Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 19-33

Vol. 13/ No. 4/ Winter 2025
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

Fault Location with Distance Relay via Network Equivalent Circuit Parameters Calculation from the Viewpoint of Transmission Line Terminals, with Consideration Network Structural Changes

Majid Mohtashami[1], Abbas Saberi Noghabi[2]
1 Faculty of Electrical and Computer Engineering – University of Birjand - Birjand - Iran
majidmohtashami@birjand.ac.ir
2 Faculty of Electrical and Computer Engineering – University of Birjand - Birjand – Iran
a.saberi@birjand.ac.ir

Abstract:

The occurrence of faults in the power transmission network is inevitable due to the extensive nature of this network and the passage of transmission lines through areas with different weather and environmental conditions. One of the most important challenges faced by operators of these networks is to quickly and accurately determine the location of the fault occurrence in transmission lines, in order to expedite restoration operations and fault clearance. Various methods exist for locating faults on transmission lines. One common approach involves using distance relays and analyzing the impedance observed by these relays. However, several factors contribute to reduced fault locating accuracy by distance relays. The most significant of these factors include fault resistance, changes in network topology, and current injection from the remote end of the line to the fault location. In this research, a new fault location method based on estimating the network's equivalent circuit has been introduced for single-phase-to-ground faults in two-terminal lines equipped with a communication system. The process of estimating the equivalent circuit impedances relies on online estimation of Thevenin impedances from the perspective of transmission line terminals, both before and after the fault occurrence. Additionally, if needed, offline data stored in the relay memory (including proposed equivalent circuit impedances for different network configurations, considering the N-1 criterion) is utilized. This method can promptly calculate fault location and fault resistance with high speed and accuracy, using local information and data received from the remote end of the transmission line. The proposed algorithm has been tested on the IEEE 39-bus standard network, and simulation results demonstrate its effectiveness in fault location and fault resistance calculation.

Keywords: fault location, distance relay, network structure change, thevenin equivalent impedance, fault resistance, network equivalent circuit.

Date of sending the article: 2024/02/22
Acceptance date of the article: 2025/01/17

Name of the Corresponding Abbas Saberi Noghabi
Corresponding Author's Address: Faculty of Electrical and Computer Engineering – University of Birjand - Birjand – Iran

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۳۳ -۱۹

Vol. 13 / No. 4/ Winter 2025
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

مکان‌یابی خطا به کمک رله‌ی دیستانس بر مبنای محاسبه‌ی پارامترهای مدار معادل شبکه از دید پایانه‌های خط انتقال در شرایط تغییر ساختار شبکه

مجید محتشمی[۱]، عباس صابری نوقابی[۲]
۱دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند – بیرجند – ایران
majidmohtashami@birjand.ac.ir
۲ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند – بیرجند – ایران
a.saberi@birjand.ac.ir

چکیده:

وقوع خطا در شبکه‌ی انتقال قدرت به سبب گستردگی این شبکه و عبور خطوط انتقال از مناطق با شرایط آب و هوایی و محیطی مختلف، اجتناب‌ناپذیر می‌با شد و یکی از مهمترین چالش‌های پیش‌روی بهره‌برداران این شبکه‌ها، تعیین سریع و دقیق مکان وقوع خطا، به منظور ت سریع در انجام عملیات بازیابی و رفع عیب می‌با شد. روش‌های مختلفی برای تعیین مکان وقوع خطا در خطوط انتقال وجود دارد. یکی از این روش‌های مر سوم، ا ستفاده از رله‌ی دی ستانس و آنالیز امپدانس دیده شده تو سط آن می‌با شد، اما عوامل متعددی سبب کاهش دقت رله‌ی دی ستانس در تعیین مکان صحیح خطا می شوند. مهمترین این عوامل وجود مقاومت خطا، تغییر آرایش شبکه و تزریق جریان از پایانه‌ی دیگر خط به محل خطا، می‌با شند. در این تحقیق برای حذف اثر سوء عوامل مذکور، یک روش جدید مکان‌یابی خطای تک فاز به زمین، برای خطوط دو پایانه‌ای مجهز به سی ستم ارتباطی، معرفی شده ا ست. در این روش ابتدا یک مدار معادل منا سب برای شبکه‌ی دربرگیرنده‌ی خط انتقال مورد مطالعه پی شنهاد شده و پس از محا سبه‌ی پارامترهای این مدار معادل، مکان‌یابی خطا تو سط رله انجام می‌شود. فرآیند تخمین امپدانس‌های مدار معادل، مبتنی بر تخمین آنلاین امپدانس‌های تونن شبکه از دید پایانه‌های خط انتقال در شرایط قبل از وقوع خطا و پس از رفع خطا می‌با شد. همچنین در صورت نیاز از داده‌های آفلاین ذخیره شده در حافظه رله (شامل امپدانس‌های مدار معادل پی شنهادی برای آرایش‌های مختلف شبکه با رعایت معیار *N-1*) نیز ا ستفاده می شود. این روش قادر ا ست بلافا صله پس از رخداد خطا به کمک اطلاعات محلی و اطلاعات دریافت شده از پایانه‌ی دور خط انتقال، مکان خطا و مقاومت خطا را با سرعت و دقت بسیار بالا محاسبه کند. الگوریتم یاد شده بر روی شبکه ۳۹ باسه استاندارد IEEE آزمایش شده است و نتایج شبیه‌سازی، به خوبی کارایی آن را در تعیین مکان خطا و محاسبه‌ی مقاومت خطا، نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: مکان‌یابی خطا، رله‌ی دیستانس، تغییر ساختار شبکه، امپدانس تونن، مقاومت خطا، مدار معادل شبکه.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر عباس صابری نوقابی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند – بیرجند – ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

۱- مقدمه

در ع صر حا ضر با گ سترش روزافزون نیاز به انرژی الکتریکی، شبکه‌های انتقال توان در محدوده‌های و سیع جغرافیایی تو سعه یافته‌اند. از سوی دیگر، اهمیت تامین انرژی الکتریکی م ستمر و با کیفیت باعث شده ا ست که شرکت‌های تامین کننده‌ی انرژی الکتریسیته، پیو سته در صدد بهبود عملکرد سی ستم حفاظتی شبکه‌ی خود و کاهش مدت زمان بازیابی بخش های خطادار آن با شند. در این بین یکی از مهمترین چالش‌های پیش‌رو، تعیین مکان وقوع خطا و مقاومت خطا در خطوط انتقال، به منظور ت سریع در انجام عملیات بازیابی شبکه می‌با شد و این مو ضوع به جهت و سعت شبکه‌های امروزی و گاها صعب العبور بودن م سیر خط انتقال، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

امروزه به سبب فراگیر شدن کاربرد رله‌های دیجیتال در سیستم‌های قدرت، امکان ا ستفاده از الگوریتم های حفاظتی پیچیده‌تر بر روی این رله‌ها، فراهم شده ا ست. از آنجاییکه رله‌ی دی ستانس، به عنوان حفاظت ا صلی شبکه‌های انتقال ا ستفاده می شود و فل سفه‌ی حفاظت دی ستانس مبتنی بر تخمین فا صله‌ی مکان وقوع خطا از محل ن صب رله به کمک امپدانس محاسبه شده در پایانه‌ی نصب رله می‌باشد، می‌توان از این قابلیت رله‌ی دی ستانس به منظور تعیین مکان وقوع خطا در شبکه، ا ستفاده کرد (Cook, 1986). عوامل متعددی سبب خطای رله‌ی دیستانس در تخمین مکان وقوع خطا می شوند که در (Saha et al., 2010) این عوامل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. دو عامل اثرگذار مهم بر روی امپدانس محاسبه شده تو سط رله‌ی دی ستانس، عدم قطعیت در ساختار شبکه و اندازه‌ی مقاومت محل خطا (در صورت وقوع خطا) می‌باشند که می‌توانند باعث کاهش دقت رله (کاهش یا افزایش برد آن) در محاسبه‌ی مکان خطا شوند (Eriksson et al., 1985; Saha et al., 2010; Takagi et al., 1982).

در این تحقیق برای حذف اثر سوء دو عا مل فوق، یک الگوریتم مکان‌یابی خطای جدید قابل اعمال در رله‌ی دی ستانس، برای خطای تک فاز به زمین در خطوط انتقال دو پایلنه‌ای مجهز به سی ستم ارتباطی، پی شنهاد شده ا ست. این الگوریتم به کمک تخمین آنلاین امپدانس تونن شبکه در پایانه‌های خط انتقال، می‌تواند مقاومت خطا و مکان وقوع خطا را با دقت و سرعت بالا تعیین کند. در این طرح، یک مدار معادل منا سب برای شبکه‌ی دربرگیرنده خط انتقال پی شنهاد شده و تلاش می شود با تخمین امپدانس‌های آن، محا سبات مکان‌یابی خطا، بر ا ساس این مدار معادل انجام گیرد. فرآیند تخمین امپدانس های مدار معادل، مبتنی بر تخمین آنلاین امپدانس‌های تونن شبکه از دید پایلنه‌های خط انتقال در شرایط قبل از وقوع خطا و پس از رفع آن می‌با شد. همچنین در صورت نیاز از بلنک اطلاعاتی آفلاین رله، که شامل امپدانس‌های مدار معادل متناظر با آرایش‌های مختلف شبکه می‌باشد، استفاده خواهد شد. این روش قادر ا ست بلافا صله پس از رخداد خطا به کمک اطلاعات محلی و اطلاعات دریافت شده از پایانه‌ی دور خط انتقال (امپدانس تونن و وضعیت کلیدها)، مکان خطا و مقاومت خطا را با سرعت و دقت بسیار بالا محاسبه کند.

نوآوری‌های این مقاله شامل موارد زیر ا ست: در این تحقیق مدل ا ستفاده شده برای شبکه، مدل جامع ا ستفاده شده در (Anderson et al., 2022; Eisa & Ramar, 2010; Wiszniewski, 1983) بوده و تمام امپدانس‌های این مدار معادل تخمین زده می شوند و لذا مدل ارائه شده قابلیت تطبیق‌پذیری با ساختارهای مختلف شبکه را دارا می‌باشد. همچنین الگوریتم ارائه شده م ستقل از مقاومت خطا بوده و قادر ا ست مقاومت خطا و مکان خطا را با دقت و سرعت بالا تخمین بزند. همچنین با توجه اینکه این الگوریتم بر اساس داده‌های رخداد خطای ذخیره شده در حافظه‌ی رله و بلافا صله پس از رفع خطا عمل می‌کند هم مزیت ا ستفاده از داده‌های آفلاین را دا شته و در لحظه‌ی وقوع خطا بار محا سباتی برای رله ایجاد نمی‌کند و هم با توجه به سرعت بالای عملکرد سی ستم حفاظتی و پا سخ سریع الگوریتم پیشنهادی، مزیت پاسخ آنلاین را دارد.

۲- مکان‌یابی خطا توسط رله‌ی دیستانس

۲-۱- تاریخچه

الگوریتم های متنوعی برای مکان‌یابی خطا وجود دارد (*Adem, 2020; Panahi et al., 2021; Saha et al., 2010*). در (*Panahi et al., 2021*) این الگوریتم‌ها بر اساس روش محاسباتی استفاده شده دسته‌بندی شده‌اند. یک د سته از این الگوریتم‌ها قابلیت پیاده سازی بر روی رله‌ی دی ستانس را دا شته و مبتنی بر محا سبه‌ی امپدانس دیده شده تو سط یک یا هر دو پایانه‌ی خط انتقال می‌با شند (*Panahi et al., 2021*). پی شینه‌ی این الگوریتم‌ها به سال ۱۹۸۲ برمی‌گردد و برای اولین بار تاکاگی و همکاران در (*Takagi et al., 1982*)، با ساده سازی معادلات حلقه‌ی خطا و پی شنهاد تفکیک شبکه‌ی تحت خطای خالص از شبکه‌ی خطادار، یک الگوریتم مکان‌یابی با ا ستفاده از اطلاعات یک پایلنه‌ی خط ارئه دادند (*Takagi et al., 1982*). یک سال بعد در (*Schweitzer III, 1983*)، برای بهبود دقت روش (*Takagi et al., 1982*)، یک الگوریتم مکان‌یابی دو پایانه‌ای معرفی شد. همزمان در (*Wiszniewski, 1983*) با ا ستفاده از مدل کامل خط انتقال واقع در یک شبکه‌ی به هم پیو سته، یک الگوریتم مکان‌یابی تک پایلنه‌ای با دقت بالا، برای خطای تک فاز به زمین و دو فاز به هم، ارائه شد. در سال ۱۹۸۵ در (*Eriksson et al., 1985*)، با ساده سازی مدل ا ستفاده شده تو سط (*Wiszniewski, 1983*)، پی شنهاد ا ستفاده از شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر مطرح شد و با جدا سازی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

شبکه‌ی تحت خطای خالص از شبکه‌ی خطادار و استفاده از اطلاعات هر دو پایانه‌ی خط، مفهوم ضرایب توزیع جریان خطا معرفی شد و بر اساس آن روش مکان‌یابی خطای جدیدی ارائه شد که در خطوط انتقال بین ناحیه‌ای از دقت بالایی برخوردار بود. هرچند روش‌های ذکر شده به راحتی در رله‌های دیجیتال امروزی قابل پیاده سازی هستند اما برای اولین بار در سال ۱۹۸۶، سه الگوریتم مختلف برای استفاده در رله‌ی دیستانس معرفی شد (*Cook, 1986*). روش مکان‌یابی (*Johns & Jamali, 1990*)، مبتنی بر مدل گسترده خط انتقال و مستقل از مقاومت خطا می‌باشد که در سال ۱۹۹۰ ارائه شد. سال ۱۹۹۶ در (*Novosel et al., 1996*) یک روش مکان‌یابی دو پایانه‌ای آفلاین ارائه شد که نیازی به اطلاعات همگام شده نداشت. در سال ۲۰۰۴ روش مکان‌یابی خطای تک پایانه‌ای مورد استفاده در خطوط انتقال موازی معرفی شد (*Izykowski et al., 2004*). سال ۲۰۱۰ در (*Eisa & Ramar, 2010*) یک روش مکان‌یابی تک پایلنه‌ای برای همه‌ی انواع خطاهای خط انتقال، با استفاده از مدل جامع شبکه و مدل گسترده خط انتقال ارائه شد. در (*Paladhi & Pradhan, 2017*)، سال ۲۰۱۷ یک طرح حفاظت تطبیقی برای رله‌ی دیستانس با در نظر گرفتن اثر تغییر ساختار شبکه و ارائه یک فرموله‌بندی متفاوت، پیشنهاد شد که مبتنی بر محاسبه‌ی امپدانس‌های شبکه بود. اما نه در (*Eisa & Ramar, 2010*) و (*Paladhi & Pradhan, 2017*) و نه در سایر تحقیقات این حوزه، تاکنون روشی برای محاسبه‌ی آنلاین امپدانس‌های شبکه ارائه نشده است.

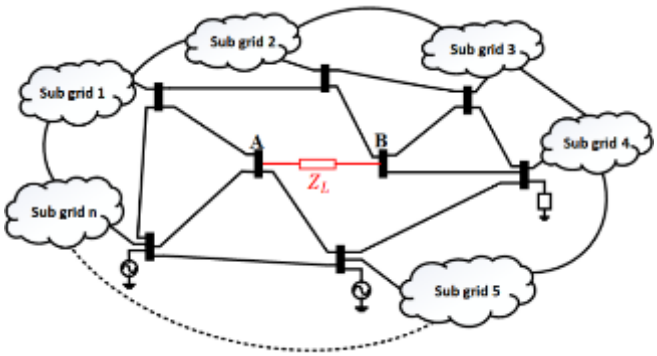
در این تحقیق تلاش شده‌است نقاط ضعف روش‌های مکان‌یابی مبتنی بر محاسبه‌ی امپدانس پوشش داده شود و یک روش مکان‌یابی با دقت بالا به کمک اطلاعات رخداد خطای ثبت شده در رله‌ی دیستانس ارائه شود. بدین منظور ابتدا لازم است برای شبکه‌ی دربرگیرنده‌ی خط انتقال یک مدل مناسب انتخاب شود.

۲-۲- مدل شبکه در شرایط عادی بهره‌برداری

مدل‌های استفاده شده برای شبکه در (*Cook, 1986; Eriksson et al., 1985; Izykowski et al., 2004; Johns & Jamali, 1990; Novosel et al., 1996; Paladhi & Pradhan, 2017; Schweitzer III, 1983; Takagi et al., 1982*) جامع نبوده و دقت آنها تنها در شبکه‌هایی که مسیر ارتباطی بین پایانه‌های خط انتقال، خود خط انتقال (مانند خطوط بین ناحیه‌ای یا تبادلی) می‌باشد، کافی است و با اضافه شدن یک مسیر ارتباطی جدید، دقت آنها کاهش می‌یابد. این موضوع با توجه به پیوسته بودن آرایش اکثر شبکه‌های انتقال امروزی، سبب ناتوانی این مدل‌ها در پاسخگویی به ساختارهای مختلف شبکه می شود. همچنین با اینکه در (*Eisa & Ramar, 2010; Izykowski et al., 2004; Wiszniewski, 1983*)، مدل کامل شبکه در نظر گرفته شده، اما نقطه ضعف اصلی الگوریتم‌های ارائه شده در این تحقیق‌ها، عدم تطبیق‌پذیری آنلاین با آرایش‌های مختلف شبکه و همچنین تاثیرپذیری از مقدار مقاومت خطا می‌باشد. در ادامه روند استخراج مدار معادل مناسب برای شبکه‌ی متصل به پایانه‌های خط انتقال شرح داده شده است.

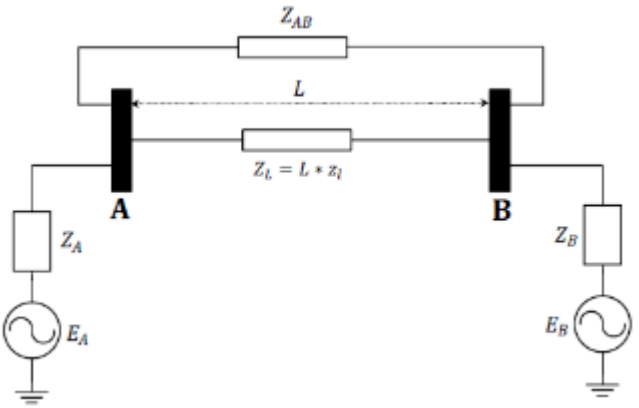
یک خط انتقال فاقد خطای واقع در یک شبکه‌ی قدرت به هم پیوسته را، می‌توان به صورت خط AB در شکل (۱)، نشان داد. در این شبکه هر یک از زیر سیستم‌های ۱ تا n، نشانگر بخشی از سیستم قدرت کل می‌باشند.

برای مدل‌سازی خط انتقال نشان داده شده در شکل (۱)، نمی‌توان از مدل استفاده شده در (*Cook, 1986; Eriksson et al., 1985; Johns & Jamali, 1990; Novosel et al., 1996; Paladhi & Pradhan, 2017; Schweitzer III, 1983; Takagi et al., 1982*) استفاده کرد، زیرا در این مدل‌ها، از امپدانس سایر مسیرهای ارتباطی بین پایانه‌های خط AB، از طریق شبکه‌ی در برگیرنده‌ی آن (که در شکل (۲) با Z_{AB} نشان داده شده) ، صرفنظر شده است. در این تحقیق شبکه‌ی قدرت متصل به پایانه‌های خط AB به صورت شکل (۲) و توسط سه امپدانس Z_A، Z_B و Z_{AB} و منابع ولتاژ E_A و E_B مدل شده است. در این شکل خط AB (به طول L و امپدانس واحد طول Z_l)، با امپدانس Z_L نشان داده شده است. این مدل در (*Eisa & Ramar, 2010; Wiszniewski, 1983*) نیز مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۱): خط انتقال AB و شبکه‌ی دربر گیرنده‌ی آن

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

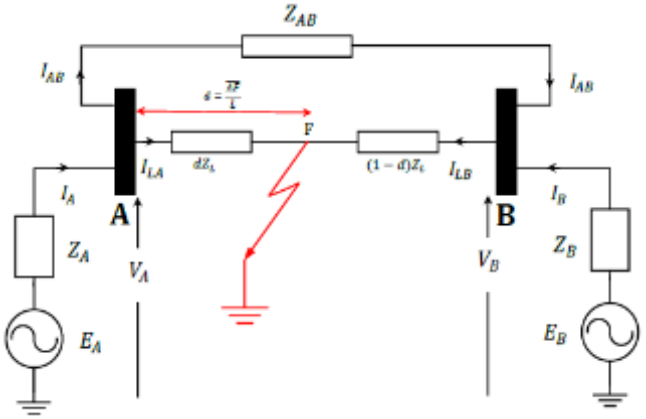


شکل (۲): مدار معادل پیشنهادی برای شبکه‌ی دربرگیرنده‌ی خط AB

۳-۲- مدل شبکه در شرایط وقوع خطا در خط AB

وضعیت شبکه‌ی شکل (۲) در لحظه‌ی قبل از خطا را می‌توان مطابق شکل (۳) نشان داد، که در آن $I_{AB} = -I_{BA}$ جریان جاری از شین A به شین B از طریق شبکه‌ی خارجی، I_{LA} و I_{LB} به ترتیب جریان تزریقی شین A و شین B به خط AB، I_A و I_B به ترتیب جریان‌های تزریقی شبکه‌ی خارجی به شین‌های A و B و ولتاژ شین‌ها V_A و V_B می‌باشند. در شکل (۳)، F محل وقوع خطا و d پریونیت فاصله‌ی محل خطا از پایانه‌ی A (که اصطلاحا مکان خطا نامیده می‌شود) می‌باشد.

در مدل‌سازی خطای تک فاز به زمین، مطابق شکل (۴) هادی فاز از طریق مقاومت R_f که مقدار آن می‌تواند بین صفر تا مقادیر بسیار بالا متغییر باشد، به زمین متصل می‌شود (Cook, 1986). وجود این مقاومت در حضور جریان تزریقی از پایانه‌ی دیگر خط انتقال، سبب بروز خطای رله‌ی دیستانس در محاسبه‌ی مقاومت خطا و تخمین مکان خطا می شود (Eriksson et al., 1985; Takagi et al., 1982).



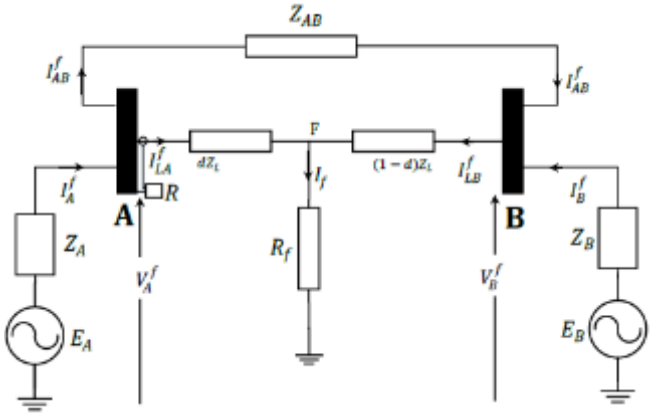
شکل (۳): وقوع خطا اتصال کوتاه تک فاز به زمین در خط AB

اگر فرض کنیم رله‌ی دیستانس R در پایانه‌ی A قرار دارد امپدانس دیده شده توسط آن طبق رابطه‌ی (۱) محاسبه می شود. همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده، در این رابطه بالانویس f معرف کمیت‌های شبکه در شرایط خطا می‌باشد. V_A^f ولتاژ شین A، I_{LA}^f جریان تزریقی شین A به خط AB، مجهولات R_f، I_f و d، به ترتیب مقاومت، جریان و مکان خطا در شرایط وقوع خطا و Z_R امپدانس دیده شده توسط رله‌ی دیستانس می‌باشند. با توجه به اینکه می‌توان رابطه‌ی (۱) را به دو بخش حقیقی و موهومی تفکیک کرد، نهایتا یک دستگاه دو معادله و سه مجهول بدست می‌آید، که چون تعداد مجهولات بیشتر از معادلات است، نمی‌توان به جواب یکتایی برای آن رسید.

$$Z_R = {V_A^f}/{I_{LA}^f} = d\,Z_L + R_f \frac{I_f}{I_{LA}^f} \qquad (۱)$$

سال ۱۹۸۲ در (*Takagi et al., 1982*) تاکاگی و همکاران به منظور یافتن راه‌حلی برای رابطه‌ی (۱)، مطابق شکل (۵)، پیشنهاد تفکیک شبکه‌ی خطادار به دو شبکه‌ی فاقد خطا و شبکه‌ی تحت خطای خالص را مطرح و جریان خطا را بر حسب کمیت‌های شبکه‌ی تحت خطای خالص محاسبه کردند. در این معادل سازی، کمیت‌های شبکه‌ی خطادار برابر مجموع کمیت‌های نظیر به نظیر آن در شبکه‌ی فاقد خطا و شبکه‌ی تحت خطای خالص می‌باشد. همچنین با توجه به اختلاف دامنه‌ی جریان خطا و جریان بار، فرض شده است که در طی فرآیند وقوع خطا بار ثابت می‌باشد و می‌توان از اطلاعات شبکه قبل از وقوع خطا، برای شبکه‌ی فاقد خطا استفاده کرد. کمیت‌های شبکه‌ی تحت خطای خالص، مطابق روابط (۲) محاسبه می شوند در این روابط بالانویس f نشان دهنده‌ی شرایط خطا و علامت Δ معرف کمیت‌های شبکه‌ی تحت خطای خالص می‌باشد. برای مثال در رابطه‌ی (۲) جریان تزریقی شین A به خط AB در شرایط وقوع خطا با I_{LA}^f، در شرایط قبل از وقوع خطا (کمیت متناظر در شبکه‌ی فاقد خطا) با I_{LA} و سهم آن در جریان خطای کل (کمیت متناظر در شبکه‌ی تحت خطای خالص) با ΔI_{LA}^f، نمایش داده می شود. این کمیت‌ها در شکل (۵) نشان داده شده‌اند.

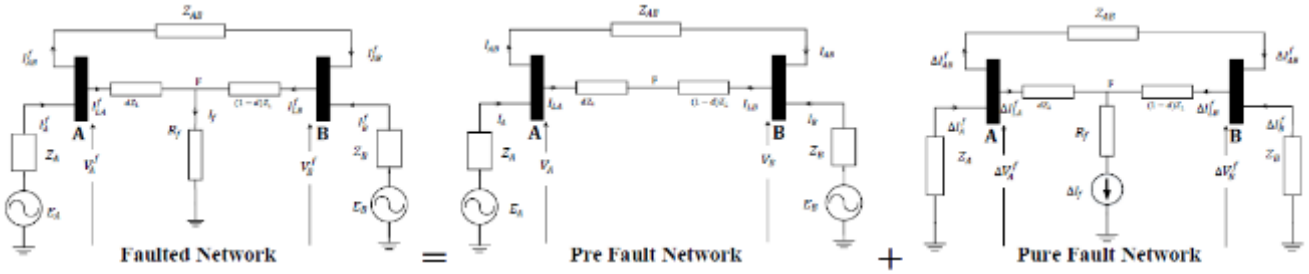
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]



شکل (۴): مدل شبکه در حالت وقوع خطا در خط AB

$$\Delta I_{LA}^f = I_{LA}^f - I_{LA}$$
$$\Delta I_{LB}^f = I_{LB}^f - I_{LB}$$
$$\Delta I_{LAB}^f = I_{LAB}^f - I_{LAB}$$
$$\Delta I_f = I_f - 0$$
$$\Delta V_{LA}^f = V_{LA}^f - V_{LA}$$
$$\Delta V_{LB}^f = V_{LB}^f - V_{LB} \qquad (۲)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]



شکل (۵): تفکیک شبکه‌ی خطادار به شبکه‌ی قبل از خطا و شبکه‌ی تحت جریان خطای خالص

شبکه‌ی تحت خطای خالص تنها از طریق منبع جریان معادل I_f تحریک می شود و لذا امپدانس‌های شبکه به نوعی مقسم جریان خطا می‌باشند. نسبت جریان خطای خالص تزریقی از هر بخش شبکه به جریان خطای کل را، ضریب توزیع جریان خطای آن بخش شبکه می‌نامیم. این ضریب که بدون بعد می‌باشد برای جریان تزریقی پایانه‌ی A به محل خطا، k_A^f نام‌گذاری و طبق رابطه‌ی (۴) تعریف و بر حسب امپدانس‌های مدار معادل پیشنهادی، امپدانس خط AB و مکان خطا محاسبه می شود (*Eriksson et al., 1985*) و از آنجاییکه مکان خطا قبل از وقوع خطا مشخص نمی‌باشد این ضریب برحسب مکان وقوع خطا تغییر می‌کند.

$$k_A^f = \frac{\Delta I_{LA}^f}{I_f} = \frac{Z_{AB}(Z_B + Z_L) + Z_L(Z_A + Z_B) - d(Z_{AB}Z_L + Z_L(Z_A + Z_B))}{Z_{AB}(Z_A + Z_B + Z_L) + Z_L(Z_A + Z_B)} \qquad (۳)$$

k_A^f را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۴) نوشت که در آن پارامترهای M، K و L از جنس امپدانس می‌باشند و برحسب امپدانس‌های مدار معادل و امپدانس خط AB و مستقل از مکان وقوع خطا، طبق روابط (۵)-*(a)*، *(b)* و *(c)* قابل محاسبه می‌باشند (*Saha et al., 2010*).

$$k_A^f = \frac{K\,d + L}{M} \qquad (۴)$$

$$K = -(Z_{AB}Z_L + Z_L(Z_A + Z_B)) \qquad (a)$$

$$L = Z_{AB}(Z_B + Z_L) + Z_L(Z_A + Z_B) \qquad (b)$$

$$M = Z_{AB}(Z_A + Z_B + Z_L) + Z_L(Z_A + Z_B) \qquad (c) \qquad (۵)$$

در شبکه‌های سه فاز که عموما خطاها نامتقارن هستند، این ضرایب برای شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر نیز به ترتیب با k_{A1}^f، k_{A2}^f و k_{A0}^f نمایش و به صورت روابط (۶) تعریف می شوند (*Saha et al., 2010*).

ضرایب K_1، L_1 و M_1 بر حسب امپدانسهای شبکه‌های توالی مثبت و ضرایب K_0، L_0 و M_0 برحسب امپدانسهای شبکه‌ی توالی صفر شبکه‌ی تحت خطای خالص محاسبه می‌شوند و روابط آنها مشابه روابط (۵) می‌باشد. نوآوری مهم این تحقیق تخمین این ضرایب به کمک اطلاعات ساختاری شبکه و اندازه‌گیری‌های آنلاین می‌باشد.

$$k_{A1}^f = \frac{I_{LA1}^f}{I_{F1}} = \frac{K_1\,d + L_1}{M_1} \qquad (a)$$

$$k_{A2}^f = \frac{\Delta I_{LA2}^f}{I_{F2}} = k_{A2}^f \qquad (b)$$

$$k_{A0}^f = \frac{I_{LA0}^f}{I_{F0}} = \frac{K_0\,d + L_0}{M_0} \qquad (c) \qquad (۶)$$

برای شبکه‌ی شکل (۴)، جریان خطا را می‌توان طبق رابطه‌ی (۷) به صورت ترکیب وزنی مولفه‌های توالی جریان خطا نوشت. با توجه به وجود رابطه بین جریان مدارهای توالی، انتخاب ضرایب وزنی a_1^f، a_2^f و a_0^f متناسب با نوع خطا، فاز وقوع خطا و پاره‌ای اولویت‌های محاسباتی و تکنیکی صورت می‌پذیرد (*Eriksson et al., 1985*).

$$I_f = a_1^f\, I_{f1} + a_2^f\, I_{f2} + a_0^f\, I_{f0} \qquad (۷)$$

با انتخاب ضرایب وزنی به گونه‌ای که منجر به حذف مولفه‌ی توالی صفر شود، جریان خطا به صورت رابطه‌ی (۸) در نظر گرفته می شود (*Eriksson et al., 1985*).

$$I_f = a_1^f\, \Delta I_{LA1}^f + a_2^f\, I_{LA2}^f \qquad (۸)$$

به کمک رابطه‌ی (۶)-(*a*) و جایگذاری رابطه‌ی (۸) در رابطه‌ی (۱)، رابطه‌ی (۹) برای محاسبه‌ی امپدانس دیده شده توسط رله‌ی دیستانس بدست می‌آید.

$$Z_R = d\,Z_L + R_f\,\frac{M_1(a_1^f\,\Delta I_{LA1}^f + a_2^f\,I_{LA2}^f)}{(K_1\,d + L_1)\,I_{LA}^f} \qquad (۹)$$

اگر رابطه‌ی (۹) برحسب d بازنویسی شود، رابطه‌ی (۱۰) بدست می‌آید.

$$K_1 Z_L^1 d^2 + (L_1 Z_{L1} - K_1 Z_R)d - L_1 Z_R + R_f\,\frac{M_1(a_1^f\,\Delta I_{LA1}^f + a_2^f\,I_{LA2}^f)}{I_{LA}^f} = 0 \qquad (۱۰)$$

چنانچه در رابطه‌ی (۱۰) ضرایب K_1، L_1 و M_1 معلوم باشند با توجه به معلوم بودن سایر پارامترها، با تجزیه‌ی این رابطه به بخش‌های حقیقی و موهومی، مجهولات این معادله که d و R_f می‌باشند به طور دقیق قابل محاسبه خواهند بود (*Saha et al., 2010*). برای محاسبه‌ی ضرایب K_1، L_1 و M_1 نیز، ابتدا بایلد امپدانس‌های Z_A، Z_B و Z_{AB} که نشان دهنده‌ی ساختار شبکه‌ی شکل (۲) هستند، تعیین شوند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

۳- روش پیشنهادی محاسبه‌ی پارامترهای مدار معادل شبکه

چنانچه امپدانس تونن شبکه‌ی شکل (۲)، از دید پایانه‌ی A، Z_{thA} و از دید پایانه‌ی B، Z_{thB} نام گذاری گردد، این امپدانس‌ها بر حسب پارامترهای این شبکه به شرح روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه خواهند شد.

$$Zth_A = [(Z_L \parallel Z_{AB}) + Z_B] \parallel Z_A = \frac{Z_A Z_L Z_{AB} + Z_A Z_B (Z_L + Z_{AB})}{Z_L Z_{AB} + Z_B (Z_L + Z_{AB}) + Z_A (Z_L + Z_{AB})} \quad (۱۱)$$

$$Zth_B = [(Z_L \parallel Z_{AB}) + Z_A] \parallel Z_B = \frac{Z_B Z_L Z_{AB} + Z_A Z_B (Z_L + Z_{AB})}{Z_L Z_{AB} + Z_B (Z_L + Z_{AB}) + Z_A (Z_L + Z_{AB})} \quad (۱۲)$$

از نماد $\parallel$ برای نشان دادن امپدانس‌های موازی، استفاده شده است.

حال اگر در شبکه‌ی شکل (۲)، خط AB از مدار خارج گردد و مجددا امپدانس تونن از دید پایانه‌ی A و B، محاسبه و به ترتیب با Zth'_A و Zth'_B نام‌گذاری گردد، روابط (۱۳) و (۱۴) بدست می‌آیند.

$$Zth'_A = (Z_{AB} + Z_B) \parallel Z_A = \frac{Z_A (Z_B + Z_{AB})}{Z_A + Z_B + Z_{AB}} \quad (۱۳)$$

$$Zth'_B = (Z_{AB} + Z_A) \parallel Z_B = \frac{Z_B (Z_A + Z_{AB})}{Z_A + Z_B + Z_{AB}} \quad (۱۴)$$

با توجه به معلوم بودن امپدانس خط AB (Z_L)، چنانچه سمت چپ معادلات (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) معلوم باشد، می‌توان با انتخاب سه معادله از بین روابط مذکور، امپدانس‌های مجهول شبکه شکل (۲) (Z_A، Z_B و Z_{AB}) را محاسبه کرد.

برای محاسبه‌ی Zth_A، Zth_B، Zth'_A و Zth'_B دو روش وجود دارد. روش اول مبتنی بر محاسبات آفلاین و معلوم بودن امپدانس کلیه‌ی اجزای شبکه است و روش دوم مبتنی بر اندازه‌گیری آنلاین امپدانس تونن شبکه از دید پایانه‌های خط AB، می‌باشد.

۳-۲- روش پیشنهادی محاسبه‌ی آفلاین امپدانس‌های مدار معادل

از آنجاییکه عناصر قطری ماتریس امپدانس شبکه (Z_{bus})، امپدانس‌های تونن شبکه از دید شین متناظر با شماره‌ی سطر(یا ستون) آن می‌باشند، لذا اگر امپدانس کلیه‌ی اجزای شبکه معلوم باشد، می‌توان ماتریس امپدانس شبکه (Z_{bus}) را تشکیل داد و به امپدانس‌های تونن شبکه از دید پایانه‌های خط انتقال دسترسی پیدا کرد. چنانچه شین A متناظر با سطر iام و شین B متناظر با سطر jام ماتریس Z_{bus} باشد، عناصر Z_{ii} و Z_{jj} ماتریس Z_{bus}، به ترتیب معادل Zth_A و Zth_B می‌باشند و چنانچه ماتریس Z_{bus} در حالت خروج خط AB تشکیل شود، عناصر Z_{ii} و Z_{jj} ماتریس Z_{bus}، به ترتیب معادل Zth'_A و Zth'_B خواهند بود. بدین ترتیب می‌توان مشابه روند فوق، به ازای هر آرایش شبکه (خروج خطوط، ژنراتورها، ترانسفورماتورها و بارها) سمت چپ روابط (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) را بدست آورد و سپس امپدانس‌های مجهول شبکه (Z_A، Z_B و Z_{AB}) را محاسبه کرد.

۳-۳- تخمین آنلاین امپدانس‌های مدار معادل

برای تخمین آنلاین امپدانس‌های مدار معادل پیشنهادی، ابتدا لازم است سمت چپ روابط (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) که همان امپدانس‌های تونن شبکه از دید شین‌های A و B می‌باشند به صورت آنلاین اندازه‌گیری شوند. روش‌های متنوعی برای تخمین آنلاین امپدانس تونن از دید شین، وجود دارد (Abdelkader et al., 2018; Abdelkader & Morrow, 2012; Arancibia et al., 2020; Yuan & Li, 2014; Yun et al., 2019). در این تحقیق برای تخمین آنلاین امپدانس‌های تونن شبکه، از تکنیک معرفی شده در (Abdelkader & Morrow, 2012) استفاده شده است. برای این منظور در هر کدام از پایانه‌های A و B یک بار (L_A و L_B) در نظر گرفته شده و با دنبال کردن ولتاژ و جریان آنها، امپدانس تونن شبکه از دید شین‌های A و B محاسبه می‌شود.

با توجه به اینکه در پایانه‌ی نصب رله، امکان دسترسی همزمان به اطلاعات پایانه‌ی دور خط انتقال، از طریق سیستم ارتباطی با سرعت بالا، میسر است، می‌توان به طور همزمان در هر دو پایلنه‌ی A و B امپدانس تونن شبکه Zth_A و Zth_B را محاسبه و نتیجه را به پایانه‌ی دیگر ارسال کرد. اما امکان محاسبه‌ی Zth'_A و Zth'_B در شرایط عادی بهره‌برداری وجود ندارد، زیرا نمی‌توان خط انتقال در حال بهره‌برداری عادی را از مدار خارج کرد و نیاز است راه‌کاری اتخاذ گردد که قابل پیاده سازی عملی باشد. این چالش، با ارائه‌ی روش پیشنهادی این تحقیق مرتفع شده است.

۳-۴- روش پیشنهادی تخمین امپدانس‌های مدار معادل

روش پیشنهادی این تحقیق برای تخمین امپدانس‌های مدار معادل، ترکیبی از هر دو روش آفلاین و آنلاین می باشد و به طور خلاصه شامل گام‌های زیر است:

گام ۱: با تشکیل بانک اطلاعاتی رله به روش شرح داده شده در بخش ۲-۳-، Zth_A، Zth_B، Zth'_A و Zth'_B به همراه امپدانس های معادل متناظر آنها Z_A، Z_B و Z_{AB}، به ازای آرایش‌های مختلف شبکه (خروج تکی کلیه‌ی عناصر شبکه)، به عنوان یک ترکیب یکتا تعریف می‌شوند. الگوریتم اجرای این گام تحت عنوان اطلاعات آفلاین در شکل (۶) آمده است.

گام ۲: در این گام امپدانس‌های تونن شبکه از دید پایانه‌های خط انتقال (Zth_A و Zth_B) برای یافتن سمت چپ روابط (۱۱) و (۱۲)، به صورت آنلاین و با دنبال کردن ولتاژ و جریان بارهای درنظر گرفته شده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

در پایانه های خط انتقال، تخمین زده می شود و Zth_A^{online} و Zth_B^{online} نامیده می‌شوند.

گام ۳: چنانچه پس از وقوع خطا، خط AB از مدار خارج شود به کمک اطلاعات پایانه‌های خط در شرایط پس از رفع خطا، $Zth_A'^{online}$ و $Zth_B'^{online}$ نیز به طور مستقیم قابل محاسبه می‌باشد و به کمک روابط (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) امپدانس‌های مدار معادل محاسبه خواهند شد.

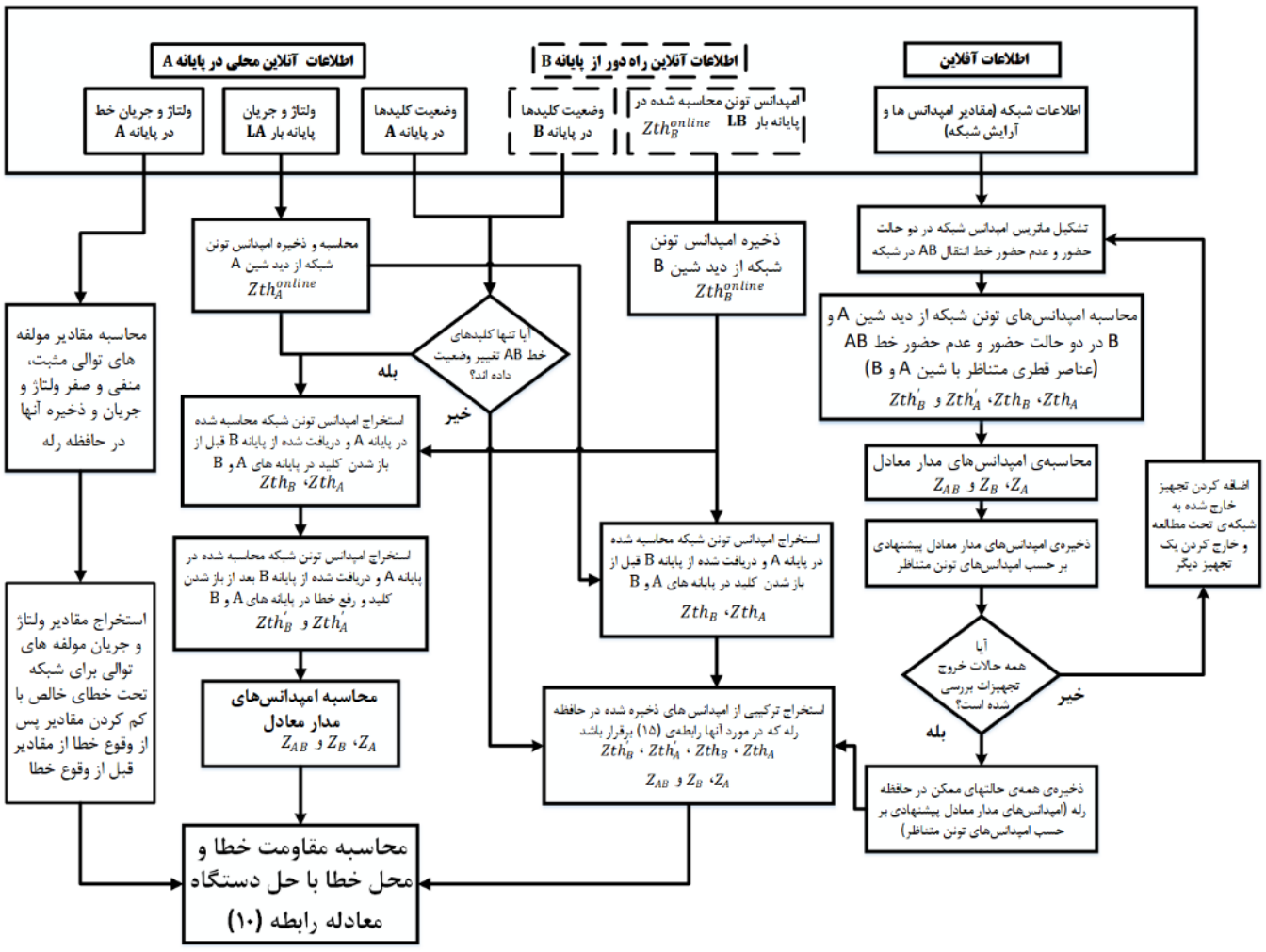
گام ۴: چنانچه به هر دلیلی پس از وقوع خطا، شرایطی غیر از خروج خط AB رخ دهد، به کمک اندازه‌گیری‌های آنلاین انجام شده قبل از وقوع خطا (Zth_A^{online} و Zth_B^{online}) و اطلاعات ذخیره شده در حافظه رله در گام ۱، آرایه‌ی که Zth_A و Zth_B در آن کمترین فاصله با Zth_A^{online} و Zth_B^{online} را دارا باشد و رابطه‌ی (۱۵) را برآورده کند، از حافظه‌ی رله استخراج شده و به عنوان مدل معادل شبکه‌ی قبل از وقوع خطا، انتخاب می‌شود. در رابطه (۱۵)، i شماره‌ی آرایش ها، Z_i حاوی امپدانس های معرف آرایش iام (مطابق رابطه‌ی (۱۶)) و Z_{Table} کل آرایش‌های ذخیره شده در حافظه رله می‌باشد.

$$\min\left(\sqrt{\left(Zth_A^{online}-Zth_A^{i}\right)^2+\left(Zth_B^{online}-Zth_B^{i}\right)^2}\right) \quad \forall Z_i\ ,\quad Z_i \in Z_{Table} \tag{۱۵}$$

$$Z_i=\left(Zth_A^{i}\ ,Zth_B^{i}\ ,Zth_A'^{i}\ ,Zth_B'^{i}\ ,Z_A^{i}\ ,Z_B^{i}\ ,Z_{AB}^{i}\right) \tag{۱۶}$$

۴- مکان‌یابی خطا به کمک روش پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی این تحقیق برای یافتن محل دقیق خطا و مقدار مقاومت خطا برای رله‌ی منصوبه در پایانه‌ی A، به شرح ارایه شده در فلوچارت شکل (۶) می‌باشد که گام‌های آن در بخش ۴-۳- شرح داده شده است. در این تحقیق فرض شده است که وقوع خطای تک فاز به زمین در خط انتقال دو پایانه‌ای AB، با عملکرد رله‌ی دیستانس تشخیص داده شده است و هدف یافتن محل دقیق خطا و مقدار مقاومت خطا می‌باشد. این موضوع با استخراج پارامترهای مدار معادل شبکه‌ی شکل (۲) و حل دستگاه معادله‌ی رابطه‌ی (۱۰) انجام می‌گردد. بارهای L_A و L_B به ترتیب در شین A و B به منظور محاسبه‌ی امپدانس‌های تونن درنظرگرفته شده‌اند و با دنبال کردن ولتاژ و جریان آنها، امپدانس تونن‌های شبکه تخمین زده می‌شوند.



[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

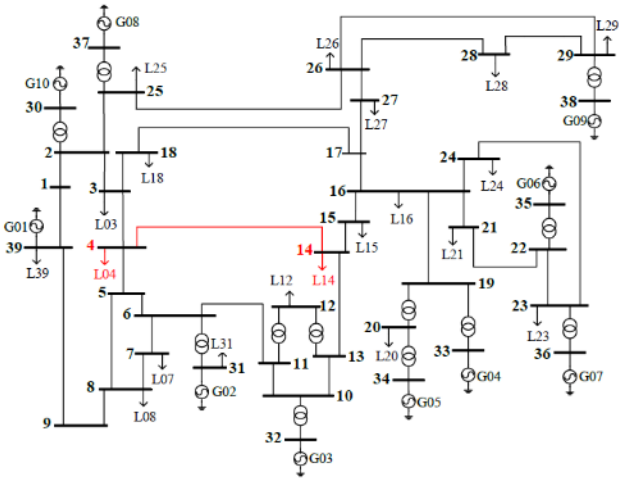
شکل (۶): فلوچارت الگوریتم مکان‌یابی خطای پیشنهادی

همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است اطلاعات ورودی الگوریتم مکان‌یابی پیشنهادی، به سه دسته‌ی اطلاعات آفلاین، اطلاعات آنلاین راه دور و اطلاعات آنلاین محلی تقسیم می‌شوند. اطلاعات آفلاین که شامل مقادیر امپدانس‌های اجزای شبکه و آرایش آنها می‌باشد، جهت تهیه‌ی بلنک اطلاعاتی رله مورد استفاده قرار می‌گیرد. اطلاعات آنلاین راه دور، شامل وضعیت کلیدها و امپدانس تونن محاسبه شده در پایانه‌ی B (با دنبال کردن ولتاژ و جریان بار L_B) می‌باشند و برای تخمین امپدانس‌های مدار معادل شبکه استفاده می شوند. اطلاعات آنلاین محلی که در پایانه‌ی A در دسترس رله می‌باشد، شامل وضعیت کلیدهای پایلنه‌ی A، ولتاژ و جریان بار L_A و جریان تزریقی پایلنه‌ی A به خط AB می‌باشند و به ترتیب به منظور تعیین و ضعیت خروج خط بعد از عملکرد سیستم حفاظت، تخمین امپدانس تونن دیده شده در پایانه‌ی A و انجام محاسبات رله‌ی دیستانس استفاده می شوند. شایان ذکر است در صورتیکه تغییر وضعیت کلیدهای پایانه‌ی A و پایانه‌ی B بعد از عملکرد سیستم حفاظت، مشخص کند که تنها خط انتقال AB از شبکه خارج شده است، می‌توان Zth'_A و Zth'_B را به طور مستقیم و با محاسبه‌ی امپدانس تونن شبکه در شرایط بعد از خروج خط، محاسبه کرد. در غیر اینصورت با مراجعه به بلنک اطلاعاتی رله، طبق گام ۴ بخش ۴-۳-، عمل می‌شود.

۵- پیاده‌سازی روش پیشنهادی

برای صحت سنجی روش پیشنهادی، این الگوریتم بر روی شبکه‌ی ۳۹ باسه استاندارد *IEEE* (*Zimmerman & Murillo-Sánchez, 2016*)، پیاده سازی شده است. برای انجام مطالعات مدنظر این تحقیق، خط انتقال موجود بین شین ۴ و شین ۱۴ انتخاب شده و جهت محاسبه‌ی امپدانس تونن شبکه در شین ۱۴، یک بار در شین ۱۴ (L_{14}) با قدرت $100 + j153\ MVA$ به شبکه‌ی استاندارد موجود اضافه شده است.

شبکه‌ی مورد مطالعه با تغییرات لحاظ شده در شکل (۷) مشاهده می‌شود.



شکل (۷): شبکه ۳۹ باسه استاندارد IEEE با اضافه شدن بار L14

۵-۲- محاسبه‌ی امپدانس‌های مدار معادل پیشنهادی در حالت آفلاین

برای شبکه‌ی شکل (۷)، با تشکیل ماتریس امپدانس شبکه (با فرض در مدار بودن کلیه‌ی اجزای شبکه و در حالت بار نامی)، امپدانس‌های تونن شبکه از دید پایانه‌های خط ۱۴-۴، در دو حالت در مدار بودن آن (Zth_A و Zth_B) و خروج آن (Zth'_A و Zth'_B)، به شرح جدول (۱) بدست می‌آید.

جدول (۱): مپدانس‌های تونن شبکه از دید پایانه‌های خط ۱۴-۴

پارامتر	مقدار (Ω)
Zth_4	۲.۴۰+۲۹.۴۸i
Zth_{14}	۲.۵۶+۳۱.۲۱i
Zth'_4	۲.۶۹+۳۳.۰۷i
Zth'_{14}	۳.۲۴+۳۸.۳۳i

با انتخاب سه معادله از بین روابط (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و(۱۴) امپدانس‌های مدار معادل پیشنهادی شکل (۲)، به شرح جدول (۲) محاسبه می‌شوند. این امپدانس‌ها نشان دهنده‌ی ساختار پایه‌ی شبکه‌ی شکل (۷) در حالت در مدار بودن کلیه‌ی عناصر شبکه می‌باشند و خروج هر عنصر شبکه باعث تغییر در این امپدانس‌ها خواهد شد.

جدول (۲): امپدانس‌های مدار معادل پیشنهادی شبکه ۳۹ باسه IEEE

پارامتر	مقدار (Ω)
Z_A	۳.۷۸+۴۷.۳۹i
Z_B	۵.۸۳+۶۶.۶۷i
Z_{AB}	۳.۴۹+۴۲.۸۰i

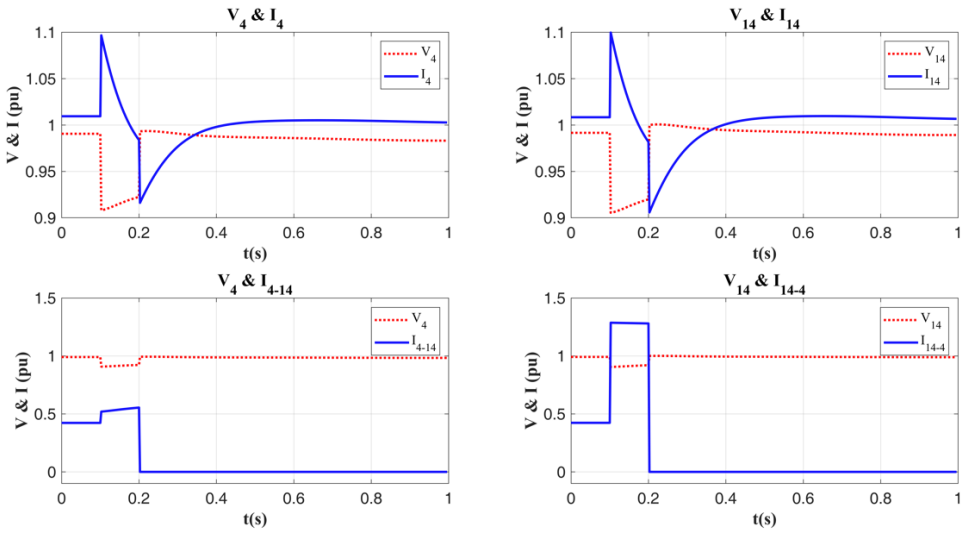
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

فرآیند شرح داده شده برای تشکیل جدول (۱) و جدول (۲) به ازای کلیه‌ی ساختارهای ممکن شبکه با رعایت معیار N-1 (خروج تکی تجهیزات)، انجام می‌شود تا بانک اطلاعاتی رله‌های منصوبه در شین ۴ و ۱۴ کامل گردد.

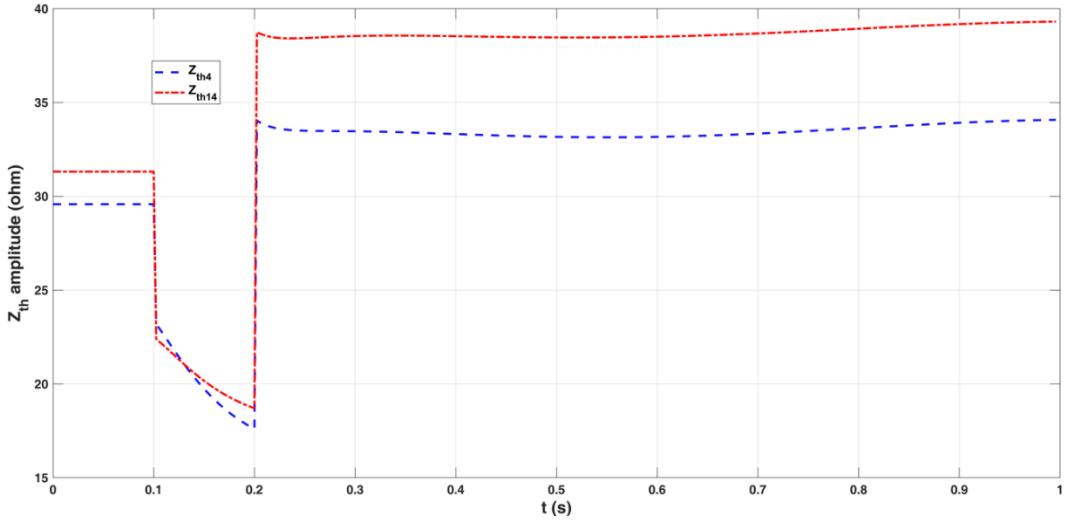
۳-۵- مطالعه موردی ۱

در مطالعه موردی اول فرض شده است که در سناریوهای مختلف یک خطای تک فاز به زمین با مقاومت‌های ۰، ۰.۵، ۵ و ۲۰ اهم و در فاصله‌های ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصدی طول خط ۱۴-۴ نسبت به مبدا شین ۴، رخ می‌دهد و سیستم حفاظت جهت رفع خطا، پس از ۱۰۰ میلی ثانیه خط ۱۴-۴ را با باز کردن کلیدهای دو سمت آن، از مدار خارج می‌کند. تغییرات جریان بار L_4 و L_{14} (I_4 و I_{14})، ولتاژ شین‌های ۴ و ۱۴ (V_4 و V_{14}) و جریان تزریقی هر شین به خط ۱۴-۴ (I_{4-14} و I_{14-4}) برای سناریوی ۸ (بر اساس شماره‌گذاری‌های جدول (۴))، در شکل (۸) آمده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]



شکل (۸): تغییرات ولتاژ و جریان بارهای L_4 و L_{14} و خط ۱۴-۴ در سناریوی ۸



شکل (۹): تغییرات امپدانس تونن شبکه از دید شین‌های ۴ و ۱۴ قبل، حین و بعد از رفع (قطع خط ۴-۱۴) خطای تکفاز به زمین در سناریوی ۸

با دنبال کردن جریان بارهای L_4 و L_{14}، امپدانس‌های تونن شبکه مطابق شکل (۹) بدست می‌آید. مقادیر حدی این امپدانس‌ها در جدول (۳) آمده‌است و همانطور که انتظار می‌رفت با توجه به عدم تغییر در ساختار پلیه‌ی شبکه، مقادیر ستون دوم و چهارم جدول (۳)، که امپدانس‌های تونن محاسبه شده قبل از وقوع خطا (Zth_A و Zth_B) و پس از قطع خط و رفع خطا (Zth'_A و Zth'_B) می‌باشند، همان مقادیر جدول (۱) می‌باشند. در زمان وقوع خطا امپدانس تونن شبکه دچار تغییر می‌شود که مقدار حدی آن برای سناریوی ۸، مطابق ستون سوم جدول (۳) می‌باشد.

جدول (۳): امپدانس‌های تونن شبکه، قبل، حین و بعد از وقوع خطا تکفاز به زمین طبق سناریوی ۸ مطالعه موردی ۱

امپدانس تونن	مقدار محاسبه شده قبل خطا (Ω)	مقدار محاسبه شده حین خطا در صورت استمرار خطا (Ω)	مقدار محاسبه شده بعد از رفع خطا و قطع خط (Ω)
Zth_4	$۲.۴۰+۲۹.۴۸i$	$۸.۰۱+۲۶.۵۸i$	$۲.۶۹+۳۳.۰۷i$
Zth_{14}	$۲.۵۶+۳۱.۲۱i$	$۱۰.۰۱+۲۷.۴۹i$	$۳.۲۴+۳۸.۳۳i$

با مشخص شدن پارامترهای شبکه، به کمک رابطه‌ی (۱۰) برای سناریوهای مختلف مطالعه‌ی موردی ۱، مکان (d^{cal}) و مقاومت (R_f^{cal}) خطای تخمین زده شده، محاسبه می شوند. میزان خطای

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

محا سبات (Er)، به ازای ۱۲ سناریوی مختلف، مطابق جدول (۴) محا سبه می شود. در این جدول بالانویس ac ن شانگر مقدار واقعی و بالانویس cal نشانگر مقدار تخمین زده شده توسط الگوریتم پیشنهادی می‌با شد. برای محا سبه‌ی خطا نیز از رابطه‌ی (۱۷) ا ستفاده شده که در آن متغییر X، برای محا سبه‌ی خطای تخمین d و R_F، با هر کدام از آنها جایگزین می‌شود.

$$Er = \frac{(X^{cal} - X^{ac})}{X^{ac}} * 100 \qquad (۱۷)$$

جدول (۴): نتایج مطالعه موردی ۱ برای ۱۲ سناریوی تعریف شده

سناریو	$R_F^{ac}(\Omega)$	$d^{ac}(\%)$	$R_F^{cal}(\Omega)$	$Er(\%)$	$d^{cal}(\%)$	$Er(\%)$
۱	۰	۲۰	۰	۰	۲۰	۰
۲	۰.۵	۲۰	۰.۵۰۱	۰.۲۴۲	۲۰.۰۰۵	۰.۰۲۶۷
۳	۵	۲۰	۵.۰۱۱	۰.۲۱۴	۲۰.۰۰۵	۰.۰۲۲۹
۴	۲۰	۲۰	۲۰.۰۳۸	۰.۱۹	۲۰.۰۰۴	۰.۰۱۷۵
۵	۰	۵۰	۰.۰۰۸	۰.۰۸	۵۰.۰۰۴	۰.۰۰۸
۶	۰.۵	۵۰	۰.۵۰۵	۰.۹۴	۵۰.۰۴۷	۰.۰۹۴
۷	۵	۵۰	۵.۰۳۶	۰.۷۲	۵۰.۰۳۶	۰.۰۷۲
۸	۲۰	۵۰	۲۰.۰۷۲	۰.۳۶	۵۰.۰۱۸	۰.۰۳۶
۹	۰	۸۰	۰.۰۰۱	۰.۱	۸۰.۰۰۸	۰.۰۱
۱۰	۰.۵	۸۰	۰.۵۰۵	۱.۰۸	۸۰.۰۸۶	۰.۱۰۸
۱۱	۵	۸۰	۵.۰۵۳	۱.۰۶	۸۰.۰۸۵	۰.۱۰۶
۱۲	۲۰	۸۰	۲۰.۱۷	۰.۸۵	۸۰.۰۶۸	۰.۰۸۵

۱-۱- مطالعه موردی ۲

در مطالعه موردی دوم فرض شده ا ست که خط ۱۸-۱۷ قبل از وقوع خطا در خط ۱۴-۴، از مدار خارج شده و شبکه به تعادل ر سیده ا ست. حال در سناریوهای مختلف یک خطای تک فاز به زمین با مقاومت‌های ۰، ۰.۵، ۵ و ۲۰ اهم و در فا صله‌های ۲۰، ۵۰ و ۸۰ در صدی طول خط ۱۴-۴ نسبت به مبدا شین ۴، رخ می‌دهد و سیستم حفاظت جهت رفع خطا، پس از ۱۰۰ میلی ثانیه خط ۱۴-۴ را با باز کردن کلیدهای دو سمت آن، از مدار خارج می‌کند.

با خروج خط ۱۸-۱۷، Zth_A و Zth_B با در نظر ال کردن تغییرات جریان و ولتاژ بارهای L_4 و L_{14} مطابق جدول (۵) بدست می‌آیند (گام ۲ بخش ۳-۳-). اما همانطور که گفته شد امکان اندازه‌گیری م ستقیم Zth'_A و Zth'_B در شرایط بهره‌برداری عادی شبکه فراهم نمی‌با شد و باید ستی با ا ستفاده از اطلاعات آفلاین محا سبه شده و ذخیره شده در حافظه رله و به کمک روش‌های د سته‌بندی، آنها را از حافظه رله ا ستخراج کرد (گام ۳ بخش ۳-۳-). از آنجاییکه در صورت وقوع خطا در خط ۱۴-۴برای رفع آن، خط از مدار خارج می شود، می‌توان با اندازه‌گیری امپدانس تونن شبکه در شرایط پس از رفع خطا (خروج خط)، Zth'_A و Zth'_B را محا سبه کرد (گام ۴ بخش ۳-۳-). مقادیر جدول (۵) ن شان می‌دهد که در هر دو حالت، مراجعه اطلاعات آفلاین رله (Z_{Table} تکمیل شده در گام ۱ بخش ۳-۳-) در شرایط قبل از وقوع خطا و اندازه‌گیری مستقیم امپدانس تونن شبکه در شرایط پس از رفع خطا، پاسخ یکسانی بدست آمده است.

جدول (۵): امپدانس‌های تونن شبکه قبل، حین و بعد از اجرای سناریوی ۸، در مطالعه موردی ۲

امپدانس تونن	مقدار محاسبه شده قبل خطا (Ω)	مقدار محاسبه شده حین خطا در صورت استمرار خطا (Ω)	مقدار محاسبه شده بعد از رفع خطا و قطع خط (Ω)
Zth_4	$۲.۴۶+۳۰.۰۲i$	$۱۱.۰۴+۱۲.۲۷i$	$۲.۹۱+۳۴.۸۷i$
Zth_{14}	$۲.۵۶+۳۱.۲۲i$	$۱۱.۵۶+۱۲.۶۹i$	$۳.۳۲+۳۸.۸۴i$

با مراجعه به کتابخانه‌ی رله (Z_{Table})، امپدانس های معادل شبکه‌ی پیشنهادی که متناظر با امپدانس‌های تونن محا سبه شده قبل از وقوع خطا و بعد از رفع آن می‌با شند، مطابق جدول (۶) بد ست می‌آیند. این امپدانس‌ها را با محا سبه م ستقیم (از طریق ت شکیل دستگاه معادلات، به کمک روابط (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و(۱۴))، نیز می‌توان بدست آورد. در این مطالعه، در هر دو حالت پاسخ یکسانی حاصل شده است.

جدول (۶): امپدانس‌های مدار معادل پیشنهادی شبکه در حالت خروج خط ۱۸-۱۷

پارامتر	مقدار (Ω)
Z_A	$۴.۱۰+۵۰.۱۹i$
Z_B	$۵.۳۴+۶۲.۸۷i$
Z_{AB}	$۴.۶۶+۵۱.۴۰i$

جدول (۷): نتایج مطالعه موردی ۲ برای ۱۲ سناریوی تعریف شده

سناریو	$R_f^{ac}(\Omega)$	$d^{ac}(\%)$	$R_f^{cal}(\Omega)$	$Er(\%)$	$d^{cal}(\%)$	$Er(\%)$
۱	۰	۲۰	۰	۰	۲۰	۰
۲	۰.۵	۲۰	۰.۵۰۱	۰.۲۴۶	۲۰.۰۰۵	۰.۰۲۵
۳	۵	۲۰	۵.۰۱۱	۰.۲۲۲	۲۰.۰۰۴	۰.۰۲۰
۴	۲۰	۲۰	۲۰.۰۳۴	۰.۱۷۰	۲۰.۰۰۳	۰.۰۱۶
۵	۰	۵۰	۰.۰۰۱	۰.۰۹۰	۵۰.۰۰۴	۰.۰۰۸
۶	۰.۵	۵۰	۰.۵۰۵	۰.۹۸۰	۵۰.۰۴۹	۰.۰۹۸
۷	۵	۵۰	۵.۰۴۲	۰.۸۴۰	۵۰.۰۴۱	۰.۰۸۲
۸	۲۰	۵۰	۲۰.۰۷۶	۰.۳۸۰	۵۰.۰۱۹	۰.۰۳۸
۹	۰	۸۰	۰.۰۰۱	۰.۱۰۰	۸۰.۰۰۸	۰.۰۱۰
۱۰	۰.۵	۸۰	۰.۵۰۵	۱.۰۸۰	۸۰.۰۸۶	۰.۱۰۸
۱۱	۵	۸۰	۵.۰۵۸	۱.۱۶۰	۸۰.۰۹۳	۰.۱۱۶
۱۲	۲۰	۸۰	۲۰.۱۹۰	۰.۹۵۰	۸۰.۰۷۶	۰.۰۹۵

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

با مشخص شدن ساختار شبکه، به کمک رابطه‌ی (۱۰)، برای سناریوهای مختلف مطالعه‌ی موردی ۲، مکان (d^{cal}) و مقاومت (R_f^{cal}) خطای تخمین زده می شود. میزان خطای محاسبات (Er)، به ازای ۱۲ سناریوی مختلف، مطابق جدول (۷) محاسبه می‌شود.

تحلیل و مقایسه‌ی نتایج جدول (۴) و جدول (۷) نشان می‌دهد، که روش پیشنهادی در برابر تغییرات ساختار شبکه، مقاومت قابل ملاحظه‌ای دارد. با توجه به تغییرات اعمال شده در ساختار شبکه در دو مطالعه موردی انجام شده، خطای روش مکان‌یابی بسیار کم و مستقل از تغییرات ساختار شبکه و تغییر مقاومت خطا است.

۶- آنالیز حساسیت الگوریتم پیشنهادی

در فرآیند اجرای الگوریتم مکان‌یابی پیشنهادی، از شروع الگوریتم و نمونه‌برداری ولتاژ و جریان شبکه تا پایان الگوریتم و محاسبه‌ی مکان و مقاومت خطا، ایجاد خطای محاسباتی در سه مرحله محتمل است:

مرحله‌ی اول: تغییر در ولتاژ و جریان شبکه (به سبب تغییرات بار) و متعاقب آن احتمال وقوع خطا در محاسبه‌ی امپدانس‌های تونن شبکه

مرحله‌ی دوم: ایجاد خطا در محاسبه‌ی امپدانس‌های مدار معادل (جهت تشخیص آرایش شبکه) به سبب خطای ایجاد شده در محاسبه‌ی امپدانس‌های تونن شبکه

مرحله‌ی سوم: وقوع خطای محاسبه‌ی مکان و مقاومت خطا به سبب خطای ایجاد شده در محاسبه‌ی امپدانس‌های مدار معادل

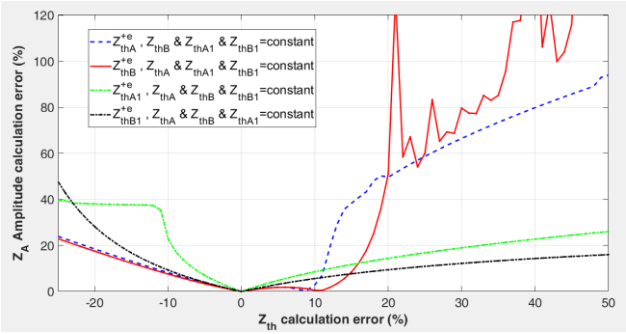
در ادامه این خطاها و میزان تاثیر گذاری آن‌ها بر متغییر های وابسته‌ی آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۶-۱- میزان حساسیت امپدانس‌های تونن شبکه به تغییرات بار

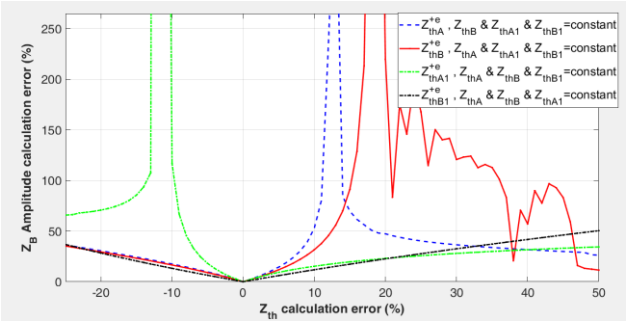
با توجه به توزیع بار در کل شبکه و بیشتر بودن امپدانس بار از امپدانس خطوط، ژنراتورها و ترانسفورماتورها، تاثیر تغییر بار بر امپدانس تونن شبکه، در مقایسه با تاثیر خروج تجهیزات شبکه بر آنها، بسیار ناچیز و تقریبا قابل صرفنظر می‌باشد مگر اینکه یک بار محلی با توان بالا، در نزدیکی پایانه‌های خط وجود داشته باشد که در این صورت تاثیر خروج آن بر امپدانس‌های مدار معادل به طور مجزا بررسی و در حافظه‌ی رله ذخیره می شود. علاوه بر آن در روش مکان‌یابی پیشنهادی به دلیل استفاده از شبکه‌ی تحت تاثیر خطای خالص (شکل (۵))، جریان بار در محاسبات حذف می‌شود.

۶-۲- میزان حساسیت امپدانس‌های مدار معادل به امپدانس‌های تونن شبکه

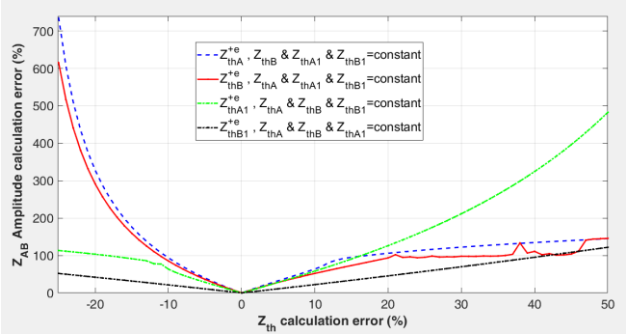
برای محاسبه‌ی میزان حساسیت امپدانس های مدار معادل به امپدانس‌های تونن تخمین زده شده، با ثابت نگه‌داشتن سه عدد از امپدانس‌های تونن و اضافه کردن خطا به امپدانس تونن دیگر طبق رابطه‌ی (۱۸)، امپدانس‌های مدار معادل برای سناریوی شماره ۸ مطالعه‌ی موردی ۱، محاسبه شده است. میزان خطای تحمیل شده در محاسبه‌ی امپدانس‌های مدار معادل Z_A، Z_B و Z_{AB} به ترتیب در شکل (۱۰)، شکل (۱۱) و شکل (۱۲) ترسیم شده است. در رابطه‌ی (۱۸)، X پارامتر فاقد خطا و X^{+e} همان پارامتر با اضافه شدن خطا و e میزان خطا بر حسب % می‌باشد.



شکل (۱۰): حساسیت Z_A به خطای محاسباتی امپدانس‌های تونن



شکل (۱۱): حساسیت Z_B به خطای محاسباتی امپدانس‌های تونن



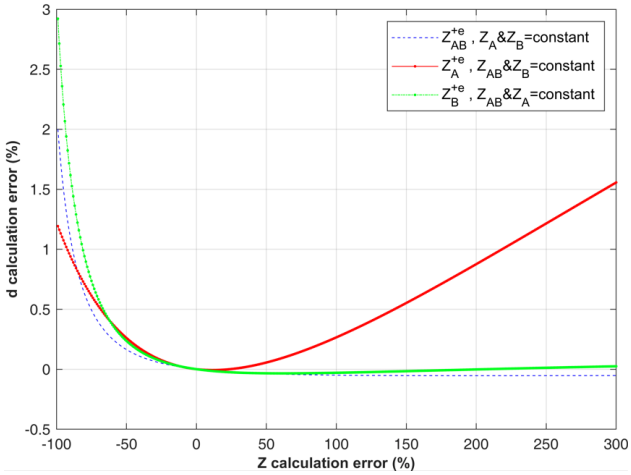
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

شکل (۱۲): حساسیت Z_{AB} به خطای محاسباتی امپدانس‌های تونن

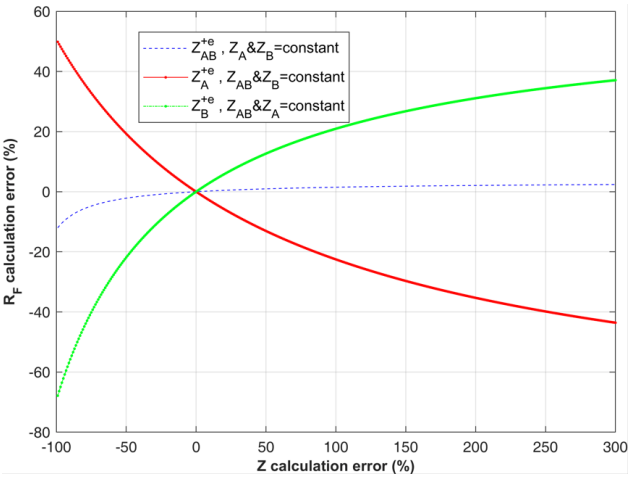
$$X^{+e} = X * (1 + \frac{e}{100}) \quad (۱۸)$$

۳-۶- میزان حساسیت مکان و مقاومت خطا به امپدانس‌های مدار معادل

برای محاسبه‌ی میزان حساسیت روش مکان‌یابی خطای پیشنهادی به وجود خطا در محاسبه‌ی امپدانس‌های مدار معادل، با ثابت نگه‌داشتن دو پارامتر مدار معادل و اضافه کردن خطا به پارامتر دیگر مشابه رابطه‌ی (۱۸)، مکان و مقاومت خطا برای سناریوی شماره ۸ مطالعه‌ی موردی ۱، محاسبه شده است. میزان خطای تحمیل شده در محاسبه‌ی مکان و مقاومت خطا بر اساس رابطه‌ی (۱۰)، به ترتیب در شکل (۱۳) و شکل (۱۴) ترسیم شده است.



شکل (۱۳):حساسیت مکان خطا به خطای محاسباتی پارامترهای مدار معادل



شکل (۱۴): حساسیت مقاومت خطا به خطای محاسباتی پارامترهای مدار معادل

همانطور که در شکل (۱۳) مشاهده می شود روش مکان‌یابی پیشنهادی، مقاومت بسیار بالایی در برابر خطای محاسبه‌ی پارامترهای مدار معادل پیشنهادی دارا می‌باشد. این موضوع در (*Eisa & Ramar, 2010*) نیز بررسی و تایید شده است.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک روش مکان‌یابی خطای جدید برای خطوط انتقال دو پایانه‌ای مجهز به سیستم ارتباطی با سرعت بالا، واقع در یک شبکه‌ی قدرت به هم پیوسته، پیشنهاد شد که در آن ابتدا به کمک امپدانس تونن محاسبه شده در پایانه‌های خط انتقال پارامترهای شبکه تخمین زده می‌شود و سپس به کمک اطلاعات فازورهای جریان و ولتاژ پیش از خطا و حین خطا که از اندازه‌گیری‌های پایلنه‌ی محلی خط به دست می‌آید و اطلاعات آفلاین شبکه، مکان و مقاومت خطا با دقت بالا تخمین زده می شود. با توجه به ماهیت فرآیند مکان‌یابی خطا که در آن دقت پاسخ نسبت به سرعت آن اولویت دارد، این روش علاوه بر تامین دقت بسیار بالا، برای اجرای آفلاین از داده‌های جریان و ولتاژ ذخیره شده در حافظه‌ی رله‌ی دیستانس و با یک تاخیر زمانی کوتاه پس از عملکرد سیستم حفاظت استفاده می‌کند تا هم در لحظه‌ی وقوع خطا بار محاسباتی اضافی به رله تحمیل نکند و هم مزیت پاسخ آنلاین را داشته باشد.

نتایج آنالیز حساسیت‌های انجام شده هم نشان می‌دهد که مدار معادل پیشنهادی نسبت به خطای محاسبه‌ی امپدانس‌هایش مقاومت بالایی دارد و این خطا تاثیری قابل توجهی بر دقت مکان‌یابی ندارد هرچند که تاثیر آن در محاسبه‌ی مقاومت خطا می‌تواند بالا باشد. اما امپدانس‌های مدار معادل، نسبت به خطای محاسبه‌ی امپدانس تونن شبکه تاثیرپذیری بالاتری دارند و در نتیجه کارایی روش پیشنهادی در تعیین مکان دقیق و مقدار مقاومت خطا وابستگی بیشتری به خطای تخمین امپدانس های تونن شبکه از دید پایانه های خط، دارد. اما خوشبختانه با توجه به محدود بودن تعداد مانورهای خروج تجهیزات در سطح شبکه‌ی انتقال (رعایت معیار $N-1$ در بهره‌برداری شبکه)، فرصت کافی برای پایدار شدن شبکه پس از انجام مانورهای مذکور، وجود دارد. همچنین در صورت خروج خط مورد مطالعه، به سبب اینکه روش پیشنهادی به محاسبات آنلاین رله وابسته نمی‌باشد، با درنظر گرفتن فرصت کافی برای پایدار شدن شبکه، می‌توان میزان خطای تخمین امپدانس‌های تونن را به میزان قابل توجهی کاهش داد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

با بررسی سناریوهای مختلف تعریف شده در این تحقیق، حداکثر خطای ٪۴ در محاسبه‌ی امپدانس تونن مشاهده شد که این میزان خطا در بدترین شرایط، حداکثر ٪۱۰ در محاسبه‌ی امپدانس‌های مدار معادل خطا ایجاد می‌کند. خطا ٪۱۰ در محا سبه‌ی امپدانس‌های مدار معادل، خطای زیر ٪۰.۲ برای محا سبه‌ی مکان خطا و زیر ٪۶ برای محا سبه‌ی مقاومت خطا به دنبال دارد.

مراجع

Abdelkader, S. M., Eladl, A. A., Saeed, M. A., & Morrow, D. J. (2018). Online Thévenin equivalent determination using graphical phasor manipulation. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 97, 233-239 .

Abdelkader, S. M., & Morrow, D .J. (2012). Online tracking of Thévenin equivalent parameters using PMU measurements. IEEE Transactions on Power Systems, 27(2), 975-983 .

Adem, S. H. (2020). Fault Detection, Protection and Location on Transmission Line. A Review .

Anderson, P. M., Henville, C. F., Rifaat, R., Johnson, B., & Meliopoulos, S. (2022). Power system protection. John Wiley & Sons .

Arancibia, A., Soriano–Rangel, C. A., Mancilla–David, F., Ortega, R., & Strunz, K. (2020). Finite–time identification of the Thévenin equivalent parameters in power grids. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 116, 105534 .

Cook, V. (1986). Fundamental aspects of fault location algorithms used in distance protection. IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution) ,

Eisa, A. A. A., & Ramar, K. (2010). Accurate one-end fault location for overhead transmission lines in interconnected power systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 32(5), 383-389. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2009.11.005

Eriksson, L., Saha, M. M., & Rockefeller, G. (1985). An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remore-end infeed. IEEE Transactions on Power apparatus and systems(2), 423-436 .

Izykowski, J ,.Rosolowski, E., & Saha, M. M. (2004). Locating faults in parallel transmission lines under availability of complete measurements at one end. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 151(2), 268-273 .

Johns, A., & Jamali, S. (1990). Accurate fault location technique for power transmission lines. IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution) ,

Novosel, D., Hart, D. G., Udren, E., & Garitty, J. (1996). Unsynchronized two-terminal fault location estimation. IEEE Transactions on Power Delivery, 11(1), 130-138 .

Paladhi, S., & Pradhan, A. K. (2017). Adaptive zone-1 setting following structural and operational changes in power system. IEEE Transactions on Power Delivery, 33(2), 560-569 .

Panahi, H., Zamani, R., Sanaye-Pasand ,M., & Mehrjerdi, H. (2021). Advances in transmission network fault location in modern power systems: Review, outlook and future works. IEEE Access, 9, 158599-158615 .

Saha, M. M., Izykowski, J., & Rosolowski, E. (2010). Fault location on power networks) Vol. 2). Springer .

Schweitzer III, E. O. (1983). Evaluation and development of transmission line fault-locating techniques which use sinusoidal steady-state information. Computers & electrical engineering, 10(4), 269-278 .

Takagi, T., Yamakoshi, Y., Yamaura, M., Kondow, R., & Matsushima, T. (1982). Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. IEEE Transactions on Power apparatus and systems(8), 2892-2898 .

Wiszniewski, A. (1983). Accurate fault impedance locating algorithm. IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution) ,

Yuan, H., & Li, F. (2014). A comparative study of measurement-based Thevenin equivalents identification methods. 2014 North American Power Symposium (NAPS) ,

Yun, Z., Cui, X & ,.Ma, K. (2019). Online Thevenin equivalent parameter identification method of large power grids using LU factorization. IEEE Transactions on Power Systems, 34(6), 4464-4475 .

Zimmerman, R. D., & Murillo-Sánchez, C. E. (2016). Matpower 6.0 user's manual. Power Systems Engineering Research Center, 9 .

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]