

## Integrated Wide Area Fault Location in Transmission Network Using Differential Impedance Index Based on Phasor Synchronous Data

Saeed Kardan Halvaei,<sup>1</sup> Tohid Ghanizadeh Bolandi,<sup>2\*</sup> Vahid Talavat<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Electrical and Computer Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.  
kardansaeed@gmail.com

<sup>2</sup> Faculty of Electrical and Computer Engineering, Urmia University, Urmia, Iran  
t.ghanizadehbolandi@urmia.ac.ir

<sup>3</sup> Faculty of Electrical and Computer Engineering, Urmia University, Urmia, Iran  
v.talavat@urmia.ac.ir

### Keywords:

wide area fault location  
differential impedance  
fault resistance  
transmission line protection  
synchrophasor data

**Abstract:** Transmission networks are always prone to various short-circuit faults in their lines. Fast and accurate fault location is required to improve system reliability by reducing downtime and restoring service. This issue has become more interesting since the advent of wide area communication and measurement technologies. Dependence on the parameter of the protected line, inaccuracy in resistance faults and time-consuming detection of the fault area, and faulty line are among the main disadvantages of the existing methods. This article presents a new integrated fault location algorithm based on differential-impedance calculated from voltage and current phasors collected from two transmission fault terminals. First, the suspected fault line was identified using the differential of the phase angle of the positive sequence current calculated at the two terminals of each line. Then, the exact location of the fault was obtained using the impedance-differential technique. This technique was tested for different types of faults, various locations of fault and fault resistance. The important output of this article is the rapid detection of the fault area, the faulty line, and fault location using a technique based on differential impedance obtained from synchronous measurements on both sides of the line.

### Original Research Article

#### Paper History:

Received: 27/04/2024

Revise: 13/07/2024

Accepted: 15/07/2024

**How to cite this article:** Kardan Halvaei, S., Ghanizadeh Bolandi, T., Talavat, V., "Integrated Wide Area Fault Location in Transmission Network using Differential Impedance Index based on Phasor Synchronous Data", Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 1, PP. 74-89, Spring 2024. <https://doi.org/10.22052/eem.2024.254849.1066>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



### Introduction

Transmission lines are subject to faults resulted from various causes such as short circuit, bird strike, and storm. The existing methods in fault location are generally divided into conventional methods based on local information and new methods based on wide area information, each of which uses specific algorithms for

location. Local fault location methods require measurements from one or more terminals of the faulty line to be available. Besides, the nonlinearity of circuit equations, related to the fault location, makes their solution process repetitive and computationally complicated. In this article, the focus is on the review of the fault location methods based on synchronous

phasor measurements and wide area measurements. This article through using the impedance-differential protection theory presented in [19], which is a pilot protection method for the transmission line, provides an indicator for wide area fault location in transmission networks using phasor-synchronous data.

### Materials and Methods

Using relations (39) to (42), a wide area location scheme for the transmission network can be implemented. The steps of the wide-area fault location plan, based on phasor-synchronous measurements that were obtained from transmission network buses equipped with PMU equipment are as follows:

- First step is measuring the voltage and current signals from all the buses of the transmission network. At this stage, the analog voltage and current signals should be measured by the voltage and current measuring transformers by this equipment in all the buses of the transmission network.
- The second step is extracting the phasor components of the voltage and current signals through the PMUs in the transmission network buses; in this step, the analog voltage and current signals in all buses must first pass through an anti-similarity low-pass filter to remove high-frequency components from the signal; then, with a sampling frequency of 20 samples per cycle, they are sampled by the A/D converter and converted to the phasor components of voltage and current synchronized with the GPS time tag by the Fourier algorithm of the full cycle coded in the PMU microprocessor. These phasor components will be available simultaneously and with a common time reference in all buses of the transmission network as the output of PMUs.
- The third step is sending the phasor components of the voltage and current measured simultaneously in the network buses to the local PDC; in this step, the phasor components of the voltage and current are collected from all the PMUs of the transmission network buses and sent to the local PDC. At this stage, the damaged information is deleted and, if needed, the information is obtained from the PMUs again. If all the necessary information is available for the implementation of the fault location algorithm, this information will be sent to the location center of the wide area of the fault. This process is depicted in Figure (4).
- Fourth step is the detection of suspected fault lines; in this step, by using the current phasors collected from the PMUs in the network buses, the phase angle of all the currents is extracted. Then, for each line using the phase angle of the current phasor obtained from the PMUs in the two sides of the line, an index, called the phase angle differential of the phasor component of the currents on both sides of the line is calculated to determine the suspect line. If the value of this differential is greater than the defined threshold value, that line will be considered as a suspected fault line. Fault location should be implemented for that line using differential impedance.
- In the fifth step, the location of the fault in the suspected fault line are accurately determined. In this step, using the relevant relationships, the approximate value of the fault location is obtained by calculating the performance impedance for each faulty phase of the suspected fault line.
- The sixth step is concerned with fault location accuracy; in this step, the accuracy can be obtained by comparing the exact value of the fault location with the estimated value of the fault location.

### Results

Wide area fault location in transmission networks using phasor synchronous data can be an effective method to increase system reliability due to reducing recovery time and power system shutdown. In this article, the wide area fault location in the transmission network is presented using the impedance-differential index, the most important outputs of which are as follows:

1. Accurate identification of the fault location is undertaken by analyzing the phasor synchronous data and comparing it with the reference values. The exact location of the fault can be detected with unacceptable approximation. This method is able to accurately determine the range and location of errors.
2. The proposed method is able to detect the approximate location of the fault in the faulty phase for all 11 types of short circuit currents.
3. The proposed wide area fault location method, unlike other fault location methods, does not depend on the time of the fault occurrence, and its accuracy is not affected by the moment of the fault occurrence.
4. The proposed method is able to quickly detect the approximate location of the fault in the faulty phase, and, therefore, it can lead to reduction in the blackout time and an increase in the reliability of the network.

## مکان‌یابی یکپارچه و ناحیه گسترده خط در شبکه انتقال با استفاده از شاخص امیدانس دیفرانسیل مبتنی بر داده‌های فازورسنکرون

سعید کاردان حلوائی<sup>۱</sup>، توحید غنی‌زاده بلندی<sup>۲\*</sup> و وحید تلاوت<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

kardansaeed@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

t.ghanizadehbolandi@urmia.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

v.talavat@urmia.ac.ir

---

چکیده: شبکه‌های انتقال همیشه مستعد خطاهای مختلف اتصال کوتاه در خطوط خود هستند. مکان‌یابی سریع خط با دقت مناسب برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم با کاهش زمان خاموشی و بازیابی سرویس مورد نیاز است. این مسئله از زمان ظهور فناوری‌های اندازه‌گیری و ارتباطی ناحیه گسترده جالب‌تر شده است. وابستگی به پارامتر خط حفاظت شونده، عدم دقت در خطاهای با مقاومت و زمان بر بودن تشخیص ناحیه خط و خط معیوب از جمله معایب اصلی روش‌های موجود است. این مقاله یک الگوریتم جدید مکان‌یابی یکپارچه و ناحیه گسترده خط را مبتنی بر امیدانس-دیفرانسیل محاسبه‌شده از فازورهای ولتاژ و جریان تجمیع‌شده از دو پایانه خط انتقال را ارائه می‌دهد. ابتدا خط مشکوک به خط با استفاده از دیفرانسیل زاویه‌فاز جریان توالی مثبت محاسبه‌شده در دو پایانه هر خط شناسایی می‌شود و سپس مکان خط با دقت مناسب با استفاده از روش امیدانس-دیفرانسیل به دست می‌آید. این روش برای انواع مختلف خطا، مکان‌های متنوع وقوع خطا و مقاومت خطا مورد آزمایش قرار می‌گیرد. به دست آوردن سریع ناحیه وقوع خطا، خط معیوب و فاصله وقوع خطا از شین ابتدای خط با استفاده از روش مبتنی بر امیدانس دیفرانسیل به دست آمده از اندازه‌گیری‌های سنکرون دو طرف خط از خروجی مهم این مقاله است.	واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی ناحیه گسترده خط امیدانس دیفرانسیل مقاومت خط حفاظت خط انتقال داده‌های فازورسنکرون
--	---

---

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸  
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

## ۱. مقدمه

خطوط انتقال و توزیع در معرض خطاهایی هستند که به دلایل مختلفی مانند اتصال کوتاه، برخورد پرنده و طوفان ایجاد می‌شوند. بیشتر این عیوب منجر به آسیب مکانیکی خطوط برق می‌شود که باید قبل از بازگرداندن خط به سرویس تعمیر شوند. عیوب خطوط برق باید با دقت مناسب مکان‌یابی شوند تا خدمت تعمیر و نگهداری بتوانند در محل حادثه حاضر شده و بخش معیوب را در اسرع وقت تعمیر کنند تا شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه تحت‌تأثیر منفی قرار نگیرد و پایداری گذرای سیستم به خطر نیفتد [۱-۲]. روش‌های موجود در مکان‌یابی خطا به‌طور کلی به دو دسته روش‌های مرسوم مبتنی بر اطلاعات محلی و روش‌های جدید مبتنی بر اطلاعات ناحیه‌گسترده تقسیم می‌شوند. روش‌های محلی در مکان‌یابی خطا نیاز به اندازه‌گیری از یک یا چند پایانه خط خطا دار دارد تا در دسترس باشد. از سوی دیگر، غیرخطی بودن معادلات مداری مرتبط با محل خطا، فرایند حل آن‌ها را تکراری و از لحاظ محاسباتی پیچیده می‌کند. در این مقاله تمرکز بر بررسی روش‌های مکان‌یابی خطا مبتنی بر اندازه‌گیری‌های فازورسنکرون و اندازه‌گیری‌های ناحیه‌گسترده است.

در سال‌های اخیر استفاده از فناوری اندازه‌گیری سنکروفازور<sup>۱</sup> در راستای نظارت، حفاظت و کنترل ناحیه‌گسترده شبکه<sup>۲</sup> افزایش یافته است. در این فناوری، پارامترهای اساسی مانند ولتاژ، جریان، زاویه‌فاز و فرکانس را می‌توان با استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU)<sup>۳</sup> اندازه‌گیری نمود. مسئله مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال از زمان ظهور فناوری‌های اندازه‌گیری و ارتباطی جدید جالب‌تر شده است. در مرجع [۳]، یک روش مکان‌یابی خطای مقاوم در مقابل نویز برای خطوط انتقال براساس PMU پیشنهاد شده است. معادلات ولتاژ گره براساس مؤلفه‌های خطای ولتاژ برای ایجاد معادلات درجه‌دوم غیرخطی تعیین شده محل خطا، با استفاده از PMUهای محدود در مجاورت خط خطا دار به دست آمده است. به‌منظور کمی‌سازی تأثیر خطاهای اندازه‌گیری، خطاهای باقی‌مانده در معادلات محل خطا نیز لحاظ شده‌اند. با وجود این، دقت روش پیشنهادی تحت‌تأثیر زمان وقوع خطا قرار می‌گیرد و وابسته به پارامترهای خط حفاظت‌شونده است. در مرجع [۴]، یک روش غیرتکراری برای مکان‌یابی ناحیه‌گسترده خطا با بهره‌گیری از قضیه جایگزینی پیشنهاد می‌شود. بر این اساس، سیستمی از معادلات

ایجاد می‌شود که با استفاده از روش حداقل مربعات خطی قابل حل است. با وجود این، این روش پیچیدگی محاسباتی بالایی دارد و زمان یافتن خطا را طولانی می‌کند. در مرجع [۵]، با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال، ویژگی‌های خاصی از سیگنال‌ها شامل تغییرات فرکانس، نویزهای غیرمعمول، تغییرات زمانی و... استخراج می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند و ماشینی، ویژگی‌های استخراج‌شده از سیگنال‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. این تجزیه و تحلیل به تعیین وضعیت خطا در خطوط بالادستی ترکیبی کمک می‌کند. در نهایت، وضعیت خطا با دقت مناسب مشخص می‌شود. در مرجع [۶]، با استفاده از اندازه‌گیری‌های فازورسنکرون، خطاهای اتصال کوتاه در خطوط جبران‌شده سری مکان‌یابی می‌شوند. با وجود این روش پیشنهادی تحت‌تأثیر درجه جبران‌سازی خازن و مقاومت خطا قرار گرفته و دقت آن کاهش می‌یابد. در مرجع [۷]، یک روش مکان‌یابی خطا با استفاده از توزیع مؤلفه‌های تحمیلی خطا شده ارائه شده است. با استفاده از این روش، اطلاعات از PMUها استخراج می‌شود تا توزیع مؤلفه‌های تحمیلی خطا را تخمین بزنند. سپس با استفاده از این تخمین، وضعیت خطا با دقت مناسب محاسبه می‌شود. در مرجع [۸] یک روش مکان‌یابی خطا با رله‌های جریان تفاضلی در خطوط سه‌ترمینالی ارائه شده است. این روش در خطاهای با مقاومت بالا کارایی و دقت لازم را ندارد. در مرجع [۹] روش مکان‌یابی خطا در سیستم‌های انتقال برق با استفاده از اندازه‌گیری همزمان یا ناهمزمان ولتاژ و جریان ارائه می‌شود تا با تجزیه و تحلیل این اندازه‌گیری‌ها و استفاده از روابط بین ولتاژ و جریان در سیستم، معادلاتی برای تعیین وضعیت دقیق خطا ایجاد ارائه گردد. با ترکیب اطلاعات همزمان و ناهمزمان، روش پیشنهادی می‌تواند دقت بالا در تعیین وضعیت خطاها را ارائه دهد. در مرجع [۱۰]، روش ماشین بردار پشتیبان<sup>۴</sup> برای دسته‌بندی و تشخیص وضعیت خطاها در خطوط انتقال برق بررسی می‌شود. ماشین بردار پشتیبان (SVM) یک روش یادگیری ماشینی است که برای دسته‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین ایرادات این روش نیاز داشتن آن به داده‌ها و شبیه‌سازی‌های متعدد برای یادگیری است که دقت روش پیشنهادی به نوع آموزش ماشین بردار پشتیبان و سناریوهای آن وابسته است.

در مرجع [۱۱]، روش جدید برای مکان‌یابی خطا با استفاده از درخت تصمیم مبتنی بر رگرسیون مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین ایرادات این روش وابستگی آن به تعداد سناریوهای

1. Synchrophasor
2. WAMPAC
3. Phasor Measurement Units

از الگوریتم WMES، مقاومت روش پیشنهادی را در برابر داده‌های نامطلوب ناشی از عدم قطعیت اندازه‌گیری تضمین می‌کند. در مرجع [۱۷]، یک روش مکان‌یابی خطا با استفاده از محل خطای یک‌طرفه بر پایه فرکانس امواج سیار ناشی از عملکرد بریکر پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی با استفاده از تبدیل فوریه سریع و تبدیل موجک، اطلاعات مورد نیاز را از امواج سیار ولتاژ استخراج کرده و به کمک شبکه عصبی مصنوعی به تشخیص خطا و مکان‌یابی آن می‌پردازد. وابستگی روش پیشنهادی به سناریوهای آموزش شبکه عصبی و وابستگی آن به عملکرد مدارشکن از جمله ایرادات این روش است. در مرجع [۱۸]، روشی برای تشخیص و دسته‌بندی خطا در یک خط انتقال دومیاداره جبران‌شده سری با TCSC پیشنهاد شده است که از ابزار پردازش سیگنال تبدیل موجک برای استخراج ویژگی سیگنال استفاده شده است. در ادامه از الگوریتم‌های طبقه‌بندی‌کننده درخت تصمیم‌گیری و ماشین بردار پشتیبان برای آموزش استفاده می‌شود. وابستگی این روش همچون سایر روش‌هایی که مبتنی بر آموزش و یادگیری ماشین است به سناریوهای مورد بررسی از ایرادات این‌گونه روش‌هاست که دقت روش پیشنهادی را در نقاط کار مختلف سیستم قدرت با چالش روبه‌رو می‌کند.

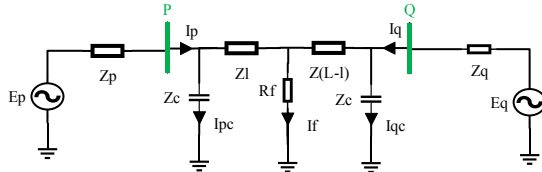
در این مقاله با استفاده از تئوری حفاظتی امپدانس-دیفرانسیل ارائه شده در مرجع [۱۹] که یک روش حفاظتی پایلوت برای خط انتقال است، به عنوان شاخصی برای مکان‌یابی ناحیه گسترده خطا در شبکه‌های انتقال با استفاده از داده‌های فازورسنکرون استفاده شده و قابلیت روش پیشنهادی برای مکان‌یابی خطا مورد ارزیابی قرار گرفته است. به طور خلاصه مهم‌ترین نوآوری‌های روش مکان‌یابی خطای پیشنهادی به شرح ذیل است:

- ارائه شاخص مکان‌یابی خطا مبتنی بر روش امپدانس دیفرانسیل برای تشخیص مکان خطا با دقت مناسب و پیشنهاد طرح مکان‌یابی ناحیه گسترده خطا براساس شاخص پیشنهادی.
- توانمندی مناسب روش پیشنهادی برای تشخیص انواع خطاهای اتصال کوتاه در مکان‌های مختلف با مقاومت خطای مختلف.
- به دست آوردن سریع ناحیه وقوع خطا و فاز معیوب با استفاده از شاخص اختلاف زاویه فاز جریان‌های تجمیع شده از دو طرف خط حفاظت‌شونده.

لحاظ شده در درخت تصمیم است که می‌تواند دقت روش پیشنهادی را تحت تأثیر قرار دهد و نمی‌تواند به عنوان یک روش قطعی مورد استفاده قرار گیرد. در مرجع [۱۲] برای تعیین مکان خطا در خطوط انتقال هوایی براساس امواج مغناطیسی و فیلتر کالمن گسترده می‌پردازد. در این روش، امواج مغناطیسی مربوط به خطاها در خطوط انتقال هوایی با استفاده از حسگرهای مغناطیسی جمع‌آوری می‌شود. سپس، از فیلتر کالمن گسترده که یک روش تخمین وضعیت سیستم براساس مدل ریاضی است، استفاده می‌شود تا وضعیت خطاها را تخمین بزند. حساسیت این روش به نویز و نیز تحت تأثیر قرار گرفتن آن با مقاومت خطای یکی از ایرادات مهم این روش است. در مرجع [۱۳]، از روش ترکیبی اندازه‌گیری‌های ولتاژ همگام و غیرهمگام برای تعیین ناحیه گسترده خطا در شبکه انتقال استفاده شده است. با استفاده از این روش، اندازه‌گیری‌های همگام و غیرهمگام از نقاط گسترده در سیستم جمع‌آوری شده و با استفاده از الگوریتم‌های مناسب، وضعیت خطا تعیین می‌شود. استفاده از روش ترکیبی اندازه‌گیری‌های همگام و غیرهمگام باعث افزایش دقت و قابلیت اطمینان در تعیین وضعیت خطا شده است. در مرجع [۱۴] به بررسی قوانین مشاهده‌پذیری حفاظتی و مکان‌یابی خطا در شبکه قدرت برای الگوریتم‌های مکان‌یابی خطای مبتنی بر امپدانس توسط ادوات PMU پرداخته شده است تا بتوان از طریق PMU‌های موجود در سیستم، اطلاعات کافی برای تشخیص و مکان‌یابی خطا را به دست آورد. در مرجع [۱۵]، یک روش هیبریدی برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال ترکیبی<sup>۱</sup> پیشنهاد می‌شود. این روش از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی<sup>۲</sup> و تبدیل بسته موجک<sup>۳</sup> استفاده کرده که از شبکه عصبی مصنوعی برای آموزش و پیش‌بینی وضعیت خطا و از تبدیل بسته موجک برای استخراج ویژگی‌های مرتبط با خطا از سیگنال‌های اندازه‌گیری‌شده بهره برده است. روش پیشنهادی در این مقاله قابلیت تعیین وضعیت خطا در خطوط انتقال ترکیبی را با دقت و قابلیت اعتماد بالا بهبود می‌بخشد؛ ولی وابستگی آن به سناریوهای آموزش شده توسط شبکه عصبی و حساسیت آن به مقاومت خطا از ایرادات آن است. در مرجع [۱۶]، یک روش مکان‌یابی ناحیه گسترده خطا براساس الگوریتم مربعات بیشینه‌نمایی وزن‌دار (WMES) پیشنهاد می‌شود که دارای مقاومت بالا در برابر عدم قطعیت اندازه‌گیری است. در این روش، اندازه‌گیری‌ها براساس قضیه انتشار عدم قطعیت به طور مناسب وزن‌دهی می‌شوند. استفاده

1. Hybrid Transmission Lines  
2. Artificial Neural Network  
3. Wavelet Packet Transform

که  $(\tilde{U}_{diff})$  ولتاژ دیفرانسیل،  $(\tilde{U}_p)$  فازور ولتاژ شین P،  $(\tilde{U}_q)$  فازور ولتاژ شین Q،  $(\tilde{E}_p)$  فازور ولتاژ تونن دیده‌شده از شین P،  $(\tilde{E}_q)$  فازور ولتاژ تونن دیده‌شده از شین Q،  $(\tilde{I}_{diff})$  جریان دیفرانسیل،  $(\tilde{I}_p)$  جریان اندازه‌گیری شده در سمت ترمینال P،  $(\tilde{I}_q)$  جریان اندازه‌گیری شده در سمت ترمینال Q است.



شکل (۱): مدل مداری یک خط انتقال برای به دست آوردن امیدانس خطای داخلی

با تقسیم ولتاژ دیفرانسیل بر جریان دیفرانسیل، امیدانس  $(Z_{diff})$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Z_{diff} = \frac{\tilde{U}_{diff}}{\tilde{I}_{diff}} = \frac{\tilde{U}_p - \tilde{U}_q}{\tilde{I}_p - \tilde{I}_q} \quad (۳)$$

## ۲.۲. اثبات روش مکان‌یابی خطا برای خطاهای سه‌فاز

### مقارن

در خطاهای مقارن سه‌فاز فقط مدار توالی مثبت خط وجود دارد و محاسبات بر این اساس انجام می‌گیرد. با توجه به شکل (۱) با صرف‌نظر از جریان خازنی خط (که اندازه جریان خطا بزرگ‌تر از جریان شارژینگ خازنی است) در مقابل جریان خطا و نوشتن معادله افت ولتاژ از ترمینال‌های خط تا نقطه خطا معادلات زیر حاصل خواهند شد:

$$\tilde{U}_p - zL\tilde{I}_p = \tilde{U}_q - z(L-l)\tilde{I}_q \quad (۴)$$

$$\tilde{U}_p - \tilde{U}_q = zL\tilde{I}_p - z(L-l)\tilde{I}_q \quad (۵)$$

با فرض اینکه خطا در فاصله  $l = zkl$  از ترمینال P اتفاق بیفتد و خود k ضریب بین (۱ و ۰) است و فاصله ترمینال Q از نقطه خطا برابر است با  $(1-k) \times L$ ، با جاگذاری فاصله خطا بر حسب k در رابطه (۵) مقدار امیدانس به صورت زیر به دست می‌آید.

$$z_{diff} = \left( \frac{\tilde{U}_p - \tilde{U}_q}{\tilde{I}_p - \tilde{I}_q} \right) = zL \times \left( \frac{K\tilde{I}_p - (1-K)\tilde{I}_q}{\tilde{I}_p - \tilde{I}_q} \right) \quad (۶)$$

با کم کردن  $\frac{zL}{2}$  از رابطه (۶) خواهیم داشت:

## ۲. الگوریتم حفاظتی مبتنی بر امیدانس دیفرانسیل

در این قسمت شاخص حفاظتی خط انتقال مبتنی بر امیدانس دیفرانسیل مطرح شده در مرجع [۱۹]، به‌عنوان یک روشی برای مکان‌یابی خطای ناحیه گسترده شبکه انتقال پیشنهاد می‌شود. همان‌طور که مشخص است، مکان‌یابی خطا فرایندی بعد از تشخیص خطا توسط الگوریتم حفاظتی است. به عبارت دیگر، مکان‌یابی خطا بعد از عملکرد تجهیز حفاظتی و تشخیص خطا توسط آن و باز شدن بریکرهای دو انتهای خط انجام می‌گیرد؛ لذا برخلاف طرح حفاظت خط انتقال، فرایند مکان‌یابی خطا می‌تواند یک فرایند زمان‌بر باشد. در این مقاله، مکان‌یابی خطا مبتنی بر این شاخص برای یک شبکه انتقال متشکل از چندین خطوط پیاده‌شده است. فرض می‌شود تمامی شین‌های شبکه انتقال مجهز به PMU هستند و الگوریتم مکان‌یابی خطا مبتنی بر داده‌های فازورسنکرون جمع‌آوری شده از شین‌های شبکه انتقال پیاده‌سازی می‌شود. در ادامه، خروجی این شاخص در خطاهای مقارن و نامقارن بررسی می‌شود و طرح مکان‌یابی ناحیه گسترده خطا مبتنی بر این شاخص پیشنهاد می‌شود.

### ۱.۲. معرفی شاخص پیشنهادی مکان‌یابی خطا در شبکه انتقال با استفاده از معیار امیدانس دیفرانسیل

شاخص امیدانس دیفرانسیل برابر نسبت اختلاف فازور ولتاژهای اندازه‌گیری شده دو ترمینال خط به اختلاف فازور جریان‌های اندازه‌گیری شده دو سمت خط است. تخمین فازور ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده توسط الگوریتم فوریه تمام‌سیکل، با فرکانس نمونه‌برداری ۲ کیلوهرتز انجام می‌شود. برای اثبات روش پیشنهادی، از مدل  $\pi$  خط انتقال در شکل (۱) استفاده می‌شود که در معرض یک خطای داخلی قرار دارد. این مدل برای خطاهای سه‌فاز مقارن معتبر است؛ چراکه در خطاهای مقارن تنها مدار توالی مثبت وجود خواهد داشت و مؤلفه‌های توالی منفی و صفر وجود ندارند. در این شکل، امیدانس پریونیت کل خط حفاظت‌شونده (Z)، طول کل خط (L)، فاصله از ترمینال P تا نقطه خطای داخلی (l)، و k ضریب بین (۰ و ۱) است با فرض اینکه جهت‌های مثبت جریان‌ها در هر دو پایانه به سمت خط P, Q هستند. ولتاژ دیفرانسیل  $(\tilde{U}_{diff})$  و جریان دیفرانسیل  $(\tilde{I}_{diff})$  به صورت زیر خواهد بود:

$$\tilde{U}_{diff} = \tilde{U}_p - \tilde{U}_q \quad (۱)$$

$$\tilde{I}_{diff} = \tilde{I}_p - \tilde{I}_q \quad (۲)$$

از آنجاکه  $\tilde{U}_{f1} = \tilde{U}_{f2}$  باهم برابر است، با کم کردن رابطه (۱۱) از رابطه (۱۰) و در نظر گرفتن رابطه  $\tilde{U}_{f1} = \tilde{U}_{f2}$  رابطه (۱۲) حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{p1} - \tilde{U}_{p2} - z_1 l (\tilde{I}_{p1} - \tilde{I}_{p2}) &= \\ = \tilde{U}_{q1} - \tilde{U}_{q2} - z_1 (L - l) (\tilde{I}_{q1} - \tilde{I}_{q2}) &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

با فرض اینکه اتصال کوتاه دوفاز بین فاز (B و C) رخ داده باشد و با در نظر گرفتن ارتباط مؤلفه‌های فاز و مؤلفه‌های توالی، برای ترمینال (P) خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \tilde{U}_{pa} = \tilde{U}_{p1} + \tilde{U}_{p2} + \tilde{U}_{p0} \\ \tilde{U}_{pb} = a^2 \tilde{U}_{p1} + a \tilde{U}_{p2} + \tilde{U}_{p0} \\ \tilde{U}_{pc} = a \tilde{U}_{p1} + a^2 \tilde{U}_{p2} + \tilde{U}_{p0} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \tilde{U}_{qa} = \tilde{U}_{q1} + \tilde{U}_{q2} + \tilde{U}_{q0} \\ \tilde{U}_{qb} = a^2 \tilde{U}_{q1} + a \tilde{U}_{q2} + \tilde{U}_{q0} \\ \tilde{U}_{qc} = a \tilde{U}_{q1} + a^2 \tilde{U}_{q2} + \tilde{U}_{q0} \end{cases} \quad (14)$$

مقدار  $a$  در روابط (۱۳) و (۱۴) یک عملگر فازوری با دامنه یک و زاویه فاز ۱۲۰ درجه ( $a = 1 \angle 120$ ) است. با استفاده از روابط فوق می‌توان ارتباط مشابهی بین جریان‌های توالی با جریان‌های فاز را استخراج کرد. با توجه به روابط (۱۳) و (۱۴) خواهیم داشت:

$$\tilde{U}_{pb} - \tilde{U}_{pc} = (a^2 - a)(\tilde{U}_{p1} - \tilde{U}_{p2}) \quad (15)$$

$$\tilde{U}_{qb} - \tilde{U}_{qc} = (a^2 - a)(\tilde{U}_{q1} - \tilde{U}_{q2}) \quad (16)$$

$$\tilde{I}_{pb} - \tilde{I}_{pc} = (a^2 - a)(\tilde{I}_{p1} - \tilde{I}_{p2}) \quad (17)$$

$$\tilde{I}_{qb} - \tilde{I}_{qc} = (a^2 - a)(\tilde{I}_{q1} - \tilde{I}_{q2}) \quad (18)$$

با جای‌گذاری روابط (۱۵) تا (۱۸) در رابطه (۱۲) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{U}_{pb} - \tilde{U}_{pc}}{(a^2 - a)} - z_1 l \frac{\tilde{I}_{pb} - \tilde{I}_{pc}}{(a^2 - a)} &= \\ = \frac{\tilde{U}_{qb} - \tilde{U}_{qc}}{(a^2 - a)} & \\ - z_1 (L - l) \frac{\tilde{I}_{qb} - \tilde{I}_{qc}}{(a^2 - a)} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

با توجه به رابطه (۱۹) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{pb} - \tilde{U}_{qb} - z_1 l \tilde{I}_{pb} + z_1 (L - l) \tilde{I}_{qb} &= \\ = \tilde{U}_{pc} - \tilde{U}_{qc} - z_1 l \tilde{I}_{pc} & \\ + z_1 (L - l) \tilde{I}_{qc} &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

بنابراین:

$$\tilde{U}_{pb} - \tilde{U}_{qb} = z_1 l \tilde{I}_{pb} - z_1 (L - l) \tilde{I}_{qb} \quad (21)$$

با تقسیم کردن طرفین (۲۱) به  $\tilde{I}_{pb} - \tilde{I}_{qb}$  داریم:

$$\left( Z_{diff} - \frac{zL}{2} \right) = zL \left( K - \frac{1}{2} \right) \left( \frac{\tilde{I}_p + \tilde{I}_q}{\tilde{I}_p - \tilde{I}_q} \right) \quad (7)$$

$$\left( Z_{diff} - \frac{zL}{2} \right) \left( \frac{\tilde{I}_p - \tilde{I}_q}{\tilde{I}_p + \tilde{I}_q} \right) = zL \left( K - \frac{1}{2} \right) \quad (8)$$

همان‌طور که از رابطه (۸) مشخص است، طرف راست رابطه ضربی از امیدانس توالی مثبت خط است و با ضرب کردن طرفین به عدد ۲ امیدانس عملکرد  $Z_{opp}$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Z_{opp} = 2 \left( Z_{diff} - \frac{zL}{2} \right) \left( \frac{\tilde{I}_p - \tilde{I}_q}{\tilde{I}_p + \tilde{I}_q} \right) = zL(2K - 1) \quad (9)$$

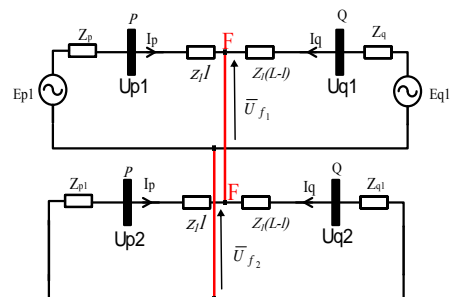
همان‌طور که از رابطه بالا معلوم است، با در دست داشتن جریان‌های اندازه‌گیری شده دو طرف خط و محاسبه  $Z_{diff}$  مقدار  $Z_{opp}$  به آسانی قابل محاسبه خواهد بود.  $Z_{opp}$  در خط‌های داخلی برابر امیدانس توالی مثبت خط حفاظت‌شونده خواهد بود و با به دست آوردن مقدار  $Z_{opp}$  مقدار  $K$  که نشان‌دهنده محل وقوع خطاست، به آسانی به دست خواهد آمد و بدین ترتیب می‌توان محل خطا با دقت مناسب را در داخل خط با استفاده از رابطه (۹) در خط‌های متقارن سه‌فاز برای هر فاز به‌طور جداگانه حساب کرد.

### ۳.۲. اثبات روش مکان‌یابی خطا در خط‌های دوفاز به‌هم

یکی دیگر از انواع خط‌های نامتعادل در شبکه انتقال اتصال کوتاه دوفاز به‌هم است. در خط‌های فاز به فاز مدارهای مؤلفه‌های مثبت و منفی باهم موازی می‌شوند. شکل (۲) مدار معادل توالی در خط‌های فاز به فاز را نشان می‌دهد. خط‌های دوفاز به‌هم به دلیل موازی بودن مدارهای توالی مثبت و منفی، فازور ولتاژ محل خطا باهم برابر خواهد بود و با استفاده از (KVL) از دو ترمینال P و Q تا نقطه خطا روابط زیر به دست می‌آید:

$$\tilde{U}_{f1} = \tilde{U}_{p1} - z_1 l \tilde{I}_{p1} = \tilde{U}_{q1} - z_1 (L - l) \tilde{I}_{q1} \quad (10)$$

$$\tilde{U}_{f2} = \tilde{U}_{p2} - z_1 l \tilde{I}_{p2} = \tilde{U}_{q2} - z_1 (L - l) \tilde{I}_{q2} \quad (11)$$



شکل (۲): مدار معادل مؤلفه‌های توالی خط در خط‌های دوفاز به‌هم



#### ۴.۲. اثبات روش مکان یابی خطا در خطاهای تک فاز

تاکنون، خطاهای متقارن سه فاز، خطاهای دوفاز به هم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تجزیه و تحلیل امیدانس دیفرانسیل در خطاهای نامتقارن تک فاز را می توان با استفاده از سری کردن مدارت توالی مثبت، منفی و صفر انجام داد. برای این منظور خطاهای داخلی تک فاز به زمین را در این قسمت بررسی کردیم که می توان این فرایند را برای انواع خطاها توسعه داد. شکل (۳) شبکه های توالی مثبت، منفی و صفر را برای یک خطای تک فاز به زمین در مدل خط کوتاه نوع R-L نشان می دهد که با هم سری شده اند. در اینجا اعداد (۱، ۲، ۰) به ترتیب مؤلفه های مثبت، منفی و صفر را نشان می دهند. می توان از شکل (۳) نوشت که:

$$\begin{cases} \tilde{U}_{f1} = \tilde{U}_{p1} - z_1 l (\tilde{I}_{p1}) = \tilde{U}_{q1} - z_1 (L-l) \tilde{I}_{q1} \\ \tilde{U}_{f2} = \tilde{U}_{p2} - z_1 l (\tilde{I}_{p2}) = \tilde{U}_{q2} - z_1 (L-l) \tilde{I}_{q2} \\ \tilde{U}_{f0} = \tilde{U}_{p0} - z_0 l (\tilde{I}_{p0}) = \tilde{U}_{q0} - z_0 (L-l) \tilde{I}_{q0} \end{cases} \quad (26)$$

با جمع کردن طرف اول و دوم سه معادله فوق الذکر با هم با فرض اینکه فاز (a) در معرض خطا باشد، خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \tilde{U}_{fa} = \tilde{U}_{pa} - z_1 l (\tilde{I}_{pa}) - ((z_0 - z_1) l) (\tilde{I}_{p0}) \\ \tilde{U}_{fa} = \tilde{U}_{qa} - z_1 (L-l) \tilde{I}_{qa} - (z_0 - z_1) (L-l) \tilde{I}_{q0} \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{pa} - z_1 l \left( \tilde{I}_{pa} + \frac{z_0 - z_1}{z_1} \tilde{I}_{p0} \right) \\ = \tilde{U}_{qa} - z_1 (L-l) \left( \tilde{I}_{qa} + \frac{z_0 - z_1}{z_1} \tilde{I}_{q0} \right) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{pa} - \tilde{U}_{qa} - (z_0 - z_1) [l (\tilde{I}_{p0}) - (L-l) \tilde{I}_{q0}] \\ = z_1 l (\tilde{I}_{pa}) - z_1 (L-l) \tilde{I}_{qa} \end{aligned} \quad (29)$$

محاسبات افت ولتاژ از هر دو ترمینال به نقطه خطا در مدار توالی صفر شکل (۳) معادله ای به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\tilde{U}_{p0} - z_0 l (\tilde{I}_{p0}) = \tilde{U}_{q0} - z_0 (L-l) \tilde{I}_{q0} \quad (30)$$

با مرتب سازی خواهیم داشت:

$$l (\tilde{I}_{p0}) - (L-l) \tilde{I}_{q0} = \frac{\tilde{U}_{p0} - \tilde{U}_{q0}}{z_0} \quad (31)$$

با جاگذاری سمت راست رابطه (۳۱) به (۲۹) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{pa} - \tilde{U}_{qa} - \frac{z_0 - z_1}{z_0} (\tilde{U}_{p0} - \tilde{U}_{q0}) \\ = z_1 l (\tilde{I}_{pa}) - z_1 (L-l) \tilde{I}_{qa} \end{aligned} \quad (32)$$

حال با تقسیم رابطه (۳۲) به  $(\tilde{I}_{pa} - \tilde{I}_{qa})$  خواهیم داشت:

$$z'_{diff} = \frac{\tilde{U}_{pb} - \tilde{U}_{qb}}{\tilde{I}_{pb} - \tilde{I}_{qb}} = \frac{z_1 l \tilde{I}_{pb} - z_1 (L-l) \tilde{I}_{qb}}{\tilde{I}_{pb} - \tilde{I}_{qb}} \quad (22)$$

$$= zL \frac{K \tilde{I}_{pb} - (1-K) \tilde{I}_{qb}}{\tilde{I}_{pb} - \tilde{I}_{qb}}$$

با کم کردن  $\frac{zL}{2}$  از طرفین رابطه (۲۲) خواهیم داشت:

$$\left( z'_{diff} - \frac{zL}{2} \right) = zL \left( k - \frac{1}{2} \right) \left( \frac{\tilde{I}_{pb} + \tilde{I}_{qb}}{\tilde{I}_{pb} - \tilde{I}_{qb}} \right) \quad (23)$$

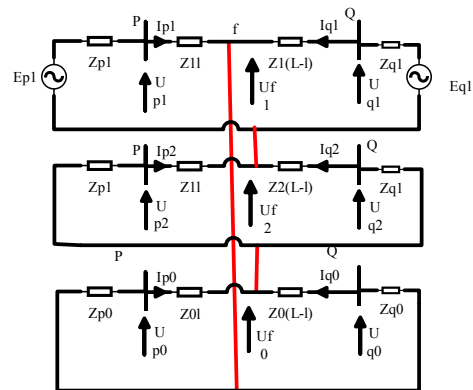
بنابراین برای فاز (B) امیدانس عملکرد  $Z_{opB}$  به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} Z_{opB} &= 2 \left( z'_{diff} - \frac{zL}{2} \right) \left( \frac{\tilde{I}_{pb} - \tilde{I}_{qb}}{\tilde{I}_{pb} + \tilde{I}_{qb}} \right) \\ &= zL (2K - 1) \end{aligned} \quad (24)$$

و برای فاز (C) امیدانس عملکرد  $Z_{opC}$  را به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} Z_{opC} &= 2 \left( z'_{diff} - \frac{zL}{2} \right) \left( \frac{\tilde{I}_{pc} - \tilde{I}_{qc}}{\tilde{I}_{pc} + \tilde{I}_{qc}} \right) \\ &= zL (2K - 1) \end{aligned} \quad (25)$$

با در نظر گرفتن طرف راست رابطه (۲۲)،  $(zL)$  و با جاگذاری آن در روابط (۲۴) و (۲۵) برای فازهای معیوب در خطای دوفاز به هم می توان نتیجه گرفت همان مقداری که برای امیدانس سه فاز به دست می آید، برای خطاهای دوفاز به هم نیز صادق است و نتیجه می توان گرفت که برای امیدانس عملکرد  $Z_{op\phi}$  برای انواع خطاهای داخلی در هر فاز معیوب درست جواب می دهد. شایان ذکر است که در خطاهای دوفاز به هم و به زمین نیز از آنجاکه مدارات توالی مثبت، منفی و صفر با هم موازی خواهند شد، به خروجی مشابهی خواهیم رسید.



شکل (۳): شبکه های توالی مثبت، منفی و صفر در خطاهای تک فاز به

زمین



$(\tilde{U}_{q\varphi})$  ولتاژ فاز معیوب در سمت Q،  $(\tilde{U}_{p\varphi})$  ولتاژ فاز معیوب در سمت P،  $(z_0)$  امپدانس توالی صفر،  $(z_1)$  امپدانس توالی مثبت،  $(\tilde{U}'_{p\varphi})$  ولتاژ جبران‌شده فاز معیوب در سمت Q،  $(\tilde{U}'_{q\varphi})$  ولتاژ جبران‌شده فاز معیوب در سمت P،  $(z_{op})$  امپدانس عملکرد،  $(\tilde{U}_{q0})$  ولتاژ توالی صفر سمت شین Q،  $(\tilde{U}_{p0})$  ولتاژ توالی صفر سمت شین P است. با توجه به اینکه در خطاهای داخلی  $z_{op}$  برابر با  $(1 - 2k)zL$  بوده، با برابر گرفتن قسمت موهومی دو امپدانس، محل خطا  $(kL)$  را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

$$kL = \frac{1}{2} \left( \frac{\text{Imaginary}(z_{op})}{\text{Imaginary}(zL)} + 1 \right) \times L \quad (41)$$

شایان ذکر است که وجود خطا در امپدانس‌های توالی صفر و مثبت خط با توجه به روابط (۳۹) و (۴۰) می‌تواند بر دقت روش مکان‌یابی خطا تأثیر منفی داشته باشد. با این حال اگر درصد خطا در هر دو امپدانس یکسان باشد، به دلیل وجود رابطه کسری این خطا به حداقل خواهد رسید.

### ۳. طرح مکان‌یابی ناحیه گسترده خطا در شبکه

#### انتقال با استفاده از شاخص امپدانس دیفرانسیل

#### به‌دست‌آمده از داده‌های فازورسنکرون دو طرف

##### خط

همان‌طور که در بخش قبلی اثبات شد، از قابلیت طرح امپدانس دیفرانسیل می‌توان برای مکان‌یابی خطا با دقت مناسب در خط انتقال بهره جست. با استفاده از روابط (۳۷) تا (۴۰) می‌توان یک طرح مکان‌یابی ناحیه گسترده برای شبکه انتقال پیاده‌سازی نمود. مراحل طرح مکان‌یابی ناحیه گسترده خطا مبتنی بر اندازه‌گیری‌های فازورسنکرون به‌دست‌آمده از شین‌های شبکه انتقال که به تجهیزات PMU مجهزند به شرح ذیل است:

- **گام اول:** اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان از تمامی شین‌های شبکه انتقال؛ در این مرحله باید توسط ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان، سیگنال‌های آنالوگ ولتاژ و جریان را در تمامی شین‌های شبکه انتقال اندازه‌گیری کرد.
- **گام دوم:** استخراج مؤلفه‌های فازوری سیگنال‌های ولتاژ و جریان از طریق PMU‌های موجود در شین‌های شبکه انتقال؛ در این مرحله باید سیگنال‌های آنالوگ ولتاژ و جریان در تمامی شین‌ها ابتدا از یک فیلتر پایین‌گذر ضد تشابه برای حذف

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{U}_{pa} - \tilde{U}_{qa} - \frac{z_0 - z_1}{z_0} (\tilde{U}_{p0} - \tilde{U}_{q0})}{\tilde{I}_{pa} - \tilde{I}_{qa}} \\ = \frac{z_1 l (\tilde{I}_{pa}) - z_1 (L - l) \tilde{I}_{qa}}{\tilde{I}_{pa} - \tilde{I}_{qa}} \quad (33) \\ = z_1 L \frac{k \tilde{I}_{pa} - (1 - k) \tilde{I}_{qa}}{\tilde{I}_{pa} - \tilde{I}_{qa}} \end{aligned}$$

با در نظر گرفتن طرف اول رابطه (۳۳) به‌عنوان امپدانس دیفرانسیل جبران‌شده  $(Z'_{diff})$ ، طرف دوم رابطه (۳۳) دقیقاً مشابه با طرف دوم روابط (۲۲) و (۶) در خطاهای متقارن سه‌فاز و دوفاز است؛ بنابراین با تفاضل طرفین رابطه بالا از  $\frac{z_1 L}{2}$  خواهیم داشت:

$$Z'_{diff} - \frac{z_1 L}{2} = z_1 L \left( k - \frac{1}{2} \right) \frac{\tilde{I}_{pa} + \tilde{I}_{qa}}{\tilde{I}_{pa} - \tilde{I}_{qa}} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} z_{op} = 2 \left( Z'_{diff} - \frac{z_1 L}{2} \right) \frac{\tilde{I}_{pa} - \tilde{I}_{qa}}{\tilde{I}_{pa} + \tilde{I}_{qa}} \\ = z_1 L (2k - 1) \quad (35) \end{aligned}$$

به‌طور کلی برای هر فاز معیوب  $(\varphi)$  از رابطه (۳۵) ممکن است

به‌صورت زیر بیان شود:

$$\begin{aligned} z_{op} = 2 \left( Z'_{diff} - \frac{z_1 L}{2} \right) \frac{\tilde{I}_{p\varphi} - \tilde{I}_{q\varphi}}{\tilde{I}_{p\varphi} + \tilde{I}_{q\varphi}} \\ = z_1 L (2k - 1) \quad (36) \end{aligned}$$

از آنجاکه فرمول (۳۶) مشابه امپدانس عملکرد خطاهای دیگر است، برای خطاهای تک‌فاز به زمین نیز قابل استفاده است. علاوه‌بر این نتایج مشابهی را می‌توان برای انواع خطاها نیز به‌دست آورد.

### ۵.۲. معرفی شاخص نهایی امپدانس دیفرانسیل برای

#### تمامی انواع خطاهای اتصال کوتاه

همان‌طور که در بخش‌های قبلی اثبات شد، محاسبه امپدانس عملکرد  $(z_{op})$  پس از تشخیص خطا در فاز معیوب به‌صورت زیر است:

$$z_{op} = 2 \times \left( Z'_{diff} - \frac{z_1 L}{2} \right) \times \left( \frac{\tilde{I}_{p\varphi} - \tilde{I}_{q\varphi}}{\tilde{I}_{p\varphi} + \tilde{I}_{q\varphi}} \right) \quad (37)$$

که در آن  $(L)$  طول کل خط،  $(\tilde{I}_{p\varphi})$  جریان فاز معیوب در سمت P،  $(\tilde{I}_{q\varphi})$  جریان فاز معیوب در سمت Q و  $(Z'_{diff})$  امپدانس دیفرانسیل جبران‌شده است، به‌طوری‌که:

$$Z'_{diff} = \left( \frac{\tilde{U}'_{p\varphi} - \tilde{U}'_{q\varphi}}{\tilde{I}_{p\varphi} - \tilde{I}_{q\varphi}} \right) \quad (38)$$

$$\tilde{U}'_{p\varphi} = \tilde{U}_{p\varphi} - \frac{z_0 - z_1}{z_0} \tilde{U}_{p0} \quad (39)$$

$$\tilde{U}'_{q\varphi} = \tilde{U}_{q\varphi} - \frac{z_0 - z_1}{z_0} \tilde{U}_{q0} \quad (40)$$

**گام چهارم: تشخیص خطوط مشکوک به خطا:** در این مرحله با استفاده از فازورهای جریان جمع‌آوری شده از PMUهای موجود در شین‌های شبکه، زاویه‌فاز تمامی جریان‌ها استخراج می‌گردد و سپس برای هر خط با استفاده از زاویه‌فاز فازور جریان به‌دست‌آمده از PMUهای موجود در دو طرف خط شاخصی به نام دیفرانسیل زاویه‌فاز مؤلفه فازوری جریان‌های دو طرف خط برای تعیین خط مشکوک به خطا محاسبه می‌شود. چنانچه مقدار این دیفرانسیل بزرگ‌تر از مقدار آستانه تعریف شده باشد، آن خط به‌عنوان خط مشکوک به خطا تلقی شده که باید مکان‌یابی خطا با استفاده از امیدانس دیفرانسیل برای آن خط پیاده گردد.

$$\Delta\varphi = \angle I_{in\ put} - \angle I_{out\ put} > \theta^\circ \quad (42)$$

به‌طوری‌که  $\angle I_{in\ put}$  و  $\angle I_{out\ put}$  مقادیر زاویه‌فاز جریان‌های ورودی و خروجی خط مشکوک به خطا هستند. مقدار  $\Delta\varphi$  به‌عنوان دیفرانسیل زاویه‌فاز و  $\theta^\circ$  به‌عنوان مقدار زاویه آستانه برای تشخیص خط معیوب است. شایان ذکر است که جهت این دو جریان به‌صورت قراردادی به‌سمت داخل خط لحاظ می‌شوند. لذا از آنجاکه در خط‌های داخلی جهت این دو جریان به‌سمت داخل خط خواهد بود، انتظار می‌رود که اختلاف زاویه‌فاز نزدیک به  $180^\circ$  درجه را شاهد باشیم. با این حال با لحاظ خط‌های اندازه‌گیری و نویز و نیز به‌منظور افزایش امنیت طرح حفاظتی در این مقاله مقدار  $\theta^\circ$  برابر  $120^\circ$  درجه لحاظ می‌شود. بنابراین چنانچه اختلاف زاویه‌فاز فازوری جریان‌های دو طرف خط بیش از  $120^\circ$  درجه باشد، آن خط مشکوک به خطا تشخیص داده می‌شود.

**گام پنجم: تعیین مکان خطا با دقت مناسب در خط مشکوک به خطا:** در این مرحله با استفاده از رابطه (۴۳) مقدار تقریبی محل خطا با محاسبه امیدانس عملکرد به‌دست آمده در رابطه (۳۷) برای هر فاز معیوب خط مشکوک به خطا به‌صورت زیر به دست می‌آید.

$$z_{opA} = 2 \times \left( Z'_{diffA} - \frac{z_1 L}{2} \right) \times \left( \frac{\tilde{I}_{pa} - \tilde{I}_{qa}}{\tilde{I}_{pa} + \tilde{I}_{qa}} \right) \quad (43)$$

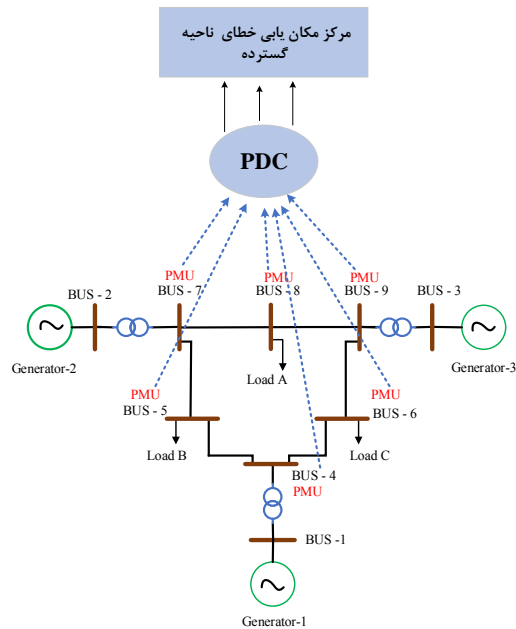
$$z_{opB} = 2 \times \left( Z'_{diffB} - \frac{z_1 L}{2} \right) \times \left( \frac{\tilde{I}_{pb} - \tilde{I}_{qb}}{\tilde{I}_{pb} + \tilde{I}_{qb}} \right) \quad (44)$$

$$z_{opC} = 2 \times \left( Z'_{diffC} - \frac{z_1 L}{2} \right) \times \left( \frac{\tilde{I}_{pc} - \tilde{I}_{qc}}{\tilde{I}_{pc} + \tilde{I}_{qc}} \right) \quad (45)$$

$$kL = \frac{1}{2} \left( \frac{\text{Imaginary}(z_{op\varphi})}{\text{Imaginary}(zL)} + 1 \right) \times L \quad (46)$$

مؤلفه‌های فرکانس بالا از سیگنال عبور کنند و سپس با فرکانس نمونه‌برداری ۲۰ نمونه بر سیکل توسط مبدل A/D نمونه برداری شوند. در ادامه توسط الگوریتم فوریه تمام‌سیکل کدنویسی شده در میکروپروسسور PMU به مؤلفه‌های فازوری ولتاژ و جریان سنکرون‌شده با برچسب زمانی GPS تبدیل می‌شوند. این مؤلفه‌های فازوری به‌طور هم‌زمان و با یک مرجع زمانی مشترک در تمامی شین‌های شبکه انتقال به‌عنوان خروجی PMUها در دسترس خواهند بود.

**گام سوم: ارسال مؤلفه‌های فازوری ولتاژ و جریان هم‌زمان اندازه‌گیری شده در شین‌های شبکه به PDC محلی؛** در این مرحله مؤلفه‌های فازوری ولتاژ و جریان از تمامی PMUهای شین‌های شبکه انتقال جمع‌آوری می‌شود و به متمرکزکننده داده‌های فازوری (PDC<sup>1</sup>) محلی ارسال می‌گردد. در این مرحله اطلاعات خراب حذف شده و در صورت نیاز اطلاعات مجدداً از PMUها اخذ می‌شود و در صورت در دسترس بودن تمامی اطلاعات لازم برای پیاده‌سازی الگوریتم مکان‌یابی خطا، این اطلاعات با یک رفرنس زمانی مشترک به مرکز مکان‌یابی ناحیه گسترده خطا ارسال می‌گردد. این فرایند در شکل (۴) به تصویر کشیده شده است.



شکل (۴): فرایند پیاده‌سازی مکان‌یابی ناحیه گسترده خطا در

سیستم نه‌شینیه WSCC انتقال

#### ۴. نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت طرح مکان‌یابی ناحیه گسترده خطا روی شبکه انتقال نه‌شینه WSCC پیاده‌سازی می‌شود که در شکل (۴) طرح‌واره آن نشان داده شده است. شبکه انتقال فوق در محیط نرم‌افزار PSCAD پیاده و شبیه‌سازی شده و انواع خطاها در طول شبکه شبیه‌سازی و بررسی گردیده است. فرکانس سیستم قدرت ۵۰ هرتز است. سپس سیگنال‌های ولتاژ و جریان‌های اندازه‌گیری‌شده سه‌فاز در ابتدا و انتهای هر خط به‌عنوان اطلاعات ورودی الگوریتم حفاظتی پیشنهادی از PSCAD به محیط نرم‌افزار MATLAB جهت تخمین اندازه‌ی فازور توسط الگوریتم فوریه تمام‌سیکل با فرکانس نمونه‌برداری ۲۰ نمونه در سیکل (با فرکانس ۱ kHz) منتقل و با کدنویسی مناسب طرح مکان‌یابی ناحیه گسترده خطا مبتنی بر امپدانس دیفرانسیل، خط معیوب و محل خطا استخراج می‌شود. سپس اثر مقاومت خطا، نوع خطا در مکان‌های مختلف روی عملکرد روش مکان‌یابی خطا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این فصل عملکرد طرح پیشنهادی مبتنی بر شاخص (دیفرانسیل امپدانس) تحت شرایط زیر بررسی می‌شود:

- بررسی عملکرد طرح پیشنهادی در مکان‌یابی ۱۱ نوع خطای اتصال کوتاه و تشخیص خط مشکوک به خطا؛
- بررسی عملکرد در خطاهای با مقاومت خطا؛
- بررسی عملکرد مکان‌یابی خطا در لحظه‌های مختلف وقوع خطا.

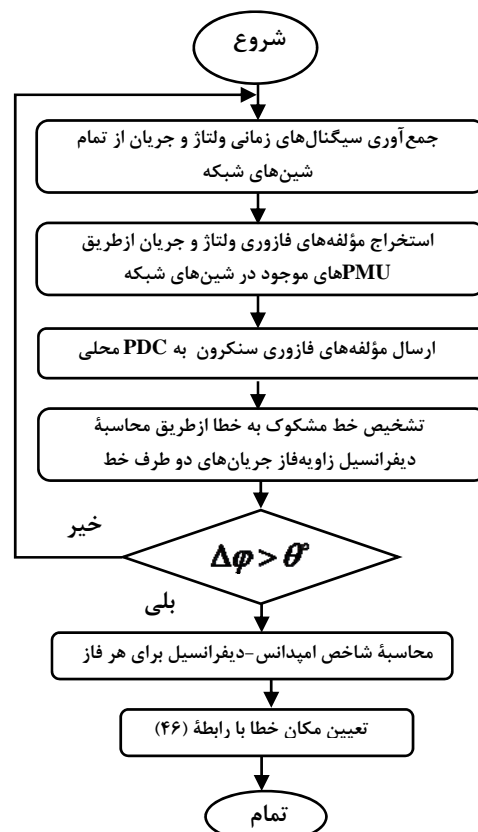
#### ۱.۴. تشخیص خط مشکوک به خطا

در این قسمت برای تشخیص خط مشکوک به خطا سیگنال‌های جریان از تمامی شین‌های شبکه انتقال توسط PMUها اندازه‌گیری شده و با نرخ ۲۰ نمونه بر سیکل نمونه‌برداری می‌شوند و سپس اختلاف زاویه‌فاز بین فازورهای جریان دو طرف تمامی خط با استفاده از رابطه (۴۴) استخراج می‌شود. این فرکانس نمونه‌برداری طبق استاندارد در اکثر PMUها نیز قابل پیاده‌سازی است [۲۰] و کاهش مقدار نرخ نمونه‌برداری دقت الگوریتم را کاهش می‌دهد. سپس خطوط براساس مقدار به‌دست‌آمده  $\Delta\phi$  آن‌ها مرتب‌سازی می‌شوند و خطوطی که مقدار شاخص  $\Delta\phi$  به‌دست‌آمده برای آن بزرگ‌تر از ۱۲۰ درجه باشد، به‌عنوان خط مشکوک به خطا شناسایی می‌شود. در شکل (۶) مقدار  $\Delta\phi$  که با عنوان  $Dphi$  (deg) نشان داده شده، برای خطوط شبکه استخراج شده است و خطایی که بین شین ۸ به سمت ۹ بود، توسط این روش به‌طور کامل قابل تشخیص است. همان‌طور که

- گام ششم: محاسبه دقت مکان‌یابی خطا: در این مرحله با مقایسه مقدار واقعی محل خطا با مقدار تخمین زده‌شده مکان خطا می‌توان دقت محاسبه را با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

$$(47) \quad \frac{(\text{مکان محاسبه‌شده خطا}) - (\text{مکان واقعی خطا})}{(\text{طول خط حفاظت‌شونده})} \times 100$$

روندنامای طرح مکان‌یابی ناحیه گسترده پیشنهادی متناسب با گام‌های فوق‌الذکر به‌صورت شکل (۵) خواهد بود.



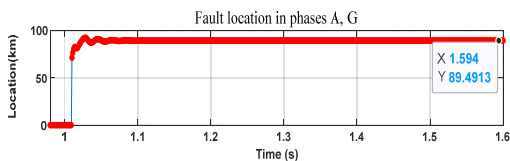
شکل (۵) روندنامای طرح پیشنهادی متناسب برای مکان‌یابی

شایان ذکر است که روش مکان‌یابی خطا فرایندی بعد از تشخیص و ایزوله کردن خطا توسط رله‌های حفاظتی است و به تسریع تعمیرات و ارتقای قابلیت اطمینان شبکه کمک می‌کند. بنابراین تأخیر مخابراتی ایجادشده در فرایند پیاده‌سازی الگوریتم مکان‌یابی، تأثیری منفی در پایداری شبکه نداشته و در حد چند ثانیه بوده که حداکثر مقدار این تأخیر در مرجع [۲۰] محاسبه شده است. همچنین روش مکان‌یابی خطای پیشنهادی به‌دلیل اینکه مبتنی بر استخراج دیفرانسیل جریان و ولتاژ است، حساسیت کمتری نسبت به نویز موجود در سیگنال‌های ولتاژ و جریان خواهد داشت.

میزان دقت مکان‌یابی خطا با استفاده از رابطه (۴۹) میزان درصد خطا (درصد اشتباه) در استخراج مکان خطا با دقت مناسب محاسبه می‌شود تا بتوان دقت تخمین خطا را با استفاده از رابطه پیشنهادی به دست آورد. همان‌طور که در جدول (۱) دیده می‌شود، برای تمامی خطاهای اتصال کوتاه، روش امیدانس عملکرد قادر به مکان‌یابی خطا با دقت بالغ بر ۹۸ درصدی است. نمونه‌ای از خروجی‌های مکان‌یابی خطا با استفاده از نرم‌افزار متلب برای خطاهای مختلف که در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از ابتدای شین ۸ در خط ۹-۸ رخ داده، بررسی شده و در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) به نمایش درآمده است. خروجی نشان داده‌شده در شکل‌های مذکور نشان‌دهنده دقت روش مکان‌یابی خطا در تخمین مکان خطا با دقت مناسب در خط معیوب است. با محاسبه درصد خطا در جدول (۱) مشخص می‌شود که در فاصله ۱۰۰ کیلومتری، درصد خطای شبیه‌سازی در خطاهای تک‌فاز به زمین حدود ۲/۶۲۷۶ درصد و در خطاهای دوفاز به زمین ۱/۱۵۴۴۳۷۵ درصد و در خطاهای سه‌فاز به زمین ۱/۰۶۷۹۵ درصد وجود دارد؛ لذا با توجه به شاخص دیفرانسیل امیدانس مقدار به‌دست‌آمده خیلی نزدیک‌تر به محل وقوع خطاست.

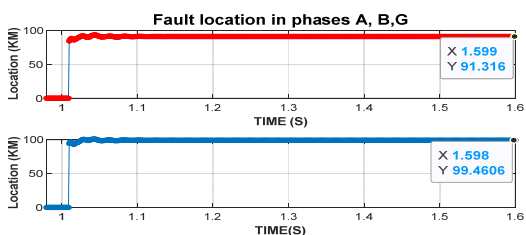
جدول (۱) مکان خطا در فاصله ۱۰۰ کیلومتری برای انواع خطاها

نوع خطا	فاصله فاز (km)			درصد خطا
	A	B	C	
A-G	۸۹/۴۹۱۳	--	--	۲/۶۲۷۱۷۵
B-G	--	۸۹/۵۰۸۲	--	۲/۶۲۲۹۵
C-G	--	--	۸۹/۴۶۹۳	۲/۶۳۲۶۷۵
AB-G	۹۱/۳۱۶	۹۹/۴۶۰۶	--	۱/۱۵۲۹۲۵
BC-G	--	۹۱/۳۱۸۷	۹۹/۴۳۳۷	۱/۱۵۵۹۵
ABC-G	۹۵/۷۲۸۵	۹۵/۷۳۸۶	۹۵/۷۱۷۵	۱/۰۶۷۹۵

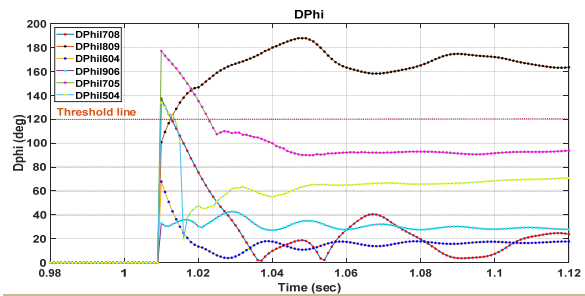


شکل (۷) مکان‌یابی خطا در خطای تک‌فاز به زمین (A, G) در

فاصله ۱۰۰ کیلومتری از ابتدای خط



دیده می‌شود، نمودار سیاه‌رنگ شین ۸۰۹ از زاویه ۱۲۰ درجه که آستانه عملکرد طرح حفاظتی بود، بالاتر رفته و مشکوک به خطاست.



شکل (۹) خطوط مشکوک به خطا در سیستم نه‌شین

#### ۲.۴. بررسی مکان‌یابی خطا در انواع خطاهای مختلف

مکان‌یابی سریع خطاهای رخ‌داده با دقت مناسب در شبکه انتقال یکی از پیش‌نیازهای لازم برای ارتقای قابلیت اطمینان سیستم قدرت و کاهش مدت خاموشی است. در سیستم قدرت ۱۱ نوع خطای اتصال کوتاه وجود دارد. از بین این خطاها، ۳ خطا از نوع تک‌فاز به زمین، ۳ خطا از نوع دوفاز به هم، ۳ خطا از نوع دوفاز به هم و به زمین، یک خطا به صورت سه‌فاز به هم و یک خطا به صورت سه‌فاز به هم و به زمین است. در خطاهای تک‌فاز به زمین هر سه مؤلفه توالی مثبت، منفی و صفر وجود دارد و مدارات توالی به‌صورت سری بسته می‌شوند. در خطاهای دوفاز به هم تنها دو مؤلفه توالی مثبت و منفی وجود دارد که مدارات توالی مثبت و منفی با هم موازی بسته می‌شوند. در خطاهای دوفاز به هم و به زمین هر سه مدار توالی مثبت، منفی و صفر وجود دارد که این سه مدار با هم موازی بسته می‌شود. در خطاهای سه‌فاز به هم و سه‌فاز به هم و به زمین تنها مدار توالی مثبت وجود دارد و تحلیل این مدار کافی است. در این قسمت با توجه به اینکه شاخص امیدانس دیفرانسیل در تمامی ۱۱ نوع خطای اتصال کوتاه دارای قابلیت مکان‌یابی خطاست، در این قسمت به دنبال اثبات عملکرد آن در انواع خطاهای داخلی هستیم. در جداول (۱) و (۲)، نمونه‌ای از انواع خطاها در مکان‌های مختلف مورد نقد و بررسی قرار می‌گیرد و نتایج هر کدام بیان می‌شود. این خطاها مابین شین ۸ و ۹ بررسی می‌شود. روش کار به این صورت است که ابتدا با استفاده از شاخص  $\Delta\varphi$  خط معیوب و فاز خطا مشخص می‌شود و سپس مقدار امیدانس عملکرد برای فاز معیوب با محاسبه روابط (۴۳) تا (۴۶) به دست می‌آید و در انتها مکان تقریبی خطا با استفاده از رابطه (۴۷) برای فاز معیوب استخراج می‌شود. در جدول (۱) مقدار رابطه (۴۷) برای فاز معیوب با فرض وجود خطا در ۱۰۰ کیلومتری از شین شماره ۸ نشان‌داده‌شده در شکل (۴) در خط مابین شین ۸ و ۹ به‌ازای انواع خطای اتصال کوتاه استخراج شده است. همچنین برای محاسبه

جدول (۲): اثر مقاومت خطا بر روی خطوط در فواصل مختلف (km)

نوع خطا		فاصله خطا در ۰ اهم	فاصله خطا در ۵ اهم	فاصله خطا در ۱۰ اهم
۲۰۰ (KM)	A-G	۱۹۴/۱۲۷	۱۹۱/۱۶۴	۱۸۸/۲۰۴
	B-G	۱۹۴/۱۵۲	۱۹۱/۱۸۶	۱۸۸/۲۲۱
	C-G	۱۹۴/۰۹۸	۱۹۱/۱۳۳	۱۸۸/۱۷
	AB-G	۱۹۸/۲۵۲	۱۹۵/۲۵۶	۱۹۲/۲۶۲
	BC-G	۱۹۸/۲۳۷	۱۹۵/۲۳۹	۱۹۲/۲۴۲۵
	ABC-G	۱۹۸/۳۰۸	۱۹۵/۵۶۰	۱۹۲/۸۱۳
۳۰۰ (KM)	A-G	۳۰۱/۹۳	۲۹۸/۶۸۸	۲۹۵/۷۶۹
	B-G	۳۰۱/۶۱۳	۲۹۸/۷۰۵	۲۹۵/۷۸۲
	C-G	۳۰۱/۵۷۲	۲۹۸/۶۶۵	۲۹۵/۷۴۴
	AB-G	۳۰۱/۴۳۴	۲۹۸/۴۴۴۵	۲۹۵/۴۴۲
	BC-G	۳۰۱/۴۲۴۵	۲۹۸/۴۳۲	۲۹۵/۴۲۷
	ABC-G	۳۰۱/۲۴۰	۲۹۸/۵۰۹	۲۹۵/۷۶۵

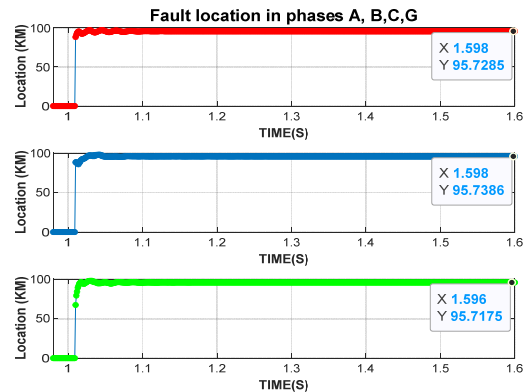
#### ۴.۴. تأثیر زمان وقوع خطا در دقت مکانیابی خطا

به‌طور کلی، زمان وقوع خطا در شبکه‌های انتقال می‌تواند تأثیر مستقیمی بر دقت مکانیابی خطا داشته باشد. برای مکانیابی با دقت بیشتر، ممکن است نیاز به استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌هایی باشد که بتوانند با خطاها و ابهامات زمانی که در شبکه رخ می‌دهند، مقابله کنند و دقت مکانیابی را به حداکثر برسانند. همچنین، استفاده از فناوری‌ها و تجهیزات پیشرفته می‌تواند بهبود دقت مکانیابی را در شرایط خطا ارائه دهد. برای بررسی استقلال روش پیشنهادی از زمان وقوع خطا در جدول (۳) تأثیر زمان وقوع خطا در فاصله ۳۰۰ و ۲۰۰ کیلومتری برای خطای سه‌فاز به هم در زمان‌های مختلف بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار خروجی الگوریتم مکانیابی پیشنهادی مستقل از زمان رخداد خطاست و به عبارتی، لحظه وقوع خطا تأثیری در دقت مکانیابی خطا نخواهد داشت.

#### ۵.۴. مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌های موجود

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در بخش‌های قبلی، عملکرد روش مکانیابی خطای پیشنهادی با سایر روش‌های مکانیابی موجود که در سال‌های اخیر منتشر شده‌اند، در جدول (۴) مقایسه شده است. فاکتورهای مقایسه شامل توانایی مکانیابی خطا به‌ازای وقوع انواع خطاهای اتصال کوتاه، توانایی تشخیص فاز معیوب، عملکرد مناسب در خطاهای مقاومت بالا، مکانیابی خطا با دقت مناسب، تحت‌تأثیر قرار گرفتن از زمان وقوع خطا و فرایند غیرخطی و پیچیده مکانیابی خطاست. شایان ذکر است که علامت "✓" به مفهوم تأیید و علامت

شکل (۸): مکانیابی خطا در خطای دو فاز به هم و به زمین (A, B, G) در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از ابتدای خط



شکل (۹): مکانیابی خطا در خطای سه‌فاز به هم و به زمین (A, B, G) در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از ابتدای خط

#### ۳.۴. اثر مقاومت خطا

وجود مقاومت حین وقوع خطا می‌تواند به دلیل تغییر در دامنه جریان خطا منجر به اشتباه در عملکرد و تصمیم‌گیری رله‌های حفاظتی شود. وجود خطاهای با مقاومت می‌تواند دقت عملکرد روش‌های مکانیابی را تحت‌تأثیر قرار دهد و منجر به خروجی اشتباه مکانیابی‌های خطا شده و در نتیجه مکانیابی خطا با دقت مناسب را با چالش مواجه نموده و در نتیجه منجر به افزایش مدت‌زمان خاموشی سیستم قدرت شده و شاخص قابلیت اطمینان شبکه را کاهش دهد. بنابراین لازم است تا اثر مقاومت خطا روی الگوریتم حفاظتی و مکانیابی خطا نیز مورد آنالیز قرار گیرد. در این قسمت به دنبال ارزیابی اثر مقاومت خطا بر خروجی مکانیابی خطا مبتنی بر امیدانس دیفرانسیل هستیم. مقدار مقاومت خطای استاندارد و متداول در شبکه انتقال را بین صفر تا ۱۰ اهم لحاظ می‌کنیم و عملکرد روش مکانیابی را برای این گسترده از مقاومت‌ها چک می‌کنیم. در جدول (۲) اثر مقاومت خطا در فاصله ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلومتری با مقادیر (۰، ۵ و ۱۰) اهم در مکانیابی خطا در فاز خطا در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص می‌شود که هرچه قدر مقاومت خطا به سمت صفر میل کند مکانیابی با دقت بالاتر خواهد بود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت طرح مکانیابی ناحیه گسترده خطا در مقاومت‌های بالای خطا محدودیت داشته و تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد، ولی دقت عملکرد آن در خطاهای با مقاومت خطای پایین قابل قبول است.

سیستم ناشی از کاهش مدت‌زمان بازیابی و خاموشی سیستم قدرت باشد. با توجه به تغییرات قابل توجه در مؤلفه‌های فازورسنکرون در صورت وقوع خطا، این روش قادر به شناسایی و مکان‌یابی نواحی گسترده خطا در سیستم است. در این مقاله مکان‌یابی ناحیه‌گسترده خطا در شبکه انتقال با استفاده از شاخص امیدانس دیفرانسیل ارائه شد که مهم‌ترین خروجی‌های آن به شرح ذیل است:

۲. شناسایی مکان خطا با دقت مناسب: با تحلیل دقیق داده‌های فازورسنکرون و مقایسه آن با مقادیر مرجع، می‌توان مکان خطا را با تقریب قابل قبولی تشخیص داد. این روش قادر است تا محدوده و مکان خطاها را با دقت مناسبی مشخص کند.
۳. قابلیت استفاده در سیستم‌های پیچیده: روش مکان‌یابی ناحیه‌گسترده خطا با استفاده از داده‌های فازورسنکرون قابلیت استفاده در سیستم‌های پیچیده و شبکه‌های گسترده را دارد. این روش می‌تواند در شبکه‌های انتقال بزرگ و پیچیده که شامل تعداد زیادی شین است، مورد استفاده قرار گیرد.
۴. روش پیشنهادی مکان‌یابی ناحیه‌گسترده خطا قادر به تشخیص مکان تقریبی خطا در فاز معیوب به‌ازای تمامی ۱۱ نوع جریان اتصال کوتاه است.

۵. روش پیشنهادی مکان‌یابی ناحیه‌گسترده برخلاف سایر روش‌های مکان‌یابی خطا به زمان وقوع خطا بستگی ندارد و دقت آن تحت تأثیر لحظه وقوع خطا قرار نمی‌گیرد.

۶. روش پیشنهادی مکان‌یابی ناحیه‌گسترده خطا قادر به تشخیص سریع مکان تقریبی خطا در فاز معیوب است؛ لذا منجر به کاهش زمان خاموشی و افزایش قابلیت اطمینان شبکه خواهد شد.

۷. دقت مکان‌یابی خطا در خطاهای اتصال کوتاه با مقاومت بالا کاهش می‌یابد؛ لذا روش پیشنهادی در خطاهای امیدانس بالا دچار محدودیت خواهد بود.

۸. وابستگی پیاده‌سازی روش پیشنهادی به داده‌های فازوری دو طرف خط و کانال مخابراتی یکی دیگر از محدودیت‌های این روش نسبت به روش‌های محلی است.

در نتیجه، مکان‌یابی ناحیه‌گسترده خطا با استفاده از داده‌های فازورسنکرون می‌تواند یک روش قوی و مؤثر برای تشخیص و مکان‌یابی خطاها در شبکه‌های انتقال باشد.

"x" به معنای عدم تأیید در برآورده ساختن فاکتور مقایسه است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که روش پیشنهادی عملکرد مناسب و قابل قبولی در اکثر فاکتورهای مقایسه دارد و می‌تواند به‌عنوان یک روش محاسباتی ساده و بدون نیاز به حل معادلات غیرخطی باشد.

جدول (۳): تأثیر زمان وقوع خطا در دقت مکان‌یابی خطا (km)

فاصله	زمان	نوع خطا ABC-G
300KM	T=۱/۰۰۲	۳۰۱/۲۳۴
	T=۱/۰۰۴	۳۰۱/۲۳۴
	T=۱/۰۰۶	۳۰۱/۲۳۴
	T=۱/۰۰۷	۳۰۱/۲۳۴
	T=۱/۰۱	۳۰۱/۲۳۴
	T=۱/۰۱۲	۳۰۱/۲۳۴
	T=۱/۰۲	۳۰۱/۲۳۴
200 KM	T=۱/۰۰۲	۱۹۸/۳۰۱
	T=۱/۰۰۴	۱۹۸/۳۰۱
	T=۱/۰۰۶	۱۹۸/۳۰۱
	T=۱/۰۰۷	۱۹۸/۳۰۱
	T=۱/۰۱	۱۹۸/۳۰۱
	T=۱/۰۱۲	۱۹۸/۳۰۱
	T=۱/۰۲	۱۹۸/۳۰۱

جدول (۴): مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌های مکان‌یابی خطا

فاکتور مقایسه	روش پیشنهادی	[۳]	[۴]	[۹]	[۱۶]
مکان‌یابی خطا به‌ازای وقوع انواع خطاهای اتصال کوتاه	✓	✓	✓	✓	✓
توانایی تشخیص فاز معیوب	✓	×	×	✓	×
عملکرد مناسب در خطاهای مقاومت بالا	تاحدی	✓	تاحدی	×	✓
مکان‌یابی خطا با دقت بالا	✓	✓	✓	تاحدی	×
تحت تأثیر قرار گرفتن از زمان وقوع خطا	×	✓	×	×	×
فرایند غیرخطی و پیچیده مکان‌یابی خطا	×	✓	×	✓	✓

## ۵. نتیجه‌گیری

مکان‌یابی ناحیه‌گسترده خطا در شبکه‌های انتقال با استفاده از داده‌های فازورسنکرون می‌تواند یک روش مؤثر برای افزایش قابلیت اطمینان



- [1] Arpanahi, M. K., Fini, M. H., Nateghi, A. "A novel single-end fault location method for double-circuit transmission lines", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 158, 109984, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109984>
- [2] Abbasi, S., Shabani, H. R., kalantar, M. "An analysis of the impact of wind power generation on the transient stability of power systems", Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 3, pp. 2-15, 2023. <https://doi.org/10.22052/eem.2023.252833.1010>.
- [3] Tong, X., Dong, X., Manzoor, S., Wang, Y., Zhao, Z. "Robust fault location method for transmission lines using pmus", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 38, No. 4, pp. 2338-2347, 2023. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2023.3240717>
- [4] Azizi, S., Sanaye-Pasand, M. "A straightforward method for wide-area fault location on transmission networks", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 1, pp. 264-272, 2014. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2334471>
- [5] Gilany, M., El Din, E. T., Aziz, M. A., Ibrahim, D. K. "An accurate scheme for fault location in combined overhead line with underground power cable", In IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 2521-2527, 2005. <https://doi.org/10.1109/PES.2005.1489308>
- [6] Yu, C. S., Liu, C. W., Jiang, J. A. "A new fault location algorithm for series compensated lines using synchronized phasor measurements", In Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 3, pp. 1350-1354, 2000. <https://doi.org/10.1109/PES.2005.1489308>
- [7] Jegarluei, M. R., El-Gorashi, T. E., Elmirghani, J. M., Azizi, S. A generalized closed-form solution for wide-area fault location by characterizing the distributions of superimposed errors. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 37, No. 6, pp. 5484-5487, 2022. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2022.3214746>
- [8] Izykowski, J., Rosolowski, E., Saha, M. M., Fulczyk, M., Balcerek, P. A fault-location method for application with current differential relays of three-terminal lines. IEEE Transactions on power delivery, Vol. 22, No. 4, pp. 2099-2107, 2007. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905544>
- [9] Chafi, Z. S., Afrakhte, H. "Wide area fault location on transmission systems using synchronized/unsynchronized voltage/current measurements", Electric Power Systems Research, Vol. 197, pp. 107285, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107285>
- [10] Ekici, S. "Support Vector Machines for classification and locating faults on transmission lines", Applied soft computing, Vol. 12, No. 6, pp. 1650-1658, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.02.011>
- [11] Swetapadma, A., Yadav, A. "A novel decision tree regression-based fault distance estimation scheme for transmission lines", IEEE transactions on power delivery, Vol. 32, No. 1, pp. 234-245, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2598553>
- [12] Neto, J. A. D. O., Sartori, C. A. F., Junior, G. M. "Fault location in overhead transmission lines based on magnetic signatures and on the extended kalman filter", IEEE Access, Vol. 9, pp. 15259-15270, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050211>
- [13] Dobakhshari, A. S. "Wide-area fault location of transmission lines by hybrid synchronized/unsynchronized voltage measurements", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 3, pp. 1869-1877, 2016. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2601379>
- [14] Dolatabadi, S. H. H., Golshan, M. E. H. "Fault location observability rules for impedance-based fault location algorithms", Electric Power Systems Research, Vol. 224, pp. 109771, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109771>
- [15] Ravesh, N. R., Ramezani, N., Ahmadi, I., Nouri, H. "A hybrid artificial neural network and wavelet packet transform approach for fault location in hybrid transmission lines", Electric Power Systems Research, Vol. 204, pp. 107721, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107721>
- [16] Mohammadi, R., Ghotbi-Maleki, M., Ghaffarzadeh, A. "Wide-Area fault location in transmission power system considering measurement uncertainty", IEEE Access, to be published, 2024. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3370921>
- [17] Moravej Z., Boostani P., Ghahremani M. "Fault location and classification in non-homogeneous transmission line utilizing breaker transients", Energy Engineering and Management, Vol. 11, No. 4, pp. 48-59, 2022. <https://doi.org/10.22052/11.4.48>
- [18] Moravej, Z., Khalilzadeh fard, A., Pazoki, M. "Fault Detection and Classification in Double-Circuit Transmission Line in the Presence of TCSC Using Hybrid Intelligent Method", Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 1, pp. 54-63, 2023. <https://doi.org/10.22052/jeem.2023.113601>
- [19] Bolandi, T. G., Seyedi, H., Hashemi, S. M., Nezhad, P. S. "Impedance-differential protection: A new approach to transmission-line pilot protection", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 6, pp. 2510-2518, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2387689>
- [20] Khoshbouy, M., Yazdaninejadi, A., Bolandi, T. G. "Transmission line adaptive protection scheme: A new fault detection approach based on pilot superimposed impedance", International Journal of



Electrical Power & Energy Systems, Vol. 137,  
107826, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107826>