

Phasor-Based Double-Ended Method for Fault Location on N-Circuit Transmission Lines

Moossa Khodadadi Arpanahi¹, *PhD*, Majid Khoshnama¹, *M.Sc*

¹ *Pardisan Engineering Company, Isfahan, Iran.*

Abstract:

Existing double-ended fault location methods in transmission systems can be applied only to single or double-circuit transmission lines. They conventionally use different abc-domain or sequence network equivalent circuits for different fault types. Furthermore, some methods do not consider shunt capacitances of the line, inductive or capacitive coupling between different phases, and (or) the cases of untransposed lines, simultaneously. In this paper, a comprehensive and fast phasor-based double-ended fault location method is proposed which can be used for N-circuit transmission lines. For this purpose, first, a matrix-vector equivalent circuit (MVEC) is proposed that leads to a unique formulation for fault location problem regardless of fault type, number of line circuits, being transposed or untransposed while it considers inductive and capacitive coupling between the phases. Then, based on the MVEC formulation, a bi-level algorithm is suggested that quickly finds the fault location, despite its iterative nature. The proposed method does not need to know impedances of local and remote end sources. Furthermore, its accuracy is not sensitive to fault impedance. Various case studies in terms of fault types, fault impedances, and distances from the measurement side in the presence of noise reveal the accuracy and applicability of the proposed fault location method.

Keywords: Double-ended, fault location, N-circuit, phasor, Transmission.

Received: 03 March 2022

Revised: 19 May 2022

Accepted: 12 June 2022

Corresponding Author: Dr. Moossa Khodadadi Arpanahi, m.khodadadi@pardisan-co.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1958630.1009>



یک روش دو طرفه مبتنی بر فازور برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال N مداره

موسی خدادادی آرپناهی^۱، دکتری، مجید خوشنما^۱، کارشناسی ارشد

۱- شرکت مهندسی پردیسان، اصفهان، ایران

چکیده: روش‌های دو طرفه موجود برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال یا مخصوص خطوط تک‌مداره هستند و یا تنها برای خطوط دو مداره طراحی شده‌اند. همچنین، فرمول‌بندی این روش‌ها برای انواع مختلف خطا متفاوت است؛ چرا که این روش‌ها برای هر نوع خطا از یک مدار معادل خاص در حوزه abc و یا یک شبکه توالی مشخص استفاده می‌کنند. علاوه بر این، برخی از روش‌های موجود، نمی‌توانند برخی از جنبه‌های مسأله مکان‌یابی خطا مانند اثر خازن شنت خط، تزویج سلفی و خازنی بین فازها و عدم ترانسپوز خطوط را در نظر بگیرند. در این مقاله، یک روش جامع، دقیق و سریع برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال N مداره پیشنهاد می‌شود. برای این منظور، ابتدا یک مدار معادل ماتریسی- برداری (MVEC) پیشنهاد می‌شود که صرف نظر از نوع خطا، تعداد مدارهای خط، وجود و یا عدم وجود خازن شنت، تزویج سلفی و خازنی بین فازهای مختلف و عدم ترانسپوز خطوط، به یک فرمول‌بندی واحد منجر می‌شود. برای حل فرمول‌بندی ماتریسی- برداری حاصل و یافتن مکان خطا، یک الگوریتم دو مرحله‌ای پیشنهاد می‌شود که علی‌رغم تکراری بودن در تعداد تکرار بسیار پایین همگرا می‌شود. روش پیشنهادی، از اندازه‌گیرهای فازوری دو طرف خط برای محاسبه مکان خطا استفاده می‌کند، نیازی به دانستن امپدانس منابع دو سمت خط ندارد و دقت آن حساسیت بسیار کمی نسبت به مقاومت خطا دارد. شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر روی مجموعه زیادی از سناریوها بر حسب نوع خطا، مقدار مقاومت خطا، مکان‌های مختلف وقوع خطا و در نظر گرفتن نویز، دقت و کارایی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: انتقال، N مداره، دو طرفه، فازور، مکان‌یابی خطا.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۲

نویسنده مسئول: موسی خدادادی آرپناهی ، m.khodadadi@pardisan-co.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1958630.1009>





۱- مقدمه

تأمین انرژی الکتریکی به صورت امن و قابل اطمینان یکی از مهمترین اهداف سیستم قدرت است. با این حال، سیستم قدرت، می‌تواند با اختلال‌های مختلفی مواجه شود که یکی از مهمترین آنها خطای اتصال کوتاه در خطوط انتقال است. دقت و سرعت مکان‌یابی این نوع از اختلال که به طور خلاصه «مکان‌یابی خطا» نامیده می‌شود، بر روی زمان اعزام و رفع خطا توسط خدمه تعمیرات خط، طول فرآیند بازیابی و در نتیجه مقدار شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم، به شدت مؤثر است. بنابراین، توسعه روش‌های دقیق و سریع برای مکان‌یابی خطا از اهمیت زیادی برخوردار است [۱-۴].

تاکنون، محققان روش‌های مختلفی برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال پیشنهاد داده‌اند که به دو دسته کلی روش‌های مبتنی بر زمان و روش‌های مبتنی بر فازور تقسیم می‌شوند. روش‌های مبتنی بر زمان که روش‌های مبتنی بر امواج سیار نیز نامیده می‌شوند با آشکارسازی زمان رسیدن موج سیار به ترمینال‌های خط، مکان خطا را محاسبه می‌کنند. اگر چه این روش‌ها موضوع بسیاری از تحقیقات بوده و هست؛ با این حال، مکان‌یابی خطا با استفاده از این روش‌ها به دلایل مختلف، بسیار چالش بر انگیز است. از جمله اینکه، در روش‌های مبتنی بر زمان، چنانچه زاویه وقوع خطا نزدیک به صفر باشد، شدت موج سیار ایجاد شده توسط خطا چندان زیاد نیست که بتوان پیشانی‌های موج را با دقت آشکار کرد. همچنین، این روش‌ها برای مکان‌یابی خطا، نیازمند نرخ نمونه‌برداری بالا هستند و در نتیجه هزینه‌های سخت‌افزاری زیادی به سیستم تحمیل می‌کنند [۵-۷].

از طرف دیگر، روش‌های مبتنی بر فازور که مبتنی بر امیدانس نیز نامیده می‌شوند، فاروهای دینامیکی متناظر با شکل موج‌های ولتاژ و جریان خط را محاسبه می‌کنند و با استفاده از آنها مکان خطا (در برخی از موارد همراه با مقدار امیدانس خطا) را محاسبه می‌کنند. این روش‌ها بسته به اینکه از اندازه‌گیرهای یک یا دو طرف خط استفاده کنند، به روش‌های یک طرفه و دو طرفه تقسیم می‌شوند. روش‌های یک طرفه تنها فرض می‌کنند که مقادیر ولتاژ و جریان یک طرف خط موجود است و بر اساس آنها فازور ولتاژ و جریان آن سمت از خط را در طی خطا محاسبه می‌کنند و با استفاده از مجموعه‌ای از محاسبات حوزه فازور، مکان خطا را محاسبه می‌کنند. اگر چه این روش‌ها از تعداد کمتری اندازه‌گیر استفاده می‌کنند و نیاز به بستر مخابراتی برای جمع‌آوری داده‌های دو سمت خط در یک سمت و یا یک مرکز کنترل ندارند؛ با این حال، با مرور مراجع می‌توان دریافت که این نوع از روش‌ها از دقت مطلوبی برای تخمین مکان خطا برخوردار نیستند. این موضوع، به‌ویژه هنگامی که مقدار مقاومت خطا که نامعلوم است، زیاد باشد، تشدید می‌شود. در برخی از مراجع، با بکارگیری پیش فرض‌های ساده‌کننده‌ای همچون معلوم‌بودن امیدانس تونن دیده‌شده از منبع دور دست و هم‌فاز بودن جریان سمت اندازه‌گیر و جریان عبوری از نقطه خطا، سعی شده که دقت این روش‌ها بهبود یابد. با این حال، این فرض‌ها در عمل، در بسیاری از مواقع اتفاق نمی‌افتند که غیرعملی بودن این روش‌ها را نشان می‌دهد. در مجموع، به‌سختی می‌توان با تنها یک اندازه‌گیر و بدون بکارگیری یک فرض ساده‌کننده به دقت خوبی برای مکان‌یابی خطا دست یافت. شاید یکی از مهمترین دلایلی که محققان حوزه مکان‌یابی خطا به روش‌های یک طرفه اقبال کمی نشان داده‌اند نیز همین موضوع باشد [۸،۹].

از سوی دیگر، روش‌های دوطرفه مکان‌یابی خطا فرض می‌کنند که ولتاژ و جریان دو سمت خط در یک مکان مشخص، مثلاً در یکی از پست‌های طرفین خط و یا یک مرکز کنترل جمع‌آوری می‌شوند و الگوریتم مکان‌یابی خطا محاسباتی را بر روی مجموعه مقادیر دو سمت خط اجرا می‌کند و مکان خطا را بدست می‌آورد. طبیعتاً، دقت این نوع از روش‌ها با توجه به این که تعداد مجهولات به شدت کم است، بسیار بیشتر از روش‌های یک طرفه است. همچنین، با توجه به اینکه داشتن مقادیر ولتاژ و جریان دو سمت خط، در بسیاری از مواقع باعث شده که تعداد مجهولات و معادلات مسأله برابر شود، مقاومت خطا از محاسبات حذف شده و اثر آن ناچیز شود. در سال‌های اخیر، روش‌های مکان‌یابی دو طرفه مختلفی ارائه شده است [۱۰-۱۸]. از میان این مراجع، [۱۰-۱۲]، [۱۵] و [۱۷،۱۸] تنها برای خطوط تک‌مداره مناسب هستند و روش‌های مکان‌یابی خطا پیشنهاد شده در [۱۳،۱۴] و [۱۶] تنها برای خطوط انتقال دو مداره کارایی دارند. در مرجع [۱۰] با استفاده از مدارهای توالی مثبت، منفی و صفر مربوط به انواع خطا و با فرض در اختیار داشتن اندازه‌گیرهای ولتاژ و جریان فازهای مختلف دو سمت خط، مکان خطا محاسبه شده است. اگر چه روش پیشنهادی یک روش دو طرفه است؛ با این حال، خطای روش در برخی از موارد به شش درصد هم می‌رسد. تمرکز مرجع [۱۱] بر تعیین مکان خطا در خطوط انتقال دارای جبران‌سازی سری است. مرجع [۱۲] بر اساس مقادیر فازور ولتاژ مدار توالی منفی، روشی برای تخمین مکان خطا در خطوط انتقال ارائه کرده است. با توجه به نیاز به مدار توالی منفی، این روش برای خطاهای متقارن (سه‌فاز و سه‌فاز به زمین) مناسب نیست. همچنین، این روش نیاز به



تخمین امیدانس‌های تونن دیده‌شده از دو سمت خط دارد که یافتن این امیدانس‌ها خود یک چالش است. در مراجع [۱۱]، [۱۵]، [۱۷، ۱۸] مکان‌یابی خطا بر اساس اندازه‌گیری‌های فراهم‌شده توسط دو PMU^۱ نصب‌شده در دو سمت خط انجام شده است. مرجع [۱۳] با استفاده از اندازه‌گیری‌های فراهم‌شده توسط ثبات‌های خطای موجود در دو طرف خط و بر اساس مدل توزیع‌شده خط، کمیت‌هایی به نام فازورهای ولتاژ توالی مثبت چرخشی را در طول خط محاسبه می‌کند و با استفاده از مدار توالی مثبت معکوس خط، تابعی موسوم به اختلاف اندازه ولتاژها را محاسبه کرده و با یافتن مقدار کمینه این تابع، مکان خطا را محاسبه می‌کند. مرجع [۱۹] برای افزایش دقت روش‌های دو طرفه مکان‌یابی خطا، از یک مدل چندبخشی برای خط انتقال استفاده کرده است. به عبارت دیگر، هر خط انتقال با استفاده از چند مدار معادل π ، مدل شده است که در این مرجع، روشی برای تعیین تعداد بخش‌های π مورد نیاز پیشنهاد شده است. پس از تعداد بخش‌های π ، مکان خطا با حل یک معادله چندجمله‌ای به فرم بسته، تعیین شده است. فرم بسته معادلات پیشنهادی در این مرجع، بر حسب اندازه‌گیری‌های حین و قبل از خطا است. اندازه‌گیری‌های قبل از وقوع خطا، در واقع، منعکس‌کننده پارامترهای خط هستند. اگر چه مدل پیشنهادی این مرجع برای خطوط غیرترانسپوز شده پیشنهاد شده است، با این حال، برای آنکه فرم بسته معادلات حفظ شود و روش پیشنهادی نیازمند حل تکراری معادلات نباشد، نویسندگان ناگزیر از فرض‌های ساده‌کننده استفاده کرده‌اند که برای همه خطوط غیرترانسپوز شده برقرار نیست.

بررسی و تأمل در پژوهش‌های موجود در زمینه مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال با استفاده از اندازه‌گیری‌های دو طرفه خط، ضرورت افزایش دقت و کارایی این روش‌ها را نشان می‌دهد. همچنین، خلأ وجود روشی که بتواند ضمن برخورداری از سرعت و دقت مناسب، برای طیف وسیعی از مسائل مکان‌یابی خطا یعنی انواع خطا در خطوط تک و چندمداره، مناسب باشد، احساس می‌شود. به طور مرسوم، روش‌های موجود یا مناسب خطوط تک‌مداره هستند و یا چندمداره (غالباً دو مداره).

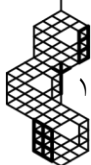
این مقاله، یک روش دو طرفه جدید برای مکان‌یابی خطاهای رخ داده بر روی خطوط انتقال پیشنهاد می‌کند و شامل دو نوآوری عمده است. اولین نوآوری مقاله عبارت است از ارائه یک مدار معادل ماتریسی- برداری (MVEC)^۲ برای مکان‌یابی انواع خطا با استفاده از اندازه‌گیری‌های دو طرفه خط که یک مفهوم جدید است. برخلاف مدارهای فازوری رایج که ولتاژ هر باس و جریان هر خط یک فازور و امیدانس هر عنصر یک عدد مختلط است، در MVEC ولتاژ و جریان‌های مدار، برداری و امیدانس‌ها و ادیتمانس‌های مدار، ماتریسی هستند. درایه‌های هر بردار یا ماتریس به گونه‌ای مناسب تعریف می‌شوند که روابط KVL و KCL شبکه، همچنان برقرار باشند. همان‌گونه که در بخش (۲) توضیح داده خواهد شد، اینگونه مدار معادل، مسأله مکان‌یابی خطا را به مراتب ساده‌تر خواهد کرد، ضمن اینکه طیف وسیعی از مسائل مکان‌یابی خطا اعم از خطوط تک‌مداره و در حالت کلی N مداره، خطوط ترانسپوز شده و غیرترانسپوز شده و انواع خطاهای متقارن و غیرمتقارن را می‌توان تنها با همین یک مدار و بدون نیاز به حل مسائل متنوع و متعدد که به صورت مرسوم انجام می‌شود، حل کرد. نوآوری دوم مقاله، ارائه یک الگوریتم دو مرحله‌ای تکراری برای حل مسأله مکان‌یابی خطا بر اساس مدار معادل MVEC است. این الگوریتم، ضمن سادگی، دقت، پوشش انواع مسائل مکان‌یابی خطا که در بالا اشاره شد، در تعداد تکرار پایین همگرا می‌شود.

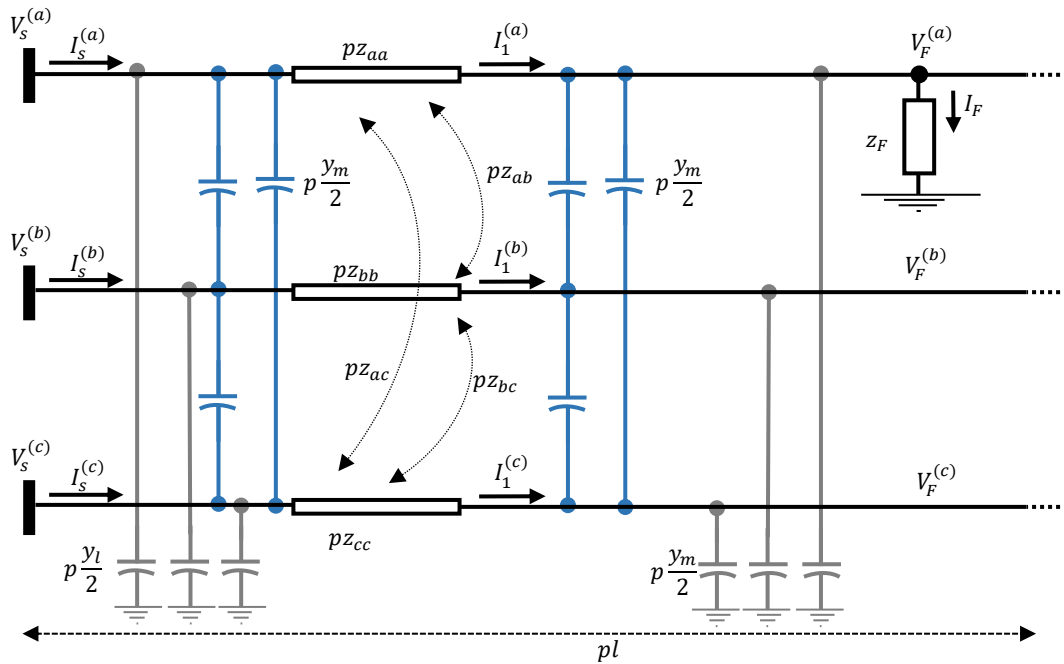
ادامه این مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است. در بخش (۲)، روش مکان‌یابی خطا دو طرفه شامل مفهوم MVEC، همراه با الگوریتم دو طرفه پیشنهادی برای یافتن مکان خطا، توضیح داده می‌شود. بخش (۳)، به نتایج مجموعه زیادی از شبیه‌سازی‌های که برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی انجام شده، می‌پردازد و در نهایت در بخش (۴)، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری مقاله ارائه می‌شود.

۲- الگوریتم پیشنهادی برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال

۲-۱- بیان مسأله و مدار معادل پیشنهادی برای مکان‌یابی خطا

این مقاله، با یک خط انتقال مجهز به اندازه‌گیر در دو سمت آن، مواجه است که یک خطای اتصال کوتاه در نقطه دلخواهی از آن رخ داده و هدف یافتن محل این خطا بر اساس اندازه‌گیری‌های ولتاژ و جریان فراهم‌شده از دو سمت خط است. تجهیزات اندازه‌گیری می‌توانند رله یا ثبات دیجیتال خطا (DFR)^۲ باشند که مقادیر زمانی ولتاژ و جریان سه‌فاز طرفین خط را در اختیار قرار می‌دهند. در این صورت، برای کاربرد مکان‌یابی خطا با استفاده از الگوریتم پیشنهادی باید مقادیر فازوری متناظر با مقادیر زمانی با استفاده از





شکل (۱): مدار معادل سمت فرستنده یک خط سه‌فاز ترانسپوز شده با در نظر گرفتن تزویج سلفی و خازنی بین فازها، در حالت وقوع خطای تک‌فاز (برای سایر انواع خطوط، خطاها مدار معادل متفاوت است).

روش‌هایی مانند DFT^۱ محاسبه شوند. همچنین، این اندازه‌گیرها می‌توانند PMU باشند که مستقیماً مقادیر فازوری را فراهم می‌کنند. لازم به ذکر است که سنکرون‌سازی برای کاربرد مکان‌یابی خطا با الگوریتم دو طرفه، ضروری است که البته راه‌حل‌های زیادی در مراجع مختلف برای آن پیشنهاد شده است که موضوع بحث ما نیست. در اینجا فرض می‌شود که اندازه‌گیرهای دو سمت خط، سنکرون هستند؛ چه از ابتدا با دقت خوبی سنکرون باشند؛ مثل حالت بکارگیری PMUها و چه اینکه با استفاده از یکی از روش‌های مرسوم سنکرون شده‌اند. در هر صورت با داشتن مقادیر فازوری ولتاژ و جریان سنکرون‌شده طرفین خط، محاسبه مکان خطا بر اساس روش پیشنهادی به‌صورتی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، انجام خواهد شد.

برای روشن شدن روش پیشنهادی، از یک مثال استفاده می‌کنیم. مدار معادل یک خط انتقال در حوزه abc برای خطای تک‌فاز به فاصله p از ابتدای خط (سمت چپ یا سمت فرستنده) که در آن تنها فاز a درگیر شده باشد، مطابق شکل (۱) خواهد بود. برای سادگی، در این شکل تنها سمت فرستنده خط تا نقطه خطا نشان داده شده است برای بدست آوردن مکان خطا باید معادلات توصیف‌کننده این مدار را نوشت و سپس حل کرد تا پارامتر p بدست آید. برای مثال، رابطه KVL از سمت فرستنده تا نقطه خطا برای فازهای مختلف، به‌صورت روابط (۱) تا (۳) است.

$$V_s^{(a)} = V_F^{(a)} + pZ_{aa}I_1^{(a)} + pZ_{ab}I_1^{(b)} + pZ_{ac}I_1^{(c)} \quad (۱)$$

$$V_s^{(b)} = V_F^{(b)} + pZ_{ab}I_1^{(b)} + pZ_{bb}I_1^{(b)} + pZ_{bc}I_1^{(c)} \quad (۲)$$

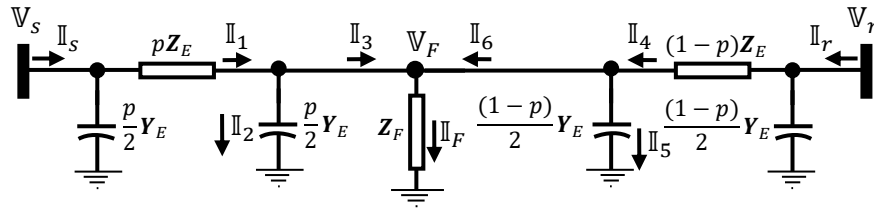
$$V_s^{(c)} = V_F^{(c)} + pZ_{ac}I_1^{(c)} + pZ_{bc}I_1^{(b)} + pZ_{cc}I_1^{(c)} \quad (۳)$$

این رویکرد حل که رویکرد مرسوم است چند چالش دارد:

۱- برای مسائل مختلف وقوع خطا باید از یک مدار مخصوص به خود استفاده کرد. مثلاً مدار معادل خطاهای تک‌فاز به زمین، سه‌فاز، دو فاز به یکدیگر کاملاً با یکدیگر متفاوت است.

۲- برای هر مسئله با مجموعه زیادی از معادلات روبرو هستیم که باید حل شوند تا مقدار دقیق پارامتر p را محاسبه کرد. توجه شود که در شکل (۱) بخشی از مدار رسم نشده است. علاوه بر این، این مدار برای یک خط انتقال ترانسپوز شده است. همچنین، فرض شده که خط تک‌مداره است. برای هر کدام از خطوط ترانسپوز شده، دومداره (یا در حالت کلی چندمداره) با مسائل متفاوت و پیچیده‌تری روبرو هستیم که یافتن مکان خطا در آنها دشوارتر است.





شکل (۲): مدار معادل فازوری ماتریسی - برداری، مناسب برای انواع خطوط و خطاها (توجه: در این مدل، نیازی به نمایش تزویج سلفی و خازنی نیست. این موارد در ماتریس‌های Z_E و Z_E لحاظ می‌شوند).

۳- هر چقدر پیچیدگی مسأله بیشتر شود، با تعداد زیادتری معادله روبرو خواهیم بود. با این حال همواره تنها پارامتر مجهول، p است. بنابراین، با افزایش تعداد معادلات تعداد جواب‌های خارجی یا جواب‌های غیرقابل قبول افزایش یافته و عملاً تعیین مقدار واقعی مکان خطا از بین تعداد زیادی مقدار که برای پارامتر p بدست آمده است خود یک چالش است.

توجه داریم که چالش‌های نامبرده حتی در صورت استفاده از مدارهای توالی مثبت، منفی و صفر به جای مدارهای حوزه abc همچنان وجود دارند. به‌عنوان مثال، مدار توالی مثبت یک خط تک‌مداره با یک خط چند مداره متفاوت است، همچنین، در حالتی که خط ترانسپوز نشده باشد، مدارهای توالی، مثبت، منفی و صفر با یکدیگر تزویج دارند که به نوبه خود به پیچیدگی مسأله می‌افزاید.

برای حل مشکلات یادشده، در این مقاله یک مدار معادل فازوری ماتریسی - برداری (MVEC) مطابق شکل (۲) پیشنهاد می‌شود. یک تفاوت اساسی بین این مدار و مدارهای رایج این است که در اینجا مقادیر ولتاژ و جریان سمت فرستنده و گیرنده که با V_s , I_s , V_r و I_r نشان داده شده‌اند، تنها یک فازور نیستند؛ بلکه برداری از فازورهای سه‌فاز هستند. همچنین، ماتریس‌های امپدانس و ادمیتانس نشان داده شده در این مدار معادل، تنها یک عدد مختلط نیستند، بلکه ماتریسی از اعداد مختلط هستند که شامل امپدانس یا ادمیتانس‌های خودی هر فاز و متقابل بین فازهای مختلف هستند. همچنین، یکی دیگر از نوآوری‌های این مدار معادل این است که برای همه فازها -چه در گیر خطا باشند و چه نباشند- یک امپدانس خطا در نظر گرفته می‌شود. این کار چند مزیت دارد. اول اینکه نوشتن معادلات سیستم دیگر متأثر از نوع خطا نیست و همواره می‌توان مجموعه یکتایی از معادلات را نوشت و حل کرد و دیگر با مسائل مکان‌یابی خطای متعدد و متنوع سر و کار نداریم. در واقع، مدار معادل پیشنهادی می‌تواند برای حل مسأله مکان‌یابی خطا در خطوط تک‌مداره و چند مداره، ترانسپوز شده و ترانسپوز نشده و برای هر نوعی از خطا کاربرد داشته باشد. مزیت دیگر این است که در الگوریتم پیشنهادی نیازی به دانستن نوع خطا نیست. این در حالی است که در سایر الگوریتم‌ها باید نوع خطا را دانست و متناسب با آن، مدار معادلی را در نظر گرفت، معادلات مربوط به آن را حل کرد و مکان خطا را یافت. در عوض، برای الگوریتم پیشنهادی نه تنها نوع خطا مهم نیست بلکه خود نوع خطا را تعیین می‌کند. این مزیت از این حقیقت ناشی می‌شود که الگوریتم پیشنهادی برای همه فازها اعم از فازهای درگیر خطا و فازهای سالم، یک مقاومت خطا در نظر می‌گیرد و سپس مقاومت خطا همه فازها را همراه با مکان خطا محاسبه می‌کند. فازهایی که مقاومت خطا آنها مقدار خیلی زیادی (از نظر تئوری بی‌نهایت) و مقدار جریان خطا آنها نزدیک به صفر باشد، در واقع فازهای سالم هستند و بنابراین می‌توان نوع خطا را با دقت تشخیص داد. لازم به ذکر است که اگر چه به‌طور مرسوم، در بسیاری از موارد، با توجه به شکل موج جریان‌ها و ولتاژها اندازه‌گیری شده، می‌توان نوع خطا را پیش از اجرای الگوریتم مکان‌یابی خطا تشخیص داد؛ با این حال در برخی از موارد، ممکن است شناسایی نوع خطا با نگاه به مقادیر ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در سمت فرستنده یا گیرنده به آسانی قابل تشخیص نباشد. در مجموع می‌توان گفت که مدار پیشنهادی شکل (۲) برای انواع خطوط تک و چندمداره، انواع خطاهای متقارن و غیرمتقارن، خطوط ترانسپوز شده و غیرترانسپوز شده بکار می‌رود و نیز در بردارنده تزویج سلفی و خازنی بین فازهای مختلف یک مدار و هر فاز از یک مدار با فاز دیگر از سایر مدارها است. این در حالی است که نمایش مدار معادل پیشنهادی به مراتب ساده‌تر و نوشتن و صد البته حل معادلات آن بسیار آسان‌تر از مدارهای مرسوم برای مکان‌یابی خطا است. در واقع این مدار تنها یک مدار با قابلیت پوشش چندین حالت است.



۲-۲- فرمول‌بندی مدار معادل پیشنهادی

در این بخش، فرمول‌بندی پیشنهادی برای مکان‌یابی خطا بر اساس مدار معادل پیشنهادی شکل (۲) ارائه می‌شود. با توجه به این شکل، به سادگی می‌توان یافت که این فرمول‌بندی مطابق روابط (۴) تا (۱۰) خواهد بود. روابط (۴) تا (۶)، توصیف‌کننده بخش سمت چپ شکل (۲) هستند که بر حسب بردارهای ولتاژ و جریان سمت فرستنده و ماتریس‌های امپدانس و ادمیتانس خط نوشته شده‌اند. به‌طریق مشابه، روابط (۷) و (۸) نیز بخش سمت راست خط را توصیف می‌کنند. رابطه (۹) جریان ورودی به نقطه خطا را بر حسب جریان‌های \mathbb{I}_3 و \mathbb{I}_6 بیان می‌کند که به ترتیب، نماینده سمت چپ و راست مدار یعنی سمت فرستنده و گیرنده هستند. رابطه (۱۰) برای محاسبه مکان خطا یعنی پارامتر p پیشنهاد شده است که در آن G_1 تا G_4 به ترتیب مطابق با روابط (۱۰-ب) تا (۱۰-ه) بدست می‌آیند. بردار ولتاژ \mathbb{V}_L در رابطه (۱۰)، مطابق رابطه (۱۰-و) بدست می‌آید.

$$\begin{cases} \mathbb{I}_1 = \mathbb{I}_s - \frac{p}{2} \mathbf{Y}_E \mathbb{V}_s & (۴) \\ \mathbb{V}_F = \mathbb{V}_s - p \mathbf{Z}_E \mathbb{I}_1 & (۵) \\ \mathbb{I}_3 = \mathbb{I}_1 - \frac{p}{2} \mathbf{Y}_E \mathbb{V}_F & (۶) \end{cases}$$

$$\mathbb{I}_4 = \mathbb{I}_r - \frac{(1-p)}{2} \mathbf{Y}_E \mathbb{V}_r \quad (۷)$$

$$\mathbb{I}_6 = \mathbb{I}_4 - \frac{(1-p)}{2} \mathbf{Y}_E \mathbb{V}_F \quad (۸)$$

$$\mathbb{I}_F = \mathbb{I}_3 + \mathbb{I}_6 \quad (۹)$$

$$p = \frac{G_1 - G_2}{G_3 - G_4} \quad (۱۰-الف)$$

$$G_1 = \text{Re}\{\mathbb{V}_s(i) - d\mathbb{V}_s(j)\} \text{Im}\{\mathbb{I}_F(i)\} \quad (۱۰-ب)$$

$$G_2 = \text{Im}\{\mathbb{V}_s(i) - d\mathbb{V}_s(j)\} \text{Re}\{\mathbb{I}_F(i)\} \quad (۱۰-ج)$$

$$G_3 = \text{Re}\{\mathbb{V}_L(i) - d\mathbb{V}_L(j)\} \text{Im}\{\mathbb{I}_F(i)\} \quad (۱۰-د)$$

$$G_4 = \text{Im}\{\mathbb{V}_L(i) - d\mathbb{V}_L(j)\} \text{Re}\{\mathbb{I}_F(i)\} \quad (۱۰-ه)$$

$$\mathbb{V}_L = \mathbf{Z}_E \mathbb{I}_1 \quad (۱۰-و)$$

با توجه به روابط (۴) تا (۱۰)، ذکر نکات زیر ضروری است:

(۱) همان‌گونه که گفته شد، ولتاژهای موجود در روابط (۴) تا (۱۰) بردارهایی مختلط شامل فازور سه فاز برای خط تک مداره و $3N$ فاز برای خط N مداره هستند. به‌عنوان مثال، برای خط N مداره، \mathbb{V}_s به‌صورت رابطه (۱۱) قابل بیان است که در آن برای مثال، $[V_s^{(a)}]^k$ و $[V_s^{(a)}]^k$ به ترتیب فازور ولتاژ فازهای a ، b و c مدار k هستند که در آن $k = 1, 2, \dots, N$ است.

$$\mathbb{V}_s = \left[[V_s^{(a)}]^1 [V_s^{(b)}]^1 [V_s^{(c)}]^1 [V_s^{(a)}]^2 [V_s^{(b)}]^2 [V_s^{(c)}]^2 \dots [V_s^{(a)}]^N [V_s^{(b)}]^N [V_s^{(c)}]^N \right]^T \quad (۱۱)$$

(۲) ماتریس‌های امپدانس \mathbf{Z}_E و ادمیتانس \mathbf{Y}_E شامل امپدانس‌های خودی فازهای مختلف و متقابل بین هر دو فاز هستند. برای مثال، این ماتریس‌ها برای خط تک‌مداره به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\mathbf{Z}_E = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix}, \mathbf{Y}_E = \begin{bmatrix} y_{aa} + y_{ab} + y_{ac} & -y_{ab} & -y_{ac} \\ -y_{ab} & y_{aa} + y_{ab} + y_{ac} & -y_{bc} \\ -y_{ac} & -y_{bc} & y_{aa} + y_{ab} + y_{ac} \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

(۳) اندیس‌های i و j در رابطه (۱۰) در واقع دو فاز درگیر خطا را نشان می‌دهند. در واقع، رابطه (۱۰) با استفاده از حداکثر دو فاز درگیر خطا، مکان خطا را برای انواع خطا بدست می‌آورد. برای خطاهای تک فاز به زمین، دو فاز به زمین، سه فاز و سه فاز به زمین، i یکی از فازهایی است که به زمین وصل شده است (تفاوتی ندارد کدام فاز درگیر خطا). در خطای فاز به فاز، i و j در واقع همان فازهایی هستند



که به یکدیگر متصل می‌شوند. با توجه به این توضیحات، d یک متغیر باینری است که برای خطای فاز به فاز مقدار آن «یک» و برای سایر خطاها «صفر» است.

(۳) همان گونه که از رابطه (۱۰) بر می‌آید، متغیرهای G_1 تا G_4 که با استفاده از آنها شاخص مکان خطا یعنی p محاسبه می‌شود، خود به متغیرهایی مثل \mathbb{I}_F و \mathbb{V}_L وابسته هستند که آنها نیز خود به مقدار p وابسته هستند. بنابراین، عملاً با مجموعه‌ای از معادلات مواجه هستیم که در همه آنها p مجهول است. برای بدست آوردن p ، یک الگوریتم تکراری پیشنهاد می‌شود که در بخش بعد توضیح داده می‌شود.

(۴) روابط (۴) تا (۹) در واقع روابط KVL و KCL بخش‌های سمت چپ و راست خطا هستند. رابطه (۱۰) که پارامتر p را بیان می‌کند به صورتی که در ادامه توضیح داده می‌شود، بدست می‌آید. ابتدا فرض می‌شود که خطا از نوع اتصال به زمین است و رابطه KVL از نقطه زمین تا سمت فرستنده، مطابق زیر بکار می‌رود که در آن $p\mathbb{V}_L$ مطابق رابطه (۱۰-و) تعریف شد.

$$\mathbb{V}_s = \mathbf{Z}_F \mathbb{I}_F + p \mathbb{V}_L \quad (۱۳)$$

با مساوی قرار دادن بخش‌های حقیقی و موهومی سمت راست و چپ این معادله داریم:

$$\text{Re}\{\mathbb{V}_s\} = \text{Re}\{\mathbf{Z}_F \mathbb{I}_F\} + p \text{Re}\{\mathbb{V}_L\} \quad (۱۴-الف)$$

$$\text{Im}\{\mathbb{V}_s\} = \text{Im}\{\mathbf{Z}_F \mathbb{I}_F\} + p \text{Im}\{\mathbb{V}_L\} \quad (۱۴-ب)$$

فرض می‌شود که $\mathbf{Z}_F = \mathbf{R}_F$ یعنی مقاومتی خالص است. بنابراین، برای یک درایه از هر یک از بردارهای موجود در رابطه (۱۴) (نظیر یکی از فازهای درگیر خطا مانند فاز i که مقاومت خطای آن $R_F^{(i)}$ است) می‌توان نوشت:

$$\text{Re}\{\mathbb{V}_s(i)\} = R_F^{(i)} \text{Re}\{\mathbb{I}_F(i)\} + p \text{Re}\{\mathbb{V}_L(i)\} \quad (۱۵-الف)$$

$$\text{Im}\{\mathbb{V}_s(i)\} = R_F^{(i)} \text{Im}\{\mathbb{I}_F(i)\} + p \text{Im}\{\mathbb{V}_L(i)\} \quad (۱۵-ب)$$

که با حذف $R_F^{(i)}$ پارامتر p به صورت رابطه (۱۰) خواهد بود.

چنانچه، خطا از نوع اتصال به زمین نباشد یعنی خطای دوفاز که در آن دو فاز i و j درگیر خطا هستند، همه مراحل مشابه خطاهای اتصال به زمین است با این تفاوت که می‌توان رابطه KVL شماره (۱۳) را از فاز i منبع سمت فرستنده یعنی $\mathbb{V}_s(i)$ تا فاز j این منبع نوشت و در این صورت کافی است در رابطه (۱۵) به جای $\mathbb{V}_s(i)$ و $\mathbb{V}_L(i)$ ، به ترتیب $(\mathbb{V}_s(i) - \mathbb{V}_s(j))$ و $(\mathbb{V}_L(i) - \mathbb{V}_L(j))$ قرار داد. در نتیجه، در حالت کلی با $(\mathbb{V}_s(i) - d\mathbb{V}_s(j))$ و $(\mathbb{V}_L(i) - d\mathbb{V}_L(j))$ سر و کار داریم؛ یعنی دقیقاً همان عبارتهایی که پارامترهای G_1 تا G_4 در رابطه (۱۰) بر حسب آن تعریف شده‌اند که در آن متغیر دودویی d نشان می‌دهد که خطا دوفاز به زمین ($d = 1$) است یا خیر ($d = 0$).

۳-۲- الگوریتم پیشنهادی برای مکان‌یابی خطا

الگوریتم دو طرفه پیشنهادی برای مکان‌یابی خطا در شکل (۳) نشان داده شده است. این الگوریتم بر اساس مدار معادل MVEC پیشنهاد شده است و از روابط این مدار که در بخش قبل توضیح داده شدند، استفاده می‌کند. با توجه به شکل (۳)، الگوریتم پیشنهادی یک الگوریتم دو مرحله‌ای تکراری است که از شکل موج جریان‌ها و ولتاژهای سمت فرستنده و گیرنده یعنی $\mathbb{I}_s, \mathbb{V}_s, \mathbb{I}_r, \mathbb{V}_r$ همراه با پارامترهای خط و نیز یک مقدار اولیه برای مکان خطا، به عنوان ورودی استفاده می‌کند. پیش از آنکه الگوریتم وارد حلقه تکرار شود، ابتدا با استفاده از یک روش محاسبه فازور مانند DFT، فازور ولتاژهای و جریان‌های دو سمت فرستنده و گیرنده محاسبه می‌شوند. در هر تکرار از الگوریتم، در مرحله اول، با داشتن مکان خطا، ولتاژها و جریان‌های بخش‌های مختلف مدار و به ویژه جریان ورودی به نقطه خطا یعنی \mathbb{I}_F محاسبه می‌شوند و به عنوان ورودی مرحله دوم مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مرحله دوم، با داشتن ولتاژها و جریان‌های مدار، پارامتر p با استفاده از رابطه (۱۰) به روز می‌شود. مطابق شکل (۳)، مقدار به روز شده پارامتر p مجدداً به عنوان ورودی مرحله یک مورد استفاده قرار می‌گیرد تا فازورهای ولتاژ و جریان بخش‌های مختلف مدار به روز شوند. این فرآیند تکراری آن قدر ادامه می‌یابد تا الگوریتم همگرا شود و یک مقدار نهایی برای مکان خطا بدست آید. در شبیه‌سازی‌ها نشان داده خواهد شد که اگر چه الگوریتم، معرف یک روش تکراری است اما همواره یک الگوریتم سریع است که در تعداد تکرار بسیار کم (حدود ۳ تکرار) همگرا می‌شود و با توجه به اینکه در هر تکرار تنها چند دستور ساده تخصیص وجود دارد، پیاده‌سازی آن به هر زبان برنامه‌نویسی بسیار ساده و زمان اجرای آن نیز



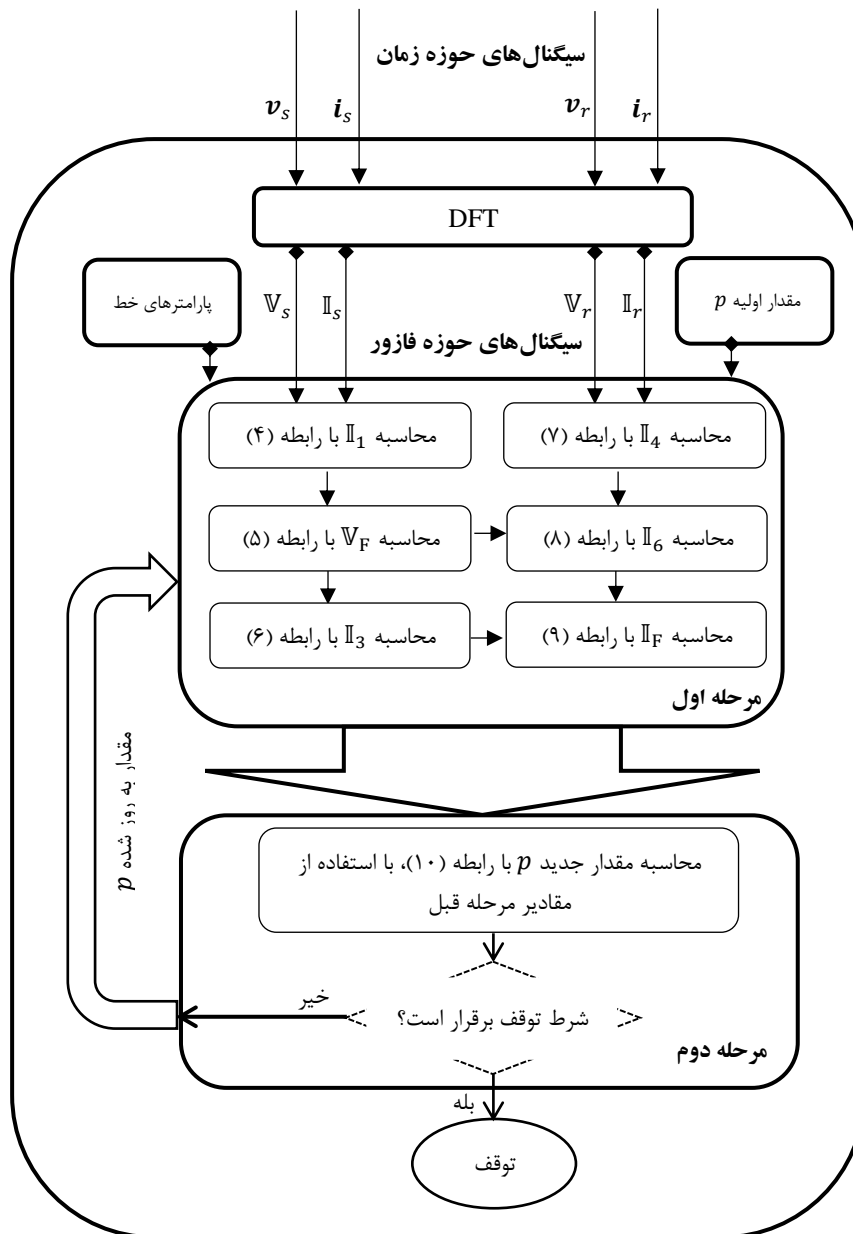


بسیار کم خواهد بود. همچنین، یک مزیت مهم دیگر این الگوریتم آن است که به ازای هر مقدار اولیه دلخواه پارامتر p که در اختیار الگوریتم قرار می‌گیرد، الگوریتم همواره به یک نقطه مشخص که همان مکان خطا است همگرا می‌شود و جواب‌های متعدد نیز وجود ندارند.

۳- شبیه‌سازی‌ها و نتایج عددی

روش مکان‌یابی خطا دو طرفه پیشنهادی بر روی تعداد و انواع مختلفی از سناریوها، شبیه‌سازی‌شده و نتایج آن در این بخش ارائه می‌شود. این سناریوها عبارتند از:

- انواع خطاهای SLG، DLG، TLG و LL^a
- به ازای مکان‌های مختلف وقوع خطا به صورت فاصله از ابتدای خط به صورت $p = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 pu$
- به ازای مقادیر مختلف مقاومت خطا
- خطوط تک‌مداره و چندمداره
- مقادیر مختلف طول خط



شکل (۳): الگوریتم مکان‌یابی خطا پیشنهادی



• با حضور نويز

ابتدا شبیه‌سازی‌های یک خط تک‌مداره ارائه می‌شود و سپس برای ارزیابی صحت عملکرد روش پیشنهادی برای خطوط چندمداره، روش پیشنهادی بر روی یک خط دو مداره نیز شبیه‌سازی شده و نتایج مورد تحلیل قرار می‌گیرد. خط تک‌مداره، یک خط ۴۰۰ kV به طول ۱۰۰ km و فرکانس ۵۰ Hz است که پارامترهای آن در مرجع [۲۰] موجود است. شبیه‌سازی‌های دینامیکی در محیط SIMULINK نرم‌افزار MATLAB با استفاده از مدل توزیع‌شده خط انجام شده است. برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی در هر سناریو از شاخص مرسوم خطای مکان‌یابی خطا (FLE) که مطابق رابطه (۱۶) تعریف می‌شود، استفاده می‌شود.

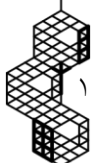
$$(16) \quad \text{طول خط} / | \text{مکان خطای محاسبه‌شده} - \text{مکان خطای واقعی} | = \text{FLE} (\%)$$

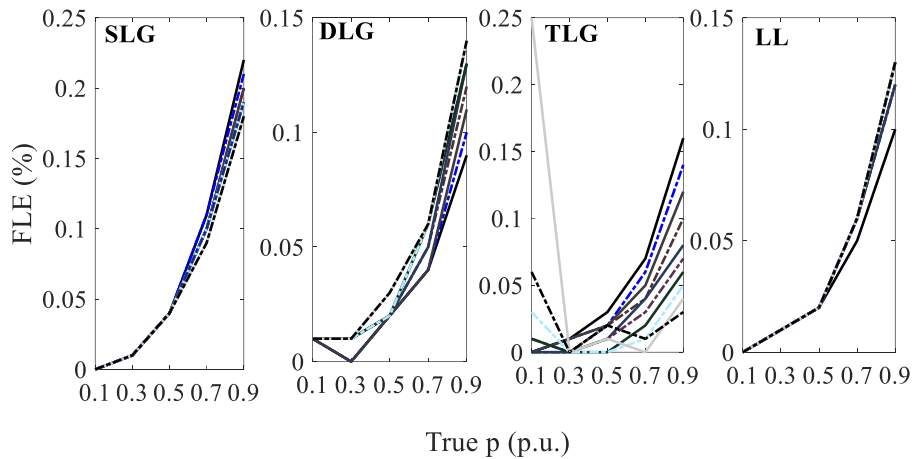
۳-۱- عملکرد روش برای انواع خطا، مکان‌های مختلف وقوع خطا و مقادیر مختلف مقاومت خطا

در جدول (۱)، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی برای خط تک‌مداره برای انواع خطا، مکان‌های مختلف وقوع خطا و همچنین مقادیر مختلف مقاومت خطا نشان داده شده است. همان‌گونه که نتایج ارائه‌شده در این جدول نشان می‌دهد، الگوریتم پیشنهادی قادر است برای انواع، مکان‌ها و مقادیر مختلف مقاومت خطا، با دقت خوبی مکان خطا را محاسبه کند. با توجه به جدول (۱)، مکان خطا محاسبه‌شده در هر یک از سناریوها، بسیار نزدیک به مقدار واقعی طول خط است. برای مثال، هنگامی که یک خطای SLG با مقاومت ۱۰۰ اهم در ۰/۹ طول خط اتفاق می‌افتد، روش پیشنهادی مکان خطا را ۰/۸۹۸۲ بدست می‌آورد که به معنای ۰/۱۸ درصد خطا در محاسبه مکان خطا است که دقت خوب الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. برای ارزیابی بهتر دقت الگوریتم پیشنهادی، در شکل (۴)، شاخص FLE برای کلیه حالت‌های جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، به خوبی می‌توان دید که حداکثر خطای روش در محاسبه مکان خطاهای SLG، DLG، TLG و LL به ترتیب کمتر از ۰/۲۵، ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۵ درصد است.

جدول (۱): مکان خطا بدست آمده توسط الگوریتم پیشنهادی، با وقوع انواع، مکان‌ها و مقادیر مختلف مقاومت خطا (خط تک‌مداره)

		خطای SLG					خطای DLG				
		مقدار واقعی p (p.u.)					مقدار واقعی p (p.u.)				
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
مقدار مقاومت خطا (اهم)	0	0.1000	0.2999	0.4996	0.6989	0.8978	0.0999	0.3000	0.4998	0.6996	0.8991
	10	0.1000	0.2999	0.4996	0.6989	0.8979	0.0999	0.3000	0.4998	0.6996	0.8990
	20	0.1000	0.2999	0.4996	0.6990	0.8980	0.0999	0.3000	0.4998	0.6996	0.8989
	30	0.1000	0.2999	0.4996	0.6990	0.8980	0.0999	0.2999	0.4998	0.6995	0.8988
	40	0.1000	0.2999	0.4996	0.6990	0.8981	0.0999	0.2999	0.4998	0.6995	0.8987
	60	0.1000	0.2999	0.4996	0.6990	0.8981	0.0999	0.2999	0.4998	0.6994	0.8987
	70	0.1000	0.2999	0.4996	0.6990	0.8981	0.0999	0.2999	0.4998	0.6994	0.8987
	80	0.1000	0.2999	0.4996	0.6990	0.8981	0.0999	0.2999	0.4998	0.6994	0.8986
	90	0.1000	0.2999	0.4996	0.6991	0.8982	0.0999	0.2999	0.4997	0.6994	0.8986
	100	0.1000	0.2999	0.4996	0.6991	0.8982	0.0999	0.2999	0.4997	0.6994	0.8986
		خطای TLG					خطای LL				
		مقدار واقعی p (p.u.)					مقدار واقعی p (p.u.)				
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
	0	0.1000	0.2999	0.4997	0.6993	0.8984	0.1000	0.2999	0.4998	0.6995	0.8990
	10	0.1000	0.2999	0.4998	0.6994	0.8986	0.1000	0.2999	0.4998	0.6994	0.8988
	20	0.1000	0.2999	0.4998	0.6995	0.8988	0.1000	0.2999	0.4998	0.6994	0.8988
	30	0.1000	0.3000	0.4998	0.6996	0.8990	0.1000	0.2999	0.4998	0.6994	0.8988
	40	0.1000	0.3000	0.4999	0.6996	0.8992	0.1000	0.2999	0.4998	0.6994	0.8987
	60	0.0999	0.3000	0.4999	0.6997	0.8993	0.1000	0.2999	0.4998	0.6994	0.8987
	70	0.0999	0.3000	0.5000	0.6998	0.8994	0.1000	0.2999	0.4998	0.6994	0.8987
	80	0.0997	0.3000	0.5000	0.6999	0.8995	0.1000	0.2999	0.4998	0.6994	0.8987
	90	0.0975	0.3000	0.5001	0.7000	0.8996	0.1000	0.2999	0.4998	0.6994	0.8987
	100	0.1006	0.3000	0.5002	0.7001	0.8997	0.1000	0.2999	0.4998	0.6994	0.8987

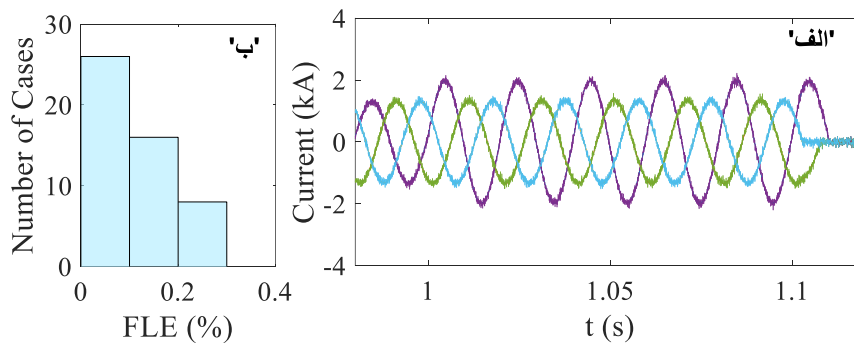




شکل (۴): شاخص FLE برای مکان‌های مختلف وقوع خطا در طول خط، مقادیر مختلف مقاومت خطا و انواع خطا

۳-۲- اثر نویز

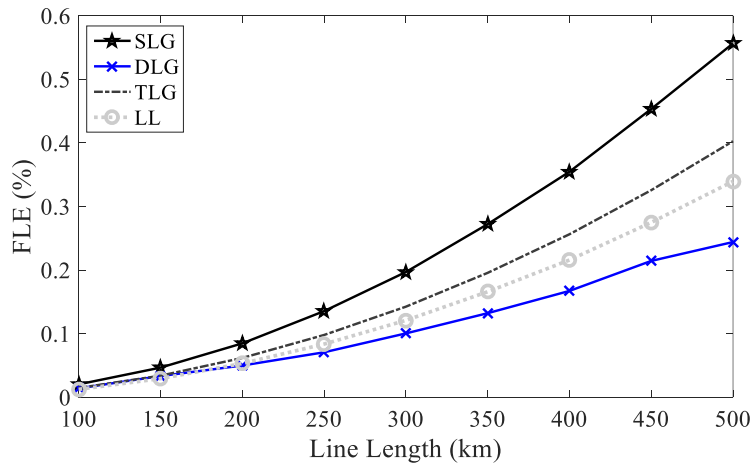
یکی از مهمترین ویژگی‌های روش پیشنهادی، عدم حساسیت آن به نویز است. برای اثبات این موضوع، عملکرد روش پیشنهادی در ۵۰ سناریو خطا مربوط به خطای SLG (مکان‌های مختلف وقوع خطا و مقادیر مختلف مقاومت خطا) که در همه آنها فرض شده که شکل موج‌های ولتاژ و جریان حاوی نویز با سطح ۲۰ dB تا ۶۰ dB هستند، مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل موج جریان مربوط به یکی از این حالت‌ها در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. شکل (۵-ب) نشان می‌دهد که حتی با وجود ۲۰ dB نویز، در هیچ حالتی خطای مکان‌یابی خطا از ۰/۳ درصد تجاوز نکرده است که عملکرد خوب روش پیشنهادی در حضور نویز را نشان می‌دهد. در واقع، این یکی از مزایای روش‌های مبتنی بر فازور، به‌ویژه روش پیشنهادی است که حساسیت کمی به نویز دارند؛ چرا که خود فرآیند تخمین فازور تا حد زیادی اثر نویز را حذف می‌کند.



شکل (۵): الف- شکل موج جریان سمت فرستنده خط در حضور نویز، شاخص FLE در ۵۰ حالت با ولتاژ و جریان نویزی

۳-۳- اثر طول خط

اثر طول خط بر دقت روش پیشنهادی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، خطای SLG با مقاومت ۱۰۰ اهم در ۴۰ درصد طول خط (فاصله از سمت فرستنده)، شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان داده شده در شکل (۶) نشان می‌دهد که اگر چه با افزایش طول خط، خطای روش پیشنهادی کمی افزایش می‌یابد؛ با این حال، شاخص FLE برای انواع مختلف طول خط از ۱۰۰ km تا ۵۰۰ همواره کمتر از ۰/۶ درصد است که نشانگر دقت روش پیشنهادی برای انواع مختلف طول خط است.



شکل (۶): اثر طول خط بر دقت روش پیشنهادی

۳-۴- کارایی محاسباتی روش پیشنهادی

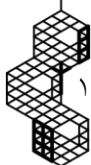
روش پیشنهادی از منظر شاخص‌های محاسباتی نیز روشی قدرتمند و کاربردی محسوب می‌شود. جدول (۲) نشان می‌دهد که روش پیشنهادی صرف نظر از مقدار اولیه در نظر گرفته شده برای مکان خطا، همواره در تعداد تکرار بسیار کم، به یک مقدار نهایی مشخص که همان مقدار دقیق مکان خطا است، همگرا می‌شود. این نتایج که مربوط به وقوع یک خطای LL با مقاومت ۵۰ اهم در فاصله $p = 0.36 pu$ یعنی ۳۶٪ از طول خط است، نشان می‌دهد که برای همه مقادیر اولیه، الگوریتم در تکرار دوم به مقدار نهایی رسیده و در تکرار سوم همگرا شده است (یعنی مقدار تکرار سوم با مقدار تکرار قبل برابر است). زمان وقوع این همگرایی یعنی زمان اجرا تا تکرار سوم، از مرتبه 10^{-2} ثانیه است که سرعت فوق‌العاده زیاد الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول (۲): مکان خطا ($p = [pu]$)، محاسبه شده در تکرارهای مختلف الگوریتم پیشنهادی به ازای مقادیر اولیه مختلف

مقدار اولیه	تکرار ۱	تکرار ۲	تکرار ۳	تکرار ۴	تکرار ۵	تکرار ۶	تکرار ۷	تکرار ۸	تکرار ۹	تکرار ۱۰
0	0.3602	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599
0.1	0.3601	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599
0.2	0.3600	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599
0.3	0.3600	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599
0.4	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599
0.5	0.3598	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599
0.6	0.3597	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599
0.7	0.3596	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599
0.8	0.3595	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599
0.9	0.3594	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599
1	0.3593	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599	0.3599

۳-۵- کاربرد روش پیشنهادی برای خطوط دو مداره و غیر ترانسپوز شده

همان‌گونه که گفته شد، روش پیشنهادی تنها روشی است که هم برای خطوط تک‌مداره بکار می‌رود و هم بدون تغییر فرمول‌بندی و مراحل الگوریتم و تنها با در اختیار داشتن داده‌های مدارهای مختلف خط، می‌تواند مکان خطا را در اینگونه خطوط نیز تعیین کند. همچنین، بیان شد که برای روش پیشنهادی تفاوتی ندارد که خط ترانسپوز شده است یا خیر. در این بخش، با شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر روی یک خط دو مداره غیر ترانسپوز شده، این دو ویژگی مهم روش پیشنهادی نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. داده‌های این خط در





جدول (۳) ارائه شده است. جدول (۴) نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر است برای انواع مختلف خطا و مقدار مقاومت خطا ۱۰۰ اهم که مقدار زیادی نیز هست، با دقت بسیار خوبی، مکان خطا در خط دو مداره مورد مطالعه را محاسبه کند. با توجه به این نتایج، برای سناریوهای شبیه‌سازی شده؛ بیشترین خطا در محاسبه مکان خطا، مربوط به حالتی است که خطا دارای بیشترین مقاومت و در فاصله ۹۰٪ از ابتدای خط است. در این حالت، شاخص p به صورت $0.8933/0.67$ بدست آمده است که معادل $FLE=0.67$ است؛ یعنی ۶۷٪ خطا در محاسبه طول خط. این نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای خطوط چند مداره و غیرترانسپوز شده نیز کاربرد دارد و دقت مطلوبی دارد. در واقع، اگر چه افزایش تعداد مدارها و عدم ترانسپوز خط می‌تواند کمی خطای روش را افزایش دهد؛ اما خطای روش همچنان قابل قبول است.

جدول (۳): داده‌های خط دو مداره غیر ترانسپوز شده مطالعه شده (توجه: $Z_E = R_E + jX_E$ ماتریس امپدانس معادل خط، Y_E ماتریس ادمینانس خط، a, b, c فازهای مدار اول خط و $\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}$ فازهای مدار دوم خط هستند).

		a	b	c	\hat{a}	\hat{b}	\hat{c}
R_E [Ω/km]	a	0.0529	0.0384	0.0366	0.0358	0.0366	0.0375
	b	0.0384	0.0469	0.0362	0.0359	0.0362	0.0366
	c	0.0366	0.0362	0.0466	0.0362	0.0359	0.0358
	\hat{a}	0.0358	0.0359	0.0362	0.0466	0.0362	0.0366
	\hat{b}	0.0366	0.0362	0.0359	0.0362	0.0469	0.0384
	\hat{c}	0.0375	0.0366	0.0358	0.0366	0.0384	0.0529
X_E [Ω/km]	a	0.3585	0.1308	0.1020	0.0883	0.0958	0.0879
	b	0.1308	0.4086	0.1635	0.1232	0.1235	0.0958
	c	0.1020	0.1635	0.4297	0.1414	0.1232	0.0883
	\hat{a}	0.0883	0.1232	0.1414	0.4297	0.1635	0.1020
	\hat{b}	0.0958	0.1235	0.1232	0.1635	0.4086	0.1308
	\hat{c}	0.0879	0.0958	0.0883	0.1020	0.1308	0.3585
Y_E [$\mu S/km$]	a	3.786	-0.745	-0.241	-0.126	-0.259	-0.409
	b	-0.745	3.691	-0.774	-0.252	-0.342	-0.259
	c	-0.241	-0.774	3.572	-0.386	-0.252	-0.126
	\hat{a}	-0.126	-0.252	-0.386	3.572	-0.774	-0.241
	\hat{b}	-0.259	-0.342	-0.252	-0.774	3.691	-0.745
	\hat{c}	-0.409	-0.259	-0.126	-0.241	-0.745	3.786

جدول (۴): نتایج مکان‌یابی خطا برای خط دومداره غیر ترانسپوز شده، در حالت‌های مختلف وقوع خطا بر حسی مکان و مقاومت خطا

مقدار مقاومت خطا (اهم)	مقدار واقعی p (p.u.)				
	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
0	0.1000	0.2999	0.4992	0.6988	0.8979
10	0.1000	0.2998	0.4990	0.6983	0.8973
20	0.1000	0.2998	0.4986	0.6977	0.8966
40	0.1000	0.2996	0.4987	0.6965	0.8954
60	0.1000	0.2995	0.4985	0.6963	0.8952
80	0.1000	0.2993	0.4980	0.6962	0.8945
100	0.1000	0.2993	0.4977	0.6961	0.8933

۳-۶- مقایسه با روش‌های موجود

در جدول (۵)، روش مکان‌یابی خطا دو طرفه پیشنهادی، در حالت وقوع یک خطای SLG بر روی یک خط تک‌مداره و به ازای برخی از مقادیر مقاومت خطا، با برخی از روش‌های موجود مقایسه شده است. با توجه به این جدول، علی‌رغم اینکه حداکثر خطا برای روش‌های ارائه شده در مراجع [۲۱]، [۲۲] و [۲۳] به ترتیب، ۱/۶۴، ۹/۸۳ و ۱/۸۵ درصد است، خطای روش پیشنهادی در حالت‌های مطالعه شده از ۰/۱۲ درصد تجاوز نمی‌کند که دقت بسیار بهتر روش پیشنهادی نسبت به این روش‌ها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که روش‌های ارائه شده در مراجع [۲۱] و [۲۲] تنها برای خطوط ترانسپوز شده کاربرد دارند و روش مرجع [۲۳] تنها مربوط به خطوط تک‌مداره است؛ در حالی که کارایی روش پیشنهادی برای خطوط چندمداره و غیرترانسپوز شده نیز نشان داده شد.



جدول (۵): مقایسه روش پیشنهادی با کارهای گذشته برای خط تک مداره و خطای SLG

مقدار مقاومت خطا (اهم)	حداکثر FLE (%)			روش پیشنهادی
	[۲۱]	[۲۲]	[۲۳]	
0	1.60	8.11	1.85	0.080
1	1.49	8.26	1.79	0.100
5	1.51	8.93	1.54	0.110
10	1.64	9.83	1.25	0.116

۴- نتیجه گیری

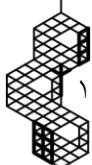
در این مقاله، یک روش جامع، دقیق و سریع برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال N مداره پیشنهاد شد. برای این منظور، ابتدا یک مدار معادل ماتریسی- برداری موسوم به MVEC پیشنهاد شد که می‌تواند برای مکان‌یابی انواع خطوط تک و چند مداره، انواع خطاهای متقارن و نامتقارن، صرف نظر از اینکه خط متقارن یا نامتقارن باشد و با در نظر گرفتن تزویج سلفی و خازنی بین فازها، بکار رود. سپس، یک الگوریتم دو مرحله‌ای برای محاسبه مکان خطا با استفاده از اندازه‌گیرهای دو سمت خط ارائه شد که از روابط مدار MVEC در مراحل اول و دوم خود استفاده می‌کند. صحت عملکرد و کارایی روش پیشنهادی، بر روی مجموعه زیادی از سناریوها مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که الگوریتم پیشنهادی برای خطوط تک و چندمداره، خطاهای LL، TLG، DLG و LL، در حالت ترانسپوز و یا عدم ترانسپوز خط، مقادیر مختلف طول خط و با حضور نویز به‌دقت خوبی دست می‌یابد که غالباً زیر ۱٪ خطا است. همچنین، این دقت خوب در تعداد تکرار کم (عمدتاً حدود ۳ تکرار) و زمان بسیار کم (کسری از ثانیه) بدست می‌آید.

سپاسگزاری

نویسنده اول این مقاله از هیأت مدیره شرکت دانش بنیان مهندسی پردیسان با بیش از ۲۵ سال سابقه در حوزه اتوماسیون صنعت برق و پیاده‌سازی زیرساخت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در جهت هوشمندسازی شبکه برق کشور، به‌ویژه جناب آقای مهندس مجید همتی ریاست محترم شرکت و جناب آقای مهندس مجید خوشنما معاونت فنی شرکت به‌خاطر همه حمایت‌های فنی و مالی در طول اجرای این پروژه تحقیقاتی، کمال تشکر و قدردانی را دارد.

مراجع

- [1] M. Kezunovic, "Smart Fault Location for Smart Grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 11-22, March 2011, doi: 10.1109/TSG.2011.2118774.
- [2] S. Azizi and M. Sanaye-Pasand, "A Straightforward Method for Wide-Area Fault Location on Transmission Networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 264-272, Feb. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2334471.
- [3] J. C. Das, "Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics," *Power System Analysis*, Apr. 2002, doi: 10.1201/9780203908952.
- [4] S. Das, S. Santoso, A. Gaikwad and M. Patel, "Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application," *IEEE Access*, vol. 2, pp. 537-557, 2014, doi: 10.1109/ACCESS.2014.2323353.
- [5] K. Yu *et al.*, "A novel traveling wave fault location method for transmission network based on time linear dependence," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 126, p. 106608, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.IJEPES.2020.106608.
- [6] R. J. Hamidi and H. Livani, "Traveling-Wave-Based Fault-Location Algorithm for Hybrid Multiterminal Circuits," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 135-144, Feb. 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2589265.
- [7] F. Deng, X. Zeng, X. Tang, Z. Li, Y. Zu, and L. Mei, "Travelling-wave-based fault location algorithm for hybrid transmission lines using three-dimensional absolute grey incidence degree," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 114, p. 105306, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.IJEPES.2019.05.043.





- [8] A. Ghorbani and H. Mehrjerdi, "Accurate fault location algorithm for shunt-compensated double circuit transmission lines using single end data," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 116, p. 105515, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.IJEPES.2019.105515.
- [9] 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*, vol. 123, p. 106254, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.IJEPES.2020.106254.
- [10] M. S. Sachdev and R. Agarwal, "A technique for estimating transmission line fault locations from digital impedance relay measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no. 1, pp. 121-129, Jan. 1988, doi: 10.1109/61.4237.
- [11] A. H. Al-Mohammed and M. A. Abido, "A Fully Adaptive PMU-Based Fault Location Algorithm for Series-Compensated Lines," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 5, pp. 2129-2137, Sept. 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2303207.
- [12] B. Mahamedi, M. Sanaye-Pasand, S. Azizi, and J. Guo Zhu, "Unsynchronised fault-location technique for three-terminal lines," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 9, no. 15, pp. 2099-2107, Nov. 2015, doi: 10.1049/IET-GTD.2015.0062/CITE/REFWORKS.
- [13] N. Peng, L. Zhou, R. Liang, X. Xue, G. Piliposyan, and Y. Hu, "Fault location on double-circuit transmission lines by phase correction of fault recorder signals without accurate time synchronization," *Electric Power Systems Research*, vol. 181, p. 106198, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.EPSR.2020.106198.
- [14] M. Gil, A. A. Abdoos, and M. Sanaye-Pasand, "A precise analytical method for fault location in double-circuit transmission lines," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 126, p. 106568, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.IJEPES.2020.106568.
- [15] C Chi-Shan Yu, Chih-Wen Liu, Sun-Li Yu and Joe-Air Jiang, "A new PMU-based fault location algorithm for series compensated lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 1, pp. 33-46, Jan. 2002, doi: 10.1109/61.974185.
- [16] D. Cai and J. Zhang, "New Fault-Location Algorithm for Series-Compensated Double-Circuit Transmission Line," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 210685-210694, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3039877.
- [17] Joe-Air Jiang, Jun-Zhe Yang, Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu and Jih-Chen Ma, "An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. I. Theory and algorithms," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 486-493, April 2000, doi: 10.1109/61.852973.
- [18] Joe-Air Jiang, Ying-Hong Lin, Jun-Zhe Yang, Tong-Ming Too and Chih-Wen Liu, "An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. II. PMU implementation and performance evaluation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 4, pp. 1136-1146, Oct. 2000, doi: 10.1109/61.891494.
- [19] D. Lu, Y. Liu, S. Chen, B. Wang and D. Lu, "An Improved Noniterative Parameter-Free Fault Location Method on Untransposed Transmission Lines Using Multi-Section Models," *IEEE Transactions on Power Delivery*, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3085746..
- [20] H. Mehrjerdi and A. Ghorbani, "High-speed auxiliary fault location element for distance relays in double-circuit lines," *Electric Power Systems Research*, vol. 200, p. 107470, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EPSR.2021.107470.
- [21] Y. Liao and N. Kang, "Fault-Location Algorithms Without Utilizing Line Parameters Based on the Distributed Parameter Line Model," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 579-584, April 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2008.2002698.
- [22] V. Terzija, Z. M. Radojević and G. Preston, "Flexible Synchronized Measurement Technology-Based Fault Locator," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 866-873, March 2015, doi: 10.1109/TSG.2014.2367820.
- [23] N. I. Elkalashy, "Simplified parameter-less fault locator using double-end synchronized data for overhead transmission lines," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 24, no. 6, pp. 808-818, Jun. 2014, doi: 10.1002/ETEP.1736.



-
- ¹ PMU: Phasor Measurement Unit
 - ² MVEC: Matrix-Vector Equivalent Circuit
 - ³ DFR: Digital Fault Recorder
 - ⁴ DFT: Digital Fourier Transform
 - ⁵ SLG: Single Line to Ground
 - ⁶ DLG: Double Line to Ground
 - ⁷ TLG: Triple Line to Ground
 - ⁸ LL: Line to Line

