

مکان‌یابی خطا در ریزشکته‌های جریان مستقیم با استفاده از مؤلفه‌های جریان مستقیم ولتاژ و جریان

محمد دیسی^۱ محمود حسینی علی‌آبادی^۲ شهرام جوادی^۳ حسن میارنعمی^۴

۱- دکتری، دانشکده فنی و مهندسی و مرکز تحقیقات برق هوشمند و اتوماسیون - واحد تهران مرکز - دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

moh.daisy.eng@iauctb.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

mah.hosseini-aliabadi@iauctb.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی و مرکز تحقیقات برق هوشمند و اتوماسیون - واحد تهران مرکز - دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

sh.javadi@iauctb.ac.ir

۴- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

h.meyar.naimi@gmail.com

چکیده: همواره یکی الزامات حفاظتی در ریز شبکه‌های جریان مستقیم مکان‌یابی خطا است. ویژگی‌های متغیر جریان‌ها، پخش بار دوطرفه و نوسانات توان خروجی در منابع تجدیدپذیر که باعث ایجاد مشکلات برای دستگاه‌های حفاظتی با تنظیم ثابت می‌شوند، از چالش‌های این روش‌ها محسوب می‌شوند. امروزه دسترسی به داده‌های هم‌زمان در ریز شبکه‌ها و پیشرفت‌های اخیر در واحدهای اندازه‌گیری با دقت بالا، به یک نقطه عطف تحقیقاتی جدید تبدیل شده است. در این مقاله یک روش مکان‌یابی خطا در ریز شبکه‌های جریان مستقیم در حالت متصل به شبکه با استفاده از اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در ابتدا و انتهای بخش (انشعاب) و حضور سیستم‌های فتوولتائیک و ذخیره‌ساز انرژی پیشنهاد شده است. در این روش با استفاده از مؤلفه‌های جریان مستقیم ولتاژ و جریان و در نظر گرفتن مدل خط π ، علاوه بر فاصله خطا، بخش خطا نیز محاسبه شده است. مقاومت‌ها و مکان‌های مختلف خطا بر عملکرد این الگوریتم تأثیر اندکی دارند. همچنین تغییر در پارامترهای خط و تولیدات مختلف منابع، بر دقت این روش تأثیری ندارند. عملکرد این روش با استفاده از یک ریز شبکه با ۸ گره در نرم‌افزار متلب بررسی و نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده دقت قابل قبول این روش نسبت به سایر روش‌های مکان‌یابی خطا است.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی خطا، ریز شبکه، مؤلفه‌های جریان مستقیم، منابع تجدیدپذیر

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaee.21.2.135

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر شهرام جوادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - خیابان اشرفی اصفهانی - بلوار امام حسن - مجتمع دانشگاهی آیت‌الله هاشمی رفسنجانی (دانشکده فنی و مهندسی)

مشکل چند پاسخی در شبکه توزیع مواجه است. همچنین، با حضور منابع تولید پراکنده و خودروهای برقی در شبکه توزیع، شبکه از حالت شعاعی خارج و به سیستم چند سو تغذیه شونده تبدیل می‌شود. این موضوع سبب ایجاد تغییرات در شارش جریان اتصال کوتاه شده و علاوه بر اختلال در عملکرد تجهیزات حفاظتی سبب می‌شود که روش امیددانی جهت فاصله‌یابی خطا در شبکه توزیع شعاعی کارا نباشد. لذا جهت کارا نمودن روش امیددانی، باید یک روشی تعمیمی ارائه گردد که با استفاده از اطلاعات ولتاژ و جریان ثبت شده در ابتدای فیدر و اطلاعات مشابهی از محل اتصال واحد تولید پراکنده، قادر باشد مکان‌یابی خطا را انجام دهد. [۶، ۷]. دیدگاه دیگری که می‌تواند در صورت در اختیار داشتن داده‌های مناسب، با سرعت بالاتری مکان خطا را تعیین نماید، استفاده از روش امواج سیار است. اصول این روش براساس محاسبه و یا سنجش زمان موردنیاز برای حرکت موج از محل قرار گرفتن مکان‌یاب خطا تا محل خطا است. این روش‌ها نیز دارای محدودیت‌هایی هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به اشکال در تشخیص بین امواج سیار بازگشتی از نقطه خطا و از انتهای خط، وجود معادلات و ساختار عملیاتی پیچیده اشاره کرد. این روش مانند روش امیددانی، فقط فاصله خطا را محاسبه می‌کند. همچنین دقت این روش‌ها به نوع خطا، زاویه ولتاژ خطا و موقعیت خطا وابسته است که در این موارد روش‌های امیددانی با مشکلات کمتری روبرو بوده و ساده و کم‌هزینه‌تر هستند [۸]. گروه بعد الگوریتم‌های هوشمند هستند. این الگوریتم‌ها ابتدا شاخص یا مجموعه شاخص‌هایی را تعریف می‌نمایند که رفتار یکتایی جهت هر خطا در هر مکان داشته باشند. برخی روش‌ها به ازای خطاهای مختلف در مکان‌های مختلف آموزش لازم به سیستم داده می‌شود. آنگاه اگر خطایی در سیستم رخ دهد شاخص یا مجموعه شاخص‌های موردنظر محاسبه و با داده‌های آموزشی مقایسه شده و بدین‌صورت نوع و مکان خطا تعیین می‌گردد. مشکل بزرگ این روش‌ها، نیاز به بانک داده حجیم است که با توسعه یا تغییر شبکه نیز لازم است این بانک داده به‌روز گردد [۹، ۱۰]. گروه بعد روش‌های معادلات دیفرانسیل می‌باشند که در حوزه زمان نوشته و با کمک مسئله بهینه‌سازی حل می‌شود. این روش‌ها از حالت گذرای خط استفاده می‌کنند و معادلات دیفرانسیل را در نقطه خطا با استفاده از داده‌های ولتاژ پایانه مشخص می‌کنند. سپس بر اساس این نتایج، می‌بایست ولتاژهای محاسبه‌شده در طرفین خطا برابر باشند، بنابراین مسئله بهینه‌سازی حل شده و موقعیت خطا بدست می‌آید. روش‌های دیفرانسیل دارای معایبی هستند که از میان آن‌ها می‌توان به نیاز به لینک‌های مخابراتی با پهنای باند بالا، نیاز به نرخ نمونه‌برداری بالا و همگام‌سازی سریع و دقیق داده اشاره کرد. در ادامه به بررسی تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر در دو گروه روش‌های محلی (بدون مبادله اطلاعات) و روشهای غیر محلی (بر اساس سیستم‌های ارتباطی) در ریزشبکه‌های جریان مستقیم پرداخته شده است [۱۱، ۱۲].

- روشهای محلی (بدون مبادله اطلاعات)

ریزشبکه یک سیستم توزیع برق در مقیاس کوچک و پایدار است که شامل چندین منبع انرژی توزیع‌شده، سیستم‌های ذخیره انرژی و بارهای قابل کنترل است. حالت عملکرد یک ریزشبکه می‌تواند متصل به شبکه یا جزیره‌ای باشد. همچنین می‌تواند کیفیت توان، قابلیت اطمینان و پایداری شبکه را افزایش می‌دهد. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه مبدل‌ها و الکترونیک قدرت و همچنین افزایش بارهای جریان مستقیم از جمله موبایل، لپ‌تاپ و غیره، ریز شبکه‌های جریان مستقیم روزبه‌روز در حال افزایش هستند. با این‌وجود، مسائل حفاظتی مرتبط با ادغام منابع تجدیدپذیر و عملکرد ریزشبکه‌ها وجود دارد. تشخیص سریع و دقیق مکان خطا برای عملکرد ایمن ریزشبکه همواره یکی از چالش‌های این شبکه‌ها در بخش حفاظت به شمار می‌رود. چالش‌هایی از جمله پخش بار دوطرفه، کاهش سطح جریان خطا در حالت‌های متصل به شبکه و جزیره‌ای تأثیر مستقیمی بر روش‌های مکان‌یابی خطا در ریزشبکه‌ها دارد. از مزایای روش‌های مکان‌یابی خطا به‌صورت خلاصه می‌توان به ترمیم سریع و کاهش مدت‌زمان خاموشی، افزایش عمر تجهیزات و رضایت مشترکین که در نهایت دسترسی و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهد اشاره کرد [۱، ۲].

با توجه به فراهم شدن بسترهای مخابراتی پیشرفته و رؤیت پذیر بودن شبکه‌های هوشمند و ریزشبکه‌ها، می‌توان از داده‌های ولتاژ و جریان در پایانه‌ها در زمینه مکان‌یابی خطا بهره برد [۳]. روش‌های مکان‌یابی خطا در شبکه‌های قدرت به‌طور کلی به چهار گروه امیددانی، امواج سیار، روش‌های هوشمند و روش معادلات دیفرانسیل تقسیم‌بندی می‌شوند. تمام روش‌های ذکرشده قادر به تخمین مکان خطا با استفاده از داده‌های ولتاژ و جریان در تک پایانه (روش‌های محلی) یا دو پایانه (روش‌های مبتنی بر ارتباطات) هستند. در روش‌های تک‌پایانه‌ای با استفاده از تجهیزات حفاظتی یا تخمین داده‌ها در پایانه‌های دیگر، مکان خطا محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است در صورت نداشتن قیود کافی و محاسبات دقیق جهت بدست آوردن داده‌های سایر پایانه‌ها، این محاسبات و تخمین‌ها منجر به کاهش دقت در محاسبات خواهند شد [۱]. در روش‌های مکان‌یابی خطا مبتنی بر ارتباطات (استفاده از داده‌های دو پایانه)، داده‌های اندازه‌گیری شده از هر دو انتهای خطوط (بخش) از طریق کانال‌های ارتباطی به سیستم حفاظتی ارسال می‌شود تا مکان خطا تعیین شود. با این‌حال، در صورتیکه شبکه رؤیت‌پذیر نباشد، کانال ارتباطی، هزینه، نویز و احتمال خرابی را افزایش می‌یابد. در ادامه، ابتدا چهار روش مکان‌یابی خطا بررسی و سپس تحقیقات انجام شده در زمینه مکان‌یابی خطا در دو گروه روش‌های محلی و غیر محلی مرور شده است.

روش‌های امیددانی با محاسبه هارمونیک‌های اصلی ولتاژ و جریان، فقط فاصله خطا را تعیین می‌کنند [۴، ۵]. این روش در برابر مقاومت خطا و تأثیر متقابل فازها بسیار حساس است. علاوه بر این، روش امیددانی با

در [۱۳] یک روش مکان‌یابی خطا در ریزشبکه‌های جریان مستقیم حلقوی ارائه شده است. خطاهای دارای امپدانس پایین و بالا با اندازه‌گیری جریان توسط حس‌گرهای محلی در یک پایانه مشخص می‌شوند. بر اساس رویکرد تخمین پارامتر، محل خطا با نمونه‌برداری از مقادیر پیک جریان خطا برآورد می‌شود. این روش نسبت به افزایش مقاومت خطا حساس می‌باشد. علاوه بر این فقط فاصله خطا محاسبه شده و تأثیرات حضور منابع تجدید پذیر در نظر گرفته نشده است. در [۱۴] یک مدل ریاضی برای توصیف انرژی خطا در طول دوره گذرای خطاهای جریان مستقیم پیشنهاد شده است. این روش یک استراتژی مکان‌یابی خطای DC مبتنی بر انرژی برای تسهیل و نگهداری شبکه پیشنهاد کرده است. همچنین مقاومت‌های خطا کوچک‌تر از ۱ اهم و مدل خط کوتاه در نظر گرفته شده است. در [۱۵] یک روش مکان‌یابی خطا در یک ریزشبکه جریان مستقیم حلقوی چند ترمینالی بر اساس اندازه‌گیری محلی و امواج سیار با حضور توربین‌های بادی، سیستم فتوولتائیک و باتری‌ها ارائه شده است. در این روش از مدل خطا π استفاده شده است. به‌منظور یافتن شرایط تمایز بین خطاهای داخلی و خارجی، ویژگی‌های ولتاژ خط پس از وقوع خطا تجزیه و تحلیل و سپس طرح تشخیص خطا بر اساس اصل شبه ولتاژ پیشنهاد شده است. این روش به سیستم‌های ارتباطی نیاز ندارد و حداکثر خطای محاسباتی ۲/۴۵ درصد گزارش شده است. در [۱۶]، یک الگوریتم مکان‌یابی خطا مبتنی بر اندازه‌گیری محلی آنلاین در ریزشبکه‌های جریان مستقیم پیشنهاد شده است. این مرجع فقط به اندازه‌گیری‌های محلی ولتاژ، جریان و di/dt نیاز دارد. این روش نیازی به هیچ گونه سیستم ارتباطی ندارد. در [۱۷] یک روش برای تشخیص و جداسازی خطاها در ریزشبکه‌های جریان مستقیم بدون قطع انرژی کل شبکه پیشنهاد شده است. این مرجع با اندازه‌گیری نمونه‌های جریان در رله‌های دیجیتال توسط تبدیل موجک گسسته برای استخراج ویژگی‌های خطا در حوزه زمان و فرکانس پردازش می‌شوند تا یک بانک داده تشکیل شود. نهایتاً بردار ویژگی استخراج شده برای تشخیص و طبقه‌بندی خطاها به شبکه عصبی مصنوعی وارد و مکان خطا به‌دست می‌آید.

• روش‌های غیر محلی (بر اساس سیستم‌های ارتباطی)

در [۱۸] یک روش برای مکان‌یابی خطاها در یک ریزشبکه جریان مستقیم با استفاده از یک طرح ارت خازنی چندگانه ارائه شده است. در شرایط خطا، خازن‌های درون طرح ارتینگ توسط جریان‌های گذرا شارژ می‌شوند که با فاصله و مقاومت خطا مرتبط است؛ بنابراین با ارزیابی پاسخ طرح ارتینگ خازنی در هنگام بروز خطا، فاصله خطا تخمین زده می‌شود. این مرجع از اندازه‌گیری‌های جریان و ولتاژ لحظه‌ای (به‌دست‌آمده از پایانه‌های فیدر و خازن‌های زمین) استفاده می‌کند که در یک مدل ریاضی تحلیلی فیدر خطادار اعمال می‌شود. در این مرجع فقط به تخمین فاصله خطا پرداخته شده و از مدل فشرده خطا استفاده شده است. در [۱۹] یک روش مکان‌یابی خطا در ریزشبکه‌های حلقوی جریان مستقیم ولتاژ پایین با استفاده از شبکه

عصبی و داده‌های تجهیزات حفاظتی در تمام گره‌ها ارائه شده می‌شود. در این روش محل خطا را در درصد طول خط به‌عنوان کنترل‌کننده ثانویه برآورد و با استفاده از کنترل‌کننده، مکان خطا تشخیص داده می‌شود. در [۲۰] مکانیسم‌های خطای اتصال کوتاه جریان مستقیم مبتنی بر مبدل‌های چند سطحی ارائه شده است. این مرجع با استفاده از روش امواج سیار، در نظر گرفتن نویز و داده‌های ناهماهنگ، مکان خطا را به‌دست آورده است. در [۲۱] از شبکه‌های عصبی برای تعیین مکان خطا در ریزشبکه‌های جریان مستقیم در حالت‌های جزیره‌ای و متصل به شبکه استفاده شده است. در این مرجع از سنجش جریان فیدرهای بار و ولتاژ گره اصلی برای تشخیص وقوع خطا و تعیین مکان آن استفاده شده است. تشکیل بانک داده حجیم از معایب این روش می‌باشد. در جدول (۱) یک مقایسه کلی بین روش‌های مکان‌یابی خطا در شبکه‌های جریان مستقیم نشان داده شده است.

در این مقاله یک روش مکان‌یابی خطا در ریزشبکه‌های جریان مستقیم در حالت متصل به شبکه و بر اساس مدل خط π به‌منظور در نظر گرفتن خازن خط پیشنهاد شده است. این روش با استفاده از مؤلفه‌های جریان مستقیم ولتاژ و جریان پایانه‌های هر بخش، علاوه بر محاسبه فاصله خطا، بخش (انشعاب) خطا را نیز محاسبه می‌نماید (منظور از بخش یا انشعاب، خط قرار گرفته بین دو گره است). همچنین به مدل منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی نیازی ندارد. علاوه بر این به مقاومت‌ها و مکان‌های مختلف خطا حساس نبوده و مستقل از تغییرات پارامترهای خط و حالت‌های مختلف عملکرد تولیدات منابع است. این روش جهت استفاده در شبکه‌های شعاعی و حلقوی کارا می‌باشد.

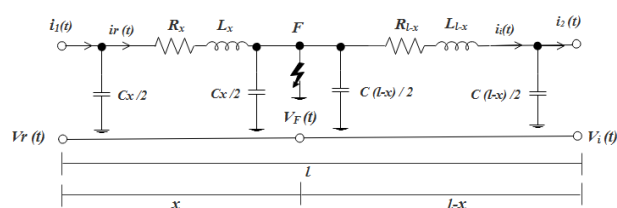
بخش‌بندی این مقاله به‌صورت زیر است: در بخش ۲ روش پیشنهادی جهت بخش‌یابی و فاصله‌یابی خطا بیان شده است. در بخش ۳ نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با دیگر روش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، بخش ۴ به نتیجه‌گیری پرداخته است.

۲- روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا در ریزشبکه جریان مستقیم

در این روش به‌منظور تخمین مکان خطا، داده‌های جریان و ولتاژ در ابتدا و انتهای هر خط (انشعاب) مورد نیاز است. پس از وقوع خطا، ولتاژ و جریان تمام گره‌ها با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری دریافت و ذخیره می‌شوند. سپس جریان‌ها و ولتاژهای دو سمت هر بخش با یکدیگر برابر قرار داده شده و با استخراج مؤلفه‌های جریان مستقیم داده‌ها توسط تبدیل فوریه سریع، برای هر نمونه از داده‌های جریان و ولتاژ یک مکان خطا به دست می‌آید. در زمان وقوع خطا نمونه‌های زیادی از داده‌های ولتاژ و جریان به دست می‌آیند. در نتیجه چندین مکان خطا در هر بخش محاسبه می‌شود. با رسم این نقاط در کنار

جدول (۱): بررسی معایب و مزایای مقالات مختلف در زمینه مکان‌یابی خطا در شبکه‌های جریان مستقیم

مرجع	اصول عملکرد	مزایا	معایب
[۱۳]	معادلات حوزه زمان / محلی	دقیق، در نظر گرفتن مقاومت خطا، قابل اجرا در شبکه‌های شعاعی و حلقوی	حساس نسبت به مقاومت خطا، عدم حضور منابع تجدید پذیر، عدم محاسبه بخش خطا
[۱۴]	مدل ریاضی بر اساس انرژی خطا / محلی	عدم حساسیت به نویز، عدم نیاز به همگام‌سازی داده، دقیق	مدل خط کوتاه، عدم حضور منابع تجدید پذیر
[۱۵]	امواج سیار / محلی	حضور منابع تجدید پذیر، در نظر گرفتن خازن خطا، عدم نیاز به سیستم ارتباطی، در نظر گرفتن نویز	گران، نیاز به نرخ نمونه‌برداری بالا و هماهنگ ساز داده، عدم بررسی تاثیر مقاومت خطا و تغییرات تولید منابع
[۱۶]	محاسبه di/dt اندازه‌گیری ولتاژ و جریان / محلی	ارزان، در نظر گرفتن مقاومت خطا، عدم نیاز به سیستم ارتباطی	دقت پایین، حساس به مقاومت خطا، قابل اجرا فقط در شبکه‌های شعاعی، عدم حضور منابع تجدید پذیر، عدم بررسی تغییر پارامترهای خط و تغییر تولیدات منابع
[۱۷]	شبکه عصبی و تبدیل موجک / محلی	عدم نیاز به سیستم ارتباطی، حالت‌های جزیره‌ای و متصل به شبکه	بانک داده حجیم، نیازمند به‌روزرسانی، عدم تخمین فاصله خطا
[۱۸]	اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در گره‌ها و طرح ارت خازنی چندگانه / غیر محلی	حضور سیستم فتوولتائیک و باتری، قابل اجرا در شبکه‌های شعاعی و حلقوی، عدم نیاز به تزریق سیگنال	عدم محاسبه بخش خطا، عدم در نظر گرفتن خازن خطا
[۱۹]	سیستم چند معیاره و شبکه عصبی / غیر محلی	سریع، دقیق، بررسی خطاهای امیدانس بالا	نیاز به بانک داده حجیم، گران
[۲۰]	امواج سیار / غیر محلی	بررسی خطاهای امیدانس بالا، در نظر گرفتن نویز و داده های ناهماهنگ	عدم در نظر گرفتن خازن خطا، گران
[۲۱]	شبکه عصبی / غیر محلی	بررسی حالت‌های جزیه ای و متصل به شبکه، بررسی مقاومت‌های مختلف خطا	بانک داده حجیم، سرعت پایین
[۲۲]	ماژول مکان‌یاب خطا، تفاضل جریان خطا / غیر محلی	سریع، دقت بالا، قابل اجرا در شبکه‌های شعاعی و حلقوی، در نظر گرفتن خازن خطا	عدم بررسی تغییر پارامترهای خط و تغییر تولیدات منابع، نیاز به دو تجهیز اضافی که هزینه و پیچیدگی را افزایش می‌دهند.
[۲۳]	معادلات حوزه زمان / محلی	دقت بالا، مناسب خطاهای امیدانس بالا، در نظر گرفتن بارهای توان ثابت و مقاومت خطا، حضور منابع تجدید پذیر و ذخیره‌ساز انرژی	قابل اجرا فقط در شبکه‌های شعاعی، مدل خط کوتاه، عدم محاسبه بخش خطا، عدم بررسی تغییر پارامترهای خط و تغییر تولیدات منابع، ثابت محاسبه می‌کند.
[۲۴]	الگوریتم ژنتیک و ضریب همبستگی / غیر محلی	سریع، دقت بالا، قابل اجرا در شبکه‌های شعاعی و حلقوی، حضور منابع تجدید پذیر، در نظر گرفتن مقاومت خطا	مدل خط کوتاه، عدم بررسی تغییر پارامترهای خط و تغییر تولیدات منابع
[۲۵]	امپدانس محور / محلی	عدم نیاز به لینک ارتباطی و تجهیزات جانبی، ارزان، در نظر گرفتن مقاومت خطا	دقت پایین، حساس به مقاومت خطا، قابل اجرا فقط در شبکه‌های شعاعی، مدل خط کوتاه، عدم محاسبه بخش خطا، عدم حضور منابع تجدید پذیر، عدم بررسی تغییر پارامترهای خط و تغییر تولیدات منابع
روش پیشنهادی	معادلات دیفرانسیل / غیر محلی	سریع، دقت بالا، محاسبه فاصله و بخش خطا، در نظر گرفتن مقاومت خطا، حضور منابع تجدید پذیر و ذخیره‌سازهای انرژی، مستقل از تغییر پارامترهای خط و تغییر تولیدات منابع، قابل اجرا در شبکه‌های شعاعی و حلقوی، استفاده از مدل خط π	قابل اجرا فقط در شبکه‌های جریان مستقیم



شکل (۱): مدل مداری یک بخش از ریزشبکه جریان مستقیم در لحظه وقوع خطا با در نظر گرفتن مدل π خط

یکدیگر در محور مختصات، برای هر بخش یک منحنی به دست می‌آید. این محاسبات برای تمام بخش‌ها انجام می‌شود. منحنی دارای کمینه مطلق نشان دهنده بخش خطا دار می‌باشد. سایر منحنی‌ها به صورت صعودی یا نزولی به دست می‌آیند. همچنین در بخش خطا دار، نقطه کمینه مطلق نشان دهنده فاصله خطا از ابتدای بخش می‌باشد. در ادامه با استفاده از مدل خط π ، روش پیشنهادی تجزیه و تحلیل شده است. شکل (۱)، یک بخش از ریزشبکه جریان مستقیم با در نظر گرفتن مدل خط π در لحظه وقوع خطا را نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۱)، خطایی در نقطه F و فاصله x از پایانه r رخ داده است. اگر فرض شود که پارامترهای خط و فاصله خط تا پایانه r داده شده است، ولتاژ محل خط را می‌توان با استفاده از KVL در سمت چپ خط به صورت (۱) و (۲) محاسبه کرد:

$$v_f^r(t) = v_r(t) - Rx i_r(t) - Lx \frac{di_r(t)}{dt} \quad (1)$$

$$v_f^r(t) = v_r(t) - Rx \left(i_1(t) - \frac{c}{2} x \frac{dv_r(t)}{dt} \right) - Lx \frac{d}{dt} \left(i_1(t) - \frac{c}{2} x \frac{dv_r(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

که: R مقاومت در واحد طول خط، C کاپاسیتانس در واحد طول خط، L اندوکتانس در واحد طول خط، $v_f^r(t)$ ولتاژ محل خط براساس داده‌های پایانه r، $v_r(t)$ ولتاژ پایانه r، $i_r(t)$ جریان ثبت شده در پایانه r، $i_r(t)$ جریان سمت پایانه r هستند. به طور مشابه، با اعمال KVL در سمت راست خط، ولتاژ محل خط را می‌توان به صورت (۳) و (۴) تعریف کرد:

$$v_f^i(t) = v_i(t) + R(l-x) i_i(t) + L(l-x) \frac{di_i(t)}{dt} \quad (3)$$

$$v_f^i(t) = v_i(t) + R(l-x) \left(i_2(t) + \frac{c}{2} (l-x) \frac{dv_i(t)}{dt} \right) + L(l-x) \frac{d}{dt} \left(i_2(t) + \frac{c}{2} (l-x) \frac{dv_i(t)}{dt} \right) \quad (4)$$

که $v_i(t)$ ولتاژ پایانه i، $i_i(t)$ جریان ثبت شده در پایانه i، $i_i(t)$ جریان سمت پایانه i و l طول کل خط هستند. با توجه به مدل π خط، ولتاژ خط و معادلات جریان پایانه، می‌توان نوشت:

$$i_1(t) = i_r(t) - C \frac{dv_r(t)}{dt} \quad (5)$$

$$i_2(t) = i_i(t) + C \frac{dv_i(t)}{dt} \quad (6)$$

$$v_f(t) = R_f I_f = R_f (i_r - i_i) \quad (7)$$

که: R_f مقاومت خط و I_f جریان خط در نقطه خط هستند. معادلات فوق فقط برای محاسبه ولتاژ خط استفاده و به مقاومت خط بستگی دارد که مقدار مجهولی است؛ بنابراین، این معادلات برای روش مکان‌یابی خط مناسب نیستند. در نتیجه باید معادله‌ای به دست آورد که محل خط را با استفاده از داده‌های پایانه‌ها و پارامترهای آن تعیین کند؛ بنابراین، با توجه به (۵) و (۶)، معادله ولتاژ سمت پایانه r با ولتاژ خط در خط به صورت زیر به دست می‌آید:

$$v_r(t) = Rx \left(i_2(t) - C \frac{dv_r(t)}{dt} \right) + Lx \frac{d}{dt} \left(i_2(t) - C \frac{dv_r(t)}{dt} \right) + v_f(t) \quad (8)$$

برای حذف ولتاژ خط، (۴) را در (۸) جایگذاری و پس از ساده‌سازی، (۹) به دست می‌آید:

$$v_r - v_i - Rl \left(i_2(t) - C \frac{dv_i(t)}{dt} \right) - Ll \left(\frac{di_2(t)}{dt} - C \frac{d^2 v_i(t)}{dt^2} \right) = x \left(R \left(i_1(t) - C \frac{dv_r(t)}{dt} \right) + L \left(\frac{di_1(t)}{dt} - C \frac{d^2 v_r(t)}{dt^2} \right) - Ri_2(t) - RC \frac{dv_i(t)}{dt} - L \frac{di_i(t)}{dt} - LC \frac{d^2 v_i(t)}{dt^2} \right) \quad (9)$$

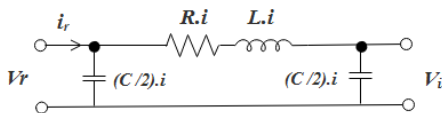
مشاهده می‌شود که رابطه (۹) بر اساس اختلاف ولتاژ و جریان دو طرف خط در یک بخش بدست آمده است. پس از ساده‌سازی (۹)، معادله (۱۰) به دست می‌آید:

$$x = \frac{v_r(t) - v_i(t) - Rl \left(i_2(t) - C \frac{dv_i(t)}{dt} \right) - Ll \left(\frac{di_2(t)}{dt} - C \frac{d^2 v_i(t)}{dt^2} \right)}{R \left(i_1(t) - i_2(t) - C \frac{dv_r(t)}{dt} \right) + L \left(\frac{di_1(t)}{dt} - \frac{di_2(t)}{dt} - C \frac{d^2 v_r(t)}{dt^2} - C \frac{d^2 v_i(t)}{dt^2} \right)} \quad (10)$$

به منظور ساده تر شدن روش پیشنهادی، مؤلفه‌های جریان مستقیم ولتاژ و جریان و پارامترهای وابسته به آن با استفاده از تبدیل فوریه سریع (دستور FFT در متلب) استخراج می‌گردد. دستور FFT یک الگوریتم است که تبدیل فوریه گسسته و نیز معکوس آن را سریعتر محاسبه می‌کند. این تبدیل معمولاً برای تبدیل یک سیگنال در طیف زمانی به سیگنالی در طیف فرکانسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع با استفاده از آنالیز فوریه در یک سیگنال می‌توان موج‌های تشکیل دهنده آن را استخراج کرد. در نتیجه (۱۰) به (۱۱) تبدیل می‌شود:

$$x = \frac{v_r(DC) - v_i(DC) - Rli_2(DC)}{R(i_1(DC) - i_2(DC))} \quad (11)$$

که: $v_r(DC)$ مؤلفه DC ولتاژ در ابتدای بخش، $v_i(DC)$ مؤلفه DC ولتاژ در انتهای بخش، $i_i(DC)$ مؤلفه DC جریان سمت پایانه i و $i_r(DC)$ مؤلفه DC جریان سمت پایانه r هستند. با توجه به (۱۱) می‌توان دریافت که این معادله فقط به مقاومت خط وابسته است؛ بنابراین در ادامه روشی برای محاسبه مقاومت خط پیشنهاد شده است. مدل مداری خط π پیش از وقوع خط در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): مدل مداری خط π در لحظات قبل از وقوع خط

با اعمال KVL در شکل (۲) و در نظر گرفتن برابر بودن جریان‌های هر دو سمت مدار، (۱۲) به دست می‌آید:

$$v_r(t) = Rl \left(i_r(t) - \frac{c}{2} l \frac{dv_r(t)}{dt} \right) + Ll \frac{d}{dt} i_r(t) - L \frac{l^2 c d^2 v_r(t)}{dt^2} + v_i(t) \quad (12)$$

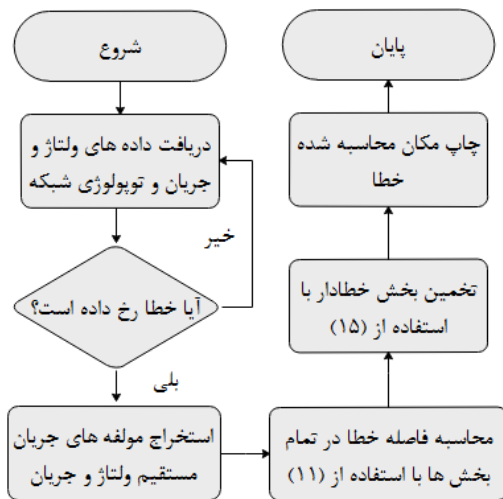
با استخراج مؤلفه‌های جریان مستقیم از (۱۲) و با در نظر گرفتن اینکه دیفرانسیل یک جز DC برابر با صفر است، (۱۳) به دست می‌آید:

$$v_r(DC) = Rl(i_r(DC)) + v_i(DC) \quad (13)$$

نهایتاً مقاومت خط با استفاده از (۱۴) به دست می‌آید:

$$R = \frac{v_r(DC) - v_i(DC)}{li_r(DC)} \quad (14)$$

با جایگذاری (۱۴) در (۱۱)، معادله نهایی تعیین فاصله خط به دست می‌آید. با توجه به (۱۱)، می‌توان دریافت که با وجود استفاده از مدل خط π در شروع محاسبات، این مدل پس از ساده‌سازی به مدل کوتاه



شکل (۳): فلوجارت روش پیشنهادی

۳- نتایج شبیه سازی

نتایج روش پیشنهادی با استفاده از نرم افزار MATLAB 2020b تعیین و بر روی رایانه با پیکربندی زیر اجرا شده است: CPU: AMD FX-7600P, 12 compute cores 4C+8G, Radeon R7, 2.7 GHz, RAM: 8 GB.

نرخ نمونه برداری $1e-5$ تنظیم شده است. تأخیر ناشی از تمیز بخش DC کمتر از 0.7 ثانیه بوده که با استفاده از دستور tic-toc محاسبه شده است. همچنین کل زمان پردازش و رسم منحنی ها در روش پیشنهادی کمتر از $2/3$ ثانیه بدست آمده که در مقایسه با مراجع [۲۶]، 50 ثانیه، [۲۷]، 25 ثانیه و [۲۸]، 10 ثانیه، قابل قبول می باشد. لازم به ذکر است که زمان محاسبه مکان خطا یکی از فاکتورهای مقایسه در روش های مکان یابی خطا می باشد که با افزایش آن، عواملی از جمله شاخص های قابلیت اطمینان کاهش میابند. علاوه بر این، پس انجام آزمون های متعدد، حداکثر بازه زمانی مورد نیاز جهت استفاده از داده ها، 0.05 ثانیه پس از وقوع خطا بدست آمده است.

۳-۱- سیستم مورد مطالعه

به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، یک ریزشبکه جریان مستقیم مطابق شکل (۴) که شامل ۷ بخش و ۸ گره است، در نظر گرفته شده است. طول کل این ریزشبکه $5/3$ کیلومتر می باشد. همچنین ریزشبکه انتخاب شده دارای دو منبع تولید پراکنده از نوع فتوولتائیک و باتری و همچنین دارای ۴ مصرف کننده می باشد. سطح ولتاژ شبکه بالادستی در سیستم مورد مطالعه ۲۵ کیلوولت و در گره های جریان مستقیم، ۵۰۰ ولت با فرکانس ۶۰ هرتز می باشد. تمام منابع با استفاده از کتابخانه و مثال های متلب مدل سازی شده اند [۲۹، ۳۰]. در این مقاله فرض شده تمام اطلاعات دریافتی از اندازه گیرها با استفاده از هماهنگ ساز داده یکسان سازی شده است.

تبدیل شده است. لذا می توان دریافت که این روش به مدل خط (کوتاه، متوسط و بلند) وابسته نمی باشد. در صورتی که بسیاری از روش های مکان یابی خطا از جمله امیدانسی، مدل های مختلف خط بر عملکرد الگوریتم مورد استفاده تاثیر گذار است. همچنین با جایگزینی (۱۴) در (۱۱) می توان دریافت که پارامترهای مورد نیاز شامل ولتاژها و جریان های دو سر هر بخش (اختلاف ولتاژ و جریان طرفین خطا) و طول بخش مورد نظر می باشند. بر اساس (۱۱)، در خط بدون خطا، مخرج کسر صفر شده و مقدار x بینهایت می شود. همچنین در خطوط خطادار مقدار x عدد کوچکی به دست خواهد آمد. معادله (۱۱) فقط برای یک نمونه از داده های ولتاژ و جریان کارآمد می باشد. در صورتیکه در زمان وقوع خطا، تعداد زیادی از نمونه های ولتاژ و جریان (وابسته به نرخ نمونه برداری) ذخیره می گردد. در نتیجه معادله (۱۱) باید برای تمام این نمونه ها، مکان خطا را محاسبه و کوچکترین مقدار بدست آمده را به عنوان مکان اصلی خطا نمایش دهد. لذا این محاسبات باید به صورت مقدار کمینه از یک مجموعه باشد. این محاسبات با استفاده از (۱۵) انجام می شود:

$$f_m = \min \sum f(x_i, s_i) \quad (15)$$

که: f_m بیان گر کمینه مقدار اختلاف ولتاژ و جریان در طرفین بخش و s_i بیان کننده آمین بخش می باشند. همچنین x_i نشان دهنده رابطه نهایی (۱۱) است. پارامترهای استفاده شده در (۱۱) شامل v_r, i_r, v_i, i_i و l می باشند که نشان دهنده ولتاژها و جریان های دو طرف بخش و طول بخش هستند. در نتیجه رابطه (۱۵) نشان دهنده اعمال رابطه (۱۱) برای تمام نمونه های ولتاژها و جریان های بدست آمده در زمان خطا برای تک تک بخش ها و نهایتاً بدست آوردن مقدار کمینه (x) می باشد. به بیان دیگر، رابطه (۱۵) بر اساس مجموعه نقاط بدست آمده از (۱۱) و اعمال آن در تمام بخش ها عمل می کند. به طور کلی، مجموعه ای از نقاط بدست آمده از تفاضل جریان ها و ولتاژهای زمان خطا در طرفین هر بخش و رسم آن ها به صورت یک منحنی، در قالب (۱۵) بیان شده است. همچنین حداقل مقدار این منحنی (کمینه مطلق) نشان دهنده فاصله خطا از ابتدای بخش می باشد.

فلوجارت روش پیشنهادی در شکل (۳) نشان داده شده است.

در اولین گام داده های ولتاژ و جریان با استفاده از تجهیزات اندازه گیری در گره ها دریافت و ذخیره می شوند. در صورت بروز خطا، مؤلفه های جریان مستقیم ولتاژ و جریان با استفاده از تبدیل فوریه استخراج و با استفاده از (۱۱)، فاصله خطا برای تمام بخش ها محاسبه می شود. در این مرحله برای هر بخش با استفاده از (۱۱)، یک منحنی ترسیم می شود. سپس با استفاده از (۱۵)، منحنی دارای کمینه مطلق به عنوان بخش خطادار و نقطه کمینه مطلق به عنوان فاصله خطا از ابتدای بخش مربوطه نشان داده می شود.

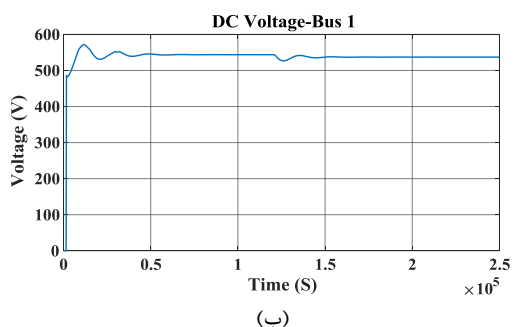
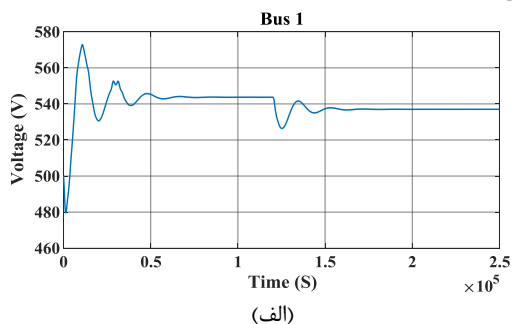
۳-۲- ارزیابی روش پیشنهادی

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، در این قسمت یک خطای ماندگار در بخش ۴ با فاصله ۰/۱۵ کیلومتر از ابتدای گره ۲ با مقاومت خطای صفر اعمال گردیده است. شکل موج ولتاژ و جریان در لحظه وقوع خطا در ابتدای فیدر در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) الف مشاهده می‌شود، ولتاژ گره ۱ در ابتدا به ۵۴۰ ولت رسیده است و در زمان ۱/۲ ثانیه که خطا رخ داده است، به حدوداً ۵۱۰ ولت کاهش پیدا است؛ در صورتی که با اعمال FFT در شکل (۵) ب مشاهده می‌شود که اغتشاشات کاهش پیدا کرده است. همچنین در شکل (۶) الف ملاحظه می‌شود که جریان در ابتدا حدوداً ۱/۵ کیلو آمپر بوده و در لحظه خطا به بیش از ۱/۸ کیلو آمپر رسیده و پس از اعمال FFT در شکل (۶) ب اغتشاشات در این شکل موج کاهش یافته است.

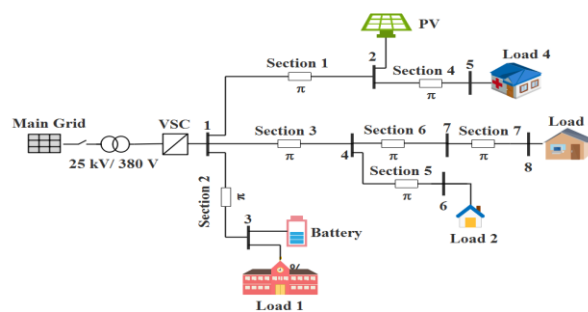
در این مقاله، از (۱۶) به منظور به دست آوردن دقت روش پیشنهادی استفاده شده است. همچنین طول کل ریزش شبکه (مخرج کسر) ۵/۳ کیلومتر در نظر گرفته شده است.

$$(۱۶) \quad \text{خطا \%} = \left| \frac{\text{فاصله محاسبه شده خطا} - \text{فاصله واقعی خطا}}{\text{طول کل ریز شبکه}} \right| \times 100$$

پس از اجرای الگوریتم پیشنهادی، مکان تخمینی خطا ۰/۱۵۶۷ کیلومتر از ابتدای بخش ۴ به دست آمده است. خطای روش پیشنهادی در این آزمون ۰/۱۲۶۴٪ محاسبه شده است. نمودارهای به دست آمده از اجرای الگوریتم پیشنهادی در بخش‌های بدون خطا در شکل (۷) نشان داده شده است. همچنین شکل (۸) نمودار بخش ۴ (بخش خطادار) را نشان می‌دهد.



شکل (۵): نمودار ولتاژ گره ۱ در شرایط خطا در بخش ۴ الف) قبل از اعمال FFT ب) بعد از اعمال FFT



شکل (۴): ریزش شبکه مورد مطالعه

جدول‌های (۲) تا (۵) مشخصات بارها، منابع و خطوط را در ریزش شبکه مورد مطالعه نشان می‌دهند [۲۹، ۳۰].

جدول (۲): مشخصات بارها

شماره بار	توان بار (kW)
(۱)	۲۰۸
(۲)	۱۱۳
(۳)	۱۶۷
(۴)	۲۰۸

جدول (۳): مشخصات منابع

ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی (باتری)	
لیتیوم-یون	نوع باتری
۱۲۰	ولتاژ نامی (V)
۸۰۰	ظرفیت نامی (Ah)
سیستم فتوولتائیک	
۳۰۵/۲۲	توان ماکزیمم هر ماژول (W)
۹۶	تعداد سلول در هر ماژول
۶۴/۲	ولتاژ مدار باز (V)
۵/۹۶	جریان اتصال کوتاه (A)

جدول (۴): مشخصات خطوط

۰/۰۲	مقاومت خطوط (Ω.km)
۰/۲۲	اندوکتانس خطوط (Ω)
۲	طول بخش ۱ (km)
۱	طول بخش ۲ (km)
۱/۵	طول بخش ۳ (km)
۰/۲	طول بخش ۴ (km)
۰/۲	طول بخش ۵ (km)
۰/۲	طول بخش ۶ (km)
۰/۲	طول بخش ۷ (km)
۲۵	ولتاژ نامی در شبکه جریان متناوب (kV)
۵۰۰	ولتاژ نامی در شبکه جریان مستقیم (V)

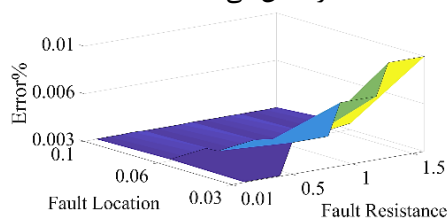
جدول (۵): مشخصات مبدل

۳	تعداد پل
۱۴۶/۱۶	مقاومت مدار (Ω)
۰/۰۵	مقاومت داخلی (Ω)
۰	اندوکتانس داخلی (H)
۰	ولتاژ ارسالی (V)

از این آزمون نشان‌دهنده تعیین فاصله و بخش خطا توسط الگوریتم پیشنهادی با دقت قابل قبول می‌باشد. در ادامه، تاثیر مقاومت‌های مختلف خطا، تاثیر تغییر پارامترهای خط و عملکردهای مختلف منابع بر عملکرد روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲-۱- تاثیر مقاومت خطا بر دقت روش پیشنهادی

از عواملی که بر دقت روش‌های مکان‌یابی خطا در شبکه‌های قدرت تاثیر گزار است، می‌توان به مکان‌ها و مقاومت‌های مختلف خطا اشاره کرد. لذا در این قسمت تاثیر مقاومت‌ها و مکان‌های مختلف خطا بر دقت الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمون‌ها، مقاومت‌های خطای ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۱ و ۱/۵ اهم در فاصله‌های ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ کیلومتری از ابتدای بخش ۷ مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۹) خطای الگوریتم پیشنهادی با فاصله و مقاومت‌های مختلف خطا را نشان می‌دهد.

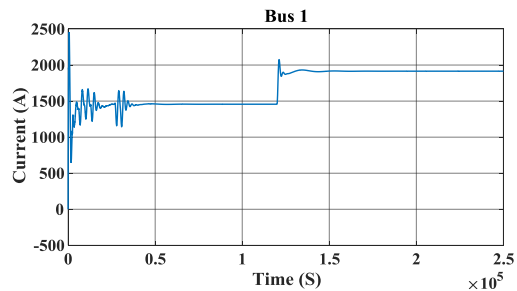


شکل (۹): تاثیر فاصله و مقاومت خطاهای مختلف بر الگوریتم پیشنهادی

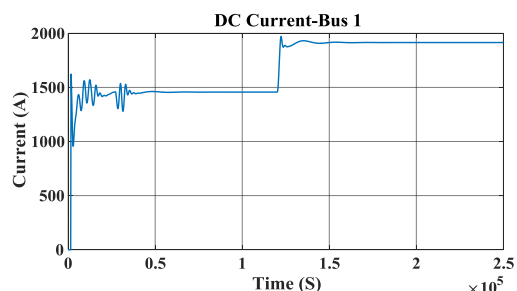
با توجه به شکل (۹)، حداکثر خطای روش پیشنهادی در این آزمون‌ها ۰/۰۱ درصد محاسبه شده که مربوط به مقاومت خطای ۱/۵ اهم می‌باشد. همچنین حداقل خطای محاسبه شده ۰/۰۰۳ درصد می‌باشد که مربوط به مقاومت خطای ۰/۰۱ اهم می‌باشد. نتایج به دست آمده از این آزمون‌ها نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت خطا در فاصله‌های مختلف، دقت روش پیشنهادی به صورت جزئی کاهش یافته است؛ اما همچنان دقت این روش بالا می‌باشد. لذا می‌توان دریافت که عملکرد الگوریتم پیشنهادی در برابر مقاومت‌ها و فاصله‌های مختلف خطا قابل قبول می‌باشد.

۳-۲-۲- تاثیر تغییر پارامترهای خط بر روش پیشنهادی

پارامترهای خط توسط عوامل مختلفی از جمله شرایط آب و هوایی، عمر تجهیزات و غیره تغییر می‌کنند. این تغییرات بر روی الگوریتم‌های مکان‌یابی خطا تاثیر گذار است. در این قسمت به منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، پارامترهای خط به صورت متغیر و در قالب ۴ سناریو در نظر گرفته شده است. بدین منظور در ریزشکبه مورد مطالعه یک خطای تک قطب به زمین در فاصله ۱ کیلومتری از ابتدای بخش ۱ شبیه‌سازی شده است. زمان خطا ۱/۲ ثانیه در نظر گرفته شده است. جدول (۶) نتایج به دست آمده از این تغییرات بر دقت الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.



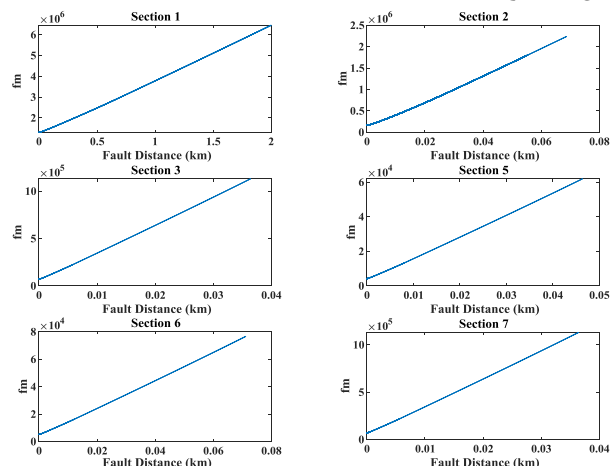
(الف)



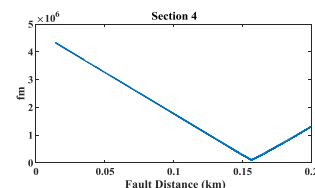
(ب)

شکل (۶): نمودار جریان گر ۱ در شرایط خطا در بخش ۴ (الف) بدون اعمال FFT (ب) بعد از اعمال FFT

این نمودارها با استفاده از رسم نقاط محاسبه شده خطا برای هر نمونه از ولتاژ و جریان در زمان وقوع خطا توسط (۱۵) در کنار یکدیگر به دست آمده است. با توجه به شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود در بخش‌هایی که خطا رخ نداده است، نمودارها دارای کمینه مطلق نمی‌باشند. در حالی که بخش ۴ دارای کمینه مطلق می‌باشد که نشان دهنده بخش خطادار است.



شکل (۷): نمودارهای به دست آمده از بخش‌های بدون خطا



شکل (۸): نمودار بخش خطادار

همچنین مقدار نقطه کمینه مطلق در شکل (۸) نشان دهنده فاصله محاسبه شده خطا توسط الگوریتم پیشنهادی است. نتایج به دست آمده

۳-۲-۴- مقایسه روش پیشنهادی با دیگر روش‌های ارائه‌شده در زمینه مکان‌یابی خطا در ریزشبکه‌های جریان مستقیم

در این بخش به مقایسه روش پیشنهادی با دیگر روش‌های مکان‌یابی خطا در ریزشبکه‌های جریان مستقیم پرداخته شده است. در جدول (۸) روش پیشنهادی با چندین مقاله چاپ‌شده در این زمینه مقایسه شده است.

جدول (۸): مقایسه روش پیشنهادی و دیگر روش‌های ارائه‌شده در موضوع تعیین فاصله و بخش خطا

مرجع	[۱۳]	[۱۴]	[۲۱]	[۳۲]	روش پیشنهادی
مدل خط	π	π	کوتاه	π	π
تغییر پارامترهای خط	-	-	-	-	✓
تغییر تولیدات منابع	-	-	-	-	✓
سیستم فتوولتائیک	-	-	-	✓	✓
ذخیره‌ساز انرژی	-	-	✓	-	✓
تخمین بخش خطا	-	✓	-	-	✓
تجهیزات و لینک‌های مخابراتی	-	-	۱	۱	۱
هزینه	کم	زیاد	بسیار زیاد	زیاد	زیاد
خطا (%)	۶	۳	۳	۳	۱/۸

1: Remote Terminal Unit, an Optical Ground Wire, GPS Time Tag, SCADA, Radio Antenna, General Packet Radio Services (GPRS), Optical Fiber.

الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن خازن خط، منابع تجدیدپذیر و استفاده از مؤلفه‌های جریان مستقیم ولتاژ و جریان، علاوه بر تخمین فاصله خط، بخش خطا را نیز محاسبه می‌نماید. همچنین، روش پیشنهادی به مقاومت‌ها و مکان‌های مختلف خطا، تغییر در پارامترهای خط و تولیدات مختلف منابع حساس نمی‌باشد. سادگی در محاسبات و عملیاتی کردن این الگوریتم از دیگر مزایای این روش به شمار می‌رود. همچنین در صورتی که ریزشبکه رؤیت پذیر باشد، این روش دارای هزینه‌های جانبی نمی‌باشد. به دلیل استفاده از داده‌های ولتاژ و جریان در دو سمت هر بخش، این روش قابلیت اجرا در شبکه‌های شعاعی و حلقوی را دارد. با توجه به این مقایسه، واضح است که دقت روش پیشنهادی از سایر روش‌ها بالاتر بوده که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول این روش می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

روش پیشنهادی بر اساس مدل خط π و استخراج مؤلفه‌های جریان مستقیم ولتاژ و جریان هر بخش توسط تبدیل فوریه سریع در زمان وقوع خطا و حضور سیستم فتوولتائیک و ذخیره‌سازهای انرژی،

جدول (۶): تأثیر تغییر پارامترهای خط بر دقت الگوریتم پیشنهادی

سناریو	۱	۲	۳	۴
مقاومت ($\Omega.km$)	۰/۰۲	۰/۰۹۹	۰/۰۱۹۸	۰/۰۲۰۲
اندوکتانس (H.km)	۰/۱۰	۰/۰۹۹	۰/۰۹۹	۰/۱۰
خازن (F.km)	۲/۲۹	۲/۲۷۸۵	۲/۲۶۷۱	۲/۳۱۲۹
فاصله به دست‌آمده خطا (km)	۰/۹۱۵۲	۰/۹۰۹۹	۰/۹۰۴۶	۰/۹۲۵۰۵
خطا (%)	۱/۶	۱/۷	۱/۸	۱/۵

همان‌طور که از نتایج جدول (۶) مشخص است، بیشترین درصد خطای الگوریتم مربوط به سناریو ۳ با ۱/۸ درصد و کمترین درصد خطا مربوط به سناریوهای ۴ با ۱/۵ درصد است. میانگین خطای این آزمون‌ها ۱/۶۵ درصد و حداکثر تغییرات در خطای الگوریتم ۰/۳ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده حساسیت کم عملکرد روش پیشنهادی در برابر تغییر پارامترهای خط می‌باشد.

۳-۲-۳- تأثیر عملکردهای مختلف منابع بر دقت روش پیشنهادی

به‌منظور ارزیابی تأثیر تغییرات تولید منابع بر دقت روش پیشنهادی، در این قسمت یک خطای تک قطب به زمین با مقاومت خطای ۰/۰۲ اهم در بخش ۵ شبیه‌سازی شده است. زمان خطا ۱/۲ ثانیه در نظر گرفته شده است. جدول (۷) نتایج این تغییرات و تأثیرات آن بر روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول (۷): تأثیر تغییر تولیدات منابع

سناریو	۱	۲	۳
ذخیره‌ساز (Ah)	۷۷۰	۸۲۵	۸۱۰
فتوولتائیک (kW)	۷۰	۱۲۵	۹۰
فاصله واقعی خطا (km)	۰/۱	۰/۱	۰/۱
فاصله به دست‌آمده خطا (km)	۰/۱۴۴	۰/۱۴۳	۰/۱۴۸
خطای الگوریتم پیشنهادی (%)	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۹۰

همان‌طور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، بیشترین درصد خطای الگوریتم پیشنهادی با ۰/۹ درصد مربوط به سناریو ۳ و کمترین درصد خطا با ۰/۸۱ درصد مربوط به سناریو ۲ است. عدم حساسیت الگوریتم پیشنهادی نسبت به عملکردهای مختلف منابع به دلیل استفاده از داده‌های ولتاژ و جریان در لحظه وقوع خطا می‌باشد. به بیان دیگر، بر اساس پارامترهای مورد استفاده در (۱۱)، می‌توان دریافت که اصول عملکرد این روش بر اساس تفاضل مقادیر ولتاژها و جریان‌های خطا در دو سمت خطا می‌باشد. در نتیجه حضور یا عدم حضور منابع تولید پراکنده و مقدار توان تولیدی آن‌ها تأثیری بر عملکرد روش پیشنهادی ندارند.

- [4] R. Dashti, M. Daisy, H. R. Shaker, and M. Tahavori, "Impedance-based fault location method for four-wire power distribution networks", *Ieee Access*, vol. 6, pp. 1342-1349, 2017.
- [5] R. Dashti and S. M. Salehizadeh, "Fault Location in Double Circuit MV Power Distribution Networks Using an Impedance Based Method", (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 14, no. 1, pp. 11-17, 2017. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-324-fa.html>
<http://jiaeee.com/article-1-324-fa.pdf>.
- [6] R. Dashti, M. Ghasemi, and M. Daisy, "Fault location in power distribution network with presence of distributed generation resources using impedance based method and applying π line model", *Energy*, vol. 159, pp. 344-360, 2018.
- [7] R. Dashti and M. Ghasemi, "Fault Location in Power Distribution Network with Presence of Distributed Generation Resources Using Impedance Based Method and Applying π Line Model", (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 14, no. 3, pp. 79-90, 2017. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-451-fa.html>
<http://jiaeee.com/article-1-451-fa.pdf>.
- [8] O. Naidu and A. K. Pradhan, "Precise Traveling Wave-Based Transmission Line Fault Location Method Using Single-Ended Data", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 8, pp. 5197-5207, 2020.
- [۹] دشتی، دیسی، جوادی، "مکان‌یابی خطای تک فاز به روش امیدانسی با بهره‌گیری از روش‌های شناسایی الگو"، نشریه کیفیت و بهره‌وری در صنعت برق ایران، دوره ۷، شماره ۱۴، ۱۳۹۷
- [۱۰] دیسی، دشتی، "مکان‌یابی خطا در شبکه‌های توزیع با استفاده از ترکیب روش امیدانسی و فرورفتگی ولتاژ"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران - الف مهندسی برق، دوره ۱۵، شماره ۱، ۱۳۹۶
- [11] M. Daisy, R. Dashti, and H. R. Shaker, "A new fault-location method for HVDC transmission-line based on DC components of voltage and current under line parameter uncertainty", *Electrical Engineering*, vol. 99, no. 2, pp. 573-582, 2017.
- [12] E. Kamyab, M. Javidi, and J. Sadeh, "Fault Location in Three Terminal Transmission Lines: Time Domain Distributed Line Model and Synchronous Measurements", (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 5, no. 1, pp. 59-67, 2008. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-246-fa.html>
<http://jiaeee.com/article-1-246-fa.pdf>.
- [13] N. Bayati, H. R. Baghaee, A. Hajizadeh, M. Soltani, Z. Lin, and M. Savaghebi, "Local fault location in meshed DC microgrids based on parameter estimation technique", *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 1606-1615, 2021.
- [14] D. Wang, V. Psaras, A. A. Emhemed, and G. M. Burt, "A novel fault let-through energy based fault location for LVDC distribution networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 2, pp. 966-974, 2020.
- [15] Y. Yang, C. Huang, D. Zhou, and Y. Li, "Fault detection and location in multi-terminal DC microgrid based on local measurement", *Electric Power Systems Research*, vol. 194, p. 107047, 2021.
- [16] X. Feng, L. Qi, and J. Pan, "A novel fault location method and algorithm for DC distribution protection",

علاوه بر محاسبه فاصله خطا، بخش خطا را در ریزشبه‌های جریان مستقیم با دقت قابل قبولی به دست آورده است. اصول این روش بر اساس محاسبه تفاضل جریان‌ها و ولتاژهای خطا در پایانه‌های هر بخش می‌باشد. در نتیجه حضور یا عدم حضور منابع تولید پراکنده و میزان تولید توان آن‌ها تاثیری بر دقت الگوریتم پیشنهادی ندارد. عملکرد این روش بر اساس سیستم‌های ارتباطی و هماهنگ‌کننده داده‌های تمام گره‌ها می‌باشد که در صورت رویت پذیر بودن ریزشبه‌ها، نیاز به هزینه‌های جانبی ندارد. به منظور ارزیابی عملکرد این روش، یک ریزشبه جریان مستقیم با ۸ گره در سیمولینک متلب شبیه‌سازی و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از انجام آزمون‌های مختلف، مشخص شد که این روش به مکان‌ها و مقاومت‌های مختلف خطا، تغییر در پارامترهای خط و تغییر در تولیدات منابع حساس نمی‌باشد. در اولین آزمون، فاصله و مقاومت خطاهای مختلف بررسی و بیشینه خطای روش پیشنهادی ۰/۰۱ درصد به دست آمده است. دومین آزمون مربوط به تغییر پارامترهای خط در قالب چهار سناریو بوده که بالاترین درصد خطای این الگوریتم ۱/۸ درصد به دست آمده است. در سومین آزمون، تغییر در تولیدات منابع تولید پراکنده در قالب سه سناریو مورد ارزیابی قرار گرفت که بالاترین درصد خطا ۰/۹ درصد به دست آمده است. همچنین بیشینه خطای الگوریتم پیشنهادی در تمام آزمون‌ها ۱/۸ درصد محاسبه شده که در مقایسه با سایر روش‌ها نشان دهنده دقت قابل قبول این الگوریتم است. این روش در شبکه‌های شعاعی، حلقوی و پیکربندی‌های مختلف قابل اجرا می‌باشد. در تحقیقات آینده می‌توان تاثیرات حضور D-FACTS و تاخیر در سیستم‌های مخابراتی را مورد بررسی قرار داد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری دکتر رحمان دشتی و دکتر حمیدرضا شاکر کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] R. Dashti, M. Daisy, H. Mirshekali, H. R. Shaker, and M. H. Aliabadi, "A Survey of Fault Prediction and Location Methods in Electrical Energy Distribution Network", *Measurement*, vol. 184, p. 109947, 2021.
- [۲] دیسی، علی‌آبادی، جوادی، میارنعیمی، "مکان‌یابی خطاهای دوفاز در ریزشبه‌ها با حضور خودرو برقی و استفاده از مدل گسترده خط"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، دوره ۱۲، شماره ۱، ۱۴۰۲
- [3] M. H. Khazaei and F. Haghjoo, "A Comprehensive PMU-Based Fault Location Algorithm for Double Circuit and Multi-Terminal Transmission Lines", (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 14, no. 1, pp. 1-10, 2017. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-323-en.html>
<http://jiaeee.com/article-1-323-en.pdf>.

- [32] S. K. Srivastva, R. K. Panda, S. S. Nagam, and A. Mohapatra, "Current Derivative based schemes for Fault Location in DC Microgrid", in 2019 8th International Conference on Power Systems (ICPS), 2019: IEEE, pp. 1-6.
- IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 3, pp. 1834-1840, 2017.
- [17] D. Jayamaha, N. Lidula, and A. D. Rajapakse, "Wavelet-multi resolution analysis based ANN architecture for fault detection and localization in DC microgrids", IEEE Access, vol. 7, pp. 145371-145384, 2019.
- [18] A. Makkieh, V. Psaras, R. Peña-Alzola, D. Tzelepis, A. A. Emhemed, and G. M. Burt, "Fault location in DC microgrids based on a multiple capacitive earthing scheme", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9, no. 3, pp. 2550-2559, 2020.
- [19] A. Abdali, K. Mazlumi, and R. Noroozian, "High-speed fault detection and location in DC microgrids systems using Multi-Criterion System and neural network", Applied Soft Computing, vol. 79, pp. 341-353, 2019.
- [20] C. Wang, P. Li, X. Xu, and H. Gao, "A DC Fault Location Method of Multiterminal Flexible DC Distribution Network", Mathematical Problems in Engineering, vol. 2022, 2022.
- [21] A. Akbari Sharif, H. Kazemi karegar, and S. Esmailbeigi, "Fault Detection and Location In DC Microgrids by Recurrent Neural Networks and Decision Tree Classifier", (in eng), Energy Engineering & Management, Research vol. 11, no. 4, pp. 40-47, 2022, doi: 10.22052/11.4.40.
- [22] Y. Yang, C. Huang, and Q. Xu, "A fault location method suitable for low-voltage DC line", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 35, no. 1, pp. 194-204, 2019.
- [23] N. Bayati, H. R. Baghaee, A. Hajizadeh, and M. Soltani, "Localized protection of radial DC microgrids with high penetration of constant power loads", IEEE Systems Journal, vol. 15, no. 3, pp. 4145-4156, 2020.
- [24] L. Kong and H. Nian, "Fault detection and location method for mesh-type DC microgrid using pearson correlation coefficient", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 3, pp. 1428-1439, 2020.
- [25] E. Christopher, M. Sumner, D. W. Thomas, X. Wang, and F. de Wildt, "Fault location in a zonal DC marine power system using active impedance estimation", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. 2, pp. 860-865, 2013.
- [26] J.-D. Park, J. Candelaria, L. Ma, and K. Dunn, "DC ring-bus microgrid fault protection and identification of fault location", IEEE transactions on Power delivery, vol. 28, no. 4, pp. 2574-2584, 2013.
- [27] R. Mohanty, U. S. M. Balaji, and A. K. Pradhan, "An accurate noniterative fault-location technique for low-voltage DC microgrid", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, no. 2, pp. 475-481, 2015.
- [28] S. Dhar, R. K. Patnaik, and P. Dash, "Fault detection and location of photovoltaic based DC microgrid using differential protection strategy", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 5, pp. 4303-4312, 2017.
- [29] S. Coelho et al., "A unified power converter for solar PV and energy storage in dc microgrids", Batteries, vol. 8, no. 10, p. 143, 2022.
- [30] "Mathworks.com", <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/112450-dc-microgrid-model> (accessed).
- [31] A. A. Sharif, H. K. Karegar, and S. Esmailbeigi, "Fault detection and location in dc microgrids by recurrent neural networks and decision tree classifier", in 2020 10th Smart Grid Conference (SGC), 2020: IEEE, pp. 1-6.