

Simulation and Modeling of Optimal Protective Coordination of Overcurrent Relays for the Integration of Distributed Generation Sources in Distribution Systems

Hamidreza Sezavar¹, Assistant Professor, Saeed Hasanzadeh¹, Associate Professor

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

Abstract:

The performance of overcurrent relays is crucial in fault detection and protection of power networks. With the increasing integration of Distributed Generation (DG) sources into distribution networks, new challenges have emerged in the operation of these relays. The presence of DG sources can reduce fault currents, leading to delays in relay operation. This delay can potentially cause damage to existing equipment due to the prolonged fault in the network. Additionally, DG sources may cause malfunctions in relays, resulting in the disconnection of a healthy feeder instead of the faulty one. This paper introduces and models an algorithm that allows the integration of DG sources into the network without altering the overcurrent relay settings. The goal of this algorithm is to determine the optimal location for connecting DG sources to the network. In this study, the proposed algorithm was implemented in MATLAB, and the model was validated using DigSilent software. The results of this research can contribute to optimizing the performance of distribution systems and mitigating issues related to network protection with the presence of distributed generation sources.

Keywords: Overcurrent relays, Distributed generation, Fault detection, Power system, Algorithm modeling

Received: 2 November 2024

Revised: 21 December 2024

Accepted: 14 January 2024

Corresponding Author: Dr. Hamidreza Sezavar, sezavar@qut.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1192288>



فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

شبیه‌سازی و مدلسازی هماهنگی حفاظتی بهینه رله‌های اضافه جریان به منظور ورود منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع

حمیدرضا سزاوار^۱، استادیار، سعید حسن زاده^۱، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

چکیده: عملکرد رله‌های اضافه جریان در تشخیص و حفاظت شبکه‌های قدرت از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به گسترش منابع تولید پراکنده (DG) در شبکه‌های توزیع، چالش‌های جدیدی در عملکرد این رله‌ها به وجود آمده است. حضور این منابع در شبکه می‌تواند باعث کاهش جریان خطا شده و در نتیجه باعث تأخیر در عملکرد رله‌ها گردد. این تأخیر می‌تواند منجر به آسیب به تجهیزات موجود در شبکه به دلیل تداوم خطا شود. همچنین، منابع تولید پراکنده می‌توانند باعث ایجاد اختلال در رله‌ها شوند، به طوری که رله‌هایی که به طور معمول باید فیدر معیوب را از شبکه جدا کنند، فیدر سالم را قطع کنند. این مقاله به معرفی و مدلسازی الگوریتمی می‌پردازد که با حفظ عملکرد صحیح رله‌های اضافه جریان، شرایط حضور منابع تولید پراکنده در شبکه را فراهم می‌کند. هدف این الگوریتم تعیین بهترین مکان برای اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه است. در این تحقیق، الگوریتم مدنظر در محیط متلب پیاده‌سازی و سپس صحت‌سنجی مدل در نرم‌افزار دیگسایلنت انجام شده است. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های توزیع انرژی و کاهش مشکلات مربوط به حفاظت شبکه‌های توزیع با حضور منابع تولید پراکنده کمک کند.

واژه‌های کلیدی: تشخیص خطا، تولید پراکنده، رله اضافه جریان، مدلسازی الگوریتم

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵

نویسنده‌ی مسئول: دکتر حمیدرضا سزاوار، sezavar@qut.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1192288>





۱- مقدمه

حفاظت^۱ نقشی اساسی در یک شبکه ی قدرت ایفا می کند. یکی از قسمت های مهم حفاظت شبکه های قدرت رله های اضافه جریان^۲ هستند. یکی از اصول مهم استفاده از این رله ها تنظیم و هماهنگی دقیق آن ها با یکدیگر است تا ضمانت اجرای صحیح و حفاظت دقیق شبکه را به وجود آورند [۱]. با توجه به گستردگی کنونی سیستم های قدرت و به خصوص نیازمندی تولید انرژی در شبکه های توزیع، ورود و تاثیر منابع تولید پراکنده^۳ در شبکه های نامبرده غیر قابل انکار است. ورود منابع تولید پراکنده به شبکه های قدرت، نه تنها باعث ایجاد تغییرات اساسی در نحوه توزیع بار و مدیریت انرژی می شود، بلکه تأثیر چشمگیری بر عملکرد رله های اضافه جریان نیز دارد [۲]. این منابع، به دلیل ویژگی های منحصر به فرد خود، می توانند در نحوه شناسایی و پاسخ دهی این رله ها به اضافه بارها تأثیر بگذارند. به ویژه، ممکن است تنظیمات زمانی رله ها، که برای تشخیص و قطع سریع مدار در شرایط بحرانی طراحی شده اند، تحت تأثیر تغییرات ایجاد شده توسط این منابع قرار گیرد و منجر به عدم کارایی یا تأخیر در عملکرد آن ها شود. در نتیجه، به دست آوردن و حفظ تنظیمات مناسب برای رله ها در حضور این منابع جدید، از اهمیت بالایی برخوردار است [۳]. در واقع در صورتیکه مدیریت صحیح در جایگذاری منابع تولید پراکنده صورت نگیرد، ورود آن ها به شبکه توزیع باعث به وجود آوردن اثرات منفی حفاظتی، به خصوص در حفاظت رله های اضافه جریان، می شود. به طور معمول حضور منابع تولید پراکنده می تواند در اندازه و یا جهت تولید جریان اتصال کوتاه تاثیر فراوانی بگذارد و باعث عملکرد غیر صحیح این رله ها شود [۴].

در [۵] یک مدل ریاضی بهینه به منظور هماهنگی ادوات حفاظتی در شبکه توزیع به همراه منابع انرژی توزیع شده که در دو حالت متصل به شبکه و جزیره ای کار می کنند، پیشنهاد شده است. نتایج این تحقیق نشان دهنده هماهنگی کافی دستگاه های حفاظتی غیر فعال و کم هزینه است. با توجه به نیاز به عملکرد منعطف ریز شبکه ها^۴ به همراه در دسترس بودن واحدهای تولید پراکنده، در [۶] یک طرح حفاظتی چندجهته با رله های اضافه جریان و یک استراتژی کنترلی جدید پیشنهاد شده است که به منظور حفاظت در برابر خطا در ریز شبکه ها توسعه داده شده است. در [۷] یک طرح حفاظتی برای ریز شبکه های جزیره ای مبتنی بر ژنراتورهای توزیع شده با رابط اینورتری ارائه شده است و در نهایت روی یک سیستم نمونه در سیستم توزیع شهری در کانادا با موفقیت تست شده است. در [۸] نمونه های از روش های حفاظتی مدرن بر پایه ی هماهنگی حفاظتی تطبیقی [۹] با استفاده از تکنیک های بهینه سازی^۵ [۱۰] مختلف استفاده شده است. در [۱۱] با توجه به انواع امان های حفاظتی، مناسب ترین و دقیق ترین ترکیب حفاظتی در ریز شبکه های مبتنی بر ژنراتور سنکرون بر اساس پارامتر حفظ پایداری نوسان اول، پیشنهاد شده است. با توجه به اهمیت حفاظت ریز شبکه ها، در [۱۲] مروری بر بهینه سازی هماهنگی رله در ریز شبکه ها انجام گرفته است و مطالعه ای کامل با توجه به اهمیت رویکردهای تطبیقی و هوشمند در این موضوع انجام گرفته است و همچنین در [۱۳] امکان سنجی استفاده از مجموعه تنظیمات حفاظتی در ریز شبکه ها و منابع تولید پراکنده، در دو حالت متصل به شبکه و جزیره ای بررسی و تحلیل شده است.

رله های اضافه جریان بایستی قادر باشند که بین حالت های عادی سیستم و غیر عادی آن تفاوت قائل شوند و معمولاً شرایط غیر عادی زمانی اتفاق می افتد که در شبکه خطایی رخ داده باشد. این رله ها بایستی ویژگی های یک حفاظت قوی از جمله سرعت حساسیت، دقت و ... را داشته باشند. معمولاً این رله ها را به دو صورت استفاده می کنند، اولیه و پشتیبان. در صورتی که رله ی اولیه به هر دلیلی نتواند به صورت صحیح عمل کند، رله های بعدی که به عنوان رله های پشتیبان هستند وارد عمل می شوند و با یک اختلاف زمانی خطا را برطرف می کنند [۱۴]. به منظور بهره برداری صحیح و همچنین قابلیت اطمینان بالا در رفع خطا میزان اختلاف زمانی عملکرد رله ها بایستی هماهنگ شود تا مواردی رخ ندهد که در آن رله ی پشتیبان به اشتباه و قبل از عملکرد رله ی اصلی عمل کند و این شرایط نباید در هیچ یک از حالت های سیستم رخ دهد. یکی از اثرات منفی حضور منابع تولید پراکنده در شبکه ی قدرت افزایش جریان اتصال کوتاه شبکه در برخی از خطاها و در بعضی از مکان های خطا می باشد [۱۵]. در این مواقع ممکن است حضور منابع تولید پراکنده باعث ایجاد اشکال در کلیدهای قدرت نیز شود. در بعضی از موارد وجود منابع تولید پراکنده موجب کاهش جریان عبوری از رله و در نتیجه باعث ایجاد تأخیر در عملکرد رله میشود و در نتیجه خطا در مدت زمان بیشتری در شبکه باقی می ماند و ممکن است به تجهیزات موجود در شبکه





صدمه وارد شود. در مواردی هم منابع تولید پراکنده موجب ایجاد خطا در رله‌هایی می‌شوند که نامربوط به خطا بوده و موجب می‌شود که فیدر سالم به جای فیدر معیوب از شبکه جدا شود. در این شرایط معمولاً تعویض رله‌های حفاظتی و یا تغییر آنها (به طور مثال استفاده از رله‌های جهتی^۲) موجب بهبود عملکرد حفاظتی می‌شود.

در این تحقیق، هدف اصلی ارائه مدلی است که به کمک الگوریتم‌های مناسب پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار متلب و دیگ سایننت، قابلیت‌ها و شرایط ورود مولدهای تولید پراکنده به شبکه‌های برق را بررسی کند. این مدل به گونه‌ای طراحی خواهد شد که ورود منابع تولید پراکنده به سیستم، هیچ‌گونه تأثیری بر سیستم‌های حفاظتی موجود نداشته باشد و همچنین رله‌های اضافه جریان دستخوش تغییرات یا تنظیمات جدید نشوند. به عبارتی، این تحقیق به دنبال آن است تا شرایط لازم برای حضور موفق و ایمن منابع انرژی تجدیدپذیر و دیگر انواع تولید پراکنده را شناسایی کند، به طوری که این منابع به راحتی و بدون ایجاد اختلال در عملکرد و ایمنی سیستم‌های حفاظتی، به شبکه برق اضافه شوند. در این راستا، پارامترهای مختلفی که ممکن است بر روی عملکرد رله‌ها و سیستم‌های حفاظتی تأثیر بگذارند، مطالعه خواهند شد و الگوهای مخصوصی برای شبیه‌سازی و ارزیابی کارایی این منابع در شرایط متنوع و مختلف طراحی خواهد شد. نتایج این تحقیق می‌تواند به مهندسان و طراحان سیستم‌های قدرت کمک کند تا با اطمینان بیشتری مولدهای تولید پراکنده را در شبکه‌های فعلی و آینده یکپارچه‌سازی کنند، بدون آنکه اصول ایمنی و پایداری شبکه به خطر بیفتد.

۲- بررسی و تحلیل مشکل ورود منبع تولید پراکنده

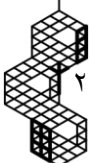
تنظیم و هماهنگ‌سازی وسایل حفاظتی در یک شبکه‌ی به هم پیوسته کاری پیچیده است. امروزه با افزایش استفاده از منابع تولید پراکنده و اتصال آن‌ها به شبکه‌های قدرت پیچیدگی دو چندان شده است. در این شرایط تلاش می‌شود که به دلایل اقتصادی از تعویض رله‌های حفاظتی، به خصوص رله‌های اضافه جریان، در هنگام حضور منابع تولید پراکنده جلوگیری شود. اما همانطور که اشاره شد، یکی از مشکلات اساسی در اینگونه موارد، برهم خوردن هماهنگی زمانی رله‌ها می‌باشد که باعث عملکرد ناصحیح آن‌ها در حضور منابع تولید پراکنده می‌شود. در شبکه‌های توزیع سنتی معمولاً در ابتدای فیدرها از رله‌های اضافه جریان استفاده می‌شود که با رله‌های در طول فیدر هماهنگی زمانی شده‌اند. با ورود منابع تولید پراکنده مشکلاتی برای هماهنگی رله‌ها به وجود می‌آید که ممکن است زمان قطع رله‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. معمولاً یکی از مشکلات حضور منابع تولید پراکنده، عدم دسترسی و یا کاهش دسترسی رله‌ی ابتدای فیدر به نقاط پایین دستی و یا انتهای فیدری است که در آن منابع تولید پراکنده قرار دارد. یکی از نکات دیگری که باعث بروز اشتباه در عملکرد رله‌های اضافه جریان می‌شود، ایجاد خطا در سایر فیدرها است که ممکن است به اشتباه فیدر متصل به منابع تولید پراکنده نیز قطع دهد و همچنین افزایش سطح اتصال کوتاه و تأثیر روی عملکرد کلیدهای متصل به باسبارها نیز می‌تواند یکی دیگر از دلایل به خطر افتادن حفاظت صحیح شبکه باشد.

۲-۱- کاهش دسترسی و افزایش زمان عملکرد رله‌ی ابتدای فیدر

شکل ۱ قسمتی از یک شبکه را نشان می‌دهد که در حالت عدم حضور منابع تولید پراکنده رله A در ابتدای فیدر قرار گرفته است. تنظیم مناسب برای این رله در هنگام ایجاد خطای اتصال کوتاه سه فاز در نظر گرفته شده است. در صورتی که منابع تولید پراکنده وارد شبکه شود می‌توان نشان داد که بخشی از سهم جریان اتصال کوتاه شبکه را منابع تولید پراکنده تولید می‌کند و این باعث کاهش جریان اتصال کوتاه گذرنده از رله‌ی ابتدای فیدر می‌شود و در واقع افزایش زمان عملکرد رله ابتدای فیدر را به همراه دارد که این افزایش زمان عملکرد باعث ایجاد صدمه به تجهیزات موجود در شبکه می‌شود.

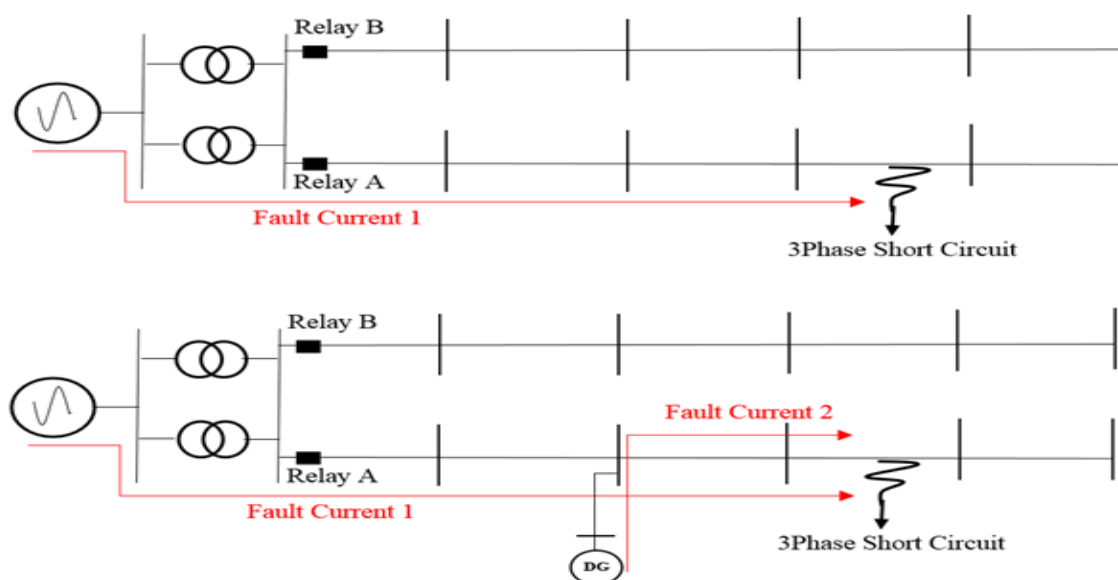
۲-۲- تغذیه معکوس منابع تولید پراکنده تولید کننده در حالت ایجاد خطا در فیدر دیگر

در زمانی که خطای اتصال کوتاه در فیدری غیر از فیدر مربوط به منابع تولید پراکنده ایجاد می‌شود، یکی از منابع تولید پراکنده تغذیه خطا خود منابع تولید پراکنده است. در صورتیکه رله‌های ابتدایی فیدر از نوع جهتی نباشند رله‌ی متصل به ابتدای فیدر منابع تولید

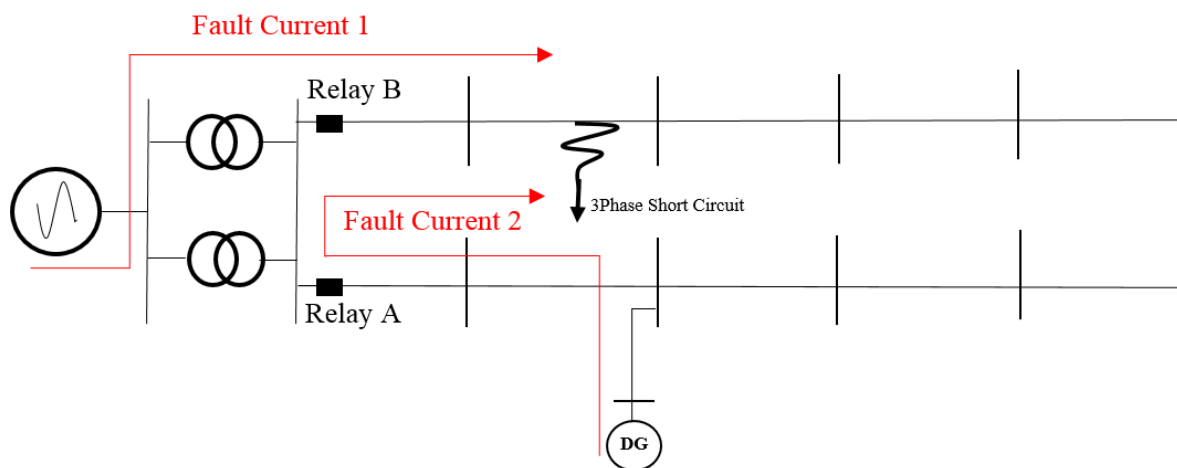




پراکنده ممکن است به اشتباه قطع بدهد. شکل ۲ نشان می دهد که در صورت ایجاد خطا باید هماهنگی حفاظتی بین رله های A, B برقرار شود در این حالت نباید ظرفیت منابع تولید پراکنده از حدی افزایش یابد تا باعث ایجاد اختلال در عملکرد این رله ها نشود.



شکل (۱): تغذیه مستقیم منبع تولید پراکنده و تاثیر آن روی عملکرد رله



شکل (۲): تغذیه معکوس منبع تولید پراکنده و تاثیر آن روی عملکرد رله

۲-۳- افزایش سطح اتصال کوتاه

یکی از نکات مهم که همواره در شبکه های قدرت در حضور منابع تولید پراکنده با آن روبه رو هستیم، افزایش سطح اتصال کوتاه شبکه است. افزایش جریان اتصال کوتاه باعث عملکرد ناصحیح کلیدهای قدرت متصل به باسبارها می شود و ممکن است به این کلیدها آسیب های جدی وارد شود. ورود منابع تولید پراکنده به شبکه باعث تغییر در جهت و اندازه ی جریان اتصال کوتاه عبوری از خطوط می شود. در شبکه های سنتی، معمولاً اندازه گیری میزان جریان اتصال کوتاه نامی شبکه، تنها از میزان جریان تامین شده از باسبار مرجع





بدست آمده است. اما در هنگام اضافه شدن منابع تولید پراکنده به شبکه، این میزان جریان ناشی از خود منابع تولید پراکنده نیز می‌باشد. بنابراین باید با توجه به اندازه و مکان منابع تولید پراکنده، مراقب بود تا میزان جریان اتصال کوتاه شبکه از میزان نامی آن فراتر نرود.

۳- آنالیز خطا

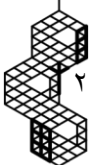
به منظور طراحی یک الگوریتم مناسب برای رفع مشکلات اشاره شده در قسمت ۲ ابتدا باید مکان و امپدانس خطا را در شبکه محاسبه کنیم. زمان عملکرد و یا زمان قطع رله‌های اضافه جریان وابسته به جریان گذرنده از رله است. این جریان در شرایط مختلف متفاوت است. این شرایط شامل محل خطا، نوع خطا، امپدانس خطا و همچنین تعداد منابع تولید پراکنده تامین‌کننده خطا است. بنابراین برای محاسبه عملکرد زمان رله‌ها باید انواع شرایط خطا در شبکه مورد ارزیابی قرار بگیرد تا بتوان با توجه به تمام شرایط ذکر شده، شرایطی را فراهم کرد که رله‌ها عملکردی صحیح و مناسب برای برخورد با خطا و حفاظت از شبکه را داشته باشند.

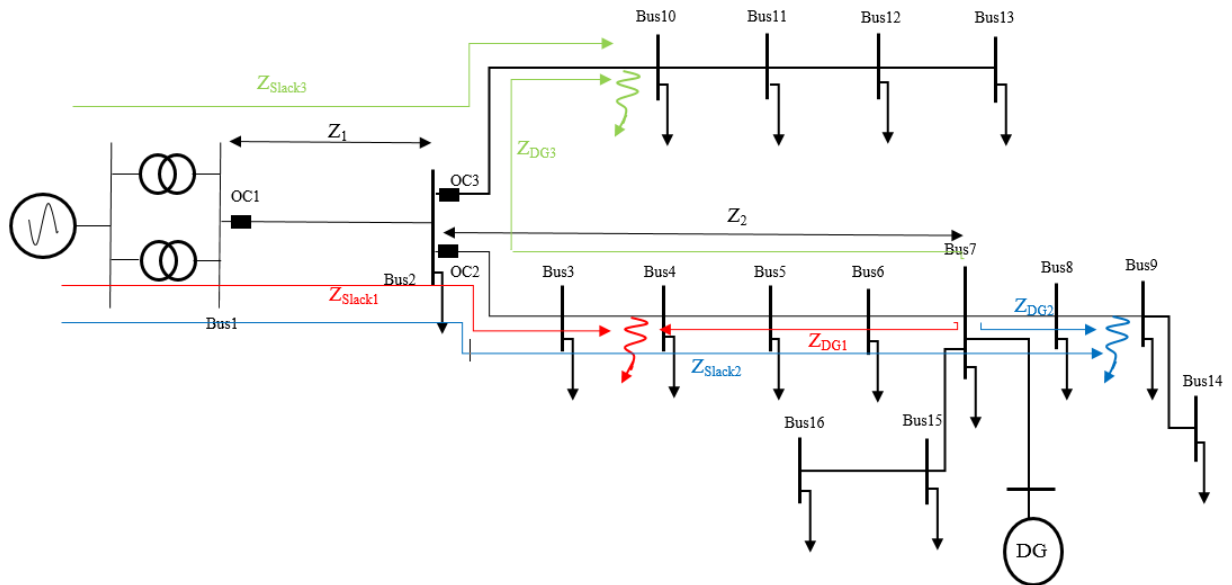
با توجه به اینکه هدف ایجاد خطا در فواصل ۱۰۰ متری از منابع تولید پراکنده در طول شبکه است، سه نوع خطا در نظر گرفته شده است. حالت اول زمانی اتفاق می‌افتد که خطا بین منابع تولید پراکنده و باسبار مرجع صورت می‌گیرد. حالت دوم زمانی است که خطا بین منابع تولید پراکنده و انتهای همان فیدر متصل به منابع تولید پراکنده به وجود می‌آید و حالت آخر مربوط به زمانی است که خطا در فیدر و یا انشعاب دیگر رخ می‌دهد. در شکل ۳ فرض شده است که منابع تولید پراکنده در باسبار شماره ۷ قرار گرفته است و انواع خطاها در این شکل نمایش داده شده است.

۳-۱- تشخیص محل خطا و محاسبه امپدانس خطا

با توجه به اینکه برای هماهنگ‌سازی دقیق رله‌های اضافه جریان نیاز به ایجاد خطا در طول تمام فیدرها و انشعاب‌ها می‌باشد، باید در ابتدا فاصله بین مکان منابع تولید پراکنده تا باسبار مرجع، تا انتهای فیدر متصل به منابع تولید پراکنده و همچنین تا فیدرهای دیگر را به دست بیاوریم. محاسبه این فواصل کمک می‌کند بتوان در فواصل صد متری منابع تولید پراکنده خطای اتصال کوتاه سه فاز در شبکه ایجاد نمود و با محاسبه امپدانس خطای تامین شده توسط منابع تولید پراکنده و باسبار مرجع جریان اتصال کوتاه گذرنده از رله‌ها را محاسبه کرد. بدین منظور دو امپدانس Z_{DG} و Z_{Slack} را برای هریک از سه حالت خطا محاسبه می‌کنیم.

در حالت اول فرض شده بود که خطا بین منابع تولید پراکنده و باسبار مرجع اتفاق افتاده است. این حالت خطا در شکل ۳ با رنگ قرمز مشخص شده است. با اعمال خطای سه فاز در هر صد متر از منابع تولید پراکنده در طول این فاصله امپدانس منابع تولید پراکنده و مرجع با در نظر گرفتن امپدانس خطا محاسبه می‌شود. محاسبه امپدانس خطای منابع تولید پراکنده و باسبار مرجع در حالت‌های دوم و سوم نیز به همین ترتیب صورت می‌گیرد. در حالت دوم که خطا در بین محل منابع تولید پراکنده و انتهای همان فیدر متصل به منابع تولید پراکنده ایجاد شده است، معمولاً باعث کاهش جریان رله‌ی ابتدای فیدر و در نتیجه افزایش زمان عملکرد و یا کاهش دسترسی آن می‌شود. این نوع خطا در شکل با رنگ آبی نشان داده شده است. خطای نوع سوم زمانی اتفاق می‌افتد که یک خطای اتصال کوتاه در فیدر دیگر (غیر از فیدری که منابع تولید پراکنده در آن قرار دارد) صورت گیرد. امپدانس این خطا نیز با رنگ سبز در شکل ۳ نشان داده شده است. این خطا باعث عملکرد نابجایی رله متصل به فیدری که منابع تولید پراکنده در آن قرار دارد می‌شود و تغذیه معکوس منابع تولید پراکنده نامیده می‌شود.

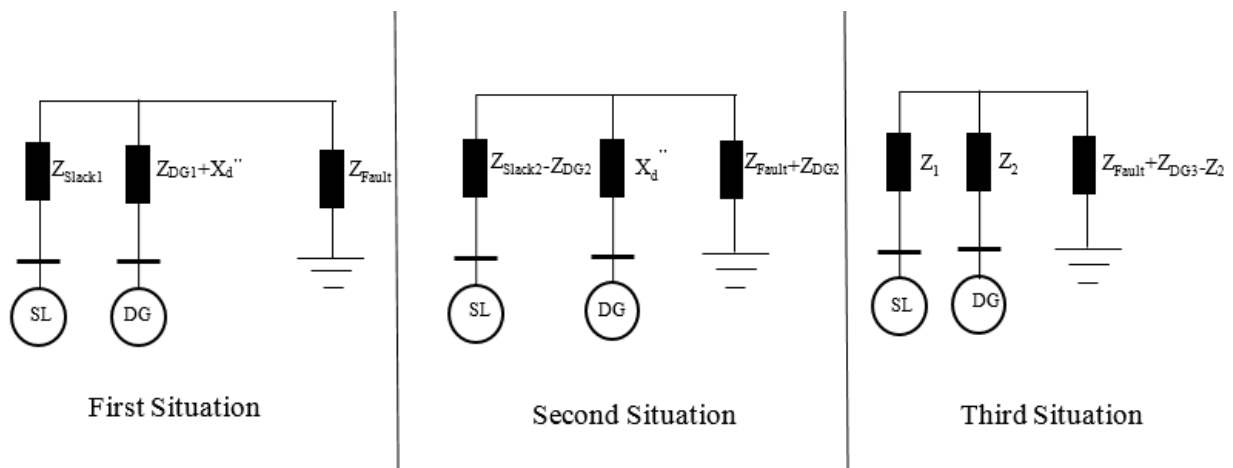




شکل (۳): نمایش حالت های مختلف ایجاد خطا

۳-۲- محاسبه جریان گذرنده از رله ها و زمان عملکرد آنها

با توجه به قسمت قبل و محاسبه ای امیدانس خطای منابع تولید پراکنده و باسبار مرجع می توان در هر حالت، جریان گذرنده از رله ها و در نتیجه زمان عملکرد آنها را محاسبه کرد. شکل ۴ مدار معادل شبکه در هر یک از حالت های ایجاد خطا در حضور منابع تولید پراکنده را نشان می دهد. در این شکل امیدانس های اشاره شده در شکل ۳ قرار داده شده است و همچنین مقدار راکتانس توالی منفی ژنراتورها به منظور تحلیل خطا در نظر گرفته شده است. با توجه به مدار معادل سیستم، می توان میزان جریان خطای تامین شده توسط منابع تولید پراکنده و باسبار مرجع را محاسبه نمود و برای محاسبه ای زمان عملکرد رله ها به کار گرفت. باید به این نکته نیز اشاره نمود که در زمان ایجاد خطا در شبکه، در هر یک از انواع سه گانه ای خطای نامبرده شده، تعدادی از رله ها عمل می کنند. با توجه به شکل ۳ مشخص است که رله ای اول و دوم در هر سه خطا عمل می کنند اما رله ی سوم فقط در خطای نوع سوم عمل می کند.

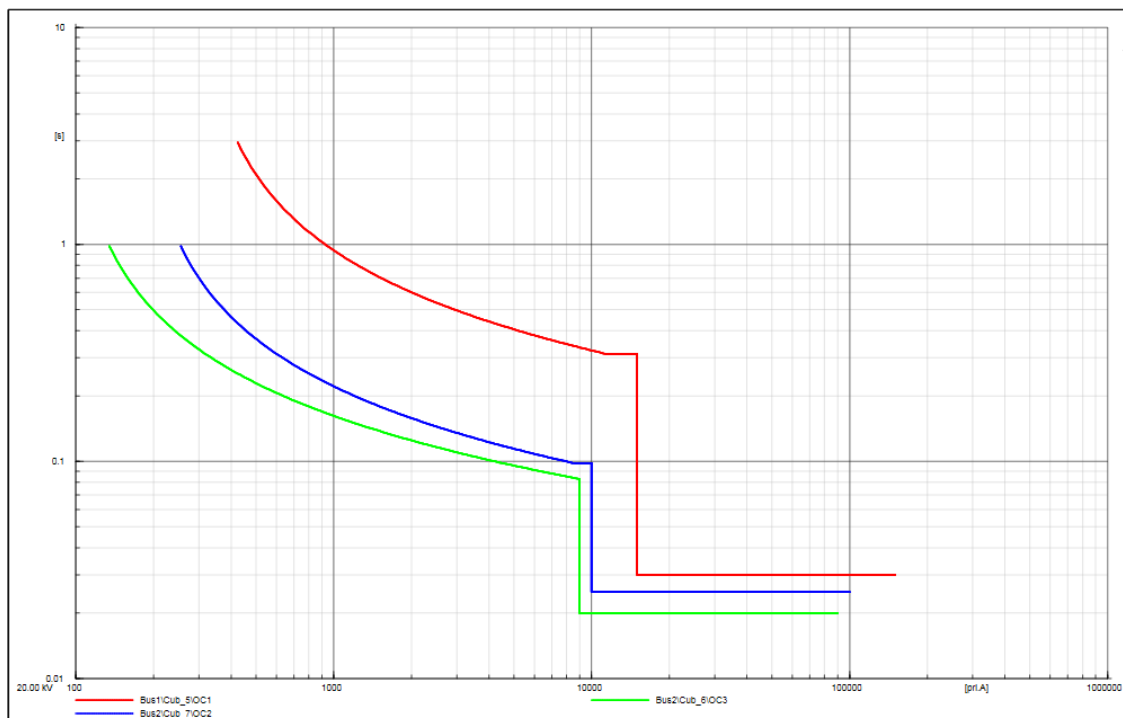


شکل (۴): مدار معادل شبکه در هر یک از حالت های ایجاد خطا در حضور منابع تولید پراکنده



زمان عملکرد رله‌ها از معادله (۱) به دست می‌آید. در این معادله ضریب تنظیم زمانی^۲ (TDS) با توجه به تنظیم اولیه‌ی رله‌ها متغیر است و با توجه به شرایط شبکه مورد مطالعه محاسبه می‌شود. در شبکه‌های توزیع شعاعی تنظیم رله‌های اضافه جریان با اختلاف زمانی حدوداً بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌ثانیه انجام می‌شود. در رابطه ۱، زمان عملکرد رله‌ها تابع جریان اندازه‌گیری شده توسط ترانسفورماتور اندازه‌گیری جریان است. به منظور هماهنگی رله‌ها از نرم افزار دیگسایلنت^۸ استفاده شده است. در شرایطی که خطا در داخل شبکه (از یاسبار ۲ به بعد) صورت بگیرد، باید رله OC1 به عنوان پشتیبان رله های OC2 و OC3 باشد. بدین منظور با استفاده از میزان جریان نامی خطوط متصل به رله های ۱ و ۲ و ۳، ترانسفورماتورهای جریان آن‌ها به نسبت ۳۰۰ به ۱ و ۲۰۰ به ۱ و ۱۰۰ به ۱ تنظیم می‌شوند. شکل ۵ نشان‌دهنده‌ی تنظیم هماهنگ رله‌ها می‌باشد که با فاصله زمانی مناسب که متناسب با TDS است، مشخص شده است. بنابراین در این حالت می‌توان جریان پیک آپ رله‌ها را به ترتیب برابر ۳۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ آمپر در نظر گرفت.[۲]

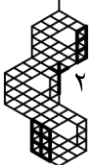
$$t_{op} = \frac{0.14 \times TDS}{\left(\frac{I_{sc}}{I_{pickup}}\right)^{0.02} - 1} \quad (1)$$



شکل (۵): زمانبندی تنظیم هماهنگ رله‌ها

۴- الگوریتم پیشنهادی

هدف اصلی طراحی الگوریتم در این مقاله بهبود تلفات شبکه‌ی مورد مطالعه با در نظر گرفتن مشکلات مربوط به رله‌های حفاظتی با اضافه کردن منابع تولید پراکنده است. ورود منابع تولید پراکنده به شبکه ممکن است مشکلاتی برای رله‌های حفاظتی به وجود بیاید که به این مشکلات در بخش ۲ اشاره شد. در واقع تنظیم زمانی هماهنگ رله‌های اضافه جریان با ورود منابع تولید پراکنده دچار اختلال می‌شود و به همین منظور بایستی تابع هدف مسئله شامل یکسری توابع جریمه باشد که از به هم خوردن هماهنگی حفاظتی رله‌ها جلوگیری کند. تابع هدف شامل یک قسمت اصلی است که همان کمینه کردن تلفات شبکه است. همچنین شامل چند قسمت فرعی می‌باشد که به عنوان توابع جریمه در نظر گرفته می‌شوند، در واقع این توابع جریمه باعث می‌شود که تا به هدف ما به سمت از بین رفتن شرایط هماهنگی زمانی رله‌ها نرود و هماهنگ‌سازی رله‌ها که قبل از ورود منابع تولید پراکنده صورت گرفته است دچار اختلال نشود. در این قسمت به بررسی اجزای تشکیل دهنده تابع هدف می‌پردازیم.





۴-۱- تلفات شبکه

به منظور محاسبه تلفات شبکه باید در الگوریتم پیشنهادی از یک پخش بار استفاده کرد در این مقاله از پخش بار نیوتون رافسون استفاده شده است و فرض شده است که تلفات شبکه حاصل از تلفات خطوط است و بنابراین با محاسبه جریان گذرنده از خود رو انتقال می توان طبق رابطه (۲) تلفات شبکه را محاسبه کرد [۱۶].

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^{N_{Lines}} R_i I_i^2 \quad (2)$$

۴-۲- افزایش زمان عملکرد رله ها

زمانی که منابع تولید پراکنده وارد شبکه می شود، قسمتی از جریان خطا توسط منابع تولید پراکنده تامین می شود و در نتیجه باعث کاهش جریان خطای تامین شده توسط باسبار مرجع و یا به عبارتی رله ی ابتدای فیدر می شود. این امر موجب افزایش زمان عملکرد رله های ابتدای فیدر می شود. بنابراین یکی از توابع جریمه را به میزان افزایش زمان عملکرد رله های ابتدای فیدر تخصیص داده و با استفاده از رابطه (۳) افزایش زمان عملکرد رله ها را کنترل کرده و اجازه افزایش زیاد آنها داده نمی شود. تابع جریمه معرفی شده در رابطه (۳) برابر با حاصل ضرب افزایش زمان عملکرد رله نام در کل بار متصل به فیدر مذکور است.

$$Performance\ Error = \sum_{i=1}^{N_{relays}} t_{opi} \times (\sum_{j=1}^{N_{Load\ of\ Relay\ i}} Load_j) \quad (3)$$

۴-۳- کاهش اختلاف زمانی عملکرد رله ها

زمانی که خطا در فیدری غیر از فیدر متصل به منابع تولید پراکنده به وقوع می پیوندد، باعث می شود رله های متصل به فیدر منابع تولید پراکنده عملکرد اشتباه کرده و در صورت تنظیم نامناسب و یا ظرفیت بالای منابع تولید پراکنده این رله ها فرمان اشتباه دهند. در این وضعیت باید اختلاف زمان عملکرد رله ها با یکدیگر مرتباً مقایسه شود تا این زمان ها از حد مشخصی کمتر نشوند یا به عبارت دیگر رله ها دچار عدم هماهنگی زمانی نشوند. رابطه (۴) نشان می دهد که زمان عملکرد رله ها باید در حالت معمول دارای اختلافی برابر فاصله زمانی هماهنگی^۹ (CTI) باشد که میزان آن تقریباً بین ۰.۲ تا ۰.۵ ثانیه است. در این مقاله میزان این زمان برابر ۰.۲۵ ثانیه در نظر گرفته شده است.

$$Coordination\ Error = \begin{cases} 0 & |t_{opRelay\ i} - t_{opRelay\ j}| \geq CTI \\ Coordination\ Error + 1 & |t_{opRelay\ i} - t_{opRelay\ j}| < CTI \end{cases} \quad (4)$$

با استفاده از مفهوم هماهنگی زمانی تعریف شده در رابطه (۴) تابع جریمه ی دوم را به صورتی تعریف می کنیم که در صورتیکه اختلاف زمان عملکرد رله ها از میزان زمان CTI در نظر گرفته شده کمتر شود، یک مقدار خطا به تابع هدف اضافه شود تا از به هم خوردن هماهنگی حفاظتی رله ها جلوگیری شود.

۴-۴- سطح اتصال کوتاه

افزایش سطح اتصال کوتاه باعث صدمه زدن به تجهیزات موجود در شبکه می شود. با ورود منابع تولید پراکنده به سیستم سطح اتصال کوتاه آن افزایش می یابد. با توجه به جریان اتصال کوتاه نامی هریک از خطوط شبکه ی مورد مطالعه، می توان تابع جریمه ای برای افزایش





سطح اتصال کوتاه بیان کرد. در صورتی که منابع تولید پراکنده مورد نظر باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای جریان اتصال کوتاه خطوط شود، این تابع جریمه باعث افزایش تابع هدف شده و در نتیجه از ورود چنین منابع تولید پراکنده به شبکه جلوگیری می‌شود. رابطه (۵) تابع جریمه برای افزایش جریان اتصال کوتاه خطای سه فاز را نشان می‌دهند. با استفاده از این تابع می‌توانیم شرایط اتصال کوتاه هر یک از خطوط شبکه را بعد از ورود منابع تولید پراکنده بررسی کرده و در صورتی که این جریان‌ها از جریان نامی اتصال کوتاه خطوط بیشتر شود، مقدار جریمه به تابع هدف اضافه می‌شود. در این حالت خطاهای اتصال کوتاه سه فاز در هر باسبار اعمال می‌شود و سپس میزان خطای اتصال کوتاه در هر یک از خطوط اندازه‌گیری شده و با مقدار نامی جریان‌ها مقایسه می‌شود.

$$ShortCircuit\ Error = \begin{cases} \left(\frac{I_{sc}-I_{scn}}{I_{scn}}\right)^3 + 1 & I_{sc} > I_{scn} \\ 0 & I_{sc} \leq I_{scn} \end{cases} \quad (5)$$

علت اصلی استفاده از توان ۳ در تابع جریمه به قرار زیر است:

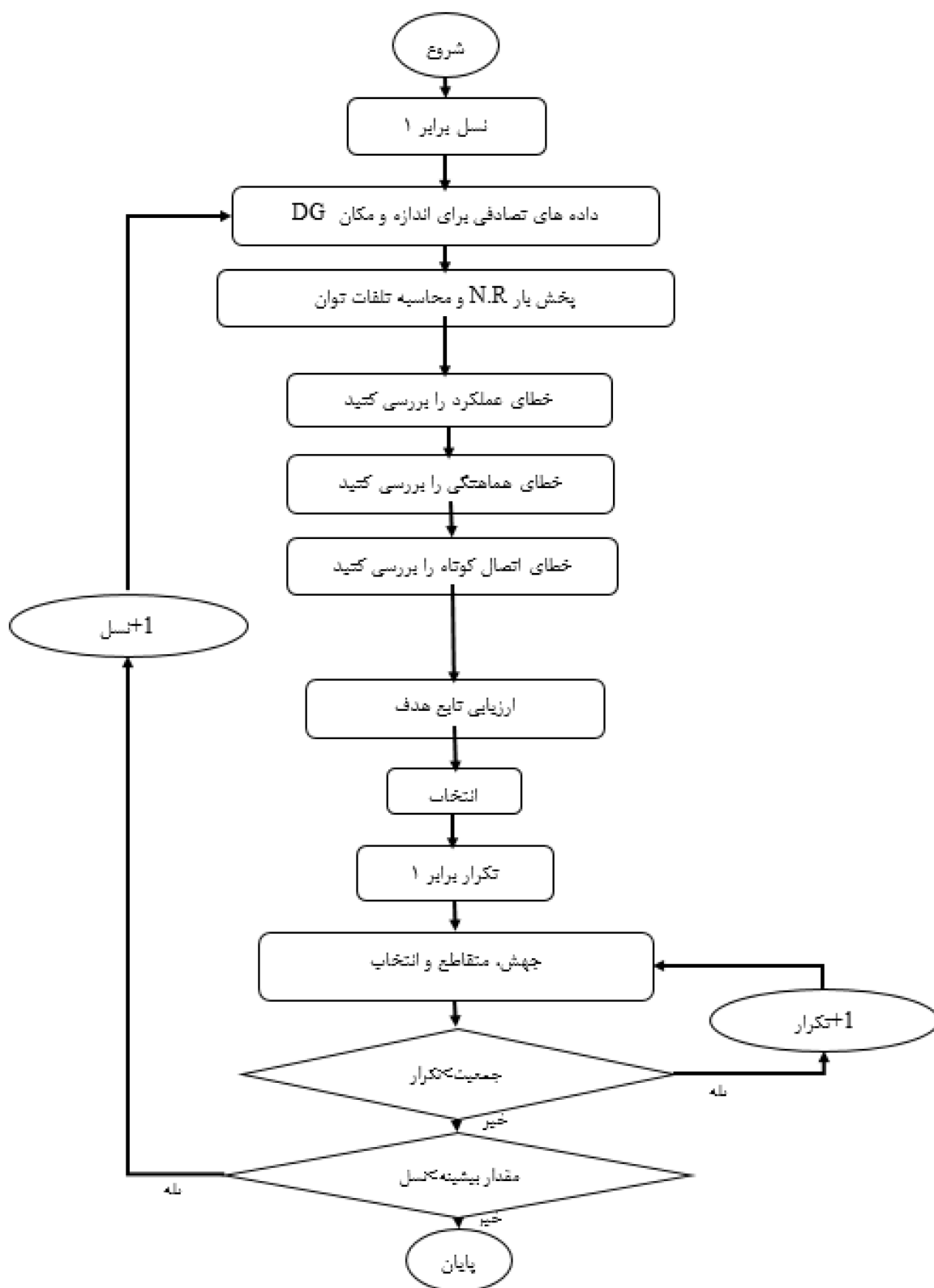
- قدرت تصاعدی: استفاده از توان سه باعث می‌شود که افزایش در اختلاف بین جریان‌ها به‌طور نمایی تأثیر بیشتری بر تابع جریمه داشته باشد. این به این معناست که اگر جریان اتصال کوتاه از مقدار مشخص افزایش یابد، تأثیر منفی که روی سیستم می‌گذارد، به‌طرز چشم‌گیری قابل توجه خواهد بود. این ساختار نه تنها مقدار خطا را نشان می‌دهد، بلکه شدت آن را نیز مشخص می‌کند.
- نتیجه‌گیری درباره ناپایداری: این تابع همچنین به تحلیل‌ها در مورد ناپایداری و امنیت سیستم کمک می‌کند. اگر جریان‌های اتصال کوتاه به‌طور مکرر بیشتر از حد مجاز شوند، تابع جریمه به‌سرعت افزایش می‌یابد و نشان‌دهنده بارگذاری یا خطاهای مکرر در سیستم است.

در این مقاله از الگوریتم ژنتیک^{۱۰} و متلب برای بهینه‌سازی تابع هدف بیان شده در (۶)، استفاده شده است. روال الگوریتم اجرایی بیان شده در بخش ۴ نیز در شکل ۶ بیان شده است. با توجه به اهمیت توابع جریمه، باید آن‌ها را وارد تابع هدف مساله کرد. این اهمیت برای تابع Coordination Error بسیار بیشتر از دو تابع دیگر است. زیرا هدف اصلی مساله برهم نخوردن هماهنگی حفاظتی رله‌ها است.

$$OF = Min(P_{Loss}) \rightarrow Subject\ to : (3 - 5) \quad (6)$$

برای شبیه‌سازی فرض‌های زیر در نظر گرفته شده است: ۱- منابع تولید پراکنده از نوع سنکرون هستند. ۲- مود کنترلی آن‌ها $P_{cos\theta}$ است با ضریب توان ۰.۹۵-۳-راکتانس زیر سنکرون ژنراتورها برابر ۰.۱۶۸. پریونیت است و راکتانس زیرسنکرون باسبار مرجع برابر ۱.۳۱ پریونیت می‌باشد.





شکل (۶): فلوچارت پیشنهادی به منظور اجرای الگوریتم شبیه سازی

۱



٥-١- مدخل مورد مطالعه

شکل (۷): شماتیک شبکه مورد مطالعه

جدول (۱): مشخصات و لتاژ و توان شبکه مورد مطالعه

باسبار	(pu)ولتاژ	(Deg) زاویه	(MW) توان اکتیو	(MVar) توان
۱	۰	۰	۰	۰
۲	۰.۹۹۸۸	-۰.۰۲۹۷	۰.۳۵۷۲	۰.۶۰۲۱
۳	۰.۹۹۷۳	-۰.۰۶۸۲	۰	۰.۱۴۰۰
۴	۰.۹۹۶۲	-۰.۰۹۳۵	۰.۱۵۲۶	۰.۳۱۵۰
۵	۰.۹۹۴۸	-۰.۱۲۶۷	۰.۱۰۹۳	۰.۳۳۲۵
۶	۰.۹۹۳۵	-۰.۱۵۶۷	۰.۴۳۱۴	۰.۷۶۱۳
۷	۰.۹۹۲۶	-۰.۱۷۸۱	۰.۳۸۱۴	۰.۷۸۷۵
۸	۰.۹۹۲۴	-۰.۱۸۴۲	۰.۲۱۰۱	۰.۲۸۰۰
۹	۰.۹۹۲۱	-۰.۱۹۳۹	۰.۱۰۹۳	۰.۳۳۲۵
۱۰	۰.۹۹۱۰	-۰.۰۵۱۷	۰.۳۸۱۴	۰.۷۸۷۵
۱۱	۰.۹۹۷۵	-۰.۰۶۶۸	۰.۱۶۸۱	۰.۲۲۴۰
۱۲	۰.۹۹۶۸	-۰.۰۸۵۷	۰.۱۷۴۹	۰.۵۳۲۴
۱۳	۰.۹۹۶۵	-۰.۰۹۷۸	۰.۳۴۲۹	۰.۸۰۵۱
۱۴	۰.۹۹۱۶	-۰.۲۰۳۳	۰.۳۸۱۴	۰.۷۸۷۵
۱۵	۰.۹۹۲۴	-۰.۱۸۱۳	۰.۲۱۰۰	۰.۲۸۰۰
۱۶	۰.۹۹۲۴	-۰.۱۸۴۴	۰.۱۵۲۶	۰.۳۱۵۰



جدول (۲): مشخصات امیدانس شبکه مورد مطالعه

طول (km)	جریان اتصال کوتاه نامی (kA)	اندوکتانس (Pu)	مقاومت (pu)	باسبار ثانویه	باسبار اولیه
۰.۱۳۸	۱۱.۱۵	۰.۰۱۲۰	۰.۰۱۰۴	۲	۱
۰.۳۰۲	۹.۸۲	۰.۰۲۶۳	۰.۰۲۲۸	۳	۲
۰.۳۰۲	۹.۸۱	۰.۰۲۶۳	۰.۰۲۲۸	۱۰	۲
۰.۲۱	۹.۲۷	۰.۰۱۸۲	۰.۰۱۵۸	۴	۳
۰.۳۰	۸.۵۸	۰.۰۲۶۱	۰.۰۲۲۶	۵	۴
۰.۳۱	۷.۹۵	۰.۰۲۷۰	۰.۰۲۳۴	۶	۵
۰.۲۶	۷.۴۸	۰.۰۲۲۴	۰.۰۱۹۴	۷	۶
۰.۱۵	۷.۲۳	۰.۰۱۳۰	۰.۰۱۱۲	۸	۷
۰.۲۲	۷.۱۲	۰.۰۱۹۱	۰.۰۱۶۶	۱۵	۷
۰.۲۷	۶.۸۲	۰.۰۲۳۵	۰.۰۲۰۳	۹	۸
۰.۴۰	۶.۲۸	۰.۰۳۴۸	۰.۰۳۰۱	۱۴	۹
۰.۳۰	۹.۰۴	۰.۰۲۶۳	۰.۰۲۲۸	۱۱	۱۰
۰.۴۶	۸.۰۵	۰.۰۳۹۹	۰.۰۳۴۵	۱۲	۱۱
۰.۴۰	۷.۳۳	۰.۰۳۴۶	۰.۰۲۹۹	۱۳	۱۲
۰.۳۲	۶.۶۵	۰.۰۲۷۹	۰.۰۲۴۱	۱۶	۱۵

۵-۲- تحلیل نتایج

جدول های شماره ۳ و ۴ و ۵ نشان دهنده ی نتایج شبیه سازی و ظرفیت و مکان منابع تولید پراکنده و همچنین تابع هدف می باشد با این تفاوت که CTI برای این جداول متفاوت است. در این جداول، به ترتیب برای CTI های ۲۵۰ و ۳۰۰ و ۳۵۰ میلی ثانیه است، مشاهده می شود که در جدول اول که کمترین CTI را دارد، بیشترین اجازه ی ورود در آرایش های مختلف TDS وجود دارد، اما برای جدول آخر که CTI ۳۵۰ میلی ثانیه است برای بیشتر آرایش های TDS ها اجازه ورود منابع تولید پراکنده وجود ندارد. در واقع چالش اصلی مسئله تعیین و مقایسه شرایط مختلف حضور منابع تولید پراکنده در شبکه است به طوری که توابع جریمه وارد مسئله و تابع هدف نشوند. به همین دلیل دو متغیر از مسئله را علاوه بر ظرفیت و مکان منابع تولید پراکنده را تغییر دادیم که این دو متغیر، CTI و TDS اولیه رله های اضافه جریان می باشند.

جدول (۳): نتایج ظرفیت و مکان منابع تولید پراکنده برای CTI ۲۵۰ میلی ثانیه

TDS			DG		توان تلفاتی (kW)	تابع هدف
OC1	OC2	OC3	(MVA) ظرفیت	باسبار		
∞	∞	∞	4.۴۷	۷	۶.۱۰۲۹	۶.۱۰۲۹
۰.۳۰	۰.۰۵	۰.۰۵	۳.۶۷	۷	۶.۸۴۰۱	۶.۸۹۴۲
۰.۲۵	۰.۰۵	۰.۰۵	۳.۶۷	۷	۶.۸۴۰۱	۶.۸۹۰۶
۰.۲۰	۰.۰۵	۰.۰۵	۳.۶۷	۷	۶.۸۴۰۱	۶.۸۸۷۱
۰.۱۷	۰.۰۵	۰.۰۵	۳.۶۸	۸	۷.۰۷۳۸	7.۱۱۷۳
۰.۱۵	۰.۰۵	۰.۰۵	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-
۰.۳۰	۰.۱۰	۰.۱۰	۴.۴۶	۷	۶.۱۳۵۲	۶.۲۱۱۱
۰.۲۵	۰.۱۰	۰.۱۰	۴.۴۶	۷	۶.۱۳۵۲	۶.۲۰۶۶
۰.۲۳	۰.۱۰	۰.۱۰	۴.۴۶	۷	۶.۱۳۵۲	۶.۲۰۴۹
۰.۲۲	۰.۱۰	۰.۱۰	۴.۴۶	۷	۶.۱۳۵۲	۶.۲۰۴۰
۰.۲۱	۰.۱۰	۰.۱۰	۳.۱۱	۱۱	۲۳.۵۱۲۵	۲۳.۸۱۸۶
۰.۲۰	۰.۱۰	۰.۱۰	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-





جدول (۴): نتایج ظرفیت و مکان منابع تولید پراکنده برای CTI ۳۰۰ میلی ثانیه

TDS			DG		توان تلفاتی (kW)	تابع هدف
OC1	OC2	OC3	ظرفیت (MVA)	باسبار		
∞	∞	∞	۴.۴۷	۷	۶.۱۰۲۹	۶.۱۰۲۹
۰.۳۰	۰.۰۵	۰.۰۵	۳.۲۰	۷	۷.۹۵۷۵	۸.۰۰۳۳
۰.۲۵	۰.۰۵	۰.۰۵	۳.۲۰	۷	۷.۹۵۷۵	۸.۰۰۰۴
۰.۲۰	۰.۰۵	۰.۰۵	۳.۲۰	۷	۷.۹۵۷۵	۷.۹۹۷۱
۰.۱۷	۰.۰۵	۰.۰۵	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-
۰.۱۵	۰.۰۵	۰.۰۵	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-
۰.۳۰	۰.۱۰	۰.۱۰	۴.۴۶	۷	۶.۱۳۵۲	۶.۲۱۱۱
۰.۲۵	۰.۱۰	۰.۱۰	۴.۴۶	۷	۶.۱۳۵۲	۶.۲۰۶۶
۰.۲۳	۰.۱۰	۰.۱۰	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-
۰.۲۲	۰.۱۰	۰.۱۰	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-
۰.۲۰	۰.۱۰	۰.۱۰	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-

جدول (۵): نتایج ظرفیت و مکان منابع تولید پراکنده برای CTI ۳۵۰ میلی ثانیه

TDS			DG		توان تلفاتی (kW)	تابع هدف
OC1	OC2	OC3	ظرفیت (MVA)	باسبار		
∞	∞	∞	۴.۴۷	۷	۶.۱۰۲۹	۶.۱۰۲۹
۰.۳۰	۰.۰۵	۰.۰۵	۲.۸۹	۸	۸.۹۱۹۱	۸.۹۸۳۰
۰.۲۵	۰.۰۵	۰.۰۵	۲.۸۹	۸	۸.۹۱۹۱	۸.۹۴۷۹
۰.۲۰	۰.۰۵	۰.۰۵	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-
۰.۱۷	۰.۰۵	۰.۰۵	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-
۰.۱۵	۰.۰۵	۰.۰۵	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-
۰.۳۰	۰.۱۰	۰.۱۰	۴.۴۶	۷	۶.۱۳۵۲	۶.۲۱۱۱
۰.۲۵	۰.۱۰	۰.۱۰	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-
۰.۲۳	۰.۱۰	۰.۱۰	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-
۰.۲۲	۰.۱۰	۰.۱۰	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-
۰.۲۰	۰.۱۰	۰.۱۰	-	-	۲۹.۲۵۹۰	-

طبیعتاً افزایش CTI، شرایط حضور منابع تولید پراکنده را در شبکه مشکل تر می سازد. با افزایش CTI توقع داریم که با حضور منابع تولید پراکنده رله‌ها بتوانند در فاصله زمانی مشخص شده فرمان دهند و تاخیر زمانی رله‌های پشتیبان و اولیه حداقل برابر این مقدار بماند. بنابراین افزایش این مقدار باعث می شود تنها در شرایطی اجازه ی حضور منابع تولید پراکنده در شبکه وجود داشته باشد که فاصله TDS رله‌های پشتیبان و اولیه زیاد باشد. رله‌های اضافه جریان که مشخصه‌ای به صورت رابطه ۱ دارند، دارای تأخیر زمانی متفاوتی هستند و این تاخیر زمانی ثابت نیست و متناسب با جریان اتصال عبوری از رله تغییر می کنند. به صورتی که اگر جریان اتصال کوتاه عبوری از رله‌های اولیه و پشتیبان زیاد باشد، تاخیر زمانی عملکرد آن‌ها کمتر است و در زمان که این جریان کم باشد تاخیر زمانی آنها زیاد می شود. بنابراین تاخیر زمانی در این مشخصه‌ها عددی ثابت نیست و تابع جریان عبوری از رله‌ها می باشد. جریان اتصال کوتاه ممکن است در شرایطی با توجه به تغییرات موجود در شبکه که یکی از آن‌ها ورود منابع تولید پراکنده است، کاهش یا افزایش یابد. در این مواقع نباید اجازه داده شود که زمان عملکرد رله‌ها از CTI کمتر شود تا دچار ناهماهنگی زمانی حفاظت برای رله‌های اضافه جریان نشود.





از طرفی باید توجه کرد که افزایش زمان یا به عبارتی اختلاف زمانی عملکرد رله ها نیز نمی تواند مورد قبول باشد، زیرا افزایش زمان عملکرد باعث ایجاد مشکلاتی در تجهیزات شبکه می شود. بنابراین علاقه مند هستیم که از رله های سریع برای رفع خطا استفاده کنیم. زمانی که می خواهیم به شبکه ای با رله هایی با تنظیم سریع، منابع تولید پراکنده وارد کنیم، با توجه به چیدمان TDS ها متوجه موضوعی می شویم. جالب است که زمانی که رله های اولیه (OC2, OC3) دارای سرعت بالایی هستند، یعنی زمان عملکرد آنها یا به عبارتی TDS آنها کم است، با وجود زیاد بودن زمان عملکرد رله ی پشتیبان باز هم اجازه ی ورود منابع تولید پراکنده با ظرفیت بالا نسبت به حالتی که TDS رله های اولیه بیشتر است داده نمی شود. به طور مثال زمانی که چیدمان TDS ها برابر (۰.۳-۰.۰۵-۰.۰۵) است به نسبت حالتی که (۰.۱-۰.۱-۰.۳) است، علارقم اختلاف زمانی زیاد بین رله ی پشتیبان و اولیه، باز هم در حالت اول توان نامی منابع تولید پراکنده کمتر است. بنابراین هرچه رله های اولیه دارای سرعت بالاتری باشند با ورود منابع تولید پراکنده احتمال به خطر افتادن هماهنگی حفاظتی افزایش می یابد. علت اصلی این پدیده برای حالتی است که خطا در غیر از فیدر متصل به منابع تولید پراکنده رخ می دهد و حالتی است که در اصطلاح هردو رله های اولیه همزمان عمل می کنند و رله ی متصل به منابع تولید پراکنده نقش رله ی پشتیبان را دارد.

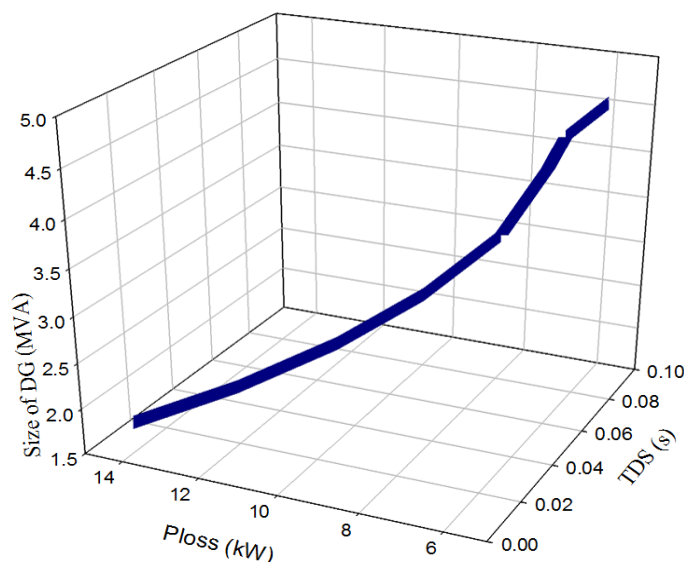
جدول ۶ این موضوع را بیشتر روشن می سازد. در این جدول که برای CTI ۲۵۰ میلی ثانیه رسم شده است، فرض شده است که رله ی پشتیبان OC1 دارای زمان عملکرد بسیار زیادی است. بنابراین در این حالت TDS بین رله های اولیه و پشتیبان بسیار زیاد می شود. با این وجود میزان ظرفیت منابع تولید پراکنده ی ورودی به شبکه در حالیکه رله های اولیه بسیار سریع هستند، کم است و با افزایش زمان عملکرد رله ها ظرفیت منابع تولید پراکنده نیز افزایش پیدا میکند. شکل ۸ هم نمایی سه بعدی از TDS، ظرفیت منابع تولید پراکنده و میزان تلفات شبکه را نشان می دهد که مشخص می کند با افزایش TDS، اجازه ی ورود منابع تولید پراکنده با ظرفیت زیاد و در نتیجه کاهش تلفات داده می شود.

جدول (۶): نتایج شبیه سازی با فرض افزایش زمان عملکرد رله پشتیبان OC1

TDS			DG		توان تلفاتی (kW)
OC1	OC2	OC3	ظرفیت (MVA)	باسبار	
∞	۰.۰۱	۰.۰۱	۱.۷۳	۹	۱۴.۲۶۴۲
∞	۰.۰۲	۰.۰۲	۲.۱۴	۹	۱۲.۰۱۷۷
∞	۰.۰۳	۰.۰۳	۲.۶۱	۸	۹.۹۵۳۸
∞	۰.۰۴	۰.۰۴	۳.۱۰	۷	۸.۲۶۵۳
∞	۰.۰۵	۰.۰۵	۳.۶۷	۷	۶.۸۴۰۳
∞	۰.۰۶	۰.۰۶	۴.۲۷	۷	۶.۱۴۹۵
∞	۰.۰۷	۰.۰۷	۴.۴۶	۷	۶.۱۳۵۲
∞	۰.۰۸	۰.۰۸	۴.۴۶	۷	۶.۱۳۵۲
∞	۰.۰۹	۰.۰۹	۴.۴۶	۷	۶.۱۳۵۲
∞	۰.۱۰	۰.۱۰	۴.۴۶	۷	۶.۱۳۵۲

علت اصلی وقوع چنین پدیده ای مربوط به بحث بخش ۲ و قسمت ۲-۲ می باشد که در واقع همان موضوع تغذیه معکوس منابع تولید پراکنده در هنگام ایجاد خطا در فیدری غیر از فیدر متصل به منابع تولید پراکنده، بود. در واقع در چنین حالتی رله های اولیه OC2 و OC3 که پیش از ورود منابع تولید پراکنده به صورت مستقل از هم عمل می کردند و با رله ی پشتیبان OC1 تنظیم زمانی شده بودند، حال با ورود منابع تولید پراکنده به عنوان رله ی پشتیبان یکدیگر باید عمل کنند. در شکل ۲ نشان داده شده است که اگر خطایی در فیدر B رخ دهد رله ی A به عنوان رله ی پشتیبان عمل می کند و باید با فاصله زمانی حداقل برابر CTI بعد از رله ی B (در صورتی که به





شکل (۸): نمایی سه بعدی از TDS، ظرفیت منابع تولید پراکنده و میزان تلفات شبکه

۶- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی شرایط ورود منابع تولید پراکنده به یک شبکه‌ی نمونه با در نظر گرفتن رله‌های اضافه جریان و همچنین بدون ایجاد تغییر در تنظیمات اولیه رله‌ها پرداخته شده است. با توجه به حفاظت شبکه‌های شعاعی، به وسیله‌ی نرم افزار دیگسایلنت اقدام به هماهنگ‌سازی رله‌های اضافه جریان شده است. سپس با استفاده از تحلیل محل خطا و امپدانس خطا با ورود منابع تولید پراکنده به شبکه، خطای اتصال کوتاه سه فاز در فواصل ۱۰۰ متری از مکان منابع تولید پراکنده ایجاد می‌شود و با توجه به شرایط برقراری هماهنگی حفاظتی رله‌ها، ظرفیت و مکان منابع تولید پراکنده مورد نظر به دست می‌آید. پروسه‌ی بهینه‌سازی به منظور عدم تریپ نابجای رله‌ها در حضور منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم ژنتیک اجرا شده است. روش پیشنهادی به ارزیابی شرایط اولیه رله‌ها و تنظیم اولیه‌ی آن‌ها می‌پردازد و نشان می‌دهد که با ورود منابع تولید پراکنده به شبکه با توجه به تنظیم رله‌های اولیه و پشتیبان منابع تولید پراکنده می‌تواند تاثیر به سزایی در عملکرد مناسب رله‌ها داشته باشد. یکی از اثرات مهم، تغذیه معکوس خطا توسط منابع تولید پراکنده است که موجب می‌شود رله‌هایی با تنظیم حساس دچار مشکل بیشتر نسبت به رله‌هایی با تنظیم زمان عملکرد بالاتر شوند. بنابراین در شبکه‌هایی با رله‌های حساس میزان ظرفیت منابع تولید پراکنده مورد استفاده کاهش میابد و در نتیجه میزان کاهش تلفات شبکه که یکی از اهداف مسئله است در اثر ورود منابع تولید پراکنده در این شرایط کاهش میابد. روش پیشنهادی می‌تواند نشان دهنده ترکیبی از ورود منابع تولید پراکنده به شبکه باشد، بدون اینکه با مشکل تعویض رله‌های شبکه که از نظر اقتصادی نیز به صرفه نیستند، برخورد داشته باشیم.



- [1] M. H. Moradi, M. Abedini, and S. M. Hosseinian, "A combination of evolutionary algorithm and game theory for optimal location and operation of DG from DG owner standpoints," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 608-616, 2015. doi: 10.1109/TSG.2015.2422995
- [2] M. Uzair, L. Li, M. Eskandari, J. Hossain, and J. G. Zhu, "Challenges, advances and future trends in AC microgrid protection: With a focus on intelligent learning methods," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 178, p. 113228, 2023. doi: 10.1109/TSG.2014.2357813
- [3] H. H. Zeineldin, H. M. Sharaf, D. K. Ibrahim, and E. E.-D. Abou El-Zahab, "Optimal protection coordination for meshed distribution systems with DG using dual setting directional over-current relays," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 6, no. 1, pp. 115-123, 2014. doi: 10.1109/TSG.2014.2357813
- [4] H. Zhan *et al.*, "Relay protection coordination integrated optimal placement and sizing of distributed generation sources in distribution networks," *IEEE Transactions on Smart grid*, vol. 7, no. 1, pp. 55-65, 2015. doi: 10.1109/TSG.2015.2420667
- [5] C. Reiz and J. B. Leite, "Optimal coordination of protection devices in distribution networks with distributed energy resources and microgrids," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 99584-99594, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3203713
- [6] P. Thararak and P. Jirapong, "Implementation of optimal protection coordination for microgrids with distributed generations using quaternary protection scheme," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2020, no. 1, p. 2568652, 2020. doi: 10.1155/2020/2568652
- [7] T. E. Sati and M. A. Azzouz, "Optimal protection coordination for inverter dominated islanded microgrids considering N-1 contingency," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 3, pp. 2256-2267, 2021. doi: 10.1109/TPWRD.2021.3108760
- [8] F. Alasali *et al.*, "The recent development of protection coordination schemes based on inverse of AC microgrid: A review," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 18, no. 1, pp. 1-23, 2024. doi: 10.1049/gtd2.13074
- [9] A. Kurmaiah and C. Vaithilingam, "Design of adaptive protection coordination scheme using SVM for an AC microgrid," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 4688-4712, 2024. doi:10.1016/j.egy.2024.04.021
- [10] O. Merabet, A. Kheldoun, M. Bouchahdane, A. Eltom, and A. Kheldoun, "An adaptive protection coordination for microgrids utilizing an improved optimization technique for user-defined DOCRs characteristics with different groups of settings considering N-1 contingency," *Expert Systems with Applications*, vol. 248, p. 123449, 2024. doi:10.1016/j.eswa.2024.123449
- [11] H. Fayazi, M. Moazzami, B. Fani, and G. Shahgholian, "Coordination of protection equipment in synchronous generator-based microgrids with regard to maintaining first swing stability," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 53, pp. 1-14, 2023. doi: 20.1001.1.23223871.1402.14.54.2.8
- [12] P. Kumar and A. S. Rana, "Review of optimization techniques for relay coordination in consideration with adaptive schemes of Microgrid," *Electric Power Systems Research*, vol. 230, p. 110240, 2024. doi: 10.1016/j.epsr.2024.110240
- [13] A. K. Soni, A. Mohapatra, and S. N. Singh, "Protection Coordination in AC Microgrid via Novel Voltage-Supervised Directional Over-Current Relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2024. doi: 10.1109/TPWRD.2024.3368624
- [14] I. N. Trivedi, S. V. Purani, and P. K. Jangir, "Optimized over-current relay coordination using Flower Pollination Algorithm," in *2015 IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*, 2015, pp. 72-77: IEEE. doi: 10.1109/IADCC.2015.7154671
- [15] J. Duan, K. Zhang, and L. Cheng, "A novel method of fault location for single-phase microgrids," *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 7, no. 2, pp. 915-925, 2015. doi: 10.1109/TSG.2015.2480065
- [16] P. Li, D. Xu, Z. Zhou, W.-J. Lee, and B. Zhao, "Stochastic optimal operation of microgrid based on chaotic binary particle swarm optimization," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 66-73, 2015. doi: 10.1109/TSG.2015.2431072



-
- ¹ Protection
 - ² Overcurrent Relay
 - ³ Distributed Generation
 - ⁴ Micro Grid
 - ⁵ Optimization
 - ⁶ Directional over-current relays
 - ⁷ Time Dial Setting
 - ⁸ Digsilent
 - ⁹ Coordination Time Interval
 - ¹⁰ Genetic Algorithm