Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 33-41

Vol. 13/ No. 3/ Fall 2024
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

Providing a Protection Strategy to Reduce the Impact of Distributed Generation in Electrical Energy Distribution Systems

Raed Ali Farhan[1], Ghazanfar Shahgholian[2], Bahador Fani[3]

Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran[1]
Najafabad Branch, Islamic Azad University[2]
Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran[3]

Abstract:
The distribution network is usually radial in nature, and loads are connected to the main electrical network by means of a distribution system. The penetration of distributed resources in a distribution system will have a great impact on the system, which is one of the main issues of power system protection. Today, various types of renewable energy sources are integrated into the electrical grid, and a large number of these distributed generators are located near the load. Small-scale distributed energy sources effectively support local loads, injecting additional power into the main grid. Solar energy and wind energy are widely used sources. When these sources are generating at their maximum capacity, the local load demand will be almost met, and therefore most of the generated power is fed into the grid. Overcurrent relays, which are located upstream of the distribution line, are set based on the amount of transient current through the line. When this level of current value changes, the operation of the overcurrent relay may face various challenges. In this paper, the challenges of distributed generation based on renewable energy are investigated in the protection relay operation, and a relay operation algorithm is presented to overcome these challenges. The simulation results show that in the proposed approach, the relay can adapt to different network conditions and operate.

Keywords: distributed generation, distribution system, overcurrent relay, protection strategy

Submit date: 2024/02/18
Accepted date: 2024/09/29

Corresponding author's name: Ghazanfar Shahgholian
Corresponding author's address: Najafabad Branch, Islamic Azad University

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.3.3]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۴۱-۳۳

Vol. 12 / No. 1/ Spring 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

ارائه یک استراتژی حفاظتی برای کاهش تأثیر تولیدات پراکنده در سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی

نوع مطالعه: پژوهشی

رائد علی فرحان[۱]، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، غضنفر شاهقلیان[۲،۳]، استاد، بهادر فانی[۱]، دانشیار

۱- دانشکده فنی مهندسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
۳- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
stuid39917540055118@khuisf.ac.ir, shahgholian@iaun.ac.ir, bahadorfani@gmail.com

چکیده: شبکه توزیع معمولاً ماهیت شعاعی دارد و بارها به وسیله سیستم توزیع به شبکه الکتریکی اصلی متصل می‌شوند. نفوذ منابع پراکنده در یک سیستم توزیع تأثیر زیادی بر سیستم خواهد داشت که حفاظت از سیستم قدرت یکی از مسائل اصلی است. امروزه انواع مختلف منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه الکتریکی ادغام شده‌اند و تعداد زیادی از این ژنراتورهای پراکنده در نزدیکی بار قرار دارند. منابع انرژی پراکنده در مقیاس کوچک به طور موثر بارهای محلی را پشتیبانی می‌کنند و توان اضافی را به شبکه اصلی تزریق می‌کنند. انرژی خورشیدی و انرژی بادی از منابع پراکنده مورد استفاده هستند. زمانی که این منابع در حداکثر ظرفیت خود تولید می‌کنند، تقاضای بار محلی تقریباً تامین خواهد شد و بنابراین بیشتر توان تولید شده به شبکه وارد می‌شود. رله‌های اضافه جریان که در بالادست خط توزیع قرار دارند بر اساس مقدار جریان گذرا از خط تنظیم می‌شوند. هنگامی که این سطح از مقدار جریان تغییر می‌کند، عملکرد رله اضافه جریان با چالش‌های مختلفی ممکن است که روبرو شود. در این مقاله چالش‌های تولید پراکندها مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر در عملکرد رله حفاظتی بررسی شده و یک الگوریتم عملکرد رله برای غلبه بر این چالش‌ها ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند در رویکرد پیشنهادی، رله می‌تواند با شرایط مختلف شبکه سازگار شود و عمل نماید.

واژه‌های کلیدی: استراتژی حفاظتی، تولید پراکنده، رله اضافه جریان، سیستم توزیع

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۳/۰۷/۸

نام نویسنده‌ی مسئول: غضنفر شاهقلیان

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.3.3]

۱- مقدمه

امروزه برای کمک به حل مشکلات زیست محیطی و جلوگیری از هدر رفتن سوخت‌های فسیلی محدود با بازه جایگزینی طولانی، انرژی‌های تجدیدپذیر (منابع پاک انرژی) مانند انرژی خورشید، انرژی آب و انرژی باد نقش مهمی دارند (فولادگر و همکاران، ۱۳۹۳). از مزایای انرژی تجدیدپذیر می‌توان به انعطاف‌پذیری، دسترسی آسان و کاهش تامین انرژی نیز اشاره کرد. هزینه اولیه و متناوب بودن انرژی از معایب انرژی تجدیدپذیر است (Keyvani-Boroujeni, 2021, Aghadavoodi, and Shahgholian, 2018, Haghshenas et al., 2019).

سیستم توزیع[1] یکی از بخش‌های اصلی سیستم قدرت الکتریکی است که وظیفه تامین بار الکتریکی را برعهده دارد. سیستم توزیع در یک شبکه الکتریکی توان را به مصرف‌کننده‌های تکفاز و سه فاز تحویل می‌دهد. سیستم توزیع بین سیستم فوق‌توزیع و بخش مصرف‌کننده قرار دارد. سیستم توزیع بر اساس ماهیت جریان الکتریکی به دو دسته سیستم توزیع جریان مستقیم و سیستم توزیع جریان متناوب تقسیم-بندی می‌شوند. سیستم‌های توزیع بر اساس نوع اتصال به سه دسته زیر سیستم شعاعی، سیستم حلقوی و سیستم مش تقسیم‌بندی می‌شوند (Vempalle, et al., 2022, Sharma, Panigrahi, 2019, Deyhimi, et al., 2020). همچنین بر اساس ساخت خط برق به دو دسته سیستم توزیع سربار[2] و سیستم توزیع زیرزمینی[3] تقسیم‌بندی می‌شوند (Bishop, et al., 1995, Stillman, 2000). سیستم توزیع بر اساس سرویس توان به سه گروه برق داخلی، برق تجاری (مانند روشنایی خیابان، خط راه آهن و غیره) و برق صنعتی تقسیم بندی می‌شوند (سالاری و حقیقت‌دار، ۱۳۹۹).

سیستم توزیع به علت ساختار عظیم و پیچیده که دارد به شدت مستعد آسیب پذیری‌های ناشی از حوادث شدید است. تولید پراکنده به عنوان یک راه‌حل آینده‌نگر در سیستم یکپارچه ایجاد شده تا انعطاف‌پذیری سیستم توزیع را ارتقا دهد (Sandhya and Chatterjee, 2021). تولید پراکنده نیروگاه مقیاس کوچکی است مانند پنل‌های خورشیدی که برق را در محل مصرف بار یا نزدیکی آن تولید می‌کند و ظرفیت حداکثری تولید آنها ۲۵ مگاوات است (Kiani, et al., 2021).

با گسترش مراکز صنعتی و تجاری همراه با افزایش بارهای مصرفی باعث شده تا منابع انرژی تجدیدپذیر[4] در قالب منابع تولید پراکنده[5] (DG) در حال اتصال به سیستم توزیع انرژی الکتریکی باشند و سطح نفوذ آن‌ها در حال افزایش باشد (Sharma, et al., 2017, Fayazi, et al., 2021). با نفوذ زیاد منابع تولید پراکنده، الگوهای شبکه با حفاظت واقعی که برای سیستم توزیع طراحی شده تغییر پیدا می‌کند و در نتیجه عملکرد قابل اعتماد رله حفاظتی در معرض چالش قرار خواهد گرفت (صابری و همکاران، ۱۳۹۹، شاکری‌نیا و همکاران، ۱۴۰۲، ستار و همکاران، ۱۴۰۳، سلطانیان و فانی، ۱۴۰۳).

منابع تولید پراکنده باعث می‌شود که سیستم توزیع جریان شعاعی خود را از دست بدهد. افزایش سطح اتصال کوتاه، تغییر تلفات بار، تغییر پروفیل های ولتاژ در طول شبکه از اثرات منابع تولید پراکنده در سیستم توزیع است. همچنین کیفیت توان و قابلیت اطمینان ممکن است تحت تاثیر قرار گیرد و حفاظت شبکه ممکن است به درستی عمل نکند (Dulău et al, 2014 ،Fayazi and et al, 2021).

با افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های برق مدرن، چالش‌های متعددی به وجود آمده که می‌توان به مسائل مربوط به سطح ولتاژ و خرابی‌های سیستم حفاظتی ناشی از جریان دو طرفه برق و تغییر دینامیک شبکه اشاره کرد (Kasap, et. Al., 2023, Sachit, et al., 2023).

فناوری‌های جدید ضمن ارتقای توان شبکه‌های الکتریکی و ارائه فرصت‌ها و راه‌حل‌های جدید برای چالش‌های شبکه، می‌توانند مشکلاتی را نیز به همراه داشته باشند (Meskin, et al., 2020).

حفاظت از سیستم قدرت برای حفظ پایداری و قابلیت اطمینان شبکه‌های برق و جلوگیری از اختلالات پرهزینه بسیار مهم است (Islam, et al., 2024). یکی از راه‌حل‌های مفهومی برای محافظت از سیستم قدرت حفاظت تطبیقی است. هنگامی که پیکربندی سیستم قدرت به دلیل نصب منابع تولید پراکنده در حال تغییر است، حفاظت تطبیقی می‌تواند در حالت عملکرد ریزشبکه مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر در حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه استفاده شود (Gutierrez-Rojas, et al., 2021).

۱-۱- مطالعات انجام شده

تحقیقات زیادی در مورد حفاظت تطبیقی تاکنون انجام شده است (Vasconcelos, et al., 2022, Uddin, et al., 2022, Bisheh, et al., 2023).

یک طرح حفاظتی توسعه یافته برای سیستم حفاظت از اضافه جریان تطبیقی توسط کافه و همکاران ارائه شده که به طور خودکار تنظیمات حفاظتی همه رله‌های اضافه جریان را در پاسخ به تأثیر تولید پراکنده، مدیریت شبکه فعال و عملیات جزیره‌ای اصلاح می‌کند. مقایسه سیستماتیک عملکرد طرح تطبیقی ارائه شده با یک طرح اضافه جریان معمولی، کاهش عملیات نادرست و کاهش میانگین زمان عملیاتی را نشان می‌دهد (Coffele, et al., 2015).

هماهنگی حفاظتی بهینه مقید به پایداری سیستم به‌صورت مسئله تصادفی در ریزشبکه با مدهای عملکردی اتصال به شبکه و جزیره‌ای شامل منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی توسط بارا و همکاران بررسی شده و محدودیت‌های فاصله زمانی هماهنگی، پارامترهای تنظیم رله‌ها، اندازه محدودکننده جریان خطا و پایداری ریزشبکه در شرایط خطا در نظر گرفته شده است (Barra, et al., 2020).

توسط چوی و همکاران یک روش حفاظت تطبیقی را با استفاده از تجزیه و تحلیل حساسیت ارائه شده که تأثیر توپولوژی‌های شبکه تغییر یافته بر زمان عملیات دستگاه‌های محافظ برای توپولوژی شبکه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.3.3]

پایه در یک شبکه توزیع بررسی شده است. در نظر گرفتن سرعت عملکرد دستگاه محافظ و تعداد کنترل‌ها برای تغییر تنظیمات و محاسبه مقادیر تنظیمات بهینه است که برای دو ترم در حالی که توپولوژی شبکه تغییر یافته را در توپولوژی شبکه پایه در مدت طولانی لحاظ می‌شود (Choi, et al., 2020).

یک روش برای ایجاد حداقل الزامات جهت حفاظت در برابر جزیره-ای منابع انرژی توزیع شده با توجه به پایداری سیستم قدرت توسط مورینیو و اسیس ارائه شده که هدف آن جلوگیری از قطع آبشاری منابع انرژی توزیع شده در طول اغتشاشات عمده در شبکه انتقال و به خطر انداختن کمترین امکان تشخیص موقعیت‌های جزیره‌ای واقعی است. این روش روی تابع حفاظتی نرخ تغییر فرکانس متمرکز بوده و مبتنی بر ارزیابی مناطق امنیتی پویا برای نشان دادن قطع اتصال منابع انرژی توزیع شده هنگام تجزیه و تحلیل سیستم قدرت حجیم است (Mourinho and Assis, 2023).

یک طرح حفاظتی حساس و انتخابی برای ریزشبکه‌های ایزوله توسط ساتی و همکاران ارائه شده که در آن از ولتاژ هارمونیک سوم تطبیقی تولید شده توسط ژنراتورهای توزیع شده مبتنی بر اینورتر و سازگار با شدت خطا استفاده می¬شود. در این روش رله‌های اضافه جریان جهت دار هارمونیک، با حس کردن جریان‌ها و ولتاژهای هارمونیک تولید شده در محل رله، از هماهنگی حفاظتی بهینه اطمینان حاصل می‌کنند (Sati, et. Al., 2024).

یک روش برای هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان جهت دار از نظر تنظیمات منحنی رله، تنظیم شماره‌گیری زمان و تنظیم پلاگین برای دستیابی به کوتاه‌ترین زمان اجرا و دستیابی به تنظیمات بهینه توسط مرابت و همکاران ارائه شده است. در این روش بهینه‌سازی با استفاده از نسخه اصلاح‌شده الگوریتم جستجوی بازی‌ها انجام شده و ارزیابی آن با استفاده از نرم افزار DIgSILENT در سیستم توزیع ۱۴ باس در حالی که تمام موارد احتمالی N-1 در نظر گرفته می¬شود، انجام شده است (Merabet, et. Al. 2024).

۱-۲- نوآوری تحقیق

هماهنگی حفاظت معمولاً با توجه به ساختار شبکه اصلی انجام می‌شود ولی ممکن است حوادث احتمالی مانند خرابی ژنراتور یا خط باعث ایجاد اختلال در شبکه برق شود. افزایش ادغام تولید منابع پراکنده در سیستم قدرت باعث شده که هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان یک مشکل اصلی در سیستم توزیع برق باشد.

از نوآوری تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- بررسی عملکرد رله در اثر چالش‌های منابع تولید پراکنده مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر
- ارائه الگوریتم حفاظتی تحت شرایط دینامیکی سیستم قدرت

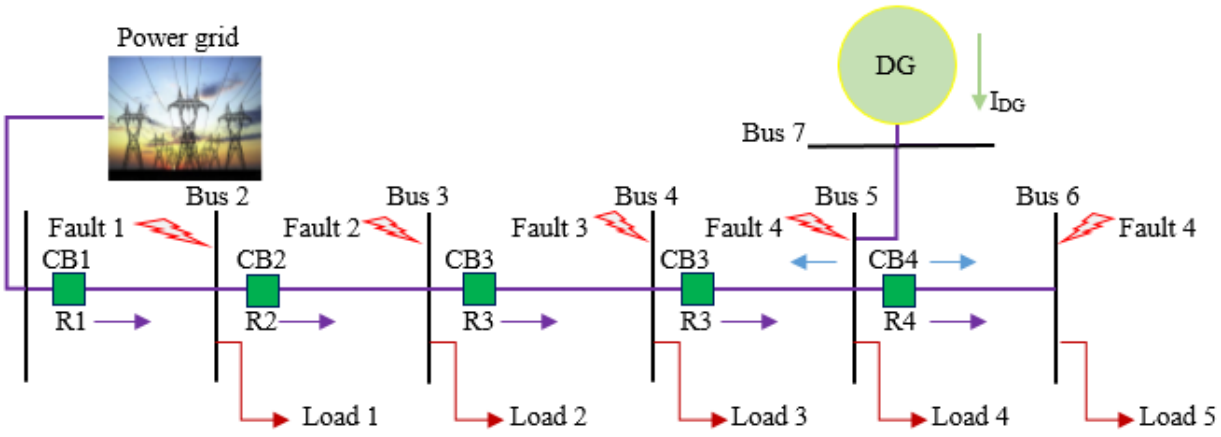
۱-۳- ساختار مقاله

ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. سیستم شعاعی مورد مطالعه برای مشاهده اثر منابع پراکنده بر روی سیستم حفاظتی در قسمت دوم آمده است. در قسمت سوم نحوه عملکرد الگوریتم حفاظتی اشاره شده است. در قسمت چهارم تحلیل و بررسی نتایج شبیه‌سازی بیان شده و در نهایت در قسمت پنجم نتیجه‌گیری آمده است.

۲- شبکه مورد مطالعه

ساختار سیستم توزیع شعاعی و برای شبکه‌های توزیع به علت سادگی و کم هزینه بودن بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سیستم شعاعی بر خلاف سیستم حلقوی، حلقه‌های بسته در آن وجود ندارد، بنابراین توان از یک باس به باس دیگر در یک جهت حرکت می‌کند. اگر خطی در سیستم توزیع شعاعی قطع شود، ادامه تأمین توان همه خطوط پایین دست خط دچار مشکل خواهند شد. در یک شبکه توزیع شعاعی تا زمان رفع خطای ایجاد شده، تامین توان بارهای مصرفی شاخه خطا با مشکل روبرو خواهد شد.

برای بررسی تاثیر منابع تولید پراکنده در سیستم قدرت، شبکه شعاعی با ۶ باس در نظر گرفته شده که نمودار تک خطی آن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): نمودار تک خطی شبکه شعاعی مورد مطالعه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.3.3]

در این شبکه منبع تولید پراکنده در باس ۵ قرار دارد. بارها به طور یکسان در باس‌های ۲ تا ۶ به عنوان بارهای ۱ تا ۵ نشان داده شده‌اند. ولتاژ عملکردی شبکه شعاعی ۲۵ کیلوولت است. هر بخش از خط توزیع دارای فاصله مساوی است. بخش خط بین باس‌ها برابر و هر بخش شامل یک قطع کننده مدار و یک رله اضافه جریان است. منبع تولید پراکنده به عنوان منبع جریان کنترل شده مدل‌سازی می‌شود و لذا ظرفیت آن می‌تواند به‌عنوان منبع متغیر به‌روزرسانی شود.

۴- الگوریتم حفاظتی رله

معمولاً سیستم توزیع الکتریکی با پیکربندی شعاعی استفاده می‌شود و فیدرهای توزیع به علت بارگذاری نامتعادل و خطاهای نامتعادل امکان نامتعادل شدن را دارند. سیستم توزیع الکتریکی از منبع سه فاز تغذیه می‌شود که فیدرهای پایین دست و بارها را تغذیه می کند.

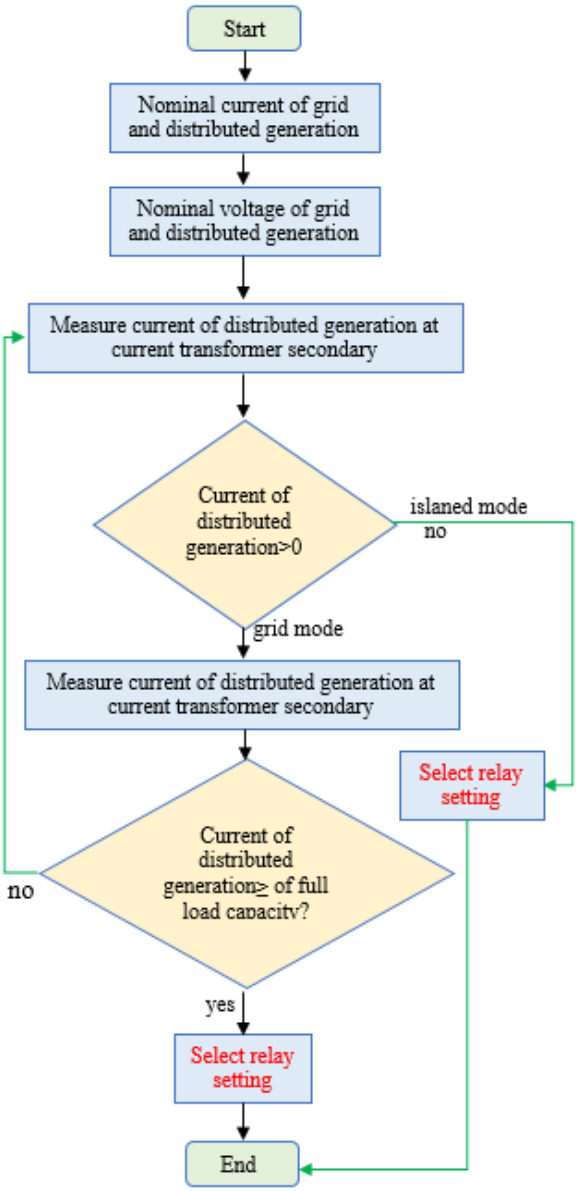
در حالت جزیره‌ای، جریان خطا تنها دو تا سه برابر جریان بار کامل است. با توجه به کم بودن جریان خطا، رله حساسیت کمتری پیدا می‌کند و حتی ممکن است رله قادر به تشخیص عیب نباشد. همچنین رله اضافه جریان معمولی طوری طراحی شده که با جریان بار کامل ۱/۲ تا هشت بار عمل کند، اما نفوذ بالای منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر، جریان خطا را به ۱/۲ تا ۱/۵ برابر جریان بار کامل کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر به ازای جریان خطای کمتر، زمان عملکرد رله بالاتر است و این می‌تواند بر عملکرد انتخابی تأثیر گذار باشد (Bisheh, et al., 2024).

به منظور برطرف نمودن چالش‌ها و عملکرد رله حفاظتی تحت شرایط سیستم دینامیکی، الگوریتم عملکردی رله مطابق شکل (۲) ارائه شده است. در این الگوریتم منابع تولید پراکنده‌هایی در نظر گرفته می‌شوند که قادر هستند بارهای محلی یا ریزشبکه‌ای را به منظور ادامه فعالیت بخشی از شبکه در حالت جزیره‌ای پشتیبانی کنند.

بنابراین ابتدا با اندازه‌گیری جریان از شبکه مورد مطالعه در Bus-1 وضعیت کار سیستم متصل به تولید پراکنده در دو حالت متصل به شبکه یا جزیره‌ای بررسی می‌شود. جریان ورودی از شبکه و تولید پراکنده بررسی می‌شود و تنظیمات یک رله را به ترتیب برای حالت عملکرد متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای انتخاب می‌شود.

این روش باعث می‌شود که رله با دو حالت مختلف شبکه سازگار شود. الگوریتم با بررسی جریان‌های نامی منبع تولید پراکنده و ولتاژ آن‌ها عمل می‌کند. در مرحله بعد، حالت متصل به شبکه یا حالت جزیره‌ای بودن سیستم با اندازه‌گیری جریان اصلی شبکه در Bus-1 بررسی می‌شود. اگر جریان اصلی شبکه در Bus-1 صفر باشد، حالت جزیره‌ای است و تنظیم رله بر این اساس انتخاب می‌شود. اگر جریان اندازه‌گیری شده در Bus-1 صفر نباشد، در حالت متصل به شبکه است.

در این شرایط، ظرفیت منبع تولید پراکنده (۲۰ درصد یا بیشتر) بررسی می‌شود و سایر تنظیمات رله بر این اساس انتخاب شده است. با این حال، اگر هیچکدام از شرایط برآورده نشود به عبارت دیگر خطایی در شبکه وجود نداشته باشد، مجدداً جریان شبکه و منبع تولید پراکنده اندازه‌گیری می‌شود و مراحل بیان شده تکرار می‌شود.



شکل (۲): الگوریتم عملکرد رله تحت شرایط مختلفی دینامیکی سیستم توزیع

۵- نتایج شبیه‌سازی

سیستم حفاظتی متداول در سیستم توزیع از عناصر حفاظتی استاتیکی تشکیل شده‌اند. هماهنگی هر رله با رله بالادست و یا پایین‌دست انجام می‌شود. هماهنگی بین تمام وسایل حفاظتی با توجه به تفاوت زمان و رله اضافه جریان برای سیستم توزیع شعاعی به خوبی برقرار است. طرح حفاظتی باید قادر باشد الزامات حفاظتی اولیه انتخابی، حساسیت و قابلیت اطمینان را هم در حالت متصل به شبکه و هم در حالت عملیات جزیره‌ای برآورده کند (Memon and Kauhaniemi, 2015, Laaksonen, 2010). با افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.3.3]

عنوان ژنراتورهای پراکنده، پیکربندی سیستم قدرت پیچیده می‌شود و جریان توان دو طرفه می‌شود.

بر اساس الگوریتم ارائه شده تنظیمات کنترل رله برای عملکرد رله اضافه جریان از نوع IDMT (معکوس حداقل زمان معین[۶]) برای دو حالت اعمال شده و عملکرد قطع‌کننده مدار برای بررسی رفع خطا در صورت نیاز تحت شرایط فوق فعال است. زمان عملکرد رله (t_R) بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$t_R = \frac{k \times TMS}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\alpha} - 1} \qquad (۱)$$

که در آن k و α ثابت هستند و برای مشخصه معکوس استاندارد به ترتیب برابر ۰/۱۴ و ۰/۰۲- است. جریان خط یا جریان خطا در شرایط اتصال کوتاه I و I_S جریان تنظیم رله است. تنظیم ضریب زمانی (TMS) برای همه رله‌ها ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

۵-۱- بدون تاثیر منابع تولید پراکنده

در این حالت طرح حفاظتی بر اساس الگوریتم ارائه شده برای شبکه الکتریکی قدرت نرمال زمانی که منابع تولید پراکنده در سیستم قدرت وجود ندارد بررسی شده است.

زمان عملکرد رله (t_R) برای نزدیکترین خطا مربوطه در جدول (۱) آمده است. با توجه به اینکه شبکه منبع دیگری ندارد و جریان فقط از یک جهت برقرار است، بنابراین رله‌های دیگر دور از محل خطا هستند و به خطا پاسخ نمی‌دهند و لذا زمان پاسخ آن‌ها به صورت زمان بی نهایت (∞) نشان داده شده است. همانطور که نوع IDMT روی رله جریان در نظر گرفته شده، بنابراین برای جریان خطای بالاتر زمان عملکرد کوتاه‌تر است.

زمان عملکرد t_R برابر ∞ نشان دهنده عدم ارسال سیگنال قطعی توسط رله است زیرا خطا از دسترس آن خارج است. زمان عملکرد قطع کننده مدار (t_{CB}) برابر است با:

$$t_{CB} = t_{FA} + t_{RO} \qquad (۲)$$

که در آن t_{FA} و t_{RO} به ترتیب زمان خطا[۷] و زمان عملکرد رله[۸] هستند.

جدول (۱): زمان عملکرد رله بدون منابع پراکنده

زمان (ثانیه)	خطای یک	خطای دو	خطای سه	خطای چهار	خطای پنج
t_{R1}	۰/۰۱۲۵۲	∞	∞	∞	∞
t_{R2}	∞	۰/۰۱۶۵۲	∞	∞	∞
t_{R3}	∞	∞	۰/۰۱۸۸۸	∞	∞
t_{R4}	∞	∞	∞	۰/۰۲۰۰۳	∞
t_{R5}	∞	∞	∞	∞	۰/۰۲۴۸۰

ابتدا Fault-5 اعمال شده و به تدریج خطا به سمت منبع حرکت می‌کند. پس از این که اولین خطا در Bus-6 در ۰/۱ ثانیه رخ می‌دهد، اختلاف زمانی بین وقوع هر خطا ۰/۲ ثانیه است.

منابع تولید پراکنده یک منبع متغیر است، بنابراین تأثیر آن به سطح خروجی منبع در نقطه خطا بستگی دارد. قابل ذکر است که قطع‌کننده‌های مدار مجاز به قطع نیستند، اگرچه زمان پاسخ رله تخمین زده شده باشد.

شکل (۳) پاسخ به هر خطا و عملکرد رله با قطع‌کننده را نشان می‌دهد. همانطور که از مقدار جریان در باس‌های ۱ تا ۶ مشاهده می‌شود، الگوریتم هر خطا را به درستی انتخاب و آن را پاک می‌کند. برای هر خطا رله مربوطه سیگنال قطع را به قطع‌کننده ارسال می‌کند.

۵-۲- حالت جزیره‌ای

در این قسمت عملکرد الگوریتم ارزیابی در حالت جزیره‌ای بررسی شده است. در طول بررسی منبع/شبکه اصلی قطع می‌شود و بخش شبکه به منابع تولید پراکنده به عنوان منبع تغذیه وابسته است. برای بررسی اثربخشی الگوریتم حفاظتی رله در شرایط شبکه جزیره‌ای، خطا در Bus-2 در زمان ۰/۱ ثانیه، سپس خطا در Bus-3 در زمان ۰/۲۵ ثانیه و آخرین خطا در Bus-4 در زمان ۰/۷ ثانیه اعمال شده است. پاسخ عملکرد حفاظت در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تنها نزدیکترین رله، خطا را برطرف می‌کند که اثربخشی الگوریتم حفاظتی رله را نشان می‌دهد.

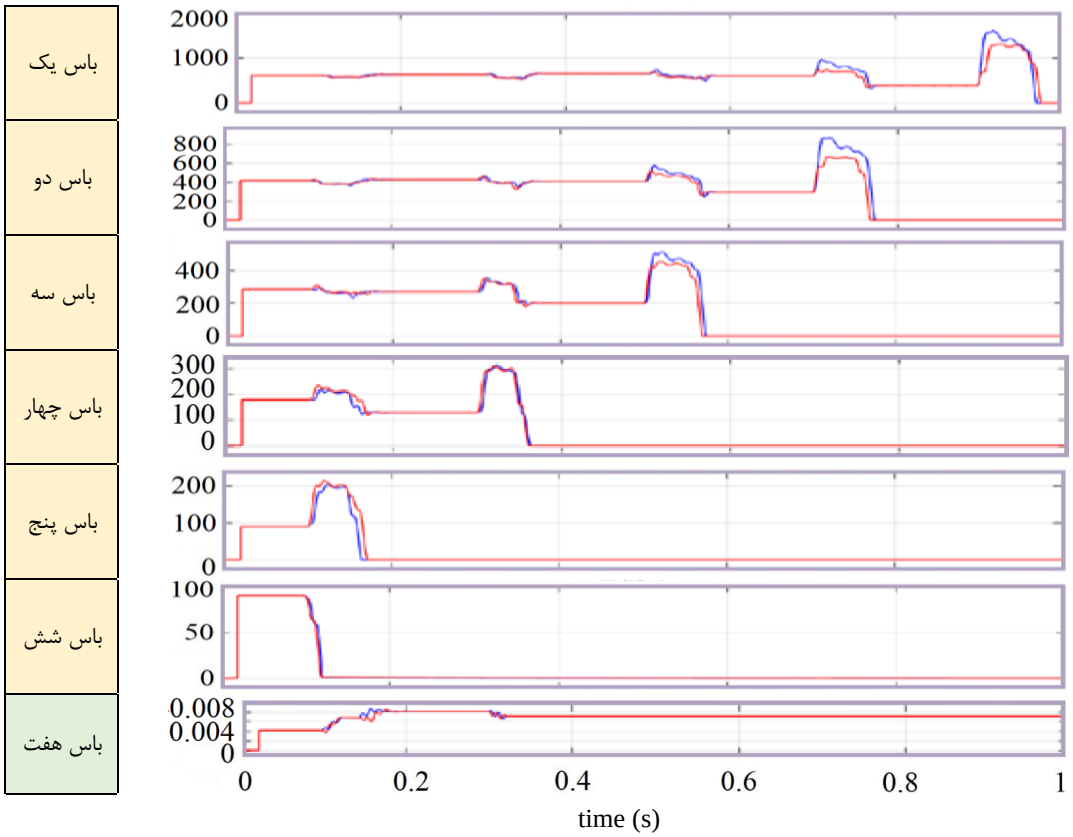
۵-۳- فعال بودن منابع پراکنده قبل از خطا

در این قسمت عملکرد حفاظت سیستم بر اساس الگوریتم حفاظتی در دو حالت خطا در باس ۴ و خطا در باس ۵ بررسی شده است. منابع پراکنده در زمان ۰/۳ ثانیه در باس ۵ وصل می‌شود و خطا در زمان ۰/۶ ثانیه رخ می‌دهد. ظرفیت منابع پراکنده برابر ۲۰ درصد بار کامل در نظر گرفته شده است. نتایج شبه‌سازی برای دو حالت فوق در ادامه نشان داده شده‌اند.

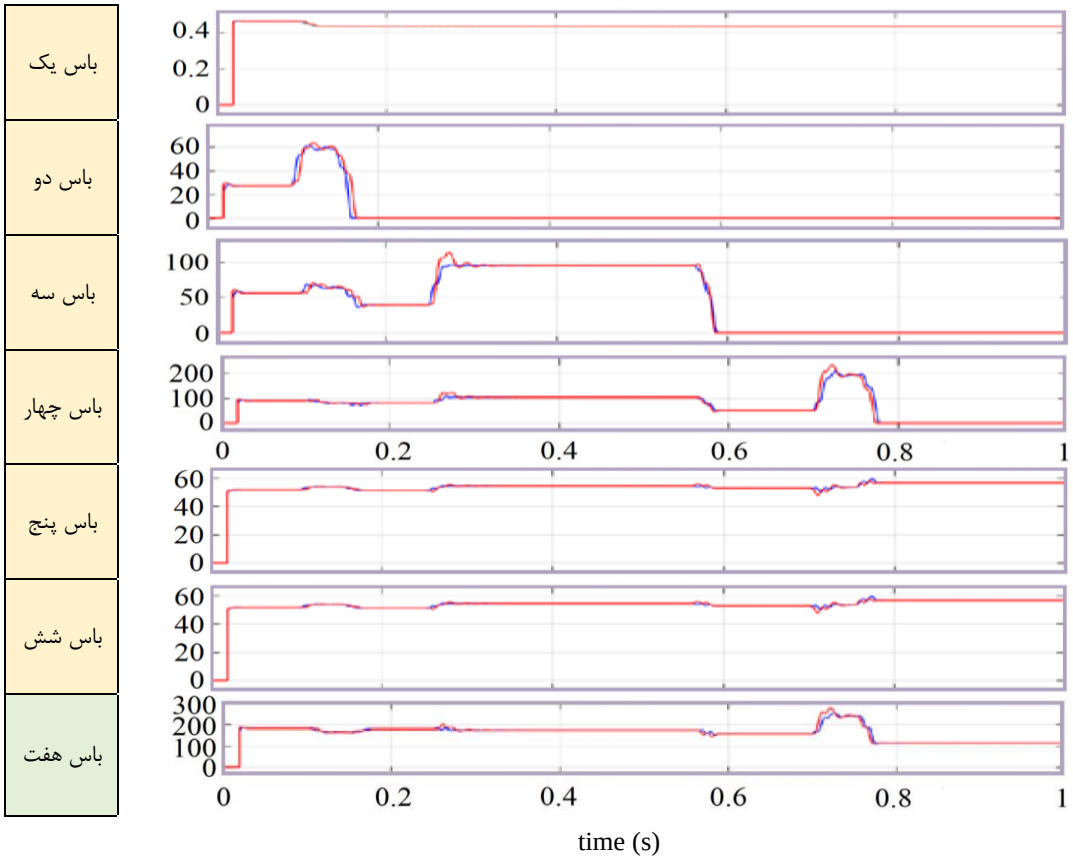
همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود وقتی خطا در باس ۴ در زمان ۰/۳ ثانیه رخ می‌دهد، رله R3 فرمان عملکرد قطع‌کننده مدار را ارسال و خطا را برطرف می‌کند و به دلیل اتصال منابع پراکنده جریان دوباره در ۰/۶ ثانیه افزایش می‌یابد. به طور مشابه در شکل (۶) مشاهده می‌شود که وقتی خطا در ۰/۶ ثانیه رخ می‌دهد، رله R3 فرمان علمکرد قطع‌کننده مدار را ارسال و خطا را پاک می‌کند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.3.3]



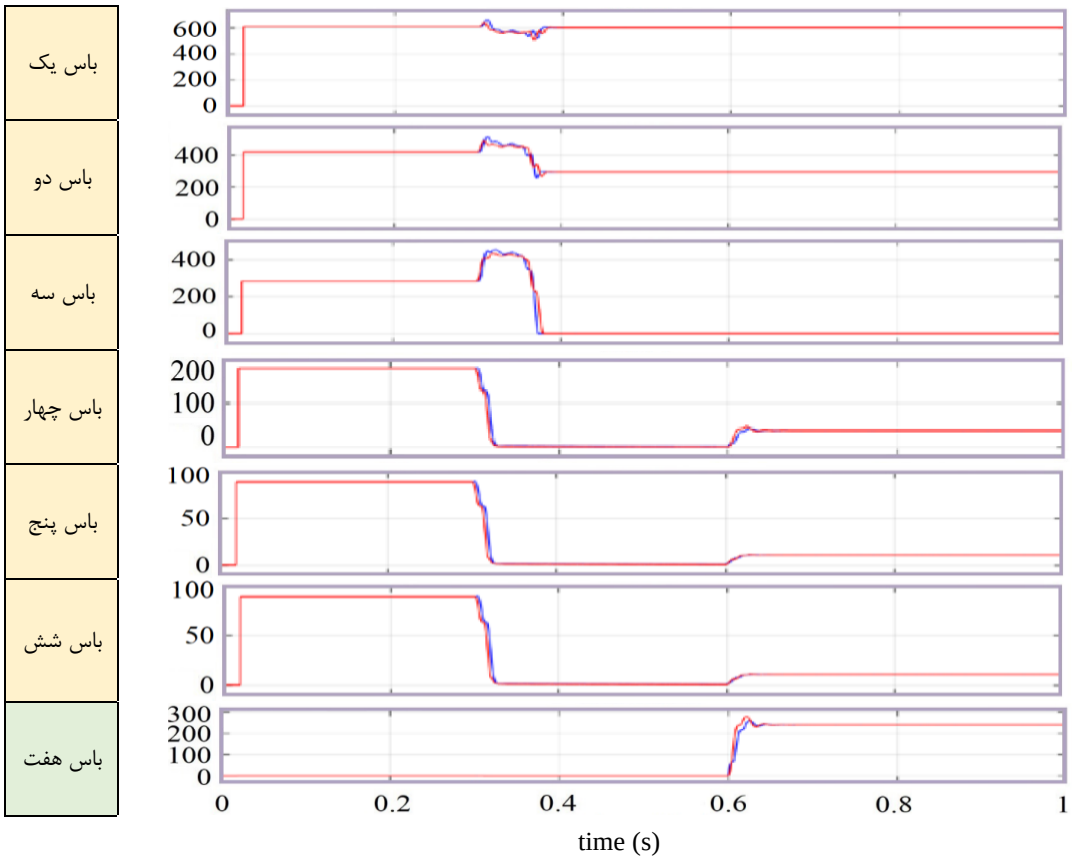
شکل (۳): عملکرد حفاظتی شبکه بدون تاثیر منابع پراکنده به ازای خطاهای مختلف



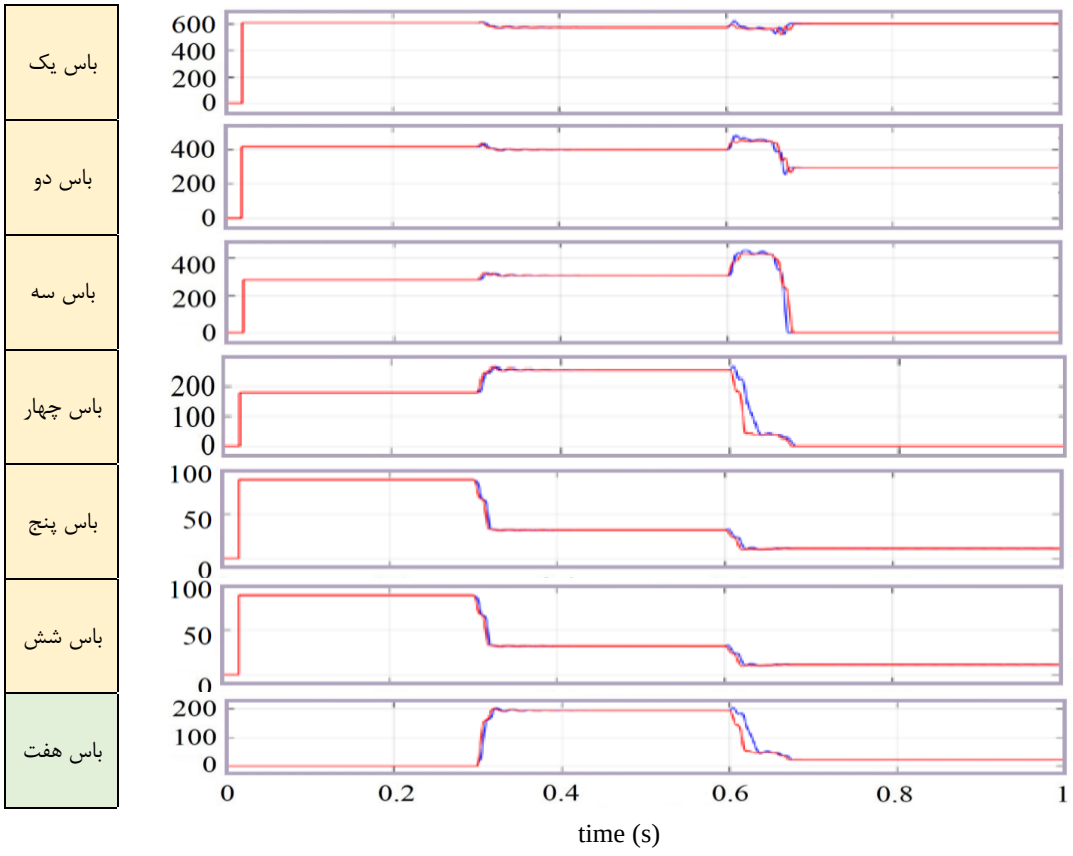
شکل (۴): عملکرد حفاظتی شبکه در حالت جزیره‌ای به ازای خطاهای مختلف

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.3.3]



شکل (۵): عملکرد حفاظتی شبکه در حالت خطا در باس ۴



شکل (۶): عملکرد حفاظتی شبکه در حالت خطا در باس ۵

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.3.3]

۶- نتیجه‌گیری

با گسترش کاربرد منابع انرژی تجدیدپذیر و امکان پیکربندی مجدد توپولوژی‌های سیستم قدرت، طرح حفاظت تطبیقی برای پاسخ سریع به تغییرات در پیکربندی شبکه مهم است. در این مقاله اثرات منابع تولید پراکنده بر عملکرد رله حفاظتی بررسی و الگوریتمی برای عملکرد رله تحت شرایط دینامیک شبکه با توجه به ویژگی‌های منابع تولید پراکنده ارائه شده است. الگوریتم علمکرد رله تحت دو پیکربندی متفاوت شبکه را نشان می‌دهد که می‌تواند بر محدودیت‌های عملکرد رله تحت شرایط متفاوت شبکه غلبه کند. بر اساس الگوریتم ارائه شده تنظیمات رله برای عملکرد رله اضافه جریان به ازای دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای ایجاد و اعمال شده است. به عبارت دیگر در این شرایط عملکرد قطع‌کننده مدار برای بررسی رفع خطا در صورت نیاز فعال می‌گردد. عملکرد الگوریتم فقط برای نفوذ ۲۰ درصدی منابع تولید پراکنده بررسی شده ولی امکان آزمایش این الگوریتم برای ارزیابی عملکرد آن تحت نفوذ بیشتر منابع تولید پراکنده پیشنهاد می‌شود.

مراجع

سالاری مجید، حقیقت‌دار فشارکی فریبرز، **"جایابی و تعیین اندازه بهینه خازن‌ها و منابع تولید پراکنده با هدف بهبود قابلیت اطمینان و حداقل نمودن تلفات در شبکه‌های توزیع"**، روش‌های هوشمند در صنعت برق، دوره: ۱۱، ش.: ۴۳، ص.: ۸۳-۹۴، ۱۳۹۹.

ستار مه‌رو، سمیعی‌مقدم محمود، آذرفر آزیتا، صالحی نسرین، واحدی مجتبی، **"بهینه‌سازی مشترک سیستم‌های انرژی یکپارچه در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های تبدیل توان به گاز و سیستم ذخیره‌سازی انرژی"**، روش‌های هوشمند در صنعت برق، دوره: ۱۵، ش.: ۵۷، ص.: ۱۵-۳۰، ۱۴۰۳.

سلطانیان سعید، فانی بهادر، ***"مدیریت منابع تولید پراکنده برای بازیابی هماهنگی حفاظتی با استفاده از ساختار سیستم‌های چند-عاملی"***، روش‌های هوشمند در صنعت برق، دروه: ۱۵، ش.: ۵۹، ص.: ۱۲۵-۱۴۲، ۱۴۰۳.

شاکری‌نیا سعید، فتاحی می‌ابادی عباس، واحدی مجتبی، صالحی نسرین، سمیعی‌مقدم محمود، **"بهره‌برداری بهینه ریزشبکه‌ها با استفاده از الگوریتم تکاملی دو سطحی در حضور قطعی منابع انرژی تجدیدپذیر"**، نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، دوره: ۱۲، ش.: ۴، ص.: ۷۲-۸۷، ۱۴۰۲.

صابری رضا، فلقی حمید، اسماعیلی مصطفی، **"طراحی منابع تولیدپراکنده در شبکه های توزیع با هدف بهبود تاب‌آوری"**، نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، دوره: ۹، ش.: ۴، ص.: ۳۵-۴۹، ۱۳۹۹.

فولادگر مهدی، رکرک اسمعیل، فانی بهادر، شاهقلیان، غضنفر، **"تحلیل حساسیت مسیر DFIG نسبت به پارامترهای کنترلی در برابر تغییر سرعت باد و تغییر امپدانس خط اتصال DFIG به شبکه"**، روش‌های هوشمند در صنعت برق، دوره: ۵، ش.: ۲۰، ص.: ۳۷-۵۴، ۱۳۹۳.

Aghadavoodi, E. and Shahgholian, G., *"A new practical feed-forward cascade analyze for close loop identification of combustion control loop system through RANFIS and NARX"*, Applied Thermal Engineering, vol. 133, pp. 381-395, 2018.

Barra, P.H.A., et al., *"A survey on adaptive protection of microgrids and distribution systems with distributed generators"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 118, Article Number: 109524, 2020.

Bisheh, H. and et al., "An adaptive fuse-saving protection scheme for active distribution networks", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 144, Article Number: 108625, 2023.

Bisheh, H., et al., "*Fuse saving coordination scheme for active distribution systems: State-of-the-art and a novel quasi-voltage current based scheme*", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 18, no. 4, pp. 729-755, 2024,

Bishop, M.T., et al., *"Overcurrent protection alternatives for underground distribution systems"*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, no. 1, pp. 252-257, Jan. 1995.

Choi, M.G., et al., *"Adaptive protection method of distribution networks using the sensitivity analysis for changed network topologies based on base network topology"*, IEEE Access, vol. 8, pp. 148169-148180, 2020.

Coffele, F., et al., *"An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks"*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 30, no. 2, pp. 561-568, 2015.

Deyhimi, N., et al., *"Comparative multi-objective investigation of radial and ring distribution system in the presence of DGs"*, Proceeding of the IEEE/EEEIC, pp. 1-6, Bari, Italy, Sept. 2021.

Dulău, L.I., et al., *"Effects of distributed generation on electric power systems"*, Procedia Technology, vol. 12, pp. 681-686, 2014.

Fayazi, H., *"An offline three-level protection coordination scheme for distribution systems considering transient stability of synchronous distributed generation"*, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 131, Article Number: 107069, 2021.

Fayazi, H., et al., *"An offline three-level protection coordination scheme for distribution systems considering transient stability of synchronous distributed generation"*, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 131, Article Number: 107069, 2021.

Gutierrez-Rojas, D., *"Review of the state of the art on adaptive protection for microgrids based on communications"*, IEEE Trans. on Industrial Informatics, vol. 17, no. 3, pp. 1539-1552, 2021.

H.J. Laaksonen, *"Protection principles for future microgrids"*, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 25, no. 12, pp. 2910-2918, 2010.

Haghshenas, G., et al., *"High step-up boost-flyback converter with soft switching for photovoltaic applications"*, Journal of Circuits, Systems, and Computers, Vol. 28, No. 1, pp. 1-16, 2019.

Islam, K., *"A review on adaptive power system protection schemes for future smart and micro grids, challenges and opportunities"*, Electric Power Systems Research, vol. 230, Article Number: 110241, 2024.

Kasap, H., and et. Al., "*Tap staggering analysis and effects on the adaptive protection system in networks with renewable energy sources*", IEEE Access, vol. 11, pp. 138623-138637, 2023.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.3.3]

for achieving resilient distribution system", Journal of Cleaner Production, vol. 287, Article Number: 125023, 2021.

Sati, T.E. and et. Al., "Adaptive harmonic-based protection coordination for inverter-dominated isolated microgrids considering N-1 contingency", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 156, Article Number: 109750, 2024.

Sharma, A., Panigrahi, B.K., *"Interphase fault relaying scheme to mitigate sympathetic tripping in meshed distribution system"*, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 55, no. 1, pp. 850-857, 2019.

Sharma, S.K., *"Voltage flicker mitigation employing smart loads with high penetration of renewable energy in distribution systems"*, IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 8, no. 1, pp. 414-424, 2017.

Stillman, R.H., *"Modeling failure data of overhead distribution systems"*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, no. 4, pp. 1238-1242, 2000.

Uddin, M.N., *"Adaptive and optimal overcurrent protection of wind farms with improved reliability"*, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 58, no. 3, pp. 3342-3352, 2022.

Vasconcelos, L.H.P., et al., *"Hybrid optimization algorithm applied to adaptive protection in distribution systems with distributed generation"*, Electric Power Systems Research, vol. 202, Article Number: 107605, 2022.

Vempalle, R., et al., "*Optimal analysis of time varying load radial distribution system with photovoltaic and wind generating system using novel hybrid optimization technique*", Renewable Energy Focus, vol. 41, pp. 246-257, 2022.

Keyvani-Boroujeni, B., et al., *"Virtual impedance-based droop control scheme to avoid power quality and stability problems in VSI-dominated microgrids"*, IEEE Access, vol. 9, pp. 144999-145011, 2021.

Kiani, A., *"A multi-agent solution to multi-thread protection of DG-dominated distribution networks"*, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 130, Article Number: 106921, 2021.

Memon, A.A., Kauhaniemi, K., *"A critical review of ac Micr-ogrid protection issues and available solutions"*, Electric Power Systems Research, vol. 129, pp. 23-31, Dec. 2015.

Merabet, O., and et. Al., "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, Article Number: 123449, 2024.

Meskin, M., et al., *"Impact of distributed generation on the protection systems of distribution networks: analysis and remedies– review paper"*, IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 14, no. 24, pp. 5944-5960, 2020.

Mourinho, F.A., Assis, T.M.L., "Impact of cascade disconnection of distributed energy resources on bulk power system stability: Modeling and mitigation requirements", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 11, no. 2, pp. 412-420, March 2023.

Sachit, A.H., et al., "*Analysis and implementation of second-order step-up converter using winding cross coupled inductors for photovoltaic applications*", Journal of Solar Energy Research, vol. 8, no. 2, pp. 1516-1525, 2023.

Sandhya, K, Chatterjee, K., *"A review on the state of the art of proliferating abilities of distributed generation deployment*

زیرنویس‌ها

[1] Distribution system
[2] Overhead distribution system
[3] Underground distribution system
[4] Renewable energy
[5] Distributed generation
[6] Invers definite minimum time
[7] Fault time
[8] Relay operating time

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.61186/ieijqp.13.3.3]