

An Improved Method for Online Fault Location Based on the Phasor Measurement Unit in Transmission Lines Considering the Thermal Limit**Mohammad Reza Rezaei¹, Ph.D Student, Seyed Reza Hadian-Amrei^{1,2}, Assistant Professor, Mohammad Reza Miveh³, Assistant Professor**¹Department of Electrical Engineering- Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran²Department of Electrical Engineering- Jiroft Branch, Islamic Azad University, Jiroft, Kerman, Iran³Department of Electrical Engineering- Tafresh University, Tafresh, Iran
m.rezaei94@iau-arak.ac.ir, hadian.r@iauji.ac.ir, miveh@tafreshu.ac.ir**Abstract**

In this paper, an improved online method for simultaneous estimation of parameters and fault location in transmission lines based on Phasor Measurement Units (PMUs) installed on both sides of the transmission line is proposed. Unlike offline methods, the proposed method does not depend on the geometric characteristics of the lines, the fault resistance and the impedance of the equivalent Thevenin sources. The most important application of line modeling is to estimate the thermal rating of transmission lines, which limits the power transmission capacity. Offline methods cause part of the power transmission capacity to be unused and create unrealistic congestion in the transmission system. Therefore, the estimation must be determined in a way that is online and has the appropriate accuracy and speed. Calculating the thermal rating is a complex task that requires estimating the parameters of the lines, calculating the temperature of the lines and determining the climatic conditions of the environment around the studied lines. Therefore, a new method based on a combination of direct conductor temperature monitoring method and method based on climatic conditions is proposed in this paper. In this method, first, the parameters of the transmission line are estimated and then using these parameters and the weather conditions of the desired line, the thermal rating is calculated online. In this paper, the Nonlinear Least Squares (NLS) method is used to perform the process of simultaneously estimating the fault location and line parameters. The simulations were performed in the MATLAB software environment on a standard series capacitor-compensated transmission lines. The simulation results show that the proposed method has high accuracy and speed and can play a significant role in increasing the speed of line repairs and system reliability and reducing social and economic losses.

Keywords: line parameters estimation, online fault location estimation, phasor measurement unit, series capacitor-compensated lines, thermal rating**Received:** 12 November 2021**Revised:** 2 January 2022**Accepted:** 1 February 2022**Corresponding Author:** Dr. Seyed Reza Hadian-Amrei

یک روش بهبودیافته برای مکان‌یابی آنلاین خط مبتنی بر واحد اندازه‌گیری فازور در خطوط انتقال با در نظر گرفتن حد حرارتی

محمدرضا رضائی^۱، دانشجوی دکتری، سید رضا هادیان امرئی^۲، استادیار، محمدرضا میوه^۳، استادیار

۱- گروه مهندسی برق- واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۲- گروه مهندسی برق- واحد جیرفت، دانشگاه آزاد اسلامی، جیرفت، کرمان، ایران

۳- گروه مهندسی برق- دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

m.rezaei94@iau-arak.ac.ir, hadian.r@iaui.ac.ir, miveh@tafreshu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک روش بهبودیافته آنلاین برای تخمین همزمان پارامترها و محل خطا در خطوط انتقال مبتنی بر واحدهای اندازه‌گیری فازور نصب شده در دو طرف خط انتقال پیشنهاد شده است. برخلاف روش‌های آفلاین، این روش به مشخصات هندسی خطوط، مقاومت خط و امپدانس منابع معادل تونن بستگی ندارد. مهمترین کاربرد مدل‌سازی خطوط، تخمین حد حرارتی خطوط انتقال است که ظرفیت انتقال توان را محدود می‌سازد. روش‌های آفلاین به کار رفته، باعث بدون استفاده ماندن بخشی از ظرفیت انتقال توان و ایجاد تراکم غیرواقعی در سیستم انتقال می‌شوند. بنابراین، تخمین حد حرارتی باید به روشی تعیین گردد که به صورت آنلاین بوده و دارای دقت و سرعت مناسبی باشد. محاسبه حد حرارتی کار پیچیده‌ای است که نیاز به تخمین پارامترهای خطوط، محاسبه دمای خطوط و تعیین شرایط آب و هوایی محیط اطراف خطوط مورد مطالعه دارد. لذا در این مقاله، روش جدیدی مبتنی بر ترکیب روش پایش مستقیم دمای هادی و روش مبتنی بر شرایط آب و هوایی پیشنهاد شده است. در این روش، ابتدا پارامترهای خط انتقال تخمین زده شده و سپس با استفاده از این پارامترها و شرایط آب و هوایی خط مورد نظر، حد حرارتی به صورت آنلاین محاسبه می‌گردد. برای انجام فرآیند تخمین همزمان محل خطا و پارامترهای خطوط از روش حداقل مربعات غیرخطی (NLS) استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزاری متلب و بر روی یک سیستم انتقال استاندارد با جبران‌ساز سری انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از دقت و سرعت بالایی برخوردار بوده و می‌تواند نقش بسزایی در افزایش سرعت تعمیر خطوط و قابلیت اطمینان سیستم و همچنین کاهش زیان‌های اجتماعی و اقتصادی داشته باشد.

کلمات کلیدی: تخمین آنلاین محل خطا، تخمین پارامترهای خطوط، حد حرارتی، خطوط جبران شده با خازن سری، واحد اندازه‌گیری فازور

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید رضا هادیان امرئی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: اراک- بلوار امام خمینی(ره)- دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک- دانشکده فنی و مهندسی

۱- مقدمه

خطوط انتقال به‌عنوان بخش مهمی از سیستم قدرت شناخته می‌شود. این خطوط در مقایسه با سایر اجزاء سیستم قدرت با طی مسافت‌های طولانی و وجود شرایط آب و هوایی و محیطی مختلف، در معرض خطاهای مختلفی است [۱]. هنگامی که خطایی در خط انتقال رخ می‌دهد، سیستم حفاظتی قسمت معیوب را جدا کرده و سپس واحد تعمیر و نگهداری، قسمت معیوب را شناسایی و صدمات ناشی از خطا را رفع می‌نمایند [۲]. بنابراین، تعیین دقیق محل خطا در کمترین زمان ممکن بسیار حیاتی است.

روش‌های مکان‌یابی خطا را می‌توان به دو روش ناحیه معمولی و ناحیه گسترده طبقه‌بندی نمود. مکان‌یابی خطا در روش ناحیه معمولی به سه گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌شود. گروه اول مبتنی بر امیدانس بوده و از مولفه فرکانس اصلی سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده برای مکان‌یابی خطا استفاده می‌کند [۳]. گروه دوم مبتنی بر امواج گذرا است که از امواج سیار ناشی از وجود خطا برای تعیین محل خطا استفاده می‌کند [۴] و گروه آخر، روشی مبتنی بر هوش مصنوعی است که از شبکه‌های عصبی و سیستم‌های منطق فازی برای تعیین دقیق محل خطا استفاده می‌کند [۵]. روش‌های مکان‌یابی خطای ناحیه گسترده نیز خود به دو گروه عمده مبتنی بر امواج گذرا [۶] و مبتنی بر امیدانس [۷] تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های مبتنی بر امواج گذرا به تجهیزات با سرعت نمونه‌برداری بالا نیاز داشته در حالی که روش‌های مبتنی بر امیدانس به سرعت بسیار پایین‌تری نیاز دارند.

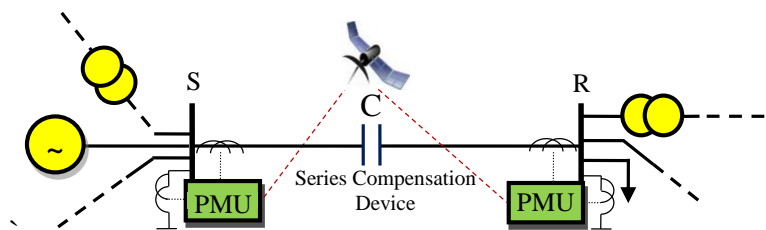
با مقایسه بین روش‌های معمولی و ناحیه گسترده می‌توان دریافت که شبکه‌های برق فعلی در سراسر جهان در حال حرکت به سمت شبکه‌های برق هوشمند هستند [۸]. سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده^۱ (WAMS) به‌عنوان یک فناوری نوین اندازه‌گیری و جمع‌آوری اطلاعات شناخته می‌شود. واحدهای اندازه‌گیری فازور^۲ (PMU) مهم‌ترین بخش این سیستم‌ها هستند که در روش مکان‌یابی خطای ناحیه گسترده مبتنی بر امیدانس، نیاز به اندازه‌گیری همگام فازورهای به‌دست آمده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی^۳ (GPS) واحدها است [۹]. از آنجا که واحدهای اندازه‌گیری فازور، جهت پایش و تحلیل سیستم‌های قدرت دارای هزینه‌های بالایی است، لذا استفاده کمینه از تعداد آنها به‌منظور ایجاد رؤیت‌پذیری سیستم در مرجع [۱۰] پیشنهاد شده که به دنبال آن قابلیت اطمینان سیستم نیز افزایش یافته است. قابل ذکر است که در ساختار اصلی واحدهای اندازه‌گیری فازور از یک پردازشگر سیگنال دیجیتال بهره گرفته شده است. این پردازشگر دیجیتالی از سیگنال‌های ولتاژ و جریان با نرخ حداقل ۲۸۸۰ نمونه در هر ثانیه نمونه‌برداری می‌کند. این نرخ معادل ۴۸ نمونه در هر سیکل است. واحدهای اندازه‌گیری فازور کمیت‌های ولتاژ و جریان را ۵۰ بار در ثانیه اندازه‌گیری می‌کند. با توجه به سرعت بالای پردازش، زمان پاسخ‌گویی بسیار بالا در حد چند میلی-ثانیه را در پی خواهد داشت.

یکی از مهم‌ترین مسائل دستگاه‌های اندازه‌گیری همگام، قابلیت اطمینان سیگنال سیستم موقعیت‌یاب جهانی است. عوامل غیرقابل پیش‌بینی و کنترل‌ناپذیر مختلفی مانند اختلال‌های جوی، خرابی آنتن سیستم موقعیت‌یاب جهانی، تداخل امواج الکترومغناطیسی، تغییرات آب و هوایی، نویز در سیگنال سیستم موقعیت‌یاب جهانی و تغییرات دمای خورشید ممکن است در برخی اوقات سبب قطع سیگنال گیرنده‌های سیستم موقعیت‌یاب جهانی شود [۱۱]. در صورت قطع سیگنال سیستم موقعیت‌یاب جهانی، روش پیشنهادی در مرجع [۱۲]، موثر نخواهد بود. در مرجع‌های [۱۳]، [۱۴] و [۱۵] زمانی که سیگنال همگام‌سازی سیستم موقعیت‌یاب جهانی در برخی از شین‌های شبکه وجود نداشته باشد، اندازه‌گیری‌ها در محاسبات در نظر گرفته نمی‌شود و تعیین محل خطا توسط سایر دستگاه‌های اندازه‌گیری همگام انجام می‌شود. مرجع‌های [۱۶] و [۱۷]، روش‌هایی را معرفی نموده‌اند که در صورت نبود زاویه همگام‌سازی از دامنه استفاده می‌کند. تکنیک پیشنهادی در مرجع [۱۸]، دامنه‌های ولتاژ را در لحظه قطع سیگنال سیستم موقعیت‌یاب جهانی در نظر می‌گیرد. به این ترتیب، دستگاه‌های اندازه‌گیری فعلی، بخش مهم دیگری از اطلاعات شبکه هستند. زمانی که ترانسفورمر ولتاژ در برخی از شین‌ها وجود نداشته باشد و یا اطمینانی از صحت کار دستگاه‌های اندازه‌گیری ولتاژ موجود نباشد، ترانسفورمر جریان^۴ (CT) شین‌های مربوطه، به مسئله تعیین محل خطا کمک شایانی می‌کند. علاوه بر این، در پست فقط یک ترانسفورمر ولتاژ وجود دارد، ولی به دلیل تعداد بالای خطوط متصل به پست، ترانسفورمرهای جریان مختلفی وجود دارد [۱۹]. بنابراین، ترکیب دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان در کنار دستگاه‌های اندازه‌گیری ولتاژ اطلاعات جامع و کاملی را به ما می‌دهد.

یکی از مهمترین مدل‌سازی‌های لازم برای انجام مطالعات مربوط به تخمین محل خطا، مدل‌سازی خطوط انتقال است. روش‌های متفاوتی برای تخمین پارامترهای خطوط انتقال شامل مقاومت سری، راکتانس سری و سوسپیتانس موازی ارائه شده است. تخمین پارامترهای خطوط انتقال ساده دو ترمیناله و سه ترمیناله [۱۷] و تخمین پارامترهای خطوط انتقال جبران شده سری در مرجع [۱۹] ارائه شده است. در این مرجع‌ها از ترکیب واحد اندازه‌گیری فازور و سیستم جمع‌آوری داده و کنترل نظارتی^۵ (SCADA) که به صورت آنلاین است استفاده شده که سبب کاهش دقت تخمین پارامترها می‌شود. به دلیل ناتوانی سیستم جمع‌آوری داده و کنترل نظارتی در ارائه داده‌های توالی‌های صفر و منفی، امکان مدل‌سازی سه فاز خطوط را نداشته و با استفاده از روش ارائه شده در این مرجع تنها می‌توان پارامترهای توالی مثبت خطوط را تخمین زد. در مرجع [۲۰] به تخمین آنلاین پارامترها در یک خط انتقال دارای ترانسفورمر سری با استفاده از دو واحد اندازه‌گیری فازور پرداخته است. روش‌های سنتی تاثیر شرایط محیطی متغیر با زمان را در محاسبات در نظر نمی‌گیرند و این باعث می‌شود تا مقادیر تخمینی با مقادیر واقعی مطابقت نداشته باشند. یکی از عواملی که سبب کاهش دقت الگوریتم‌های تخمین محل خطا می‌شود، پارامترهای نادقیق و نامعین خطوط انتقال است؛ بنابراین ارائه الگوریتمی که بتواند پارامترهای خط انتقال را با دقت تخمین بزند و از پارامترهای تخمینی در الگوریتم مکان‌یابی خطا و محاسبه آنلاین حد حرارتی خطوط نیز استفاده نمود بسیار کارآمد و مؤثر است. در این مقاله، ضمن تخمین آنلاین پارامترها و محل خطا، همچنین مقدار راکتانس سری جبران‌ساز نیز تخمین زده می‌شود. در این راستا، روش جدیدی برای محاسبه آنلاین حد حرارتی دینامیکی شبکه‌های انتقال نیرو ارائه می‌شود. در این مقاله، مسئله تخمین همزمان محل خطا و پارامترهای خطوط جبران شده با خازن سری مورد بررسی قرار گرفته. برای انجام فرآیند تخمین از روش حداقل مربعات غیرخطی^۶ (NLS) استفاده می‌شود و شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از نرم‌افزار متلب برای نمایش صحت عملکرد الگوریتم ارائه شده هستند. در ادامه مقاله به ترتیب در بخش‌های دوم و سوم رویکرد پیشنهادی تخمین محل خطا و بحث و مدل‌سازی روش پیشنهادی و سپس در بخش چهارم محاسبه بلادرنگ حد حرارتی و در ادامه در بخش پنجم روش حداقل مربعات غیرخطی و در نهایت در بخش ششم و هفتم نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری بیان می‌گردد.

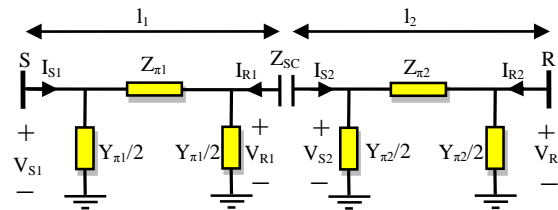
۲- رویکرد پیشنهادی تخمین محل خطا

شکل (۱) خط انتقال مورد مطالعه را نشان می‌دهد. جبران‌کننده مورد نظر می‌تواند یک خازن ثابت، بانک خازنی، خازن سری کنترل شده با ترستور^۷ (TCSC) و یا یک سیستم انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر^۸ (FACTS) سری باشد. پارامترهای واحد طول بخش‌های S-C و C-R برابر هستند، اما طول آن‌ها می‌تواند متفاوت باشد. در نتیجه، پارامترهای مدل π این بخش‌ها نیز متفاوت هستند و باید هر کدام از آن‌ها را با یک مدل π مجزا نشان دهیم. مدار معادل مدل π قبل از وقوع خطای یک خط انتقال جبران شده با خازن سری در توالی مثبت در شکل (۲) نشان داده شده است. پارامترهای $Z_{\pi 1}$ ، $Y_{\pi 1}$ ، $Z_{\pi 2}$ و $Y_{\pi 2}$ با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند [۱۷، ۱۶]:



شکل (۱): خط انتقال جبران شده با خازن سری مورد مطالعه [۱۹]

Figure (1): Series capacitor-compensated transmission lines under study [19]



شکل (۲): مدار معادل مدل π قبل از وقوع خطا
Figure (2): The equivalent circuit of π model before an error occurs

$$Z_{\pi 1} = \sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \sinh\left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)}\right) l_1\right) \quad (1)$$

$$Y_{\pi 1} = \frac{2}{\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}}} \tanh\left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)}\right) l_1/2\right) \quad (2)$$

$$Z_{\pi 2} = \sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \sinh\left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)}\right) l_2\right) \quad (3)$$

$$Y_{\pi 2} = \frac{2}{\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}}} \tanh\left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)}\right) l_2/2\right) \quad (4)$$

$$Z_C = -jX_C \quad (5)$$

در رابطه (۵)، X_C راکتانس جبران‌کننده سری است. با اعمال قانون جریان کیرشهف به مدار معادل نشان داده شده در شکل (۲) خواهیم داشت:

$$V_{R2} \left(1 + Z_{\pi 2} Y_{\pi 2}/2\right) - Z_{\pi 2} I_{R2} - V_{S1} \left(1 + Z_{\pi 1} Y_{\pi 1}/2\right) + Z_{\pi 1} I_{S1} = V_{S2} - V_{R1} \quad (6)$$

با استفاده از قانون ولتاژ کیرشهف برای مدار معادل نشان داده شده در شکل (۲) خواهیم داشت:

$$V_{S1} \left(1 + \left(Z_{\pi 1} Y_{\pi 1}/2\right) + Z_C Y_{\pi 1} + \left(Z_C Z_{\pi 1} Y_{\pi 1}^2/4\right)\right) - I_{S1} \left(Z_{\pi 1} + Z_C + Z_C Z_{\pi 1} Y_{\pi 1}/2\right) - V_{R2} \left(1 + Z_{\pi 2} Y_{\pi 2}/2\right) + Z_{\pi 2} I_{R2} = 0 \quad (7)$$

معادله‌های (۶) و (۷) دو معادله اساسی مورد نیاز برای فرآیند تخمین در این بخش هستند. با جایگذاری رابطه‌های (۱) الی (۵) در معادله‌های (۶) و (۷)، رابطه‌های (۸) و (۹) به دست می‌آیند.

۳- مدل‌سازی مسئله

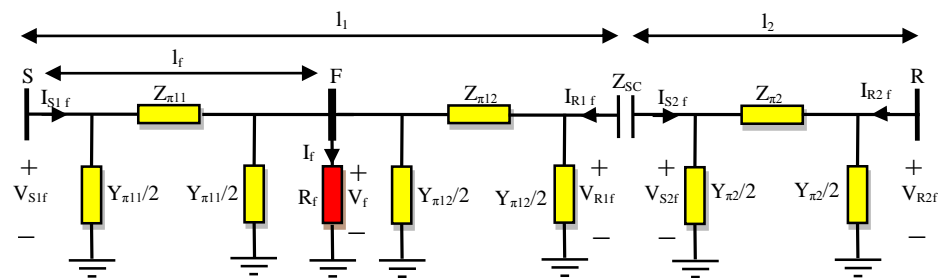
برای به دست آوردن معادله سوم مورد نیاز برای فرآیند تخمین نیاز است تا شرایط خط مورد مطالعه را در هنگام وقوع خطا بررسی شود. در ادامه شرایط وقوع خطا بر روی خطوط قبل و بعد از جبران‌کننده سری بررسی می‌شود.

۳-۱- وقوع خطا بر روی خط قبل از جبران‌کننده سری

شکل (۳) مدار معادل مدل π توالی مثبت شبکه را هنگامی که یک خطای متقارن و یا نامتقارن بر روی خط قبل از جبران‌کننده سری اتفاق می‌افتد را نشان می‌دهد. پارامترهای مدل π مربوط به قسمت‌های S-F و F-C با استفاده از رابطه‌های (۱۰) الی (۱۳) محاسبه می‌گردد [۱۹]. با اعمال قوانین ولتاژ و جریان کیرشهف به مدار معادل نشان داده شده در شکل (۳) و جایگذاری‌های مربوطه، معادله سوم نهایی فرآیند تخمین محل خطا و پارامترهای خط انتقال مطابق رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

متغیرهای این مسئله، پارامترهای واحد طول خط مورد مطالعه (α و X و b)، راکتانس جبران‌کننده سری (X_C) و طول محل وقوع خطا (l_f)، پنج پارامتر مجهولی هستند که باید با استفاده از معادله‌های (۸)، (۹) و (۱۴) تخمین زده شوند. بردار متغیرهای مجهول و بردار اندازه‌گیری‌های این مسئله که برای فرآیند تخمین به آن‌ها نیاز است بصورت رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) تعریف می‌شوند. در رابطه‌های فوق y_1, y_2, y_3, y_4 و y_5 به ترتیب α, X, b, X_C و l_f را نشان می‌دهند. x_1 و x_2 ، اجزاء حقیقی و موهومی V_{S1} هستند. x_3 و x_4 ، اجزاء حقیقی و موهومی I_{S1} را نشان می‌دهند. x_5 و x_6 ، اجزاء حقیقی و موهومی V_{R2} هستند. x_7 و x_8 ، اجزاء حقیقی و موهومی I_{R2} را نشان می‌دهند. x_9 و x_{10} ، اجزاء حقیقی و موهومی V_{S1f} هستند. x_{11} و x_{12} ، اجزاء حقیقی و موهومی I_{S1f} را نشان می‌دهند. x_{13} و x_{14} ، اجزاء حقیقی و موهومی V_{R2f} هستند. x_{15} و x_{16} ، اجزاء حقیقی و موهومی I_{R2f} را نشان می‌دهند.

$$\begin{aligned}
 & \left(\left(\frac{2}{\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}} \tanh\left(\left(\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}\right) l_1 / 2\right) \right) \times \left(\frac{\tanh\left(\left(\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}\right) l_1 / 2\right)}{2\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}} \right) \right) - \left(1 + \left(\frac{\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}}{\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}} \times \sinh\left(\left(\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}\right) l_1\right) \right) \right) \\
 & I_{S1} \left(1 + \left(\frac{\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}}{\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}} \times \sinh\left(\left(\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}\right) l_1\right) \right) \right) \left(\frac{\tanh\left(\left(\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}\right) l_1 / 2\right)}{\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}} \right) + \\
 & \left(\left(\frac{2}{\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}} \tanh\left(\left(\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}\right) l_2 / 2\right) \right) \times \left(\frac{\tanh\left(\left(\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}\right) l_2 / 2\right)}{2\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}} \right) \right) - \left(1 + \left(\frac{\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}}{\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}} \times \sinh\left(\left(\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}\right) l_2\right) \right) \right) \\
 & I_{R2} \left(1 + \left(\frac{\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}}{\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}} \times \sinh\left(\left(\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}\right) l_2\right) \right) \right) \left(\frac{\tanh\left(\left(\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}\right) l_2 / 2\right)}{\sqrt{\frac{r+jx}{jb}}} \right) = 0 \tag{۸}
 \end{aligned}$$



شکل (۳): مدار معادل وقوع خطا قبل از جبران‌کننده سری

Figure (3): The equivalent circuit an error occurs before series compensator

$$\begin{aligned}
 & V_{S1} \left[1 + \left(\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \times \sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_1 \right) \right) \left(\frac{\tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_1 / 2 \right)}{\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}}} \right) \right] + \\
 & \left(\frac{-2jX_C}{\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}}} \tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_1 / 2 \right) \right) + \left((-jX_C) \left(\frac{\tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_1 / 2 \right)}{\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}}} \right)^2 \right) \left. \right] - I_{S1} \times \\
 & \left(\left(\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \times \sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_1 \right) \right) + (-jX_C) + \left(\frac{\tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_1 / 2 \right)}{\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}}} \right) \right) \\
 & \left((-jX_C) \left(\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \times \sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_1 \right) \right) \right) \\
 & - V_{R2} \left(1 + \left(\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \times \sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 \right) \right) \left(\frac{\tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_1 / 2 \right)}{\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}}} \right) \right) + \tag{9}
 \end{aligned}$$

$$I_{R2} \left(\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \times \sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 \right) \right) = 0$$

$$Z_{\pi 11} = \sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_f \right) \tag{10}$$

$$Y_{\pi 11} = \frac{2}{\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}}} \tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_f / 2 \right) \tag{11}$$

$$Z_{\pi 12} = \sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) (l_1 - l_f) \right) \tag{12}$$

$$Y_{\pi 12} = \frac{2}{\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}}} \tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) (l_1 - l_f) / 2 \right) \tag{13}$$

در نهایت با بازنویسی معادله‌های (۸)، (۹) و (۱۴) به کمک x و y ، معادله‌های نهایی توابع هدف برای فرآیند تخمین به دست می‌آیند. با جداسازی بخش‌های حقیقی و موهومی معادلات حاصل که سه معادله مختلط هستند، شش معادله حقیقی به صورت (۱۷) الی (۲۲) خواهیم داشت. در نهایت، با استفاده از روش حداقل مربعات غیرخطی و رابطه‌های (۱۷) الی (۲۲) توابع هدف می‌توانیم x ، b ، X_C و l_f را تخمین بزنیم.

$$\begin{aligned}
 & V_{S1f} \left(1 + \left(\sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_f \right) \right) \left(\tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_f / 2 \right) \right) \right) - \\
 & I_{S1f} \left(\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_f \right) \right) + I_{R2f} \left[\left(\left(\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) (l_1 - l_f) \right) \right) \right) \times \right. \\
 & \left. \left(1 + \left(\left(\sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 \right) \right) \times \left(\tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 / 2 \right) \right) \right) \right) \right] + \\
 & \left(1 + \left(\left(\sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) (l_1 - l_f) \right) \right) \right) \times \left(\tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) (l_1 - l_f) / 2 \right) \right) \right) \times \left(\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 \right) \right) \\
 & + \left(-jX_C \right) + \left(-jX_C \right) \times \left(\left(\sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 \right) \right) \times \left(\tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 / 2 \right) \right) \right) \right] \\
 & - V_{R2f} \left[\left(\left(\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \times \sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) (l_1 - l_f) \right) \right) \right) \right. \\
 & \left. \times \left(\left(\frac{2 \tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 / 2 \right)}{\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}}} \right) + \left(\frac{\left(\sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 \right) \right) \times \left(\tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 / 2 \right) \right)^2}{\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}}} \right) \right) \right] \\
 & + \left(\left(1 + \left(\left(\sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) (l_1 - l_f) \right) \right) \right) \times \left(\tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) (l_1 - l_f) / 2 \right) \right) \right) \right) \times \\
 & \left(1 + \left(\left(\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}} \sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 \right) \right) \right) \right. \\
 & \left. \times \left(\frac{\tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 / 2 \right)}{\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}}} \right) \right) \right) + \left(-jX_C \right) \times \left(\left(\frac{2 \tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 / 2 \right)}{\sqrt{\frac{(r+jx)}{jb}}} \right) \right) \right) \right] + \\
 & \left(-jX_C \right) \times \left(\sinh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 \right) \right) \times \left(\tanh \left(\left(\sqrt{(r+jx)(jb)} \right) l_2 / 2 \right) \right) \right] = 0
 \end{aligned} \tag{۱۴}$$

$$y = [y_1, y_2, y_3, y_4, y_5]^T \tag{۱۵}$$

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}] \tag{۱۶}$$

$$F_1^1(X, Y) = \text{real}(f_1(X, Y)) \tag{۱۷}$$

$$F_1^2(X, Y) = \text{imag}(f_1(X, Y)) \tag{۱۸}$$

$$F_2^1(X, Y) = \text{real}(f_2(X, Y)) \tag{۱۹}$$

$$F_2^2(X, Y) = \text{imag}(f_2(X, Y)) \tag{۲۰}$$

$$F_3^1(X,Y)=\text{real}\left(f_3(X,Y)\right) \quad (21)$$

$$F_3^2(X,Y)=\text{imag}\left(f_3(X,Y)\right) \quad (22)$$

۲-۳- وقوع خطا بر روی خط بعد از جبران کننده سری

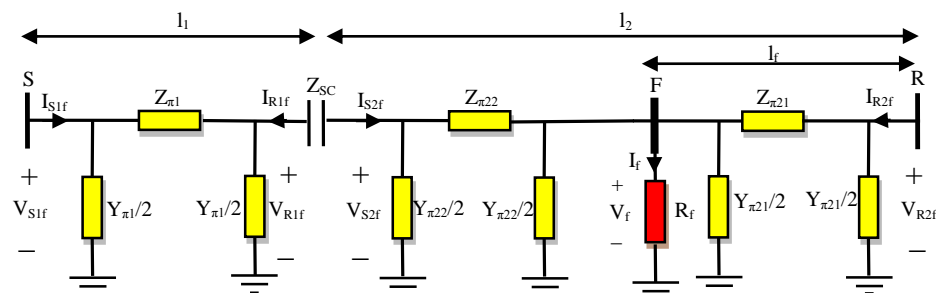
مدار معادل مدل π توالی مثبت خط انتقال با خازن سری مورد مطالعه هنگامی که خطایی بر روی خط بعد از جبران کننده سری اتفاق می افتد در شکل (۴) نشان داده شده که در آن $Z_{\pi 21}$ و $Y_{\pi 21}$ به ترتیب امپدانس و ادمیتانس مدل π توالی مثبت مربوط به بخش R-F، $Z_{\pi 22}$ و $Y_{\pi 22}$ به ترتیب امپدانس و ادمیتانس مدل π توالی مثبت مربوط به بخش F-C هستند که مشابه معادله های (۱۰) الی (۱۳) محاسبه می شوند. با اعمال قوانین ولتاژ و جریان کیرشهف به مدار معادل نشان داده شده در شکل (۴) و جایگذاری های مربوطه، معادله سوم نهایی فرآیند تخمین محل خطا و پارامترهای خط انتقال در هنگامی که خط بعد از جبران کننده سری دچار خطا شود به صورت زیر به دست می آید [۱۹]:

$$V_{S1f} \left(1 + \frac{Z_{\pi 1} Y_{\pi 1}}{2} + \left(Z_C \times Y_{\pi 1} \right) + \frac{Z_C Z_{\pi 1} Y_{\pi 1}^2}{4} + \left(Z_{\pi 22} \times Y_{\pi 1} \right) + \frac{Z_{\pi 1} Y_{\pi 1}^2 Z_{\pi 22}}{4} \right. \\ \left. + \frac{Z_{\pi 22} Y_{\pi 22}}{2} + \frac{Z_{\pi 1} Y_{\pi 1} Z_{\pi 22} Y_{\pi 22}}{4} + \frac{Z_C Y_{\pi 1} Z_{\pi 22} Y_{\pi 22}}{2} + \frac{Z_C Z_{\pi 1} Y_{\pi 1}^2 Z_{\pi 22} Y_{\pi 22}}{8} \right) \\ - I_{S1f} \left(Z_{\pi 1} + Z_C + \frac{Z_C Z_{\pi 1} Y_{\pi 1}}{2} + Z_{\pi 22} + \frac{Z_{\pi 1} Y_{\pi 1} Z_{\pi 22}}{2} + \frac{Z_{\pi 1} Z_{\pi 22} Y_{\pi 22}}{2} \right. \\ \left. + \frac{Z_C Z_{\pi 22} Y_{\pi 22}}{2} + \frac{Z_C Z_{\pi 1} Y_{\pi 1} Z_{\pi 22} Y_{\pi 22}}{4} \right) - V_{R2f} \left(1 + \frac{Z_{\pi 21} Y_{\pi 21}}{2} \right) + I_{R2f} \left(Z_{\pi 21} \right) = 0 \quad (23)$$

در نهایت با جایگذاری رابطه های مربوطه در معادله (۲۳)، بازنویسی معادله های (۸)، (۹) و (۲۳) به کمک بردارهای x و y ، جداسازی بخش های حقیقی و موهومی و اعمال روش حداقل مربعات غیرخطی به معادلات به دست آمده می توان پارامترهای مجهول این مسئله را تخمین زد.

۴- روش پیشنهادی محاسبه بلادرنگ حد حرارتی

یکی از بحرانی ترین قیود خطوط انتقال نیرو، حد حرارتی هادی های خطوط می باشند که بر اساس این قید دمای هادی نباید از حداکثر دمای مجاز تعریف شده برای آن بیشتر باشد. حد حرارتی دینامیک^۹ (DTR) به عنوان حداکثر جریان مجازی که می تواند از یک خط انتقال عبور کند به شرطی که دمای خط مورد نظر از حداکثر دمای مجاز تعریف شده برای آن خط (T_{max}) تجاوز نکند تعریف می شود.



شکل (۴): مدار معادل در هنگام وقوع خطا بعد از جبران کننده سری
Figure (4): The equivalent circuit when an error occurs after series compensator

روش ارائه شده برای محاسبه بلادرنگ حد حرارتی با استفاده از داده‌های واحد اندازه‌گیری فازور است که ترکیب دو روش پایش مستقیم دمای هادی [۲۱] و روش مبتنی بر شرایط آب و هوایی [۲۲] است. شمای کلی الگوریتم ارائه شده برای محاسبه حد حرارتی خطوط انتقال در شکل (۵) نشان داده شده است. در ادامه گام‌های تعریف شده در شکل (۵) بررسی شده است.

گام اول - تخمین پارامترهای مدل π خط انتقال: داده‌های ولتاژ و جریان مربوط به دو انتهای خط توسط واحدهای اندازه‌گیری فازور موجود در این ترمینال‌ها جمع‌آوری می‌شوند. سپس، با اعمال روش ارائه شده، می‌توان پارامترهای خط را تخمین زد. بنابراین، در انتهای این گام مقادیر R_π ، X_π و B_π مربوط به خط مورد مطالعه به دست می‌آید که در بخش قبل تشریح شده است.

گام دوم - محاسبه دمای خط انتقال با استفاده از معادله تبادل انرژی: با استفاده از پارامترهای تخمین زده شده در گام اول و رابطه زیر دمای خط انتقال محاسبه می‌شود.

$$\left(R \left(T_C \right) \times I^2 \right) + q_S - q_R - q_C = 0 \quad (24)$$

$$q_S = \alpha K_{\text{solar}} Q_S \sin(\theta) (D/1000) \quad (25)$$

$$q_R = 0.0178 D \epsilon \left[\left(\frac{T_C + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (26)$$

که در آن R مقاومت خط انتقال در دمای هادی T_C که در گام اول تخمین زده شده و I اندازه جریان عبوری از خط و q_S نرخ گرمای جذب شده از خورشید و q_R نرخ تلفات گرمایی تابشی هادی و q_C نیز نرخ خنک‌سازی همرفتی هادی در اثر وزش باد را نشان می‌دهد. α قابلیت جذب نور خورشید را نشان می‌دهد و عموماً مقدار آن از ۰/۲۳ تا ۰/۹۱ است. K_{solar} ضریب تصحیح ارتفاع از سطح دریا برای خورشید و Q_S نرخ تراوش گرمای تابشی آسمان و خورشید و θ زاویه موثر برخورد اشعه‌های نور خورشید است که با استفاده از رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود. D قطر هادی و ϵ قابلیت انتشار هادی که مقدار آن از ۰/۲۳ تا ۰/۹۱ است. T_a نیز مقدار دمای محیط را نشان می‌دهد.

$$\theta = \arccos \left[\cos(H_c) \cos(Z_c - Z_1) \right] \quad (27)$$

که در آن H_c ارتفاع خورشید از سطح دریا را نشان می‌دهد. Z_c و Z_1 نیز به ترتیب زوایای آزیموت^{۱۱} خورشید و خط هستند. هنگامی که سرعت وزش باد کمتر یا بیشتر از ۱ متر بر ثانیه باشد، به ترتیب از معادله (۲۸) و (۲۹) برای محاسبه نرخ خنک‌سازی همرفتی استفاده می‌شود. همچنین به ازای سرعت وزش باد صفر، خنک‌سازی همرفتی طبیعی اتفاق می‌افتد که با استفاده از رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود.

$$q_{C1} = \left[1.01 + 0.0372 \left(\frac{D_p V_w}{\mu_f} \right)^{0.52} \right] k_f k_{\text{angle}} (T_C - T_a) \quad (28)$$

$$q_{C2} = \left[0.0119 \left(\frac{D_p V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} \right] k_f k_{\text{angle}} (T_C - T_a) \quad (29)$$

$$q_{Cn} = 0.0205 \rho_f^{0.5} D^{0.75} (T_C - T_a)^{1.25} \quad (30)$$

که در آن ρ_f چگالی هوا و V_w سرعت وزش باد به هادی و μ_f چسبندگی دینامیکی هوا و k_f ضریب رسانایی گرمایی هوا و k_{angle} ضریب جهت وزش باد را نشان می‌دهد. در رابطه‌های پیشین، D ، ϵ و Z_1 جزء مشخصات هادی هستند، α ، K_{solar} ، Q_S ، H_c ، Z_c ، T_a و V_w نیز از ایستگاه‌های هواشناسی گرفته می‌شوند. بنابراین اگر رابطه‌های پیشین در معادله (۲۴) قرار داده شود، تنها پارامتر مجهول معادله غیرخطی حاصله T_C خواهد بود که می‌توان با استفاده از روش حداقل مربعات غیرخطی آن را محاسبه کرد.

گام سوم - محاسبه مقاومت متناظر با حداکثر دمای مجاز خط انتقال: رابطه خطی که مقاومت خط را به دمای آن مربوط می‌کند به صورت زیر است و از آن برای محاسبه مقاومت متناظر با حداکثر دمای مجاز خط استفاده می‌شود.

$$R(T_{C_{\text{max}}}) = R(T_C) \left(1 + A (T_{C_{\text{max}}} - T_C) \right) \quad (31)$$

که در آن $R(T_{Cmax})$ مقاومت متناظر با حداکثر دمای مجاز خط و T_{Cmax} حداکثر دمای مجاز خط انتقال و A ضریب مقاومت حرارتی هادی و $R(T_C)$ و نیز به ترتیب مقاومت و دمای تخمین زده شده در گام‌های اول و دوم هستند. گام چهارم - محاسبه حد حرارتی خط انتقال: ماکزیمم جریان مجازی عبوری از یک خط به شرطی که دمای خط از حداکثر دمای مجاز آن تجاوز نکند، به عنوان حد حرارتی شناخته می‌شود. با استفاده از معادله (۳۲)، حداکثر جریان عبوری را می‌توان محاسبه کرد:

$$I_{max} = \sqrt{\frac{q_C(T_{Cmax}) + q_R(T_{Cmax}) - q_S}{R(T_{Cmax})}} \quad (32)$$

در نهایت، پس از محاسبه حداکثر جریان عبوری از خط، حد حرارتی خط با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۳]:

$$|S_{max}| = \sqrt{3} \times |V_{max}| \times |I_{max}| \quad (33)$$

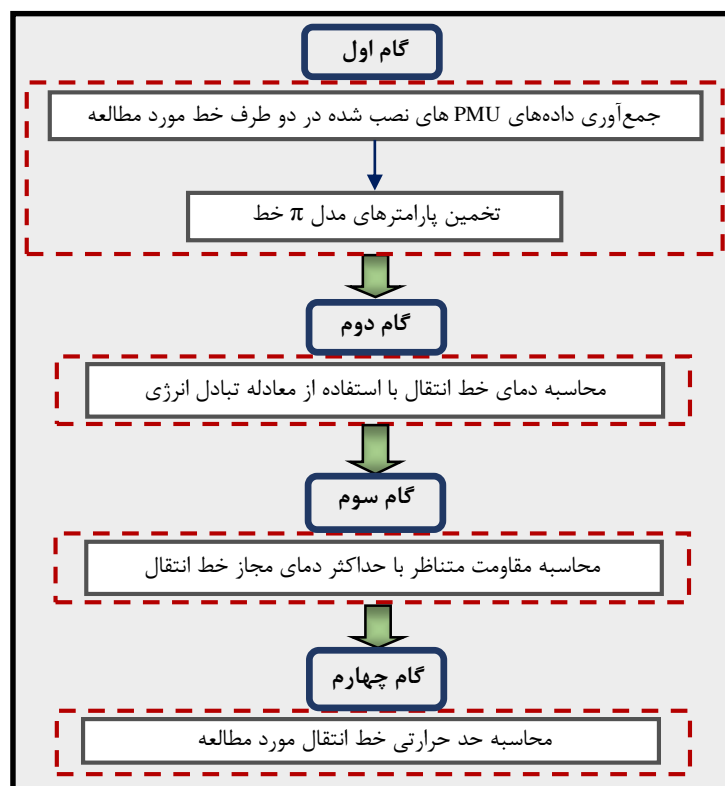
که V_{max} ولتاژ خط مورد نظر برای بهره‌برداری در آن ولتاژ است.

۵- رویکرد بهینه‌سازی بکار رفته

در روش‌های به کار رفته برای تخمین محل خطا و پارامترهای خطوط انتقال نیرو، تخمین بردار پارامترهای مجهول (θ) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. معادله‌های نهایی استخراج شده برای تخمین θ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$J = [-f(x, \theta)]^T W^{-1} [-f(x, \theta)] \quad (34)$$

که در آن x و θ به ترتیب بردار اندازه‌گیری‌ها و بردار متغیرهای مجهول مسئله هستند. W ماتریس کوواریانس خطاهای اندازه‌گیری را نشان می‌دهد که دارای توزیع نرمال (گوسی) با میانگین صفر و انحراف معین است.



شکل (۵): الگوریتم ارائه شده برای محاسبه DTR با استفاده از داده‌های واحد اندازه‌گیری فازور

Figure (5): The proposed algorithm for calculating DTR using PMU data

برای تخمین θ تابع هدف روش حداقل مربعات غیرخطی به صورت رابطه زیر باید کمینه گردد [۲۳].

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta\theta \quad (35)$$

$$\Delta\theta = \left[H^T W^{-1} H \right]^{-1} \left[H^T W^{-1} \left(-f(x, \theta_k) \right) \right] \quad (36)$$

$$H = \frac{\partial f(x, \theta_k)}{\partial \theta_k} \quad (37)$$

در رابطه‌های بالا θ_k و θ_{k+1} به ترتیب مقادیر بردار متغیر مجهول را در تکرار k ام و بعد از آن نشان می‌دهند. H ماتریسی است که شامل مشتقات مرتبه اول تابع f نسبت به عناصر θ است. فرآیند تکرار به محض اینکه $\Delta\theta$ از مقداری مشخص کمتر گردد به پایان می‌رسد [۲۴].

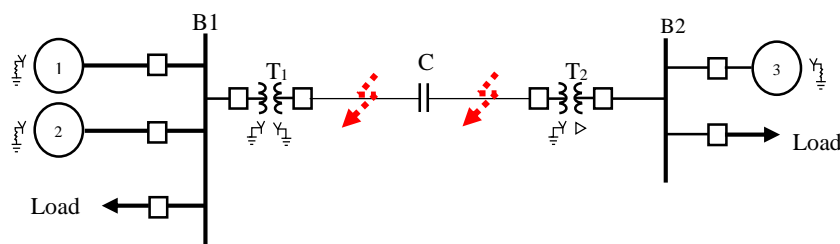
۶- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای نشان دادن دقت و عملکرد الگوریتم ارائه شده جهت تخمین آنلاین محل خطا و پارامترهای خطوط انتقال جبران شده با خازن سری مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور در نظر گرفتن خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری در فرآیند تخمین، داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده در قسمت سیمولینک نرم‌افزار متلب با نویز نرمال (گوسی) منحرف شده‌اند. خطای برداری در نظر گرفته شده برای داده‌های واحد اندازه‌گیری فازور یک درصد است که مطابق با استاندارد اندازه‌گیری همگام شده IEEE است [۲۵]. در ادامه بررسی نتایج شبیه‌سازی‌ها بیان می‌شود.

۶-۱- مدل‌سازی خطوط انتقال مورد مطالعه

خط انتقال برای شبیه‌سازی در این قسمت یک خط ۲۳۰ کیلو ولتی و ۶۰ هرتزی است که دارای آرایش نشان داده شده در شکل (۶) است. بخش‌های B1-C و B2-C دارای پارامترهای واحد طول یکسان هستند که از مرجع [۱۹] گرفته شده‌اند. طول این بخش‌ها نیز به ترتیب ۱۱۰ و ۹۰ کیلومتر است. یک خازن سری ثابت که مقدار آن $77/8340$ میکروفاراد است به عنوان جبران‌کننده سری در نظر گرفته شده است که قابلیت جبران ۴۰ درصد از امپدانس سری خط را دارا است. داده‌های ولتاژ و جریان مربوط به قبل از وقوع خطا که در جدول (۱) ارائه شده‌اند با شبیه‌سازی خط انتقال مورد نظر در نرم‌افزار متلب جمع‌آوری شده‌اند. برای تولید داده‌های ولتاژ و جریان حین وقوع خطا، خطاهای اتصال کوتاه؛ یک فاز به زمین^{۱۲} (SLG)، دو فاز به یکدیگر^{۱۳} (LL)، دو فاز به زمین^{۱۴} (DLG) و اتصال کوتاه متقارن سه فاز^{۱۵} (LLL) با مقاومت‌ها و محل‌های مختلف خطا بر روی خط مورد نظر اعمال می‌شود. در این قسمت، خطاهای SLG و LL بر روی خط قبل از جبران‌کننده سری اعمال شده است و خطاهای DLG و LLL نیز بر روی خط بعد از جبران‌کننده سری پیاده‌سازی شده است. جدول‌های (۲) الی (۵) نتایج تخمین و درصد خطاهای تخمین حالت‌های مختلف شبیه‌سازی شده برای خطاهای SLG و LL را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که درصد خطای ارائه شده در این جدول با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است [۱۷].

$$\% \text{ Error} = \frac{|\text{Actual Value} - \text{Estimated Value}|}{\text{Actual Value}} \times 100 \quad (38)$$



شکل (۶): نمودار تک خطی سیستم قدرت مورد مطالعه [۱۹]

Figure (6): Single line diagram of studied power system [19]

Table (1): Voltage and current Phasor before an error occurs for both ends of the line

جدول (۱): فازورهای ولتاژ و جریان قبل از وقوع خطا برای دو انتهای خط

کمیت مورد نظر	مقدار اندازه‌گیری شده	
	دامنه (آمپر یا کیلوولت)	زاویه فاز (درجه)
V_{S1}	۱۵۸/۹۹	۱۵/۸۵
I_{S1}	۵۶۶/۳۰	۱۳۸/۲۶
V_{R2}	۱۴۴/۹۱	۲۴/۲۲
I_{R2}	۱۱۱۶/۵۸	۹۵/۵۶

Table (2): Estimation results for SLG fault on section B1-C

جدول (۲): نتایج تخمین برای خطای SLG بر روی سکشن B1-C

نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	محل واقعی وقوع خطا (km)	محل تخمینی وقوع خطا (km)	r (Ω /km)	x (Ω /km)	b (Ω /km)	X_c (μ F)
SLG	۱	۲۰	۲۰/۰۷۴۲	۰/۰۵۲۹	۰/۵۰۳۳	$48/0.935 e-6$	۳۴/۱۰۴۶
		۶۳	۶۳/۰۷۷۰	۰/۰۵۳۴	۰/۵۰۲۹	$48/1.323 e-6$	۳۴/۱۲۰۱
		۹۲	۹۲/۱۲۷۴	۰/۰۵۴۱	۰/۵۰۲۷	$47/9.571 e-6$	۳۴/۱۸۲۳

Table (3): Estimation results for LL fault on section B1-C

جدول (۳): نتایج تخمین برای خطای LL بر روی سکشن B1-C

نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	محل واقعی وقوع خطا (km)	محل تخمینی وقوع خطا (km)	r (Ω /km)	x (Ω /km)	b (Ω /km)	X_c (μ F)
LL	۳	۱۲	۱۲/۱۰۰۵	۰/۰۵۲۹	۰/۵۰۳۱	$48/1.714 e-6$	۳۴/۰۹۷۹
		۵۳	۵۳/۰۲۳۴	۰/۰۵۳۴	۰/۵۰۲۶	$48/1.586 e-6$	۳۴/۰۹۱۰
		۸۱	۸۱/۰۴۹۹	۰/۰۵۳۶	۰/۵۰۲۸	$47/9.266 e-6$	۳۴/۱۱۵۶

Table (4): The percentage error of results estimating for SLG fault on section B1-C

جدول (۴): درصد خطای نتایج تخمین برای خطای SLG بر روی سکشن B1-C

نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	درصد خطا				
		محل وقوع خطا (km)	r (Ω /km)	x (Ω /km)	b (Ω /km)	X_c (μ F)
SLG	۱	۰/۳۷۱۱	۰/۵۶۴۳	۰/۱۹۳۰	۰/۰۲۸۹	۰/۰۷۲۳
		۰/۱۲۲۳	۰/۲۸۴۶	۰/۱۲۲۳	۰/۱۰۹۷	۰/۱۱۷۶
		۰/۱۳۸۵	۱/۶۳۰۱	۰/۰۸۸۶	۰/۲۵۴۸	۰/۳۰۰۱

Table (5): The percentage error of results estimating for LL fault on section B1-C

جدول (۵): درصد خطای نتایج تخمین برای خطای LL بر روی سکشن B1-C

نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	درصد خطا				
		محل وقوع خطا (km)	r (Ω /km)	x (Ω /km)	b (Ω /km)	X_c (μ F)
LL	۳	۰/۸۳۷۴	۰/۵۶۴۳	۰/۱۹۳۰	۰/۱۹۱۰	۰/۰۵۲۶
		۰/۰۴۴۱	۰/۴۳۶۵	۰/۰۶۱۴	۰/۱۶۴۴	۰/۰۳۲۲
		۰/۰۶۱۷	۰/۶۳۲۷	۰/۱۰۲۸	۰/۳۱۸۲	۰/۱۰۴۴

نتایج تخمین و درصد خطاهای تخمین حالات مختلف شبیه‌سازی شده برای خطاهای DLG و LLL در جدول‌های (۶) الی (۹) ارائه شده است. با استفاده از فازورهای ولتاژ و جریان مربوط به قبل از وقوع خطا که در جدول (۱) ارائه شده، داده‌های حین وقوع خطا نیز با استفاده از شبیه‌سازی خطاهای DLG و LLL بر روی خط بعد از جبران‌کننده سری با روش ارائه شده به دست

آمده‌اند. نتایج ارائه شده در جدول‌های (۶) الی (۹) نشان می‌دهند که روش ارائه شده از دقت قابل قبولی در تخمین همزمان محل خطا و پارامترهای خطوط انتقال برخوردار است. شکل (۷) نیز روند تخمین پارامترهای خط انتقال، راکتانس جبران‌کننده سری و محل وقوع خطا را برای خطای LL که در فاصله ۸۱ کیلومتری از ترمینال B1 شبکه مورد مطالعه اتفاق افتاده نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص می‌باشد، روش ارائه شده به سرعت و پس از سه تکرار به جواب نهایی همگرا می‌شود.

Table (6): Estimation results for DLG fault on section C-B2

جدول (۶): نتایج تخمین برای خطای DLG بر روی سکشن C-B2

نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	محل واقعی وقوع خطا (km)	محل تخمینی وقوع خطا (km)	r (Ω /km)	x (Ω /km)	b (\bar{U} /km)	X_c (μ F)
DLG	۵	۵	۴/۸۲۰۱	۰/۰۵۵۳	۰/۵۰۰۹	۴۷/۶۹۳۸ e-۶	۳۴/۰۸۹۰
		۴۳	۴۲/۸۹۹۴	۰/۰۵۴۶	۰/۵۰۱۳	۴۷/۸۲۲۴ e-۶	۳۴/۰۲۷۳
		۷۶	۷۶/۱۸۸۳	۰/۰۵۳۴	۰/۵۰۱۵	۴۸/۰۷۲۶ e-۶	۳۳/۸۲۷۳

Table (7): Estimation results for LLL fault on section C-B2

جدول (۷): نتایج تخمین برای خطای LLL بر روی سکشن C-B2

نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	محل واقعی وقوع خطا (km)	محل تخمینی وقوع خطا (km)	r (Ω /km)	x (Ω /km)	b (\bar{U} /km)	X_c (μ F)
LLL	۱۰	۱۲	۱۱/۹۸۸۹	۰/۰۵۳۳	۰/۵۰۲۸	۴۷/۹۵۱۹ e-۶	۳۴/۰۷۹۱
		۶۳	۶۳/۲۱۰۶	۰/۰۵۳۰	۰/۵۰۱۱	۴۸/۰۹۷۰ e-۶	۳۳/۷۲۶۷
		۸۲	۸۲/۱۵۸۴	۰/۰۵۳۳	۰/۵۰۱۶	۴۸/۰۹۱۸ e-۶	۳۳/۸۵۸۵

Table (8): The percentage error of results estimating for DLG fault on section C-B2

جدول (۸): درصد خطای نتایج تخمین برای خطای DLG بر روی سکشن C-B2

نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	درصد خطا				
		محل وقوع خطا (km)	r (Ω /km)	x (Ω /km)	b (\bar{U} /km)	X_c (μ F)
DLG	۵	۳/۵۹۷۰	۳/۹۴۴۴	۰/۲۸۷۳	۰/۸۰۲۳	۰/۰۲۶۵
		۰/۲۳۳۹	۲/۵۶۸۹	۰/۱۹۸۵	۰/۵۳۴۹	۰/۱۵۴۶
		۰/۲۴۷۷	۰/۴۲۳۹	۰/۱۶۷۰	۰/۰۱۴۶	۰/۷۴۱۵

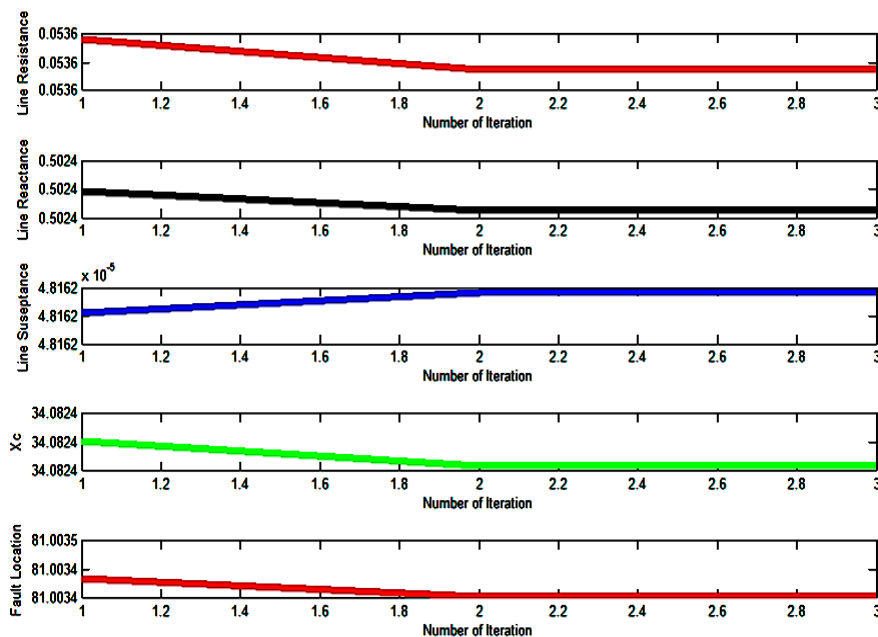
Table (9): The percentage error of results estimating for LLL fault on section C-B2

جدول (۹): درصد خطای نتایج تخمین برای خطای LLL بر روی سکشن C-B2

نوع خطا	مقاومت خطا (Ω)	درصد خطا				
		محل وقوع خطا (km)	r (Ω /km)	x (Ω /km)	b (\bar{U} /km)	X_c (μ F)
LLL	۱۰	۰/۰۹۲۶	۰/۱۰۷۹	۰/۱۰۱۰	۰/۲۶۵۷	۰/۰۰۲۷
		۰/۳۳۴۲	۰/۳۳۹۸	۰/۲۳۷۲	۰/۰۳۶۲	۱/۰۳۶۷
		۰/۱۹۳۲	۰/۱۹۳۴	۰/۱۴۵۷	۰/۰۲۵۴	۰/۶۴۹۸

۲-۶- محاسبه آنالین حد حرارتی خط انتقال مورد مطالعه

خط انتقال مورد نظر برای شبیه‌سازی یک خط ۲۳۰ کیلو ولتی و ۶۰ هرتزی است که دارای آرایش نشان داده شده در شکل (۶) است [۱۹]. بخش‌های C-B2 و B1-C دارای پارامترهای واحد طول یکسان هستند و در جدول (۱۰) نشان داده شده‌اند. طول این بخش‌ها نیز به ترتیب ۱۱۰ و ۹۰ کیلومتر است. با اعمال روش ارائه شده برای تخمین پارامترهای خطوط انتقال دارای جبران سری به داده‌های ولتاژ و جریان دو انتهای خط، پارامترهای خط انتقال مورد نظر تخمین زده می‌شوند که در جدول (۱۱) ارائه شده‌اند.



شکل (۷): روند تخمین همزمان محل خطا و پارامترهای خط برای خطای LL

Figure (7): The Simultaneous estimation procedure of fault location and line parameters for LL fault

Table (10): Data on the transmission line of case study

جدول (۱۰): اطلاعات مربوط به خط انتقال مورد مطالعه

کمیت مورد نظر	مقدار
r (Ω/km)	۰/۰۵۳۲
x (Ω/km)	۰/۵۰۲۲۹۹
b (S/km)	$۴/۸۰۷۹۵۶ \text{e}-۵$
Conductor type	ACSR, "squab"
A ($1/^\circ\text{C}$)	۰/۰۰۳۵
T_{Cmax} ($^\circ\text{C}$)	۱۰۰
D (mm)	۲۴/۵
ϵ	۰/۵
H_c (m)	۱۱۰
Z_l (degree)	۹۰

Table (11): Data on the results of estimating the distributed parameters

جدول (۱۱): اطلاعات نتایج تخمین پارامترهای توزیع شده

کمیت مورد نظر	مقدار واقعی	مقدار تخمین زده شده	درصد خطا
r (Ω/km)	۵/۲۹۴۳	۵/۳۴۷۹	۱/۰۱۲۴
x (Ω/km)	۵۲/۶۲۹۸	۵۲/۶۳۸۶	۰/۰۱۶۷
b (S/km)	$۵/۴۲۱۴ \text{e}-۳$	$۵/۴۱۲۰ \text{e}-۳$	۰/۱۷۳۴

سپس، دمای خط انتقال با استفاده از معادله تبادل انرژی محاسبه می‌شود. جدول (۱۲) اطلاعات مربوط به شرایط آب و هوایی خط مورد مطالعه را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از اطلاعات موجود، دمای خط مورد نظر محاسبه شده است. در نهایت، نتایج مربوط به محاسبه مقاومت متناظر با حداکثر دمای مجاز، حداکثر جریان مجاز و حد حرارتی خط مورد مطالعه محاسبه می‌گردند که نتایج آن در جدول (۱۳) موجود است.

Table (12): Data on weather conditions of the studied line

جدول (۱۲): اطلاعات شرایط آب و هوایی خط مورد مطالعه

مقدار	کمیت مورد نظر
۰/۶۵	V_w (m/s)
۹۰	φ (degree)
۰/۵	α
۲۴	T_a (°C)
۱	K_{Solar}
۱۰۲۳	Q_s (w/m ²)
۷۲/۵	H_c (degree)
۱۳۹	Z_c (degree)

Table (13): The results of temperature estimate, resistance corresponding to maximum allowable temperature and the thermal rate

جدول (۱۳): نتایج تخمین دما، مقاومت متناظر با حداکثر دمای مجاز و حد حرارتی

مقدار محاسبه شده	کمیت مورد نظر
۳۹/۵۳	T_c (°C)
۶/۴۷۹	R_{max} (Ω)
۱/۳۸۱۹	I_{max} (kA)
۵۵۰/۴۹	S_{max} (MVA)

۳-۶- بررسی تاثیر خطای واحدهای اندازه‌گیری فازور بر روی نتایج تخمین روش پیشنهادی

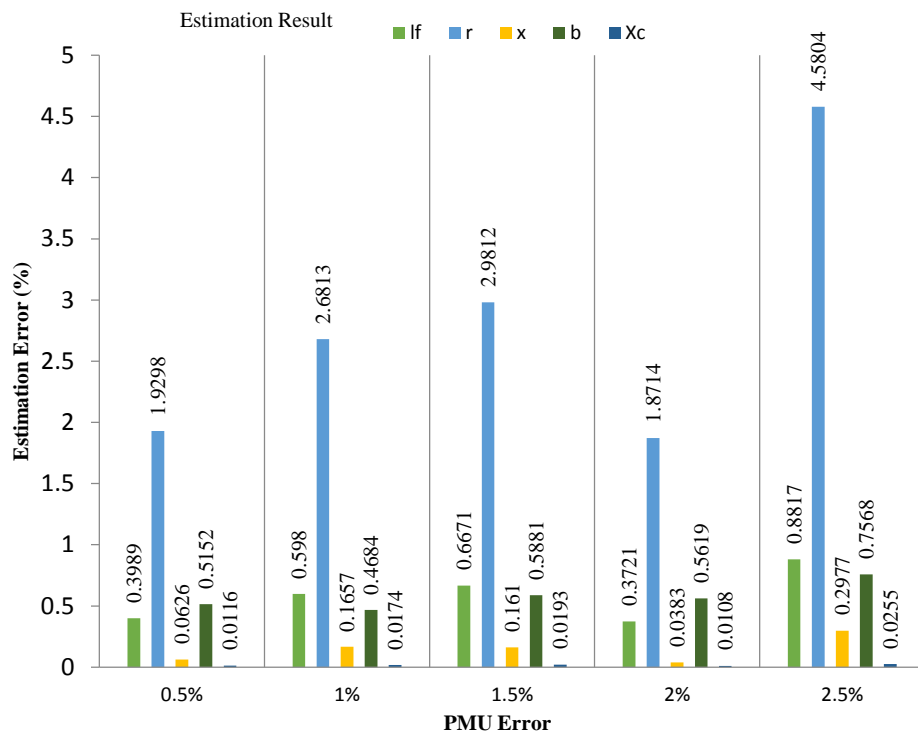
در سیستم‌های واقعی قدرت، دستگاه‌های اندازه‌گیری دارای مقادیر خطای متفاوتی هستند. برای بررسی تاثیر مقادیر خطای سیستم‌های اندازه‌گیری بر روی روش ارائه شده در این مقاله برای تخمین همزمان محل خطا و پارامترهای خطوط انتقال دارای جبران سری، باید به داده‌های قبل و حین وقوع خطا که توسط واحدهای اندازه‌گیری فازور اندازه‌گیری می‌شوند خطاهای متفاوتی را اعمال نماییم.

خطاهای برداری در نظر گرفته شده برای داده‌های واحدهای اندازه‌گیری فازور به ترتیب ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد هستند. برای ارزیابی روش مورد نظر یک خطای LLL با مقاومت ۱۰ اهم را بر روی خط بعد از جبران‌کننده سری و در فاصله ۱۲ کیلومتری از ترمینال B2 شبیه‌سازی می‌نماییم. با اعمال خطاهای برداری در نظر گرفته شده به داده‌های قبل و حین وقوع خطا و استفاده از روش ارائه شده برای تخمین محل خطای خطوط دارای جبران سری، پارامترهای خط مورد نظر، راکتانس جبران‌کننده سری و محل وقوع خطا را به ازای خطاهای برداری متفاوت واحدهای اندازه‌گیری فازور تخمین می‌زنیم.

Table (10): The percentage error of results estimating on state of LLL fault for different PMU errors

جدول (۱۴): درصد خطای نتایج تخمین یک حالت از خطای LLL به ازای خطاهای مختلف واحدهای اندازه‌گیری فازور

نوع خطا	محل واقعی وقوع خطا (km)	مقاومت خطا (Ω)	درصد خطای PMU	درصد خطا				
				محل وقوع خطا (km)	r (Ω /km)	x (Ω /km)	b (Ω /km)	X_c (μ F)
LLL	۱۲	۱۰	۰/۵	۰/۳۹۸۹	۱/۹۲۹۸	۰/۰۶۲۶	۰/۵۱۵۲	۰/۰۱۱۶
			۱	۰/۵۹۸۰	۲/۶۸۱۳	۰/۱۶۵۷	۰/۴۶۸۴	۰/۰۱۷۴
			۱/۵	۰/۶۶۷۱	۲/۹۸۱۲	۰/۱۶۱۰	۰/۵۸۸۱	۰/۰۱۹۳
			۲	۰/۳۷۲۱	۱/۸۷۱۴	۰/۰۳۸۳	۰/۵۶۱۹	۰/۰۱۰۸
			۲/۵	۰/۸۸۱۷	۴/۵۸۰۴	۰/۲۹۷۷	۰/۷۵۶۸	۰/۰۲۵۵



شکل (۸): درصد خطای نتایج تخمین یک حالت از خطای LLL به ازای خطاهای مختلف واحدهای اندازه‌گیری فازور
Figure (8): The percentage error of results estimating on state of LLL fault for different PMU errors

جدول (۱۴) و شکل (۸) درصد خطای نتایج تخمین محل خطا و پارامترهای خطوط انتقال را برای این شبیه‌سازی نشان می‌دهند. با دقت در نتایج شبیه‌سازی این بخش درمی‌یابیم که الگوریتم ارائه شده حتی در مواقعی که دستگاه‌های اندازه‌گیری دارای خطای بالایی باشند نیز قابل اعتماد است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی موثر برای تعیین آنلاین محل خطا و حد حرارتی دینامیکی خط با استفاده از فازورهای همگام ولتاژ و جریان گرفته شده از واحدهای اندازه‌گیری فازور واقع در دو طرف خط ارائه شده است. از آنجا که این روش بر اساس مدل π خطوط انتقال است می‌توان از آن برای خطوط کوتاه، متوسط یا بلند استفاده نمود. همچنین با استفاده از مدل پارامترهای توزیع شده خط با جبران‌ساز سری، ضمن محاسبه ظرفیت شنت خطوط، پارامترهای خطوط انتقال به صورت آنلاین تخمین زده شده و از این مقادیر به عنوان پارامترهای ورودی الگوریتم تعیین حد حرارتی دینامیکی استفاده شده است. در نتیجه در این روش، عدم دقت ناشی از پارامترهای نامشخص و نامعین خط در الگوریتم مکان‌یابی خطا و تعیین حد حرارتی دینامیکی حذف شده است. روش به کار رفته، از طریق شبیه‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار متلب ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن است که این روش از دقت بالایی برخوردار بوده و می‌تواند تخمین محل وقوع خطا را ضمن محاسبه آنلاین دمای خطوط با توجه به شرایط آب و هوایی و عدم نیاز به دانستن مقادیر دقیق پارامترهای سیستم انجام دهد. نتایج شبیه‌سازی صحت و کاربردی بودن روش بکار رفته را نشان می‌دهد.

References

مراجع

- [1] C. Li, Y. Zhang, H. Zhang, Q. Wu, V. Terzija, "Measurement-based transmission line parameter estimation with adaptive data selection scheme", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 9, Article Number: 6, pp. 5764-5773, Nov. 2018 (doi: 10.1109/TSG.2017.2696619).

- [2] P.E. Farias, A.P. Morais, J.P. Rossini, G.C. Jr, "Non-linear high impedance fault distance estimation in power distribution systems: A continually online-trained neural network approach", *Electric Power Systems Research*, vol. 157, pp. 20-28, April 2018 (doi: 10.1016/j.epsr.2017.11.018).
- [3] M.M. Devi, M. Geethanjali, A.R. Devi, "Fault localization for transmission lines with optimal phasor measurement units", *Computers and Electrical Engineering*, vol. 70, pp. 163-178, Aug. 2018 (doi: 10.1016/j.compeleceng.2018.01.043).
- [4] D. Akmaz, M.S. Mamis, M. Arkan, M.E. Tagluk, "Transmission line fault location using traveling wave frequencies and extreme learning machine", *Electric Power Systems Research*, vol. 155, pp. 1-7, Feb. 2018 (doi: 10.1016/j.epsr.2017.09.019).
- [5] P.R. Chegiredy, R. Bhimasingu, "Synchrophasor based fault location algorithm for three terminal homogeneous transmission lines", *Electric Power Systems Research*, vol. 191, Article Number: 106889, Feb. 2021 (doi: 10.1016/j.epsr.2020.106889).
- [6] A. Mouco, A. Abur, "Improving the wide-area PMU-based fault location method using ordinary least squares estimation", *Electric Power Systems Research*, vol. 189, Article Number: 106620, Dec. 2020 (doi: 10.1016/j.epsr.2020.106620).
- [7] S.K. Paraddi, H.S. Veena, "Wide area monitoring system- Identification and location of fault using voltage measurement", *Proceeding of the IEEE/I2CT*, pp. 1-6, Bombay, India, March 2019 (doi: 10.1109/I2CT45-611.2019.9033813).
- [8] Z.S. Chafi, H. Afrakhte, "Wide area fault location on transmission systems using synchronized/ unsynchronized voltage/current measurements", *Electric Power Systems Research*, vol. 197, Article Number: 107285, Aug. 2021 (doi: 10.1016/j.epsr.2021.107285).
- [9] A.S. Dobakhshari, "Wide-area fault location of transmission lines by hybrid synchronized/unsynchronized voltage measurements", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 1869-1877, May 2018 (doi: 10.1109/TSG.2016.2601379).
- [10] A. Ansari, F.H. Fesharaki, "Placement of phasor measurement units in power networks and optimal distribution of measurement redundancy", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 9, no. 36, pp. 3-14, March 2019 (doi: 20.1001.1.23223871.1397.9.36.1.6).
- [11] P. Ren, H.L. Ari, A. Abur, "Tracking three phase untransposed transmission line parameters using synchronized measurements", *IEEE Trans. on Power System*, vol. 33, no. 4, pp. 4155-4163, Jul. 2018 (doi: 10.1109/TPWRS.2017.2780225).
- [12] X. Kong, Y. Xu, Z. Jiao, D. Dong, X. Yuan, S. Li, "Fault location technology for power system based on information about the power internet of things", *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 10, pp. 6682-6692, Oct. 2020 (doi: 10.1109/TII.2019.2960440).
- [13] N. Peng, L. Zhou, R. Liang, H. Xu, "Fault location of transmission lines connecting with short branches based on polarity and arrival time of asynchronously recorded traveling waves", *Electric Power Systems Research*, vol. 169, pp. 184-194, April 2019 (doi: 10.1016/j.epsr.2018.12.022).
- [14] A. Jain, A. Tc, M. Sahoo, "A methodology for fault detection and classification using PMU measurements", *20th National Power Systems Conference (NPSC)*, India, Dec. 2018 (doi: 10.1109/NPSC.2018.8771757).
- [15] P.C. Fernandes, T.R. Honorato, F.V. Lopes, K.M. Silva, H.N.G.V. Gonçalves, "Evaluation of travelling wave-based fault location methods applied to HVDC systems", *Electric Power Systems Research*, vol. 189, Article Number: 106619, Dec. 2020 (doi: 10.1016/j.epsr.2020.106619).
- [16] A. Xue, F. Xu, K.E. Martin, H. You, J. Xu, L. Wang, G. Wei, "Robust identification method for transmission line parameters that considers PMU phase angle error", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 86962-86971, May 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.2992247).
- [17] S.S.M. Seyedi, F. Aminifar, S. Afsharnia, "Parameter estimation of multi terminal transmission lines using joint PMU and SCADA data", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1077-1085, June 2015 (doi: 10.1109/TPWRD.2014.2369500).
- [18] A.S. Dobakhshari, "Fast accurate fault location on transmission system utilizing wide-area unsynchronized measurements", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 101, pp. 234-242, Oct. 2018 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.03.009).
- [19] S.S. M.-Seyedi, F. Aminifar, S. Afsharnia, "Application of WAMS and SCADA data to online modeling of series-compensated transmission lines", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 8, no. 4, pp. 1968-1976, July 2017 (doi: 10.1109/TSG.2015.2513378).
- [20] M.R. Rezaei, S.R. H. Amrei, M.R. Miveh, "Online identification of power transformer and transmission line parameters using synchronized voltage and current phasors", *Electric Power Systems Research*, vol. 203, Article Number: 107638, Feb. 2022 (doi: 10.1016/j.epsr.2021.107638).
- [21] CIGRE, "Thermal behavior of overhead conductors", *Cigre wg12, Electra*, Number: 144, pp.107-125, Oct. 1992.

- [22] IEEE Standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors, IEEE Standard: 738-2006, Jan. 2007 (doi: 10.1109/IEEESTD.2007.301349).
- [23] H. Saadat, "Power system analysis", 3rd Edition, PSA Publishing LLC, pp. 1-720, Jan. 2011.
- [24] A.J. Wood, B.F. Wollenberg, "Power generation, operation and control", 2th Edition, Wiley-interscience Publication, pp. 1-593, 1996.
- [25] A.G. Phadke, J.S. Thorp, "Synchronized phasor measurements and their applications", 1st Edition, Springer Boston MA, pp. 1-248, 2008 (doi: 10.1007/978-0-387-76537-2).

زیر نویس‌ها

1. Wide area measurement system
2. Phasor measurement units
3. Global positioning system
4. Current transformer
5. Supervisory control and data acquisition
6. Nonlinear least square
7. Thyristor controlled series capacitor
8. Flexible AC transmission systems
9. Dynamic thermal rating
10. Radiated heat flux rate
11. Azimuth
12. Single line to ground
13. Line to line
14. Double line to ground
15. Symmetrical (three phase) short circuit