

## دسته‌بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا در سیستم‌های قدرت با استفاده از تئوری امواج سیار و سیستم فازی

سعید هاشمی‌نژاد<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری، سیدقدرت‌اله سیف‌السادات<sup>۲</sup>، دانشیار، مرتضی رزاز<sup>۳</sup>، دانشیار، محمود جورابیان<sup>۴</sup>، استاد

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - s-hasheminejad@phdstu.scu.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - seifossadat@yahoo.com

۳- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - razaz\_m@scu.ac.ir

۴- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - mjoorabian@scu.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله یک الگوریتم جدید بر پایه امواج سیار به منظور دسته‌بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی از دو بخش کلی تشکیل شده است. در بخش اول، پس از استخراج مؤلفه‌های مودال از مؤلفه‌های سه‌فاز جریان، با استفاده از عملگر انرژی تیزر، امواج سیار از مؤلفه‌های مودال استخراج می‌شوند. سپس نسبت دامنه اولین موج سیار در مؤلفه‌های مودال به منظور دسته‌بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا به کار گرفته می‌شود. عملگر انرژی تیزر یک عملگر ساده است که با سرعت بسیار بالا و با وضوح مناسب امواج سیار موجود در سیگنال‌ها را استخراج می‌کند. در بخش دوم، با استفاده از اطلاعات به دست آمده از مرحله قبل، دسته‌بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا اجرا می‌گردد. روش‌های هوشمند بهترین انتخاب برای به کارگیری در این مرحله هستند که برای اولین بار در این مقاله به کار گرفته می‌شوند. روش مورداستفاده در این مقاله سیستم فازی است که با دقت بسیار بالایی توانسته است دسته‌بندی خطا را انجام دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای خطاهای بسیار نزدیک به محل رله، خطاهای با امپدانس بالا و خطاهای با زاویه وقوع بسیار کوچک هم الگوریتم پیشنهادی عملکرد بسیار دقیقی داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** امواج سیار، دسته‌بندی خطا، عملگر انرژی تیزر، سیستم فازی، حفاظت خطوط انتقال

## Fault Classification and Faulted Phases Selection using Traveling Wave Theory and Fuzzy System

S. Hasheminejad<sup>1</sup>, S. G. seifossadat<sup>2</sup>, M. Razaz<sup>3</sup>, M. Jourabian<sup>4</sup>

1- Faculty of engineering, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.

2- Faculty of engineering, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.

3- Faculty of engineering, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.

4- Faculty of engineering, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.

**Abstract:** A traveling wave based algorithm for fault classification and faulted phases selection is presented in this paper. The proposed algorithm is composed of two major stages. In the first stage, after extraction of modal components from three phase signals and by means of Teager energy operator (TEO), traveling waves are extracted from modal signals. Then ratios of initial traveling wave in different modal components are used for the fault classification and faulted phases selection purpose. TEO is a very simple method which can extract traveling waves with very high speed and resolution. In the second stage, fault classification and faulted phases selection is performed based on the information extracted from the previous stage. Intelligent methods are the best choice to be used in the second stage and for the first time are utilized in this paper. Fuzzy system, which is used in this paper as a classifier, is able to classify the faulted signal with a high accuracy. Simulation results show that the proposed algorithm has an efficient and accurate performance in terms of close-in faults, high impedance faults and faults with very low inception angle.

**Keywords:** Traveling waves, fault classification, Teager energy operator, fuzzy system, transmission system protection

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۲/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سیدقدرت‌اله سیف‌السادات

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- اهواز - خیابان گلستان - دانشگاه شهید چمران اهواز - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق

## ۱- مقدمه

حفاظت از خطوط انتقال و دسته‌بندی خطا از مسائل مهم در شبکه‌های قدرت است که توسط مهندسين حفاظت بسیار موردتوجه قرار گرفته است. بالا بردن همزمان دقت و سرعت دسته‌بندی خطا هدف نهایی همه روش‌های ارائه‌شده در این مبحث است. به‌منظور شناخت بهتر ناحیه مربوط به خطا باید از یک روش مطمئن برای دسته‌بندی خطا استفاده کرد. سپس با استفاده از قطع تک‌فاز این امکان وجود خواهد داشت که فقط فاز(های) تحت خطا بی‌برق شوند و فاز(های) سالم به تغذیه بار ادامه دهند. این عمل باعث بالا بردن حاشیه پایداری شبکه قدرت و جلوگیری از قطع برق غیرضروری در برخی از نواحی می‌شود. به‌علاوه این عمل امکان بروز ضررهای اقتصادی ناشی از قطع برق مصرف‌کنندگان را نیز کاهش می‌دهد.

یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که بر سر راه روش‌های حفاظتی بر پایه امواج سیار وجود دارد، وقوع خطا روی یک فاز در لحظه‌ای است که دامنه ولتاژ آن فاز مقداری نزدیک به صفر دارد. در این صورت امواج سیار تولیدی بسیار کم‌دامنه بوده و شناسایی خطا را به‌وسیله امواج سیار حاصل از آن با مشکل مواجه می‌کند. مشکل دیگر وقتی پیش می‌آید که خطا در نزدیکی محل رله اتفاق بیفتد که در این صورت استخراج امواج سیار متوالی مشکل خواهد بود. از آنجاکه مقاومت خطا هم بر روی دامنه امواج سیار متوالی تأثیرگذار است، الگوریتم حفاظتی باید قادر باشد که هنگام وقوع خطا با مقاومت‌های متفاوت، عملکرد مناسبی را داشته باشد.

در مقاله [۱] شناسایی فاز تحت خطا با استفاده از اجزای توالی اضافه‌شده در هنگام خطا به‌صورت ترکیب‌شده با تئوری هم‌بستگی ارائه شده است. در این مقاله بیشتر تأکید بر روی شناسایی خطای دو فاز به زمین است. استفاده از دامنه امواج سیار به‌عنوان معیار شناسایی فاز تحت خطا از عیوب الگوریتم ارائه‌شده در این مرجع است. چراکه زاویه وقوع خطا ممکن است به‌گونه‌ای باشد که دامنه موج سیار تولیدشده روی فازهای تحت خطا کوچک‌تر از دامنه موج سیار بر روی فازهای سالم باشد. در مرجع [۲] از افزایش انرژی طیفی فازها برای شناسایی فازهای تحت خطا استفاده شده است. روش ارائه‌شده در این مرجع در برابر خطاهای دو فاز به زمین به همان دلیل ذکرشده برای مرجع [۱]، با مشکل جدی مواجه است. به این دلیل که نمی‌توان پیش‌بینی کرد که در چه زاویه‌ای از وقوع خطا ممکن است دامنه موج سیار برای فاز تحت خطا کوچک‌تر از این دامنه برای فازهای سالم باشد. در الگوریتم ارائه‌شده در [۳] پس از مشاهده وقوع خطا، تبدیل فاز به مودال بر روی سیگنال‌های جریان اعمال می‌شود. سپس با استفاده از اعمال روابط ریاضی بر روی مؤلفه‌های مودال جریان، در مورد نوع خطا تصمیم‌گیری می‌شود. هرچند که در این الگوریتم با نسبت‌گیری از مؤلفه‌های مودال، تأثیر زاویه وقوع خطا بر روی دامنه امواج سیار از بین می‌رود اما واضح است که استفاده از آستانه‌های عددی نمی‌تواند معیار خوبی برای تصمیم‌گیری باشد.

برای طراحی الگوریتم حفاظتی ابتدا باید روشی برای استخراج امواج سیار در دست باشد و سپس با استفاده از مشخصات امواج سیار استخراج‌شده در مورد ماهیت خطا تصمیم‌گیری شود. در [۴] از تبدیل فوریه برای استخراج مشخصات سیگنال خطا استفاده شده است که فقط قابلیت استخراج مشخصات فرکانسی سیگنال را دارد. در تعداد زیادی از مقالات از تبدیل موجک به‌منظور استخراج امواج سیار استفاده شده است [۵-۸]. پیچیدگی تبدیل موجک و پایین بودن وضوح خروجی آن برای استخراج امواج سیار از معایب استفاده از این تبدیل هستند. در [۹] از تبدیل S برای استخراج امواج سیار استفاده شده است که محاسبات مربوط به آن از تبدیل ویولت نیز طولانی‌تر بوده و وضوح خروجی آن بسیار پایین است. ضمناً برای اجرای تبدیل یک سیگنال از سیگنال ورودی را لازم دارد که از سرعت اجرای روش به میزان قابل‌توجهی می‌کاهد. در [۱۰] از تبدیل زمان-زمان برای استخراج امواج سیار استفاده شده است که از دو تبدیل قبل نیز محاسبات بیشتری دارد و مقدار زیادی از زمان تصمیم‌گیری صرف اجرای این تبدیل می‌شود. در بعضی از مقالات هم مانند [۱۱] از روش‌های ابتکاری مثل اجزای اساسی<sup>۱</sup> به این منظور استفاده شده است. در این مقاله یک روش هوشمند برای دسته‌بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا ارائه می‌شود. در این الگوریتم از اپراتور انرژی تیجر<sup>۲</sup> (TEO) برای استخراج امواج سیار از شکل موج جریان استفاده شده است که از نوآوری‌های این مقاله محسوب می‌شود. اپراتور انرژی تیجر روشی ساده و بسیار سریع است که می‌تواند مؤلفه‌های فرکانس بالای سیگنال ورودی را استخراج کند. هر نقطه در خروجی TEO فقط با سه نمونه از سیگنال ورودی تولید می‌شود. پس وضوح خروجی این روش بیشتر از روش‌های قبل بوده و با تغییر فرکانس نمونه‌برداری قابل کنترل است. در این صورت اگر خطا در نزدیکی محل رله هم اتفاق افتاده باشد، امواج سیار حاصل از آن به‌خوبی قابل‌استخراج هستند. الگوریتم‌هایی که تاکنون برای دسته‌بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا ارائه شده‌اند همگی روش‌هایی قطعی هستند و از معیارهای عددی برای تصمیم‌گیری استفاده کرده‌اند. در این مقاله برای نخستین بار از روش هوشمند استفاده شده است تا با استفاده از امواج سیار استخراج‌شده در فقط یک انتهای خط انتقال دسته‌بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا را انجام دهد. برای هوشمندسازی الگوریتم پیشنهادی از سیستم فازی استفاده شده است که کمک می‌کند تا در تمامی شرایط از قبیل وقوع خطا در زوایای بسیار کوچک ولتاژ و خطاهای نزدیک به رله و نیز خطاهای با امپدانس بالا تصمیم‌گیری درستی انجام شود. در مقاله ارائه‌شده برای شبیه‌سازی سیگنال‌های ولتاژ و جریان خطا، تأثیر ترانسفورماتور جریان<sup>۳</sup> (CT) و ترانسفورماتور ولتاژ با کوپلاژ خازنی<sup>۴</sup> (CCVT) نیز در نظر گرفته شده است که در الگوریتم‌های حفاظتی موجود در مراجع قبل به این مطلب پرداخته نشده است.

## ۲- قوانین اساسی

### ۱-۲ قوانین اساسی مربوط به امواج سیار

وقتی که خطایی بر روی خط انتقال روی می‌دهد، امواج گذرای فرکانس بالایی موسوم به امواج سیار تولید شده و از محل خطا به سمت دو انتهای خط به حرکت درمی‌آیند. امواج سیار هم بر روی سیگنال ولتاژ و هم بر روی سیگنال جریان تولید می‌شوند. دامنه امواج سیار تولید شده به زاویه ولتاژ در لحظه وقوع خطا، فاصله خطا تا محل رله، مقاومت خطا و نوع خطا بستگی دارد.

برای یک خط تک‌فاز، مقدار اولیه دامنه امواج سیار ولتاژ و جریان به ترتیب به صورت روابط (۱) و (۲) خواهند بود [۵].

$$v_1 = -\frac{Z_0}{Z_0 + 2R_f} v_f \quad (1)$$

$$i_1 = \frac{1}{Z_0 + 2R_f} v_f = -\frac{v_1}{Z_0} \quad (2)$$

که در این روابط  $v_f$  مقدار ولتاژ در نقطه خطا و در لحظه وقوع خطا،  $Z_0$  امپدانس موجی خط انتقال و  $R_f$  مقاومت خطا هستند. وقتی که یک موج سیار به یک نقطه انصال یا نقطه‌ای که در آن امپدانس خط تغییر می‌کند برسد، بخشی از موج مسیر خود را ادامه می‌دهد و بخش دیگر موج به سمت نقطه خطا برمی‌گردد. ضرایب انعکاس برای امواج سیار ولتاژ و جریان به ترتیب به صورت روابط (۳) و (۴) است.

$$k_v = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (3)$$

$$k_i = -\frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = -k_v \quad (4)$$

در روابط بالا  $Z$  امپدانس تونن نقطه انصال در همان جهتی است که موج سیار به سمت نقطه انصال آمده است.

### ۲-۲ تبدیل مودال

به منظور تبدیل مؤلفه‌های سه‌فاز، که به یکدیگر وابسته هستند، به سه مؤلفه غیروابسته از تبدیل فاز به مودال استفاده می‌شود. به منظور اجرای این تبدیل در این مقاله از ماتریس تبدیل کارن-باور<sup>۵</sup> استفاده شده است. این ماتریس به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود [۳].

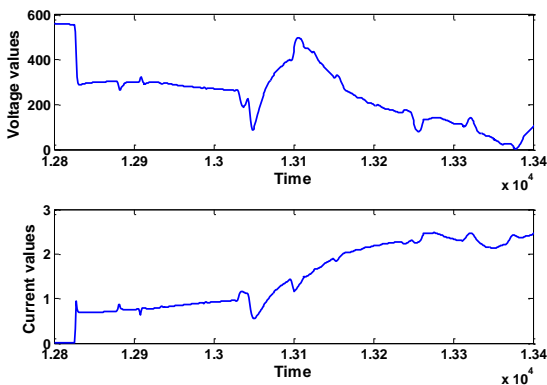
$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (5)$$

در رابطه (۵)  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  مؤلفه‌های هوایی و 0 مؤلفه‌ی زمین است که به منظور شناسایی خطاهای زمین شده به کار می‌رود.

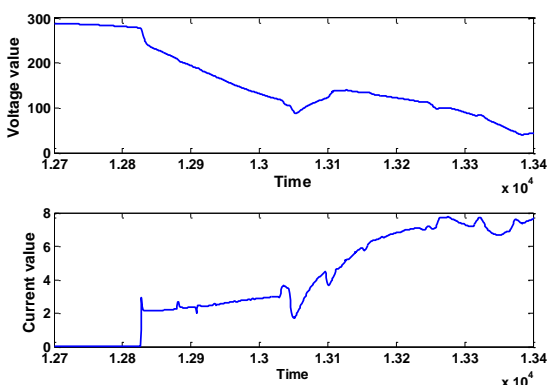
### ۳- اثر CT و CCVT بر روی امواج سیار

دستگاه‌های اندازه‌گیری سیگنال‌های قدرت یعنی CTها و CCVTها حاوی اجزاء ذخیره‌کننده انرژی هستند. این ابزار پاسخ فرکانسی کاملی

را برای تغییرات ناگهانی در سیگنال‌های ولتاژ و جریان ارائه نمی‌دهند. در واقع این ابزار، سیگنال‌های گذرای فرکانس بالا را تضعیف می‌کنند و مشخصات آن‌ها را تغییر می‌دهند. شکل ۱ شکل موج‌های مؤلفه‌ی آلفای ولتاژ و جریان را قبل از عبور از به ترتیب CCVT و CT و شکل ۲ این مؤلفه از ولتاژ و جریان را به ترتیب بعد از عبور از CCVT و CT نشان می‌دهند. این شکل موج‌ها مربوط به وقوع خطای تک‌فاز A به زمین هستند که در ۴۰ کیلومتری از خط انتقال و در زاویه ولتاژ ۷۲ درجه اتفاق افتاده‌اند. فرکانس نمونه‌برداری هم ۲۰۰ کیلوهرتز است.



شکل ۱: مود آلفا از سیگنال‌های ولتاژ و جریان قبل از عبور از CCVT و CT



شکل ۲: مود آلفا از سیگنال‌های ولتاژ و جریان بعد از عبور از CCVT, CT

همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ دیده می‌شود، پاسخ فرکانسی CT بسیار بهتر از CCVT است. بنابراین در این مقاله از امواج سیار موجود بر روی سیگنال جریان برای دسته‌بندی خطا و شناسایی فاز تحت خطا استفاده شده است. در واقع از این به بعد در تمامی مراحل تولید الگوریتم اثر CT بر روی شکل موج‌های جریان دیده شده است.

برای تحلیل اثر CT بر روی امواج سیار موجود بر سیگنال جریان می‌توان از تابع تبدیل CT استفاده کرد [۱۲].

$$H(s) = \frac{1 + 1.5 \times 10^{-6} S}{1 + 1.4 \times 10^{-5} S} \quad (6)$$

تابع تبدیل نشان می‌دهد که در فرکانس‌های پایین، مشخصات فرکانسی سیگنال با وجود CT تغییر نمی‌کند. اما با افزایش فرکانس اثر CT بر این مشخصات افزایش می‌یابد و در حقیقت مثل یک فیلتر پایین‌گذر، فرکانس‌های بالا را تضعیف می‌کند. برای بررسی بیشتر این

اگر از فرم پیوسته TEO در فاصله‌های زمانی T نمونه‌برداری شود و  $x_i(n) = A_i(n) \sin[\Omega_i(n)]$  در نظر گرفته شود، TEO گسسته با استفاده از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$\psi_d[x(n)] = x^2(n) - x(n-1)x(n+1) \quad (11)$$

اگر  $y_i(n) = x_i(n) - x_i(n-1)$  تعریف شود، در این صورت  $\Omega_i(n)$  و  $A_i(n)$  با استفاده از معادلات (۱۲) و (۱۳) به دست می‌آیند.

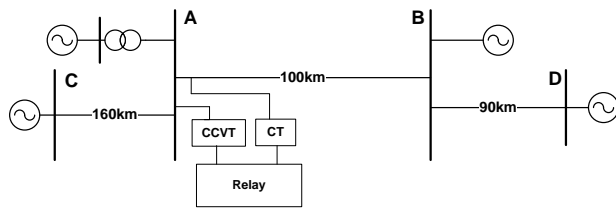
$$\Omega_i(n) = \arccos\left(1 - \frac{\psi_d[y_i(n)] + \psi_d[y_i(n+1)]}{4\psi_d[x_i(n)]}\right) \quad (12)$$

$$A_i(n) = \sqrt{\frac{\psi_d[x_i(n)]}{1 - \left(1 - \frac{\psi_d[y_i(n)] + \psi_d[y_i(n+1)]}{4\psi_d[x_i(n)]}\right)^2}} \quad (13)$$

به دلیل حجم محاسباتی کم TEO، سرعت تولید خروجی در آن بسیار زیاد است. هر نمونه از خروجی اپراتور انرژی تیجر با استفاده از فقط سه نمونه از سیگنال ورودی ساخته می‌شود. بنابراین خروجی TEO از وضوح بسیار مناسبی برخوردار است.

### ۵- طراحی الگوریتم پیشنهادی

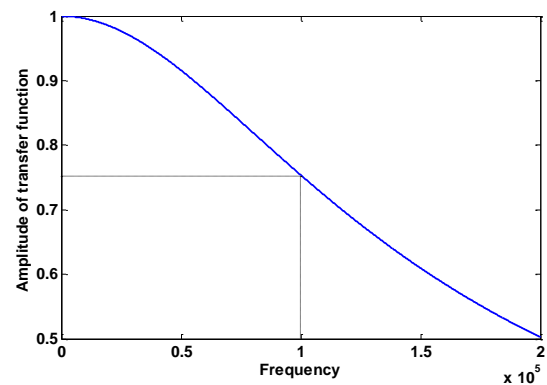
برای طراحی الگوریتم ارائه‌شده، از شبکه نشان داده‌شده در شکل (۴) استفاده شده است.



شکل ۴: شبکه مورد مطالعه

خط حفاظت‌شده، خط AB است و رله بر روی شین A نصب شده است. همان‌طور که در شکل ۴ هم دیده می‌شود، از سیگنال‌های ولتاژ و جریان به ترتیب توسط CCVT و CT نمونه‌برداری شده و سپس توسط رله تحلیل می‌شوند. برای مثال شکل ۵، شکل موج‌های جریان سه فاز از یک خطای دو فاز A و B به زمین را نشان می‌دهد. خطای مربوط به این شکل در فاصله ۴۰ کیلومتری از محل رله (شین A) و هنگامی که زاویه ولتاژ ۳۶ درجه بوده، اتفاق افتاده و با فرکانس نمونه‌برداری ۲۰۰ کیلوهرتز رسم شده است.

موضوع، مقدار تابع تبدیل نشان داده‌شده در رابطه (۶) برحسب فرکانس در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: اندازه تابع تبدیل CT برحسب فرکانس

از آنجاکه فرکانس نمونه‌برداری برای استخراج سیگنال جریان در این مقاله ۲۰۰ kHz است، بنابراین طبق تئوری نایکوئیست مؤلفه‌های فرکانسی تا فرکانس ۱۰۰ kHz بسیار مهم هستند. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، CT مؤلفه‌های مربوط به فرکانس ۱۰۰ kHz را تا ۲۵٪ تضعیف می‌کند. الگوریتم حفاظتی ارائه‌شده در این مقاله قادر است که با وجود این تغییر در مؤلفه‌های فرکانسی بازم نوع خطا را به درستی شناسایی کند.

### ۴- اپراتور انرژی تیجر

اپراتور انرژی تیجر یک عملگر غیرخطی بر روی سیگنال بوده و توسط شخصی به نام تیجر پیشنهاد شده است [۱۳]. سپس کیزر [۱۴] نشان داد که با این اپراتور می‌توان انرژی یک سیگنال خاص داده‌شده را استخراج کرد. فرض می‌شود که سیگنال قدرت به صورت مجموعه‌ای از اجزاء اساسی فرکانس و دامنه سیگنال باشد.

$$x(t) = \sum_i A_i(t) \cos(\omega_i(t)t + \phi_i) \quad (7)$$

که در این رابطه  $A_i$  دامنه  $\omega_i$  فرکانس و  $\phi_i$  فاز اولیه جزء  $n$ ام سیگنال هستند. فرم پیوسته TEO به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود.

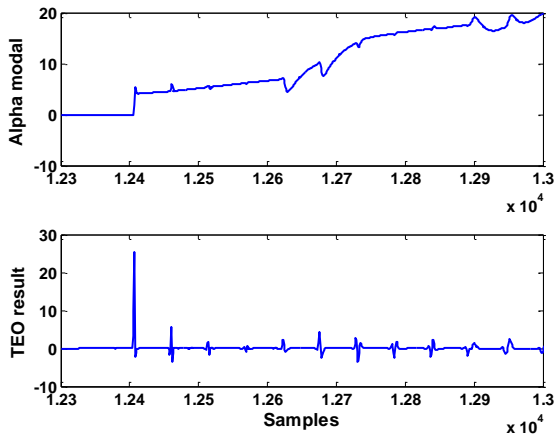
$$\psi_c[x(t)] = \left[\frac{dx(t)}{dt}\right]^2 - x(t) \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (8)$$

در رابطه بالا  $x(t)$  سیگنال ورودی و  $\psi_c[x(t)]$  انرژی لحظه‌ای سیگنال است. با استفاده از خروجی اپراتور انرژی تیجر، مؤلفه‌های سیگنال ورودی با روابط (۹) و (۱۰) قابل بازیابی هستند.

$$A_i(t) = \frac{\psi[x_i(t)]}{\sqrt{\psi_c\left[\frac{dx_i(t)}{dt}\right]}} \quad (9)$$

$$\omega_i(t) = \sqrt{\frac{\psi_c\left[\frac{dx_i(t)}{dt}\right]}{\psi_c[x_i(t)]}} \quad (10)$$

می‌افتد. در الگوریتم پیشنهادی دامنه موج سیار اول (مقدار پیک موجود در نمونه  $10^4 \times 1/24$  در این شکل) مورد استفاده قرار گرفته است.



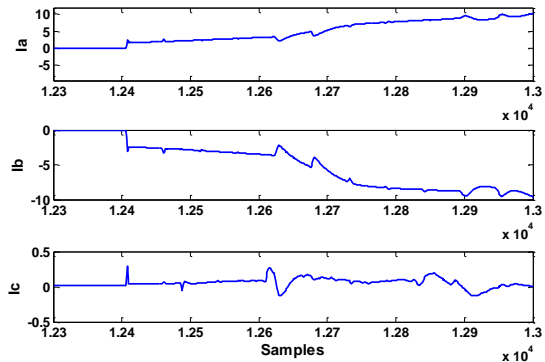
شکل ۷: شکل موج مود آلفا و نتیجه حاصل از TEO

همان‌طور که قبلاً هم ذکر شد، مقاومت خطا، فاصله خطا تا محل رله و زاویه‌ای از ولتاژ که در آن خطا اتفاق افتاده است هم بر روی دامنه امواج سیار تولیدشده تأثیر می‌گذارد. به‌منظور حذف اثر این پارامترها بر کارایی الگوریتم پیشنهادی، نسبت دامنه موج سیار اول برای اجزاء مودال یعنی  $\frac{I_0}{I_\alpha}, \frac{I_\beta}{I_\gamma}, \frac{I_\alpha}{I_\beta}$  و  $\frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)}$  مورد تحلیل قرار می‌گیرند که در پارامتر آخر عبارت mean به معنای متوسط‌گیری از سه مؤلفه است.

### ۳-۵- طراحی سیستم فازی

در این مقاله به‌منظور دسته‌بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا از دامنه موج سیار اول مؤلفه‌های مودال که به‌وسیله‌ی عملگر TEO استخراج شده است، استفاده می‌شود. سپس از نسبت دامنه امواج سیار حاصله از مؤلفه‌های مودال برای دسته‌بندی خطا استفاده می‌گردد.

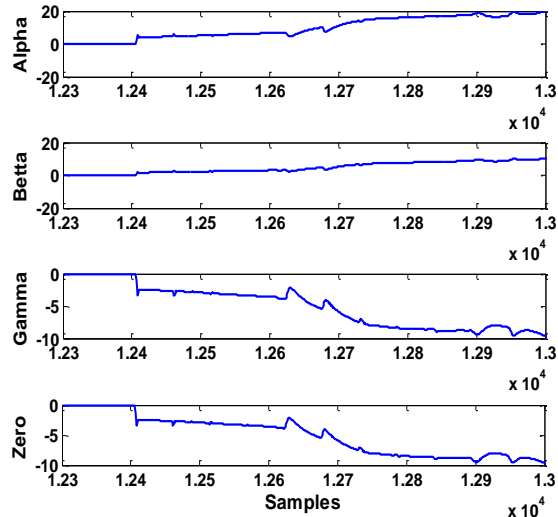
برای تحلیل مقدار چهار پارامتر  $\frac{I_0}{I_\alpha}, \frac{I_\alpha}{I_\beta}, \frac{I_\beta}{I_\gamma}$  و  $\frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)}$  برای انواع مختلف خطا، شبکه نشان داده‌شده در شکل ۴ در نرم‌افزار PSCAD شبیه‌سازی شده است. برای تولید انواع خطا، زاویه‌ی وقوع خطا در فواصل  $1/8$  درجه‌ای در تمامی طول یک سیکل تغییر داده شده است و نیز انواع خطا در فواصل مختلف و با مقاومت‌های مختلف خطا تولید شده‌اند. جدول ۱ نتایج مربوط به محدوده‌های مقادیر پارامترهای چهارگانه ذکرشده را برای انواع خطا، در شرایط مختلف خطا نشان می‌دهد.



شکل ۵: شکل موج‌های جریان برای خطای AB-g

### ۵-۱- تبدیل فاز به مودال

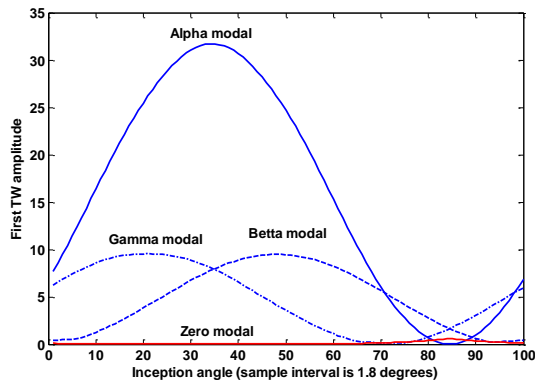
به‌منظور تبدیل سیگنال‌های سه‌فاز که به یکدیگر وابسته هستند به سیگنال‌های غیروابسته، از تبدیل فاز به مودال استفاده می‌شود. در این مقاله از تبدیل فاز به مودال کارن-باور و از اجزاء مودال  $\alpha, \beta, \gamma$  و 0 برای دسته‌بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا استفاده شده است. شکل ۶ مؤلفه‌های مودال خطای نشان داده‌شده در شکل ۵ را نشان می‌دهد.



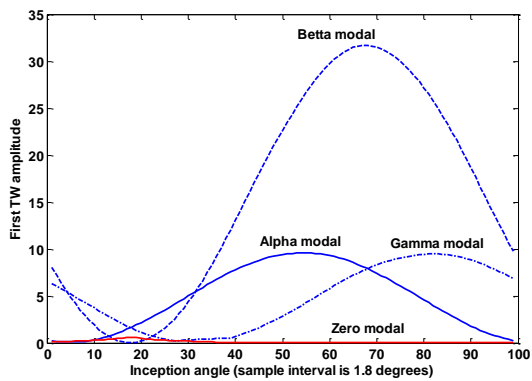
شکل ۶: مؤلفه‌های مودال برای خطای AB-g

### ۵-۲- اعمال TEO بر مؤلفه‌های مودال

در این مرحله برای استخراج امواج سیار، TEO به‌تمامی مؤلفه‌های مودال اعمال می‌شود تا دامنه موج سیار اول برای هر یک از مؤلفه‌های مودال به دست آید. شکل ۷ نتیجه حاصل از اعمال TEO بر روی مود آلفای نشان داده‌شده در شکل ۶ را نمایش می‌دهد. در شکل ۷ قسمت اول همان مؤلفه آلفای نشان داده‌شده در شکل ۶ بوده که حاوی امواج سیار است. قسمت دوم نتایج حاصل از اعمال TEO بر سیگنال نشان داده‌شده در قسمت اول این شکل را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این دو سیگنال دیده می‌شود، هر جا که موج سیاری روی سیگنال مؤلفه آلفا موجود باشد، معادل آن یک پیک بر روی خروجی TEO اتفاق



شکل ۸: مقایسه مؤلفه‌های مودال برای خطای AB-g



شکل ۹: مقایسه مؤلفه‌های مودال برای خطای AC-g

در خطای دو فاز به هم، از آنجاکه هیچ جریان زمینی وجود ندارد، اندازه دامنه امواج سیار موجود در فازهای تحت خطا مشابه و پلاریته آن‌ها قرینه است. بنابراین مثلاً برای خطای AB دامنه مؤلفه  $\alpha$  زیادتر از مؤلفه‌های دیگر است. در خطای دو فاز به زمین وضعیت مشابهی وجود دارد ولی با زیاد شدن جریان توالی صفر این قاعده از بین می‌رود. همان‌طور که از شکل (۸) دیده می‌شود، برای خطای AB-g دامنه مؤلفه  $\alpha$  بزرگ‌ترین مقدار است مگر وقتی که مؤلفه توالی صفر از یک مقدار خاص بزرگ‌تر می‌شود. در مقادیر کوچک جریان توالی صفر، مود  $\alpha$  بزرگ‌ترین موج سیار را دارد. از نمونه ۷۱ به بعد که کمی مؤلفه توالی صفر بزرگ‌تر شده است، مؤلفه  $\alpha$  مقداری بین دو مؤلفه دیگر دارد و بازم با بزرگ‌تر شدن مؤلفه توالی صفر مؤلفه  $\alpha$  می‌تواند کوچک‌ترین موج سیار را داشته باشد. جدول ۲ مقادیر ۴ پارامتر ذکر شده در جدول ۱ را برای انواع خطای دو فاز به زمین و برای زوایای مختلف وقوع خطا نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای ۴ گانه برای انواع خطا

$I_\beta / I_\gamma$	$I_\alpha / I_\gamma$	$I_\alpha / I_\beta$	$\frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)}$	
$1.48 - 1.5 \times 10^{-6}$	$1.50 - 1.5 \times 10^{-6}$	$1 - 1.02$	$0.14 - 0.15$	A-g
$6 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-3}$	$1 - 1.02$	$1.50 - 1.5 \times 10^{-6}$	$4/3 - 1.0^{-4}$	B-g
$1 - 1.02$	$6 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-3}$	$4/3 - 1.0^{-4}$	C-g
$0.97 - 1.01$	$3/9 - 4/1$	$3/9 - 4/1$	$1.0^{-1} - 6 \times 1.0^{-8}$	AB
$3/9 - 4/1$	$0.97 - 1.01$	$0.24 - 0.25$	$1.0^{-1} - 6 \times 1.0^{-8}$	AC
$0.24 - 0.25$	$0.24 - 0.25$	$0.97 - 1.01$	$1.0^{-1} - 6 \times 1.0^{-8}$	BC
$0.05 - 42/1$	$0.01 - 42/6$	$0.1 - 22/7$	$0.0021 - 1.0^{-773}$	AB-g
$0.02 - 23/1$	$0.02 - 18/3$	$0.02 - 49/1$	$0.0021 - 1.0^{-773}$	AC-g
$0.04 - 27/3$	$0.03 - 46/9$	$0.04 - 32/6$	$0.0021 - 1.0^{-773}$	BC-g
$0.001 - 2/6 \times 10^{-3}$	$0.002 - 2/6 \times 10^{-3}$	$0.002 - 712$	$1.0^{-8} - 5 \times 1.0^{-7}$	ABC-g

در جدول (۱) دیده می‌شود که با استفاده از چهار نسبت ذکر شده تمامی خطاها به‌غیر از خطاهای دوفاز به زمین از یکدیگر قابل تشخیص هستند و فقط بازه‌های موجود برای خطای دو فاز به زمین با یکدیگر تداخل دارند. دلیل این است که متصل بودن نقطه خطا به زمین، تقارن موجود در سه فاز را به هم می‌زند و اجزای مودال هم مقادیری که از پیش قابل تحلیل نیستند را پیدا می‌کنند. هر چه جریان زمین که همان جریان توالی صفر است بیشتر باشد این عدم تقارن بیشتر خواهد بود. در نتیجه یکی از فازهای تحت خطا در بعضی از زوایای ولتاژ در لحظه وقوع خطا (یعنی زوایایی که در آن‌ها دامنه ولتاژ برای این فاز خیلی کوچک است) ممکن است موج سیاری با دامنه کمتر از موج سیار موجود بر روی فاز سالم ایجاد کند. برای تکمیل الگوریتم در شناسایی خطاهای دو فاز به زمین از یکدیگر، در هر زاویه وقوع خطا، اندازه موج سیار اول مربوط به مودهای  $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $\gamma$  و نیز مود صفر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در اینجا فقط تغییر زاویه وقوع خطا مهم است چراکه فاصله خطا از محل رله و مقاومت خطا دامنه امواج سیار روی سه فاز را به یک میزان تغییر می‌دهند. به‌عنوان مثال، شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب این مقایسه را برای خطاهای AB-g و AC-g در یک نیم سیکل نشان می‌دهند. قدرمطلق امواج سیار تولیدی برای زوایای ولتاژ از صفر تا ۱۸۰ درجه مشابه با این مقادیر برای زوایای از ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه است. بنابراین تحلیل دامنه امواج سیار برای نیم‌سیکل از سیگنال ولتاژ شبکه کافی است.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای چهارگانه برای انواع مختلف خطا

	$P_4 = I_\beta / I_\gamma$	$P_3 = I_\alpha / I_\gamma$	$P_2 = I_\alpha / I_\beta$	$P_1 = \frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)}$	
AB-g	-	$P_r > 1$	$P_r > 1$	$P_1 < 0.16$	
	-	$P_r > 1$ یا $P_r < 1$	$P_r > 1$ یا $P_r < 1$	$0.16 < P_1 < 0.37$	
	-	$P_r < 1$	$P_r < 1$	$0.37 < P_1$	
AC-g	$P_r > 1$	-	$P_r < 1$	$P_1 < 0.16$	
	یا $P_r < 1$	-	یا $P_r < 1$	$0.16 < P_1 < 0.37$	
	$P_r > 1$	-	$P_r > 1$	$0.37 < P_1$	
BC-g	$P_r < 1$	$P_r < 1$	-	$P_1 < 0.16$	
	یا $P_r < 1$	یا $P_r > 1$	-	$0.16 < P_1 < 0.37$	
	$P_r > 1$	$P_r < 1$	-	$0.37 < P_1$	

بنابراین، مجموعه قواعد فازی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\text{اگر } - \frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)} > 10^{-5}$$

• اگر  $0.95 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 1.05$  و  $1.0 < \frac{I_\alpha}{I_\gamma} < 2 \times 1.06$  و

$1.0 < \frac{I_\beta}{I_\gamma} < 2 \times 1.06$ ، پس خطای A-g نتیجه می‌شود.

• اگر  $0.95 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 1.05$  و  $1.0 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 2 \times 1.06$  و

$1.0 < \frac{I_\beta}{I_\gamma} < 0.05$ ، پس خطای B-g نتیجه می‌شود.

• اگر  $1.0 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 0.05$  و  $1.0 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 0.05$  و  $1.0 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 0.05$  و

$0.95 < \frac{I_\beta}{I_\gamma}$ ، پس خطای C-g نتیجه می‌شود.

• در غیر این صورت خطای دو فاز به زمین نتیجه خواهد شد.

$$\text{اگر } - \frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)} < 10^{-5}$$

• اگر  $3/5 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 4/5$  و  $3/5 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 4/5$  و  $3/5 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 4/5$  و

$0.95 < \frac{I_\beta}{I_\gamma}$ ، خطای AB نتیجه خواهد شد.

• اگر  $0.3 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 0.7$  و  $0.95 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 1.05$  و  $0.95 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 1.05$  و

$3/5 < \frac{I_\beta}{I_\gamma}$ ، خطای AC نتیجه خواهد شد.

• اگر  $0.95 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 1.05$  و  $0.7 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 0.95$  و  $0.7 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 0.95$  و

$0.7 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 0.95$ ، خطای BC نتیجه خواهد شد.

• در غیر این صورت خطای سه فاز نتیجه خواهد شد.

در صورتی که از قوانین ذکر شده خطای دو فاز به زمین نتیجه شد، قوانین زیر برای تشخیص نوع خطای دو فاز به زمین به کار گرفته می‌شوند.

- اگر  $0.16 < \frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)} < 0.37$  و  $1.0 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} > 1$  و  $1.0 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} > 1$ ، خطای AB-g نتیجه خواهد شد.

- اگر  $0.16 < \frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)} < 0.37$  و  $1.0 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 1$  و  $1.0 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 1$ ، خطای AC-g نتیجه خواهد شد.

- اگر  $0.16 < \frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)} < 0.37$  و  $1.0 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 1$  و  $1.0 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 1$ ، خطای BC-g نتیجه خواهد شد.

- اگر  $0.37 < \frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)} < 0.7$  و  $0.16 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 1$  و  $0.16 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 1$  یا برعکس، خطای AB-g نتیجه خواهد شد.

- اگر  $0.37 < \frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)} < 0.7$  و  $0.16 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} > 1$  و  $0.16 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} > 1$  یا برعکس، خطای AC-g نتیجه خواهد شد.

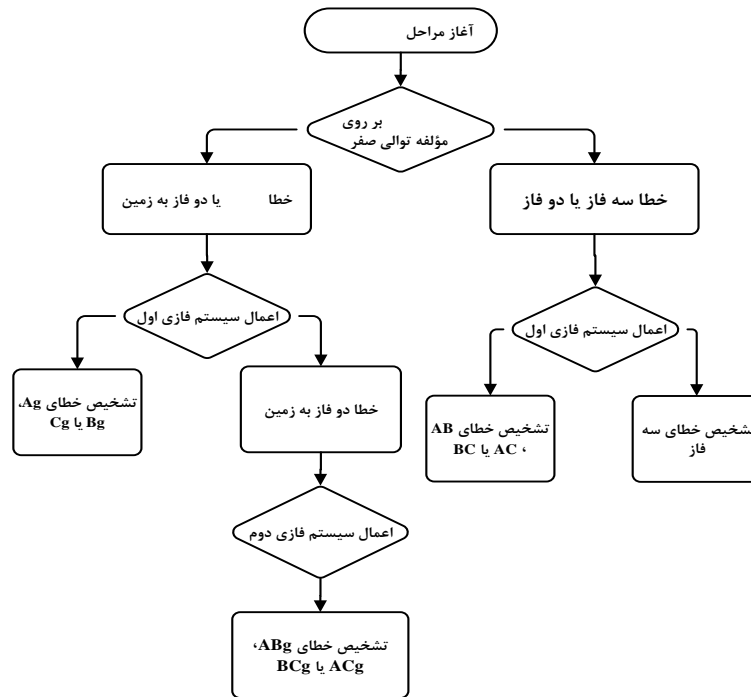
- اگر  $0.37 < \frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)} < 0.7$  و  $0.16 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} > 1$  و  $0.16 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} > 1$  یا برعکس، خطای BC-g نتیجه خواهد شد.

- اگر  $0.37 < \frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)} < 0.7$  و  $0.16 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 1$  و  $0.16 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} < 1$ ، خطای AB-g نتیجه خواهد شد.

- اگر  $0.37 < \frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)} < 0.7$  و  $0.16 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} > 1$  و  $0.16 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} > 1$ ، خطای AC-g نتیجه خواهد شد.

- اگر  $0.37 < \frac{I_0}{\text{mean}(I_\alpha, I_\beta, I_\gamma)} < 0.7$  و  $0.16 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} > 1$  و  $0.16 < \frac{I_\alpha}{I_\beta} > 1$ ، خطای BC-g نتیجه خواهد شد.

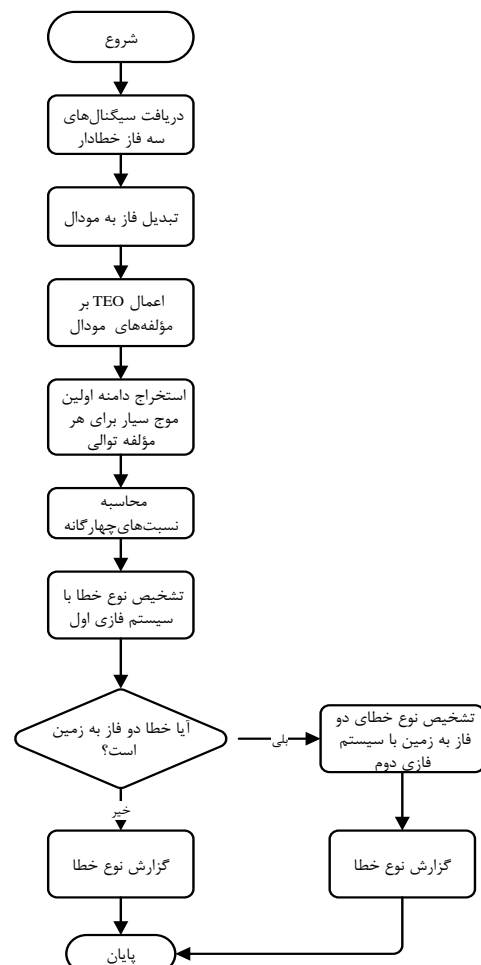
بنا بر موارد ذکر شده، در الگوریتم پیشنهادی دو سیستم فازی برای تشخیص انواع خطا تعریف می‌شود. سیستم فازی اول دسته‌بندی انواع خطا را انجام می‌دهد و فقط اگر خطا دو فاز به زمین بود فازهای تحت خطا را از یکدیگر جدا نمی‌کند. در این صورت سیستم با استفاده از سیستم فازی دوم فازهای تحت خطا در خطای دو فاز به زمین تعیین می‌شوند. فلوچارت مربوط به نحوه تصمیم‌گیری سیستم فازی در شکل ۱۰ و فلوچارت کلی الگوریتم پیشنهادی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: نحوه تصمیم‌گیری سیستم فازی

### ۶- شبیه‌سازی و نتایج

به‌منظور بررسی کارایی الگوریتم ارائه‌شده، شبکه نشان داده‌شده در شکل ۴ نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده است. این شبکه  $400\text{ kV}$  و ترانسفورماتور موجود در آن  $230/400$  کیلوولت بوده که سطح ولتاژ  $230\text{ kV}$  در سمت چپ خود را به سطح ولتاژ  $400\text{ kV}$  در سمت راست خود تبدیل می‌کند. برای استخراج امواج جریان CT مورد استفاده از نوع قابل اشباع با چگالی شار نقطه زانوی یک تسلا بوده و نسبت تبدیل آن  $1600\text{ A}/5\text{ A}$  است.  $\text{CCVT}$  هم از دو خازن و یک ترانسفورماتور ولتاژ (PT) تشکیل شده است که در مجموع نسبت تبدیل ولتاژ آن  $231 \times 10^3\text{ V}/115\text{ V}$  است. فرکانس نمونه‌برداری از شکل موج های جریان  $200\text{ kHz}$  است. خط حفاظت‌شده، خط AB است. انواع مختلف خطا به‌منظور تولید سیگنال‌های تست در این خط قرار گرفته‌اند. برای تولید سیگنال‌های خطا علاوه بر نوع خطا، مقاومت خطا، فاصله خطا از محل رله و زاویه وقوع خطا تغییر داده شده است. پیاده‌سازی الگوریتم در نرم‌افزار MATLAB اجرا شده است. در سیستم فازی شبیه‌سازی‌شده، مقادیر مربوط به توابع عضویت با استفاده از جدول‌های ۱ و ۲ تعیین شده است. جدول ۳ متغیرهای فازی و توابع عضویت مربوط به آن‌ها را نشان می‌دهد. از آنجاکه نوع سیستم‌های فازی سوگنو است، خروجی سیستم فازی اول، اعداد ۱ تا ۸ به ترتیب برای خطای Ag, Bg, Cg, AB, AC, BC, دو فاز به زمین و سه فاز به زمین بوده و خروجی سیستم فازی دوم اعداد ۱ تا ۳ به ترتیب برای خطاهای ABg, ACg و BCg است.



شکل ۱۱: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی



جدول ۳: متغیرهای فازی و مقادیر مربوط به توابع عضویت

$I_{\beta} / I_{\gamma}$	$I_{\alpha} / I_{\gamma}$	$I_{\alpha} / I_{\beta}$	$\frac{I_0}{mean(I_{\alpha}, I_{\beta}, I_{\gamma})}$	نوع تابع
دورنقه‌ای	دورنقه‌ای	دورنقه‌ای	دورنقه‌ای	
۰،۰/۰،۰۵، -۰/۰،۱، ۰/۰،۰۶	۰،۰/۰،۰۵، -۰/۰،۱، ۰/۰،۰۶	۰،۰/۱، ۰/۱۲-۰/۰،۱،	-۰/۱۰،۰،۰۱-۵، ۵×۱۰-۵	MF <sub>1</sub>
۰،۰/۲۳،۰/۲۶ ۰/۳-۰/۲	۰،۰/۲۳،۰/۲۶ ۰/۳-۰/۲	۰/۱۲،۰/۱۸، ۰/۹-۰/۱،	-۰،۵/۱،۹ ۱۰-۵،۵×۱۰	MF <sub>2</sub>
۰/۹۶، ۱/۰،۲ ۱/۱-۰/۹،	۰/۹۶، ۱/۰،۲ ۱/۱-۰/۹،	۰/۹، ۱/۸، ۲ ۰/۸	-	MF <sub>3</sub>
۴/۵، ۴/۸ ۳/۲، ۳/۵،	۴/۵، ۴/۸ ۳/۲، ۳/۵،	۲، ۴/۵، ۴/۸ ۱/۸،	-	MF <sub>4</sub>
۱۰۰، ۲×۱۰ <sup>۶</sup> ۹۰، ۲/۵×۱۰ <sup>۶</sup>	۱۰۰، ۲×۱۰ <sup>۶</sup> ۹۰، ۲/۵×۱۰ <sup>۶</sup>	۱۰۰، ۲×۱۰ <sup>۶</sup> ۹۰، ۲/۵×۱۰ <sup>۶</sup>	-	MF <sub>5</sub>

آیا این فاز خطادار هست یا نه با مشکل مواجه می‌کند. برای اینکه الگوریتم پیشنهادشده در چنین شرایطی هم آزموده شود، خطا در زوایای بسیار کوچک ولتاژ یعنی بافاصله ۱/۸ درجه‌ای از لحظه عبور از صفر ولتاژ تولید شده است. چالش دوم هنگامی اتفاق می‌افتد که خطا در نزدیکی محل رله اتفاق بیفتد که در این صورت تمایز قائل شدن بین امواج سیار متوالی مشکل خواهد بود. بنابراین خطاهای بسیار نزدیک به محل رله نیز در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت برای هر نوع خطا، ۱۵۰ سیگنال تست تولید شده و صحت عملکرد الگوریتم ارائه‌شده بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، در تمامی حالات، نوع خطا و فازهای تحت خطا به درستی تشخیص داده شده‌اند که کارایی فوق‌العاده این الگوریتم در دسته‌بندی خطا و شناسایی فاز یا فازهای تحت خطا را نشان می‌دهد. در صورتی که در [۵] که از تبدیل موجک برای استخراج امواج سیار استفاده شده است، در صورتی که مقاومت خطا بزرگ (۵۰Ω) باشد با زاویه وقوع زیر ۱۰ درجه امواج سیار به خوبی استخراج نمی‌شوند و با مقاومت خطای کوچک (۰/۱Ω) امواج سیار برای خطای با زاویه وقوع زیر ۵ درجه به خوبی استخراج نمی‌شوند. به علاوه در [۳] کوچک‌ترین زاویه ولتاژ در نظر گرفته‌شده برای وقوع خطا ۱۰ درجه و در [۶] کوچک‌ترین زاویه در نظر گرفته‌شده ۵ درجه است.

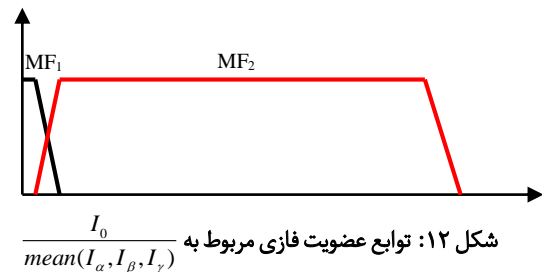
#### ۱-۶- اثر امیدانس خطا

برای بررسی کارایی الگوریتم هنگام وقوع خطا با امیدانس‌های مختلف، خطا با مقادیر مختلف امیدانس شبیه‌سازی شده و به‌عنوان ورودی الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی را برای مقادیر مختلف امیدانس خطا نشان می‌دهد. نتایج موجود در جدول ۴ نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی به درستی نوع خطاهای با امیدانس بالا را نیز تشخیص می‌دهد. لازم به ذکر است که با بالا رفتن امیدانس خطا، دامنه امواج سیار تولیدشده کوچک‌تر می‌شود و تشخیص ماهیت خطا مشکل‌تر خواهد شد. بنابراین کارآمدی الگوریتم پیشنهادی به درستی تأیید شده است.

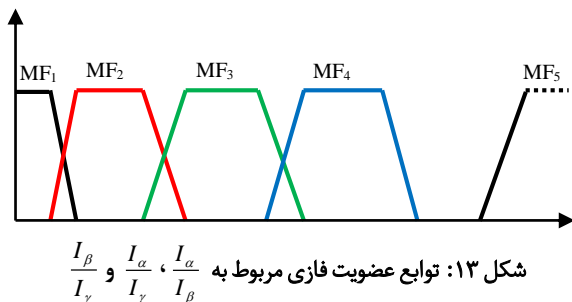
#### ۲-۶- اثر خطاهای نزدیک به رله

برای بررسی بیشتر کارایی الگوریتم پیشنهادی، عملکرد آن در مواجهه با خطاهای نزدیک به محل رله مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. جدول ۵ چگونگی پاسخ‌گویی الگوریتم پیشنهادی را هنگام وقوع خطاهای نزدیک به رله نشان می‌دهد.

شماتیک توابع عضویت فازی که حدود آن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده‌اند نیز در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۲: توابع عضویت فازی مربوط به  $\frac{I_0}{mean(I_{\alpha}, I_{\beta}, I_{\gamma})}$



شکل ۱۳: توابع عضویت فازی مربوط به  $\frac{I_{\beta}}{I_{\gamma}}$  و  $\frac{I_{\alpha}}{I_{\gamma}}$  و  $\frac{I_{\alpha}}{I_{\beta}}$

در روش‌های حفاظتی بر پایه امواج سیار دو چالش همیشگی وجود دارد که الگوریتم‌های ارائه‌شده باید قدرت پاسخ‌گویی خوبی در قبال آن‌ها داشته باشند. یکی از این چالش‌ها وقتی اتفاق می‌افتد که خطا در یک فاز در لحظه‌ای که دامنه ولتاژ در آن فاز بسیار کوچک است اتفاق بیفتد. به عبارتی خطا در نزدیکی زاویه‌ای که در آن ولتاژ در حال عبور از صفر است اتفاق بیفتد. در چنین شرایطی امواج سیار با دامنه بسیار کوچک در فاز مذکور تولید خواهند شد که تصمیم‌گیری را برای اینکه

جدول ۵: نتایج شبیه‌سازی برای خطاهای نزدیک به محل رله

شماره خروجی	$\frac{I_\beta}{I_\gamma}$	$\frac{I_\alpha}{I_\gamma}$	$\frac{I_\alpha}{I_\beta}$	$\frac{I_0}{mean(-)}$	فاصله	نوع خطا
۱	$1/6 \times 10^{-6}$	$2/6 \times 10^{-6}$	۱/۰.۶۴	-۰/۸۱۳۲	۳km	Ag
۱	$7/4 \times 10^{-5}$	$7/3 \times 10^{-5}$	-۰/۹۸۶۲	-۰/۷۵۹	۵km	
۱	$1/2 \times 10^{-6}$	$1/2 \times 10^{-6}$	-۰/۰.۱	-۰/۶۲۴۵	۷km	
۶	۴/۰.۲۱	۱/۰.۱۰۵	-۰/۲۵۱۳	$3/3 \times 10^{-10}$	۳km	AC
۶	۳/۹۵۳۴	۰/۹۷۶۷	-۰/۲۴۷۱	$1/4 \times 10^{-9}$	۵km	
۶	۴/۰.۴۳	۱/۰.۱۷۱	-۰/۲۵۲۱	$7/4 \times 10^{-10}$	۷km	
۷ و ۳	-۰/۰.۵۵۴	-۰/۵۸۵۱	۱۰/۵۵۳	-۰/۲۳۵۳	۳km	BCg
۷ و ۳	-۰/۰.۳۴۶	-۰/۶۶۲۴	۱۹/۱۳۶	-۰/۲۹۷۸	۵km	
۷ و ۳	-۰/۰.۳۷۲	-۰/۶۵۱۲	۱۷/۴۸۳	-۰/۲۳۸۴	۷km	
۸	-۰/۴۶۱۶	۲/۸۲۰۵	۶/۱۰۹۹	$1/1 \times 10^{-7}$	۳km	ABC
۸	-۰/۴۷۶۹	۲/۸۵۸۳	۵/۹۹۲۹	$1/2 \times 10^{-7}$	۵km	
۸	-۰/۴۵۴۶	۲/۸۰۳	۶/۱۶۶۴	$1/4 \times 10^{-7}$	۷km	

جدول ۴: نتایج شبیه‌سازی با مقادیر مختلف مقاومت خطا

شماره خروجی	$\frac{I_\beta}{I_\gamma}$	$\frac{I_\alpha}{I_\gamma}$	$\frac{I_\alpha}{I_\beta}$	$\frac{I_0}{mean(-)}$	R	نوع خطا
۱	$1/7 \times 10^{-6}$	$1/7 \times 10^{-6}$	۱/۰.۱	-۰/۱۲۲۷	۱	Ag
۱	$1/6 \times 10^{-6}$	$1/6 \times 10^{-6}$	۱/۰.۱	-۰/۱۲۷۸	۱۰	
۱	$1/1 \times 10^{-6}$	$1/1 \times 10^{-6}$	۱/۰.۱۲	-۰/۱۲۷۹	۵۰	
۲	$2/8 \times 10^{-7}$	-۰/۹۹	$3/5 \times 10^{-6}$	-۰/۱۲۶۲	۱	Bg
۲	$3 \times 10^{-7}$	-۰/۹۸۹۶	$3/3 \times 10^{-6}$	-۰/۱۲۶۲	۱۰	
۲	$3/9 \times 10^{-7}$	-۰/۹۸۷۸	$2/5 \times 10^{-6}$	-۰/۱۲۶۱	۵۰	
۳	۱/۰.۱۰۱	$1/5 \times 10^{-5}$	$1/5 \times 10^{-5}$	-۰/۱۱۵۹	۱	Cg
۳	۱/۰.۱۰۵	$1/6 \times 10^{-5}$	$1/6 \times 10^{-5}$	-۰/۱۱۵۶	۱۰	
۳	۱/۰.۱۲۲	$2/2 \times 10^{-5}$	$2/2 \times 10^{-5}$	-۰/۱۱۴	۵۰	
۴	-۰/۹۸۲۵	۳/۹۶۴۹	۴/۰.۳۶	$1/1 \times 10^{-10}$	۱	AB
۴	-۰/۹۸۲۱	۳/۹۶۴۱	۴/۰.۳۶	$1/2 \times 10^{-10}$	۱۰	
۴	-۰/۹۸۰۳	۳/۹۶۰۵	۴/۰.۴	$1/1 \times 10^{-10}$	۵۰	
۵	۴/۰.۳۱۲	۱/۰.۱۵۶	-۰/۲۵۱۹	$5/7 \times 10^{-10}$	۱	AC
۵	۴/۰.۳۲۳	۱/۰.۱۶۱	-۰/۲۵۲	$6/5 \times 10^{-10}$	۱۰	
۵	۴/۰.۴۰۱	۱/۰.۲۰۱	-۰/۲۵۲۵	$8/3 \times 10^{-10}$	۵۰	
۶	-۰/۲۵۲۲	-۰/۲۴۷۸	-۰/۹۸۲۴	$2/4 \times 10^{-10}$	۱	BC
۶	-۰/۲۵۲۳	-۰/۲۴۷۷	-۰/۹۸۲	$2/8 \times 10^{-10}$	۱۰	
۶	-۰/۲۵۲۵	-۰/۲۴۷۵	-۰/۹۸۰۲	$3/3 \times 10^{-10}$	۵۰	
۷ و ۱	-۰/۸۵۳۲	۳/۵۹۸	۴/۳۱۶۹	$3/1 \times 10^{-4}$	۱	ABg
۷ و ۱	-۰/۸۰۲۲	۳/۵۹۳۵	۴/۴۷۹۸	$3/2 \times 10^{-4}$	۱۰	
۷ و ۱	-۰/۷۹۳۸	۳/۵۷۵۸	۴/۵۰۴۸	$3/4 \times 10^{-4}$	۵۰	
۷ و ۲	۱۱/۸۴۱	۱۱/۸۰۴۹	-۰/۹۹۷	-۰/۱۳۱۵	۱	ACg
۷ و ۲	۱۲/۴۷	۱۳/۲۳	۱/۰.۶۱	-۰/۱۳۳۲	۱۰	
۷ و ۲	۱۹	۲۰/۹	۱/۱	-۰/۱۳۷۸	۵۰	
۷ و ۳	-۰/۱۲۴	-۰/۶۵	۵/۲۶	-۰/۰۴۷۸	۱	BCg
۷ و ۳	-۰/۱۱۳۷	-۰/۶۵۶۵	۵/۷۷۶۵	-۰/۰۴۹۶	۱۰	
۷ و ۳	-۰/۰۸۰۷	-۰/۶۷۲۸	۸/۳۳۲	-۰/۰۵۳۱	۵۰	
۸	-۰/۴۷۸۹	۲/۸۰۲۶	۵/۸۵۱۹	$1/7 \times 10^{-7}$	۱	ABC
۸	-۰/۴۵۴	۲/۸۰۱۶	۶/۱۷۰۹	$1/8 \times 10^{-7}$	۱۰	
۸	-۰/۴۵۲۴	۲/۷۹۷۶	۶/۱۸۴۴	$2/1 \times 10^{-7}$	۵۰	

همان‌طور که در جدول (۵) دیده می‌شود، نوع خطاهای اتفاق افتاده در نزدیکی محل رله نیز به‌درستی تشخیص داده می‌شود. این در صورتی است که مطابق با نتایج موجود در [۵]، وقتی که خطا در فاصله حدود ۵ کیلومتری از محل رله اتفاق بیفتد با استفاده از مقیاس اول تبدیل موجک امواج سیار اول و دوم با یکدیگر تداخل می‌کنند و باید سراغ مقیاس‌های بعدی تبدیل موجک رفت که در این صورت دامنه موج سیار کم‌تر از مقدار واقعی دیده می‌شود.

### ۳-۶- اثر نویز فرکانس بالا

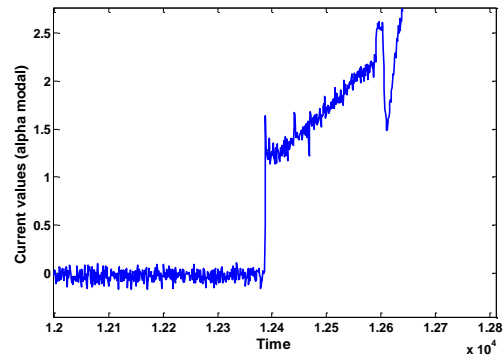
در شبکه‌های قدرت واقعی همیشه این امکان وجود دارد مقداری نویز بر روی سیگنال‌های قدرت وجود داشته باشد. به همین علت عملکرد روش پیشنهادی با حضور نویز موردبررسی قرار گرفته است. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب شکل موج جریان حاوی نویز از مؤلفه آلفا برای خطای تک‌فاز A به زمین و خروجی TEO را نشان می‌دهد. این خطا در ۴۰ کیلومتری خط انتقال و در زاویه ۳۶ درجه از ولتاژ اتفاق افتاده و با فرکانس نمونه‌برداری ۲۰۰ کیلوهرتز رسم شده است.

همان‌طور که از شکل‌ها معلوم است در شرایط وجود نویز، بازهم دامنه موج سیار اول به‌خوبی قابل استخراج بوده است. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، برای این خطا  $\frac{I_\alpha}{I_\beta} = 1/0.22$ ،  $\frac{I_\alpha}{I_\gamma} = 4/87 \times 10^{-4}$  و  $\frac{I_\beta}{I_\gamma} = 4/76 \times 10^{-4}$  به دست آمده و نوع خطا هم به‌درستی به دست آمده است.

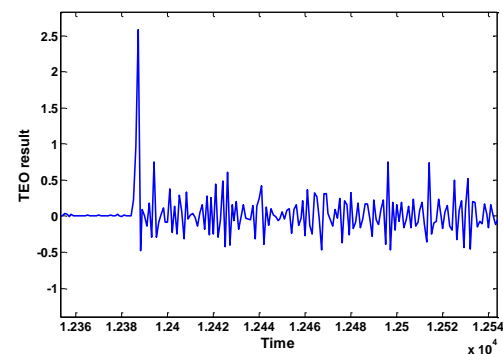
- Engineering, Generation, Transmission & Distribution, vol. 153, pp. 469-475, 2006.
- [3] X. Dong, W. Kong and T. Cui, "Fault classification and faulted phase selection based on initial current traveling wave," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 2, pp. 552-559, 2009.
- [4] M. S. Mamis, M. Arkan and C. Keles, "Transmission lines fault location using transient signal spectrum," Electrical Power and Energy Systems, vol. 53, pp. 714-718, 2013.
- [5] P. Jafarian and M. Sanaye-Pasand, "A traveling wave based protection technique using wavelet/PCA analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 2, pp. 588-599, 2010.
- [6] A. Sharafi and M. Sanaye-Pasand, P. Jafarian, "Ultra high speed protection of parallel transmission lines using current traveling waves," Generation, Transmission & Distribution, IET, vol. 5, no. 6, pp. 656-666, 2011.
- [7] C. Pang and M. Kezunovic, "Fast distance relay scheme for detecting symmetrical fault during power swing," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2205-2212, 2010.
- [8] H. Livani and C. Yaman, "A fault classification and localization method for three-terminal circuits using machine learning," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 4, pp. 2282-2290, 2013.
- [9] A. Ahmadimanesh and S. M. Shahrtash, "Transient-based fault location method for multi-terminal lines employing S-transform," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 3, 2013.
- [10] A. Ahmadimanesh and S. M. Shahrtash, "Time-time-transform-based fault location algorithm for three-terminal transmission lines," Generation, Transmission & Distribution, IET, vol. 7, no. 5, pp. 464-473, 2013.
- [11] R. Aguilar, F. Perez and E. Orduna, "High speed transmission line protection using principal component analysis, a deterministic algorithm," Generation, Transmission & Distribution, IET, vol. 5, no. 7, pp. 712-719, 2011.
- [12] T. Yonghong, Z. Wei, H. Zhen, L. Minzhong and P. Wei, "study on the effect of current transformer and its secondary cable to traveling wave propagation characteristic of electric power lines," International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Application, pp. 1495-1498, 2012.
- [13] H. M. Teager and S. M. Teager, "Evidence for non-linear sound production mechanisms in vocal tract, in speech production and modeling," ser. NATO Advanced Study Institute Series D, W. J. Hardcastle and A. Marchal, Eds. Boston, MA: Kluwer, , vol. 55, pp. 17-29, Bonas, France. 1989.
- [14] J. F. Kaiser, "Some useful properties of teager's energy operator," In Proceedings ICASSP-93. vol. 3, pp. 149-152, 1993.

#### زیرنویس‌ها

- <sup>۱</sup> Principal Components
- <sup>۲</sup> Teager Energy Operator
- <sup>۳</sup> Current Transformer
- <sup>۴</sup> Capacitor Coupling Voltage Transformer
- <sup>۵</sup> Karen Bauer



شکل ۱۴: سیگنال جریان مؤلفه آلفا حاوی نویز



شکل ۱۵: خروجی TEO در شرایط وجود نویز

#### ۷- نتیجه

در این مقاله یک روش هوشمند برای دسته‌بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا ارائه شد. تمامی چالش‌هایی که در روش‌های حفاظتی بر پایه امواج سیار وجود دارد برای این الگوریتم مورد بررسی قرار گرفت و دیده شد که در تمامی شرایط نوع خطا و فاز یا فازهای تحت خطا به درستی شناسایی شده‌اند. استفاده از عملگر انرژی تیجر یکی از نقاط قوت این مقاله است چراکه این عملگر محاسبات کم و سرعت پاسخگویی زیادی داشته و نیز امواج سیار را با وضوح مناسبی در خروجی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که الگوریتم ارائه شده در این مقاله کاملاً جدید بوده و در واقع نخستین الگوریتم هوشمندی است که با استفاده از امواج سیار و با استفاده از اطلاعات فقط یک انتهای خط انتقال دسته‌بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا را انجام می‌دهد. استفاده از سیستم فازی در این مقاله کمک کرده است که عدم قطعیت‌های موجود در شبکه‌های واقعی هم توسط الگوریتم پیشنهادی پوشش داده شود و می‌توان گفت که این الگوریتم به‌خوبی قابلیت استفاده در شبکه‌های قدرت واقعی را دارد.

#### مراجع

- [1] X. N. Lin, M. Zhao and K. Alymann and, "Novel design of a fast phase selector using correlation analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1283-1290, 2005.
- [2] C. Aguilera, E. Orduna and G. Ratta, "Fault detection, classification and faulted phase selection approach based on high frequency voltage signals applied to a series-compensated line," Proceedings of Institute of Electrical