



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 15, No. 2, 2024
pp. 33-50
Research Paper

Impedance-Based Location of Single-Phase-to-Ground Fault in Transmission Lines Using One-end-Current Data without the Need for Network Parameters Using a Variable Neighborhood Search Algorithm

Mohsen Gharaei¹, Yaser Damchi^{2*}

Faculty of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
Faculty of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract:

Identifying the fault location in the transmission lines and fixing the problem in the shortest possible time is of particular importance to reduce blackouts and increase the reliability of the network. One of these fault location methods is the impedance-based method. The precise values of transmission line parameters and the Thevenin impedance of the network are unknown due to various issues such as temperature change and network structure, which can affect the accuracy of this method in locating the fault in both uncompensated and compensated transmission lines. Therefore, in this article, the proposed method is an intelligent impedance-based method using the variable neighborhood search algorithm, regarding the uncertainty in the line parameters and the Thevenin impedance of the network in locating single-phase-to-ground faults. In the proposed method, only one-end-current data is used to estimate the location of the fault, which does not require a telecommunication platform and results in increasing the reliability of the location method. The simulation results show that the method has high accuracy in fault location in transmission lines even though the line parameters and Thevenin impedance of the network are unknown. Moreover, the resistance, the angle and the location of the fault, and the level of compensation do not have a significant effect on the accuracy of the fault location.

Keywords: Fault Location, Transmission Line, Variable Neighborhood Search Algorithm, Uncertainty.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/IJEE.2024.139656.1663>

مقاله پژوهشی

مکان‌یابی خطای تک‌فاز به زمین مبتنی بر امیدانس در خطوط انتقال با استفاده از اطلاعات جریان یک پایانه بدون نیاز به پارامترهای شبکه با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر

محسن قرائی^۱، یاسر دامچی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

mohsengharaie36@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

damchi@shahroodut.ac.ir

چکیده: شناسایی مکان خطا در خطوط انتقال و رفع آن در سریع‌ترین زمان ممکن به‌منظور کاهش خاموشی و افزایش قابلیت اطمینان شبکه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از روش‌های مکان‌یابی خطا، روش مبتنی بر امیدانس است. مقادیر دقیق پارامترهای خطوط انتقال و امیدانس تونن شبکه به‌دلیل مسائل مختلفی از جمله تغییر دما و ساختار شبکه نامعلوم هستند که می‌تواند بر دقت روش مذکور در مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال جبران‌نشده و جبران‌شده تأثیر بگذارد؛ بنابراین در این مقاله، یک روش فراابتکاری مبتنی بر روش امیدانسی با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای خط و امیدانس تونن شبکه برای مکان‌یابی خطاهای تک‌فاز به زمین پیشنهاد می‌شود. در روش پیشنهادی، برای تخمین محل خطا از اطلاعات جریان یک پایانه حین خطا استفاده می‌شود که سبب عدم نیاز به بستر مخابراتی و افزایش قابلیت اطمینان روش مکان‌یابی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که روش پیشنهادی دارای دقت مطلوبی در مکان‌یابی خطای تک‌فاز به زمین در خطوط انتقال جبران‌نشده و جبران‌شده سری با وجود معلوم‌نبودن پارامترهای خط و امیدانس تونن شبکه است. همچنین مقاومت، زاویه و محل وقوع خطا و میزان جبران‌سازی بر دقت مکان‌یابی تأثیر چشمگیری ندارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر، خط انتقال، عدم قطعیت، مکان‌یابی خطا

۱- مقدمه

شبکه، مهم‌ترین کارشناسایی دقیق و سریع مکان رخداد خطا و انجام اقدامات لازم برای بازیابی سریع شبکه است. در گذشته، تیم‌های بازیابی باید مسافت طولانی را در شرایط سخت جغرافیایی برای شناسایی مکان خطا طی می‌کردند که این امر باعث صرف زمان زیاد و تحمیل خاموشی طولانی مدت به مشترکین می‌شد.

تاکنون روش‌های مختلفی برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال ارائه شده‌اند که می‌توان آنها را به چند دسته کلی روش‌های مبتنی بر نظریه امواج سیار، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و روش‌های امیدانسی دسته‌بندی کرد [۱-۳]. الگوریتم‌های مبتنی بر امواج سیار، به نرخ نمونه‌برداری بالا برای رسیدن به سطح قابل قبول از دقت

خطوط انتقال به‌دلیل انتقال انرژی الکتریکی از اجزای اصلی شبکه قدرت هستند. وقوع انواع مختلف اتصال کوتاه، از مهم‌ترین حوادثی است که در خطوط انتقال رخ می‌دهد. پس از پاک‌سازی خطا، به‌منظور جلوگیری از آسیب بیشتر به

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

نام نویسنده مسئول: یاسر دامچی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی برق

در طول خط انتقال چالش‌هایی همچون خرابی و پارگی این خطوط و در نتیجه افزایش هزینه تعمیر و نگهداری را در پی دارد. این موضوع در کنار احتمال وقوع حملات سایبری در بسترهای مخابراتی بی‌سیم، قابلیت اطمینان این روش‌ها را کاهش می‌دهد [۱۴]. محدودیت‌های یادشده باعث شده است روش‌های تک‌پایانه مطرح شوند [۱۵، ۱۴] و [۲۶-۲۱]. مراجع [۲۸-۲۶] روشی برای محاسبه مکان خطا با استفاده از اطلاعات ولتاژ و جریان یک پایانه در خطوط انتقال ارائه کرده‌اند. در مرجع [۲۴] یک روش مکان‌یابی خطا مبتنی بر امیدانس در خطوط جبران‌شده سری فقط با استفاده از اطلاعات ولتاژ و جریان اندازه‌گیری‌شده از یک پایانه ارائه شده است. استفاده از اطلاعات ولتاژ و جریان به‌طور همزمان باعث کاهش قابلیت اطمینان روش‌های مکان‌یابی خطا می‌شود؛ از این‌رو، در مرجع [۲۷] روشی مبتنی بر اطلاعات جریان یک پایانه برای تخمین محل خطا پیشنهاد شده است. مرجع [۱۴] با استفاده از اطلاعات جریان و ولتاژ یک پایانه و ارائه یک مدل جدید برای مدل‌سازی جبران‌ساز سری و MOV، روشی برای مکان‌یابی خطا در خطوط تک و دو مداره جبران‌شده سری ارائه کرده است. عمده روش‌های امیدانسی تک‌پایانه‌ای، محاسبات مکان‌یابی خطا را در حضور جبران‌سازها در وسط خط انجام می‌دهند؛ اما در عمل به دلیل صرفه اقتصادی، جبران‌سازی سری در ابتدای خطوط انتقال انجام می‌شود که این امر موجب کارایی نامطلوب روش‌های معمول برای مکان‌یابی خطا می‌شود. مرجع [۱۵] یک روش مکان‌یابی تک‌پایانه تنها با استفاده از اطلاعات جریان یک پایانه در خطوط انتقال جبران‌شده سری با حضور جبران‌ساز در ابتدای خط ارائه کرده است. در این مقاله، از یک مدل خطی مطابق مرجع [۲۹] برای مدل‌سازی MOV استفاده شده است. پیاده‌سازی روش‌های تک‌پایانه بسیار ساده است و از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه هستند؛ اما پارامترهای مختلفی از جمله همگن نبودن خطوط، ترنسپوز نبودن خطوط، مقاومت و زاویه خطا [۲۵]، نویز و فرکانس نمونه‌برداری می‌توانند دقت مکان‌یابی روش‌های مذکور را تحت‌الشعاع قرار دهند. روش‌های مذکور برای تخمین محل خطا، پارامترهای خط انتقال و امیدانس تونن شبکه را معلوم در نظر می‌گیرند؛

مکان‌یابی خطا نیاز دارند [۸-۴]. الگوریتم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نیز دارای معایبی مانند نیاز به فرآیند یادگیری با استفاده از مقدار زیادی داده ورودی برای افزایش دقت هستند [۹-۱۳]. پیاده‌سازی روش‌های امیدانسی ساده است؛ اما در الگوریتم‌های مرسوم، امیدانس خط و تونن شبکه، پارامترهای ثابت و از پیش تعیین‌شده در نظر گرفته می‌شوند؛ با این حال، تغییرات دما و آب و هوا از عواملی‌اند که پارامترهای خط انتقال را دستخوش تغییر می‌کنند [۱۴، ۱۵]. همچنین، به دلیل مسائل مختلفی از جمله خروج خطوط به علت خرابی یا تعمیرات دوره‌ای، ورود و خروج واحدهای تولیدی و نیروگاه‌های بادی متصل به شبکه و توسعه شبکه، امیدانس تونن شبکه نیز تغییر می‌کند [۱۶].

تقاضای روزافزون انرژی الکتریکی سبب توسعه شبکه‌های قدرت شده است؛ اما محدودیت‌های سرمایه‌گذاری گسترش خطوط انتقال را با چالش مواجه کرده است؛ از این‌رو، استفاده از جبران‌سازهای سری (SC) به منظور افزایش ظرفیت انتقالی خطوط تا حد حرارتی خطوط انتقال مرسوم است. رفتار غیرخطی برقگیر جبران‌ساز سری (MOV) در هنگام خطا، چالش‌های جدی برای مکان‌یابی به روش امیدانسی به وجود می‌آورد. عدم توجه به این موضوعات، دقت مکان‌یابی روش‌های امیدانسی را کاهش می‌دهد. بعضی از روش‌های مکان‌یابی خطا به اطلاعات فازور دوپایانه خط انتقال نیاز دارند [۲۴-۱۷]. بعضی از روش‌های دوپایانه به همگام‌سازی داده‌ها نیاز دارند [۲، ۱] و [۲۰-۱۷] و برخی نیز به همگام‌سازی داده‌ها وابسته نیستند [۳] و [۲۴-۲۱]. در مرجع [۲۱]، یک الگوریتم مکان‌یابی امیدانسی برای خطوط جبران‌شده سری دومداره در وسط خط ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی از داده‌های جریان و ولتاژ غیرهمزمان دوپایانه برای مکان‌یابی استفاده می‌کند. در مرجع [۲]، با استفاده از اطلاعات ولتاژ و جریان اندازه‌گیری‌شده همزمان دوپایانه (ابتدا و انتها) خط انتقال، روشی دقیق برای مکان‌یابی خطا در حوزه زمان در خطوط جبران‌شده سری ارائه شده است. این روش برای سناریوهای مختلف خطا به همگام‌سازی داده‌ها نیاز دارد. روش‌های دوپایانه دقت بالایی دارند؛ اما به بستر مخابراتی نیاز دارند. بهره‌برداری از خطوط مخابراتی

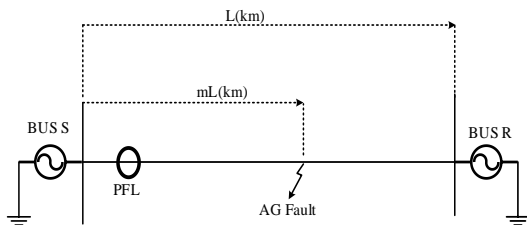
۲- نیازمندی‌های مسئله

برای ارائه روش پیشنهادی ضروری است که در ابتدا روش مکان‌یابی مبتنی بر امیدانس معرفی شود؛ بنابراین، در زیربخش‌های ۱-۲ و ۲-۲ به ترتیب روش مکان‌یابی خطا برای خطوط انتقال جبران‌نشده و جبران‌شده سری ارائه می‌شود. سپس در بخش ۲-۳ الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر برای پیدا کردن پارامترهای نامشخص و تخمین محل خطا معرفی می‌شود.

۲-۱- مکان‌یابی تک پایانه امیدانسی برای خطوط

جبران‌نشده

معمولاً بیش از ۷۰ درصد خطاهای اتصال کوتاه در شبکه انتقال از نوع تک فاز به زمین مطابق شکل (۱) هستند [۱۵]؛ بنابراین، در این مقاله، روشی برای مکان‌یابی خطای مذکور با وجود عدم قطعیت در پارامترهای خط و امیدانس تونن شبکه ارائه می‌شود.



شکل (۱): خطای تک‌فاز به زمین در شبکه انتقال دو

ترمیناله

در مرجع [۲۵]، رابطه‌های تک‌خطی فازوری برای تخمین محل خطا با استفاده از اطلاعات جریان یک پایانه ارائه شده‌اند. در این مطالعه، به منظور ارائه رابطه‌های لازم برای مکان‌یابی خطای تک‌فاز به زمین در خطوط جبران‌نشده و جبران‌شده سری براساس شبکه‌های توالی، از مرجع [۲۷] و توسعه رابطه‌ها براساس شبکه‌های توالی صفر و منفی استفاده می‌شود. ولتاژهای توالی صفر و منفی را می‌توان براساس جریان‌های توالی صفر و منفی برای خطای تک‌فاز به زمین به کمک رابطه (۱) محاسبه کرد:

اما در شرایط مختلف این پارامترها دستخوش تغییر می‌شوند که باعث کاهش دقت مکان‌یابی می‌شود. برای حل این مشکل روش‌های مختلفی در مراجع [۱۶] و [۳۰-۳۴] پیشنهاد شده است. برخی از این روش‌ها پارامترهای خط را با استفاده از اطلاعات ولتاژ و جریان پیش از خطا در دو پایانه خط انتقال تخمین می‌زنند و سپس آنها را در مکان‌یابی خطا استفاده می‌کنند [۳۰،۳۱]. برخی دیگر از روش‌ها نیز بر مبنای اندازه‌گیری دو پایانه، پارامترهای خط انتقال را در طول فرایند تعیین محل خطا به عنوان مجهول در نظر می‌گیرند [۱۶] و [۳۲-۳۴]. در مراجع [۱۴،۱۵] عدم قطعیت در امیدانس خط و تونن شبکه به عنوان دو متغیر مستقل برای بررسی حساسیت روش‌های پیشنهادی مطرح شده‌اند؛ در حالی که در شبکه قدرت، عدم قطعیت‌های مذکور می‌تواند به طور همزمان رخ دهند و بر دقت مکان‌یابی خطا اثرگذار باشند.

به منظور رفع مشکلات فوق، در این مقاله، یک روش مکان‌یابی خطای فراابتکاری مبتنی بر روش امیدانسی با کمک الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر در خطوط انتقال جبران‌نشده و جبران‌شده سری، بدون نیاز به پارامترهای خط و امیدانس تونن در صورت وقوع خطای تک‌فاز به زمین در خط انتقال پیشنهاد می‌شود. نتایج شبیه‌سازی حاکی از دقت مطلوب روش پیشنهادی بدون تأثیرپذیری از مقاومت، زاویه، محل وقوع خطا، فرکانس نمونه‌برداری، ترنسپوزنبودن خط و میزان جبران‌سازی با وجود معلوم‌نبودن امیدانس خطوط و تونن شبکه است. ساختار مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲ یک روش مکان‌یابی خطای تک‌فاز به زمین مبتنی بر امیدانس، با بهره‌گیری از اطلاعات جریان یک پایانه برای خطوط جبران‌نشده و جبران‌شده سری معرفی می‌شود. در بخش ۳، روش پیشنهادی برای مکان‌یابی خطا با معلوم‌نبودن پارامترهای خط و امیدانس تونن شبکه ارائه می‌شود. در بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی‌های مختلف برای ارزیابی روش پیشنهادی ارائه می‌شوند و نتیجه‌گیری نیز در بخش ۵ بیان می‌شود.

$$\begin{bmatrix} I_F \\ I_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{OS}+Z_{OL}+Z_{OR}}{Z_{OR}-(1-m)Z_{OL}} \\ \frac{Z_{2S}+Z_{2L}+Z_{2R}}{Z_{2R}-(1-m)Z_{2L}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S0} \\ I_{S2} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$\left(\frac{Z_{OS}+Z_{OL}+Z_{OR}}{Z_{OR}-(1-m)Z_{OL}} \right) I_{S0} - \left(\frac{Z_{2S}+Z_{2L}+Z_{2R}}{Z_{2R}-(1-m)Z_{2L}} \right) I_{S2} = 0 \quad (۷)$$

رابطه (۷) یک رابطه امپدانس برای محاسبه مکان خطا در خطوط انتقال، فقط با استفاده از اطلاعات جریان حین خطای توالی صفر و منفی پایانه ابتدایی (پایانه S) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محاسبه مکان خطا به امپدانس خط و امپدانس تونن شبکه وابسته است. تغییرات دما، طول عمر تجهیزات، ورود و خروج خطوط انتقال از شبکه و ورود و خروج واحدهای تولید از جمله عواملی هستند که باعث تغییر پارامترهای مذکور و در نتیجه کاهش دقت مکان‌یابی می‌شوند.

۲-۲- مکان‌یابی تک‌پایانه امپدانس برای خطوط

جبران‌شده سری

یکی از روش‌های افزایش توان انتقالی در خطوط انتقال استفاده از جبران‌سازهای سری است. روش‌های مکان‌یابی امپدانس معمول در حضور جبران‌سازهای دارای برقی‌گیر با عملکرد غیرخطی، عملکرد مطلوبی ندارند و نیاز به روش‌های جدید برای تخمین محل خطا است. از نظر تنوعی با نصب جبران‌سازها در وسط خط، بهینه‌ترین حالت برای جبران‌سازی ایجاد می‌شود؛ اما برای این منظور نیاز به احداث یک پست و صرف هزینه بالا است [۱۵]. روش‌های مکان‌یابی خطا در حضور جبران‌ساز در وسط خط، برای حالتی که جبران‌ساز در ابتدای خط نصب شود، کارایی مطلوب ندارند. در مرجع [۱۵] یک روش مکان‌یابی خطا با استفاده از اطلاعات جریان یک پایانه برای مکان‌یابی خطا در خطوط جبران‌شده سری با حضور در سر خط ارائه شده است که در ادامه تشریح می‌شود. مطابق شکل (۲) با نوشتن معادلات حلقه برای توالی‌های صفر و منفی برای خطای تک‌فاز به زمین و در نظر گرفتن ولتاژ توالی خازن جبران‌ساز، رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} V_{S0} \\ V_{S2} \\ V_{R0} \\ V_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{OS}+mZ_{OL} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{2S}+mZ_{2L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{OR}+(1-m)Z_{OL} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{2R}+(1-m)Z_{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S0} \\ I_{S2} \\ I_{R0} \\ I_{R2} \end{bmatrix} \quad (۱)$$

با استفاده از رابطه‌های (۲) و (۳) می‌توان ولتاژهای توالی منفی و صفر در پایانه R (به ترتیب سطرهای ۳ و ۴ رابطه (۱) را برحسب ولتاژهای توالی در پایانه S نوشت [۱۵]:

$$\begin{bmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S0} \\ V_{S1} \\ V_{S2} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

$$\begin{bmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_F \end{bmatrix} \quad (۳)$$

با جایگذاری رابطه‌های (۲) و (۳) در رابطه (۱) رابطه (۴) حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} V_{S0} \\ V_{S2} \\ V_{S0} \\ V_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{OS}+mZ_{OL} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{2S}+mZ_{2L} & 0 \\ -Z_{OR}-(1-m)Z_{OL} & 0 & 0 & Z_{OR}+(1-m)Z_{OL} \\ 0 & 0 & -Z_{2R}-(1-m)Z_{2L} & Z_{2R}+(1-m)Z_{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_F \end{bmatrix} \quad (۴)$$

سپس با تفاضل سطرهای مساوی از هم در رابطه (۴)، این رابطه به رابطه (۵) تبدیل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} Z_{OS}+Z_{OL}+Z_{OR} & 0 & 0 & -Z_{OR}-(1-m)Z_{OL} \\ 0 & 0 & Z_{2S}+Z_{2L}+Z_{2R} & -Z_{2R}-(1-m)Z_{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

با ساده‌سازی رابطه (۵)، رابطه (۶) حاصل می‌شود و سپس با تفاضل سطرهای مساوی از هم، رابطه (۷) برای محاسبه محل خطا به دست می‌آید:

(R) را برحسب رابطه‌های باس ابتدایی (S) نوشت که در

این صورت رابطه (۱۰) به (۱۱) تبدیل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} V_{S0} \\ V_{S2} \\ V_{R0} \\ V_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{0S+mZ_{0L}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{2S+mZ_{2L}} & 0 \\ -Z_{0R}-(1-m)Z_{0L} & 0 & 0 & Z_{0R}+(1-m)Z_{0L} \\ 0 & 0 & -Z_{2R}-(1-m)Z_{2L} & Z_{2R}+(1-m)Z_{2L} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_F \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_a-2jX_c & Z_a+jX_c & Z_a+jX_c & 0 & 0 \\ Z_a+jX_c & Z_a+jX_c & Z_a-2jX_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_F \end{bmatrix}$$

با تفاضل سطرهای مساوی در رابطه (۱۱) از یکدیگر،

رابطه جریان خطا (I_F)، با استفاده از اطلاعات جریان باس

ابتدایی مطابق رابطه (۱۲) به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} I_F \\ I_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{0S}+\frac{1}{3}(Z_a-2jX_c)+Z_{0L}+Z_{0R}}{Z_{0R}-(1-m)Z_{0L}} & \frac{\frac{1}{3}(Z_a+jX_c)}{Z_{0R}-(1-m)Z_{0L}} & \frac{\frac{1}{3}(Z_a+jX_c)}{Z_{0R}+(1-m)Z_{0L}} \\ \frac{\frac{1}{3}(Z_a+jX_c)}{Z_{2R}+(1-m)Z_{2L}} & \frac{\frac{1}{3}(Z_a+jX_c)}{Z_{2R}+(1-m)Z_{2L}} & \frac{Z_{2S}+\frac{1}{3}(Z_a-2jX_c)+Z_{2L}+Z_{2R}}{Z_{2R}+(1-m)Z_{2L}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

در نهایت، با تفاضل سطرهای مساوی رابطه (۱۲) از

هم، رابطه مکان خطا برای خطوط جبران‌شده سری مبتنی بر

اطلاعات توالی جریان یک پایانه حین خطا مطابق (۱۳) به

دست می‌آید:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{Z_{0S}+\frac{1}{3}(Z_a-2jX_c)+Z_{0L}+Z_{0R}}{Z_{0R}-(1-m)Z_{0L}} - \frac{\frac{1}{3}(Z_a+jX_c)}{Z_{2R}+(1-m)Z_{2L}} \right) I_{S0} + \\ & \left(\frac{\frac{1}{3}(Z_a+jX_c)}{Z_{0R}+(1-m)Z_{0L}} - \frac{\frac{1}{3}(Z_a+jX_c)}{Z_{2R}+(1-m)Z_{2L}} \right) I_{S1} + \\ & \left(\frac{\frac{1}{3}(Z_a+jX_c)}{Z_{0R}+(1-m)Z_{0L}} - \frac{Z_{2S}+\frac{1}{3}(Z_a-2jX_c)+Z_{2L}+Z_{2R}}{Z_{2R}-(1-m)Z_{2L}} \right) I_{S2} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

با توجه به رابطه (۱۳) مشاهده می‌شود که تخمین مکان

خطا به امپدانس خط و تونن شبکه وابسته است. با تغییر

شرایط شبکه، این پارامترها نامعلوم هستند؛ بنابراین، ارائه

$$\begin{bmatrix} V_{S0} \\ V_{S2} \\ V_{R0} \\ V_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{0S+mZ_{0L}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{2S+mZ_{2L}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{0R}+(1-m)Z_{0L} \\ 0 & 0 & 0 & Z_{2R}+(1-m)Z_{2L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} I_{S0} \\ I_{S2} \\ I_{R0} \\ I_{R2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{C0} \\ V_{C2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

با استفاده از امپدانس‌های توالی صفر، مثبت و منفی

خازن سری، رابطه بین ولتاژ و جریان دو سر خازن سری

مطابق با (۹) نوشته می‌شود [۱۵].

$$\begin{bmatrix} V_{C0} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

در صورت وقوع خطا در فاز a به علت عملکرد

غیرخطی برقی خازن، امپدانس فاز مذکور (Z_a) مجهول

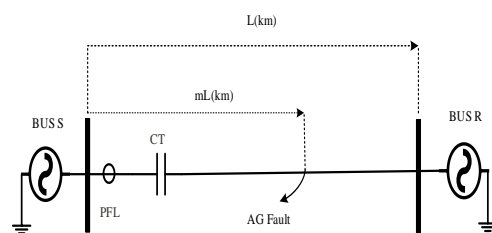
می‌شود. با به‌کارگیری روش بیان‌شده در [۲۹]، امپدانس

خازن جریان‌ساز و در نتیجه امپدانس فاز خطا دار (Z_a) به

دست می‌آید. امپدانس فازهای دیگر (Z_b و Z_c) نیز برابر

با امپدانس خازن ($-jX_c$) است. رابطه (۱۰) با جایگذاری

رابطه (۹) در (۸) به دست می‌آید:



شکل (۲): خطی تک‌فاز به زمین در خط جبران‌شده سری

$$\begin{bmatrix} V_{S0} \\ V_{S2} \\ V_{R0} \\ V_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{0S+mZ_{0L}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{2S+mZ_{2L}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{0R}+(1-m)Z_{0L} \\ 0 & 0 & 0 & Z_{2R}+(1-m)Z_{2L} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{R0} \\ I_{R2} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_a-2jX_c & Z_a+jX_c & Z_a+jX_c & 0 & 0 \\ Z_a+jX_c & Z_a+jX_c & Z_a-2jX_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S0} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{R0} \\ I_{R2} \end{bmatrix}$$

در رابطه (۱۰) همانند بخش قبلی، می‌توان با استفاده از

رابطه‌های توالی، رابطه‌های حلقه ولتاژی در باس انتهایی

روشی برای مکان‌یابی خطا در صورت معلوم‌نبودن پارامترهای شبکه از اهمیت بالایی برخوردار است.

۲-۳- الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر

تاکنون برای بهینه‌سازی معادلات با چندین مجهول روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند. روش‌های فراابتکاری زیادی با الگوریتم‌های موجود در طبیعت به‌منظور عدم توقف در نقطه بهینه محلی و پیدا کردن جواب سراسری یا جواب نزدیک به جواب سراسری ارائه شده‌اند. روش جست‌وجوی همسایگی متغیر یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری برای یافتن جواب بهینه مسئله هدف در ادامه تشریح می‌شود که بر مبنای پیشگیری از توقف الگوریتم در بهینه محلی پایه‌ریزی شده است [۳۵]. مسئله بهینه‌سازی (۱۴) را در نظر بگیرید:

$$\min \{F(x) \mid x \in X, X \subseteq D\} \quad (14)$$

در اینجا D ، $F(x)$ و X به ترتیب تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، محدوده جواب‌ها و جواب‌های شدنی مسئله هستند. برای هر x موجود، مجموعه جواب‌هایی در همسایگی جواب اصلی وجود دارد که در آن $x \in P_r(x) \subseteq D$ برای $r=1, \dots, r_{\max}$ است. در این رابطه $P_r(x)$ مجموعه متناهی از جواب‌ها، حول همسایگی x بوده که در آن مقدار r نشان‌دهنده شدت اغتشاش است. تغییر مقدار r کمک می‌کند تا الگوریتم در مقدار بهینه محلی توقف نکند و از همسایگی آن دور شود. برای استفاده از الگوریتم VNS، در قدم اول یک جمعیت اولیه تصادفی در محدوده جواب‌های شدنی به نام x' ایجاد می‌شود. سپس از یک جست‌وجوی محلی در همسایگی جمعیت اولیه برای پیدا کردن بهترین جواب x'' استفاده می‌شود. برای مشخص شدن جهت افزایش یا کاهش مقدار x' ، از یک شاخص تصادفی $0 < \beta < 1$ استفاده می‌شود. در هر مرحله اگر $\beta < 0.5$ باشد، مقدار x' به‌دست‌آمده، در جهت افزایش و در

غیر این صورت در جهت کاهش مقدار متغیر بهینه‌سازی حرکت می‌کند. در قدم سوم، اگر مقدار $F(x') > F(x'')$ باشد، مقدار $r=1$ و $x'=x''$ در نظر گرفته می‌شود. گفتنی است اگر r به میزان r_{\max} برسد، آنگاه $r=1$ خواهد شد. به این ترتیب تا تکمیل حلقه تکرار VNS، جواب‌های به‌دست‌آمده با توجه به شدت اغتشاش (r) حول همسایگی بهینه محلی تغییر می‌کنند تا بهترین جواب در پایان حلقه تکرار VNS برای مسئله مدنظر به‌روزرسانی شود.

۳- روش پیشنهادی برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال

رابطه‌های (۷) و (۱۳) به ترتیب برای به دست آوردن محل خطا در خطوط جبران‌نشده و جبران‌شده سری هستند. در روش پیشنهادی، این رابطه‌ها به‌عنوان تابع هدف برای تخمین محل خطا ($F(x)$) استفاده می‌شوند. مکان خطا (m) و پارامترهای خط و امیدانس تونن شبکه (Z_{1S} و Z_{2S} و Z_{1R} و Z_{2R} و Z_{1L} و Z_{2L}) به‌عنوان متغیرهای مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. پس از تخمین جواب‌های بهینه امیدانس خط و تونن شبکه در هر مرحله توسط الگوریتم VNS، مکان خطا (m) از رابطه‌های (۷) و (۱۳) به دست می‌آید و تابع هدف به‌روزرسانی می‌شود. شکل (۳) روندنمای الگوریتم مکان‌یابی پیشنهادی را نشان می‌دهد که دارای بخش‌های زیر است:

بخش اول (پردازش اولیه): ابتدا از سیگنال جریان اندازه‌گیری شده یک پایانه (پایانه S) در هنگام خطا نمونه‌برداری می‌شود. سپس اندازه و فاز آن با کمک روش تبدیل فوریه سریع به دست می‌آید و توالی مثبت، منفی و صفر جریان محاسبه می‌شود.

بخش دوم (تولید جمعیت اولیه): با توجه به مرجع [۱۴] میزان عدم قطعیت در پارامترهای خط انتقال و تونن شبکه کمتر از ۱۰ درصد از مقدار واقعی در شرایط مختلف است؛ بنابراین در این مقاله، جمعیت اولیه مجهول‌ها (x')

جبران‌شده سری محاسبه می‌شود. با داشتن مقدار امیدانس‌های مجهول و مکان خطا، تابع جدید مکان خطا ($F(x'')$) محاسبه می‌شود. مطابق رابطه‌های (۷) و (۱۳) مطلوب این است تا عدم دقت نهایی مکان خطا به صفر میل کند؛ بنابراین، اگر $F(x'') < F(x')$ باشد، آنگاه مقادیر تخمینی پیشنهادی جواب بهتری برای مسئله مکان‌یابی هستند. پس از ذخیره مقادیر جدید ($x''=x'$ و $r=1$)، مرحله سوم تا پایان حلقه تکرار می‌شود و در هر مرحله به‌ازای $F(x'') < F(x')$ جواب‌های مطلوب به‌روزرسانی می‌شوند. به‌منظور جلوگیری از دور شدن احتمالی متغیرهای بهینه‌سازی از نقطه بهینه، در هر مرحله اگر مقدار r به r_{max} برسد، مقدار r دوباره ۱ می‌شود. پس از پایان یافتن حلقه VNS، جواب به دست آمده برای محل خطا ذخیره می‌شود.

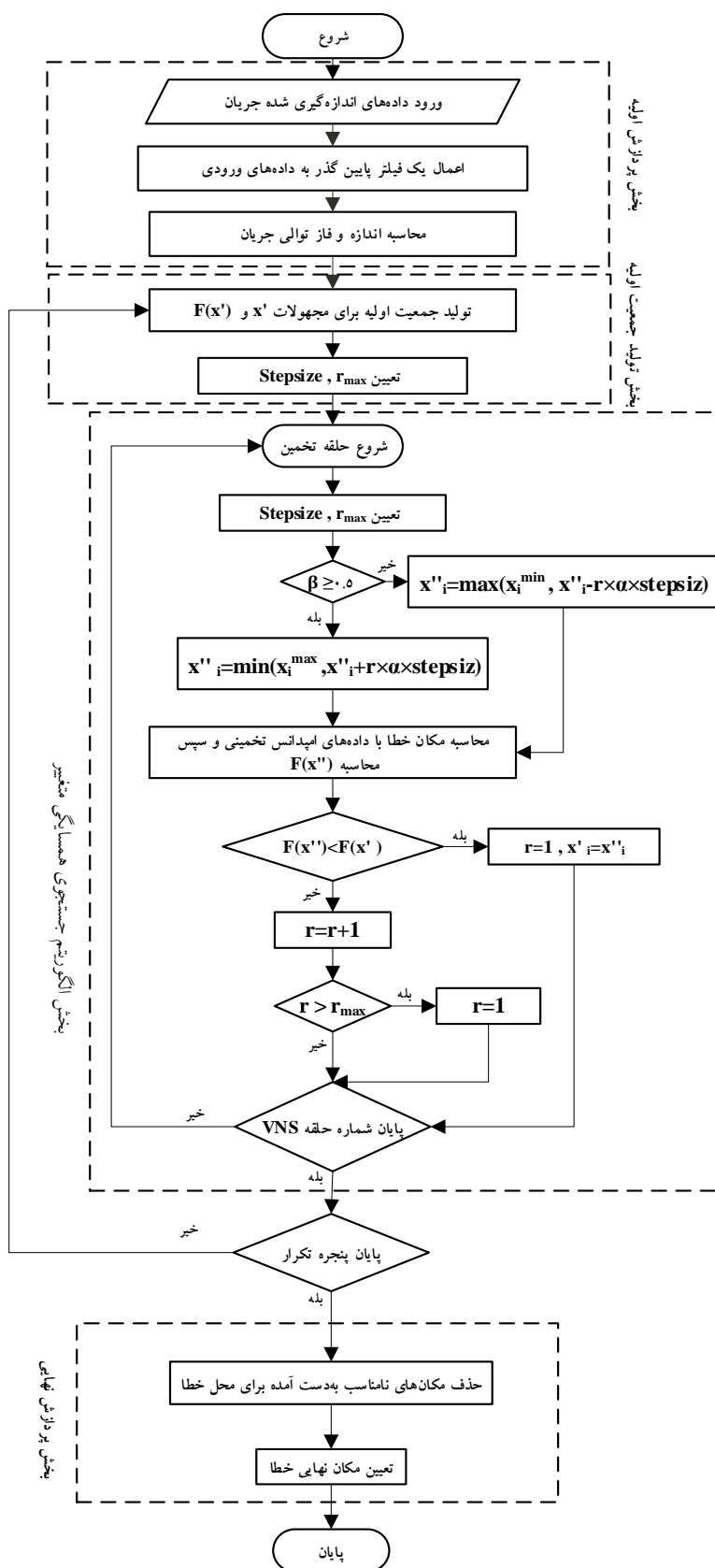
بخش چهارم (پردازش نهایی): در این مطالعه، از ۴ سیکل از اطلاعات حین خطا با توجه به زمان مورد نیاز برای رفع عیب شامل مجموع کارکرد رله، انتقال سیگنال و عملیات قطع کلید برای انجام مکان‌یابی خطا استفاده می‌شود [۱]. به ازای هر پنجره نمونه‌برداری یک مکان خطا در انتهای حلقه VNS محاسبه و ذخیره می‌شود. سپس پنجره مذکور با گام یک واحد در طول داده‌های ذخیره‌شده حرکت می‌کند و روش پیشنهادی به ابتدای بخش دوم الگوریتم برمی‌گردد. در انتها بعد از محاسبه مکان‌های اولیه خطا، با حذف داده‌های نامناسب به دست آمده برای محل خطا به کمک روش میانگین هارمونیک [۱۵]، مکان نهایی خطا تعیین می‌شود.

یک عدد تصادفی با اختلاف حداکثر ۱۰ درصد بیشتر یا کمتر از مقدار اصلی لحاظ می‌شود و همچنین مکان اولیه خطا در ۵۰ درصد طول خط در نظر گرفته می‌شود. سپس مقدار اولیه تابع مکان خطا $F(x')$ ، از رابطه‌های (۷) و (۱۳) محاسبه می‌شود.

بخش سوم (حلقه VNS): بعد از تولید جمعیت اولیه، مقادیر r_{max} و $stepsize$ تنظیم می‌شوند. پس از ورود به حلقه تخمین VNS، مقدار افزایش یا کاهش متغیرها با استفاده از روش جست‌وجوی محلی مطابق با رابطه (۱۵) تخمین زده می‌شود:

$$x_i'' = x_i' \pm r \times \alpha \times stepsize \quad (15)$$

در این رابطه، i شماره متغیر، r نشان‌دهنده شدت اغتشاش و $stepsize$ نیز گام مسئله در جهت افزایش یا کاهش مقدار متغیرهای مسئله است. گفتنی است مقدار r بین صفر و r_{max} است. همچنین، مقدار r_{max} متناسب با مسئله به اندازه ۱۰۰ و گام مسئله $0/005$ تنظیم می‌شود. بعد از انتخاب تصادفی مقدار β در محدوده $\beta < 0/5$ یا $\beta > 0/5$ ، الگوریتم مسیر خود را در جهت افزایش یا کاهش پارامترها پیدا می‌کند. پارامتر α یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است که به‌عنوان پارامتر کمکی برای جلوگیری از توقف متغیرهای بهینه‌سازی در همسایگی نقطه بهینه محلی استفاده می‌شود. پس از تخمین ابتدایی امیدانس‌های خط و تونن شبکه با استفاده از رابطه (۱۵)، مقدار مکان خطا (m) با کمک رابطه (۷) برای خطوط جبران‌نشده و رابطه (۱۳) برای خطوط



شکل (۳): روندنمای روش فراابتکاری پیشنهادی مکان‌یابی خطای مثبتی بر امیدانس

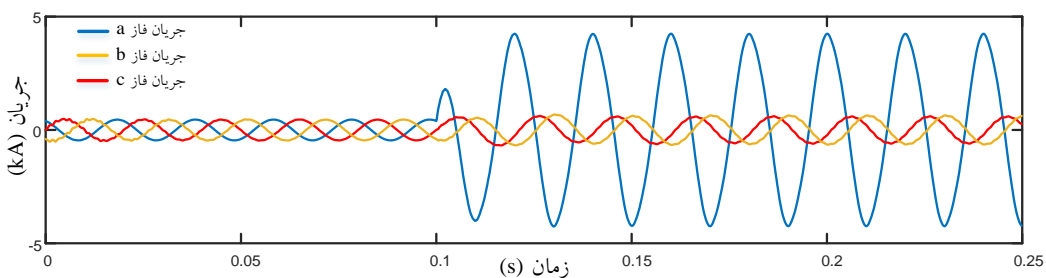
۴- نتایج شبیه‌سازی‌ها

به منظور ارزیابی کارایی روش مکان‌یابی پیشنهادی، ابتدا یک سیستم ۲۳۰ کیلوولت با خط انتقالی به طول ۲۰۰ کیلومتر، در نرم‌افزار DIGSILENT شبیه‌سازی می‌شود. اطلاعات مربوط به پارامترهای منابع و خط در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است. امپدانس خازن سری جبران‌ساز برابر ۴۰ اهم در نظر گرفته می‌شود که معادل جبران‌سازی خط به میزان ۵۰ درصد است. همچنین، اختلاف زاویه بین منبع‌های S و R به میزان ۱۰ درجه تنظیم می‌شود. پارامترهای MOV نیز به صورت غیرخطی مطابق رابطه (۱۶) تنظیم می‌شوند [۲۹]. در این رابطه مقدار I_{max} نشان‌دهنده بیشترین جریان گذرنده از جبران‌ساز، V_{pi} برابر ولتاژ نامی جبران‌ساز سری و α ضریب ثابت تجربی برای رابطه است که به ترتیب برابر ۲۰ کیلوآمپر، ۱۰۸ کیلوولت و ۵۰ در نظر گرفته می‌شود؛ برای مثال، شکل (۴) جریان خطی تک‌فاز به زمین در فاز a در ۳۰ درصد طول خط با مقاومت خطی ۲۰ اهم را نشان می‌دهد. جریان عبوری از مجموعه جبران‌ساز سری و MOV در شکل (۵) مشاهده می‌شود. همچنین، شکل موج فازهای مختلف ولتاژ

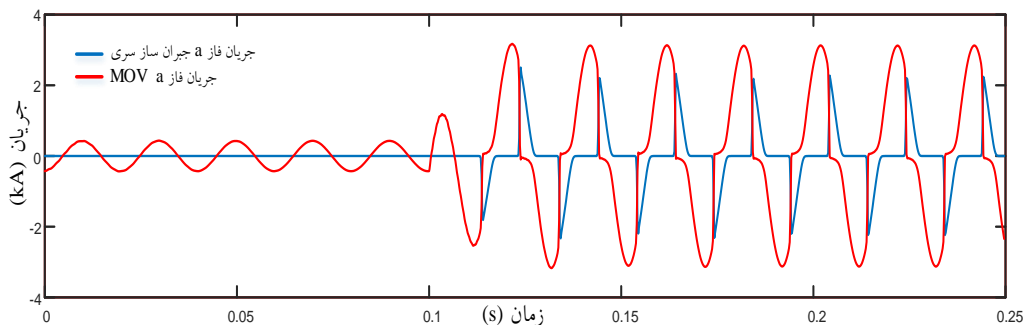
جبران‌ساز در صورت وقوع خطا در فاز a در شکل (۶) نشان داده شده است.

$$I = I_{max} \left(\frac{V}{V_{pl}} \right)^\alpha \quad (16)$$

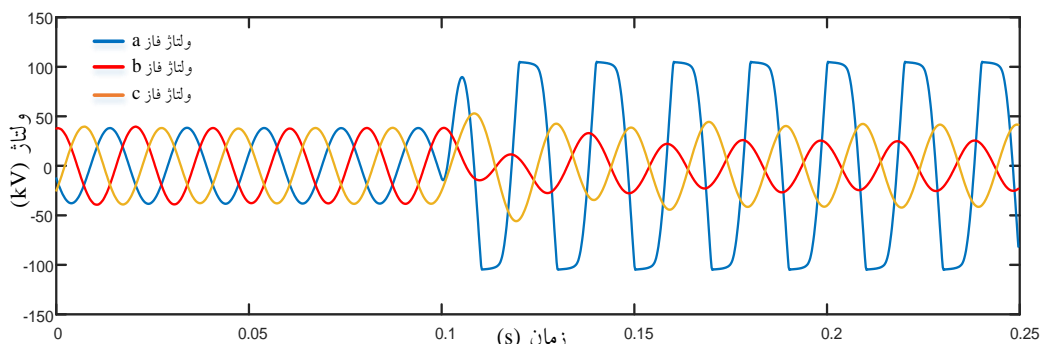
لازم به ذکر است که در این مطالعه، برای اندازه‌گیری سیگنال‌های جریان در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده از ترانسفورماتور جریان ۱۰P۲۰ با نسبت دور ۱/۱۰۰۰ با در نظر گرفتن خطای مجاز ترانس استفاده شده است. جریان اندازه‌گیری‌شده از خروجی CT در یک فایل متنی با فرکانس نمونه‌برداری ۵ کیلوهرتز، ثبت و به نرم‌افزار MATLAB انتقال داده می‌شود. بعد از نمونه‌برداری از سیگنال جریان در پایانه S و حذف داده‌های ناخواسته توسط یک فیلتر پایین‌گذر، سیگنال‌ها با استفاده از روش ۵ نمونه‌ای نرم می‌شوند. با توجه به فرکانس نمونه‌برداری، تعداد نمونه‌های یک سیکل و کل داده‌های پنجره نمونه‌برداری به ترتیب ۱۰۰ و ۳۰۱ هستند. سپس مطابق روش ارائه‌شده، درصد خطای روش مکان‌یابی پیشنهادی طبق رابطه (۱۷) تخمین زده می‌شود.



شکل (۴): جریان خطا در خط جبران‌شده در هنگام وقوع خطای تک‌فاز به زمین در فاز a



شکل (۵): جریان فاز a جبران‌کننده سری و MOV در هنگام وقوع خطای تک‌فاز به زمین در فاز a



شکل (۶): ولتاژ جبران‌ساز در هنگام وقوع خطای تک‌فاز به زمین در فاز a

عدم قطعیت در پارامترهای خط و شبکه در روش پیشنهادی، جواب‌های به دست آمده بهتر از روش مرجع مدنظر است. جدول (۴) نتایج بررسی دقت روش پیشنهادی در خط جبران‌شده سری با در نظر گرفتن اثر غیرخطی برقگیر خازن سری در کنار عدم قطعیت پارامترهای خط و شبکه را نشان می‌دهد. بررسی نتایج روش پیشنهادی حاکی از آن است که عدم دقت روش مکان‌یابی پیشنهادی در اکثر حالت‌ها در محدوده استاندارد (زیر ۲ درصد) است [۲۶]. همچنین، میانگین و واریانس عدم دقت مکان‌یابی روش پیشنهادی در این حالت به ترتیب برابر ۰/۳۱۲۶ و ۰/۹۵۶۵ درصد است. به منظور مقایسه روش پیشنهادی با یک روش مرجع، در جدول (۴) نتایج ارائه‌شده در مرجع [۲۵] نیز ارائه شده‌اند. در مرجع مقایسه‌شده تمامی جواب‌ها در محدوده استاندارد هستند؛ اما این مقاله اثر عدم قطعیت در پارامترهای شبکه و خط انتقال به‌طور هم‌زمان را نادیده گرفته است. بررسی نتایج روش پیشنهادی نشان می‌دهد با وجود نامعلوم بودن امپدانس خط و تونن شبکه، عدم دقت روش مکان‌یابی خطای پیشنهادی در محدوده مجاز و نزدیک به نتایج مرجع [۲۵] است. این موضوع نشان‌دهنده کارایی مطلوب روش پیشنهادی است.

۴-۱- تأثیر اختلاف زاویه منابع بر دقت روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا

اختلاف زاویه بین دو منبع یکی از مواردی است که می‌تواند بر دقت روش‌های مکان‌یابی تأثیر بگذارد. در این مقاله، زاویه بین دو منبع از ۱۵- تا ۱۵+ درجه با گام ۵

$$E\% = \left| \frac{A_{FL} - E_{FL}}{A_{FL}} \right| \quad (17)$$

در این رابطه، مقدار واقعی مکان خطا و E_{FL} مقدار تخمینی محل خطا توسط روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول (۱): اطلاعات امپدانس منابع

پارامتر	منبع S	منبع R
امپدانس توالی مثبت (Ω)	$0/2 + j 5/13$	$4/06 + j 26/46$
امپدانس توالی صفر (Ω)	$0/2 + j 2/66$	$5/5 + j 29/05$

جدول (۲): اطلاعات امپدانس خط

پارامتر	توالی مثبت	توالی صفر
امپدانس (Ω)	$12/98 + j 80/16$	$56/3 + j 250/36$
ادمیتانس (μS)	$j 569/24$	$j 298/44$

جدول (۳) نتایج ارزیابی روش پیشنهادی در خط جبران‌نشده تا مقاومت خطای ۵۰ اهم در نقاط مختلف خط، در صورت معلوم نبودن امپدانس خط و تونن شبکه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند عدم دقت روش مکان‌یابی پیشنهادی در محدوده استاندارد (زیر ۱ درصد) است. مقدار میانگین و واریانس عدم دقت روش پیشنهادی به ترتیب ۰/۳۷۴۵ و ۰/۰۵۸۴ درصد است که نشان‌دهنده کارایی مطلوب این روش است. به منظور مقایسه دقت روش پیشنهادی با یک روش مرجع، روش تک‌پایانه بیان‌شده در مرجع [۲۷] پیاده‌سازی شده است که نتایج این روش در جدول (۳) مشاهده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که با وجود

پیشنهادی در اکثر حالت‌های بررسی شده زیر ۲ درصد است؛ به طوری که میانگین و واریانس عدم دقت مکان‌یابی به ترتیب ۱/۱۱۹۸ و ۰/۳۷۱۳ درصد است. این نتایج نشان‌دهنده عدم وابستگی روش پیشنهادی به اختلاف زاویه بین منابع هستند.

درجه در مقاومت خطای ۲۰ اهم تغییر داده می‌شود و تأثیر اختلاف زاویه منابع بر دقت روش پیشنهادی بررسی می‌شود. با توجه به نتایج جدول (۵)، عدم دقت روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا در خط جبران‌نشده در زاویه‌های فوق زیر ۱ درصد است. همچنین، در صورت جبران‌سازی خط به مقدار ۵۰ درصد، عدم دقت روش مکان‌یابی

جدول (۳): عدم دقت (%) مکان‌یابی خطا در خط انتقال جبران‌نشده برای خطای تک‌فاز به زمین با مقاومت خطای مختلف

مکان واقعی خطا در طول خط (%)					روش	مقاومت خطا (Ω)
۹۰	۷۰	۵۰	۳۰	۱۰		
۰/۱۰۲۱	۰/۰۸۶۲	۰/۷۰۷۵	۰/۳۲۲۱	۰/۲۷۳۲	پیشنهادی	۰
۰/۳۰۳۳	۰/۵۶۶۷	۰/۸۴۷۷	۰/۵۰۲۲	۰/۸۴۳۰	مرجع [۲۷]	
۰/۱۸۷۵	۰/۱۴	۰/۳۴۲۳	۰/۲۳۶۳	۰/۱۱۵۸	پیشنهادی	۱۰
۰/۳۳۵۶	۰/۲۱۵۶	۰/۴۵۶۷	۰/۳۳۲۴	۰/۶۶۷۸	مرجع [۲۷]	
۰/۱۵۶۷	۰/۱۶۷۹	۰/۵۹۶۴	۰/۴۰۰۶	۰/۰۵۵۶	پیشنهادی	۲۰
۰/۶۷۸۹	۰/۴۴۵۶	۰/۲۱۱۳	۰/۲۳۴۵	۰/۳۲۶۷	مرجع [۲۷]	
۰/۱۴۸۴	۰/۲۸۴۵	۰/۶۰۴۱	۰/۵۳۸۸	۰/۰۹۵	پیشنهادی	۳۰
۰/۹۸۴۵	۱/۰۵۶۷	۰/۶۷۸۹	۰/۸۹۷۶	۱/۰۸۹۰	مرجع [۲۷]	
۰/۳۷۷۶	۰/۱۱۴۹	۰/۴۱۵۱	۰/۳۷۰۳	۰/۲۰۹۱	پیشنهادی	۴۰
۰/۹۸۶۹	۱/۲۳۴۵	۰/۴۳۲۱	۰/۷۸۰۵	۱/۴۵۴۹	مرجع [۲۷]	
۰/۱۱۵۱	۰/۲۸۷۹	۰/۸۱۰۶	۰/۶۱۲۵	۰/۲۳۰۶	پیشنهادی	۵۰
۱/۲۱۳۰	۰/۷۸۹۰	۰/۳۲۸۶	۰/۶۵۴۶	۱/۳۲۴۵	مرجع [۲۷]	

جدول (۴): عدم دقت (%) مکان‌یابی خطا در خط انتقال جبران‌شده سری برای خطای تک‌فاز به زمین با مقاومت خطای مختلف

مکان واقعی خطا در طول خط (%)					الگوریتم	مقاومت خطا (Ω)
۹۰	۷۰	۵۰	۳۰	۱۰		
۱/۳۷۱۴	۱/۶۹۸۷	۰/۸۸۰۴	۰/۳۰۳۶	۰/۷۴۳	پیشنهادی	۰
۰/۱۱۵۶	۰/۶۲۴۳	۰/۰۵۲۱	۰/۱۸۳۲	۰/۵۴۱۱	مرجع [۲۵]	
۰/۵۴۴۶	۰/۳۳۳۶	۰/۵۱۰۲	۱/۷۹۴۵	۱/۳۷۱۴	پیشنهادی	۱۰
۰/۸۰۲۱	۰/۶۲۳۱	۰/۱۵۴۱	۰/۰۰۵۱	۰/۸۵۳۲	مرجع [۲۵]	
۰/۳۴۳۰	۰/۷۲۰۹	۰/۲۶۱۱	۰/۹۹۶۸	۰/۱۳۸۸	پیشنهادی	۲۰
۰/۰۰۴۱	۰/۶۶۲۱	۰/۰۰۳۱	۰/۱۹۳۲	۰/۱۳۲۱	مرجع [۲۵]	
۰/۶۸۰۲	۰/۷۷۱۳	۰/۱۶۲۹	۱/۶۲۵۹	۱/۸۲۱۷	پیشنهادی	۳۰
۰/۷۸۰۱	۰/۳۶۰۲	۰/۱۱۳۲	۰/۰۳۳۶	۰/۱۷۴۳	مرجع [۲۵]	
۰/۴۱۶۶	۱/۳۰۱۵	۰/۶۱۵۵	۰/۷۸۰۵	۱/۴۵۴۹	پیشنهادی	۴۰
۰/۷۳۱۴	۰/۳۹۲۱	۰/۵۸۴۳	۱/۰۶۳۶	۰/۰۹۳۲	مرجع [۲۵]	
۱/۳۰۲۷	۰/۶۹۶۳	۱/۳۲۸۶	۱/۱۲۹۶	۱/۵۹۵۱	پیشنهادی	۵۰
۱/۰۵۲	۰/۰۲۵۳	۰/۰۸۰۲	۰/۷۹۲۱	۰/۳۵۳۲	مرجع [۲۵]	

۴-۲- تأثیر تغییر زاویه شروع خطا بر دقت روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا

تغییر زاویه شروع خطا یکی از مواردی است که دقت روش‌های مکان‌یابی خطا را دچار چالش می‌کند [۱۴]. در این مطالعه، کارایی روش پیشنهادی برای خطاهای با زاویه شروع صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ درجه در مقاومت خطای ۲۰ اهم بررسی شده است. نتایج جدول (۶) نشان می‌دهند دقت روش پیشنهادی مکان‌یابی در خطوط جبران‌نشده در محدوده استاندارد است. همچنین، در صورت جبران‌سازی خط به مقدار ۵۰ درصد، عدم دقت روش در اکثر حالت‌های بررسی شده زیر ۲ درصد است.

۴-۳- تأثیر میزان جبران‌سازی خط بر دقت روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا

در شرایط بهره‌برداری متفاوت، ممکن است درصد جبران‌سازی خط تغییر کند. در این مطالعه برای بررسی تأثیر میزان جبران‌سازی بر دقت روش پیشنهادی، این میزان از ۳۰ تا ۶۰ درصد با گام ۱۰ درصد تغییر می‌کند. جدول (۷) نتایج مکان‌یابی خطا در طول خط با مقاومت خطاهای صفر، ۱۰ و ۵۰ اهم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در

اکثر حالت‌های بررسی‌شده، دقت روش فراابتکاری پیشنهادی در محدوده استاندارد است؛ برای مثال، در مقاومت ۵۰ اهم و درصد جبران‌سازی ۴۰ درصد، عدم دقت مکان‌یابی در صورت وقوع خطا در ۳۰ درصد طول خط برابر ۱/۳۸۰۷ درصد است.

۴-۴- تأثیر نویز بر دقت روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا

وجود نویز در داده‌های اندازه‌گیری شده ممکن است دقت روش‌های مکان‌یابی خطا را دچار مشکل کند. در این مقاله، به منظور بررسی تأثیر نویز بر روش پیشنهادی، یک نویز سفید گوسی با نسبت سیگنال به نویز ۲۰ و ۳۰ دسی‌بل به داده‌های اندازه‌گیری شده اعمال می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در جدول (۸) مشاهده می‌شود به‌طور مثال، در صورت وقوع نویز با نسبت سیگنال به نویز ۲۰ دسی‌بل، عدم دقت مکان‌یابی در خط جبران‌نشده و جبران‌شده سری در صورت وقوع خطای تک‌فاز به زمین در ۵۰ درصد خط به ترتیب برابر ۰/۵۹۶۴ و ۰/۷۶۱۱ درصد است که در محدوده مجاز است. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهند دقت روش پیشنهادی مکان‌یابی تحت تأثیر نویز قرار نمی‌گیرد.

جدول (۵): تأثیر اختلاف زاویه منابع بر عدم دقت (٪) روش پیشنهادی مکان‌یابی خطای تک‌فاز به زمین در مقاومت ۲۰ اهم

مکان واقعی خطا در طول خط (٪)					جبران‌سازی	زاویه منبع (°)
۹۰	۷۰	۵۰	۳۰	۱۰		
۰/۱۸۱۴	۰/۱۲۰۵	۰/۵۴۵۳	۰/۰۵۱۲	۰/۱۱۶۵	ندارد	۰
۰/۸۹۴۲۰	۰/۰۲۵۳	۰/۶۲۷۵	۱/۸۰۶۵	۰/۹۹۹۳	دارد	
۰/۱۳۲۶	۰/۲۱۴۰	۰/۸۷۰۳	۰/۷۹۶۵	۰/۳۷۶۹	ندارد	۱۰
۰/۱۳۸۵	۰/۲۹۶۸	۰/۵۸۴۳	۱/۸۶۸۰	۰/۸۲۱۰	دارد	
۰/۱۸۳۲	۰/۰۲۰۵	۰/۸۳۰۵	۰/۱۶۵۱	۰/۱۶۵۸	ندارد	۱۵
۱/۱۹۹۶	۰/۲۴۸۴	۱/۳۶۳۹	۱/۷۰۱۱	۱/۸۳۴۵	دارد	
۰/۲۴۳۱	۰/۴۵۰۷	۰/۶۷۲۳	۰/۳۸۱۴	۰/۱۹۰۳	ندارد	-۵
۰/۷۲۳۴	۱/۵۵۹۸	۰/۲۹۱۴	۰/۸۹۵۶	۱/۵۶۹۶	دارد	
۰/۲۰۸۹	۰/۲۶۷۴	۰/۳۵۵۳	۰/۶۵۶۴	۰/۳۲۳۴	ندارد	-۱۰
۱/۴۵۷۶	۱/۹۱۴۷	۰/۶۴۴۰	۱/۸۷۸۰	۱/۳۰۸۸	دارد	
۰/۰۶۴۴	۰/۱۶۵۲	۰/۰۹۶۸	۰/۰۵۲۵	۰/۲۴۳۲	ندارد	-۱۵
۱/۲۸۳۳	۱/۶۹۵۲	۰/۵۲۳۹	۱/۳۸۵۴	۱/۷۵۵۸	دارد	

جدول (۶): تأثیر زاویه شروع خط بر عدم دقت (%) روش پیشنهادی مکان‌یابی خطی تک‌فاز به زمین در مقاومت ۲۰ اهم

مکان واقعی خط در طول خط (%)					جبران‌سازی	زاویه کلیدزنی (°)
۹۰	۷۰	۵۰	۳۰	۱۰		
۰/۱۰۲۱	۰/۰۸۶۲	۰/۷۰۷۵	۰/۳۲۲۱	۰/۲۷۳۲	ندارد	۰
۰/۹۷۱۴	۱/۵۶۴۷	۰/۸۸۰۴	۰/۵۸۱۳	۱/۸۸۶۲	دارد	
۰/۳۸۹۹	۰/۳۹۲۰	۰/۴۷۴۷	۱/۰۶۴۴	۰/۵۵۷۶	ندارد	۴۵
۱/۱۴۰۲	۱/۱۷۸۱	۱/۷۰۳۲	۱/۵۸۰۱	۱/۵۵۹۱	دارد	
۰/۵۴۰۶	۰/۴۵۹۰	۰/۴۵۸۴	۰/۳۲۳۴	۰/۰۰۳۲	ندارد	۹۰
۱/۳۱۳۸	۱/۳۶۵۶	۰/۹۳۲۸	۰/۵۸۱۳	۱/۶۳۶۵	دارد	
۰/۲۷۹۱	۰/۰۱۸۶	۰/۴۸۷۵	۰/۱۱۶۰	۰/۰۲۲۱	ندارد	۱۸۰
۰/۶۰۱۰	۰/۳۴۴۷	۰/۳۳۹۶	۱/۰۲۷۶	۱/۳۲۶۹	دارد	

می‌شود در صورت ترنسپوزنبودن خط انتقال، دقت روش پیشنهادی در برخی نقاط کاهش می‌یابد. میانگین عدم دقت مکان‌یابی روش پیشنهادی برای خطوط جبران‌نشده و جبران‌شده سری در این حالت به ترتیب ۰/۳۱۰۴ و ۱/۱۱۳۴ درصد است. به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی حاکی از حفظ دقت روش پیشنهادی در محدوده استاندارد در خطوط جبران‌نشده و جبران‌شده سری با وجود ترنسپوزنبودن خط هستند.

۴-۷- بررسی عملکرد روش پیشنهادی مکان‌یابی

خطا در شبکه گسترده

به‌منظور بررسی دقت مکان‌یابی روش پیشنهادی در شبکه گسترده، از شبکه ۳۹ باس IEEE استفاده می‌شود. اطلاعات شبکه و خط مطالعه شده در مرجع [۳۶] مشاهده می‌شود. با تغییرات جزئی شبکه و اضافه‌کردن یک جبران‌ساز سری با جبران‌سازی به میزان ۵۰ درصد در خط انتقال ۱۳۴ کیلومتری بین باس ۲۴ و ۱۹، کارایی روش پیشنهادی بررسی شده است. جدول (۱۱) کارایی روش پیشنهادی را برای حالت جبران‌نشده و جبران‌شده سری در خط مذکور، در صورت وقوع خطای تک‌فاز به زمین با مقاومت خطای ۰ تا ۵۰ اهم با گام ۱۰ اهم در نقاط مختلف این خط نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده، عدم دقت روش پیشنهادی در خط جبران‌نشده با میانگین ۰/۲۷۴۹ درصد و واریانس ۰/۰۲۵۳ درصد در محدوده استاندارد است. همچنین، عدم دقت روش پیشنهادی برای

۴-۵- تأثیر فرکانس نمونه‌برداری بر دقت روش

پیشنهادی مکان‌یابی خطا

در این مطالعه، به‌منظور بررسی تأثیر فرکانس نمونه‌برداری بر دقت روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا، سیگنال‌های جریان ورودی با سه فرکانس ۲، ۳ و ۴ کیلوهرتز نمونه‌برداری می‌شوند. نتایج مکان‌یابی به کمک روش پیشنهادی برای مقاومت خطای ۲۰ اهم در جدول (۹) نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس نمونه‌برداری میانگین خطای حالت‌های شبیه‌سازی شده بهبود می‌یابد. همچنین، نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از کارایی مطلوب روش پیشنهادی در صورت تغییر فرکانس نمونه‌برداری است؛ به‌طور مثال، عدم دقت مکان‌یابی در صورت وقوع یک خطای تک‌فاز به زمین در ۷۰ درصد طول خط جبران‌شده سری در فرکانس ۲ و ۴ کیلوهرتز به ترتیب ۱/۴۱۳۴ و ۰/۹۱۳۴ درصد است.

۴-۶- تأثیر ترنسپوزنبودن خطوط انتقال بر دقت

روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا

یکی از چالش‌های مهم در مکان‌یابی خطای تک‌پایانه در برخی روش‌های امیدانسی، ترنسپوزنبودن خطوط است [۲۵]. در این بخش با شبیه‌سازی خط انتقال ترنسپوزنه‌نشده، با اعمال یک خطای تک‌فاز در محدوده مقاومت خطای ۰ تا ۵۰ اهم، تأثیر این عامل بر دقت مکان‌یابی روش پیشنهادی بررسی می‌شود. با توجه به نتایج جدول (۱۰) مشاهده

خطوط جبران‌شده سری در اکثر حالت‌ها در محدوده استاندارد بوده و دارای میانگین و واریانس به‌ترتیب برابر ۰/۸۹۹۱ و ۰/۲۹۸۷ درصد است. نتایج روش مکان‌یابی حاکی از کارایی مطلوب روش پیشنهادی در شبکه گسترده در خطوط جبران‌نشده و جبران‌شده سری، در صورت نامعلوم بودن پارامترهای خط و امیدانس تونن شبکه هستند.

۵- نتیجه‌گیری

به‌منظور رفع عیب و کاهش مدت زمان خاموشی مشترکین، مکان‌یابی خطا در سریع‌ترین زمان ممکن از اهمیت بالایی برخوردار است. روش‌های مبتنی بر امیدانس یکی از روش‌های تعیین مکان خطا هستند. وجود عدم قطعیت در پارامترهای خط و امیدانس تونن شبکه در شرایط مختلف یکی از مسائلی است که می‌تواند دقت این روش‌ها را دچار مشکل کند. همچنین، در صورت به‌کارگیری جبران‌سازهای سری به‌منظور افزایش ظرفیت توان انتقالی شبکه قدرت، در کنار عدم قطعیت‌های مذکور، پیچیدگی روش‌های مکان‌یابی خطا افزایش می‌یابد. بنابراین در این مقاله، به‌منظور کاهش تأثیر عدم قطعیت‌های مذکور بر دقت مکان‌یابی خطا، روش

فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر مبتنی بر روش مکان‌یابی امیدانسی برای خطاهای تک‌فاز به زمین با استفاده از اطلاعات جریان یک پایانه پیشنهاد شده است. این روش با قابلیت اطمینان بالا و صرف هزینه کم قادر است محل خطا را در خطوط جبران‌نشده و جبران‌شده سری باوجود معلوم‌نبودن پارامترهای خط و امیدانس تونن شبکه محاسبه کند. نتایج شبیه‌سازی‌های مختلف حاکی از کارایی مطلوب روش فراابتکاری پیشنهادی در صورت تغییر مقاومت خطا، اختلاف زاویه بین منابع، زاویه شروع خطا و درصد جبران‌سازی هستند. براساس نتایج شبیه‌سازی‌ها می‌توان گفت روش پیشنهادی دارای دقت مطلوب در مکان‌یابی خطای تک‌فاز در سیستم گسترده است. همچنین، ترنسپوزیسیون یا ترنسپوزنیوون خط، وجود نویز و تغییر فرکانس نمونه‌برداری تأثیر چندانی بر دقت روش پیشنهادی ندارند؛ به‌طوری‌که دقت روش پیشنهادی در محدوده استاندارد باقی می‌ماند. برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود روش ارائه شده با در نظر گرفتن ناهمگنی خطوط انتقال، وقوع خطاهای امیدانس بالا و بروز خطا در نزدیکی شین اندازه‌گیری، به‌منظور افزایش کارایی روش در شرایط مذکور توسعه یابد.

جدول (۷): تأثیر میزان جبران‌سازی خط بر عدم دقت (%) روش پیشنهادی مکان‌یابی خطای تک‌فاز به زمین

مکان واقعی خطا در طول خط (%)					جبران‌سازی (%)	مقاومت خطا (Ω)
۹۰	۷۰	۵۰	۳۰	۱۰		
۰/۵۳۲۸	۰/۳۳۴۸	۰/۰۲۲۸	۰/۵۲۸۱	۰/۶۲۸۱	۳۰	۰
۰/۸۳۳۲	۱/۵۱۰۴	۰/۶۹۰۲	۰/۲۸۶۴	۰/۷۸۵۵	۴۰	
۱/۳۷۱۴	۱/۶۹۸۷	۰/۸۸۰۴	۰/۳۰۳۶	۰/۷۴۳	۵۰	
۱/۵۶۱۷	۰/۳۹۷۰	۰/۵۷۴۹	۱/۰۴۱۱	۰/۳۷۹۲	۶۰	
۰/۵۶۷۳	۰/۲۹۸۴	۰/۲۸۷۰	۱/۲۰۰۳	۰/۷۰۶۷	۳۰	۱۰
۰/۵۳۲۴	۰/۴۶۴۰	۰/۱۶۹۵	۱/۲۱۴۹	۰/۹۷۳۳	۴۰	
۰/۴۱۶۶	۱/۳۰۱۵	۰/۶۱۵۵	۰/۷۸۰۵	۱/۶۵۴۹	۵۰	
۰/۰۱۴۴	۰/۸۱۷۳	۰/۴۹۲۴	۰/۶۳۳۹	۱/۵۶۹۰	۶۰	
۰/۰۶۳۹	۰/۷۲۸۲	۰/۲۲۹۱	۱/۱۵۸۴	۰/۶۱۴۳	۳۰	۵۰
۰/۷۲۶۸	۱/۳۲۶۳	۱/۴۰۲۴	۱/۳۸۰۷	۰/۴۹۵۷	۴۰	
۱/۳۰۲۷	۰/۶۹۶۳	۱/۳۲۸۶	۱/۱۲۹۶	۱/۵۹۵۱	۵۰	
۱/۸۵۶۴	۱/۷۴۷۰	۱/۴۷۶۹	۱/۴۴۳۵	۱/۱۶۱۴	۶۰	

جدول (۸): تأثیر نویز بر عدم دقت (%) روش پیشنهادی مکان‌یابی خطای تک‌فاز به زمین در مقاومت ۲۰ اهم

مکان واقعی خطا در طول خط (%)					جبران‌سازی	SNR (db)
۹۰	۷۰	۵۰	۳۰	۱۰		
۰/۲۵۶۰	۰/۵۶۶۹	۰/۵۹۶۴	۰/۴۰۰۶	۰/۰۵۵۶	ندارد	۲۰
۰/۵۴۳۰	۰/۷۲۰۹	۰/۷۶۱۱	۱/۹۰۶۸	۱/۲۳۸۸	دارد	
۰/۲۱۲۳	۰/۳۲۲۱	۰/۸۴۵۶	۰/۷۸۷۸	۰/۴۷۰۹	ندارد	۳۰
۰/۲۳۴۵	۰/۴۵۶۷	۰/۳۵۶۹	۱/۶۶۷۷	۰/۹۹۸۷	دارد	

جدول (۹): تأثیر فرکانس نمونه‌برداری بر عدم دقت (%) روش پیشنهادی مکان‌یابی خطای تک‌فاز به زمین در مقاومت ۲۰ اهم

مکان واقعی خطا در طول خط (%)					جبران‌سازی (%)	فرکانس (khz)
۹۰	۷۰	۵۰	۳۰	۱۰		
۰/۷۳۲۵	۰/۸۲۵۴	۰/۶۳۴۸	۱/۱۲۶۷	۰/۸۹۷۰	ندارد	۲
۰/۸۵۶۷	۱/۴۱۳۴	۰/۷۹۸۲	۱/۶۸۹۵	۱/۵۶۸۹	دارد	
۰/۸۲۱۹	۰/۵۶۷۹	۰/۵۹۶۴	۰/۴۱۶۶	۰/۶۵۵۶	ندارد	۳
۰/۶۴۳۰	۱/۲۲۰۹	۰/۵۶۱۱	۱/۴۹۶۸	۰/۹۳۸۸	دارد	
۰/۶۵۲۰	۰/۴۳۴۷	۰/۵۲۴۸	۰/۵۸۲۱	۰/۱۸۸۸	ندارد	۴
۰/۵۰۸۸	۰/۹۱۳۴	۰/۳۹۸۲	۱/۱۸۹۵	۰/۸۹۰۵	دارد	

جدول (۱۰): تأثیر ترنسپوزیسیون خط بر عدم دقت (%) روش پیشنهادی مکان‌یابی خطای تک‌فاز به زمین

مکان واقعی خطا در طول خط (%)					جبران‌سازی	مقاومت خطا (Ω)
۹۰	۷۰	۵۰	۳۰	۱۰		
۰/۲۳۰۹	۰/۲۳۴۵	۰/۸۸۷۹	۰/۴۵۶۳	۰/۳۵۶۵	ندارد	۰
۱/۴۵۴۵	۱/۷۷۸۹	۱/۰۸۰۹	۱/۰۰۹۶	۰/۸۸۷۷	دارد	
۰/۲۳۲۱	۰/۲۴۵۶	۰/۷۶۶۸	۰/۳۴۵۶	۰/۳۴۰۹	ندارد	۳۰
۰/۸۲۱۱	۰/۶۷۸۸	۰/۵۶۷۸	۱/۶۲۵۹	۱/۸۲۱۷	دارد	
۰/۱۳۴۳	۰/۳۴۴۵	۰/۵۸۸۸	۰/۸۷۸۹	۰/۳۴۴۳	ندارد	۵۰
۱/۴۵۸۹	۰/۸۸۶۳	۱/۲۳۴۵	۱/۳۴۳۲	۱/۶۶۷۸	دارد	

جدول (۱۱): عدم دقت (%) روش پیشنهادی مکان‌یابی خطای تک‌فاز به زمین در شبکه گسترده

مکان واقعی خطا در طول خط (%)					جبران‌سازی (%)	مقاومت خطا (Ω)
۹۰	۷۰	۵۰	۳۰	۱۰		
۰/۱۰۴۲	۰/۰۸۶۲	۰/۲۱۷۹	۰/۲۲۳۰	۰/۲۷۱۲	ندارد	۰
۱/۴۷۳۰	۱/۴۹۳۱	۰/۹۵۰۱	۰/۵۲۳۲	۰/۶۴۶۵	دارد	
۰/۱۹۹۸	۰/۲۲۳۴	۰/۴۴۵۳	۰/۳۲۴۶	۰/۱۴۵۲	ندارد	۱۰
۰/۴۳۲۷	۰/۴۲۳۱	۰/۷۸۹۰	۱/۴۵۶۶	۱/۳۹۹۰	دارد	
۰/۲۲۶۷	۰/۱۶۷۸	۰/۰۲۱۳	۰/۳۳۴۱	۰/۳۵۱۲	ندارد	۲۰
۰/۸۸۹۱	۱/۰۲۱۳	۰/۷۱۴۲	۰/۴۶۱۲	۰/۵۵۲۱	دارد	
۰/۱۷۸۹	۰/۱۸۶۷	۰/۵۰۸۱	۰/۵۳۴۳	۰/۱۱۲۳	ندارد	۳۰
۰/۷۷۶۰	۰/۸۱۲۰	۰/۲۵۶۷	۱/۵۴۱۲	۱/۶۶۷۸	دارد	
۰/۲۱۶۶	۰/۱۱۶۷	۰/۴۹۸۱	۰/۳۷۸۹	۰/۲۲۶۷	ندارد	۴۰
۱/۱۱۶۱	۲/۱۱۷۰	۰/۸۹۱۲	۰/۸۰۱۱	۰/۹۰۰۱	دارد	
۰/۱۶۹۸	۰/۲۳۷۸	۰/۷۲۵۶	۰/۴۸۹۰	۰/۳۲۴۵	ندارد	۵۰
۱/۲۴۵۶	۰/۷۸۹۳	۱/۴۵۶۷	۱/۲۳۷۸	۱/۳۳۵۶	دارد	

outlook and future works", IEEE Access, Vol. 9, pp. 158599-158615, Nov. 2021.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3129838>

[7] S. Biswas, and P.K. Nayak, "A new approach for protecting TCSC compensated transmission lines connected to DFIG-based wind farm", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 17, No. 8, pp. 5282-91, 2020 Oct.
<https://doi.org/10.1109/TII.2020.3029201>

[8] R.L. Reis, F.V. Lopes, E.P. Ribeiro, C.M. Moraes, K.M. Silva, A.M. Britto, R.L. Agostinho, and M.A. Rodrigues, "Traveling wave-based fault locators: performance analysis in series-compensated transmission lines", Electric Power Systems Research, Vol. 1, No. 223, pp.109567, Oct. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.epr.2023.109567>

[9] A. Fedorov, V. Petrov, V. Naumov, and V. Hristoforov, "Theory of single-end traveling wave fault location", in IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), , May. 2021.
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM51226.2021.9446310>

[10] V.H. Ferreira, R. Zanghi, M.Z. Fortes, Jr. S. Gomes, and A.P da Silva, "Probabilistic transmission line fault diagnosis using autonomous neural models", Electric Power Systems Research, Vol. 1, No. 185, pp. 106360, Aug. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.epr.2020.106360>

[11] X.W. Liu, "Research on transmission line fault location based on the fusion of machine learning and artificial intelligence", Security and Communication Networks, pp. 1-8, Mar. 2021.
<https://doi.org/10.1155/2021/6648257>

[12] D. Tzelepis, A. Dyško, G. Fusiek, P. Niewczas, S. Mirsaedi, C. Booth, and X. Dong, "Advanced fault location in MTDC networks utilising optically-multiplexed current measurements and machine learning approach", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 1, No. 97, pp. 319-333, Apr. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.10.040>

[13] P.K. Mishra, A. Yadav, and D. Pansari, "Combined fault classification and location scheme for TCSC-compensated transmission lines using machine learning techniques", In National Power Systems Conference (NPSC), pp. 1-6, Dec. 2020.
<https://doi.org/10.1109/NPSC49263.2020.9331877>

[14] A. Elmitwally, M. Elgamel, and A. Al-Zyoud, "A linearized MOV model-based method for fault location on off-terminal series capacitor bank-compensated transmission line using one-end current", Electric Power Systems Research, pp. 107400, Oct. 2021
<https://doi.org/10.1016/j.epr.2021.107400>

[15] R. Taheri, M. Eslami, and Y. Damchi, "Single-end current-based algorithm for fault location in series capacitor compensated transmission lines", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, pp. 106254, Dec. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106254>

[16] M. Davoudi, J. Sadeh, and E. Kamyab, "Parameter-free fault location for transmission

علائم اختصاری

ولتاژ توالی صفر باس ابتدایی	V_{S0}
ولتاژ توالی مثبت باس ابتدایی	V_{S1}
ولتاژ توالی منفی باس ابتدایی	V_{S2}
ولتاژ توالی صفر باس انتهایی	V_{R0}
ولتاژ توالی مثبت باس انتهایی	V_{R1}
ولتاژ توالی منفی باس انتهایی	V_{R2}
امپدانس تونن توالی صفر از دید باس ابتدایی	Z_{0S}
امپدانس تونن توالی منفی از دید باس ابتدایی	Z_{2S}
امپدانس توالی صفر خط	Z_{0L}
امپدانس توالی منفی خط	Z_{2L}
امپدانس تونن توالی صفر از دید باس انتهایی	Z_{0R}
امپدانس تونن توالی منفی از دید باس انتهایی	Z_{2R}
امپدانس فاز a	Z_a
امپدانس فاز b	Z_b
امپدانس فاز c	Z_c
مکان واقعی محل خطا	A_{FL}
مکان تخمینی محل خطا	E_{FL}

مراجع

[1] T.P. Bains, T.S. Sidhu, Z. Xu, I. Voloh, and M.R. Zadeh, "Impedance-based fault location algorithm for ground faults in series-capacitor-compensated transmission lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 33, No. 1, pp. 189-199, Jun. 2017.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2711358>

[2] J. Sadeh, N. Hadjsaid, A.M. Ranjbar, and R. Feuillet, "Accurate fault location algorithm for series compensated transmission lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, pp. 1027-1033, Jul. 2000.
<https://doi.org/10.1109/61.871370>

[3] F. Poudineh-Ebrahimi, and M. Ghazizadeh-Ahsae, "Accurate and comprehensive fault location algorithm for two-terminal transmission lines", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 12, No. 9, pp. 4334-4340, Oct. 2018.
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6084>

[4] D. Wang., M. Hou, and Y. Guo, "Travelling wave fault location of HVAC transmission line based on frequency-dependent characteristic", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 36, No. 6, pp. 3496-3505, 2020.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3044010>

[5] D. Wang, J. Liu., and M. Hou, "Novel travelling wave fault location approach for overhead transmission lines", International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Vol. 1 pp.155:109617, Jan. 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109617>

[6] H. Panahi, R. Zamani, M. Sanaye-Pasand, and H. Mehrjerdi, "Advances in transmission network fault location in modern power systems: Review,

- Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 789-797, Jul. 1999.
<https://doi.org/10.1109/61.772316>
- [27] M. Djuric, Z. Radojevic, V. Terzija, "Distance protection and fault location utilizing only phase current phasors", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, pp. 1020-1026, Oct. 1998.
<https://doi.org/10.1109/61.714437>
- [28] M. Sant, and Y. Paithankar, "Online digital fault locator for overhead transmission line", in Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. IET. Nov. 1979.
<https://doi.org/10.1049/ptee.1979.0201>
- [29] D.L. Goldsworthy, "A linearized model for MOV-protected series capacitors", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 2, No. 4, pp. 953-957, Nov. 1987.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.1987.4335284>
- [30] Y. Liao, and M. Kezunovic, "Online optimal transmission line parameter estimation for relaying applications", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 1, pp. 96-102, Dec. 2008.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.2002875>
- [31] C.S. Chen, C.W. Liu, and J.A. Jiang, "A new adaptive PMU based protection scheme for transposed/untransposed parallel transmission lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, pp. 395-404, Apr. 2002.
<https://doi.org/10.1109/61.997906>
- [32] C.A. Apostolopoulos, and G.N. Korres, "A novel fault-location algorithm for double-circuit transmission lines without utilizing line parameters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 3, pp. 1467-1478, Feb. 2011.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2102777>
- [33] C.A. Apostolopoulos, and G.N. Korres, "A novel algorithm for locating faults on transposed/untransposed transmission lines without utilizing line parameters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, pp. 2328-2338, Aug. 2010.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2053223>
- [34] K. Kalita, S. Anand, and S.K. Parida, "A closed form solution for line parameter-less fault location with unsynchronized measurements", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 37, No. 3, pp. 1997-2006, 2021. Aug.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3102181>
- [35] P. Hansen, N. Mladenović, R. Todosijević, and S. Hanafi, "Variable neighborhood search: basics and variants", EURO Journal on Computational Optimization, Vol. 5, No. 3, pp. 423-454, Sep. 2017.
<https://doi.org/10.1007/s13675-016-0075-x>
- [36] T. Athay, R. Podmore, and S. Virmani, "A practical method for the direct analysis of transient stability", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 1, No. 2, pp:573-584, Mar. 1979.
<https://doi.org/10.1109/TPAS.1979.319407>
- lines based on optimisation", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 9, No. 11, pp. 1061-1068, Aug. 2015.
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0425>
- [17] K. Gorgani Firouzjeh, "Fault location for transmission lines compensated with MOV-protected SCs using voltage phasors", IET Science, Measurement & Technology, Vol. 13, No. 3, pp. 392-402, May. 2019.
<https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5458>
- [18] M. Abasi, M. Joorabian, A. Saffarian, and S.G. Seifossadat, "A comprehensive review of various fault location methods for transmission lines compensated by FACTS devices and series capacitors", Journal of Operation and Automation in Power Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 213-225, Dec. 2021.
<http://dx.doi.org/10.22098/joape.2021.7774.1551>
- [19] Z. Bukvisova, J. Orsagova, D. Topolanek, and P. Toman, "Two-terminal algorithm analysis for unsymmetrical fault location on 110 kv lines", Energies, Vol. 12, No. 7, pp. 1193, Mar. 2019.
<https://doi.org/10.3390/en12071193>
- [20] M. Kezunović, J. Mrkić, and B. Peruničić, "An accurate fault location algorithm using synchronized sampling", Electric Power Systems Research, Vol. 29, No. 3, pp. 161-169, May. 1994.
[https://doi.org/10.1016/0378-7796\(94\)90011-6](https://doi.org/10.1016/0378-7796(94)90011-6)
- [21] J. Izykowski, E. Rsolowski, P. Balcerak, and M. Fulczyk, M.M. Saha, "Fault location on double-circuit series-compensated lines using two-end unsynchronized measurements", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 4, pp. 2072-2080, Jul. 2011.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2158670>
- [22] D. Cai, and J. Zhang, "New fault-location algorithm for series-compensated double-circuit transmission line", IEEE Access, Vol. 24, No. 8, pp. 210685-210694, Nov. 2020.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039877>
- [23] J. Izykowski, R. Molag, E. Rsolowski, and M.M. Saha, "Accurate location of faults on power transmission lines with use of two-end unsynchronized measurements", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 2, pp. 627-633, Mar. 2006.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.858778>
- [24] V.K. Gaur, and B.R. Bhalja, and A. Saber "New ground fault location method for three-terminal transmission line using unsynchronized current measurements". International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022 Feb 1;135:107513.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107513>
- [25] M. Das, S. Santoso, A. Gaikwad, and M. Patel, "Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application", IEEE Access, pp. 537-557, May. 2014.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2014.2323353>
- [26] M.M. Saha, J. Izykowski, E. Rsolowski, and B. Kasztenny, "A new accurate fault locating algorithm for series compensated lines", IEEE

