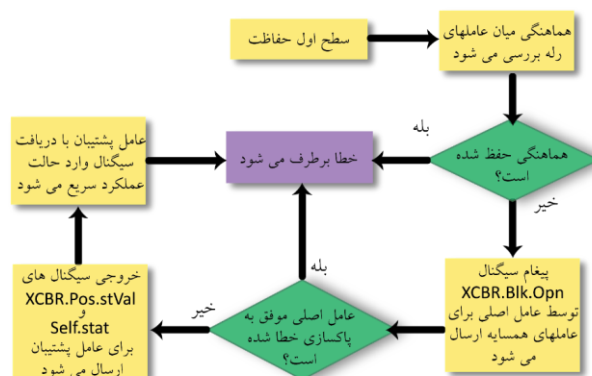


شکل (۱۱): وضعیت عملکرد حفاظت در زمان وقوع خطا بر روی گره ۵

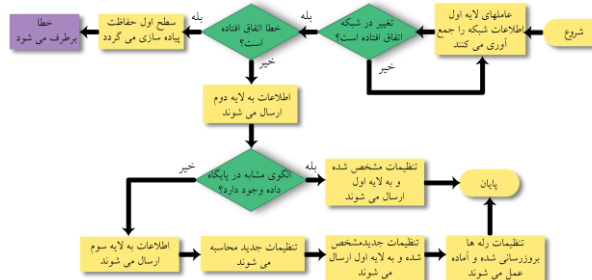


شکل (۱۲): بررسی سطح حفاظت اول در زمان وقوع خطا در گره ۵

پایگاه داده ذخیره می کند. در ادامه اطلاعات برای عامل های لایه اول ارسال شده سپس با توجه به فرمان صادر شده، نحوه عملکرد عامل ها در شرایط جدید بر روی آنها بارگذاری می گردد. در این سطح حفاظتی با توجه به اینکه ممکن است فرآیند انجام محاسبات زمان بر باشد، لازم است تا فرآیند رفع خطا توسط سطح اول انجام گرفته و بعد از آن تنظیمات توسط این سطح محاسبه و بر روی عامل ها بارگذاری گردند. شکل (۹) نحوه عملکرد طرح حفاظتی سلسله مراتبی را نشان می دهد.



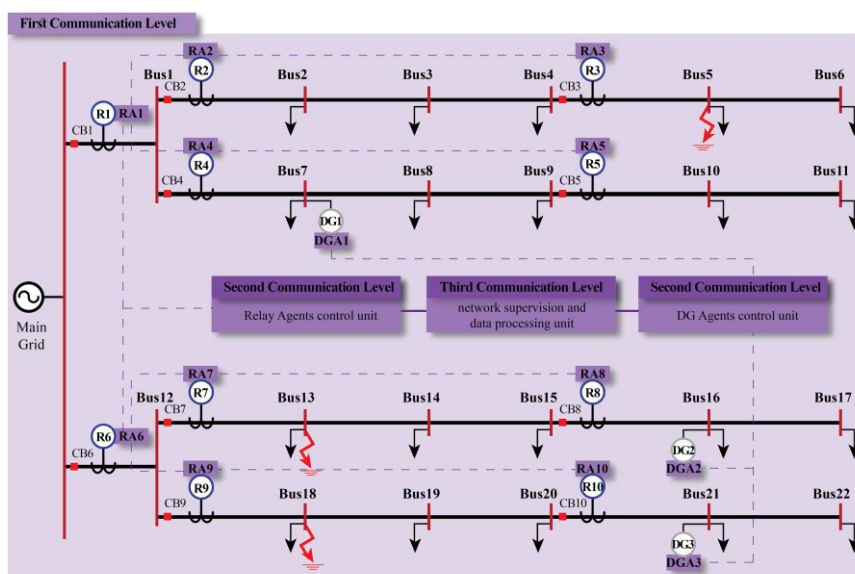
شکل (۸): عملکرد سطح حفاظتی اول روش پیشنهادی



شکل (۹): نحوه عملکرد طرح حفاظت سلسله مراتبی پیشنهادی

## ۴- نتایج شبیه سازی

شبکه تست مورد مطالعه در بخش دوم، با پیاده سازی ساختار سیستم چندعاملی به صورت شکل (۱۰) به نمایش در می آید. در جدول های (۲) و (۳) اطلاعات ذخیره شده در پایگاه داده سطح حفاظتی دوم آمده است. عامل های رله متناسب با شرایط شبکه، علاوه بر تنظیمات خود، اطلاعات مربوط به سایر عامل ها را نیز از این سطح دریافت می نمایند. برای مثال با توجه به ساختار چندعاملی پیشنهادی، جدول (۴) نحوه ارتباط بین عامل های رله را نشان می دهد. این جدول شامل اطلاعاتی مثل عامل های قرار گرفته در همسایگی هر عامل و همچنین تنظیمات حفاظتی که توسط سطح حفاظتی دوم بر روی آنها قرار گرفته، است. عامل ها به کمک در اختیار داشتن تنظیمات حفاظتی یکدیگر قادرند تا شرایط هماهنگی را بررسی نموده و در صورت برهم خوردن آن یکی از سطوح حفاظتی را پیاده سازی نمایند. در صورتی که خطا توسط سطح اول برطرف گردد، سطح حفاظتی دوم و سوم اقدام به بروزرسانی تنظیمات حفاظتی می نمایند. در این حالت سطح دوم به کمک پایگاه



شکل (۱۰): پیاده‌سازی حفاظت سلسله‌مراتبی در شبکه تست

جدول (۲): اطلاعات ذخیره شده در سطح حفاظتی دوم (فیدر یک)

DG Num.	status	Relyay status (Feeder 1)				
		RA1	RA2	RA3	RA4	RA5
DGA1	D.	I <sub>f</sub> : 5950	I <sub>f</sub> : 3850	I <sub>f</sub> : 2140	I <sub>f</sub> : 3540	I <sub>f</sub> : 1620
DGA2	D.	TMS:0.49	TMS:0.23	TMS:0.05	TMS:0.23	TMS:0.05
DGA3	D.	I <sub>p</sub> :282	I <sub>p</sub> :242	I <sub>p</sub> :246	I <sub>p</sub> :200	I <sub>p</sub> :209
		Type:VI	Type:VI	Type:VI	Type:VI	Type:VI
DGA1	C.	I <sub>f</sub> : 5950	I <sub>f</sub> : 4440	I <sub>f</sub> : 2312	I <sub>f</sub> : 3540	I <sub>f</sub> : 1900
DGA2	D.	TMS:0.47	TMS:0.26	TMS:0.05	TMS:0.19	TMS:0.05
DGA3	D.	I <sub>p</sub> :282	I <sub>p</sub> :242	I <sub>p</sub> :246	I <sub>p</sub> :200	I <sub>p</sub> :209
		Type:VI	Type:VI	Type:VI	Type:VI	Type:VI

جدول (۳): اطلاعات ذخیره شده در سطح حفاظتی دوم (فیدر دو)

DG Num.	status	Relyay status (Feeder 2)				
		RA6	RA7	RA8	RA9	RA10
DGA1	D.	I <sub>f</sub> : 4680	I <sub>f</sub> : 4230	I <sub>f</sub> : 2510	I <sub>f</sub> : 3045	I <sub>f</sub> : 1480
DGA2	D.	TMS:0.24	TMS:0.24	TMS:0.05	TMS:0.27	TMS:0.07
DGA3	D.	I <sub>p</sub> :237	I <sub>p</sub> :275	I <sub>p</sub> :280	I <sub>p</sub> :191	I <sub>p</sub> :196
		Type:I	Type:VI	Type:VI	Type:VI	Type:VI
DGA1	C.	I <sub>f</sub> : 4850	I <sub>f</sub> : 4368	I <sub>f</sub> : 2560	I <sub>f</sub> : 3115	I <sub>f</sub> : 1497
DGA2	D.	TMS:0.24	TMS:0.24	TMS:0.05	TMS:0.27	TMS:0.07
DGA3	D.	I <sub>p</sub> :237	I <sub>p</sub> :275	I <sub>p</sub> :280	I <sub>p</sub> :191	I <sub>p</sub> :196
		Type:I	Type:VI	Type:VI	Type:VI	Type:VI

پشتیبان این رله در زمان ۱۶۳ میلی ثانیه عمل خواهد کرد. از شکل مشخص است که رله‌ی پشتیبان در زمان ۳۷۳ میلی ثانیه عملکردی نخواهد داشت. پس از رفع شدن خطا، حال زمان آن می‌رسد که سطح حفاظت دوم و سوم جهت بروزرسانی تنظیمات حفاظتی رله‌ها وارد عمل شوند.

جدول (۴): اطلاعات مربوط به عامل‌های رله در شبکه

Agent name	Neighbors	Group Settings
RA1	RA2	R2_GS
	RA4	R4_GS
RA2	RA1	R1_GS
	RA3	R3_GS
RA3	RA2	R2_GS
	RA5	R5_GS
RA4	RA5	R5_GS
	RA1	R1_GS
RA5	RA3	R3_GS

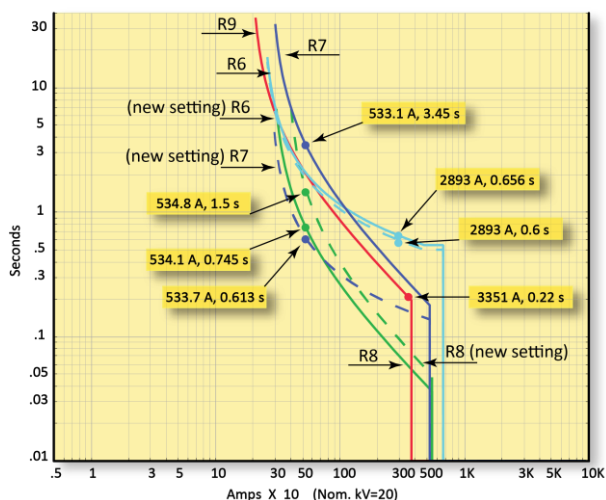
سطح حفاظتی اول از ارتباط مخابراتی بین عامل‌های رله برای جلوگیری از عملکرد اشتباه رله‌ی پشتیبان استفاده می‌نماید. در این شرایط عامل رله‌ی RA3 با ارسال سیگنال XCBR.Blk.Opn برای عامل رله‌ی RA2 همزمان با لحظه تشخیص خطا، مانع از عملکرد اشتباه این رله می‌گردد. در صورتی که به علت ایجاد مشکل، رله‌ی اصلی موفق به رفع خطا نگردد، با ارسال سیگنال مشخص کننده وضعیت Self.stat به عامل رله‌ی RA2 شرایط عملکرد فوری را به آن اطلاع می‌دهد. شکل (۱۲) وضعیت عملکرد این طرح حفاظتی را بررسی می‌نماید. مدت زمان عملکرد کلید قدرت ۸۰ میلی ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که رله‌ی اصلی موفق به قطع کلید نگردد، با تاخیر زمانی ۴ میلی ثانیه برای ارسال سیگنال قطع برای رله

موقع RA9، عامل رلهی RA8 به اشتباه زودتر از RA7 عمل خواهد نمود.

	RA4	R4_GS
RA6	RA9 RA7	R9_GS R7_GS
RA7	RA8 RA6	R8_GS R6_GS
RA8	RA10 RA7	R10_GS R7_GS
RA9	RA6 RA10	R6_GS R10_GS
RA10	RA9 RA8	R9_GS R8_GS

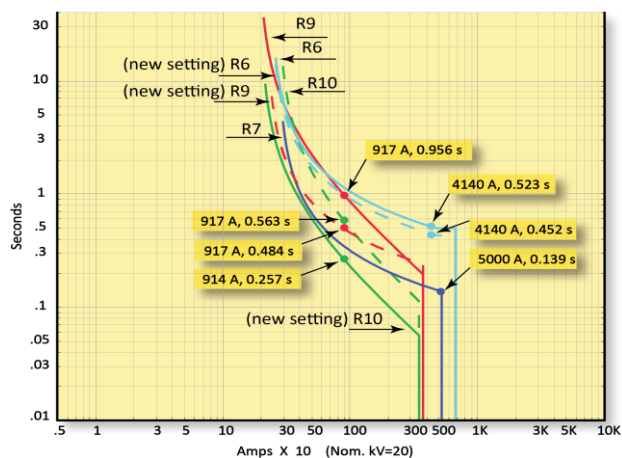
شکل (۱۳) عملکرد حفاظتی این رله ها را نشان می دهد. بر اساس طرح پیشنهادی در ابتدا هماهنگی بین عامل های رله در سطح اول بررسی می گردد. با توجه به اینکه هماهنگی بین عامل ها از دست رفته است، در ابتدا عامل رلهی RA9 که نزدیک ترین عامل به نقطه ی خطا می باشد، خطا را تشخیص داده و با ارسال سیگنال XCBR.Blk.Opn به عامل های همسایه مانع از عملکرد آنها می شود. در این حالت این عامل با ارسال سیگنال PTOC.Op.general خطای ناحیه خود را در زمان ۲۲۰ میلی ثانیه برطرف می سازد. در صورتی که به علت وجود نقص در عملکرد کلید قدرت متصل به این رله خطا در شبکه رفع نگردد، در این حالت عامل رلهی RA9 با بررسی مقدار وضعیت کلید در XCBR.Pos.stVal مقدار آن را برای عامل های همسایه ارسال کرده و آنها را در شرایط عملکرد فوری قرار می دهد. عامل های رلهی RA6 و رلهی RA7 با دریافت این سیگنال متوجه عدم عملکرد رله اصلی شده و خطا را در زمان ۳۰۴ میلی ثانیه برطرف می سازند. شکل (۱۴) وضعیت عملکرد کلیدهای شبکه را نشان می دهد. پس از رفع خطا، لازم است تا تنظیمات حفاظتی شبکه بروزرسانی شوند. در ابتدا در سطح دوم، وجود حالت مشابه با شرایط پیش آمده بررسی می شود، با توجه به جدول (۲) مشخص است که حالت مشابهی برای این مقدار جریان وجود نداشته و لازم است تا تنظیمات جدید در سطح سوم محاسبه شوند. بر این اساس در این شرایط اطلاعات در لایه ی سوم پردازش شده و تنظیمات جدید شبکه محاسبه می شوند. در نهایت نیز تنظیمات جدید برای عامل های سطح اول ارسال می گردند. در شکل (۱۳) تنظیمات جدید قرار گرفته بر روی رله ها با خط چین مشخص شده است.

در این شرایط عامل ها که در زمان پیاده سازی سطح حفاظت اول اطلاعات را برای لایه ی مخابراتی دوم ارسال کرده بودند، به انتظار دریافت تنظیمات جدید می مانند. سطح حفاظت دوم در ابتدا به دنبال یافتن الگوی مشابه با تغییرات پیش آمده در پایگاه داده است. با توجه به مقدار جریان عبوری از رلهی R3 در زمان وقوع خطا، سطح دوم به دنبال تنظیماتی نزدیک به این جریان خطا می گردد. در این شرایط با توجه به اینکه جریان عبوری از رله R3 برابر ۲۳۴۰ آمپر است، دسته تنظیماتی برای این شرایط در زمان حضور منبع تولید پراکنده DG1 بر اساس اطلاعاتی که از عامل آن یعنی DGA1 به دست آمده در پایگاه داده ثبت شده است. با توجه به جدول (۲)، دسته تنظیمات مناسب برای عامل رله RA2 ارسال شده است. در شکل (۱۱) منحنی که با علامت خط چین مشخص شده است، تنظیمات رله R2 در شرایط جدید را نشان می دهد. در شرایط دیگر این بار منابع DG1 و DG3 از شبکه جدا شده و تنها منبع تولید پراکنده DG2 به شبکه متصل می ماند. در صورتی که خطایی بر روی گره ۱۸ اتفاق بیفتد، لازم است تا وضعیت عملکرد سیستم حفاظتی بررسی شود. پس از جدا شدن منابع تولید پراکنده، اطلاعات مربوط به وضعیت کلید این دو منبع به شبکه را مشخص می نماید. با وقوع خطا در این شرایط جریان خطا از دو سمت تغذیه می شود، به همین علت در زمان وقوع خطا بر روی گره شماره ۱۸ علاوه بر بررسی هماهنگی بین عامل های رلهی RA6 و رلهی RA9 لازم است تا عامل رلهی RA7 نیز به علت مشاهده جریان خطای برگشتی هماهنگی خود را با عامل رلهی RA9 حفظ نماید. در ابتدا وضعیت هماهنگی بین دو عامل رلهی RA6 و رلهی RA9 بررسی می شود. زمان عملکرد عامل رلهی RA9 که به عنوان حفاظت اصلی عمل می نماید، برای جریان خطای عبوری ۳۳۵۰ آمپر، برابر ۲۲۰ میلی ثانیه بوده و حفاظت پشتیبان آن جریان خطای ۲۸۹۰ آمپر را در زمان ۶۵۵ میلی ثانیه رفع می نماید. در این حالت مشخص است که حاشیه هماهنگی میان این دو عامل در محدوده ی مجاز قرار نگرفته است. جریان برگشتی که به نقطه ی خطا توسط منبع تولید پراکنده DG2 تزریق می شود، برابر ۵۳۳ آمپر است. در این زمان با توجه به اینکه جریان خطا توسط عامل های رلهی RA8 و رلهی RA7 مشاهده می شود، عملکردشان بصورتی است که عامل رلهی RA8 این خطا را در زمان ۷۴۶ میلی ثانیه و عامل رلهی RA7 در زمانی در حدود ۳ ثانیه آن را تشخیص می دهند. مشخص است که در صورت عدم عملکرد به

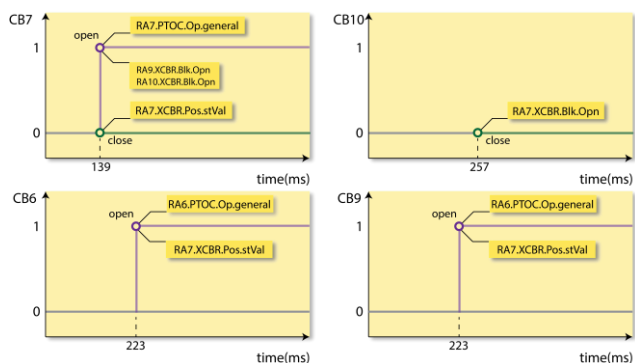


شکل (۱۳): عملکرد حفاظت در زمان وقوع خطا در گره ۱۸

توجه به جریان خطای شبکه، نمونه مشابهی بر روی پایگاه داده وجود نداشته و لازم است تا تنظیمات حفاظتی محاسبه شوند. در شکل (۱۵) تنظیمات جدید قرار گرفته بر روی رله‌ها با خط چین مشخص شده است.



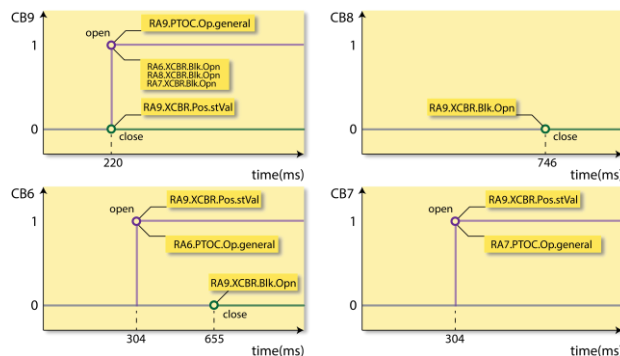
شکل (۱۵): وضعیت عملکرد سیستم حفاظتی در زمان وقوع خطا در گره ۱۳



شکل (۱۶): بررسی عملکرد سطح حفاظت اول در زمان وقوع خطا در گره ۱۳

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله طرح حفاظتی برای رفع مشکل هماهنگی بین رله‌های اضافه جریان در حضور منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع بررسی شد. طرح حفاظتی پیشنهادی که با استفاده از تجهیزات هوشمند بر روی ساختار عملکرد سیستم چندعاملی طراحی شده، از سه سطح حفاظتی تشکیل گردیده است. سطح اول به منظور بررسی شرایط هماهنگی و رفع خطا عمل کرده و دو سطح بالاتر برای تغییر تنظیمات حفاظتی شبکه عمل می‌نمایند. در هنگام وقوع خطا، در صورتی که هماهنگی حفاظتی دچار مشکل شود، در ابتدا خطا در زمان مناسب توسط سطح حفاظتی اول به کمک عامل‌های رله رفع شده و سپس اصلاح تنظیمات حفاظتی توسط سطح دوم و سوم صورت می‌گیرد. سطح دوم به کمک استفاده از داده‌های از پیش ذخیره شده در پایگاه داده، به دنبال تنظیمات مشابه با شرایط شبکه می‌گردد. در صورت موفقیت آمیز نبودن این سطح، درخواست محاسبه تنظیمات جدید به



شکل (۱۴): عملکرد سطح اول در زمان وقوع خطا در گره ۱۸

در شرایط بعدی به بررسی خطا بر روی گره ۱۳ می‌پردازیم. در صورتی که DG2 از شبکه جدا شده و DG3 به شبکه متصل گردد، به کمک اطلاعات ارسال شده، سطح حفاظت دوم از وضعیت قرار گیری منابع آگاه می‌گردد. در صورت وقوع خطا بر روی گره ۱۳، جریان عبوری مشاهده شده توسط عامل رله RA7 برابر ۵۰۰۰ آمپر می‌باشد که این رله این جریان را در مدت زمان ۱۳۹ میلی ثانیه برطرف می‌سازد. در صورت عدم عملکرد این حفاظت، لازم است تا حفاظت‌هایی که جریان خطا بر روی خود مشاهده می‌کنند در زمان مناسب عمل نمایند. در این وضعیت، دو عامل RA9 و RA10 جریان خطای برگشتی ایجاد شده توسط DG3 را بر روی خود مشاهده می‌کنند و از طرفی عامل RA6 نیز جریان خطای تزریقی از شبکه اصلی را بر روی خود دارد. شکل (۱۵) وضعیت عملکرد سیستم حفاظتی را در این شرایط نمایش می‌دهد. با توجه به شکل، جریان عبوری از عامل RA6 در هنگام وقوع خطا برابر ۴۱۴۰ آمپر بوده و این رله در زمان ۵۲۳ میلی ثانیه خطا را تشخیص خواهد داد. برای دو عامل RA9 و RA10 جریان خطایی مشاهده شده برابر ۹۱۷ آمپر بوده که به ترتیب در زمان های ۹۵۶ و ۲۵۷ میلی ثانیه خطا را برطرف می‌سازند.

با توجه به طرح پیشنهادی، در ابتدا هماهنگی میان عامل‌ها بررسی می‌شود. عامل‌های RA6 و RA7 با توجه به زمان عملکردشان هماهنگی خود را حفظ کرده‌اند، اما هماهنگی بین عامل‌های RA9 و RA10 به عنوان حفاظت پشتیبان از دست رفته است. عامل RA7 با توجه به نزدیکی به نقطه خطا، سیگنال عملکرد PTOC.Op.general را ارسال کرده و خطا را در زمان ۱۳۹ میلی ثانیه برطرف می‌سازد. در همین زمان با ارسال سیگنال XCBR.Blk.Opn مانع از عملکرد عامل‌های همسایه می‌شود. در صورتی که این رله بدلیل مشکل در عملکرد کلید موفق به قطع بموقع نگردد، لازم است تا حفاظت‌های پشتیبان خطا را برطرف نمایند. در این زمان عامل RA7 با ارسال مقدار XCBR.Pos.stVal به عامل‌های همسایه، آنها را از عدم عملکرد کلید خود آگاه کرده و در شرایط عملکرد فوری قرار می‌دهد.

شکل (۱۶) وضعیت عملکرد کلیدها را در این شرایط نشان می‌دهد. پس از برطرف شدن خطا توسط سطح حفاظتی اول، لازم است تا تنظیمات حفاظتی مناسب بر روی عامل‌های رله بارگذاری گردد. با

- and Energy Technology Systems Journal, Vol. 3, No. 4, pp. 155-165, 2016.
- [11] H.B. Funmilayo, K.L. Buyler-Purry, "An approach to mitigate the impact of distributed generation on the overcurrent protection scheme for radial feeders", IEEE/PES, pp. 1-11, Seattle, WA, USA, March 2009.
  - [12] D. Uthitsunthorn, T. Kulworawanichpong, "Distance protection of a renewable energy plant in electric power distribution systems", IEEE/ POWERCON, pp. 1-4, Hangzhou, China, Oct. 2010.
  - [13] A. Hooshyar, R. Irvani, "A new directional element for microgrid protection", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 6, pp. 6862-6876, 2018.
  - [14] S.B. Naderi, M. Negnevitsky, A. Jalilian, M. Hagh, K. Muttaqi, "Optimum resistive type fault current limiter: an efficient solution to achieve maximum fault ride-through capability of fixed speed wind turbines during symmetrical and asymmetrical grid faults", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 53, no. 1, pp. 538-548, 2017.
  - [15] S. Lim, J. Kim, M. Kim, J. Kim, "Improvement of protection coordination of protective devices through application of a sfcl in a power distribution system with a dispersed Generation", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3, 2012.
  - [16] E. Ebrahimi, M.J. Sanjari, G.B. Gharehpetian, "Control of three-phase inverter-based DG system during fault condition without changing protection coordination", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 63, pp.814-823, 2014.
  - [17] M.N. Alam, "Adaptive protection coordination scheme using numerical directional overcurrent relays", IEEE Trans. on Ind. Info., Vol. 15, No. 1, pp. 64-73, 2019.
  - [18] M.Y. Shih, A. Conde, Z. Leonowicz, L. Martirano, "An adaptive overcurrent coordination scheme to improve relay sensitivity and overcome drawbacks due to distributed generation in smart grids", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 53, No. 6, pp. 5217-5228, Nov.-Dec. 2017.
  - [19] H.M. Sharaf, H.H. Zeineldin, E. El-Saadany "Protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capabilities using communication assisted dual setting directional overcurrent relays", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 9, No. 1, pp.143-151, 2018.
  - [20] [16] Z. Liu, C. Su, H. K. Hoidalén, Z. Chen, "A multiagent system-based protection and control scheme for distribution system with distributed-generation integration", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 32, no. 1, pp. 536-545, 2017.
  - [21] "IEC standard for single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time", IEC standard 60255, 2009.
  - [22] IEEE recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems (IEEE bu# book). IEEE Std. 242-2001 (Revision of IEEE Std 242-1986) [IEEE Bu# Book] 2001, pp. 1-710.
  - [23] "IEC standard for short-circuit currents in three-phase a.c. systems", IEC Standard 60909, 2003.
  - [24] H.F. Habib, T. Youssef, M.H. Cintuglu, O.A. Mohammed "Multi-agent-based technique for fault location, isolation, and service restoration", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 53, No. 3, pp. 1841-1851, 2017.
  - [25] I.S. Baxevas, D.P. Labridis, "Implementing multiagent systems technology for power distribution network control and protection management", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, pp. 433-443, 2007.

سطح سوم ارسال شده تا واحد نظارت و پردازش اطلاعات، تنظیمات جدید را محاسبه و به سطح اول بازگرداند. طرح پیشنهادی بر خلاف ساختار سیستم چند عاملی معمول، قادر است تا در ابتدا طرح حفاظتی را مستقل از واحد پردازش مرکزی اجرا نماید. این عملکرد که به کمک استفاده از خصوصیات و گره‌های منطقی تعریف شده در استاندارد IEC-61850 بر روی رله‌ها پیاده‌سازی می‌شود، زمان عملکرد طرح حفاظتی را کاهش می‌دهد. همچنین روش پیشنهادی این مقاله به کمک ثبت اطلاعات شبکه در هر بار تغییر و یا وقوع خطا بر روی شبکه قادر است سرعت دریافت تنظیمات رله‌ها را نیز افزایش دهد. این موضوع کمک می‌کند تا طرح حفاظتی پیشنهادی بتواند در زمان وقوع خطا تصمیم‌گیری سریع‌تری نماید.

## مراجع

- [۱] طاهر سید عباس، شاهقلیان اکرم، "جایابی بهینه منابع تولید پراکنده به همراه SSVR در شبکه‌های توزیع با استفاده از الگوریتم تکاملی ایمنی"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال: ۱۱، ش: ۱، ص: ۱۹-۲۸، ۱۳۹۳.
- [۲] بیشه هادی، معظمی مجید، فانی بهادر، شاهقلیان غضنفر، "یک روش آنلاین کنترل هوشمند تنظیمات حفاظتی ریزشبکه با ضریب نفوذ بالای تولیدات پراکنده"، هوش محاسباتی در مهندسی برق، سال: ۱۰، ش: ۴، ص: ۹۰-۷۱، زمستان ۱۳۹۸.
- [3] P.T. Manditereza, R. Bansal, "Renewable distributed generation: The hidden challenges- A review from the protection perspective", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 58, pp. 1457-1465, 2016.
- [۴] افراسیابی مرتضی، رک‌رک اسماعیل، "یک طرح کنترلی هماهنگ جهت بهبود کیفیت ولتاژ توسط اینورتر واسط منابع تولید پراکنده"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال: ۱۶، ش: ۱، ص: ۵۱-۶۲، ۱۳۹۸.
- [5] H. Karimi, G. Shahgholian, B. Fani, I. Sadeghkhani, M. Moazzami, "A protection strategy for inverter interfaced islanded microgrids with looped configuration", Electrical Engineering, Vol. 101, No. 3, pp. 1059-1073, Sep. 2019.
- [6] S. Chaitusaney, A. Yokoyama, "Prevention of reliability degradation from recloser- Fuse miscoordination due to distributed generation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, pp. 2545-2554, 2008.
- [7] U. Akram, M. Khalid, S. Shafiq, "Optimal sizing of a wind/solar/battery hybrid grid-connected microgrid system", IET Renewable Power Generation, Vol. 12, No. 1, pp. 72-80, 2018.
- [8] H. Zhan, C. Wang, Y. Wang, X. Yang, X. Zhang, C. Wu, Y. Chen, "Relay protection coordination integrated optimal placement and sizing of distributed generation sources in distribution networks", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 7, No. 1, pp. 55-65, 2016.
- [9] K.O. Oureilidis, C.S. Demoulias, "A fault clearing method in converter-dominated microgrids with conventional protection means", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 31, No. 6, pp. 4628-4640, 2016.
- [10] R.K. Varma, S.A. Rahman, V. Atodaria, S. Mohan, T. Vanderheide, "Technique for fast detection of short circuit current in PV distributed generator", IEEE Power

- [26] H. Wan, K.K. Li, K.P. Wong, "An adaptive multiagent approach to protection relay coordination with distributed generators in industrial power distribution system", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 46, No. 5, pp. 2118-2124, 2010.
- [27] A. Apostolov, "Multi-agent systems and IEC 61850", IEEE/PES, pp. 1-6, Montreal, Que., Canada, June 2006.
- [28] D. Pala, C. Tornelli, G. Proserpio, "An adaptive, agent-based protection scheme for radial distribution networks based on IEC 61850 and IEC 61499", IEEE/CIRED, pp.1-4, Lisbon, Portugal, May 2012.
- [29] E. Abbaspour, B. Fani, E. Heydarian-Forushani, "A bi-level multi agent based protection scheme for distribution networks with distributed generation", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 112, pp. 209-220, 2019.
- [30] M.H. Cintuglu, T. Ma, O.A. Mohammed, "Protection of autonomous microgrids using agent-based distributed communication", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 32, no. 1, pp. 351-360, 2017.

