

## طرح هماهنگی حفاظتی تطبیقی برای ریز شبکه‌های حلقوی دارای منابع انرژی تجدید پذیر با در نظر گرفتن N-1 Contingency

عبدالرضا قلی پور<sup>۱</sup>، مهدی اخباری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری برق قدرت، دانشگاه شاهد، شرکت توزیع نیروی برق تهران بزرگ، تهران

arezagholipour@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران

akhbari@shahed.ac.ir

### چکیده

ریز شبکه‌ها می‌توانند با کارکرد در حالت جزیره ای و متصل به شبکه، تاثیر بسزایی در بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان داشته باشند. با توجه به حضور مولدهای از نوع انرژی‌های تجدید پذیر در ریز شبکه، حفاظت این شبکه‌ها پیچیده‌تر از شبکه‌های توزیع دارای مولدهای سنکرون بوده و می‌بایست اثرات مولدهای تجدید پذیر که اغلب توسط اینورتر به شبکه متصل می‌شوند در موضوع حفاظت به دقت مورد بررسی و تحقیق قرار گیرد، چرا که مشارکت مولدهای غیر سنکرون در تزریق جریان اتصال کوتاه به سمت نقطه خطا بسیار کمتر بوده و تشخیص جریان خطا توسط رله‌ها در این صورت اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. در این مقاله با در نظر گرفتن ورود و خروج مولدها و همچنین ورود و خروج خطوط که سبب تغییر در توپولوژی می‌شوند، مساله هماهنگی حفاظتی تطبیقی در ریز شبکه واقعی حلقوی و استاندارد، مورد بررسی قرار گرفته و روشی جدید با قابلیت اطمینان بالا جهت هماهنگی رله‌ها پیشنهاد می‌گردد. نتایج شبیه سازی‌ها نشان می‌دهد که با روش پیشنهادی بین رله‌های اصلی و پشتیبان در هر آرایش شبکه؛ صرفاً با استفاده از دو گروه تنظیمی، هماهنگی حفاظتی مناسبی حاصل می‌شود. شبیه سازی‌ها با استفاده از نرم افزارهای DigSILENT و GAMS انجام شده است.

### کلمات کلیدی

ریز شبکه حلقوی، حفاظت تطبیقی، منابع انرژی تجدید پذیر، هماهنگی حفاظتی، رله اضافه جریان دو تنظیمه، N-1 Contingency

کلاسیک خطی و غیر خطی و یا با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک، PSO<sup>۱</sup> و...؛ در شبکه‌های توزیع کلاسیک و شبکه‌های توزیع فعال، قبلاً مورد بررسی قرار گرفته [۸-۱] و با ظهور ریز شبکه‌ها در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در خصوص هماهنگی حفاظتی ریز شبکه‌ها صورت پذیرفته است. در [۹] با استفاده از رله‌های دیجیتال، هماهنگی حفاظتی تطبیقی برای ریز شبکه‌های فشار ضعیف شعاعی پیشنهاد داده شده، به گونه‌ای که آرایش ریز شبکه در هر حالت تشخیص داده شده و حفاظت موثری در هر آرایش ریز شبکه، توسط رله‌های اضافه جریان دیجیتال صورت می‌گیرد. در [۱۱-۱۰] با استفاده از FCL<sup>۲</sup> و استفاده از رله‌های جریان جهت‌دار حفاظت غیر تطبیقی جهت حفاظت ریز شبکه‌های با ولتاژ فشار متوسط پیشنهاد داده شده است. در [۱۹-۱۲] با استفاده از رله‌هایی با مشخصه غیر استاندارد و یا رله‌های دارای قابلیت

### ۱- مقدمه

به دلیل حضور منابع تولید پراکنده سنکرون و غیر سنکرون در سطح ریز شبکه‌های امروزی، مدیریت این شبکه‌ها از نظر مدیریت و کنترل، حفاظت و قابلیت اطمینان از اهمیت خاصی برخوردار بوده و امروزه مطالعات زیادی در این حوزه‌ها انجام می‌گیرد. مولدهای انرژی تجدید پذیر از نوع بادی و خورشیدی در سال‌های اخیر توسعه شگرفی یافته‌اند، طوریکه ۲۹ درصد انرژی مصرفی در جهان از انرژی‌های تجدید پذیر می‌باشد. با توجه به حضور انواع منابع تولید پراکنده در سطح ریز شبکه، حفاظت این شبکه‌ها پیچیده‌تر از شبکه‌های توزیع دارای مولدهای سنکرون بوده و می‌بایست اثرات این مولدها در موضوع حفاظت به دقت مورد بررسی و پژوهش قرار گیرد. ایجاد هماهنگی حفاظتی با استفاده از روش‌های بهینه سازی

این مقاله با لحاظ نمودن مولدهای تجدیدپذیری که با استفاده از اینورتر به شبکه متصل می‌شوند، مدل دقیق‌تری از ریز شبکه‌های امروزی در بحث حفاظت مورد مطالعه قرار گرفته و ورود و خروج مولدهای تولید پراکنده و همچنین خروج خطوط؛ در موضوع هماهنگی حفاظتی در ریز شبکه‌های حلقوی که نسبت به ریز شبکه‌های شعاعی، نیاز به حفاظت پیچیده‌تری دارند، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مزیت ریز شبکه‌های حلقوی نسبت به ریز شبکه‌های شعاعی این است که به دلیل قابلیت تامین توان دو سویه، با خروج هر یک از خطوط ریز شبکه، جزیره‌ای شدن ناخواسته<sup>۷</sup> یک یا چند DG رخ نمی‌دهد. در مطالعات گذشته بیشتر از حفاظت غیر تطبیقی به دلیل عدم نیاز به سیستم‌های مخابراتی استفاده می‌شد. امروزه به دلیل توسعه و افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های مخابراتی در سطح شرکت‌های توزیع و شبکه‌های قدرت، مطالعات روی حفاظت‌های تطبیقی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۲۴]. چرا که استفاده از طرح‌های حفاظت تطبیقی مستلزم استفاده از بسترهای مخابراتی جهت ارسال فرمان‌های مورد نیاز به رله‌ها می‌باشد و با استفاده از سیستم مخابراتی طرح حفاظتی می‌تواند با هر گونه تغییر در شبکه خود را سازگار نموده و حفاظت بهینه‌ای را در شبکه اعمال کند [۲۴، ۱۲]. در حقیقت حفاظت تطبیقی حفاظتی هوشمند می‌باشد و با توجه به شرایط موجود در شبکه، حفاظت مربوطه را مورد استفاده قرار می‌دهد. هماهنگی حفاظتی در ریز شبکه‌ها با تعیین مقادیر جریان تنظیمی و TMS<sup>۸</sup> رله‌های اضافه جریان، انجام می‌پذیرد. در این مقاله جریان تنظیمی رله‌ها و مقادیر TMS رله‌ها، جهت انجام هماهنگی حفاظتی، با لحاظ نمودن تغییر در توپولوژی شبکه که با ورود و خروج مولدها و خروج خطوط رخ می‌دهد، در دو گروه تنظیمی برای رله‌های شبکه معین می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد طرح پیشنهادی دقت زیادی در رفع خطای اتصال کوتاه از خود نشان می‌دهد. در صورت استفاده از حفاظت تطبیقی به جای حفاظت غیر تطبیقی، زمان عملکرد رله‌ها کمتر شده و رفع سریع خطا، از خروج غیر ضروری مولدهای تولید پراکنده به نحو مناسبی پیشگیری می‌نماید. همچنین از ورود آسیب به تجهیزات ارزشمند شبکه از قبیل ترانسفورماتورهای قدرت، مولدها و کابل‌ها نیز پیشگیری می‌گردد. رفع سریع خطا در سیستم‌های قدرت، عامل موثری در بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه می‌باشد. برای ایجاد طرح حفاظتی تطبیقی، نوع رله‌های اضافه جریان مورد استفاده بسیار مهم می‌باشد. در مطالعات انجام شده در گذشته به دلیل اینکه تغییر در توپولوژی شبکه‌ها مورد مطالعه قرار نمی‌گرفت، از رله‌هایی استفاده می‌شد که صرفاً در جهت رو به جلو خطا را تشخیص داده و عمل می‌نمودند [۱۰] و به عبارتی رله‌ها تک تنظیمه بودند. در مطالعات اخیر انجام شده در زمینه حفاظت تطبیقی به دلیل لحاظ فرضیات پیچیده‌تر در حل مساله حفاظتی از قبیل تغییر در

دو تنظیمه، طرح‌های حفاظتی برای حفاظت ریز شبکه‌های شعاعی یا حلقوی پیشنهاد گردیده است. در [۲۱-۲۰] با مطالعه روی خطاهای سه فاز، فاز به فاز و دو فاز به زمین در ترکیب‌های مختلف ریز شبکه؛ طرح حفاظتی با قابلیت اطمینان بالا برای ریز شبکه شعاعی ۹ باس IEEE، با نظر گرفتن ورود و خروج مولدهای سنکرون، ارائه گردیده است. در [۲۲-۲۷] با مطالعه روی ریز شبکه‌های حلقوی ۱۴ باس و یا ۳۰ باس IEEE؛ با نظر گرفتن خروج یکی از مولدهای سنکرون، طرح‌های حفاظتی مختلفی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج ارزشمندی ارائه شده است، طوریکه با خروج یکی از مولدها هماهنگی حفاظتی همچنان بین رله‌های اصلی و پشتیبان برقرار می‌ماند. در [۲۹-۲۸] محققین بحث پایداری ژنراتورهای سنکرون را در زمان عملکرد رله‌ها مورد مطالعه قرار داده اند، به گونه‌ای که رله‌ها قبل از زمان رفع بحرانی ژنراتورهای سنکرون موجود در سطح ریز شبکه، عمل می‌نمایند تا از خروج ناخواسته<sup>۹</sup> مولدها پیشگیری گردد. در [۳۰] روی هماهنگی حفاظتی شبکه‌های توزیع فعال در زمان تبدیل به چند ریز شبکه مطالعه جامعی صورت پذیرفته است. در [۳۱] مدل‌سازی مولدهای تولید پراکنده اینورتری در بحث حفاظت ریز شبکه‌های شعاعی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به موارد ذکر شده مشخص است که اغلب مطالعات انجام گرفته در زمینه هماهنگی حفاظتی ریز شبکه‌ها، با حضور مولدهای تولید پراکنده از نوع ماشین سنکرون کلاسیک<sup>۵</sup> CSG بوده و به صورت موثری نسبت به لحاظ نمودن اثر مولدهای اینورتری در مقوله هماهنگی حفاظتی پرداخته نشده است. برخلاف مولدهای سنکرون، احتمال ورود و خروج مولدهای اینورتری موجود در سطح ریز شبکه‌ها، بسیار بالاست و می‌بایست مطالعه این مهم در ارائه طرح‌های حفاظتی مد نظر قرار گیرد [۱۰] چرا که رفع سریع خطا باعث می‌گردد قبل از رسیدن به اتمام زمان LVRT<sup>۶</sup> نیروگاه‌هایی که با اینورتر به شبکه متصل می‌گردند (بخصوص نیروگاه‌های بادی)، خطا رفع شده و بدین طریق از خروج ناخواسته آنها پیشگیری گردد. همچنین در مطالعات گذشته کمتر به مقوله ورود و خروج مولدها و یا ورود و خروج خطوط در سطح ریز شبکه پرداخته شده است. برخلاف نیروگاه‌های بزرگ که اغلب دارای چند واحد مجزا می‌باشند و اغلب یکی از واحدها به صورت اضطراری از مدار خارج می‌شود، احتمال ورود و خروج و یا تولید و یا عدم تولید مولدهای مقیاس کوچک، خصوصاً مولدهای انرژی تجدیدپذیر در سطح ریز شبکه‌ها بالاست و در برخی موارد کل ظرفیت تولید پراکنده از مدار خارج می‌شود. لذا می‌بایست این موارد در تدوین و ارائه طرح‌های حفاظتی مورد مطالعه و محاسبه قرار گیرد تا طرح حفاظتی با قابلیت اطمینان بالا حاصل شود. تغییر در توپولوژی شبکه، جریان‌های پخش بار و جریان‌های اتصال کوتاه، در سطح شبکه را دستخوش تغییر می‌کند و هماهنگی حفاظتی قبلی را بی‌اعتبار می‌کند. بر خلاف تحقیقات پیشین در

کند یا رله پشتیبان می باشد. در این صورت می توان برای رله اصلی و رله پشتیبان روابط زیر را بیان نمود [۱۲].

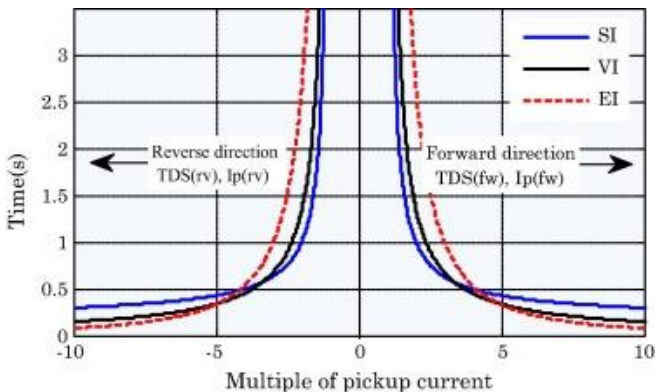
$$t_{fw}^p = TMS_{fw} \times \frac{A}{\left(\frac{I_{sc}}{I_{pfw}}\right)^B - 1} \quad (2)$$

$$t_{rv}^b = TMS_{rv} \times \frac{A}{\left(\frac{I_{sc}}{I_{prv}}\right)^B - 1} \quad (3)$$

در این صورت منحنی مشخصه این رله‌ها با توجه به اطلاعات مندرج در جدول (۱) به صورت شکل (۱) خواهد بود. نکته مهمی که در خصوص عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در رله‌های دو تنظیمه وجود دارد این است که در زمان عملکرد رله پشتیبان در هر خط، رله متناظر آن رله در سر دیگر همان خط، با ارسال سیگنال توسط سیستم مخابراتی بلاک شده و عملکرد نخواهد داشت [۱۲]. این ویژگی سیستم مخابراتی در شکل (۲) نشان داده شده است. هدف از هماهنگی حفاظتی، مینیمم کردن زمان هماهنگی رله‌ها می باشد، طوریکه شرایط هماهنگی حفاظتی هم در شرایط اتصال به شبکه (با بود و نبود هر یک از DG ها و یا هر یک از خطوط) و هم در شرایط جزیره ای (با بود و نبود هر یک از DG ها و یا هر یک از خطوط)، برقرار بماند. تنظیمات رله‌های اصلی و پشتیبان با حل مساله هماهنگی حفاظتی به نحوی انجام می پذیرد که رله‌های اصلی قبل از رله‌های پشتیبان در همه حالات کارکردی ریز شبکه عمل نمایند.

لذا تابع هدفی به صورت زیر جهت حل مساله هماهنگی حفاظتی تعریف می گردد تا زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان را مینیمم نماید:

$$MinT = \sum_{c=1}^{d+N+1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (t_{fw\_cij}^p + \sum_{k=1}^K t_{rv\_cij}^k) \quad (4)$$



شکل (۱): منحنی مشخصه عملکرد رله‌های جریان زیاد دو تنظیمه

توپولوژی ریز شبکه و همچنین حلقوی بودن ریز شبکه، از رله‌های دو تنظیمه<sup>۹</sup> که دارای قابلیت عملکرد در جهت معکوس<sup>۱۰</sup> نیز می باشند و دارای تنظیمات گروهی<sup>۱۱</sup> نیز هستند، استفاده شده است. در این مقاله نیز از رله‌های دو تنظیمه به منظور ایجاد حفاظت دقیق و موثر، استفاده خواهد شد. چرا که مطالعات انجام شده نشان می دهد رله‌های تک تنظیمه در برخی حالات شبکه عملکرد موثری نداشته و ناهماهنگی حفاظتی<sup>۱۲</sup> در سطح ریز شبکه رخ می دهد [۱۸، ۱۲]. در زمان تغییر وضعیت ریز شبکه و رخداد کارکرد جزیره‌ای، سیگنال انتقال وضعیت به رله‌ها جهت کارکرد گروه تنظیمی مختص کارکرد جزیره‌ای، ارسال می گردد. نتایج شبیه سازی‌ها نشان می دهد که با استفاده از رله‌های دو تنظیمه صرفا با استفاده از دو گروه تنظیمی، بین رله‌های اصلی و پشتیبان در هر آرایش شبکه؛ برای انواع خطاهای رخ داده، هماهنگی حفاظتی مناسبی حاصل می شود.

## ۲- فرمول بندی مساله هماهنگی حفاظتی

زمان عملکرد رله اضافه جریان، تابعی معکوس از جریان اتصال کوتاه گذرنده از آن است. این تابع با دو پارامتر TMS رله، یک پارامتر تنظیم و جریان تنظیمی رله  $I_p$  می باشد. که  $I_p$  برابر کمترین جریانی است که موجب تحریک رله می گردد. طبق استاندارد IEC 6۰۲۵۵، تابع ریاضی مذکور به صورت زیر تعریف می شود [۱۰]:

$$t = TMS \times \frac{A}{\left(\frac{I_{sc}}{I_p}\right)^B - 1} \quad (1)$$

ثابت‌های A و B برحسب رله مورد استفاده تغییر می کنند و بر اساس نوع منحنی مشخصه رله تعیین می گردند. در جدول (۱) مقادیر این ثابت‌ها بر حسب منحنی مشخصه آمده است. در این مقاله از نوع منحنی معمولی استفاده می گردد.

جدول (۱): ضرایب منحنی مشخصه

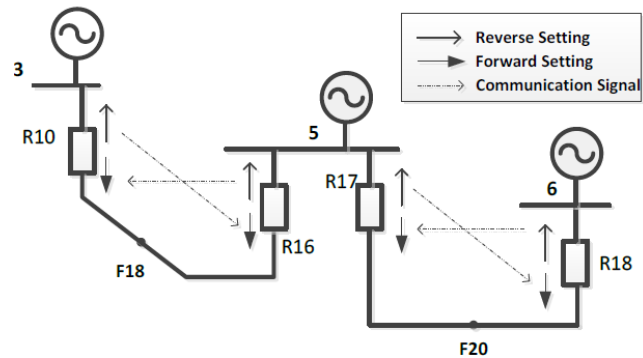
نوع منحنی	A	B
معمولی (SI)	۰.۱۴	۰.۰۲
بسیار معکوس (VI)	۱۳.۵	۱
بی نهایت معکوس (EI)	۸۰	۲

همانطور که گفته شد به طور معمول، چنین رله‌هایی یک تنظیم برای رله اصلی و رله پشتیبان دارند و در یک جهت عمل می کنند. از سوی دیگر رله‌های دارای قابلیت تنظیم دوگانه را می توان در دو جهت تنظیم نمود. تنظیمات این رله‌ها بستگی به این دارد که رله به عنوان رله اصلی عمل می

می‌بایست به صورت بهینه مقدار دهی شوند، طوری که به ازای همه خطاهای رخ داده، رله‌های اصلی و رله‌های پشتیبان در همه توپولوژی‌های کارکردی، به صورت هماهنگ عمل می‌نمایند.

### ۳- شبکه مورد مطالعه

در شکل (۳) دیاگرام تک خطی بخش توزیع شبکه ۳۰ باسه IEEE، نمایش داده شده است [۳۲]. این شبکه همانطور که در شکل مشخص است حلقوی بوده و از سه نقطه به شبکه بالادست متصل است. سطح ولتاژ بخش توزیع این شبکه ۳۳ کیلوولت بوده و سطح ولتاژ شبکه فوق توزیع آن ۱۳۲ کیلوولت می‌باشد. جهت شبیه سازی این شبکه نیاز به سطح اتصال کوتاه شبکه بالادست می‌باشد. بدین منظور کل شبکه در نرم افزار DIgSILENT شبیه سازی شده و در شکل (۴) ساختار کل شبکه ۳۰ باسه IEEE آمده است. برای انجام مطالعه هماهنگی حفاظتی در حضور مولدهای تولید پراکنده در سطح ریز شبکه، همانطور که در شکل (۳) مشخص است، در کل تعداد ۱۱ واحد تولید پراکنده از نوع CHP<sup>۱۴</sup>، بادی و خورشیدی در نظر گرفته شده است. نیروگاه های بادی و خورشیدی توسط اینورتر به شبکه متصل شده‌اند. تعداد مولدهای تولید پراکنده و میزان تولید هر مولد به نحوی انتخاب شده است که در حالت کارکرد جزیره‌ای، مولدهای تولید پراکنده پاسخگوی نیاز مصرف بارهای موجود در سطح ریز شبکه باشند تا نیازی به اعمال خاموشی به بخشی از بارها در کارکرد جزیره‌ای نباشد. همچنین در حالت متصل به شبکه، مازاد تولید مولدهای تولید پراکنده به شبکه بالادست ارسال می‌گردد. در جدول (۲) اطلاعات مولدهای تولید پراکنده آمده است. همانگونه که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد، ریز شبکه مورد مطالعه حلقوی بوده و نسبت به ریز شبکه شعاعی این مزیت را دارد که با خارج شدن هر یک از خطوط، یک یا تعدادی از مولدهای تولید پراکنده دچار جزیره‌ای شدن ناخواسته نمی‌شود. همچنین ریز شبکه مورد مطالعه دارای ۱۴ باس و ۴۳ رله حفاظتی می‌باشد. رله‌های ۱ تا ۲۹ رله‌های دو سر خطوط بوده و مابقی رله‌ها مربوط به رله نقطه اتصال مولدهای تولید پراکنده به شبکه می‌باشند. اطلاعات کامل نیروگاه ها، بارها و خطوط در سطح توزیع و فوق توزیع شکل (۴)، در مرجع [۳۲] آمده است. هنگام شبیه سازی در نرم افزار DIgSILENT با توجه به مفاد دستورالعمل‌های موجود، تمامی مولدهای تولید پراکنده در حالت متصل به شبکه؛ در مد ضرب توان کار می‌کنند و نقشی در کنترل ولتاژ و فرکانس ندارند. چرا که در این صورت کنترل فرکانس بر عهده شبکه بالادست بوده و مولدهای تولید پراکنده مشارکتی در کنترل ولتاژ و کنترل فرکانس نخواهند داشت. همچنین در ایجاد اتصال کوتاه‌ها از روش IEC 60909 استفاده شده است.



شکل (۲): عملکرد سیستم مخابراتی مورد نیاز در زمان عملکرد رله [۱۲]

طوری که T مجموع زمان هماهنگی کل رله‌ها بوده و می‌بایست مینیمم گردد. معرف توپولوژی سیستم، d تعداد DG ها و N تعداد نقاطی است که خطا روی آن رخ می‌دهد و به عبارتی N تعداد خطوط موجود در سطح ریز شبکه را نیز نشان می‌دهد. لذا  $d+N+1$  تعداد آرایش شبکه در حالت متصل به شبکه (با احتساب خروج یکی از مولدها و یا خروج یکی از خطوط) می‌باشد. همان تعداد حالت در کارکرد جزیره‌ای نیز در نظر گرفته می‌شود. i معرف مکان خطا، J معرف رله و M معرف کل رله‌هاست. p بیانگر رله اصلی و  $b_k$  بیانگر رله پشتیبان برای رله k می‌باشد. K تعداد رله های پشتیبان برای هر رله اصلی است. برای کمینه شدن زمان باید فاصله عملکردی بین رله اصلی و رله پشتیبان کم باشد. این فاصله CTI<sup>۱۳</sup> نامیده می‌شود و باید تا اندازه‌ای باشد که تداخل عملکردی بین رله اصلی و پشتیبان پیش نیاید. معمولا CTI در حدود ۰.۲ ثانیه فرض می‌شود [۱۲]. لذا داریم:

$$t_{rv\_cij}^{b_k} - t_{fw\_cij}^p \geq CTI \quad \forall c, i, \{j, k\} \quad (5)$$

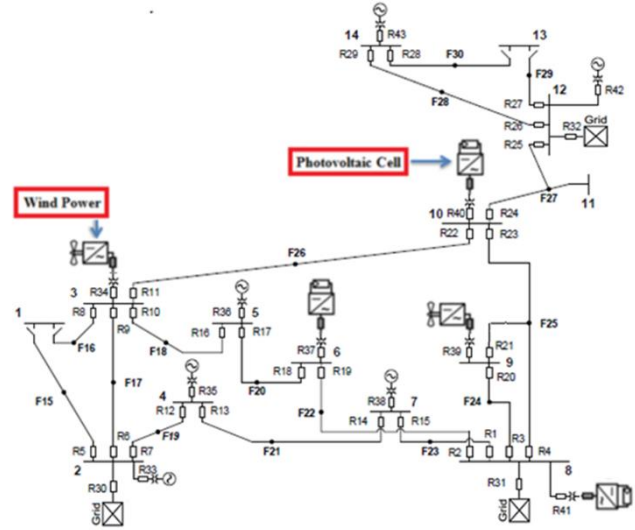
$I_p$  و TMS معمولا توسط کارخانه سازنده رله داده می‌شود و مقدار  $I_p$  معمولا بیش از جریان نامی رله هست و قید زیر را برای آن خواهیم داشت.  $I_{pi-min} \leq I_{pfi}, I_{prvi} \leq I_{pi-max}, \forall i$  (6) مینیمم  $I_p$  در حدود ۱.۰۱ و ماکزیمم آن ۲ برابر جریان جریان پخش بار هر رله در حالت متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای با حضور تمام DG ها در نظر گرفته شده است. همچنین برای TMS داریم:

$$TMS_{i-min} \leq TMS_{fwi}, TMS_{rvi} \leq TMS_{i-max}, \forall i \quad (7)$$

TMS مینیمم و ماکزیمم هر رله، معمولا بین ۰.۰۵ تا ۱ لحاظ می‌گردد. در این مقاله جهت رسیدن به جواب بهینه با توجه به شبیه سازی‌های انجام شده؛  $TMS_{fw}$  مینیمم و ماکزیمم هر رله، بین ۰.۱ تا ۰.۵ و  $TMS_{rv}$  مینیمم و ماکزیمم هر رله، بین ۰.۰۵ تا ۰.۳ در الگوریتم بهینه سازی لحاظ شده است. مساله بدین صورت خواهد بود که برای هر رله به ازای خطای رخ داده در مکان i، چهار متغیر  $TMS_{fwi}, TMS_{rvi}, I_{pfi}$  و  $I_{prvi}$

جدول (۲): اطلاعات مولدهای تولید پراکنده متصل به شبکه توزیع در شبکه ۳۰ باس استاندارد IEEE

DG BUS NO	DG Type	S (MVA)	PF (Grid Connected)	Local Controller (Grid Connected)	Local Controller (Islanded)
۲	CHP	۲۰	۱	PF	Voltage
۳	Wind	۱۵	۰.۸	PF	Droop
۴	CHP	۲۰	۱	PF	SLACK
۵	CHP	۲۰	۱	PF	Voltage
۶	Solar PV	۱۰	۰.۸	PF	Droop
۷	CHP	۲۰	۱	PF	Voltage
۸	Solar PV	۱۰	۰.۸	PF	Droop
۹	Wind	۱۵	۰.۸	PF	Droop
۱۰	Solar PV	۱۰	۰.۸	PF	Droop
۱۲	CHP	۲۰	۱	PF	Voltage
۱۴	CHP	۲۰	۱	PF	Voltage
SUM		۱۸۰			

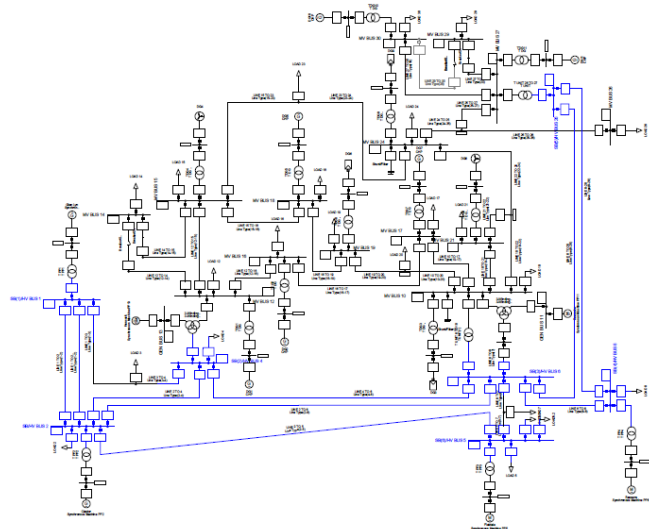


شکل (۲): دیاگرام تک خطی بخش توزیع شبکه ۳۰ باس IEEE

همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، اتصال کوتاه ها در وسط خطوط از  $F_{15}$  تا  $F_{30}$  در سطح ریز شبکه انجام می‌گیرد [۱۰]. در دو سر هر خط رله‌های اضافه جریان قرار داده شده‌اند. در این مطالعه ابتدا برای اتصال کوتاه هر خط، رله‌های اصلی و رله‌های پشتیبان مربوط به هر رله اصلی مشخص می‌گردد. به عنوان مثال برای خطی باس مجازی  $F_{17}$ ، رله‌های  $R_6$  و  $R_9$  رله اصلی دو سر خط می‌باشند. رله پشتیبان رله  $R_6$  رله‌های  $R_7$  بوده و رله پشتیبان رله  $R_9$  رله‌های  $R_{10}$ ،  $R_{11}$  می‌باشند [۱۲]. به همین طریق برای بقیه خطوط موجود در سطح ریز شبکه، رله‌های اصلی و پشتیبان مشخص می‌گردند. در این مطالعه رله‌های اصلی با  $p$  و رله‌های پشتیبان با  $b$  نشان داده می‌شوند. پس از انجام پخش بار و سپس انجام اتصال کوتاه در وسط خطوط، جریان عبوری از هر رله کاملاً مشخص شده و می‌توان از اطلاعات جریانی به دست آمده نسبت به بهینه سازی تابع هدف و تعیین  $I_p$  و  $TMS$  هر رله، در حالت عملکرد به عنوان رله اصلی یا عملکرد به عنوان رله پشتیبان، اقدام نمود. جهت بهینه سازی و تعیین زمان عملکرد بهینه رله‌ها در این مقاله از نرم افزار GAMS، استفاده شده است.

#### ۴- تغییر در توپولوژی شبکه

همان گونه که گفته شد ورود و خروج مولدهای سطح ریز شبکه توپولوژی ریز شبکه را تغییر داده و لذا جریان‌های پخش بار و اتصال کوتاه شاخه‌ها تغییر می‌کند و می‌تواند هماهنگی حفاظتی قبلی را بی‌اعتبار کند. لذا باید در ارائه طرح حفاظتی این عامل مهم لحاظ گردد. جدول (۳) انواع



شکل (۴): دیاگرام شبکه ۳۰ باس IEEE در نرم افزار DigSilent

برخلاف حالت متصل به شبکه؛ در حالت کارکرد جزیره‌ای مولدهای از نوع CHP به صورت P-V به شبکه متصل شده و مطابق اطلاعات مندرج در جدول (۲) یکی از این ژنراتورها به عنوان ژنراتور مرجع تعیین می‌شود. بقیه مولدهای تولید پراکنده از نوع بادی و خورشیدی در حالت عملکرد جزیره ای در مد Droop تنظیم شده‌اند. نحوه مدل‌سازی نیروگاه‌های بادی و واحدهای خورشیدی در [۳۱] آمده است.

## ۵- فلوجارت پیشنهادی مساله هماهنگی

### بهینه رله‌ها در ریز شبکه

فلوجارت دستیابی به مقادیر بهینه تنظیمات رله‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. ابتدا رله‌های اصلی و پشتیبان در هر حالت خطا معین شده و به نرم افزار بهینه ساز داده می‌شود و پس از آن اطلاعات جریان‌های پخش بار شبکه در حالت عملکرد متصل به شبکه و حالت عملکرد جزیره‌ای (مطابق ردیف ۱ جدول ۳) و همچنین جریان‌های اتصال کوتاه بین خطوط در هر حالت خطا در همه مدهای کاری، دریافت شده و به رله‌های متناظر هر حالت خطا، نگاشت می‌گردد. سپس  $I_p$  و TMS های بهینه رله‌ها توسط در دو گروه تنظیمی، در نرم افزار GAMS، پس از تکرار حل‌های متوالی به دست می‌آید. تکرار حل مساله تا رسیدن به مقدار مینیمم تابع هدف، که شامل جمع زمان عملکرد کلیه رله‌های اصلی و پشتیبان در هر حالت عملکردی است، ادامه می‌یابد. مینیمم و ماکزیمم  $I_p$  به ترتیب ۱.۱ و ۲ برابر جریان جریان پخش بار هر رله در حالت عملکرد متصل به شبکه و جریان پخش بار هر رله در حالت عملکرد جزیره‌ای ریز شبکه در نظر گرفته شده است (مطابق ردیف ۱ جدول ۳). با توجه به اینکه رابطه (۱) یک رابطه غیر خطی می‌باشد، برای کمینه کردن تابع هدف از Solver NLP<sup>۱۶</sup> استفاده شده است. اطلاعات مربوط به جریان‌های پخش بار و جریان‌های اتصال کوتاه با استفاده از نرم افزار DIGSILENT به دست آمده است.

## ۶- نتایج شبیه سازی

همان گونه که گفته شد با توجه به توسعه بسترهای مخابراتی، امروزه استفاده از حفاظت تطبیقی در مطالعات بیشتر شده است. استفاده از حفاظت تطبیقی باعث می‌شود تنظیمات رله‌ها به نحوی صورت پذیرد که در کمترین زمان ممکن خطا را رفع نمایند. لذا در این مطالعه برای مدهای کارکرد متصل به شبکه در جدول (۳)، رله‌ها با گروه تنظیمی (۱) و برای مدهای کارکرد جزیره‌ای در جدول (۳)، رله‌ها با گروه تنظیمی (۲)، تنظیم خواهند شد.

### ۶-۱- مدهای کارکردی متصل به شبکه

برای مدهای کارکردی متصل به شبکه که در جدول (۳) آمده است؛ نتایج شبیه سازی در جداول (۴) تا (۶) آمده است. جدول (۴) مقادیر  $I_p$  و TMS بهینه رله‌ها را برای گروه تنظیمی (۱) که مختص مدهای کاری متصل به شبکه است، نشان می‌دهد. این گروه تنظیمی مدهای کارکردی متصل به شبکه از Configuration<sup>۱</sup> الی Configuration<sup>۲۸</sup> را شامل می‌شود. با تنظیم رله‌ها با مقادیر داده شده جدول (۴) می‌توان هماهنگی حفاظتی

مدهای کاری ریز شبکه را با لحاظ نمودن خروج یکی از DG ها و یا خروج یکی از خطوط<sup>۱۵</sup> نشان می‌دهد. طرح هماهنگی حفاظتی در سطح ریز شبکه ریز شبکه باید قادر باشد در کلیه مدهای کاری همچنان با دقت عمل نماید.

جدول (۳): مدهای کارکردی ریز شبکه

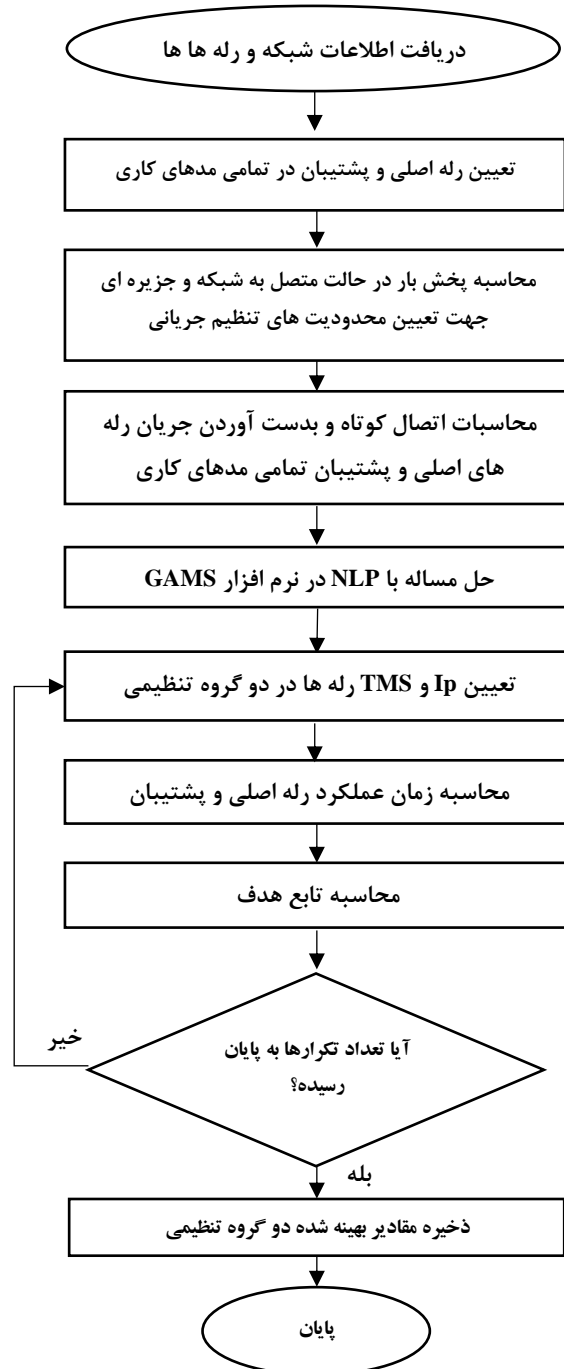
ردیف	Grid Connected Configurations	Islanded Configurations
۱	Presence of All DGs (Configuration <sup>۱</sup> )	Presence of All DGs (Configuration <sup>۲۹</sup> )
۲	Outage of DG <sup>۱</sup> (Configuration <sup>۲</sup> )	Outage of DG <sup>۱</sup> (Configuration <sup>۳۰</sup> )
۳	Outage of DG <sup>۲</sup> (Configuration <sup>۳</sup> )	Outage of DG <sup>۲</sup> (Configuration <sup>۳۱</sup> )
۴	Outage of DG <sup>۳</sup> (Configuration <sup>۴</sup> )	Outage of DG <sup>۳</sup> (Configuration <sup>۳۲</sup> )
۵	Outage of DG <sup>۴</sup> (Configuration <sup>۵</sup> )	Outage of DG <sup>۴</sup> (Configuration <sup>۳۳</sup> )
۶	Outage of DG <sup>۵</sup> (Configuration <sup>۶</sup> )	Outage of DG <sup>۵</sup> (Configuration <sup>۳۴</sup> )
۷	Outage of DG <sup>۶</sup> (Configuration <sup>۷</sup> )	Outage of DG <sup>۶</sup> (Configuration <sup>۳۵</sup> )
۸	Outage of DG <sup>۷</sup> (Configuration <sup>۸</sup> )	Outage of DG <sup>۷</sup> (Configuration <sup>۳۶</sup> )
۹	Outage of DG <sup>۸</sup> (Configuration <sup>۹</sup> )	Outage of DG <sup>۸</sup> (Configuration <sup>۳۷</sup> )
۱۰	Outage of DG <sup>۹</sup> (Configuration <sup>۱۰</sup> )	Outage of DG <sup>۹</sup> (Configuration <sup>۳۸</sup> )
۱۱	Outage of DG <sup>۱۰</sup> (Configuration <sup>۱۱</sup> )	Outage of DG <sup>۱۰</sup> (Configuration <sup>۳۹</sup> )
۱۲	Outage of DG <sup>۱۱</sup> (Configuration <sup>۱۲</sup> )	Outage of DG <sup>۱۱</sup> (Configuration <sup>۴۰</sup> )
۱۳	Outage of LINE <sup>۱۵</sup> (Configuration <sup>۱۳</sup> )	Outage of LINE <sup>۱۵</sup> (Configuration <sup>۴۱</sup> )
۱۴	Outage of LINE <sup>۱۶</sup> (Configuration <sup>۱۴</sup> )	Outage of LINE <sup>۱۶</sup> (Configuration <sup>۴۲</sup> )
۱۵	Outage of LINE <sup>۱۷</sup> (Configuration <sup>۱۵</sup> )	Outage of LINE <sup>۱۷</sup> (Configuration <sup>۴۳</sup> )
۱۶	Outage of LINE <sup>۱۸</sup> (Configuration <sup>۱۶</sup> )	Outage of LINE <sup>۱۸</sup> (Configuration <sup>۴۴</sup> )
۱۷	Outage of LINE <sup>۱۹</sup> (Configuration <sup>۱۷</sup> )	Outage of LINE <sup>۱۹</sup> (Configuration <sup>۴۵</sup> )
۱۸	Outage of LINE <sup>۲۰</sup> (Configuration <sup>۱۸</sup> )	Outage of LINE <sup>۲۰</sup> (Configuration <sup>۴۶</sup> )
۱۹	Outage of LINE <sup>۲۱</sup> (Configuration <sup>۱۹</sup> )	Outage of LINE <sup>۲۱</sup> (Configuration <sup>۴۷</sup> )
۲۰	Outage of LINE <sup>۲۲</sup> (Configuration <sup>۲۰</sup> )	Outage of LINE <sup>۲۲</sup> (Configuration <sup>۴۸</sup> )
۲۱	Outage of LINE <sup>۲۳</sup> (Configuration <sup>۲۱</sup> )	Outage of LINE <sup>۲۳</sup> (Configuration <sup>۴۹</sup> )
۲۲	Outage of LINE <sup>۲۴</sup> (Configuration <sup>۲۲</sup> )	Outage of LINE <sup>۲۴</sup> (Configuration <sup>۵۰</sup> )
۲۳	Outage of LINE <sup>۲۵</sup> (Configuration <sup>۲۳</sup> )	Outage of LINE <sup>۲۵</sup> (Configuration <sup>۵۱</sup> )
۲۴	Outage of LINE <sup>۲۶</sup> (Configuration <sup>۲۴</sup> )	Outage of LINE <sup>۲۶</sup> (Configuration <sup>۵۲</sup> )
۲۵	Outage of LINE <sup>۲۷</sup> (Configuration <sup>۲۵</sup> )	Outage of LINE <sup>۲۷</sup> (Configuration <sup>۵۳</sup> )
۲۶	Outage of LINE <sup>۲۸</sup> (Configuration <sup>۲۶</sup> )	Outage of LINE <sup>۲۸</sup> (Configuration <sup>۵۴</sup> )
۲۷	Outage of LINE <sup>۲۹</sup> (Configuration <sup>۲۷</sup> )	Outage of LINE <sup>۲۹</sup> (Configuration <sup>۵۵</sup> )
۲۸	Outage of LINE <sup>۳۰</sup> (Configuration <sup>۲۸</sup> )	Outage of LINE <sup>۳۰</sup> (Configuration <sup>۵۶</sup> )

با توجه به زمان عملکرد رله‌های اصلی و زمان عملکرد رله‌های پشتیبان، مشخص است که هماهنگی حفاظتی با CTI حدود ۲۰۰ میلی ثانیه بین رله‌های متناظر اصلی و پشتیبان، در هر حالت خطای اتصال کوتاه برقرار است و این هماهنگی حفاظتی دقیق، قابلیت اطمینان ریز شبکه را بهبود می‌بخشد. با ایزوله شدن خط معیوب، شاخص‌های قابلیت اطمینان برق مشترکین تغذیه شونده از ریز شبکه بالا می‌رود. در صورت نبود چنین هماهنگی حفاظتی بین رله‌های متناظر اصلی و پشتیبان، بخش وسیعی از سطح ریز شبکه ممکن است در حین خطای اتصال کوتاه، بی‌برق گردد. با توجه به زمان عملکرد رله‌ها در Configuration<sup>۱</sup> در جدول (۵) مشخص است زمان عملکرد رله‌ها در تابع هدف جمعاً در این مد حدود ۲۹ ثانیه می‌باشد. جدول (۶) زمان عملکرد رله‌ها در Configuration<sup>۱۵</sup> را نشان می‌دهد. با توجه به زمان عملکرد رله‌های اصلی و زمان عملکرد رله‌های پشتیبان مشخص است که هماهنگی حفاظتی CTI حدود ۲۰۰ میلی ثانیه بین رله‌های متناظر اصلی و پشتیبان، در هر حالت خطای اتصال کوتاه در

جدول (۴): Ip و TMS بهینه رله‌ها: متصل به شبکه (۱ Setting Group)

REL	TMSfw	Ipfw(A)	TMSrv	Iprv(A)
R <sup>۱</sup>	۰.۱	۲۸۱.۶	۰.۳	۲۸۱.۶
R <sup>۲</sup>	۰.۲۶۱	۴۸.۴	۰.۱۹	۴۸.۴
R <sup>۳</sup>	۰.۱	۱۲۷.۶	۰.۳	۱۲۷.۶
R <sup>۴</sup>	۰.۱	۶۱.۶	۰.۱	۱۱۲
R <sup>۵</sup>	۰.۱	۵۶.۱	No Need (Radial Branch)	
R <sup>۶</sup>	۰.۱	۱۱۰	۰.۱۷۴	۱۱۰
R <sup>۷</sup>	۰.۱	۹۱.۳	۰.۱۶۵	۹۱.۳
R <sup>۸</sup>	۰.۱	۱۲۶.۵	No Need (Radial Branch)	
R <sup>۹</sup>	۰.۱	۱۱۰	۰.۲	۱۱۰
R <sup>۱۰</sup>	۰.۱	۹۱.۳	۰.۲۲۷	۹۱.۳
R <sup>۱۱</sup>	۰.۱	۷۰.۴	۰.۲۲۱	۷۰.۴
R <sup>۱۲</sup>	۰.۱	۹۱.۳	۰.۲۰۴	۹۱.۳
R <sup>۱۳</sup>	۰.۱	۱۳۳.۱	۰.۲۲۱	۱۳۳.۱
R <sup>۱۴</sup>	۰.۱	۱۳۳.۱	۰.۲۲۳	۱۳۳.۱
R <sup>۱۵</sup>	۰.۱	۲۸۱.۶	۰.۲۳۳	۲۸۱.۶
R <sup>۱۶</sup>	۰.۱	۹۱.۳	۰.۲۰۲	۹۱.۳
R <sup>۱۷</sup>	۰.۱	۱۳۷.۵	۰.۲۳۲	۱۳۷.۵
R <sup>۱۸</sup>	۰.۱	۱۳۷.۵	۰.۲۲۵	۱۳۷.۵
R <sup>۱۹</sup>	۰.۱	۸۲.۵	۰.۲۱۵	۸۲.۵
R <sup>۲۰</sup>	۰.۱	۱۲۷.۶	۰.۱۹۸	۱۲۷.۶
R <sup>۲۱</sup>	۰.۱	۴۵.۱	۰.۲۴۶	۴۵.۱
R <sup>۲۲</sup>	۰.۱	۱۸.۷	۰.۳	۱۸.۷
R <sup>۲۳</sup>	۰.۱	۷۱.۵	۰.۱۸۷	۷۱.۵
R <sup>۲۴</sup>	۰.۱	۱۱۶.۶	۰.۲۲۳	۱۱۶.۶
R <sup>۲۵</sup>	۰.۱	۱۱۲.۲	۰.۲۰۴	۱۱۲.۲
R <sup>۲۶</sup>	۰.۱	۸۶.۹	۰.۲۳۱	۸۶.۹
R <sup>۲۷</sup>	۰.۱	۴۹.۵	No Need (Radial Branch)	
R <sup>۲۸</sup>	۰.۱	۴۶.۲	No Need (Radial Branch)	
R <sup>۲۹</sup>	۰.۱	۸۶.۹	۰.۳	۸۶.۹

کاملی را برای پوشش کلیه آرایش‌ها شامل ۲۸ مد کاری متصل به شبکه، به دست آورد. مقدار تابع هدف برای این ۲۸ حالت مجموعاً برابر ۸۰۰ ثانیه می‌باشد. جدول (۵) زمان عملکرد رله‌ها در Configuration<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد.



شکل (۵): فلوچارت دستیابی به مقادیر بهینه Ip و TMS رله‌ها

جدول (۵): زمان بهینه عملکرد رله‌ها در Configuration<sup>۱</sup> (ثانیه): متصل به شبکه

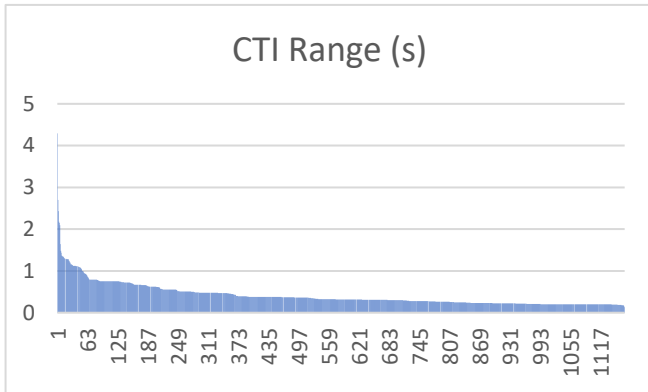
Fault Location	p	b1	b2	b3
F15	R <sup>۵</sup>	R <sup>۶</sup>	R <sup>۷</sup>	-
	۰.۱۲۷	۰.۴۴	۰.۴۰۵	-
F16	R <sup>۸</sup>	R <sup>۹</sup>	R <sup>۱۰</sup>	R <sup>۱۱</sup>
	۰.۱۶۳	۰.۳۷۱	۰.۵۴۳	۰.۵۳۵
F17	R <sup>۶</sup>	R <sup>۷</sup>	-	-
	۰.۱۲۵	۰.۳۶	-	-
	R <sup>۹</sup>	R <sup>۱۰</sup>	R <sup>۱۱</sup>	-
	۰.۱۵۴	۰.۴۶۹	۰.۴۶۴	-
F18	R <sup>۱۰</sup>	R <sup>۹</sup>	R <sup>۱۱</sup>	-
	۰.۱۲۹	۰.۳۵۵	۰.۵۱۹	-
	R <sup>۱۶</sup>	R <sup>۱۷</sup>	-	-
	۰.۱۵۴	۰.۵۳	-	-
F19	R <sup>۷</sup>	R <sup>۶</sup>	-	-
	۰.۱۲۵	۰.۴۲۵	-	-
	R <sup>۱۲</sup>	R <sup>۱۳</sup>	-	-
	۰.۱۴۴	۰.۴۵۳	-	-
F20	R <sup>۱۷</sup>	R <sup>۱۶</sup>	-	-
	۰.۱۵۹	۰.۳۶۴	-	-
	R <sup>۱۸</sup>	R <sup>۱۹</sup>	-	-
	۰.۱۶۷	۰.۳۶۷	-	-
F21	R <sup>۱۳</sup>	R <sup>۱۲</sup>	-	-
	۰.۱۵۵	۰.۳۵۵	-	-
	R <sup>۱۴</sup>	R <sup>۱۵</sup>	-	-
	۰.۱۴۱	۰.۵۱۷	-	-
F22	R <sup>۲</sup>	R <sup>۱</sup>	R <sup>۳</sup>	R <sup>۴</sup>
	۰.۳۴۲	۱.۴۶۱	۱.۶۲۵	۰.۸۴۱
	R <sup>۱۹</sup>	R <sup>۱۸</sup>	-	-
	۰.۱۴۷	۰.۴۷	-	-
F23	R <sup>۱</sup>	R <sup>۲</sup>	R <sup>۳</sup>	R <sup>۴</sup>
	۰.۱۴۱	۰.۳۴۱	۰.۸۶۲	۰.۳۴۱
	R <sup>۱۵</sup>	R <sup>۱۴</sup>	-	-
	۰.۲۱۱	۰.۴۶۲	-	-
F24	R <sup>۳</sup>	R <sup>۱</sup>	R <sup>۲</sup>	-
	۰.۱۰۷	۰.۸۵۷	۰.۳۳۵	-
	R <sup>۲۰</sup>	R <sup>۲۱</sup>	-	-
	۰.۱۶۵	۰.۳۶۵	-	-
F25	R <sup>۴</sup>	R <sup>۱</sup>	R <sup>۲</sup>	R <sup>۳</sup>
	۰.۱۴۵	۰.۹۳۵	۰.۳۶۴	۰.۵۰۵
	R <sup>۲۱</sup>	R <sup>۲۰</sup>	-	-
	۰.۰۹۷	۰.۳۲۹	-	-
	R <sup>۲۳</sup>	R <sup>۲۲</sup>	R <sup>۲۴</sup>	-
	۰.۱۵۷	۰.۴۶۴	۰.۶۳۱	-
F26	R <sup>۱۱</sup>	R <sup>۹</sup>	R <sup>۱۰</sup>	-
	۰.۱۳	۰.۳۹۲	۰.۶۰۳	-
	R <sup>۲۲</sup>	R <sup>۲۴</sup>	R <sup>۲۳</sup>	-
	۰.۰۸۷	۰.۷۰۹	۰.۳۶۴	-
F27	R <sup>۴</sup>	R <sup>۲</sup>	R <sup>۳</sup>	-
	۰.۱۷۷	۰.۴۹۸	۰.۳۷۷	-
	R <sup>۲۵</sup>	R <sup>۲۶</sup>	-	-
	۰.۱۶۴	۰.۸۳	-	-
F28	R <sup>۲۶</sup>	R <sup>۲۵</sup>	-	-
	۰.۱۵۳	۰.۶۶۳	-	-
	R <sup>۲۹</sup>	-	-	-
	۰.۲۱۴	-	-	-
F29	R <sup>۲۷</sup>	R <sup>۲۵</sup>	R <sup>۲۶</sup>	-
	۰.۱۴۳	۰.۶۱۹	۰.۹	-
F30	R <sup>۲۸</sup>	R <sup>۲۹</sup>	-	-
	۰.۱۶۲	۰.۷۱۷	-	-

این مد نیز برقرار است. با توجه به زمان عملکرد رله‌ها در Configuration<sup>۱۵</sup> در جدول (۶) مشخص است زمان عملکرد رله‌ها در تابع هدف جمعا در این مد حدود ۳۰ ثانیه می‌باشد. در جدول (۶) رله‌های فاقد عملکرد به دلیل خروج خط F<sup>۱۷</sup> Configuration<sup>۱۵</sup> با رنگ تیره مشخص شده‌اند. شکل (۶) محدوده CTI در کلیه مدهای کاری متصل به شبکه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در همه مدهای کاری هماهنگی حفاظتی برقرار است و می‌توان تنها با یک بار تنظیم مناسب رله‌ها طبق جدول (۴) هماهنگی حفاظتی مقاومتی را ایجاد نمود که توپولوژی‌های مختلف ریز شبکه را در حالت متصل به شبکه اصلی، پوشش دهد.

## ۲-۶- مدهای کارکردی جزیره‌ای

برای مدهای کارکردی جزیره‌ای نتایج شبیه سازی در جداول (۷) تا (۹) آمده است. جدول (۷) مقادیر  $I_p$  و TMS بهینه رله‌ها را برای گروه تنظیمی ۲، نشان می‌دهد. این گروه تنظیمی مدهای کارکردی جزیره‌ای از Configuration<sup>۲۹</sup> الی Configuration<sup>۵۸</sup> را شامل می‌شود. با تنظیم رله‌ها با مقادیر داده شده در جدول (۷)، می‌توان هماهنگی حفاظتی کاملی را برای پوشش کلیه آرایش‌ها شامل ۲۸ مد کاری کارکرد جزیره‌ای، به دست آورد. مقدار تابع هدف برای این ۲۸ حالت مجموعاً برابر ۷۲۰ ثانیه می‌باشد. جدول (۸) زمان عملکرد رله‌ها در Configuration<sup>۲۹</sup> را نشان می‌دهد. با توجه به زمان عملکرد رله‌های اصلی و زمان عملکرد رله‌های پشتیبان، مشخص است که هماهنگی حفاظتی با CTI حدود ۲۰۰ میلی ثانیه بین رله‌های متناظر اصلی و پشتیبان، در هر حالت خطای اتصال کوتاه در این مد کارکردی نیز برقرار است. با توجه به زمان عملکرد رله‌ها در Configuration<sup>۲۹</sup> در جدول (۸) مشخص است زمان عملکرد رله‌ها در تابع هدف جمعا در حدود ۲۶.۵ ثانیه می‌باشد. جدول (۹) زمان عملکرد رله‌ها در Configuration<sup>۵۱</sup> را نشان می‌دهد. در جدول (۹) رله‌های فاقد عملکرد به دلیل خروج خط F<sup>۲۵</sup> Configuration<sup>۵۱</sup> با رنگ تیره مشخص شده‌اند. با توجه به زمان عملکرد رله‌های اصلی و زمان عملکرد رله پشتیبان مشخص است که هماهنگی حفاظتی با CTI حدود ۲۰۰ میلی ثانیه بین رله‌های متناظر اصلی و پشتیبان، در هر حالت خطای اتصال کوتاه در این مد نیز برقرار است. با توجه به زمان عملکرد رله‌ها در Configuration<sup>۵۱</sup> در جدول (۹) مشخص است زمان عملکرد رله‌ها در تابع هدف جمعا در این مد حدود ۲۵ ثانیه می‌باشد. شکل (۷) محدوده CTI در کلیه مدهای کاری جزیره‌ای را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در همه مدهای کاری هماهنگی حفاظتی برقرار است و می‌توان تنها با یک بار تنظیم مناسب رله‌ها طبق جدول (۷) هماهنگی حفاظتی مقاومتی را ایجاد نمود که همه توپولوژی‌های مختلف شبکه را در حالت جزیره‌ای، پوشش دهد.





شکل (۶): محدوده CTI در کلیه مدهای کاری متصل به شبکه

جدول (۷): Ip و TMS بهینه رله‌ها: جزیره‌ای (۲ Setting Group)

REL	TMSfw	Ipfw(A)	TMSrv	Iprv(A)
R1	۰.۱	۱۳۳.۱	۰.۳	۱۳۳.۱
R2	۰.۱	۴۲.۹	۰.۲۴۸	۴۲.۹
R3	۰.۱	۱۳۲	۰.۳	۱۳۲
R4	۰.۱	۵۹.۴	۰.۱۴۲	۶۰
R5	۰.۱	۵۲.۸	No Need (Radial Branch)	
R6	۰.۱	۲۵.۳	۰.۲۸۷	۲۵.۳
R7	۰.۱	۳۶.۳	۰.۲۳۷	۳۶.۳
R8	۰.۱	۱۲۱	No Need (Radial Branch)	
R9	۰.۱	۲۵.۳	۰.۲۶۱	۲۵.۳
R10	۰.۱	۶۰.۵	۰.۲۶	۶۰.۵
R11	۰.۱	۳۱.۹	۰.۲۴۵	۳۱.۹
R12	۰.۱	۳۶.۳	۰.۱۹۴	۳۶.۳
R13	۰.۱	۳۰.۸	۰.۲۴	۳۰.۸
R14	۰.۱	۳۰.۸	۰.۳	۳۰.۸
R15	۰.۱	۱۳۳.۱	۰.۱۷۱	۱۳۳.۱
R16	۰.۱	۶۰.۵	۰.۲۰۵	۶۰.۵
R17	۰.۱	۷۴.۸	۰.۲۳	۷۴.۸
R18	۰.۱	۷۴.۸	۰.۲۱۱	۷۴.۸
R19	۰.۱	۵۱.۷	۰.۲۲	۵۱.۷
R20	۰.۱	۱۳۲	۰.۱۹۳	۱۳۲
R21	۰.۱	۴۹.۵	۰.۲۴۲	۴۹.۵
R22	۰.۱	۳۶.۳	۰.۲۰۱	۳۶.۳
R23	۰.۱	۴۵.۱	۰.۲۱۲	۴۵.۱
R24	۰.۱	۹۲.۴	۰.۲۴۷	۹۲.۴
R25	۰.۱	۱۳۶.۴	۰.۲۳۷	۱۳۶.۴
R26	۰.۱	۱۱	۰.۳	۱۱
R27	۰.۱	۴۸.۴	No Need (Radial Branch)	
R28	۰.۱	۱۳.۲	No Need (Radial Branch)	
R29	۰.۱	۱۱	۰.۳	۱۱

جدول (۶): زمان بهینه عملکرد رله‌ها در Configuration ۱۵ (ثابته):

متصل به شبکه

Fault Location	p	b1	b2	b3
F15	R5 ۰.۱۲۹	R6 -	R7 ۰.۳۷۶	-
F16	R8 ۰.۱۸۵	R9 -	R10 ۰.۴۷۷	R11 ۰.۴۶۷
F17	R6 -	R7 -	-	-
F18	R10 ۰.۱۷۲	R9 -	R11 ۰.۴۴۶	-
F19	R7 ۰.۱۲۹	R6 -	-	-
F20	R17 ۰.۱۸۴	R16 ۰.۴۴۸	-	-
F21	R13 ۰.۱۵۶	R12 ۰.۳۵۸	-	-
F22	R2 ۰.۳۴۲	R1 ۱.۲۴	R3 ۴.۶۳۸	R4 ۰.۴۴
F23	R1 ۰.۱۴۲	R2 ۰.۳۴۶	R3 ۰.۸۹۲	R4 ۰.۳۵۸
F24	R3 ۰.۱۰۷	R1 ۰.۸۳۲	R2 ۰.۳۷	-
F25	R4 ۰.۱۴۵	R1 ۰.۸۹۶	R2 ۰.۴۲۸	R3 ۰.۵۰۶
F26	R11 ۰.۱۵۷	R9 -	R10 ۰.۴۸۷	-
F27	R24 ۰.۱۸	R22 ۰.۵۴۷	R23 ۰.۳۶۹	-
F28	R16 ۰.۱۵۳	R20 ۰.۶۷۲	-	-
F29	R17 ۰.۱۴۳	R20 ۰.۶۳۷	R26 ۰.۸۹۹	-
F30	R28 ۰.۱۶۲	R29 ۰.۷۱۷	-	-

جدول (۹): زمان عملکرد رله‌ها در Configuration ۱ (ثانیه): جزیره‌ای

Fault Location	p	b1	b2	b3
F15	R۰	R۶	R۷	-
	۰.۱۴۲	۰.۴۲۶	۰.۴۰۱	-
F16	R۸	R۹	R۱۰	R۱۱
	۰.۱۷۶	۰.۳۸۸	۰.۵۳۴	۰.۴۸۹
F17	R۶	R۷	-	-
	۰.۰۹۵	۰.۳۷۹	-	-
	R۹	R۱۰	R۱۱	-
	۰.۰۹۸	۰.۵۰۵	۰.۴۵۱	-
F18	R۱۰	R۹	R۱۱	-
	۰.۱۲۷	۰.۳۸۴	۰.۴۶۷	-
	R۱۶	R۱۷	-	-
	۰.۱۴۵	۰.۴۹۳	-	-
F19	R۷	R۶	-	-
	۰.۱۱۳	۰.۴۱۵	-	-
	R۱۲	R۱۳	-	-
	۰.۱۲۱	۰.۳۷۲	-	-
F20	R۱۷	R۱۶	-	-
	۰.۱۴۱	۰.۳۶۷	-	-
	R۱۸	R۱۹	-	-
	۰.۱۶۱	۰.۳۸۷	-	-
F21	R۱۳	R۱۲	-	-
	۰.۱۰۹	۰.۳۰۹	-	-
	R۱۴	R۱۵	-	-
	۰.۱	۰.۴۱	-	-
F22	R۲	R۱	R۳	R۴
	۰.۱۲۶	۰.۷۵۴	۱.۴۵۶	-
	R۱۹	R۱۸	-	-
	۰.۱۳۳	۰.۳۸۶	-	-
F23	R۱	R۲	R۳	R۴
	۰.۱۷۵	۰.۴۳۵	۱.۱۷۸	-
	R۱۵	R۱۴	-	-
	۰.۱۷۸	۰.۴۴۹	-	-
F24	R۳	R۱	R۲	-
	۰.۱۹۶	۰.۶۳۷	۰.۴۳۵	-
	R۲۰	R۲۱	-	-
	۰.۳۵	-	-	-
F25	R۴	R۱	R۲	R۳
	-	-	-	-
	R۲۱	R۲۰	-	-
	-	-	-	-
	R۲۳	R۲۲	R۲۴	-
	-	-	-	-
F26	R۱۱	R۹	R۱۰	-
	۰.۱۰۷	۰.۴	۰.۵۵۶	-
	R۲۲	R۲۴	R۲۳	-
	۰.۱۵۲	۰.۶۶۷	-	-
F27	R۲۴	R۲۲	R۲۳	-
	۰.۱۹۳	۰.۳۴۸	-	-
	R۲۵	R۲۶	-	-
	۰.۲۲۱	۰.۴۵۷	-	-
F28	R۲۶	R۲۵	-	-
	۰.۰۸۶	۰.۱۱۴	-	-
	R۲۹	-	-	-
	۰.۰۹۹	-	-	-
F29	R۲۷	R۲۵	R۲۶	-
	۰.۱۶	۰.۱۰۲	۰.۴۷۳	-
F30	R۲۸	R۲۹	-	-
	۰.۱۲۳	۰.۴۲۶	-	-

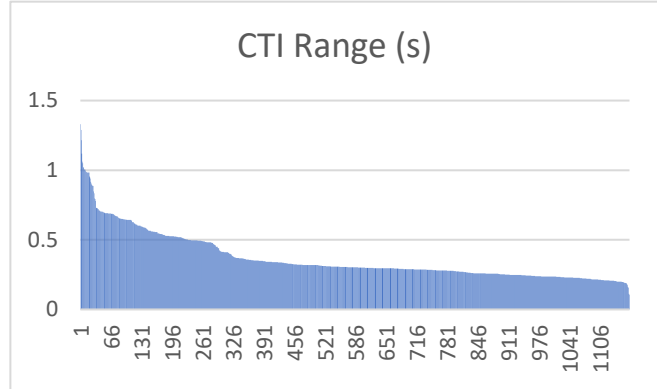
جدول (۸): زمان عملکرد رله‌ها در Configuration ۲ (ثانیه): جزیره‌ای

Fault Location	p	b1	b2	b3
F15	R۰	R۶	R۷	-
	۰.۱۴۲	۰.۴۲۷	۰.۴۰۱	-
F16	R۸	R۹	R۱۰	R۱۱
	۰.۱۷۵	۰.۳۹۱	۰.۵۴۲	۰.۴۶۵
F17	R۶	R۷	-	-
	۰.۰۹۵	۰.۳۸۱	-	-
	R۹	R۱۰	R۱۱	-
	۰.۰۹۷	۰.۵۰۸	۰.۴۴	-
F18	R۱۰	R۹	R۱۱	-
	۰.۱۲۷	۰.۳۸۵	۰.۴۶۵	-
	R۱۶	R۱۷	-	-
	۰.۱۴۵	۰.۴۹۴	-	-
F19	R۷	R۶	-	-
	۰.۱۱۴	۰.۴۱۹	-	-
	R۱۲	R۱۳	-	-
	۰.۱۲	۰.۳۶۶	-	-
F20	R۱۷	R۱۶	-	-
	۰.۱۴۲	۰.۳۷۲	-	-
	R۱۸	R۱۹	-	-
	۰.۱۵۷	۰.۳۷۸	-	-
F21	R۱۳	R۱۲	-	-
	۰.۱۱	۰.۳۱۶	-	-
	R۱۴	R۱۵	-	-
	۰.۰۹۶	۰.۳۷۴	-	-
F22	R۲	R۱	R۳	R۴
	۰.۱۲	۱.۱۱۱	۱.۱۰۴	۰.۴۵۹
	R۱۹	R۱۸	-	-
	۰.۱۳۵	۰.۳۹۳	-	-
F23	R۱	R۲	R۳	R۴
	۰.۱۵۴	۰.۴۶۱	۰.۸۴۳	۰.۳۵۴
	R۱۵	R۱۴	-	-
	۰.۱۸۲	۰.۴۶۲	-	-
F24	R۳	R۱	R۲	-
	۰.۱۴۷	۰.۶۷۲	۰.۴۶۷	-
	R۲۰	R۲۱	-	-
	۰.۱۹۵	۰.۴۳۳	-	-
F25	R۴	R۱	R۲	R۳
	۰.۱۷۸	۰.۶۷۵	۰.۴۷۳	۰.۶۷۲
	R۲۱	R۲۰	-	-
	۰.۱۲۵	۰.۴۲۷	-	-
	R۲۳	R۲۲	R۲۴	-
	۰.۱۴۲	۰.۳۳۷	۰.۶۷	-
F26	R۱۱	R۹	R۱۰	-
	۰.۱۱۱	۰.۴۱۱	۰.۵۹۲	-
	R۲۲	R۲۴	R۲۳	-
	۰.۱۳۱	۰.۷۳۲	۰.۴۲	-
F27	R۲۴	R۲۲	R۲۳	-
	۰.۱۶۸	۰.۴۱۶	۰.۳۹۷	-
	R۲۵	R۲۶	-	-
	۰.۲۲۱	۰.۴۵۷	-	-
F28	R۲۶	R۲۵	-	-
	۰.۰۸۴	۰.۲۲۷	-	-
	R۲۹	-	-	-
	۰.۰۹۹	-	-	-
F29	R۲۷	R۲۵	R۲۶	-
	۰.۱۵۷	۰.۷۱۳	۰.۴۷۸	-
F30	R۲۸	R۲۹	-	-
	۰.۱۲۳	۰.۴۲	-	-

رله اصلی R<sup>۱۰</sup> (سبز) با رله پشتیبان خود R<sup>۱۱</sup> (قهوه‌ای) هماهنگ می‌باشد. باید توجه نمود R<sup>۹</sup> (آبی آسمانی) در این حالت دارای زمان عملکرد نمی‌باشد و با بزرگ‌نمایی تصویری، این مهم کاملاً مشخص می‌گردد. همچنین رله اصلی R<sup>۱۶</sup> (آبی) با رله پشتیبان خود R<sup>۱۷</sup> (قرمز) در هماهنگی کامل می‌باشد. با بزرگ‌نمایی تصویری زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان قابل مشاهده می‌باشد. امیدانس خطای مورد آزمایش ۱۰ اهم لحاظ شده است. در شکل (۱۰) نشان داده شده است که برای خطای رخ داده در گره مجازی F<sup>۲۳</sup> در Configuration<sup>۲۹</sup> که تمامی DG ها و خطوط در مدار قرار دارند و شبکه در حالت جزیره‌ای کار می‌کند؛ رله اصلی R<sup>۱</sup> (آبی) با رله‌های پشتیبان خود R<sup>۲</sup> (آبی آسمانی)، R<sup>۳</sup> (قرمز) و R<sup>۴</sup> (سبز) و رله اصلی R<sup>۱۵</sup> (قهوه‌ای) با رله پشتیبان خود R<sup>۱۴</sup> (صورتی) در هماهنگی کامل می‌باشد. شبیه‌سازی‌های مختلف نشان می‌دهد که CTI قابل قبولی در عملکرد رله‌های متناظر برای انواع خطاهای با امیدانس پایین و خطاهای HIF وجود دارد. با بزرگ‌نمایی تصویری، زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان قابل مشاهده می‌باشد. امیدانس خطای مورد آزمایش ۵ اهم لحاظ شده است. در شکل (۱۱) برای خطای رخ داده در گره مجازی F<sup>۲۳</sup> در حالتی که تمامی DG ها در مدار قرار دارند و خط ۲۵ از مدار خارج شده است (Configuration<sup>۵۱</sup>) و شبکه در حالت جزیره‌ای کار می‌کند؛ رله اصلی R<sup>۱</sup> (آبی) با رله‌های پشتیبان خود R<sup>۲</sup> (آبی آسمانی)، R<sup>۳</sup> (قرمز) و R<sup>۴</sup> (سبز) و رله اصلی R<sup>۱۵</sup> (قهوه‌ای) با رله پشتیبان خود R<sup>۱۴</sup> (صورتی) در هماهنگی کامل می‌باشد. با بزرگ‌نمایی تصویری، زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان قابل مشاهده می‌باشد. به دلیل خروج خط ۲۵ رله R<sup>۴</sup> در شکل عملکرد ندارد. امیدانس خطای مورد آزمایش ۵ اهم لحاظ شده است.

## ۸- نتیجه گیری

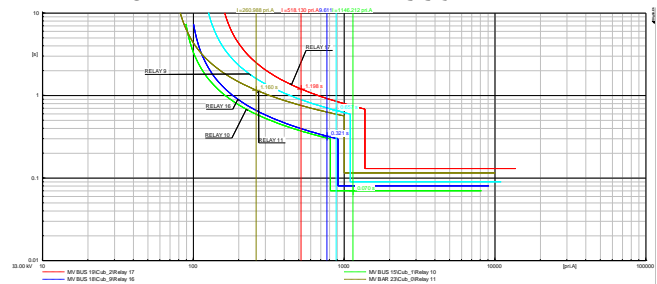
با تغییر مد کاری ریز شبکه از حالت متصل به شبکه به حالت کارکردی جزیره‌ای سطح جریان‌های اتصال کوتاه تغییر می‌کنند. همچنین ورود و خروج مولدها و همچنین خروج خطوط در سطح ریز شبکه، توپولوژی شبکه را تغییر می‌دهد. تدوین طرح حفاظتی تطبیقی با لحاظ نمودن اثرات تغییر در توپولوژی شبکه می‌تواند راهکاری مطمئن در جهت رسیدن به حفاظت موثر باشد. در این مقاله نشان داده شد که با استفاده از رله‌های دارای قابلیت دو تنظیمه و با داشتن قابلیت تنها دو گروه تنظیمی، می‌توان نسبت به حفاظت تطبیقی موثر ریز شبکه در تمامی حالات شبکه اقدام نمود. حفاظت تطبیقی هر چند نیازمند سیستم مخابراتی است، مزایایی دارد که حفاظت غیر تطبیقی از آن بی‌بهره است.



شکل (۷): محدوده CTI در کلیه مدهای کاری جزیره‌ای

## ۷- تست نتایج با نرم افزار DigSILENT

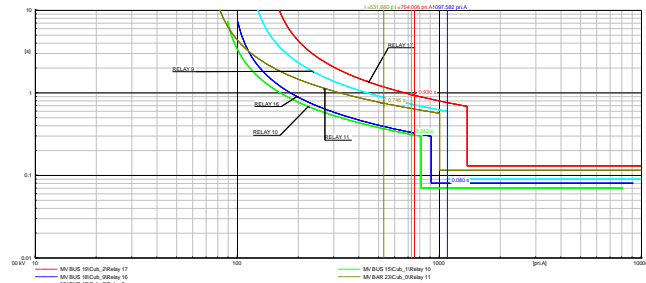
برای تست نتایج حاصله با نرم افزار DigSILENT و صحت سنجی آن، در نرم افزار از منحنی مشخصه رله inverse ۳-۲۵۵ IEC استفاده شده است. ضرایب این منحنی مشخصه همان ضرایب مندرج در ردیف ۲ جدول (۱) می‌باشند. شکل (۸) نشان می‌دهد برای خطای رخ داده در گره مجازی F<sup>۱۸</sup> در شکل (۳) و در Configuration<sup>۱</sup> که تمامی DG ها و خطوط در مدار قرار دارند و ریز شبکه به شبکه بالادست متصل است؛ رله اصلی R<sup>۱۰</sup> (سبز) با رله‌های پشتیبان خود R<sup>۱۱</sup> (قهوه‌ای) و R<sup>۹</sup> (آبی آسمانی) و همچنین رله اصلی R<sup>۱۶</sup> (آبی) با رله پشتیبان خود R<sup>۱۷</sup> (قرمز) در هماهنگی کامل می‌باشد. شبیه‌سازی‌های مختلف نشان می‌دهد که CTI قابل قبولی در عملکرد رله‌های متناظر برای انواع خطاهای با امیدانس پایین<sup>۱۷</sup> و خطاهای HIF<sup>۱۸</sup> وجود دارد. با بزرگ‌نمایی تصویری زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان قابل مشاهده می‌باشد. امیدانس خطای مورد آزمایش ۱۰ اهم لحاظ شده است. همچنین در شکل (۹) نشان داده شده است که برای خطای رخ داده در گره مجازی F<sup>۱۸</sup> در حالتی که تمامی DG ها در مدار قرار دارند و خط ۱۷ از مدار خارج شده است (Configuration<sup>۱۵</sup>) و ریز شبکه به شبکه بالادست متصل است؛



شکل (۸): عملکرد رله‌های اصلی با رله‌های پشتیبان در خطای F<sup>۱۸</sup> در Configuration<sup>۱</sup>

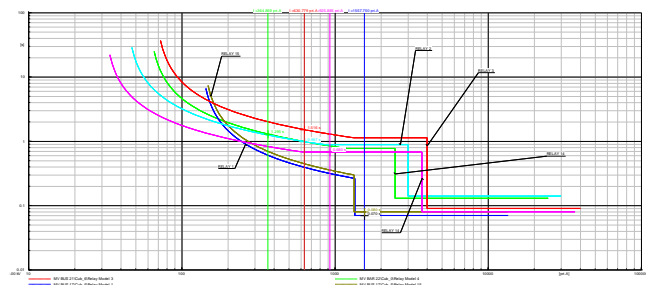
## مراجع

- [۱] A. J. Urdaneta, H. S. M. Restrepo and J. Sanchez, "Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming," *IEEE Transaction on Power Delivery*, ۱۱(۱), pp. ۱۲۲-۱۲۹, ۱۹۹۶.
- [۲] A. Noghabi, H. Mashhadi and J. Sadeh, "Optimal coordination of directional overcurrent relays considering different network topologies using interval linear programming," *IEEE Transaction on Power Delivery*, ۲۵ (۳), pp. ۱۳۴۸-۱۳۵۴, ۲۰۱۰.
- [۳] W. El-khattam and T. S. Sidhu, "Resolving the impact of distributed renewable generation on directional overcurrent relay coordination: a case study," *IET Renew. Power Gener.*, ۳(۴), pp. ۴۱۵-۴۲۵, ۲۰۰۹.
- [۴] W. El-Khattam and T. S. Sidhu, "Restoration of Directional Overcurrent Relay Coordination in Distributed Generation Systems Utilizing Fault Current Limiter," *IEEE Transaction on Power Delivery*, ۲۳ (۷), pp. ۵۷۶-۵۸۵, ۲۰۰۸.
- [۵] A. Yazdaninejadi, S. Golshannavaz, D. Nazarpour, S. Teimourzadeh, and F. Aminifar, "Dual-Setting directional overcurrent relays for protecting automated distribution networks," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. ۱۵, no. ۲, pp. ۷۳۰-۷۴۰, Feb. ۲۰۱۹.
- [۶] E. Purwar, D. N. Vishwakarma, and S. P. Singh, "A novel constraints reduction-based optimal relay coordination method considering variable operational status of distribution system with DGs," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. ۱۰, no. ۱, pp. ۸۸۹-۸۹۸, Jan. ۲۰۱۹.
- [۷] F. Albasri, A. Alroomi and J. Talaq, "Optimal coordination of directional overcurrent relays using biogeography-based optimization algorithm," *IEEE Transaction Power Delivery*, ۳۰ (۴), pp. ۱۸۱۰-۱۸۲۰, ۲۰۱۵.
- [۸] M. Singh, B. Panigrahi and A. Abhyankar, "Optimal coordination of directional over-current relays using teaching learning-based optimization (tlbo) algorithm," *International Journal of Electrical and Power Energy Systems.*, vol. ۵۰, pp. ۳۳-۴۱, ۲۰۱۳.
- [۹] M. A. Zamani, S. T. Sidhu and A. Yazdani, "A protection strategy and microprocessor-based relay for low-voltage Microgrids," *IEEE Transaction on Power Delivery*, ۲۶ (۲), pp. ۱۸۷۳-۱۸۸۳, ۲۰۱۱.
- [۱۰] K. A. W. Najy, H. H. Zeineldin and W. L. Woon, "Optimal protection coordination for microgrids with grid connected and islanded capability," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, ۶۰ (۴), pp. ۱۶۶۸-۱۶۷۷, ۲۰۱۳.
- [۱۱] E. Dehghanpour, H. Kazemi-Karegar, R. Kheirollahi and T. Soleymani, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent relays in Microgrids by Using Cuckoo-Linear Optimization Algorithm and Fault Current Limiter," *IEEE Transaction on Smart Grid*, ۹ (۲), pp. ۱۳۶۵-۱۳۷۵, ۲۰۱۸.
- [۱۲] H. M. Sharaf, H. H. Zeineldin, and E. El-Saadany, "Protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capabilities using communication assisted dual setting directional overcurrent relays," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. ۹, no. ۱, pp. ۱۴۳-۱۵۱, Jan. ۲۰۱۸.
- [۱۳] N. El-Naily, S. M. Saad, T. Hussein, and F. A. Mohamed, "A novel constraint and non-standard characteristics for optimal

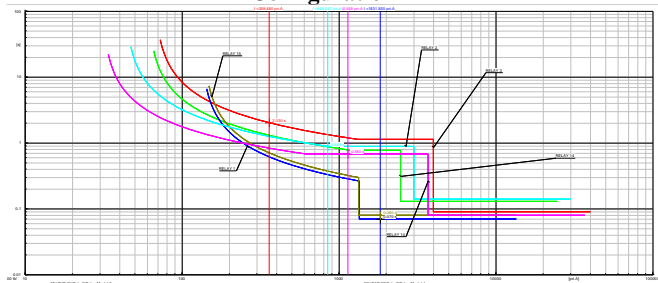


شکل (۹): عملکرد رله های اصلی با رله های پشتیبان در خطای F۱۸ در Configuration ۱۵

یکی از مزایای مهم آن این است که در زمان رخداد خطا در سطح ریز شبکه به دلیل رفع سریع خطا که ناشی از عملکرد سریع رله‌ها می باشد، از ورود آسیب به تجهیزات ارزشمند شبکه از قبیل ترانسفورماتورهای قدرت، مولدها و کلیدها پیشگیری می گردد. همچنین رفع سریع خطا باعث می گردد قبل از زمان بحرانی ژنراتورهای سنکرون و شروع ناپایداری آنها، خطا رفع شده و بدین طریق از خروج ناخواسته آنها پیش گیری شود. علاوه بر موارد ذکر شده، رفع سریع خطا باعث می گردد قبل از رسیدن به اتمام زمان LVRT نیروگاه‌هایی که با اینورتر به شبکه متصل می گردند (بخصوص نیروگاه‌های بادی)، خطا رفع شده و بدین طریق از خروج ناخواسته آنها نیز پیش گیری شود.



شکل (۱۰): عملکرد رله‌های اصلی با رله‌های پشتیبان در خطای F۲۳ در Configuration ۲۹



شکل (۱۱): عملکرد رله‌های اصلی با رله‌های پشتیبان در خطای F۲۳ در Configuration ۵۱

- [۲۴] A. H. Ataee-Kachoei, H. Hashemi-Dezaki and A. Ketabi, "Optimal adaptive protection of smart grids using high-set relays and smart selection of relay tripping characteristics considering different network configurations and operation Configurations," *IET Generation, Transmission & Distribution*, PP. ۵۰۸۴-۵۱۱۶, ۲۰۲۲.
- [۲۵] A. M. Entekhabi-Nooshabadi, H. Hashemi-Dezaki and S. A. Taher, "Optimal microgrid's protection coordination considering N-1 contingency and optimum relay characteristics," *Appl. Soft Comput.* ۹۸, ۱۰۶۷۴۱, ۲۰۲۱.
- [۲۶] S. Sadeghi, H. Hashemi-Dezaki and A. M. Entekhabi-Nooshabadi, "Optimized protection coordination of smart grids considering N-1 contingency based on reliability oriented probability of various topologies," *Electr. Power Syst. Res.* ۲۱۳, ۱۰۸۷۳۷, ۲۰۲۲.
- [۲۷] A. H. Ataee-Kachoei, H. Hashemi-Dezaki and A. Ketabi, "Optimal Protective Coordination of Microgrids Considering N-1 Contingency Using Dual Characteristics Directional Overcurrent Relays," *International Conference on Protection and Automation of Power Systems (IPAPS)*. Vol. ۱۶. IEEE, ۲۰۲۲.
- [۲۸] T. S. Aghdam, H. Kazemi Karegar and H. H. Zeineldin, "Optimal coordination of double-inverse overcurrent relays for stable operation of DGs," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. ۱۵, no. ۱, pp. ۱۸۳-۱۹۲, ۲۰۱۹.
- [۲۹] H. Aghaei and H. Hashemi-Dezaki, "Optimal communication aided protection of meshed smart grids considering stability constraints of distributed generations incorporating optimal selection of relay characteristics," *IET Renew. Power Gener.* ۱۶, ۲۳۱۳-۲۳۳۷, ۲۰۲۲.
- [۳۰] A. Saber, H. H. Zeineldin, T. H. El-Fouly and A. Al-Durra, "Overcurrent protection coordination with flexible partitioning of active distribution systems into multiple microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume ۱۵۱, ۱۰۹۲۰۵, ۲۰۲۳.
- [۳۱] R. Sitharthan, M. Geethanjali and T. K. S. Pandey, "Adaptive protection scheme for smart Microgrid with electronically coupled distributed generations," *Elsevier, Alexandria Engineering Journal*, ۵۵(۳), pp. ۲۵۳۹-۲۵۵۰, ۲۰۱۶.
- [۳۲] Univ. Washington, Power Systems Test Case Archive, Seattle, WA. Mar. ۲۰۰۶, <http://www.ee.washington.edu/research.Object>
- over-current relays coordination to enhance microgrid protection scheme," *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. ۱۳, no. ۶, pp. ۷۸۰-۷۹۳, ۲۰۱۹.
- [۱۴] R. Tiwari, R. K. Singh, and N. K Choudhary, "Optimal coordination of dual setting directional over current relays in microgrid with different standard relay characteristics," in *Proc. IEEE 9th Power India Int. Conf.*, pp. ۱-۶, ۲۰۲۰.
- [۱۵] F. Alasali, E. Zarour, W. Holderbaum and K. N. Nusair, "Highly Fast Innovative Overcurrent Protection Scheme for Microgrid Using Metaheuristic Optimization Algorithms and Nonstandard Tripping Characteristics," *IEEE Access Journal Article*, Vol ۱۰, pp. ۴۲۲۰۸-۴۲۲۳۱, ۲۰۲۲.
- [۱۶] F. Alasali, N. El-Naily, E. Zarour, and S. M. Saad, "Highly sensitive and fast microgrid protection using optimal coordination scheme and nonstandard tripping characteristics," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. ۱۲۸, Jun. Art. no. ۱۰۶۷۵۶, ۲۰۲۱.
- [۱۷] S. D. Saldarriaga-Zuluaga, J. M. López-Lezama and N. Muñoz-Galeano, "Adaptive protection coordination scheme in microgrids using directional over-current relays with non-standard characteristics," *Heliyon* 7, ۴, ۲۰۲۱.
- [۱۸] H. Beder, B. Mohandes, M.S. El Moursi, E.A. Badran and M.M. El-Saadawi, "A New Communication-Free Dual Setting Protection Coordination of Microgrid," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. ۳۶, No. ۴, ۲۰۲۱.
- [۱۹] A. H. Ataee-Kachoei, H. Hashemi-Dezaki and A. Ketabi, "Optimal Protection Coordination of Dual-Setting Directional Overcurrent Relays Based on Three-point Coordination Strategy," *IEEE 11th Smart Grid Conference (SGC)*, ۲۰۲۱.
- [۲۰] A. Sharma and B. K. Panigrahi, "Optimal relay coordination suitable for grid-connected and islanded operational Configurations of Microgrid," *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, pp. ۱-۶, ۲۰۱۵.
- [۲۱] A. Sharma and B. K. Panigrahi, "Phase Fault Protection Scheme for Reliable Operation of Microgrids," *IEEE Transaction on Industry Applications*, ۵۴ (۳), pp. ۲۶۴۶-۲۶۵۵, ۲۰۱۸.
- [۲۲] K. A. Saleh, H. H. Zeineldin and E. F. El-Saadany, "Optimal protection coordination for Microgrids Considering N-1 contingency," *IEEE Trans. Ind. Inf.* ۱۳ (۵), ۲۲۷۰-۲۲۷۸, ۲۰۱۷.
- [۲۳] A. H. Ataee-Kachoei, H. Hashemi-Dezaki, and A. Ketabi, "Optimized adaptive protection coordination of microgrids by dual-setting directional overcurrent relays considering different topologies based on limited independent relays" setting groups," *Elsevier Electric Power Systems Research*, Volume ۲۱۴, Part A, ۱۰۸۸۷۹, ۲۰۲۳.

### زیر نویس‌ها

- <sup>۱</sup> Reverse Direction
- <sup>۱۱</sup> Group Setting
- <sup>۱۲</sup> Miscoordination
- <sup>۱۳</sup> Coordination Time Interval
- <sup>۱۴</sup> Combined Heat and Power
- <sup>۱۵</sup> N-1 Contingency
- <sup>۱۶</sup> Nonlinear Programming
- <sup>۱۷</sup> Bolted Fault
- <sup>۱۸</sup> High Impedance Fault

- <sup>۱</sup> Particle Swarm Optimization
- <sup>۲</sup> Fault Current Limiter
- <sup>۳</sup> Meshed or Looped Microgrids
- <sup>۴</sup> Nuisance Tripping
- <sup>۵</sup> Classic Synchronous Generator
- <sup>۶</sup> Low Voltage Ride Through
- <sup>۷</sup> Unwanted Islanding
- <sup>۸</sup> Time Multiplier Setting
- <sup>۹</sup> Dual Setting