

Double phase fault location in microgrids with the presence of electric vehicles and distributed parameters line model

Mohammad Daisy¹, Mahmood Hosseini Aliabadi², Shahram Javadi³, Hasan Meyar Naimi⁴

1- Ph.D. Candidate, Department of Electrical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, moh.daisy.eng@iauctb.ac.ir

2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, mah.hosseini-aliabadi@iauctb.ac.ir

3- Associate Professor, Intelligent Power System Research Center, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, (Corresponding author) sh.javadi@iauctb.ac.ir

4- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, h.meyar.naimi@gmail.com

Abstract:

Nowadays, renewable energy is increasingly used in smart grids and microgrids to reduce the use of fossil fuels and improve network efficiency. Like all power system devices, microgrids are subject to transient and steady-state faults, such as short circuits. These faults impair reliability and consumer dissatisfaction. To accurately, automatically, and economically determine the location of a fault, a robust fault location method is needed to stabilize and repair the damaged part of the network. Given the access to the data of all nodes, the fault in these networks can be located based on the data on the two terminals. Accordingly, this paper proposes a method for determining fault distance and faulty section in the island and grid-connected microgrids. The proposed method uses distributed parameters line model and calculates the location of double-phase faults in the microgrid based on voltage and current data on both sides of each section, taking renewable energies and electric vehicles into account. At first, the measurement devices receive and store the current and voltage data at the beginning and end of each section. If a fault occurs, the fault distance is determined by calculating the difference between voltages and currents on both sides of the fault. According to the sampling rate, many voltage and current samples are obtained during the fault. The proposed method calculates a fault distance for each sample. As a result, many fault distances are obtained. These calculations are done for all sections. In the next step, the distances obtained for each section are plotted on the coordinate axis, and a curve is obtained for each section. Among the curves obtained, one curve has a global minimum, which indicates the faulty section. Other curves are ascending or descending. In addition, the global minimum point indicates the calculated distance of the fault from the beginning of the section. This method is not sensitive to electric vehicle models and distributed generation sources and uses only less than half-cycle data to execute the algorithm. The performance of the method is investigated with the simulation of a 9-bus microgrid in MATLAB/SIMULINK. The effects of changes in line parameters (two scenarios), different fault locations, fault resistance (0, 25, and 50 Ω), fault inception angles (36, 90, 180, and 270 degrees), different DGs operation modes (three scenarios), and measurements error ($\pm 3\%$) are studied. The maximum and minimum errors of this method are obtained to be 0.97% and 0.02%, respectively. The results indicate the high accuracy of the proposed method compared to other fault location methods.

Keywords: Microgrid, Fault Location, Electric Vehicles, Distributed Parameters Line Model

Submit date: 2022/05/06

Accepted date: 2022/05/31

Corresponding author's Name: Shahram Javadi and Mahmood Hosseini Aliabadi

Corresponding author's address: sh.javadi@iauctb.ac.ir, mah.hosseini-aliabadi@iauctb.ac.ir

مکان‌یابی خطاهای دوفاز در ریزشبکه‌ها با حضور خودرو برقی و استفاده از مدل گسترده خط

نوع مطالعه: پژوهشی

محمد دیسی^۱، دانشجوی دکتری، محمود حسینی علی‌آبادی^۱، استادیار، شهرام جوادی^۲، دانشیار، حسن میارنعمی^۱، استادیار.

۱- دانشکده فنی مهندسی- واحد تهران مرکز - دانشگاه آزاد اسلامی- تهران- ایران

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

moh.daisy.eng@iauctb.ac.ir, mah.hosseini-aliabadi@iauctb.ac.ir

sh.javadi@iauctb.ac.ir, h.meyar.naimi@gmail.com

چکیده: امروزه استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در شبکه‌های هوشمند و ریزشبکه‌ها به‌منظور کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و افزایش کارایی شبکه رو به افزایش است. مشابه تمام دستگاه‌های شبکه برق، ریزشبکه‌ها نیز تحت خطاهای گذرا و ماندگار مانند اتصال کوتاه قرار دارند. این خطاها منجر به کاهش قابلیت اطمینان، نارضایتی مصرف‌کننده‌ها و تحمیل خسارت‌های مالی به شرکت‌های برق می‌شود. برای تعیین دقیق، خودکار و اقتصادی یافتن محل خطا، برای ایجاد ثبات و ترمیم بخش آسیب‌دیده شبکه، یک روش دقیق و خودکار مکان‌یابی خطا مورد نیاز است. با توجه به قابلیت رویت‌پذیری در ریزشبکه‌ها، می‌توان مکان خطا را بر اساس داده‌های ولتاژ و جریان در دو پایانه انجام داد. بر این اساس، در این مقاله یک روش تعیین فاصله و بخش خطا در ریزشبکه‌های جزیره‌ای و متصل به شبکه پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی با استفاده از مدل گسترده خط و بر اساس اطلاعات ولتاژ و جریان دو سمت هر بخش، مکان خطاهای دوفاز را با در نظر گرفتن انرژی‌های تجدید پذیر و خودرو برقی محاسبه می‌کند. این روش به مدل خودرو برقی و منابع تولید پراکنده حساس نیست و فقط از داده‌های کمتر از نیمی از چرخه برای اجرای الگوریتم استفاده می‌کند. عملکرد روش پیشنهادی با کمک یک ریزشبکه ۹ شینه در نرم‌افزار متلب بررسی شده است. تأثیر تغییرات در پارامترهای خط، مکان‌های مختلف خطا، مقاومت‌ها و زاویه‌های شروع خطا، حالت‌های مختلف عملکرد منابع تولید پراکنده و خطاهای اندازه‌گیری مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج تأیید می‌کند که روش پیشنهادی از دقت بالایی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه، مکان‌یابی خطا، خودرو برقی، مدل گسترده خط.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۰

نام نویسندگان مسئول: شهرام جوادی، محمود حسینی علی‌آبادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۱- مقدمه

(Katić et al., 2019). مدیریت خطا و بهبود اثربخشی، جبران توان راکتیو و متعادل کردن ولتاژ، برخی از مزایا و کاربردهای این خودروها در شبکه هستند. با توجه به توضیحات ذکر شده، بررسی تأثیرات حضور و عملکرد خودروهای برقی در ریزشبه‌ها بسیار حائز اهمیت است (Mazumder et al., 2020; Lu et al., 2015). مسائل ذکر شده منجر به طبقه‌بندی اشتباه خطاها یا عدم تشخیص آن‌ها می‌شود. علاوه بر این، اگر ریزشبه در حالت جزیره‌ای باشد، ممکن است مؤلفه‌ی جریان خطای ناشی از منابع انرژی به سطح پیکاپ دستگاه حفاظتی برای تشخیص خطا نرسد؛ بنابراین حسگرها باید نرخ نمونه‌برداری بالایی داشته باشند و سیستم ارتباطی باید بسیار سریع و قابل اطمینان باشد. از طرف دیگر، پارامترهای خط ممکن است به دلیل عمر و شرایط آب‌وهوا تغییر کنند. از این رو، الگوریتم مکان‌یابی خطا نباید توسط انرژی‌های تجدید پذیر، تغییر در پارامترهای خط و شرایط مختلف خطا مانند مقاومت‌ها، فاصله‌ها و زاویه‌های شروع مختلف خطا به خطر بیفتد (Dashti, Daisy, Mirshekali, et al., 2021).

استفاده از اندازه‌گیرهای ولتاژ و جریان در ابتدا و انتهای هر بخش از شبکه‌های توزیع به دلایل اقتصادی و تعمیر و نگهداری قابل توجیه نیست؛ اما در ریزشبه‌ها به دلیل تعداد محدود گره‌ها و کاربردهای حساس از جمله مناطق نظامی یا بیمارستان، استفاده از اندازه‌گیرهای هر دو سمت بخش، قابل توجیه است. لذا روش‌های گوناگونی در زمینه مکان‌یابی خطا در ریزشبه‌ها که از اطلاعات ولتاژ و جریان در هر دو سمت بخش استفاده می‌کنند، ارائه شده است. در سال‌های گذشته چندین الگوریتم مکان‌یابی خطا در شبکه‌های توزیع و ریزشبه‌ها ارائه شده است. به طور خلاصه می‌توان به روش‌های امپدانس محور (Orozco-Henao et al., 2019)، روش‌های هوشمند (Hassani et al., 2020) و امواج سیار (Liang et al., 2019) اشاره کرد. روش‌های امپدانس با محاسبه هارمونیک‌های اصلی ولتاژ و جریان، فقط فاصله خطا را تعیین می‌کنند. این روش در برابر مقاومت خطا و تأثیر متقابل فازها بسیار حساس است. علاوه بر این، روش امپدانس با مشکل چند پاسخی در شبکه توزیع مواجه است (Dashti et al., 2018). 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 روش‌ها بر اساس محاسبه و یا سنجش زمان مورد نیاز برای حرکت موج از محل قرار گرفتن مکان‌یاب خطا تا محل خطا است. این روش‌ها نیز دارای محدودیت‌هایی هستند که از جمله آن‌ها می‌توان 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 امپدانس، فقط فاصله خطا را محاسبه می‌کند. همچنین دقت این روش‌ها به نوع خطا، زاویه ولتاژ هنگام وقوع خطا و موقعیت خطا وابسته است که در این موارد روش‌های امپدانس با مشکلات کمتری روبرو بوده و ساده و کم هزینه تر هستند (Naidu et al., 2020). گروه

شبکه‌های توزیع، ارتباط میان شبکه انتقال انرژی الکتریکی و مصرف‌کننده‌ها را فراهم می‌سازند. اکثر زمان‌های برون‌رفتی که مشترکین تجربه می‌کنند، به دلیل وقوع خطا بر روی شبکه توزیع ولتاژ متوسط و پایین است. سیستم‌های برق در پنجاه سال گذشته به سرعت رشد کرده و این امر موجب افزایش تعداد خطوط و طول کل آن‌ها شده است. این خطوط خطاهایی را تجربه می‌کنند که توسط طوفان، رعدوبرق، برف، باران، خرابی عایق، فرسودگی تجهیزات، اتصال کوتاه ناشی از پرندگان و سایر اجسام خارجی ایجاد می‌شوند (غفارزاده، ۱۳۹۲). وقوع خطا می‌تواند باعث بروز مشکلاتی نظیر صدمه دیدن تجهیزات شبکه، ایجاد وقفه در سرویس‌دهی به مصرف‌کنندگان، خارج شدن شبکه از حالت پایدار و درنهایت پایین آمدن قابلیت اطمینان شبکه گردد که تمامی این موارد باعث تحمیل خسارت‌های مالی به مصرف‌کنندگان و شرکت برق می‌گردد. از طرفی خصوصی شدن شرکت‌های برق باعث ایجاد رقابت بین آن‌ها در زمینه افزایش سطح کیفیت و قابلیت اطمینان شبکه برق‌رسانی شده است. بنابراین تلاش شرکت‌های برق بر این امر است که اولاً از این خطوط در برابر خطا حفاظت و ثانیاً در صورت وقوع خطا، مکان خطا در اسرع وقت شناسایی شده تا عملیات لازم جهت ترمیم شبکه و برقراری مجدد انرژی الکتریکی انجام شود. این عمل لازم است به گونه‌ای صورت گیرد که میزان خسارت ناشی از عدم فروش برق در زمان قطع شبکه به حداقل ممکن برسد. مکان‌یابی خطا مزایایی چون صرفه‌جویی در زمان و نیروی انسانی، بهبود آمادگی سیستم در تداوم برق‌رسانی، اصلاح برنامه‌ریزی آینده و بهبود فاکتورهای اقتصادی را به دنبال دارد و درنهایت سبب رضایتمندی مشترکین و افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌گردد (Dashti et al., 2014). بر اساس مطالعات انجام شده، سیر تکاملی راهکارهای شناخت مکان خطا را می‌توان به صورت تماس مشترکین و ابراز مشاهدات خود، ورود گروه بهره‌برداران در طول خط، استفاده از دستگاه خطا یاب off-line و استفاده از دستگاه خطا یاب بلادرنگ بر شمرد که اغلب روش‌های بلادرنگ جهت مکان‌یابی خطا مورد توجه قرار گرفته‌اند.

چالش برانگیزترین مشکل در بخش حفاظت از شبکه‌های هوشمند و ریزشبه‌ها، ادغام منابع انرژی تجدید پذیر و تجهیزاتی از جمله خودرو برقی و غیره است که منجر به پخش بار دوطرفه و همچنین سطوح مختلف جریان خطا در حالت‌های متصل به شبکه یا جزیره‌ای می‌شود. ادغام خودروهای برقی با شبکه‌های توزیع، چالش‌های جدیدی را برای مدیریت بار ایجاد می‌کند و فرصت‌هایی را برای صرفه‌جویی و تولید انرژی الکتریکی به ارمان می‌آورد (Wang et al., 2014). علاوه بر این، اگر تعدادی از این خودروها در یک شبکه حضور داشته باشند، می‌تواند از حالت تزریق به شبکه (V2G) برای پشتیبانی و تثبیت عملکرد شبکه در هنگام خطا استفاده شود

جدول (۱): بررسی مقالات مختلف در زمینه مکان‌یابی خطا در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی

مرجع	(Daisy) et al., (2016)	(Chen) et al., (2017)	(Gabr) et al., (2017)	(Dashti) et al., (2018)	(Gord et) al., (2019)	(Aboshady) et al., 2019	(Mirshekali) et al., 2020	(دیدی) et al., (1396)	(دشتی) et al., (1397)	روش پیشنهادی
مدل خط	گسترده	کوتاه	کوتاه	π	گسترده	گسترده	گسترده	گسترده	π	گسترده
سیستم نامتعادل	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ریزشبکه	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	✓
حضور منابع تجدید پذیر	-	✓	-	✓	-	-	✓	-	-	✓
حضور خودرو برقی	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
بررسی تغییر پارامترهای خط	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓

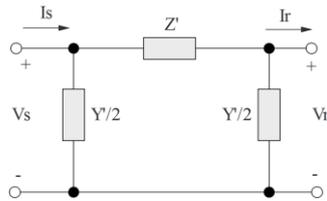
قرار گرفته است. نهایتاً، در بخش چهارم به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

۲- روش پیشنهادی

این روش در قالب دو قسمت ارائه شده است. ابتدا فاصله خطا برای خطاهای دوفاز و در نظر گرفتن مدل گسترده خط، بررسی شده است. سپس بخش خطادار برای خطاهای ذکر شده محاسبه شده است. در ادامه، مدل گسترده خط بررسی و سپس به محاسبه مکان خطا پرداخته شده است.

۲-۱- مدل گسترده خط

مدل گسترده خط به صورت شکل (۱) در نظر گرفته شده که در آن Y' و Z' به ترتیب ادمیتانس موازی و امپدانس سری با جزییات مربوط به مدل خط گسترده ارائه گردیده است. روابط مدل گسترده خط در (Stevenson, 1975) به صورت کامل تشریح شده‌اند.



شکل (۱): مدار معادل خط گسترده (Stevenson, 1975)

۲-۲- محاسبه فاصله خطا با استفاده از داده‌های ولتاژ

و جریان خطا در هر بخش

شکل (۲) مدار معادل یک بخش از ریزشبکه با در نظر گرفتن مدل گسترده خط در صورتی که خطای دوفاز رخ داده باشد را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که در زمان وقوع خطا، داده‌های ولتاژ و جریان به دو قسمت در ابتدا و انتهای بخش دسته بندی شده‌اند.

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 بدین صورت 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 (Daisy & Dashti, 2016). چندین روش ارائه شده مرتبط با این موضوع در جدول (۱) بررسی شده است.

در این مقاله روش جدیدی جهت تعیین فاصله و بخش خطا در ریز شبکه‌های حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه با حضور منابع تجدید پذیر ارائه شده است. در این روش، با فرض رؤیت پذیری شبکه و با استفاده از اطلاعات ولتاژ و جریان در ابتدا و انتهای هر بخش، مکان خطا تعیین شده است. همچنین حضور خودرو برقی در حالت تزریق به شبکه $(V2G)$ و تأثیر آن بر عملکرد روش، مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به تغییر پارامترهای خط بر اثر شرایط آب و هوایی و عمر خطوط، این پارامترها به صورت متغیر در نظر گرفته شده‌اند. به منظور افزایش دقت روش پیشنهادی از مدل گسترده خط استفاده شده است. این روش به حضور منابع تجدید پذیر و خودروهای برقی حساس نیست. روش پیشنهادی در یک ریزشبکه ۹ شینه مورد ارزیابی قرار گرفته و تأثیر مکان‌های مختلف، مقاومت‌ها و زاویه‌های مختلف شروع خطا، خطاهای اندازه‌گیری و تغییر توان تولید شده توسط منابع بر دقت روش پیشنهادی بررسی شده است.

بخش‌بندی این مقاله به صورت زیر است. در بخش دوم روش پیشنهادی جهت محاسبه فاصله و بخش خطا بیان شده است. سپس نتایج شبیه‌سازی و مقایسه با دیگر روش‌ها در بخش سوم مورد بررسی

$$-v_{a1} + \left(r_{aa} I_1 + L_{aa} \frac{di_1}{dt} + L_{ab} \frac{di_3}{dt} + L_{ac} \frac{di_5}{dt} \right) \times x + v_{fa} - \left(\left(L_{bb} \frac{di_3}{dt} + L_{ba} \frac{di_1}{dt} + L_{bc} \frac{di_5}{dt} \right) \times x + v_{b1} \right) = 0 \quad (10)$$

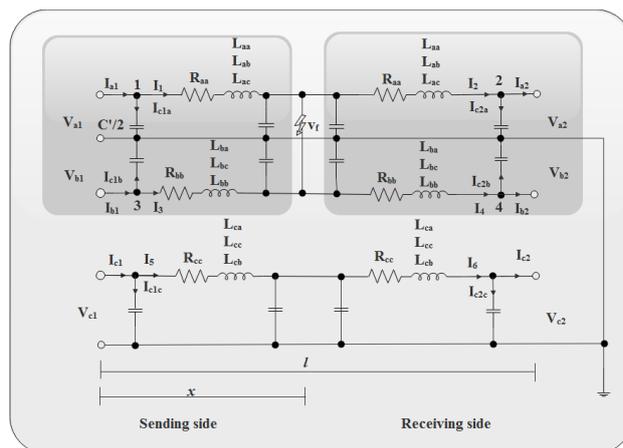
$$-v_f + r_{aa}(l-x)I_2 + \left(L_{aa} \frac{di_2}{dt} + L_{ab} \frac{di_4}{dt} + L_{ac} \frac{di_6}{dt} \right) \times (l-x) + v_{a2} - v_{b2} + \left(L_{bb} \frac{di_4}{dt} + L_{ba} \frac{di_2}{dt} + L_{bc} \frac{di_6}{dt} \right) \times (l-x) = 0 \quad (11)$$

با جایگذاری روابط (۱) و (۶) در رابطه (۱۰) خواهیم داشت:

$$-v_{a1} + \left(r_{aa} \left(I_{a1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{a1}}{dt} x \right) + L_{aa} \frac{d \left(I_{a1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{a1}}{dt} x \right)}{dt} + L_{ab} \frac{d \left(I_{b1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{b1}}{dt} x \right)}{dt} + L_{ac} \frac{d \left(I_{c1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{c1}}{dt} x \right)}{dt} \right) \times x + v_{fa} - \left(\left(L_{bb} \frac{d \left(I_{b1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{b1}}{dt} x \right)}{dt} + L_{ba} \frac{d \left(I_{a1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{a1}}{dt} x \right)}{dt} + L_{bc} \frac{d \left(I_{b1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{b1}}{dt} x \right)}{dt} \right) + r_{bb} \left(I_{b1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{b1}}{dt} x \right) \right) \times x + v_{b1} = 0 \quad (12)$$

همچنین با جایگذاری روابط (۴) و (۸) در رابطه (۱۱) داریم:

$$-v_f + r_{aa}(l-x) \left(I_{a2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{a2}}{dt} (l-x) \right) + \left(L_{aa} \frac{d \left(I_{a2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{a2}}{dt} (l-x) \right)}{dt} + L_{ab} \frac{d \left(I_{b2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{b2}}{dt} (l-x) \right)}{dt} + L_{ac} \frac{d \left(I_{c2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{c2}}{dt} (l-x) \right)}{dt} \right) \times (l-x) + v_{a2} - v_{b2} - \left(L_{bb} \frac{d \left(I_{b2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{b2}}{dt} (l-x) \right)}{dt} + L_{ba} \frac{d \left(I_{a2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{a2}}{dt} (l-x) \right)}{dt} + L_{bc} \frac{d \left(I_{c2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{c2}}{dt} (l-x) \right)}{dt} \right) \times (l-x) - r_{bb}(l-x) \left(I_{b2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{b2}}{dt} (l-x) \right) = 0 \quad (13)$$



شکل (۲): مدار معادل یک بخش از ریزشبکه با در نظر گرفتن مدل گسترده خط در صورت بروز خطای دوفاز با اعمال KCL در گره ۱ در شکل (۲) خواهیم داشت:

$$I_{a1} = I_1 + I_{c1a} \Rightarrow I_1 = I_{a1} - I_{c1a} \quad (1)$$

$$I_{c1a} = \frac{c'}{2} \frac{dv_{a1}}{dt} x \quad (2)$$

با توجه به مدل گسترده خط، مقدار $C'/2$ از (۳) به دست می‌آید:

$$\frac{c'}{2} = \frac{c}{2} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad (3)$$

که γ : ثابت انتشار، l : طول خط، x : فاصله خطا از ابتدای بخش می‌باشند.

v_{a1} و v_{a2} : ولتاژ ابتدا و انتهای بخش

I_{a1} و I_{a2} : جریان ابتدا و انتهای بخش

و همچنین با اعمال KCL در گره ۲ از شکل (۲)، معادلات (۴) و (۵) بدست می‌آیند:

$$I_2 = I_{a2} + I_{c2a} \quad (4)$$

$$I_{c2a} = \frac{c'}{2} \frac{dv_{a2}}{dt} (l-x) \quad (5)$$

با اعمال KCL در گره‌های ۳ و ۴، روابط (۶-۹) به دست می‌آید:

$$I_{b1} = I_3 + I_{c1b} \Rightarrow I_3 = I_{b1} - I_{c1b} \quad (6)$$

$$I_{c1b} = \frac{c'}{2} \frac{dv_{b1}}{dt} x \quad (7)$$

$$I_4 = I_{b2} + I_{c2b} \quad (8)$$

$$I_{c2b} = \frac{c'}{2} \frac{dv_{b2}}{dt} (l-x) \quad (9)$$

سپس با اعمال KVL در حلقه‌های سمت چپ و راست شکل (۲) معادلات (۱۰، ۱۱) حاصل می‌شوند:

می‌آید. اگر فاصله‌های به دست آمده در هر بخش به صورت یک نمودار در محور x و y نشان داده شود، فقط بخش اصلی خطا دارای یک مقدار کمینه مطلق (Global Minimum) است و دیگر نمودارها به صورت صعودی یا نزولی می‌باشند. این محاسبات با استفاده از معادله (۱۵) انجام می‌شود.

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

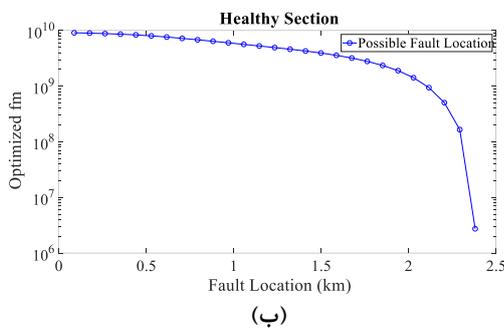
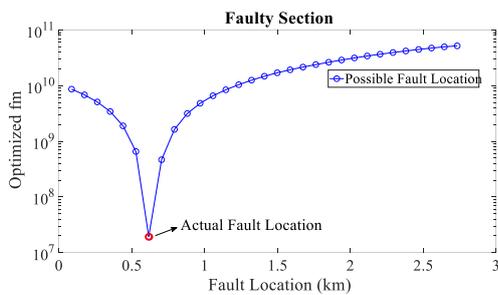
که:

$$x_i = v_s, \dot{i}_s, v_r, \dot{i}_r, x$$

$$s_i = i^{th} \text{ section}$$

$$0 < x_i < l$$

f : ولتاژ نقطه خطا در ابتدای بخش) - (ولتاژ نقطه خطا در انتهای بخش)، مقدار کمینه، v_s و v_r : ولتاژ ابتدا و انتهای بخش، \dot{i}_s و \dot{i}_r : جریان ابتدا و انتهای بخش و l به عنوان طول بخش است. s_i نیز بین ۱ و تعداد کل بخش‌ها (n) متغیر است. همچنین i نیز تعداد بخش‌ها است. به عنوان مثال، شکل (۳)، خروجی معادلات (۱۴) و (۱۵) را نشان می‌دهد.



شکل (۳): خروجی معادله (۱۴) در یک بخش از ریزش شبکه (الف) با حضور خطا (ب) بدون حضور خطا

شکل (۳) (الف) خروجی معادله (۱۴) را در یک بخش از ریزش شبکه به طول ۲/۷ کیلومتر و با در نظر گرفتن یک خطای دوفاز به زمین در فاصله ۰/۶ کیلومتری از ابتدای بخش را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۳) (ب) خروجی این معادله را در یک بخش بدون خطا نشان می‌دهد. دایره‌های نشان داده شده در این شکل، مکان‌های احتمالی خطا را با استفاده از معادله (۱۴) نشان می‌دهند. مقدار کمینه مطلق این دایره‌ها در محور x ، فاصله واقعی خطا در بخش معیوب است که با استفاده از معادله (۱۵) بدست آمده است.

با قرار دادن رابطه (۱۳) در (۱۲) به رابطه (۱۴) می‌رسیم:

$$\begin{aligned} & \left(r_{aa} \left(I_{a1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{a1}}{dt} x \right) + L_{aa} \frac{d \left(I_{a1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{a1}}{dt} x \right)}{dt} + \right. \\ & \left. L_{ab} \frac{d \left(I_{b1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{b1}}{dt} x \right)}{dt} + L_{ac} \frac{d \left(I_{c1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{c1}}{dt} x \right)}{dt} \right) \times x - \\ & \left(\left(L_{bb} \frac{d \left(I_{b1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{b1}}{dt} x \right)}{dt} + L_{ba} \frac{d \left(I_{a1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{a1}}{dt} x \right)}{dt} + \right. \right. \\ & \left. \left. L_{bc} \frac{d \left(I_{b1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{b1}}{dt} x \right)}{dt} \right) + r_{bb} \left(I_{b1} - \frac{c'}{2} \frac{dv_{b1}}{dt} x \right) \right) \times x + \\ & r_{aa} (l-x) \left(I_{a2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{a2}}{dt} (l-x) \right) + \\ & \left(L_{aa} \frac{d \left(I_{a2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{a2}}{dt} (l-x) \right)}{dt} + L_{ab} \frac{d \left(I_{b2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{b2}}{dt} (l-x) \right)}{dt} + \right. \\ & \left. L_{ac} \frac{d \left(I_{c2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{c2}}{dt} (l-x) \right)}{dt} \right) \times (l-x) - \\ & \left(L_{bb} \frac{d \left(I_{b2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{b2}}{dt} (l-x) \right)}{dt} + L_{ba} \frac{d \left(I_{a2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{a2}}{dt} (l-x) \right)}{dt} + \right. \\ & \left. L_{bc} \frac{d \left(I_{c2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{c2}}{dt} (l-x) \right)}{dt} \right) \times (l-x) - r_{bb} (l-x) \\ & \left(I_{b2} + \frac{c'}{2} \frac{dv_{b2}}{dt} (l-x) \right) = (v_{a1} - v_{a2}) + \\ & (-v_{b1} + v_{b2}) \end{aligned} \quad (14)$$

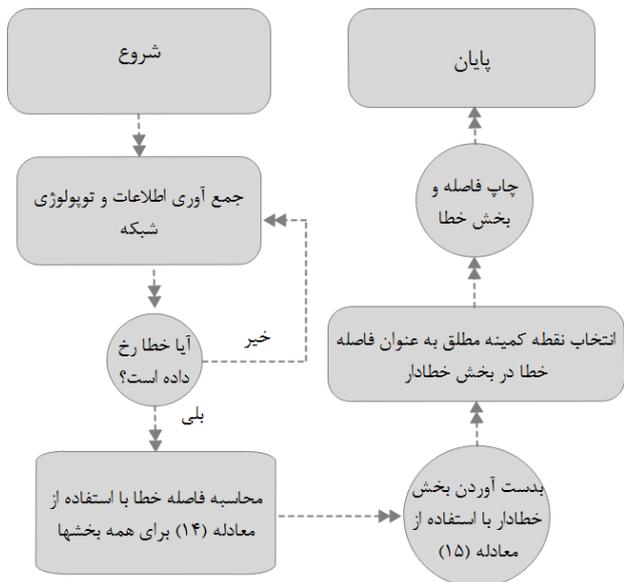
با حل معادله (۱۴)، فاصله خطاهای دوفاز ($L-L$) از ابتدای بخش به دست می‌آید. به همین طریق، معادلات محاسبه فاصله خطا برای خطاهای دوفاز به زمین ($L-L-G$) را می‌توان بدست آورد. معادلات جریان‌ها مشابه معادلات جریانی بدست آمده در خطای دو فاز به هم می‌باشند، تنها تفاوت در معادلات حلقه‌ها است که یک مقاومت به مقاومت خطا افزوده خواهد شد. در نهایت معادله نهایی مشابه معادله (۱۴) است. با استفاده از این معادله، به ازای هر بخش از ریزش شبکه، یک فاصله خطا به دست می‌آید. تخمین بخش اصلی خطا در بخش بعد به صورت کامل بررسی شده است.

۳-۲- محاسبه بخش خطا

با استفاده از معادله (۱۴) می‌توان فاصله خطا را از ابتدای بخش بدست آورد. این معادله، هنگامی که یک خطا رخ می‌دهد، به ازای ولتاژها و جریان‌های مختلف، فواصل خطای مختلفی را محاسبه می‌کند. از این رو، برای هر خطا، چندین بخش و فاصله خطا به دست

۲-۴- فلوچارت روش پیشنهادی

در این روش، ابتدا داده‌های جریان و ولتاژ در ابتدا و انتهای هر بخش و توپولوژی شبکه دریافت می‌گردد. در این مرحله از سیگنال‌های دریافت شده توسط تجهیزات حفاظتی برای تشخیص خطا استفاده شده است (Dashti, Daisy, & Aliabadi, 2021;). سپس در صورت وقوع خطا، با استفاده از معادله (۱۴) فاصله خط محاسبه می‌گردد. بدیهی است که به ازای ولتاژها و جریان‌های مختلفی که در لحظه وقوع خطا ثبت می‌شوند، فاصله‌های متعددی از خطا به دست می‌آیند. این محاسبات برای همه بخش‌ها انجام خواهد داشت. در مرحله بعد، فاصله‌های به دست آمده باید با استفاده از (۱۵) تجزیه و تحلیل شوند تا بخش واقعی خطا به دست آید. اگر $f(x_i, s_i)$ برای هر بخش کمینه مطلق را ایجاد کند، بخش معیوب را نشان می‌دهد (همان‌طور که در شکل (۳) الف) نشان داده شده است). سایر بخش‌ها به صورت صعودی یا نزولی هستند (همان‌طور که در شکل (۳) ب) نشان داده شده است). علاوه بر این، x که کمینه مطلق را در بخش مورد نظر نشان می‌دهد، فاصله خطای محاسبه شده را در آن بخش مشخص می‌کند. شکل (۴) فلوچارت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

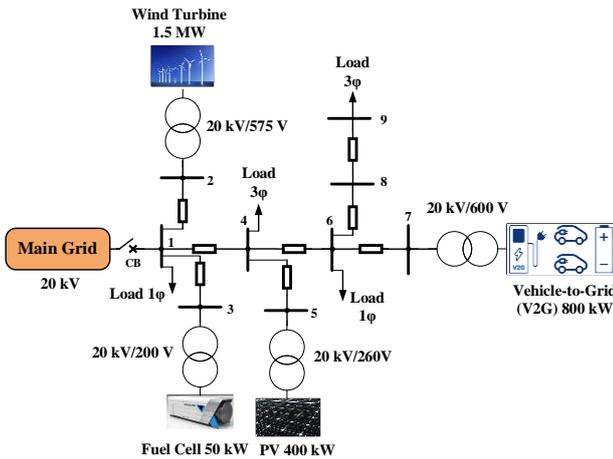


شکل (۴): فلوچارت روش پیشنهادی

۳- نتایج شبیه‌سازی

۳-۱- ریزشبکه مورد مطالعه

ارزیابی روش پیشنهادی با در نظر گرفتن یک ریز شبکه ۲۰ kV با ۹ گره مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۵): ریزشبکه مورد مطالعه

فرکانس سیستم ۵۰ Hz و طول کل این شبکه ۱۵/۸ کیلومتر می‌باشند. ریزشبکه مورد مطالعه دارای منابعی از جمله توربین بادی، سیستم فتوولتائیک، پیل سوختی و خودرو برقی است. این شبکه با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و خط‌های دو فاز با مقاومت‌های ۰، ۲۵ و ۵۰ اهم در حالت‌های جزیره‌ای و متصل به شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین حساسیت این روش در زاویه‌های مختلف شروع خطا (۳۶، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه)، تأثیر تغییر پارامترهای خط، خط‌های اندازه‌گیری و تغییر توان تولید شده در منابع مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل (۵) ریزشبکه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

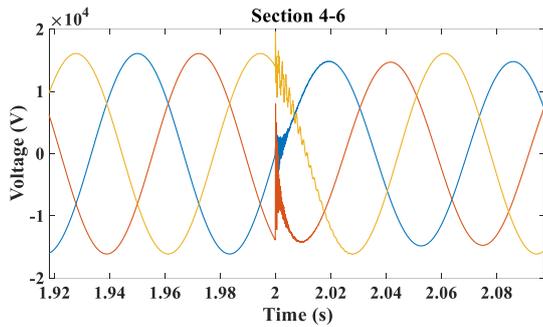
• مشخصات توربین بادی مورد مطالعه

در این مدل، یک توربین بادی ۱/۵ مگاواتی متصل به ریزشبکه ۲۰ کیلوولت برق را به شبکه صادر می‌کند. توربین بادی با استفاده از یک ژنراتور القایی دوسو تغذیه*، از یک ژنراتور القایی روتور سیم‌پیچی شده و یک مبدل IGBT (AC/DC/AC) مبتنی بر PWM مدل‌سازی شده توسط منابع ولتاژ، تشکیل شده است. سیم‌پیچ استاتور مستقیماً به شبکه ۵۰ Hz متصل می‌شود. در حالی که روتور از طریق یک مبدل AC/DC/AC با فرکانس متغیر تغذیه می‌شود. در این مدل سرعت باد در ۱۵ متر بر ثانیه ثابت است. سیستم کنترل از یک کنترل‌کننده گشتاور برای حفظ سرعت در ۱/۲ پرینیت استفاده می‌کند. توان راکتیو تولید شده توسط توربین بادی در صفر مگاوار تنظیم شده است. برای اتصال مبدل به شبکه از یک ترانسفورماتور اتصال سه فاز (۲۰ kV/۵۷۵V) استفاده شده است.

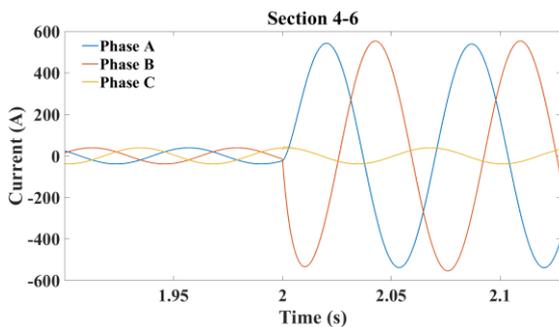
• مشخصات پیل سوختی مورد مطالعه

در این سیستم از یک پیل سوختی ۵۰ کیلووات که از طریق اینورتر IGBT به ریزشبکه متصل می‌شود، استفاده شده است. اینورتر از سوئیچینگ هیستریزس استفاده می‌کند و با فعال کردن جریان محور مستقیم در حالی که توان راکتیو را در صفر وار نگه می‌دارد، توان اکتیو را کنترل می‌کند. برای اتصال مبدل به شبکه از یک ترانسفورماتور

الگوریتم پیشنهادی، به ازای هر بخش یک نمودار به دست می‌آید. نمودارهایی که به صورت صعودی یا نزولی باشند، بخش خطادار را نشان نمی‌دهند. تنها نموداری که یک نقطه کمینه مطلق را نشان دهد، بخش اصلی خطا است. شکل (۸) نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی در تمام بخش‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که فقط نمودار بخش ۴-۶ با طول خطای ۰/۴ دارای کمینه مطلق است و دیگر نمودارها به صورت نزولی هستند. در نتیجه بخش ۴-۶ به عنوان بخش خطادار با فاصله خطای ۰/۴ کیلومتر به عنوان مکان خطا به دست می‌آید.



شکل (۶): شکل موج ولتاژ خطا در بخش ۴-۶



شکل (۷): شکل موج جریان خطا در بخش ۴-۶

• ارزیابی روش پیشنهادی در مکان‌های مختلف خطا
در این قسمت، شش مکان مختلف با مقاومت خطای $20\ \Omega$ جهت اعمال خطای واقعی و آزمودن الگوریتم پیشنهادی در مکان‌های مختلف خطا بررسی شده است. به منظور به دست آوردن دقت روش پیشنهادی از معادله (۱۶) استفاده می‌شود.

$$(16) \quad \text{خطا \%} = \left| \frac{\text{طول محاسبه شده خطا} - \text{طول واقعی خطا}}{\text{طول کل ریز شبکه}} \right| \times 100$$

نتایج این آزمون‌ها در جدول (۵) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۵)، مشاهده می‌شود که بیشینه خطای این روش ۰/۳۷ در بخش ۸-۹ و کمینه خطا ۰/۰۲ در بخش ۱-۲ است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده عدم حساسیت روش پیشنهادی به مکان‌های مختلف خطا است.

اتصال سه فاز (۲۰ kV/۲۰۰ V) استفاده شده است. اطلاعات بیشتر از این پیل سوختی در (Zhu et al., 2002) نشان داده شده است.

• مشخصات سیستم فتوولتائیک مورد مطالعه
مزرعه PV شامل چهار آرایه PV است که ۱۰۰ کیلووات را با تابش خورشید $1000\ \text{W/m}^2$ تحویل می‌دهد. یک بلوک آرایه PV متشکل از ۶۴ رشته موازی است که هر رشته دارای ۵ ماژول است که به صورت سری متصل شده‌اند. هر آرایه PV به یک مبدل DC/DC متصل است. خروجی‌های مبدل‌های تقویت‌کننده به یک گره DC مشترک با ولتاژ ۵۰۰ ولت متصل می‌شوند. یک مبدل ولتاژ سه فاز ۵۰۰ ولت جریان مستقیم را به ۲۶۰ ولت جریان متناوب تبدیل کرده و ضریب توان واحد را حفظ می‌کند. برای اتصال مبدل به شبکه از یک ترانسفورماتور اتصال سه فاز (۲۰ kV/۲۶۰ V) استفاده شده است.

• مشخصات خودرو برقی مورد مطالعه
این مدل متشکل از ده خودرو بوده و هر خودرو دارای دو باتری است. توان و ظرفیت نامی هر باتری به ترتیب ۲۰ کیلووات و ۸۵ کیلووات ساعت و بازده این سیستم ۹۰٪ می‌باشند. این سیستم در حالت تزریق به شبکه (Vehicle-to-Grid) طراحی شده و در صورت بروز حادثه، از توان موجود برای تنظیم شبکه استفاده می‌کند. برای اتصال این سیستم به شبکه از یک ترانسفورماتور اتصال سه فاز (۲۰ kV/۶۰۰ V) استفاده شده است.

• مشخصات خطوط و بارها

جدول (۲): طول خطوط

شماره بخش	۲-۱	۳-۱	۴-۱	۵-۴	۶-۴	۷-۶	۸-۶	۹-۸
طول (km)	۲/۷	۲/۱	۲/۴	۲/۷	۲/۴	۱/۹	۰/۶	۱

جدول (۳): مشخصات پارامترهای خط

$[C_1\ C_0]$ (F/m)	$[L_1\ L_0]$ (H/m)	$[R_1\ R_0]$ (Ω /m)
$1/3065 \times 10^{-11}$	$8/8580 \times 10^{-7}$	$1/5370 \times 10^{-5}$
$4/355 \times 10^{-12}$	$2/6574 \times 10^{-6}$	$4/6120 \times 10^{-5}$

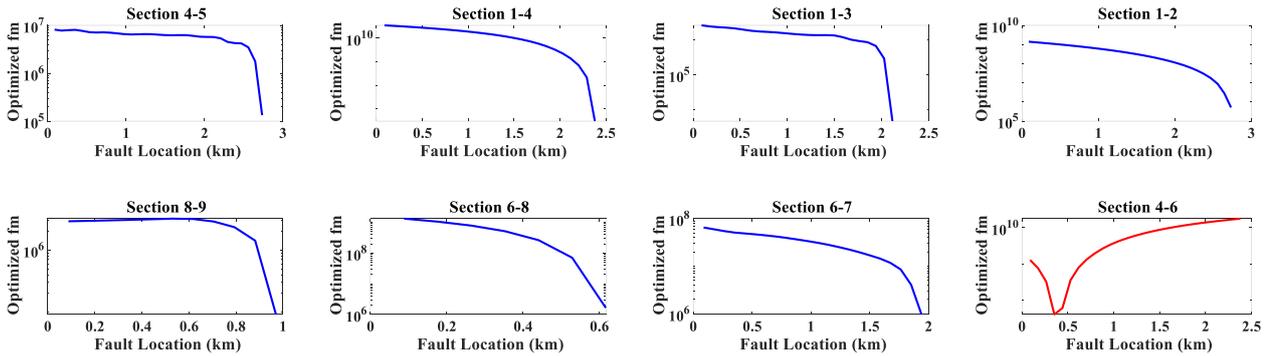
* اندیس‌های ۰ و ۱ نشان‌دهنده توالی‌های مثبت و صفر هستند.

جدول (۴): مشخصات بارها

شماره گره	۱	۹&۴	۶
مشخصات بار	$R=1000\ \Omega, L=2\ \text{H}, 1\ \phi$ (phase A)	$R=640\ \Omega, L=1.52\ \text{H}, 3\ \phi$	$R=700\ \Omega, L=1.7\ \text{H}, 1\ \phi$ (phase B)

۳-۲- بررسی روش پیشنهادی

با قرار دادن یک خطای دوفاز (A-B-G) با طول ۰/۴ کیلومتر از ابتدای بخش ۴-۶ و مقاومت $20\ \Omega$ ، الگوریتم پیشنهادی به منظور یافتن طول و بخش اصلی خطا اجرا شده است. در این آزمون، ریز شبکه در حالت جزیره‌ای قرار داشته است. شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب شکل موج‌های ولتاژ و جریان را در لحظه خطا نشان می‌دهند. پس از اجرای



شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی خط در بخش ۴-۶ با فاصله ۰/۴ کیلومتر از ابتدای بخش

خط، دقت روش پیشنهادی ارزیابی شده است. جدول (۷) مقادیر جدید پارامترهای خط را در قالب دو سناریو نشان می‌دهد.

جدول (۷): مقادیر جدید پارامترهای خط

سناریو	$[C_1 C_0] (F/m)$	$[L_1 L_0] (H/m)$	$[R_1 R_0] (\Omega/m)$
اول	$1/3196 \times 10^{-11}$	$8/9466 \times 10^{-7}$	$1/5524 \times 10^{-5}$
	$4/3988 \times 10^{-12}$	$2/684 \times 10^{-6}$	$4/6581 \times 10^{-5}$
دوم	$1/2934 \times 10^{-11}$	$8/7694 \times 10^{-7}$	$1/5216 \times 10^{-5}$
	$4/3114 \times 10^{-12}$	$2/6308 \times 10^{-6}$	$4/5658 \times 10^{-5}$

در سناریوی اول این پارامترها ۱٪ نسبت به مقادیر اولیه افزایش و در سناریوی دوم ۱٪ نسبت به مقادیر اولیه کاهش یافته‌اند. بدین منظور یک خطای (A-C-G) با طول ۱/۲ کیلومتر از ابتدای بخش ۴-۵ و مقاومت خطای 50Ω شبیه‌سازی شده است. مکان محاسبه‌شده توسط الگوریتم پیشنهادی با احتساب مقادیر اولیه پارامترهای خط ۱/۲۳ کیلومتر، در سناریوی اول ۱/۲۲ کیلومتر و در سناریوی دوم ۱/۲۴ کیلومتر به دست آمده است. نتایج این بررسی‌ها در جدول (۸) نشان داده شده است.

جدول (۸): تأثیر تغییر پارامترهای خط بر دقت روش پیشنهادی

سناریوی اول	سناریوی دوم	مقادیر اولیه
۰/۱	۰/۳	۰/۲

با توجه به این نتایج می‌توان دریافت که تغییر در پارامترهای خطوط نمی‌تواند بر دقت این روش تأثیرگذار باشد.

- تأثیر خطای اندازه‌گیرها بر دقت روش پیشنهادی

در عمل، اندازه‌گیری جریان و ولتاژ دارای خطاهایی می‌باشند که داده‌ها را با درصدی خطا مواجه می‌سازند. در این قسمت تأثیر غیر ایده‌آل بودن اندازه‌گیری بر الگوریتم مکان‌یابی خط مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه، انواع مختلف خطاهای دوفاز در مکان‌های متفاوت و شرایط مختلف، شبیه‌سازی شده است. به منظور ارزیابی این تأثیرات بر روش پیشنهادی، ابتدا نمونه‌های ولتاژ ثبت‌شده در ابتدا و انتهای هر بخش را با درصدی خطای تصادفی همراه ساخته و داده‌های به‌دست‌آمده را به‌عنوان ورودی الگوریتم در نظر می‌گیریم. این اعداد تصادفی به علت اینکه کد هسته حفاظتی ترانس‌های معمول اندازه‌گیری ولتاژ CL-E یا CL-F است، بین $+3\%$ تا -3% اعمال می‌شود. به‌عنوان مثال فرض می‌شود که یک خطای

جدول (۵): نتایج شبیه‌سازی در مکان‌های مختلف

نوع خطا	بخش خطادار	فاصله خطا (کیلومتر)	فاصله محاسبه‌شده خطا (کیلومتر)	خطا/٪
A-C-G	۲-۱	۲/۲	۲/۲۰۴۶	۰/۰۲
B-C-G	۵-۴	۰/۵	۰/۵۲۹۱	۰/۱۸
A-B-G	۶-۴	۰/۹	۰/۸۸۱۹	۰/۱۱
A-B	۷-۶	۱/۳	۱/۳۲۲۸	۰/۱۴
A-C	۳-۱	۱/۸	۱/۸۵۱۹	۰/۳۲
B-C	۹-۸	۰/۵	۰/۴۴۰۹	۰/۳۷

- ارزیابی الگوریتم پیشنهادی با مقاومت‌ها و زاویه‌های مختلف شروع خطا

به‌منظور ارزیابی دقت روش پیشنهادی، چندین خطای دوفاز در بخش ۶-۸ و در فاصله ۰/۳ کیلومتری از ابتدای بخش با چهار زاویه شروع خطا (۳۶، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه) و سه مقاومت مختلف خطا (۰، ۲۵ و ۵۰ اهم) شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از این آزمون‌ها در جدول (۶) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۶) می‌توان دریافت که الگوریتم پیشنهادی مستقل از مقاومت و زاویه شروع خطا است.

جدول (۶): تأثیر مقاومت‌ها و زاویه‌های مختلف شروع خطا در بخش

۶-۸

نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	زاویه شروع خطا (درجه)			
		(۱۸۰)	(۲۷۰)	(۹۰)	(۳۶)
خطا/٪					
B-C		۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
A-B		۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
B-C	۲۵	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
B-C-G		۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
A-B-G	۵۰	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
B-C-G		۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳

- تأثیر تغییر پارامترهای خط بر دقت روش پیشنهادی

به دلیل تغییرات شرایط آب و هوایی و عمر خطوط، پارامترهای خط دچار تغییرات می‌شود. این تغییرات می‌تواند بر دقت روش‌های مکان‌یابی خطا تأثیر منفی داشته باشند. در این قسمت با متغیر فرض کردن پارامترهای

سناریوهای ۱ تا ۳ در نظر گرفته شده است. با مقایسه جدول (۱۱) با جدول (۵) می توان دریافت که در نظر گرفتن تغییر در تولید منابع، دقت روش پیشنهادی هیچ گونه تغییری نداشته است.

• حالت متصل به شبکه

در این بخش، تأثیر حالت متصل به شبکه بر دقت روش پیشنهادی بررسی شده است. به این منظور، چندین خطای دوفاز در مکان های مختلف، مقاومت های مختلف خطا و زاویه های مختلف شروع خطا شبیه سازی شده و نتایج آن ها در جدول های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است.

جدول (۱۲): نتایج شبیه سازی در مکان های مختلف

نوع خطا	بخش خطا	فاصله خطا (کیلومتر)	فاصله محاسبه شده خطا (کیلومتر)	خطا / %
A-B-G	۲-۱	۲/۴	۲/۳۸۱۰	۰/۱۲
B-C-G	۵-۴	۰/۵	۰/۵۲۹۱	۰/۱۸
A-B-G	۶-۴	۰/۷	۰/۷۰۵۵	۰/۰۳
A-B	۷-۶	۱/۳	۱/۳۲۲۸	۰/۱۴
A-C	۳-۱	۱/۸	۱/۸۵۱۹	۰/۳۲
B-C	۹-۸	۰/۵	۰/۴۴۰۹	۰/۳۷

جدول (۱۳): مقاومت ها و زاویه های مختلف شروع خطا در بخش ۶-۸

نوع خطا	زاویه شروع خطا (درجه)				مقاومت خطا (Ω)
	(۳۶)	(۹۰)	(۲۷۰)	(۱۸۰)	
B-C	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰
A-B	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	
B-C	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۲۵
B-C-G	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	
A-B-G	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۵۰
B-C-G	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	

با توجه به جداول (۱۲) و (۱۳) مشاهده می شود که بیشینه خطای روش پیشنهادی ۰/۳۷٪ در حالت متصل به شبکه است. همچنین مقاومت ها و زاویه های مختلف شروع خطا تأثیری بر دقت این الگوریتم نداشته است. در نتیجه، با توجه به این جداول می توان دریافت که روش پیشنهادی مستقل از حالت های جزیره ای و متصل به شبکه است.

۳-۳- مقایسه الگوریتم پیشنهادی با دیگر روش های ارائه شده در سال های اخیر

تمرکز این مقاله بر روی محاسبه فاصله و بخش خطا در ریز شبکه های جریان متناوب در حالت های جزیره ای و متصل به شبکه است. از مزایای این روش نسبت به دیگر روش ها می توان به سرعت بالا، سادگی و استفاده از مدل گسترده خط اشاره کرد. علاوه بر این، عدم حساسیت به حضور منابع تجدید پذیر، خودروهای برقی، تغییر پارامترهای خطا، زاویه های مختلف شروع خطا، مکان ها و مقاومت های مختلف خطا و حالت های مختلف عملکرد منابع تولید پراکنده را نیز می توان از دیگر مزایای این روش نام برد. جدول (۱۴) نتایج مقایسه روش

(A-C-G) به زمین در فاصله ۱/۲ کیلومتر از ابتدای بخش ۴-۵ و مقاومت خطای ۳۰Ω رخ دهد. الگوریتم پیشنهادی مکان یابی خطا، به ازای اعداد تصادفی متفاوت، ۳۰۰ بار اجرا شده و مقدار خطای روش در هر تکرار به دست می آید. مقدار متوسط این خطاها به عنوان شاخصی جهت ارزیابی اثرگذاری خطای اندازه گیرها بر دقت روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است. متوسط درصد خطای روش پیشنهادی برای خطای ذکر شده ۰/۹۷ درصد بوده است. به منظور بررسی بیشتر، چندین خطا در مکان های مختلف و مقاومت های مختلف انجام شده که نتایج آن در جدول (۹) نمایش داده شده است. با توجه به جدول (۹) مشاهده می شود که بیشینه خطای روش پیشنهادی ۰/۹۷٪ است.

جدول (۹): تأثیر خطای اندازه گیرها بر دقت روش پیشنهادی

نوع خطا	فاصله خطا (km)	مقاومت خطا (Ω)			
		۱۰	۲۰	۳۰	۴۰
A-C-G	۱/۲	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷
B-C-G	۰/۳	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۴۱
A-B	۱	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳

• حالت های مختلف عملکرد منابع تولید پراکنده

ادغام در مقیاس بزرگ تولید نیروی باد، انرژی خورشیدی و ... اینرسی معادل یک سیستم قدرت را کاهش می دهد. از طرف دیگر، تولیدات این منابع می تواند در طول شبانه روز و شرایط مختلف آب و هوایی، به کمینه یا بیشینه خود برسند. با توجه به ویژگی های نامنظم، غیر خطی و غیر ثابت این منابع، چالش های مهمی در تنظیم فرکانس و توان سیستم به وجود می آید. این تغییرات می تواند الگوریتم های مکان یابی خطا را دچار مشکل کنند؛ بنابراین، بررسی عدم قطعیت در منابع تجدید پذیر و خودروهای برقی بسیار مهم است. در این قسمت تأثیر عدم قطعیت بر روش پیشنهادی، در قالب سه سناریو بررسی شده است. جدول (۱۰) مقادیر جدید منابع را نشان می دهد.

جدول (۱۰): سناریوهای مختلف عملکرد منابع تولید پراکنده

سناریو	توربین بادی	فتوولتائیک	خودرو برقی	پیل سوختی
اول	۳ MW	۱۰۰ kW	۴۰۰ kW	۵۰ kW
دوم	۵۰۰ kW	۳۰۰ kW	۸۰۰ kW	۵۰ kW
سوم	۱/۵ MW	۰ kW	۱۲۰۰ kW	۰ kW

جدول (۱۱): نتایج شبیه سازی حالت های مختلف عملکرد منابع

سناریو	بخش خطا	بخش محاسبه شده خطا	فاصله خطا (کیلومتر)	فاصله محاسبه شده خطا (کیلومتر)	خطا / %
اول	۲-۱	۲-۱	۲/۲	۲/۲۰۴۶	۰/۰۲
دوم	۷-۶	۷-۶	۱/۳	۱/۳۲۲۸	۰/۱۴
سوم	۳-۱	۳-۱	۱/۸	۱/۸۵۱۹	۰/۳۲

نتایج حاصل از این شبیه سازی ها در جدول (۱۱) نشان داده شده است. در این جدول، نتایج اعمال خطاهایی از نوع A-C-G، A-B و A-C برای

Bretas, A., Orozco-Henao, C., Marín-Quintero, J., Montoya, O., Gil-González, W., & Bretas, N. (2021). Microgrids physics model-based fault location formulation: Analytic-based distributed energy resources effect compensation. *Electric power systems research*, 195, 107178.

Chen, R., Lin, T., Bi, R., & Xu, X. (2017). Novel strategy for accurate locating of voltage sag sources in smart distribution networks with inverter-interfaced distributed generators. *Energies*, 10(11), 1885.

Daisy, M., & Dashti, R. (2016). Single phase fault location in electrical distribution feeder using hybrid method. *Energy*, 103, 356-368.

Dashti, R., Daisy, M., Mirshekali, H., Shaker, H. R., & Aliabadi, M. H. (2021). A Survey of Fault Prediction and Location Methods in Electrical Energy Distribution Networks. *Measurement*, 109947.

Dashti, R., Ghasemi, M., & Daisy, M. (2018). Fault location in power distribution network with presence of distributed generation resources using impedance based method and applying π line model. *Energy*, 159, 344-360.

Dashti, R., Daisy, M., & Aliabadi, M. H. (2021). Healthy and faulty mode detection in power distribution networks based on park transformation. *Electric power systems research*, 191, 106867.

Dashti, R., Daisy, M., Javadi, S., & Aliabadi, M. H. (2021). Proposing a new method to improve the longitudinal differential relay performance using the Clarke transformation: Theory, simulation, and experiment. *Measurement*, 168, 108450.

Dashti, R., & Sadeh, J. (2014). Accuracy improvement of impedance-based fault location method for power distribution network using distributed-parameter line model. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 24(3), 318-334.

Duan, J., Zhang, K., & Cheng, L. (2015). A novel method of fault location for single-phase microgrids. *IEEE Transactions on smart grid*, 7(2), 915-925.

Gabr, M. A., Ibrahim, D. K., Ahmed, E. S., & Gilany, M. I. (2017). A new impedance-based fault location scheme for overhead unbalanced radial distribution networks. *Electric power systems research*, 142, 153-162.

Ganivada, P. K., & Jena, P. (2021). A Fault Location Identification Technique for Active Distribution System. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.

Gholami, M., Abbaspour, A., Moeini-Aghtaie, M., Fotuhi-Firuzabad, M., & Lehtonen, M. (2019). Detecting the location of short-circuit faults in active distribution network using PMU-based state estimation. *IEEE Transactions on smart grid*, 11(2), 1396-1406.

Gord, E., Dashti, R., Najafi, M., & Shaker, H. R. (2019). Real fault section estimation in electrical distribution networks based on the fault frequency component analysis. *Energies*, 12(6), 1145.

Hassani, H., Razavi-Far, R., & Saif, M. (2020). Fault location in smart grids through multicriteria analysis of group decision support systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(12), 7318-7327.

Katić, V. A., Aleksandar, M., Dumnić, B. P., & Popadić, B. P. (2019). *Impact of V2G operation of electric vehicle chargers on distribution grid during voltage dips*. Paper presented at the IEEE EUROCON 2019-18th International Conference on Smart Technologies.

Liang, R., Peng, N., Zhou, L., Meng, X., Hu, Y., Shen, Y., & Xue, X. (2019). Fault location method in power network by applying accurate information of arrival time differences of modal traveling waves. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(5), 3124-3132.

Lu, J., & Hossain, J. (2015). *Vehicle-to-grid: linking electric vehicles to the smart grid*: Institution of Engineering and Technology.

پیشنهادی را با دیگر مقالات نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، بیشینه خطای روش پیشنهادی در قسمت تخمین فاصله خطا با در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری، ۰/۹۷٪ و بدون آن ۰/۳۷٪ است که نشان‌دهنده دقت بالای این روش نسبت به دیگر روش‌ها است.

جدول (۱۴): مقایسه روش پیشنهادی با دیگر روش‌های ارائه‌شده

مرجع	مدل خطا	بررسی تغییر پارامترهای خطا	حضور خودرو برقی	تخمین بخش خطا	% خطا (فاصله‌یابی)
Gholami et al., 2019	گسترده	-	-	✓	۸/۵
Dashti et al., 2018	π	-	-	-	۱/۵
Bretas et al., 2021	π	-	-	-	۱/۳۸
(Ganivada et al., 2021)	کوتاه	✓	-	✓	۳
(Bahmanyar et al., 2017)	کوتاه	-	-	-	۱
(Duan et al., 2015)	گسترده	-	-	-	۱۰
روش پیشنهادی	گسترده	✓	✓	✓	۰/۹۷

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید جهت تعیین مکان دقیق خطاهای دوفاز در ریز شبکه‌های حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه بر اساس اطلاعات ثبت‌شده در ابتدا و انتهای هر بخش و مدل گسترده خطا ارائه شده است. در روش پیشنهادی ابتدا ریزشبه موردنظر در نرم‌افزار متلب مدل‌سازی و سپس خطا در چندین نقطه با فواصل مختلف و در بخش‌های متفاوت شبیه‌سازی شده است. برای هر خطا اطلاعات ولتاژ و جریان ثبت شده در ابتدا و انتهای هر بخش، به صورت آنلاین فراخوانی و ذخیره می‌گردد. سپس با استفاده از اطلاعات ذخیره‌شده و بر اساس الگوریتم پیشنهادی، بخش خطادار و فاصله دقیق خطا شناسایی شده است. این روش به حضور منابع تجدیدپذیر و خودروهای برقی حساس نبوده و نتایج شبیه‌سازی مستقل بودن این روش در برابر مکان‌های مختلف خطا، مقاومت‌ها و زوایای مختلف شروع خطا، تغییر پارامترهای خطا و حالت‌های مختلف عملکرد منابع تولید پراکنده را اثبات کرده است. حداکثر خطای این روش با در نظر گرفتن خطاهای اندازه‌گیری ۰/۹۷٪ و بدون آن ۰/۳۷٪ است که در مقایسه با دیگر مقالات نشان‌دهنده دقت بالای این روش است.

مرجع

Aboshady, F., Thomas, D. W., & Sumner, M. (2019). A wideband single end fault location scheme for active untransposed distribution systems. *IEEE Transactions on smart grid*, 11(3), 2115-2124.

Bahmanyar, A., & Jamali, S. (2017). Fault location in active distribution networks using non-synchronized measurements. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 93, 451-458.

- Mazumder, M., & Debbarma, S. (2020). EV Charging Stations With a Provision of V2G and Voltage Support in a Distribution Network. *IEEE Systems Journal*, 15(1), 662-671.
- Mirshekali, H., Dashti, R., Keshavarz, A., Torabi, A. J., & Shaker, H. R. (2020). A novel fault location methodology for smart distribution networks. *IEEE Transactions on smart grid*, 12(2), 1277-1288.
- Naidu, O., & Pradhan, A. K. (2020). Precise Traveling Wave-Based Transmission Line Fault Location Method Using Single-Ended Data. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(8), 5197-5207.
- Orozco-Henao, C., Mora-Florez, J., Marín-Quintero, J., Velez, J. C., Da Silva, M., & Perez-Londoño, S. (2019). *Fault Location System for Active Distribution Networks*. Paper presented at the 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America).
- Stevenson, W. D. (1975). *Element of Power System. Analysis, Second Edition, McGraw H, 111.*
- Wang, Y., Sheikh, O., Hu, B., Chu, C.-C., & Gadh, R. (2014). *Integration of V2H/V2G hybrid system for demand response in distribution network*. Paper presented at the 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm).
- Zhu, Y., & Tomsovic, K. (2002). Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells. *Electric power systems research*, 62(1), 1-11.
- دشتی، ر. دیسی، م. جوادی، ش. (۱۳۹۷). مکان‌یابی خطای تک فاز به روش امپدانس با بهره‌گیری از روش‌های شناسایی الگو، **کیفیت و بهره‌وری در صنعت برق ایران**، ۷(۲) (پیاپی ۱۴)، صص ۱۱-۱۹.
- دیسی، م. دشتی، ر. مکان‌یابی خطا در شبکه‌های توزیع با استفاده از ترکیب روش امپدانس و فرورفتگی ولتاژ، (۱۳۹۶). **مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران - الف مهندسی برق**، ۱۵(۱)، صص ۱۲-۲۰.
- غفارزاده، ن. اکبری، م. **مروری بر روش‌های مکان‌یابی خطا در سیستم‌های توزیع برق**، (دی ۱۳۹۲). هشتمین کنفرانس تخصصی حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت، انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، تهران، ایران.