



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 11, No. 1, 2020
Research Paper

Current Only Directional Over-Current Relays Using Teager Energy Operator

Hadieh Sadat Hosseini¹, Amangaldi Koochaki¹, Seyed Hossein Hosseinian²

¹ Dept. of Electrical Engineering, Aliabad Katoul Branch, Islamic Azad University, Aliabad Katoul, Iran

h.hosseini@aliabadiu.ac.ir, koochaki@aliabadiu.ac.ir

² Dept. of Electrical Engineering, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran
hosseinian@aut.ac.ir

Abstract:

Directional overcurrent relays utilize the voltage phasor as a reference for determining the direction of the fault. This requires measuring both current and voltage and makes the directional overcurrent relays more costly than the non-directional type. In this paper, a new method for detection the fault occurrence and fault direction is proposed, that is based on Teager energy operator. Teager energy operator is a simple algorithm that is used to signal processing and extraction of instantaneous changes in amplitude and frequency of a signal. To this end, the proposed algorithm uses only three consecutive samples of measured current signal for detection of fault and its direction. This method does not require phasor estimation and complex calculations. In addition, the method is very fast. This Algorithm is implemented and verified for different types of fault and several conditions using Matlab/Simulink. The simulation results show that the proposed method is fast and has acceptable accuracy.

Keywords: Teager Energy Operator, Fault Detection, Fault Direction Detection, Directional Over Current Relays, Current-Only Directional Relays.



2252-083X/ © 2020 The Authors. Published by University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2019.117901.1254>

رله‌های اضافه جریان جهتی جریان تنها با استفاده از اپراتور انرژی تیجر

هادیه سادات حسینی^۱، امانگلدی کوچکی^۲، سید حسین حسینیان^۳

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی برق - واحد علی‌آباد کتول - دانشگاه آزاد اسلامی - علی‌آباد کتول -

ایران

h.hosseini@aliabadiu.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی برق - واحد علی‌آباد کتول - دانشگاه آزاد اسلامی - علی‌آباد کتول - ایران

koochaki@aliabadiu.ac.ir

۳- استاد، گروه مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - تهران - ایران

hosseinian@aut.ac.ir

چکیده: رله‌های اضافه جریان جهتی معمولاً از فازور ولتاژ به‌عنوان مرجعی برای تعیین جهت خطا استفاده می‌کنند که به اندازه‌گیری جریان و ولتاژ نیازمند است و موجب می‌شود از انواع غیرجهتی پرهزینه‌تر باشند. این مقاله، روشی جدید برای تشخیص وقوع خطا و تعیین جهت آن با استفاده از الگوریتم تیجر ارائه می‌کند. اپراتور انرژی تیجر، الگوریتم ساده‌ای برای تحلیل سیگنال است و برای استخراج تغییرات لحظه‌ای اندازه و فرکانس یک سیگنال استفاده می‌شود. برای این منظور، الگوریتم پیشنهادی تنها از سه نمونه متوالی سیگنال اندازه‌گیری‌شده جریان برای تشخیص و تعیین جهت خطا استفاده می‌کند. این روش به تخمین فازور و محاسبات پیچیده نیازمند نیست و سرعت زیادی دارد. این الگوریتم برای انواع مختلف خطا در نرم‌افزار Matlab/Simulink پیاده‌سازی و ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهند روش پیشنهادی از سرعت و دقت کافی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: اپراتور انرژی تیجر، تشخیص خطا، تعیین جهت خطا، رله‌های اضافه جریان جهتی، رله‌های جهتی جریان تنها.

۱- مقدمه

کوتاه‌ترین زمان ممکن آن را رفع کرد [۱]. این فرایند در شبکه‌های شعاعی تقریباً ساده است؛ چون جریان خطا فقط در یک جهت جاری می‌شود؛ اما در شبکه‌های تغذیه‌شده با چندین منبع، جهت خطا به محل خطا بستگی دارد و شامل خطاهای رو به جلو (Forward fault) و خطاهای پشت رله (Backward fault) است. همچنین، با افزایش استفاده از تولیدات پراکنده نیاز به استفاده از رله‌های جهتی روزبه‌روز در حال افزایش است [۲].

رله‌های اضافه جریان جهتی عموماً برای تعیین جهت خطا از یک فازور ولتاژ مرجع استفاده می‌کنند. در این نوع از رله‌های جهتی، جهت خطا با مقایسه فازور جریان و

خطا یکی از مهم‌ترین پدیده‌های گذرا و اجتناب‌ناپذیر است که در سیستم قدرت اتفاق می‌افتد و به تشخیص به‌موقع زمان و محل وقوع آن نیازمند است تا بتوان در

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰

نام نویسنده مسئول: امانگلدی کوچکی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - علی‌آباد کتول - دانشگاه آزاد اسلامی

واحد علی‌آباد کتول - گروه مهندسی برق

بخش از شبکه زیرزمینی ۳۳ کیلوولت در شهر کوالالامپور بررسی و تحلیل کرده‌اند و اثربخشی آن را نیز اثبات کردند. در دهه‌های اخیر، تبدیل موجک گسسته (DWT) برای الگوریتم‌های رله‌های دیجیتال استفاده شده است. این روش نتایج خوبی را نشان داده است؛ اما روش DWT مبتنی بر تخمین فازور در موارد زیادی بی‌دقت عمل می‌کند و قادر به حذف هارمونیک‌ها نیست [۱۱ و ۱۲]. بنابراین، گرایش به ارائه روش‌هایی است که در شرایط مختلف دقیق و سریع عمل کند و نواقص روش‌هایی مانند DWT و DFT را نداشته باشد. در مرجع [۱۳] الگوریتم حفاظتی مبتنی بر امواج سیار برای خطوط انتقال موزی ارائه شده است. در این الگوریتم، اپراتور انرژی تیجر در مؤلفه‌های مودال به کار گرفته شده است تا امواج سیار استخراج شوند. از سیستم‌های فازی برای طبقه‌بندی انواع خطا استفاده شده است. در مرجع [۱۴]، روشی برای تشخیص خطا با استفاده از اپراتورهای انرژی تیجر در ولتاژ توالی صفر لحظه‌ای و فازور جریان توالی منفی معرفی شده و نتایج پذیرفتنی از نظر سرعت و دقت در تشخیص خطا داشته است.

در این مقاله به منظور تشخیص و جهت‌یابی خطای فازهای در شرایط خطا در رله‌های اضافه جریان جهتی از اپراتور انرژی تیجر استفاده می‌شود که از نوآوری‌های این مقاله محسوب می‌شود. اپراتور انرژی تیجر روشی بسیار سریع و ساده است که مؤلفه‌های فرکانس بالای سیگنال ورودی را استخراج می‌کند. این روش، خروجی با وضوح بسیار بالا دارد که با تغییر فرکانس نمونه‌برداری کنترل می‌شود. در این صورت اگر خطا در نزدیک رله هم اتفاق بیفتد، امواج حاصل از آن به خوبی استخراج می‌شوند. این مورد در رله‌های اضافه جریان جهتی امری مهم تلقی می‌شود. در ادامه در بخش دوم، توضیحی از اپراتور انرژی تیجر ارائه می‌شود. سپس در بخش سوم، روش پیشنهادی به طور کامل بیان خواهد شد. در بخش چهارم و پنجم به ترتیب شبیه‌سازی و نتایج به دست آمده ارائه می‌شوند.

۲- اپراتور انرژی تیجر

اپراتور انرژی تیجر، یک الگوریتم ساده برای تحلیل سیگنال است و برای استخراج تغییرات لحظه‌ای اندازه و

فازور ولتاژ مرجع اندازه‌گیری شده تعیین می‌شود. این عمل به اندازه‌گیری ولتاژ و جریان نیازمند است که افزایش هزینه طرح حفاظتی را موجب می‌شود. به سبب اینکه در سیستم‌های توزیع، تمایل به شبکه‌های هوشمند وجود دارد، این نوع رله‌ها باید در تعداد زیاد به کار گرفته شوند و با افزایش هزینه سرمایه‌گذاری مقرون به صرفه نخواهد بود. همچنین در شرایطی که خطا نزدیک به رله باشد، این روش اطمینان‌ناپذیر می‌شود [۳].

با توجه به مطالب بیان شده، تمایل به استفاده از رله‌های اضافه جریان جهتی فقط با اندازه‌گیری جریان در شبکه‌های قدرت افزایش یافته است. در مرجع [۴]، Eissa و همکارانش روش جریان پلازیه شده را ارائه کرده‌اند که از سیگنال جریان پس از خطا و جهت انتقال توان پیش از خطا برای تشخیص جهت خطا استفاده می‌کند. در مقاله [۵]، دو الگوریتم برای استفاده در شبکه‌های ولتاژ متوسط با تولیدات پراکنده (DG) ارائه شده است. این الگوریتم‌ها براساس مؤلفه‌های متقارن جریان‌های سه فازند. در الگوریتم نخست، نسبت توالی صفر و منفی در فرکانس اصلی محاسبه شده و در الگوریتم دوم نسبت توالی صفر و مثبت در هارمونیک پنجم محاسبه شده است. با توجه به اینکه الگوریتم‌ها از توالی صفر استفاده می‌کنند، فقط خطاهای فاز به زمین تشخیص داده می‌شوند. Ukil و همکارانش، روش مبتنی بر شبکه عصبی را برای تشخیص جهت جریان فقط با اندازه‌گیری جریان در رله‌های اضافه جریان ارائه کرده‌اند [۶]. در مرجع [۷] روشی با استفاده از تغییر فاز جریان ارائه شده است. اختلاف زاویه فاز بین مؤلفه توالی مثبت جریان در حین خطا و پیش از خطا، شاخصی برای تشخیص جهت خطا در سیستم سه فاز معرفی شده است. در [۸] تکنیکی با استفاده از سیگنال جریان پس از خطا معرفی شده است. در این روش از سیگنال جریان پس از خطا، مجموع قدر مطلق سیگنال جریان و سیگنال جریان مرجع برای تشخیص جهت استفاده می‌شود. آقای نوجوان و همکارانش روشی را با استفاده از سیگنال جریان پیش از خطا به عنوان کمیت قطبی‌کننده ارائه کرده‌اند که به تخمین فاز نیازمند نیست [۹]. آقای Bakar و همکارانش در مرجع [۱۰] رله‌های اضافه جریان جهتی و رله‌های خطای زمین جهتی را برای یک

$$\Omega_i(n) = \arccos\left(1 - \frac{\psi_d[y_i(n)] + \psi_d[y_i(n+1)]}{4\psi_d[x_i(n)]}\right) \quad (۶)$$

$$A_i(n) = \sqrt{\frac{\psi_d[x_i(n)]}{1 - \left(1 - \frac{\psi_d[y_i(n)] + \psi_d[y_i(n+1)]}{4\psi_d[x_i(n)]}\right)^2}} \quad (۷)$$

به دلیل حجم محاسباتی کم، سرعت تولید خروجی در این روش زیاد است. هر نمونه از خروجی اپراتور انرژی تیجر با استفاده از سه نمونه از سیگنال ساخته می‌شود؛ بنابراین، وضوح بالایی دارد. در این مقاله از فرم گسسته TEO رابطه (۸) برای آنالیز نمونه‌های گسسته سیگنال‌های جریان استفاده می‌شود [۱۷-۱۹].

$$TEO(x(n)) = x^2(n) - x(n-1)x(n+1) \quad (۸)$$

۳- تشخیص وقوع خطا و جهت‌یابی آن با

استفاده از اپراتور انرژی تیجر

روش پیشنهادی از دو مرحله تشکیل می‌شود. در مرحله نخست این روش، تشخیص خطا با معرفی یک سیگنال و اپراتور انرژی تیجر صورت می‌گیرد. در مرحله دوم با استفاده از یک روش ریاضیاتی ساده جهت خطا تشخیص داده خواهد شد.

۳-۱- مرحله نخست: تشخیص خطا

در این مرحله ابتدا سیگنال مجموع مربعات جریان‌های فازهای خط مورد حفاظت با نام SSC، معرفی و سپس از اپراتور انرژی تیجر به منظور تشخیص تغییرات استفاده می‌شود. سیگنال مجموع مربعات جریان‌های سیستم با رابطه (۹) تعریف می‌شود:

$$SSC = i_A^2(t) + i_B^2(t) + i_C^2(t) \quad (۹)$$

در رابطه بالا i_A ، i_B و i_C جریان‌های اندازه‌گیری شده فازهای A، B و C در محل رله‌اند. سیگنال SSC در رابطه (۹) برای سیستم‌های متعادل در حالت عادی مقداری ثابت دارد و تغییراتی نخواهد داشت؛ اما هنگام وقوع خطا، این سیگنال دچار تغییرات ناگهانی خواهد شد. روش پیشنهادی بر همین مبنا خطا را تشخیص می‌دهد. فرض

فرکانس یک سیگنال استفاده می‌شود و مشخصه‌های سیگنال را به خوبی می‌تواند منعکس کند [۱۵]. در این روش سه نمونه متوالی از سیگنال اصلی محاسبه می‌شوند تا طرح کلی با وضوح زمانی عالی و ردیابی لحظه‌ای تغییرات شکل موج سیگنال اندازه‌گیری شده استخراج شود [۱۵]. شخصی به نام تیجر، اپراتور انرژی تیجر را پیشنهاد کرده است. سپس کیزر نشان داد با این اپراتور می‌توان انرژی یک سیگنال خاص داده شده را استخراج کرد [۱۳، ۱۶].

سیگنال قدرت به صورت مجموعه‌ای از اجزای اساسی فرکانس و دامنه سیگنال است [۱۳].

$$x(t) = \sum_i A_i(t) \cos(\omega_i(t)t + \varphi_i) \quad (۱)$$

در این رابطه A_i دامنه، ω_i فرکانس و φ_i فاز اولیه جزء نام سیگنال‌اند. فرم پیوسته TEO به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$\psi_c[x(t)] = \left[\frac{dx(t)}{dt}\right]^2 - x(t)\frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (۲)$$

در رابطه بالا $x(t)$ سیگنال ورودی و $\psi_c[x(t)]$ انرژی لحظه‌ای سیگنال $x(t)$ است. با استفاده از خروجی اپراتور تیجر، مؤلفه‌های سیگنال ورودی با روابط (۳) و (۴) بازیابی می‌شوند.

$$A_i(t) = \frac{\psi[x_i(t)]}{\sqrt{\psi_c\left[\frac{dx_i(t)}{dt}\right]}} \quad (۳)$$

$$\omega_i(t) = \sqrt{\frac{\psi_c\left[\frac{dx_i(t)}{dt}\right]}{\psi_c[x_i(t)]}} \quad (۴)$$

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

$$\psi_d[x(n)] = x^2(n) - x(n-1)x(n+1) \quad (۵)$$

اگر $y_i(n) = x_i(n) - x_i(n-1)$ باشد، در این صورت $\Omega_i(n)$ و $A_i(n)$ با استفاده از روابط (۶) و (۷) تعیین می‌شوند.

رله‌های اضافه جریان جهتی جریان تنها با استفاده از اپراتور انرژی تیجر

$$\begin{aligned} I_{mA} &= I_m \\ I_{mB} &= I_m + I_B \\ I_{mC} &= I_m + I_C \end{aligned} \quad (14)$$

I_C و I_B نشان‌دهنده میزان اختلاف جریان فازهای **B** و **C** از فاز **A** هستند. فرض می‌شود تغییرات فاز قابل اغماض باشد.

$$\begin{aligned} \varphi_A &= \varphi_B = \varphi_C = \varphi \\ \omega t + \varphi &= \theta \end{aligned} \quad (15)$$

با جایگذاری در رابطه (۹)، داریم:

$$\begin{aligned} SSC_{normal} &= I_m^2 \cos^2(\theta) + (I_m + I_B)^2 \cos^2(\theta - 120^\circ) \\ &\quad + (I_m + I_C)^2 \cos^2(\theta + 120^\circ) = \\ &= I_m^2 \cos^2(\theta) + I_m^2 \cos^2(\theta - 120^\circ) \\ &\quad + I_m^2 \cos^2(\theta + 120^\circ) + I_B^2 \cos^2(\theta - 120^\circ) \\ &\quad + I_C^2 \cos^2(\theta + 120^\circ) + 2I_m I_B \cos^2(\theta - 120^\circ) \\ &\quad + 2I_m I_C \cos^2(\theta + 120^\circ) = \\ &= I_m^2 [\cos^2(\theta) + \cos^2(\theta - 120^\circ) + \cos^2(\theta + 120^\circ)] + \\ &\quad (I_B^2 + 2I_m I_C) \cos^2(\theta - 120^\circ) + \\ &\quad (I_C^2 + 2I_m I_B) \cos^2(\theta + 120^\circ) = \\ &= I_m^2 \left[\frac{1 + \cos 2\theta}{2} + \frac{1 + \cos(2\theta - 240^\circ)}{2} \right] + \\ &\quad + \frac{1 + \cos(2\theta + 240^\circ)}{2} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} &= (I_B^2 + 2I_m I_B) \left[\frac{1 + \cos(2\theta - 240^\circ)}{2} \right] + \\ &= (I_C^2 + 2I_m I_C) \left[\frac{1 + \cos(2\theta + 240^\circ)}{2} \right] = \\ &= \frac{3}{2} I_m^2 + \frac{I'_{mB}}{2} + \frac{I'_{mC}}{2} + \\ &= \frac{I'_{mB}}{2} \cos(2\theta - 240^\circ) + \frac{I'_{mC}}{2} \cos(2\theta + 240^\circ) = \\ &= \frac{3}{2} I_m^2 + \frac{I'_{mB}}{2} [1 + \cos(2\theta - 240^\circ)] + \\ &= \frac{I'_{mC}}{2} [1 + \cos(2\theta + 240^\circ)] \end{aligned}$$

و درنهایت، رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$SSC_{normal} = \frac{3}{2} I_m^2 + M \quad (17)$$

می‌شود جریان‌های اندازه‌گیری شده در محل به صورت زیر باشند:

$$\begin{aligned} i_A(t) &= I_{mA} \cos(\omega t + \varphi_A) \\ i_B(t) &= I_{mB} \cos(\omega t + \varphi_B - 120^\circ) \\ i_C(t) &= I_{mC} \cos(\omega t + \varphi_C + 120^\circ) \end{aligned} \quad (10)$$

در رابطه بالا I_{mA} ، I_{mB} و I_{mC} مقادیر دامنه جریان‌های اندازه‌گیری شده و φ_A ، φ_B و φ_C مقادیر زاویه هرکدام از فازها هستند. در ادامه، دو حالت مختلف (عملکرد عادی سیستم و حالت خطا) بررسی می‌شود که ممکن است برای سیگنال SSC رخ دهد.

۳-۱-۱- عملکرد عادی سیستم

خطوط انتقال در حالت عملکرد عادی سیستم، متعادل و متقارن‌اند؛ در نتیجه، مقادیر دامنه و فاز معرفی شده در رابطه (۹) را می‌توان تقریباً برابر در نظر گرفت. برای ساده‌سازی فرض می‌کنیم:

$$\begin{aligned} I_{mA} &= I_{mB} = I_{mC} = I_m \\ \varphi_A &= \varphi_B = \varphi_C = \varphi \\ \omega t + \varphi &= \theta \end{aligned} \quad (11)$$

با فرضیات رابطه (۱۱)، سیگنال SSC به صورت رابطه (۱۲) ساده خواهد شد.

$$SSC_{normal} = I_m^2 \left[\frac{3}{2} + \frac{\cos(2\theta)}{2} + \frac{\cos(2\theta - 240^\circ)}{2} + \frac{\cos(2\theta + 240^\circ)}{2} \right] \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، مجموع ترم‌های دارای روابط مثلثاتی صفر است و در نتیجه، رابطه (۱۳) حاصل خواهد شد:

$$SSC_{normal} = \frac{3}{2} I_m^2 \quad (13)$$

رابطه بالا ثابت می‌کند سیگنال SSC در حالت عملکرد عادی سیستم مقدار ثابتی دارد.

در صورتی که شبکه کمی نامتعادلی داشته باشد، مقادیر زیر برای جریان رابطه (۱۰) در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} I'_{ma} = I'_m \\ I'_{mb} = I'_m \pm \varepsilon_0 I'_m \\ I'_{mc} = I'_m \pm \varepsilon_0 I'_m \\ \omega t + \varphi' = \theta' \end{cases} \quad (22)$$

در رابطه بالا، M بخش کسینوسی است و موجب اندکی تغییر خواهد شد که به دلیل طبیعت متقارن سیستم قدرت، در برابر بخش ثابت ناچیز است.

۳-۱-۲- وقوع خطا در سیستم

به طور کلی سیگنال جریان خطا از یک آفست DC و یک ترم کسینوسی به صورت رابطه زیر تشکیل شده است:

$$i(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + I'_m \cos(\omega t + \varphi') \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، I_0 و τ به ترتیب اندازه و ثابت زمانی آفست DC است. برای در نظر گرفتن حالت خطا و تأثیرات آن بر سیگنال SSC، فرض می شود یک خطای سه فاز متقارن در سیستم رخ دهد. این مطالعه برای تمامی حالات خطا می تواند بحث و بررسی شود؛ اما در اینجا تنها یک نوع خطا برای نمونه ارائه شده است. همچنین، فرض می شود مقدار ماکزیمم جریان خطا، زاویه فاز و اندازه و ثابت زمانی آفست DC در فازها یکسان باشد؛ در نتیجه، سیگنال SSC در این حالت به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} SSC_{fault} &= I'_m{}^2 \cos^2(\theta') + I'_m{}^2 \cos^2(\theta' - 120^\circ) \\ &+ I'_m{}^2 \cos^2(\theta' + 120^\circ) + 3I_0^2 e^{-\frac{2t}{\tau}} + 2I_0 I'_m e^{-\frac{t}{\tau}} \\ &[\cos(\theta') + \cos(\theta' - 120^\circ) + \cos(\theta' + 120^\circ)] \end{aligned} \quad (19)$$

در رابطه (۱۹) نیز مجموع ترم های مثلثاتی صفر خواهد شد و در نتیجه برای سیگنال SSC خواهیم داشت:

$$SSC_{fault} = \frac{3}{2} I'_m{}^2 + 3I_0^2 e^{-(2t/\tau)} \quad (20)$$

رابطه (۲۰) نشان می دهد سیگنال SSC در حالت وقوع خطا با زمان تغییر می کند. همچنین، مقدار ترم ثابت آن با مقدار ترم ثابت رابطه (۱۳) تفاوت زیادی دارد.

حال در صورتی که روابط بدون فرض یکسان بودن مقدار ماکزیمم جریان خطا و اندازه و ثابت زمانی آفست DC در فازها باشد، خواهیم داشت:

$$\begin{cases} i_a(t) = I_{0a} e^{-\frac{t}{\tau}} + I'_{ma} \cos(\omega t + \varphi') \\ i_b(t) = I_{0b} e^{-\frac{t}{\tau}} + I'_{mb} \cos(\omega t + \varphi' - 120^\circ) \\ i_c(t) = I_{0c} e^{-\frac{t}{\tau}} + I'_{mc} \cos(\omega t + \varphi' + 120^\circ) \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} SSC_{fault} &= I_{0a}^2 e^{-\frac{2t}{\tau}} + 2I_{0a} I'_{ma} \cos(\theta') + I'_{ma}{}^2 \cos^2(\theta') \\ &+ I_{0b}^2 e^{-\frac{2t}{\tau}} + (I'_{mb} + \varepsilon_0 I'_{mb})^2 \cos^2(\theta' - 120^\circ) \\ &+ 2I_{0b}^2 e^{-\frac{t}{\tau}} (I'_{mb} \pm \varepsilon_0 I'_{mb}) \cos(\theta' - 120^\circ) \\ &+ (I'_{mb} \pm \varepsilon_0 I'_{mb})^2 \cos^2(\theta' - 120^\circ) + I_{0c}^2 e^{-\frac{2t}{\tau}} \\ &+ 2I_{0c} e^{-\frac{t}{\tau}} (I'_{mc} \pm \varepsilon_0 I'_{mc}) \cos(\theta' + 120^\circ) \\ &+ (I'_{mc} \pm \varepsilon_0 I'_{mc})^2 \cos^2(\theta' + 120^\circ) = \\ &= [(I_{0a}^2 + I_{0b}^2 + I_{0c}^2) e^{-\frac{2t}{\tau}}] \\ &+ [(2I_{0a} I'_{ma}) + (2I_{0b} e^{-\frac{t}{\tau}}) (I'_{mb} \pm \varepsilon_0 I'_{mb}) + \\ &(2I_{0c} e^{-\frac{t}{\tau}}) (I'_{mc} \pm \varepsilon_0 I'_{mc})] \\ &[\cos(\theta') + \cos(\theta' - 120^\circ) + \cos(\theta' + 120^\circ)] + \\ &[(I'_{ma}{}^2) + (I'_{mb} \pm \varepsilon_0 I'_{mb})^2 + (I'_{mc} \pm \varepsilon_0 I'_{mc})^2] \\ &[\cos^2(\theta') + \cos^2(\theta' - 120^\circ) + \cos^2(\theta' + 120^\circ)] = \\ &= [(I_{0a}^2 + I_{0b}^2 + I_{0c}^2) e^{-\frac{2t}{\tau}}] + \\ &+ \frac{3}{2} [(I'_{ma}{}^2) + (I'_{mb} \pm \varepsilon_0 I'_{mb})^2 + (I'_{mc} \pm \varepsilon_0 I'_{mc})^2] \\ &= \frac{3}{2} I'_M{}^2 + 3I_0^2 e^{-(2t/\tau)} \end{aligned} \quad (23)$$

روابط (۲۳) نشان می دهند مقدار SSC در حالت خطا با مقدار آن در حالت عادی تفاوت زیادی دارد و در نتیجه در مقاله از این سیگنال برای مطالعات استفاده شده است. با اعمال اپراتور انرژی تیجر روی سیگنال SSC، داریم:

$$\begin{aligned} TEO(SSC(n)) &= \\ SSC^2(n) - SSC(n-1)SSC(n+1) \end{aligned} \quad (24)$$

مقدار این اپراتور در زمان عملکرد عادی سیستم بسیار ناچیز و نزدیک به صفر خواهد بود و هنگام وقوع هرگونه تغییرات، مقدار آن تغییر خواهد کرد. در این صورت، هر تغییری در سیستم شناسایی خواهد شد. برای تعیین یک منطق به منظور شناسایی هرگونه تغییرات در سیستم، شاخص پیشنهادی در رابطه (۲۵) ارائه می شود:

رله‌های اضافه جریان جهتی جریان تنها با استفاده از اپراتور انرژی تیجر

آنالیز) تشکیل می‌شود که در شکل (۲) نشان داده شده است. مقادیر تفاضل نمونه‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} D_1 &= N_{(A-max)} - N_M \\ D_2 &= N_{(A-min)} - N_M \end{aligned} \quad (25)$$

در پنجره آنالیز، مقادیر ماکزیمم و مینیمم به ترتیب نمونه‌های N_{A-max} و N_{A-min} هستند و مقادیر متناظر آنها در لحظه وقوع خطا برابر N_M است. از آنجا که مقدار N_{A-min} نقش مهمی در تعیین جهت دارد، برای مصونیت در برابر اثرات نویز، مقدار میانگین این عدد حول مقدار مینیمم استفاده می‌شود. شکل (۲)، نحوه تغییرات مقادیر N_{A-max} و N_{A-min} برای خطاهای رو به جلو و رو به عقب را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات مقادیر N_{A-max} و N_{A-min} نسبت به N_M برای خطاهای رو به جلو همواره مثبت بوده است؛ اما تغییر مقدار N_{A-min} نسبت به N_M در خطاهای رو به عقب، منفی است. شاخص پیشنهادی F برای تشخیص جهت خطا بر همین اساس ارائه می‌شود:

$$F = D_1 \times D_2 \quad (26)$$

بنابراین، جهت وقوع خطا براساس دو منطق زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{if } F > 0 &\Rightarrow \text{Forward Fault} \\ \text{if } F < 0 &\Rightarrow \text{Backward Fault} \end{aligned} \quad (27)$$

اگر این شاخص مثبت بود، خطا در جلوی رله رخ داده و در صورتی که این شاخص منفی بود، خطا در پشت رله به وقوع پیوسته است.

$$\begin{aligned} \text{FDC} &= |\text{TEO}(\text{SSC}(n))| > \text{TH} \\ &\rightarrow \text{Fault Detected} \end{aligned} \quad (25)$$

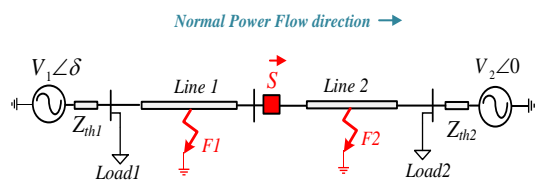
درواقع، شاخص پیشنهادی (FDC)، مقدار قدر مطلق رابطه عملگر TEO برای سیگنال SSC است که با مقدار آستانه (TH) مقایسه می‌شود و در صورت بیشتربودن، تغییرات شناسایی خواهند شد. در این مقاله مقدار آستانه در مرحله تشخیص خطا، حداقل مقدار ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است که این مقدار حداقل، برای اطمینان از دقت اندازه‌گیری است. تنظیم مقدار آستانه عملکرد رله به پارامترهای زیادی وابسته است؛ از جمله شرایط بهره‌برداری سیستم، مقاومت خطا و هماهنگی با رله‌های مجاور. این مقدار با توجه به شبیه‌سازی‌های متعدد در شرایط مختلف بهره‌برداری و خطاهای مختلف تعیین می‌شود و در بخش ۴-۱-۹ در خصوص نحوه تنظیم آن بحث شده است. همچنین، به منظور اطمینان از صحت تشخیص خطا، رله پس از چهار بار تشخیص خطای متوالی فعال خواهد شد. تعداد چهار بار متوالی با توجه به دقت و سرعت لازم تغییرپذیر است.

شکل (۱)، فلوچارت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. نخستین قدم، نمونه‌برداری از جریان‌های هر فاز در محل رله است. مرحله بعد، تشکیل سیگنال SSC با رابطه (۹) است. در قدم بعدی، اپراتور انرژی تیجر TEO با استفاده از رابطه (۲۴) بر سیگنال SSC پیاده‌سازی می‌شود. سپس شاخص FDC که در واقع قدر مطلق خروجی عملگر TEO است، با مقدار آستانه مقایسه می‌شود و در صورت بیشتربودن از آن، خطا شناسایی خواهد شد.

پس از تشخیص رخداد خطا، جهت خطا نسبت به موقعیت رله باید تعیین شود. سیگنال استفاده‌شده برای تعیین جهت خطا همان سیگنال SSC است که به کمک آن دو عدد برای محاسبه شاخص تشخیص جهت محاسبه می‌شود. این دو عدد اختلاف ماکزیمم و مینیمم سیگنال SSC، بعد از تشخیص خطا از کمیت متناظر آنها در لحظه وقوع خطا هستند. یک پنجره ۲ میلی‌ثانیه‌ای بعد از نمونه‌ای که خطا در آن شناسایی شده است، در رله ذخیره می‌شود. در واقع، یک پنجره از نقطه تشخیص خطا تا دو میلی‌ثانیه بعد از آن (پنجره

دو منبع معادل در دو طرف خطوط اند که با نمادهای V_1 و V_2 نمایش داده شده اند. همچنین، از نماد δ برای نشان دادن اختلاف زاویه بین دو منبع استفاده شده که در این شبیه سازی مقدار آن 10° درجه در نظر گرفته شده است. این مقدار تضمین کننده جهت عبور توان از منبع ۱ به سمت منبع ۲ است. برای شبیه سازی خطاهای پشت و جلوی رله به ترتیب خطای F1 و F2 شبیه سازی شده اند. رله در محل S قرار دارد.

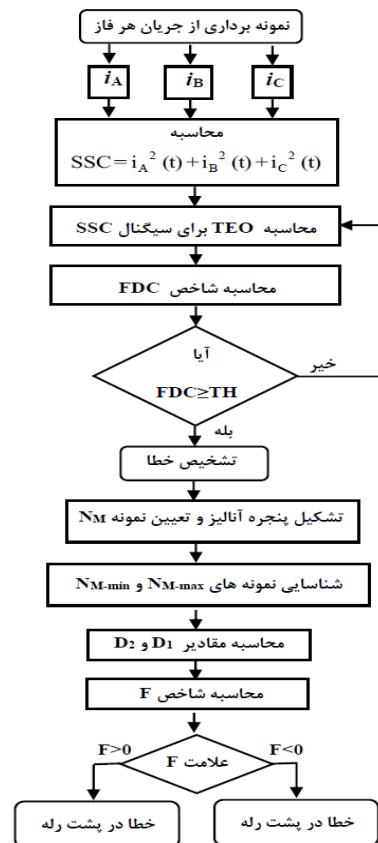
شرایط متعددی برای ارزیابی روش پیشنهادی شبیه سازی شده است که در آنها نوع خطا، مقاومت خطا، محل خطا، لحظه وقوع خطا، زاویه بین دو منبع، نویز و فرکانس نمونه برداری تغییر می کند.



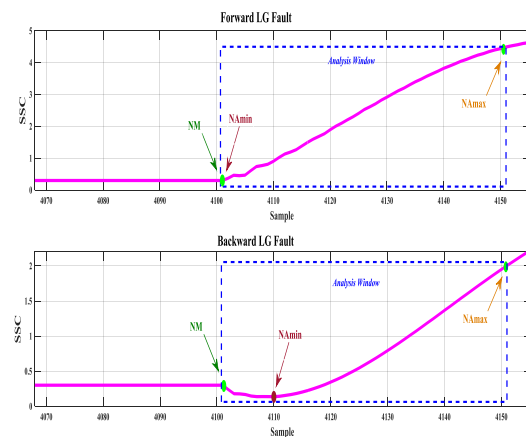
شکل (۳): شماتیک سیستم شبیه سازی اول

جدول (۱): اطلاعات سیستم شبیه سازی شده اول

اطلاعات	تجهیز
فرکانس: ۵۰ هرتز	منابع
ولتاژ فاز به فاز نامی: ۳۳ کیلوولت	
توان اتصال کوتاه نامی: ۱۰۰ مگاوات آمپر	
(مقاومت 1×10^{-6} اهم)	
زاویه ولتاژ منبع ۱: 10° درجه	
زاویه ولتاژ منبع ۲: 0° درجه	
طول هر دو خط: ۲۰ کیلومتر	
مقاومت توالی مثبت و صفر (به ترتیب):	
0.1136 و 0.0512 اهم بر کیلومتر	
اندوکتانس توالی مثبت و صفر (به ترتیب):	خطوط
$1/55 \times 10^{-3}$ و $2/39 \times 10^{-3}$ هانری بر کیلومتر	
خازن توالی مثبت و صفر (به ترتیب):	
$12/74 \times 10^{-9}$ و $7/75 \times 10^{-9}$ فاراد بر کیلومتر	
توان: ۵ مگاوات	بارها



شکل (۱): فلوجارت شناسایی جهت خطا



شکل (۲): نحوه تعیین D_1 و D_2

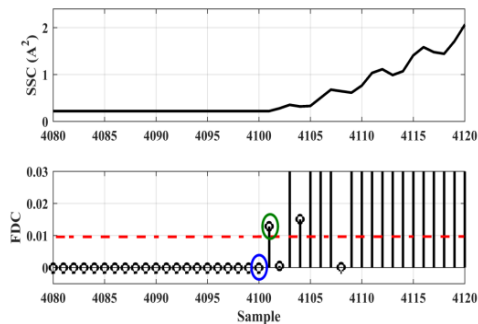
۴- شبیه سازی و نتایج

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، دو شبکه قدرت مختلف در نرم افزار Matlab/Simulink شبیه سازی شده اند. سیستم اول یک شبکه ساده متشکل از دو منبع توان و خطوط ارتباطی بین آنهاست. شکل (۳) نشان دهنده شماتیک سیستم است. در جدول ۱ اطلاعات سیستم ارائه شده است.

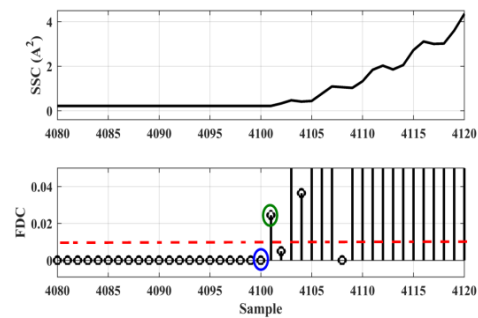
۴-۱-۱-۱-۴- ارزیابی تأثیر انواع مختلف خطا

چهار نوع خطا در خطوط سیستم قدرت، یعنی خطای تکفاز به زمین LG، دو فاز به زمین LLG، دو فاز به هم LL و سه فاز 3L در سیستم شبیه‌سازی شده‌اند. فرض می‌شود مقاومت خطا، ناچیز و لحظه وقوع خطا ثابت باشد و همچنین، خطا در وسط خط در جلو یا پشت رله رخ دهد.

برای تعیین عملکرد روش، چند نمونه شبیه‌سازی در شکل (۴) آورده شده است. چهار نوع خطای مختلف در خط انتقال شبیه‌سازی شده و سیگنال SSC و شاخص پیشنهادی تشخیص خطا یعنی FDC مرتبط برای هر چهار نوع خطا نمایش داده شده است. لحظه وقوع خطا نمونه ۴۱۰۰ بوده است. دایره آبی رنگ در نمودار FDC مشخص‌کننده نمونه‌ای است که خطا در آن رخ داده و دایره سبز رنگ، پنجره‌ای است که خطا تشخیص داده شده است. نمونه‌ها در این الگوریتم به اندازه یک دهم میلی‌ثانیه جابه‌جا می‌شوند. پس تفاوت شماره پنجره‌ای که خطا شناسایی شده و خطا رخ داده، مشخص‌کننده زمان تأخیر شناسایی خطا بوده است؛ برای مثال در خطای تکفاز، در نمونه ۴۱۰۰ خطا رخ داده و در نمونه ۴۱۰۳ خطا شناسایی شده است که میزان تأخیر روش پیشنهادی در این خطا ۰/۳ میلی‌ثانیه بوده است.



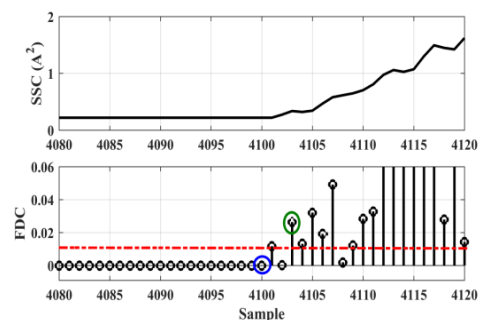
(ج)



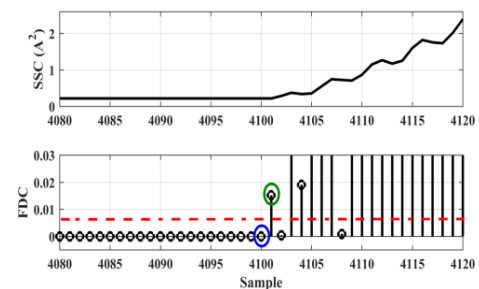
(د)

شکل (۴): تغییرات SSC و شاخص FDC برای انواع خطا در محل F2 (الف) خطای تکفاز به زمین، (ب) خطای دو فاز به زمین، (ج) خطای دو فاز به هم، (د) خطای سه فاز در شبکه مطالعه اول

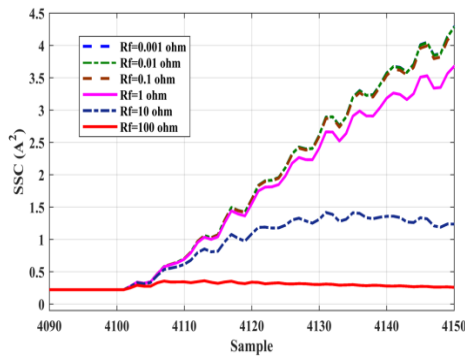
به منظور ارزیابی روش پیشنهادی در جهت یابی خطا، از داده‌های به دست آمده از سیستم مطالعه شده اول استفاده می‌شود. شکل ۵ نشان‌دهنده انواع مختلف خطا در شرایط ثابت (مقاومت خطا ۰/۱ اهم، خطا در ۵۰٪ خط و در نمونه ۴۱۱۰) در پشت و جلوی رله است. همان‌طور که دیده می‌شود، نوع خطا بر روند تغییرات سیگنال SSC تأثیر می‌گذارد و فقط در مقادیر N_{A-max} و N_{A-min} تفاوت ایجاد می‌کند و مقدار N_M ثابت است؛ در نتیجه، فقط مقدار شاخص الگوریتم F عوض خواهد شد؛ اما علامت آن تأثیر نخواهد پذیرفت و روش به درستی عمل می‌کند.



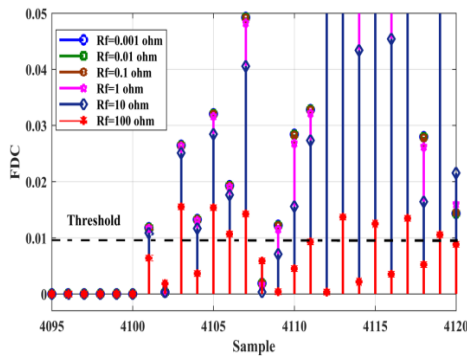
(الف)



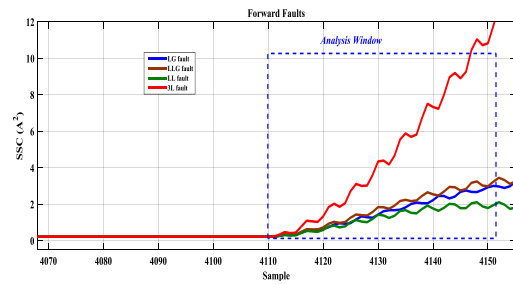
(ب)



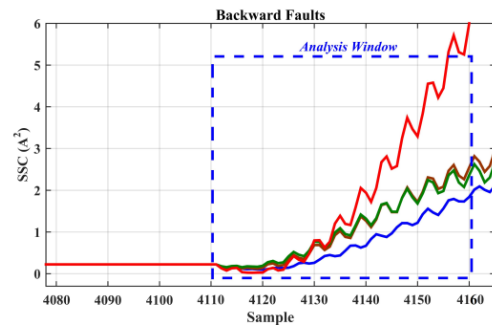
(الف)



(ب)



(الف)



(ب)

شکل (۵): سیگنال SSC برای خطاهای مختلف در حالت (الف) خطا جلو رله و (ب) خطا پشت رله

شکل (۶): ارزیابی تأثیر مقاومت خطا (الف) سیگنال SSC،

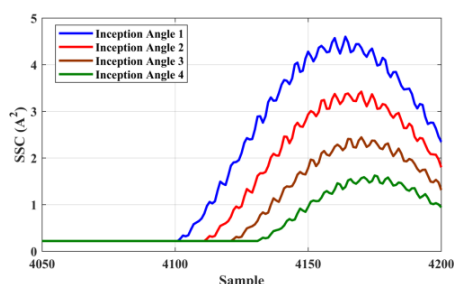
(ب) شاخص FDC

برخی از نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در جدول (۲) ارائه شده‌اند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، الگوریتم به درستی توانسته است جهت خطا را تشخیص دهد و حتی مقاومت‌های خطای بالا بر صحت عملکرد این الگوریتم تأثیری نداشته‌اند. در جداول، T_F نشان‌دهنده زمان رخداد خطا، R_F مقاومت خطا و L_F مکان رخداد خطا است. زاویه بین منابع ۱۰ درجه بوده و زمان خطا در نمونه ۴۱۱۰ است، مکان خطا در $F1$ و $F2$ بوده که به ترتیب به معنای جلو و پشت رله است، نوع خطا برای سه حالت تغییر یافته و مقاومت خطا از مقدار $0.1/0$ اهم تا مقدار 100 اهم متغیر بوده است. در نهایت، مقدار شاخص F ارائه شده در تمامی موارد خطای جلوی رله، مثبت بوده و در خطاهای پشت رله مقادیر آن منفی بوده است.

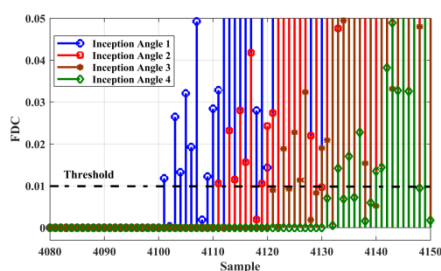
۴-۱-۲- ارزیابی تأثیر مقاومت خطا

انواع مختلف خطا با تغییر مقاومت شبیه‌سازی شده است. یکی از چالش‌های روش‌های تشخیص خطا، وقوع خطا با مقاومت بالا است که برای این منظور سیستم با مقاومت‌های بالا نیز شبیه‌سازی شده و روش پیشنهادی در آن ارزیابی شده است. شکل (۶) تغییرات سیگنال SSC شاخص FDC در خطای تک‌فاز به زمین با مقاومت‌های مختلف را نمایش می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در شکل (۶ الف)، با افزایش مقاومت خطا، مقدار سیگنال SSC در لحظات اولیه بعد از خطا کاهش یافته است. همچنین در شکل (۶ ب) دیده می‌شود فقط خطا با مقاومت 100 اهم که مقدار بالایی است، با اختلاف 0.6 میلی‌ثانیه شناسایی شده است و بقیه حالات بعد از 0.3 میلی‌ثانیه به سرعت تشخیص داده شده‌اند.

رله‌های اضافه جریان جهتی جریان تنها با استفاده از اپراتور انرژی تیزجر



(الف)



(ب)

شکل (۷): ارزیابی تأثیر زمان وقوع خطا برای خطای رو به

جلو (الف) سیگنال SSC، (ب) شاخص FDC

نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در لحظات مختلف رخداد خطا در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند زمان شروع خطا روی صحت الگوریتم پیشنهادی تأثیری ندارد. برای این ارزیابی تمامی موارد تأثیرگذار دیگر ثابت در نظر گرفته شده و فقط زمان خطا تغییر یافته است.

جدول (۳): ارزیابی روش پیشنهادی نسبت به تغییر زمان رخداد

خطا

نوع خطا	$\Delta\delta^0$	R_F [Ω]	L_F	T_F [sample number]	F [A ²]	جهت تشخیصی	
ABg	+۱۰	۱۰			+۰/۰۲۷۸		
					+۰/۰۲۳۹		
				F2	۴۱۴۰	+۰/۰۳۵۱	جلوی رله
					۴۱۶۰	+۰/۰۲۳۳	
					۴۱۸۰	+۰/۰۲۴۴	
					۴۱۰۰	-۰/۰۲۴۶	
					۴۱۲۰	-۰/۰۲۵۷	
				F1	۴۱۴۰	-۰/۰۱۹۵	پشت رله
					۴۱۶۰	-۰/۰۲۵۸	
					۴۱۸۰	-۰/۰۲۷۴	

جدول (۲): ارزیابی روش پیشنهادی برای تعیین جهت خطا در شرایط مختلف مقاومت خطا

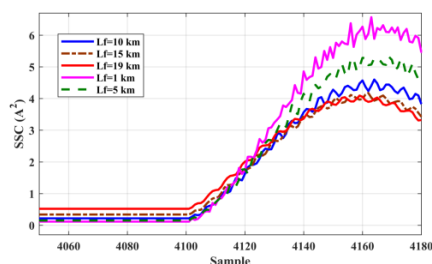
جهت تشخیصی	R_F [Ω]	F [A ²]	نوع خطا	L_F	
جلوی رله	۰/۱	+۰/۰۲۳۴	Ag	۱۰	
	۱۰۰	+۰/۰۱۶۹		۱۰۰	
	۰/۱	+۰/۰۱۳۶		۱۰۰	
	۰/۱	+۰/۰۲۰۷	ABg	۱۰	
	۱۰۰	+۰/۰۱۷۷		۱۰۰	
	۰/۱	+۰/۰۱۵۴		۱۰۰	
	پشت رله	۰/۱	+۰/۰۳۲۷	ABCg	۱۰
		۱۰۰	+۰/۰۲۷۱		۱۰۰
		۰/۱	+۰/۰۲۰۸		۱۰۰
		۰/۱	-۰/۰۲۷۱	Ag	۱۰
۱۰۰		-۰/۰۲۹۲	۱۰۰		
۰/۱		-۰/۰۳۲۷	۱۰۰		
پشت رله		۰/۱	-۰/۰۲۶۹	ABg	۱۰
		۱۰۰	-۰/۰۲۸۱		۱۰۰
		۰/۱	-۰/۰۳۰۳		۱۰۰
		۱۰۰	-۰/۰۲۸۶		۱۰۰
	۰/۱	-۰/۰۳۰۷	ABCg	۱۰	
	۱۰۰	-۰/۰۳۲۶		۱۰۰	

۳-۱-۴- ارزیابی تأثیر زمان وقوع خطا

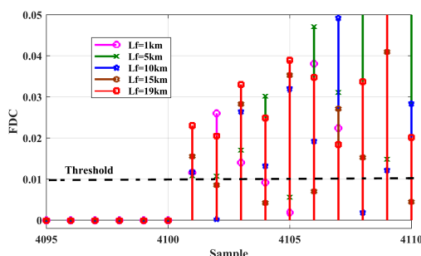
برای بررسی اثر زمان وقوع خطا، شرایط متفاوتی شبیه‌سازی شده که در تمامی حالات روش پیشنهادی حداکثر در ۰/۶ میلی‌ثانیه آن را شناسایی کرده است. شکل (۷) تغییرات سیگنال SSC و FDC برای خطای نمونه تکفاز به زمین با مقاومت ۰/۱ اهم در وسط خط انتقال در زمان‌های متفاوت را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود با تغییر زمان خطا، سیگنال SSC و خروجی FDC رفتار متفاوتی دارند؛ اما در تمامی حالات، خطا به سرعت تشخیص داده شده است. واضح است لحظه وقوع خطا در زمان شناسایی آن تأثیرگذار است.

۴-۱-۴- ارزیابی تأثیر مکان خطا

برای ارزیابی تأثیر مکان خطا در عملکرد روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی برای خطا در ۵٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۹۵٪ خط انتقال انجام شده است. شرایط چالش برانگیز، خطاهای نزدیک و دور از رله است. در شبیه‌سازی، خطا در ۵٪ خط انتقال، خطای نزدیک و خطا در ۹۵٪ خطای دور لحاظ می‌شود. شکل (۸) تغییرات سیگنال SSC و FDC را نشان می‌دهد. در تمامی این خطاها مقاومت خطا ۰/۰۱ اهم بوده است و زمان خطای نمونه ۴۱۰۰ در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود با افزایش فاصله خطا از رله، سیگنال SSC دچار تغییراتی می‌شود و شاخص FDC تغییر می‌یابد؛ اما روش پیشنهادی به‌درستی خطا و جهت آن را تشخیص داده است.



(الف)



(ب)

شکل (۸): ارزیابی روش پیشنهادی نسبت به تغییر مکان خطا (الف) سیگنال SSC، (ب) خروجی روش FDC

نتایج تعیین جهت خطا برای خطای نمونه ABG در جدول (۴) ارائه شده‌اند. در تمامی حالات روش پیشنهادی به‌درستی پاسخ داده است.

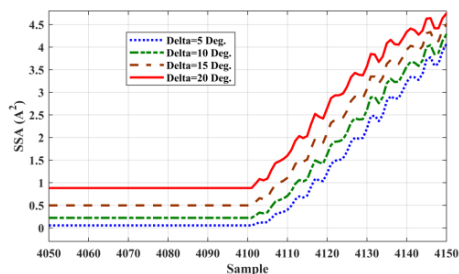
۴-۱-۵- ارزیابی تأثیر زاویه منابع

برای ارزیابی تأثیر زاویه منابع در عملکرد روش پیشنهادی، تغییر زاویه ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه شبیه‌سازی شده

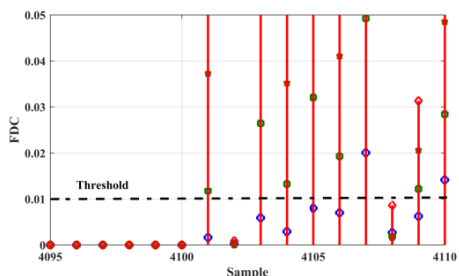
است. شکل (۹)، تغییرات SSC و شاخص FDC نسبت به تغییر زاویه منابع، در شرایط خطای تکفاز به زمین با مقاومت ۰/۰۱ اهم در ۵۰٪ خط انتقال و در نمونه ۴۱۰۰ را نشان می‌دهد. تغییر زاویه منابع تأثیر چندانی بر سیگنال SSC و شاخص FDC نداشته و روش پیشنهادی به سرعت خطا را شناسایی کرده است. شایان ذکر است در اختلاف زاویه ۵ درجه، زمان تشخیص به ۱ میلی‌ثانیه افزایش یافته است.

جدول (۴): ارزیابی روش پیشنهادی نسبت به تغییر مکان خطا

نوع خطا	$\Delta\delta^0$	R_F [Ω]	مکان خطا		جهت تشخیصی
			L_F (درصد از خط)	F [A ²]	
ABg	+۱۰	۱۰	۵	+۰/۰۵۲۷	جلوی رله
			F2	+۰/۰۳۸۲	
			۹۹	+۰/۰۱۲۱	پشت رله
			۵	-۰/۰۶۰۸	
			F1	-۰/۰۵۰۷	
			۹۹	-۰/۰۱۷۱	



(الف)



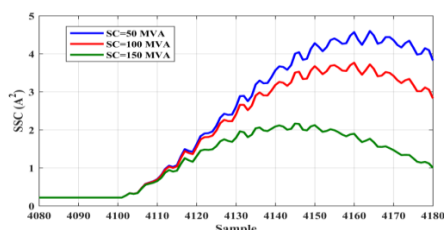
(ب)

شکل (۹): ارزیابی روش پیشنهادی نسبت به اختلاف زاویه منابع (الف) سیگنال SSC، (ب) خروجی روش FDC

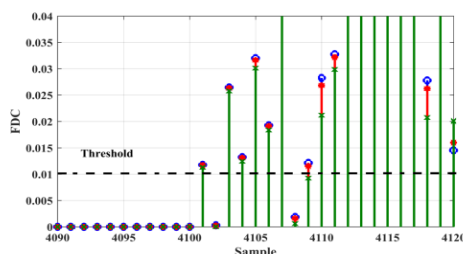
جدول (۵) نتایج به‌دست‌آمده در تعیین جهت خطا در اختلاف زاویه‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این جدول

رله‌های اضافه جریان جهتی جریان تنها با استفاده از اپراتور انرژی تیجر

نتایج ارزیابی روش پیشنهادی در تعیین جهت خطا در جدول (۶) ارائه شده‌اند. ابتدا سطح اتصال کوتاه هر دو منبع ۱۰۰ مگاوات آمپر بوده و در حالات بعد مقادیر تغییر کرده است. با توجه به اینکه روش پیشنهادی تنها به علامت شاخص پیشنهادی تکیه دارد، در تمامی حالات علامت شاخص به درستی جهت خطا را مشخص می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل (۱۰): ارزیابی روش پیشنهادی در سطح اتصال کوتاه مختلف (الف) سیگنال SSC، (ب) شاخص FDC

جدول (۶): ارزیابی روش پیشنهادی در تعیین جهت خطا نسبت به تغییر سطح اتصال کوتاه منابع

جهت تشخیصی	F [A ²]	سطح اتصال	
		کوتاه منبع ۱ (MVA)	کوتاه منبع ۲ (MVA)
F2 جلوی رله	+۰/۰۳۱۴	۱۰۰	۱۰۰
	+۰/۰۲۴۶	۵۰	۱۰۰
	+۰/۰۵۰۲	۱۰۰	۵۰
	+۰/۰۳۳۷	۱۵۰	۱۰۰
	+۰/۰۲۵۳	۱۰۰	۱۵۰
	+۰/۰۳۹۷	۵۰	۱۵۰
F1 پشت رله	+۰/۰۴۶۱	۱۵۰	۵۰
	-۰/۰۴۲۴	۱۰۰	۱۰۰
	-۰/۰۴۳۸	۵۰	۱۰۰
	-۰/۰۲۴۹	۱۰۰	۵۰
	-۰/۰۳۸۱	۱۵۰	۱۰۰

مقادیر مثبت $\Delta\delta$ نشان می‌دهند قبل از رخداد خطا، تأمین توان در جهت مثبت بوده است و حال آنکه مقادیر منفی مربوط به حالتی است که تأمین توان در جهت منفی بوده است. نتایج نشان می‌دهند عملکرد الگوریتم، تحت تأثیر جهت تأمین توان قرار نمی‌گیرد و همچنین، اندازه اختلاف فاز بین منابع بر صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی تأثیری نداشته است.

جدول (۵): ارزیابی روش پیشنهادی در شرایط تغییر زاویه منابع

جهت تشخیصی	F [A ²]	$\Delta\delta$	LF	R _F [Ω]	T _F [sample number]	نوع خطا
جلوی رله F2	+۰/۰۳۴۵	+۵				
	+۰/۰۴۲۸	+۱۰				
	+۰/۰۵۱۵	+۱۵				
	+۰/۰۴۱۱	+۲۰				
	+۰/۰۳۷۱	-۵				
	+۰/۰۲۷۶	-۱۰				
	+۰/۰۱۱۹	-۱۵				
	+۰/۰۲۹۴	-۲۰				
	-۰/۰۴۱۷	+۵				Ag
	-۰/۰۳۴۴	+۱۰				
پشت رله F1	-۰/۰۵۱۳	+۱۵				
	-۰/۰۳۳۷	+۲۰				
	-۰/۰۴۴۱	-۵				
	-۰/۰۲۳۹	-۱۰				
	-۰/۰۵۶۶	-۱۵				
	-۰/۰۳۲۷	-۲۰				

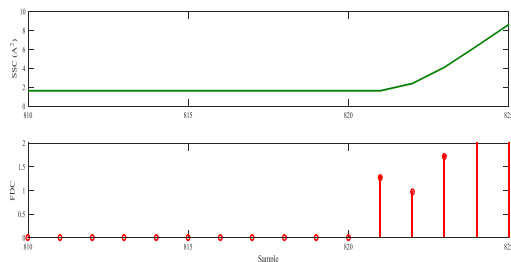
۴-۱-۶- ارزیابی تأثیر سطح اتصال کوتاه منابع

برای ارزیابی تأثیر سطح اتصال کوتاه، سه سطح اتصال کوتاه ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ مگاوات آمپر در نظر گرفته شده است. شکل (۱۰)، تغییرات SSC و شاخص FDC برای خطای تکفاز به زمین با مقاومت ۰/۰۱ اهم در ۵۰٪ خط انتقال و در نمونه ۴۱۰۰ را نشان می‌دهد. مشخص است تغییر سطح اتصال کوتاه منابع تأثیر چندانی بر سیگنال SSC و در نتیجه شاخص FDC نداشته و روش پیشنهادی به سرعت خطا را شناسایی کرده است.

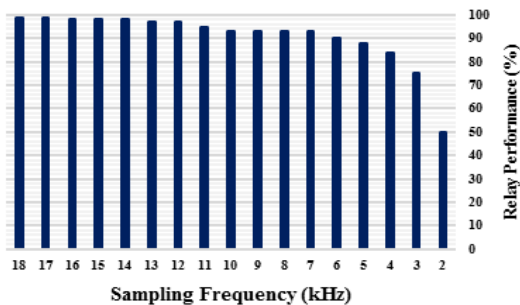
۴-۱-۸- ارزیابی تأثیر فرکانس نمونه برداری در عملکرد روش پیشنهادی

برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی در فرکانس‌های نمونه برداری مختلف، شبکه مطالعه شده در شکل (۳)، برای انواع خطاهای سه فاز، دو فاز به زمین و تکفاز به زمین با مقاومت‌های خطای ۰/۰۱، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ اهم در خطاهای رو به عقب و رو به جلو در وسط خطوط ۱ و ۲ شبیه‌سازی شده‌اند. فرکانس نمونه برداری در این مطالعه ۲ تا ۱۸ کیلوهرتز با پله‌های یک کیلوهرتز تغییر داده شد. در مجموع ۴۰۸ شبیه‌سازی برای این ارزیابی انجام شده است.

شکل (۱۲) نمونه‌ای از شبیه‌سازی در فرکانس نمونه برداری ۴ کیلوهرتز برای خطای تکفاز به زمین در محل F2 از خط ۲ با مقاومت ۰/۰۱ اهم را نشان می‌دهد. شکل (۱۳) دقت عملکرد روش پیشنهادی در فرکانس‌های نمونه برداری مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، دقت عملکرد رله در فرکانس نمونه برداری ۲ کیلوهرتز، حدود ۵۰٪ و در فرکانس ۶ کیلوهرتز حدود ۹۰٪ است و با افزایش فرکانس نمونه برداری دقت تا حدود ۹۸٪ افزایش می‌یابد.



شکل (۱۲): شبیه‌سازی انجام شده در فرکانس نمونه برداری ۴ کیلوهرتز



شکل (۱۳): دقت عملکرد روش پیشنهادی در فرکانس‌های نمونه برداری مختلف

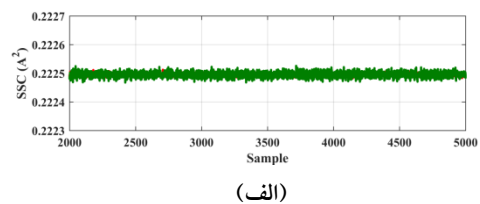
۱۰۰	۱۵۰	-۰/۰۲۵۹
۵۰	۱۵۰	-۰/۰۶۰۳
۱۵۰	۵۰	-۰/۰۵۱۹
۱۰۰	۱۰۰	-۰/۰۱۶۷

۴-۱-۷- ارزیابی تأثیر نویز

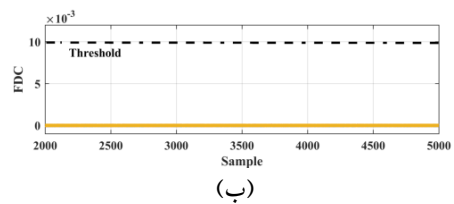
وجود نویز در شبکه قدرت انکارناپذیر است. برای بررسی اثر نویز نسبت سیگنال به نویز با رابطه ۲۸ بیان می‌شود:

$$SNR = 10 \log(P_s/P_n) \quad (28)$$

که SNR نشان دهنده نسبت سیگنال به نویز، P_s توان سیگنال مطلوب و P_n توان نویز است [۲۰]. میزان SNR شبیه‌سازی شده به ترتیب ۲۰، ۳۰ و ۴۰ دسی‌بل در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، شاخص FDC به دست آمده در اثر نویز بسیار ناچیز بوده و بر الگوریتم پیشنهادی تأثیری نداشته است. برای بالابردن قابلیت اطمینان روش پیشنهادی که براساس اپراتور انرژی تیجر است، از فیلتر Gabor می‌توان استفاده کرد [۲۱].



(الف)



(ب)

شکل (۱۱): ارزیابی روش پیشنهادی نسبت به نویز (الف) سیگنال SSC، (ب) شاخص FDC

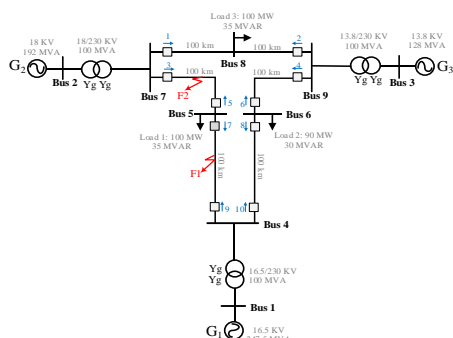
۴-۱-۹- تعیین مقدار آستانه TH

تعیین آستانه عملکرد به شبیه‌سازی در شرایط مختلف بهره‌برداری و انواع خطاهای ممکن در شبکه نیازمند است. مقدار آستانه عملکرد باید در معادله (۲۹) صدق کند.

$$FDC_{Max} \text{ in Normal} < TH < FDC_{Min} \text{ in Faults} \quad (29)$$

به این منظور، مطالعه‌ای برای انواع خطاها در مقاومت‌های مختلف در خط ۱ و ۲ در محل F2 و F1 انجام شده است. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مقادیر به دست آمده برای FDC در حالات مختلف خطا را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود مقدار TH می‌تواند عددی بین ۰/۱ تا ۰/۱۸ باشد که در اینجا حداقل مقدار ۰/۱ انتخاب شده است.

نیز مشابه سیستم اول و تأییدکننده درستی و دقت روش پیشنهادی است.



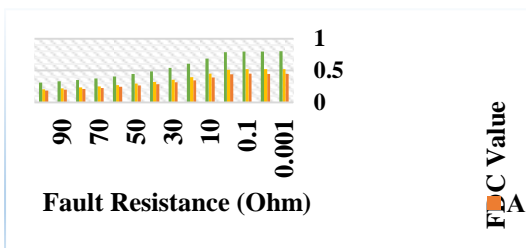
شکل (۱۶): شماتیک سیستم شبیه‌سازی دوم

عملکرد الگوریتم پیشنهادی در سیستم مطالعه‌شده دوم در جدول (۷) ارائه شده است. دقت عملکرد روش پیشنهادی در مطالعات مختلف به صورت درصد بیان شده است که تمامی نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم است.

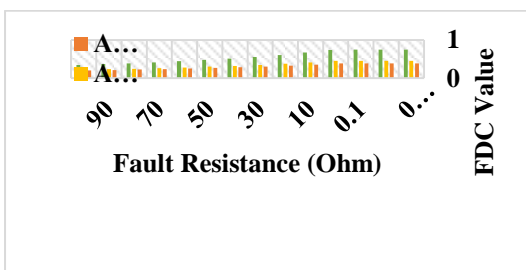
جدول (۷): ارزیابی دقت روش پیشنهادی در سیستم مطالعه دوم

عوامل	درصد عملکرد روش پیشنهادی
انواع خطا	۹۸،۵۶
مقاومت خطا	۹۸،۳۴
زاویه خطا	۹۸،۵۳
مکان خطا	۹۸،۳۲
زاویه منابع	۹۸،۵۳
سطح اتصال کوتاه	۹۸،۲۲
کلی	۹۸،۴۱

برای بررسی هماهنگی رله‌ها، در شبکه مورد مطالعه دوم یک خطای تکفاز به زمین با مقاومت ۱ اهم در محل F2 (انتهای خط باس ۵ به باس ۷) در نظر گرفته شده است. مقادیر FDC اندازه‌گیری شده با رله اصلی ۵ و رله پشتیبان ۹ در شکل (۱۷) نشان داده شده‌اند. مقادیر نشان می‌دهند با انتخاب مناسب TH، هماهنگی مناسبی بین رله‌های اصلی و پشتیبان می‌توان ایجاد کرد.



شکل (۱۴): مقادیر FDC برای خطاهای جلوی رله

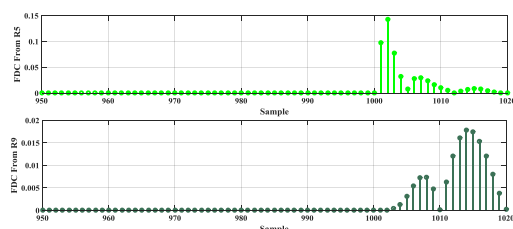


شکل (۱۵): مقادیر FDC برای خطاهای پشت رله

۴-۲- شبکه مطالعه‌شده دوم

شکل (۱۶) شماتیک سیستم ۹ با سه استاندارد IEEE را نشان می‌دهد. پارامترهای این شبکه در مرجع [۲۲] آورده شده‌اند. خط انتقال مطالعه‌شده، خط انتقال باس ۵ است. برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در این سیستم از بیش از ۲۰۰ داده استفاده شده است که از شرایط مختلف خطا به دست آمده‌اند. نتایج به دست آمده از سیستم مطالعه‌شده دوم

روش توالی جریان و مثبت خطا [۲۳] ولتاژ	بالای ۹۰٪	زیاد	۳۰۰ هرتز
روش هوش مصنوعی [۶] جریان	۸-۱۲ میلی ثانیه	زیاد	۲٫۵ کیلوهرتز
روش امواج سیار [۲۴] جریان	۸۲٪-	نسبتاً زیاد	۲۰۰ کیلوهرتز
روش پیشنهادی جریان	بالای ۹۰٪	کم	۶ کیلوهرتز
	۱ میلی ثانیه		



شکل (۱۷): بررسی هماهنگی رله ۵ و ۹

۳-۴- مقایسه با روش های پیشین

به منظور مقایسه روش پیشنهادی با روش های پیشین، تعدادی ویژگی در نظر گرفته شد که شامل سیگنال ورودی، دقت، حجم محاسباتی و نرخ نمونه برداری اند. جدول (۸) مقایسه کمی و کیفی بین روش های پیشین و روش پیشنهادی را نشان می دهد.

با توجه به مراجع موجود، روش جریان پلاریزه، حجم محاسبات بالایی دارد [۸]. روش توالی مثبت خطا به هر دو سیگنال جریان و ولتاژ نیاز داشته است و نیز حجم محاسبات بالایی دارد [۲۳]. روش های مبتنی بر هوش مصنوعی نیز به علت نیاز به تعداد داده های زیاد و تطابق ناپذیری به هنگام تغییرات شبکه، مورد اقبال صنعت نیستند. روش های مبتنی بر امواج سیار، به علت نیاز به دستگاه های اندازه گیری با نرخ نمونه برداری بسیار بالا، چندان قابلیت پیاده سازی نخواهند داشت [۲۴]. با توجه به موارد مذکور، روش پیشنهادی فقط از سیگنال جریان استفاده می کند و حجم محاسبات پایینی دارد؛ بنابراین، گزینه مناسبی برای جایگزینی آنها است. تنها عیب روش پیشنهادی شاید نرخ نمونه برداری آن باشد که مطابق شکل (۱۳)، بسته به دقت مورد انتظار تغییر می کند و در مقایسه با روش های مبتنی بر هوش مصنوعی و امواج سیار مقایسه می شود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص و جهت یابی خطا ارائه شد. الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر اپراتور انرژی تینجر و فقط با استفاده از اندازه گیری جریان در رله های اضافه جریان جهتی است. روش پیشنهادی برای شبکه های مختلف پیاده سازی شد. عملکرد روش پیشنهادی در شرایط مختلف مقاومت خطا، زمان وقوع خطا، مکان خطا، زاویه منابع، سطح اتصال کوتاه منابع و وجود نویز در سیگنال های اندازه گیری، ارزیابی و در انتها با روش های پیشین مقایسه شد. نتایج شبیه سازی، سادگی، دقت و کاربردی بودن روش پیشنهادی در سیستم های قدرت را نشان داد.

مراجع

- [1] S.R. Samantaray, "Fast S-transform based distance relaying in transmission line", Electric Power Systems Research, Vol. 95, pp. 268-274, 2013.
- [2] A. Jalilian, M. Tarafdar Hagh and S. M. Hashemi, "An innovative directional relaying scheme based on postfault current", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 29, No. 6, 2014.
- [3] A. Ukil, B. Deck, V. H. Shah, "Current-only directional overcurrent relay", IEEE Sensors Journal, Vol. 11, No. 6, pp. 1403-1404, 2011.
- [4] M. M. Eissa, "Evaluation of a new current directional protection technique using field data", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 566-572, 2005.
- [5] M. Petit, X. Le Pivert, L. Garcia-Santander, "Directional relays without voltage sensors for distribution networks with distributed generation: use of symmetrical components", Electric Power Systems Research, Vol. 80, No. 10, pp. 1222-1228, 2010.
- [6] A. Ukil, A. R. Kamala, "Current only directional overcurrent protection for distribution automation using neural network", 10th IEEE Power Tech Conference, Grenoble, France, June 2013.

جدول (۸): مقایسه کمی و کیفی روش های مختلف

روش	سیگنال ورودی	دقت و سرعت	حجم محاسبات نمونه برداری	نرخ
روش جریان پلاریزه شده [۸]	جریان	بالای ۹۰٪	نسبتاً زیاد	۸۰۰ هرتز
		۸ میلی ثانیه		

- [16] W. Hao, S. Mirsaedi, S. Kang, X. Dong, D. Tzelepis, "A novel traveling wave based protection scheme for LCC-HVDC systems using Teager Energy Operator", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 99, pp. 474-480, 2018.
- [17] H. Xiao, J. Wei, H. Liu, Q. Li, Y. Shi, T. Zhang, "Identification method for power system low-frequency oscillations based on improved VMD and Teager-Kaiser energy operator", *IET Generation Transmission & Distribution*, Vol. 11, No. 16, pp. 4096-4103, 2017.
- [18] E. Elhoussin, V. Choqueuse, Y. Amirat, M. Benbouzid, S. Turri, "An efficient Hilbert-Huang transform-based bearing faults detection in induction machines", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 32, No. 2, pp. 401-413, 2017.
- [19] S. Subasi, A. Abdulhamit, S. Yilmaz, K. Tufan, "Detection of generated and measured transient power quality events using Teager Energy Operator", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 4, pp. 1959-1967, 2011.
- [20] G. Ziegler, "Numerical distance protection: principles and applications", John Wiley & Sons, 2011.
- [21] E. Kvedalen, "Signal processing using the Teager Energy Operator and other nonlinear operators", *Cand. Scient Thesis, University of Oslo Department of Informatics*, 2003.
- [22] D. Asija, P. Choudekar, K. M. Soni, and S. K. Sinha., "Power flow study and contingency status of WSCC 9 Bus test system using MATLAB", *Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering, International Conference*, pp. 338-342, IEEE, 2015.
- [23] H. Gao and P.A. Crossley, "Design and evaluation of a directional algorithm for transmission line protection based on positive sequence fault components", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 153, No. 6, 2006.
- [24] A. Ngaopitakkul, S. Kaitwanidvilai, "A new directional relay algorithm for the protection of transmission network systems using discrete Wavelet transforms", *IEEE, IPEC*, pp. 980-983, 2010.
- [7] A. K. Pradhan, A. Routray, S. M. Gudipalli, "Fault direction estimation in radial distribution system using phase change in sequence current", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 22, No. 4, pp. 2065-2071, 2007.
- [8] M.M. Eissa, "Current directional protection technique based on polarizing current", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 44, No.1, pp. 488-494, 2013.
- [9] M. Nojavan, H. Seyedi, M. Mehdinejad, "A novel scheme for current-only directional overcurrent relay", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 82, pp. 252-263, 2016.
- [10] A.H.A. Bakar, H. Mokhlis, H.A. Illias, P.L. Chong, "The study of directional overcurrent relay and directional earth fault protection application for 33 kV underground cable system in Malaysia", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 40, pp. 113-119, 2012.
- [11] F. Jiang, Z.Q. Bo, Philip S.M. Chin, G. Weller, M.A. Redfern., "A wavelet transform based new directional relay using transient current signal", presented at the *Int. Conf. Power System Transients*, Budapest, June. 20 -24, 1999.
- [12] V.S. Kale, S.R. Bhide, P.P. Bedekar, "Comparison of wavelet transform and Fourier transform based methods of phasor estimation for numerical relaying", *Advances in Engineering Sciences*, Vol.1, No. 1, 2011.
- [13] S. Hasheminejad, S.Gh. Seifossadat, M. Razaz, M. Joorabian, "Traveling-wave-based protection of parallel transmission lines using Teager energy operator and fuzzy systems", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, No. 4, pp. 1067-1074, 2016.
- [14] J. Kumar, P. Jena, "Solution to Fault Detection During Power Swing Using Teager-Kaiser Energy Operator", *Arab J Sci Eng*, 42, pp. 5003-5013, 2017.
- [15] Sh. Yin, N. Hu, L. Chen, L. Hu, "Teager Energy Operator and its Application in the Study of Induction Motor Rotor Broken Bars Fault", *2015 Prognostics and System Health Management Conference-Beijing (2015 PHM-Beijing)*, 2015.