

تشخیص خطا در خطوط انتقال با استفاده از توان اکتیو لحظه‌ای سه‌فاز و میانگیری متحرک

محمد امین جراحی^۱، دانشجوی دکتری؛ حیدر صامت^۲، دانشیار؛ تیمور قنبری^۳، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه شیراز - شیراز - ایران - ma.jarrahi@shirazu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه شیراز - شیراز - ایران - samet@shirazu.ac.ir

۳- دانشکده فناوری‌های نوین - دانشگاه شیراز - شیراز - ایران - ghanbarih@shirazu.ac.ir

چکیده: در شرایط وقوع خطا در خطوط انتقال، الگوریتم‌های متداول حفاظتی ابتدا وقوع خطا را تشخیص داده سپس نوع آن را مشخص می‌کنند و در مرحله آخر مکان خطا تخمین زده می‌شود. شناسایی هرچه سریع‌تر خطا کمک می‌کند تا اقدامات بعدی سریع‌تر صورت گیرد. در این مقاله روشی جدید برای تشخیص خطا در خطوط انتقال با استفاده از توان اکتیو لحظه‌ای سه‌فاز و میانگیری متحرک ارائه شده است. سیگنال توان لحظه‌ای سه‌فاز از مجموع توان‌های لحظه‌ای هر فاز به دست می‌آید. این سیگنال در شرایط عملکرد عادی شبکه مقدار ثابتی دارد اما به‌هنگام وقوع خطا، تغییرات قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. این تغییرات با استفاده از میانگیری متحرک شناسایی می‌گردد. روش تشخیص خطای پیشنهادی در پنج سیستم مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته که نتایج نشان‌دهنده سرعت بالا و دقت کافی روش است. کارایی روش پیشنهادی با هفت روش مشابه دیگر مقایسه گردیده و نقاط قوت و ضعف هر کدام مشخص شده است.

واژه‌های کلیدی: تشخیص خطا، رله دیستانس، توان اکتیو لحظه‌ای سه‌فاز، خط انتقال

Fault Detection in Transmission Lines Using Three-Phase Instantaneous Active Power and Moving Average

M. A. Jarrahi¹, Ph.D Student; H. Samet², Associate Professor; T. Ghanbari³, Associate Professor

1- School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: ma.jarrahi@shirazu.ac.ir

2- School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: samet@shirazu.ac.ir

3- School of Advanced Technologies, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: ghanbarih@shirazu.ac.ir

Abstract: When a fault occurs in transmission line, first it should be detected, then the type of the fault should be recognized and in final step, location of the fault should be estimated. Fault detection as fast as possible helps to do the whole procedure faster. In this paper, a novel method for transmission line fault detection based on three-phase instantaneous active power and moving average technique is proposed. Three-phase instantaneous active power signal is the total of instantaneous active power for each phase. This signal is constant during normal operation of the network but in fault situation, some changes will happen and by utilization of moving average concept, the fault can be detected. The proposed fault detection method is evaluated in five different systems and the results denote the high accuracy and quickness of the proposed approach. For validation of the suggested method, a comparison is carried out with seven similar previous methods.

Keywords: "Fault Detection, distance relay, three phase instantaneous active power, transmission line."

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۵ و ۱۳۹۶/۰۵/۱۹

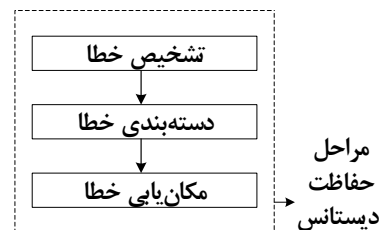
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۶

نام نویسنده مسئول: حیدر صامت

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - خیابان زند - دانشگاه شیراز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

خط انتقال یکی از مهم‌ترین تجهیزات سیستم قدرت است و حفاظت آن از دیدگاه حفظ پایداری سیستم و جلوگیری از آسیب دیدن تجهیزات در اثر عبور جریان اتصال کوتاه دارای اهمیت بسیار زیادی است. با توجه به فاصله زیاد بین ترمینال‌های ابتدا و انتهای خط، حفاظت خط انتقال یکی از پیچیده‌ترین حفاظت‌های سیستم قدرت است. حفاظت خط انتقال به طرق مختلف صورت می‌گیرد که مهم‌ترین آن حفاظت دیستانس است [۱]. در خطوط انتقال، این نوع حفاظت دارای سه مرحله عمده است که عبارتند از: تشخیص، دسته‌بندی و مکان‌یابی خطا [۲]. ترتیب اجرای مراحل مذکور در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. ترتیب مراحل حفاظت دیستانس خطوط انتقال [۲]

در مرحله تشخیص خطا، خطا شناسایی شده و اطلاعات مورد نیاز برای مراحل بعدی در دسترس قرار می‌گیرد تا اقدامات بعدی به درستی صورت گیرد.

دسته‌بندی خطا به معنای شناسایی فاز دارای خطا و اینکه کدام یک از خطاها از جمله خطای تک‌فاز، دوفاز به هم، دو فاز به زمین یا سه فاز رخ داده است، است.

مکان‌یابی خطا فاصله خطا را از محل رله تعیین می‌کند. شناسایی هرچه سریع‌تر خطا باعث می‌شود که مراحل بعد سریع‌تر آغاز شده و روند حفاظت دیستانس زودتر انجام پذیرد. مرحله دسته‌بندی خطا نیز باید با دقت و سرعت صورت پذیرد. چرا که اطلاعات به دست آمده از این مرحله برای مکان‌یابی نیز استفاده می‌شود.

تشخیص خطا در خطوط انتقال به علت وابستگی زیاد روش‌های دسته‌بندی خطا به آن‌ها اهمیت دوچندان پیدا کرده است. این موضوع باعث شده است که تحقیقات زیادی در این زمینه انجام پذیرد و الگوریتم مختلفی برای انجام این کار مطرح گردد. همچنین پیشرفت سیستم‌های مانیتورینگ در شبکه‌های قدرت، تعدد روش‌های پردازش سیگنال و گسترش کاربرد روش‌های هوشمند از دیگر عوامل مطرح شدن روش‌های مختلف برای تشخیص خطا در خطوط انتقال است.

هنگامی که در سیستم قدرت خطایی رخ می‌دهد، معمولاً تغییرات قابل ملاحظه‌ای در کمیت‌های مختلفی همچون: جریان، ولتاژ، توان، ضریب توان، امپدانس و فرکانس رخ می‌دهد. بسیاری از روش‌های موجود با مقایسه تغییرات این مقادیر و با مقادیر آستانه از پیش تعیین شده، خطا را شناسایی می‌کنند.

از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های استفاده شده در این زمینه، تبدیل موجک گسسته است که به علت ویژگی‌های بارز آن مبنای خیلی از روش‌های ارائه شده در سالهای اخیر بوده است [۳-۵]. در مقاله [۴]، به جریان تفاضلی (تفاضل هر نمونه جریان در هر لحظه از نمونه متناظر در یک سیکل قبل آن) تبدیل موجک گسسته اعمال شده و جمع تمام جزییات را به عنوان مقدار آستانه در نظر گرفته شده است. سپس با مقایسه این مقدار با جمع جزییات تبدیل موجک گسسته خود سیگنال جریان، خطا در خط تک مداره و دو مداره تشخیص داده شده است. در مرجع [۵] نیز از ترکیب تبدیل موجک گسسته و شبکه عصبی برای تشخیص و دسته‌بندی خطا در خطوط انتقال استفاده شده است. روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک به علت پیچیدگی محاسبات و تأثیرپذیری از نویز موجود در سیگنال‌های اندازه‌گیری شده، همراه با معایبی می‌باشند. در نتیجه نیاز است روش‌های ساده‌تر و در حین حال کارآمدتر جایگزین آن‌ها پیشنهاد شوند.

تبدیل فوری نیز از الگوریتم‌های مورد استفاده در تشخیص خطا است. تبدیل فوری‌های اصلاح شده‌ای همانند تبدیل فوری سریع، تبدیل فوری گسسته و تبدیل فوری زمان کوتاه بیشتر در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تبدیل‌های ذکر شده همراه با شبکه عصبی [۶]، ماشین بردار پشتیبان [۷] و منطق فازی [۸] برای تشخیص خطا نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های مبتنی بر تبدیل فوری نیز مشکلاتی مانند روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک به همراه دارند.

استفاده مستقیم از سیگنال جریان همراه با عملیات ریاضی بر روی خود سیگنال‌ها از دیگر روش‌های تشخیص خطا است [۹-۱۱]. در [۹]، با استفاده از بیشینه جریان‌های هر سه فاز در نیم سیکل بعد از وقوع خطا مشخصه‌هایی تعریف شده است و با تعریف این مقادیر در منطق فازی، خطا شناسایی شده است. در مراجع [۱۰، ۱۱] نیز با استفاده از تعاریف مختلف ضریب همبستگی برای داده‌های سیگنال جریان، خطا تشخیص داده شده و دسته‌بندی شده است. این روش‌ها در شرایط مختلف کارایی مناسبی نداشته و نمی‌توانند با دقت بالا به شناسایی خطا در خطوط انتقال بپردازند.

به کارگیری امواج سیار در تشخیص خطا در خطوط انتقال نیز در ساله‌ای اخیر مدنظر بوده است. در [۱۲]، با بهره‌گیری از این امواج و با کمک تبدیل مودال، منطق فازی و عملگر انرژی تیجر، خطا و نوع آن شناسایی شده است. همچنین در [۱۳]، از ریخت‌شناسی ریاضی برای تشخیص خطا در امواج سیار جریان استفاده شده است. این روش‌ها به علت نیاز به استفاده از سیستم‌های اندازه‌گیری با فرکانس نمونه‌برداری بسیار بالا به طور وسیع قابل استفاده نخواهند بود.

استفاده از توان راکتیو [۱۴] و توان اکتیو [۱۵] به علت سادگی و آسانی پیاده‌سازی در رله‌های دیستانس دیجیتال در مراجع اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. البته لازم است داده‌های جریان و ولتاژ به صورت هم‌زمان در دسترس باشند تا بتوان از آن‌ها برای تعاریف توان اکتیو و راکتیو استفاده نمود.

در مکان رله و کمیت‌های p_A ، p_B و p_C مشخص‌کننده توان لحظه‌ای برای به‌ترتیب فازهای A، B و C است.

بعد از مشخص شدن توان لحظه‌ای هر سه فاز، مجموع این سه مقدار که مشخص‌کننده توان لحظه‌ای سه‌فاز است، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p_{3\phi}(t) = p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) \quad (2)$$

کمیت $p_{3\phi}$ در رابطه ۲ برای سیستم‌های متعادل در حالت عادی مقداری ثابت داشته و تغییراتی نخواهد داشت. به‌هنگام وقوع خطا، مقدار $p_{3\phi}$ دچار تغییراتی ناگهانی خواهد شد. روش پیشنهادی بر همین مبنا خطا را تشخیص می‌دهد. اساس این الگوریتم میان‌گیری متحرک یا لغزان برای کمیت $p_{3\phi}$ است.

میان‌گیری متحرک برای سیگنال نمونه گسسته $x(t)$ برای پنجره‌ای با طول T_0 به‌صورت زیر است:

$$MA_n = \frac{1}{T_0} \sum_{n=t-T_0}^t x_n(t) \quad (3)$$

در رابطه ۳ مقدار MA_n مشخص‌کننده میانگین سیگنال $x(t)$ در پنجره n ام است.

در الگوریتم پیشنهادی، بعد از محاسبه $p_{3\phi}$ ، پنجره‌ای ۱۰ میلی‌ثانیه‌ای برای پردازش سیگنال و میانگین‌گیری در نظر گرفته می‌شود. سپس این پنجره ۱۰ میلی‌ثانیه‌ای به‌صورت لغزان، به‌اندازه یک میلی‌ثانیه حرکت داده‌شده و برای پنجره جدید مقدار میانگین آن محاسبه خواهد شد. مطابق با تعریف میان‌گیری متحرک برای یک سیگنال گسسته، مشخصه‌ای به نام FDC به‌منظور شناسایی خطا تعریف می‌شود. این مشخصه نسبت میانگین یک پنجره‌ای ۱۰ میلی‌ثانیه‌ای از سیگنال $p_{3\phi}$ به میانگین پنجره قبلی خودش است:

$$FDC_n = \frac{MA_n}{MA_{n-1}} \quad (4)$$

در رابطه ۴، کمیت FDC واحدی ندارد و به‌صورت عددی است. کمیت FDC در حالت عادی عملکرد شبکه، مقداری بسیار نزدیک ۱ خواهد داشت و بعد از وقوع خطا در خط انتقال، این مقدار عددی غیر از ۱ خواهد بود که با مقایسه آن با مقدار آستانه از پیش تعیین‌شده، خطا در خط انتقال قابل شناسایی است.

$$FDC_n \geq TH_1 \rightarrow Fault \quad (5)$$

در رابطه ۵، کمیت TH_1 مشخص‌کننده مقدار آستانه است. این مقدار براساس شبیه‌سازی‌ها صورت گرفته و با بهره‌گیری از روش آستانه‌یابی اتسو انتخاب خواهد شد. روش اتسو یکی از شیوه‌های آستانه‌یابی کارآمد و در عین حال ساده است که اساس آن در مرجع [۱۶] ارائه

روش‌های قبل به‌علت وجود مواردی که ذیلاً به آن‌ها اشاره شده است، دارای برخی مشکلات بوده و در شرایطی به‌درستی عمل نخواهند کرد: پیچیدگی سیستم‌های قدرت امروزی، حضور منابع تولیدات پراکنده و اتصال آن‌ها به شبکه انتقال، کلیدزنی بارهای سنگین، تغییر دائم عوامل مؤثر بر تشخیص فاز دارای خطا از جمله: مقاومت خطا، زمان وقوع خطا، مکان خطا، زاویه منابع و تغییر امپدانس تونن آن‌ها و دلایل قبل باعث تغییر در شکل موج جریان و ولتاژ خطا در لحظات ابتدایی بعد از آن شده و روش‌های تشخیص خطا را به اشتباه خواهند انداخت. در نتیجه روش‌های جدیدی در این زمینه لازم است مطرح گردد تا بتوان بر مشکلات مذکور فائق آمد.

در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص خطا در خطوط انتقال براساس استفاده از سیگنال توان لحظه‌ای سه فاز و میانگین متحرک ارائه شده است. در این روش ابتدا سیگنال توان لحظه‌ای سه‌فاز با استفاده از جمع توان‌های لحظه‌ای هر فاز به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از مفهوم میانگین متحرک خطا تشخیص داده می‌شود. برای این کار، پنجره‌های ده میلی‌ثانیه‌ای از سیگنال توان لحظه‌ای سه‌فاز با در نظر گرفتن لغزش یک میلی‌ثانیه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش پیشنهادی تشخیص خطا در پنج سیستم مختلف (سیستم ۵ باسه، خط دومداره، سیستم ۹ باسه استاندارد IEEE، سیستم ۳۹ باسه استاندارد IEEE و داده‌های آزمایشگاهی) مورد آزمایش قرار گرفته است که نتایج نشان‌دهنده دقت و سرعت آن است. در واقع روش پیشنهادی شرایط چالش‌برانگیز تشخیص خطا در خطوط انتقال را به‌خوبی پوشش داده‌است.

در ادامه در بخش دوم مقاله روش پیشنهادی تشخیص خطا با استفاده از روابط ریاضی مربوطه ارائه شده است. در بخش سوم، سیستم‌های مورد مطالعه معرفی شده و در قسمت چهارم، نتایج پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در سیستم‌های معرفی شده ارائه گردیده و مورد بحث قرار گرفته‌اند. بخش پنجم به مقایسه کارایی روش پیشنهادی با چهار روش پیشین پرداخته و در قسمت ششم، نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

۲- روش پیشنهادی تشخیص خطا در خطوط انتقال

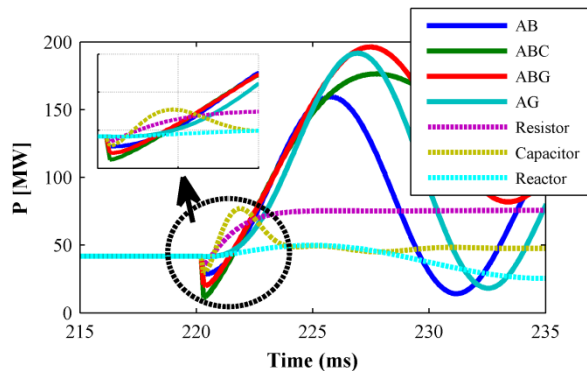
روش پیشنهادی تشخیص خطا از کمیت توان لحظه‌ای سه‌فاز استفاده می‌کند. برای معرفی روش پیشنهادی در ابتدا کمیت‌های توان لحظه‌ای برای هر فاز به‌صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\begin{aligned} p_A(t) &= v_A(t) \times i_A(t) \\ p_B(t) &= v_B(t) \times i_B(t) \\ p_C(t) &= v_C(t) \times i_C(t) \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه ۱ کمیت‌های روبرو مورد استفاده قرار گرفته است: کمیت‌های v_A ، v_B و v_C مشخص‌کننده ولتاژ سه‌فاز موجود در مکان رله، کمیت‌های i_A ، i_B و i_C مشخص‌کننده جریان سه‌فاز قابل‌دسترس

و تا مقاومت خطای ۱/۵ اهم در محل ۵ درصد در سیستم سوم، توانایی شناسایی خطا را دارد. با این حال برای ارتقای توانمندی روش در شناسایی این گونه خطاها لازم است از یک شاخص کمکی دیگر برای تشخیص خطا استفاده نمود. برای غلبه بر مشکل مذکور، ابتدا سیگنال زیر تعریف می‌شود:

$$v_{3\phi}(t) = v_A^2(t) + v_B^2(t) + v_C^2(t) \quad (6)$$



شکل ۳: تغییرات کمیت توان لحظه‌ای سه فاز در حالات مختلف خطا و کلیدزنی بار سنگین

کمیت $v_{3\phi}$ در رابطه ۶ برای سیستم‌های متقارن در حالت عادی مقداری ثابت داشته و تغییراتی ندارد. به هنگام وقوع خطا، مقدار $v_{3\phi}$ دچار تغییراتی ناگهانی خواهد شد که مبنای تعریف شاخص کمکی است. اساس این شاخص کمکی مانند شاخص معرفی شده FDC، میان‌گیری متحرک برای کمیت $v_{3\phi}$ در پنجره ۱۰ میلی‌ثانیه با گام حرکت ۱ میلی‌ثانیه است. مطابق با تعریف میان‌گیری متحرک، شاخص کمکی به نام VC به منظور شناسایی خطا در شرایط مذکور تعریف می‌شود:

$$VC_n = \frac{MA(v_{3\phi})_n}{MA(v_{3\phi})_{n-1}} \quad (7)$$

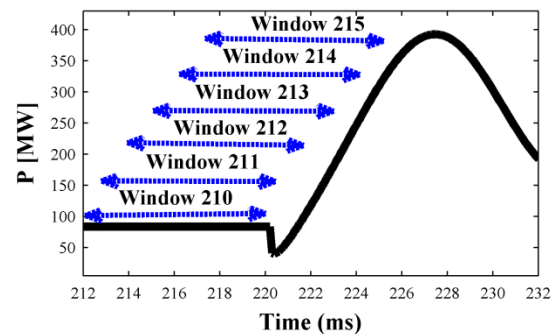
در رابطه ۷ کمیت VC واحدی ندارد و به صورت عددی است. کمیت VC در صورتی محاسبه می‌شود که شاخص FDC کمتر از ۰/۹۵ باشد. در این حالت روند محاسبه این کمیت آغاز می‌گردد. در حالت عادی، این شاخص مقداری بسیار نزدیک ۱ خواهد داشت و بعد از وقوع خطای نزدیک به رله با مقاومت صفر، این مقدار بسیار کم می‌شود که با مقایسه آن با مقدار آستانه از پیش تعیین شده، خطا نزدیک با مقاومت صفر در خط انتقال قابل شناسایی خواهد بود.

$$VC_n \leq TH_2 \rightarrow Fault \quad (8)$$

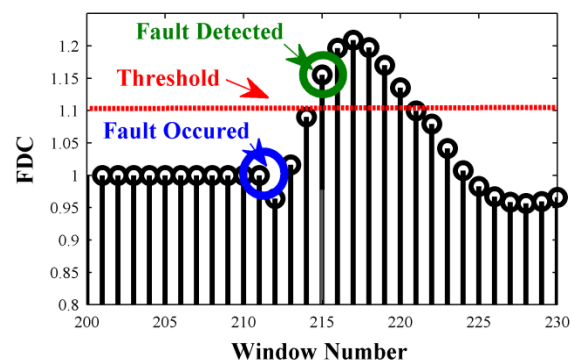
در رابطه ۸ کمیت TH_2 مشخص کننده مقدار آستانه‌ای است که برای شناسایی خطا در شرایط مذکور در نظر گرفته شده است. مقدار این آستانه نیز با بهره‌گیری از روش آستانه‌یابی اتسو [۱۶]، عدد ۰/۹ اختیار گردیده است. برای نمونه در شکل ۴ نتایج برای خطای سه فاز با مقاومت صفر نمایش داده شده است.

شده است. با توجه به شرایط شبکه و روش آستانه‌یابی اتسو، عدد ۱/۱ به عنوان مقدار آستانه انتخاب می‌شود.

شکل ۲ نشان دهنده تغییرات پنجره‌های تحت پردازش و کمیت FDC متناظر آن برای یک خطای تک فاز به زمین است.



(الف)



(ب)

شکل ۲: سیگنال‌های مد نظر در الگوریتم پیشنهادی
(الف) توان لحظه‌ای سه فاز و پنجره‌های تحت پردازش میانگین‌گیری متحرک

(ب) خروجی الگوریتم پیشنهادی FDC

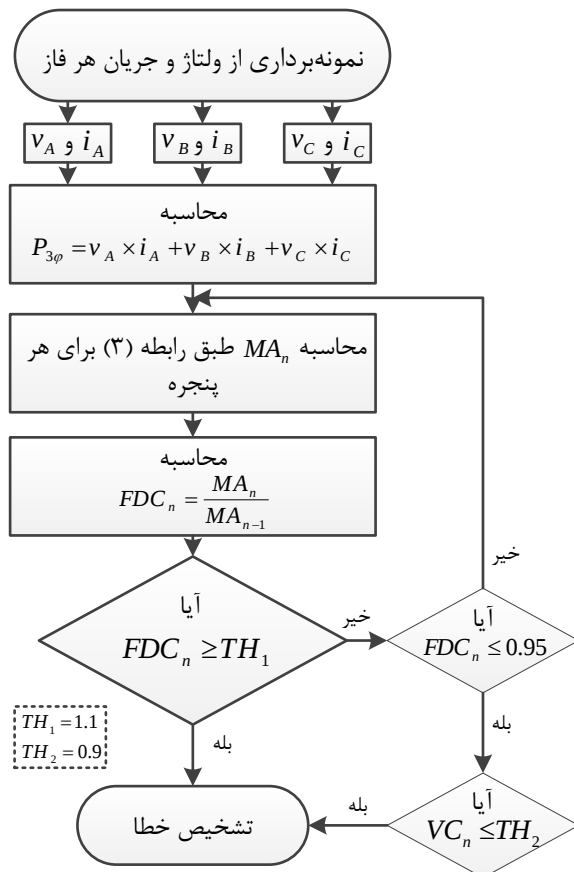
زمان تشخیص خطا این روش در حالت میانگین در حدود ۲/۷ میلی‌ثانیه بوده که در مقایسه با روش‌های مرسوم بسیار سریع‌تر است. همچنین این روش قادر به جداسازی دو حالت کلیدزنی بار سنگین و وقوع اتصال کوتاه در شبکه است. در حالی که دو حالت مذکور بسیار مشابه بوده و بسیاری از روش‌های مرسوم قادر به جداسازی این دو حالت از هم نمی‌باشند، الگوریتم پیشنهادی به علت ماهیت رفتار سیگنال $p_{3\phi}$ بعد از خطا و کلیدزنی، قادر به شناسایی خطا از کلیدزنی بار سنگین است. در شکل ۳، مقایسه‌ای بین رفتار سیگنال مذکور در حالت‌های مختلف خطا و کلیدزنی انواع بارها (خازنی، سلفی و مقاومتی) صورت پذیرفته است.

۲-۱- شاخص کمکی برای خطای نزدیک با مقاومت صفر

در شرایط وقوع خطا نزدیک به رله با مقاومت صفر، افت ولتاژ دریافتی توسط رله قابل ملاحظه است و ممکن است رله را به اشتباه بیندازد. روش پیشنهادی تا مقاومت خطای ۲/۵ اهم در محل ۵ درصد خط در سیستم اول، تا مقاومت خطای ۳ اهم در محل ۵ درصد در سیستم دوم

مدل‌سازی شده در شکل ۶ مشخص شده است. این سیستم دارای دو ژنراتور، چهار ترانسفورمر و دو بار متصل به باس‌های ۴ و ۵ است که مشخصات کامل این تجهیزات در ادامه آورده شده است:

✓ ژنراتورها: ولتاژ نامی خط به خط برابر ۲۰ کیلو ولت، توان اتصال کوتاه سه فاز برابر ۱۰۰۰ مگا ولت آمپر، فرکانس ۵۰ هرتز و نسبت X/R برابر ۱۰، زاویه فاز ولتاژهای ژنراتور ۱ و ۲ به ترتیب برابر صفر و ۱۰- درجه است.



شکل ۵: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

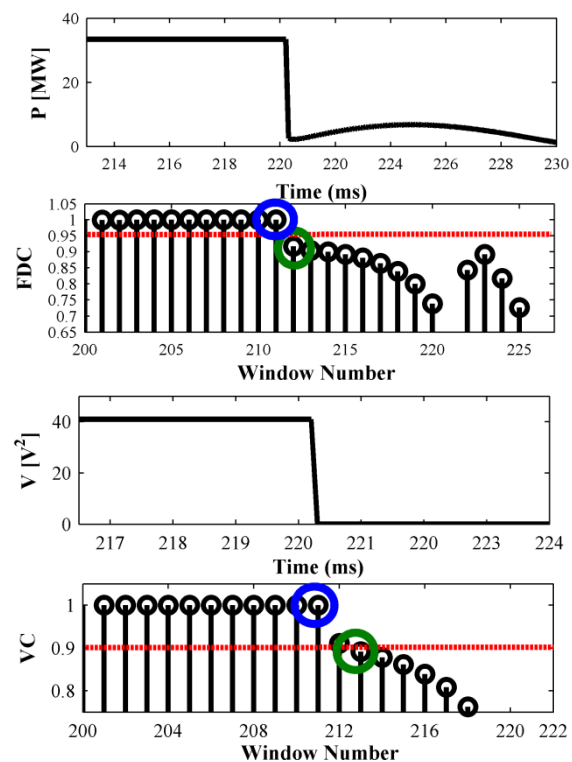
✓ ترانسفورمرها: با توان نامی ۶۰۰ مگا ولت آمپر، نسبت ولتاژ ۲۰/۲۳۰ کیلو ولت با اتصال مثلث-ستاره زمین شده، امپدانس اولیه و ثانویه برابر $0.106 + j0.3 \Omega$ و $0.397 + j12 \Omega$ و جریان مغناطیس‌کنندگی ناچیز

✓ خطوط: امپدانس همه خطوط برابر $0.15 \Omega / km$ و ظرفیت خازنی قابل صرف نظر، طول خطوط ۱-۲، ۲-۳، ۳-۴، ۴-۵ و ۵-۲ به ترتیب برابر ۵۰، ۳۵، ۶۰، ۲۰ و ۲۵ کیلومتر

✓ بارها: ولتاژ خط به خط نامی ۲۰ کیلو ولت، فرکانس ۵۰ هرتز، توان اکتیو و راکتیو بار ۱ برابر ۴۰۰ MW و ۱۰۰ MVar و توان اکتیو و راکتیو بار ۲ برابر ۱۰۰ MW و ۵۰ MVar

خط انتقال مورد بررسی در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، خط وصل‌کننده باس‌های ۱ و ۲ است. نمونه برداری از سیگنال‌های ولتاژ و جریان با استفاده از اندازه‌گیرهای نصب شده در ابتدای این خط با فرکانس نمونه برداری ۱۰ kHz صورت گرفته است. برای ارزیابی

فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص شده، اولین مرحله از روش پیشنهادی نمونه برداری از ولتاژ و جریان هر فاز است. در مرحله بعد کمیت $p_{3\phi}$ مطابق با رابطه ۲ محاسبه می‌گردد. مرحله سوم شامل محاسبه مقدار MA_n مطابق با رابطه ۳ است. در مرحله چهارم شاخص FDC محاسبه خواهد شد. در صورتی که این شاخص از مقدار آستانه ۱/۱ بیشتر بود، خطا در خط انتقال شناسایی می‌شود. شاخص کمکی VC نیز زمانی محاسبه می‌شود که شاخص FDC مقداری کمتر از ۰/۹۵ داشته باشد. در صورتی که مقدار این شاخص کمکی کمتر از ۰/۹ باشد، خطای نزدیک به محل رله با مقاومت صفر نیز تشخیص داده خواهد شد.



شکل ۴: سیگنال $p_{3\phi}$ ، FDC، $V_{3\phi}$ و VC برای خطای سه فاز نزدیک به رله با مقاومت ناچیز

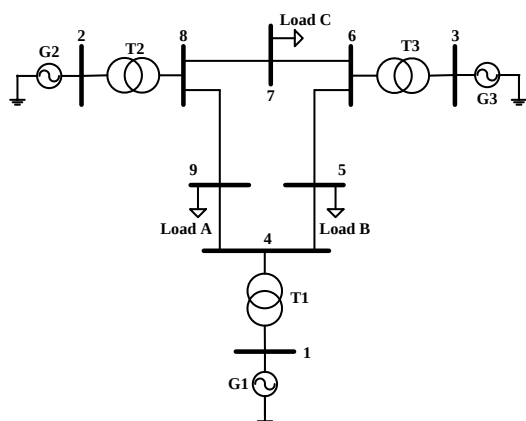
۳- سیستم‌های تحت مطالعه

در این قسمت پنج سیستم مختلف مورد استفاده برای ارزیابی روش معرفی می‌شوند. این سیستم‌ها عبارتند از: سیستم ۵ با سه نمونه، خط دومداره نمونه، سیستم ۹ با سه استاندارد IEEE، سیستم ۳۹ با سه استاندارد IEEE و داده‌های آزمایشگاهی. در ادامه اطلاعات تکمیلی هر سیستم آورده خواهند شد.

۳-۱- سیستم اول: سیستم ۵ با سه نمونه

سیستم ۵ با سه نمونه، سیستم معرفی شده در مرجع [۱۷] است. این سیستم در نرم‌افزار سیمولینک متلب (MATLAB/SIMULINK) شبیه‌سازی شده است. شماتیک دیاگرام تک‌خطی سیستم

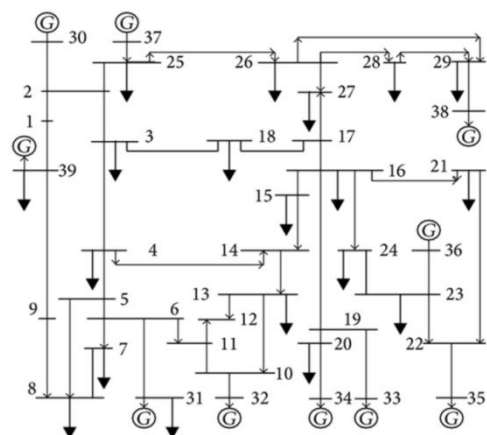
به باس‌ها با فرکانس ۶۰ هرتز است. ولتاژ سمت اولیه ترانسفورمرها ۱۸ کیلوولت و سمت ثانویه آن‌ها ۲۳۰ کیلوولت است. پارامترهای این شبکه در مرجع [۱۹] آورده شده است (شکل ۸). خط انتقال موردنظر در شبیه‌سازی‌ها، خط انتقال متصل‌کننده باس‌های ۷ و ۸ است. برای ارزیابی الگوریتم‌های پیشنهادی در این سیستم از بیش از ۲۰۰ داده که از شرایط مختلف خطا به‌دست‌آمده، استفاده خواهد شد. لازم‌به‌ذکر است که فرکانس نمونه‌برداری در این سیستم نیز برابر مقدار ۱۰ kHz در نظر گرفته شده است.



شکل ۸: سیستم ۹ باسه استاندارد IEEE [۱۹]

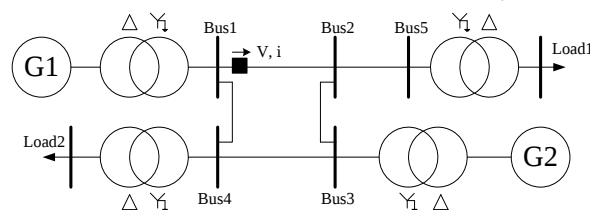
۳-۴- سیستم چهارم: سیستم ۳۹ باسه استاندارد IEEE

سیستم ۳۹ باسه استاندارد IEEE یکی از شبکه‌های انتقال مورد استفاده در مطالعات مختلف سیستم‌های قدرت است. این سیستم دارای ۱۰ ژنراتور، ۱۲ ترانسفورمر، ۴۶ خط انتقال، ۳۹ باس و ۲۱ بار متصل به باس‌ها است. ولتاژ سمت ثانویه ترانسفورمرها ۳۴۵ کیلوولت است. پارامترهای این سیستم در مرجع [۱] بیان شده است (شکل ۹). خط انتقال موردنظر در شبیه‌سازی‌ها، خط بین باس‌های ۲۵ و ۲۶ است. برای ارزیابی الگوریتم‌های پیشنهادی در این سیستم از بیش از ۱۰۰ داده که از شرایط مختلف خطا به‌دست‌آمده، استفاده خواهد شد. لازم‌به‌ذکر است که فرکانس نمونه‌برداری در این سیستم نیز برابر مقدار ۱۰ kHz در نظر گرفته شده است.



شکل ۹: سیستم ۳۹ باسه استاندارد IEEE [۱]

الگوریتم پیشنهادی در این سیستم از بیش از ۴۵۰ داده که از شرایط مختلف خطا به‌دست‌آمده، استفاده شده است.



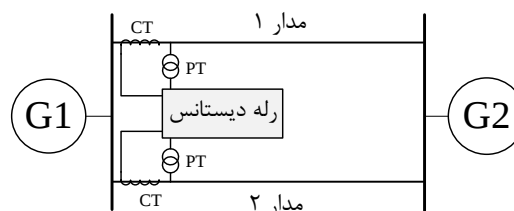
شکل ۱۰: سیستم ۵ باسه نمونه [۱۷]

۳-۲- سیستم دوم: خط دومداره نمونه

خط دومداره معرفی شده در این قسمت، برای بررسی اثر متقابل خطوط انتقال مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸]. ولتاژ خطوط انتقال ۲۲۰ کیلوولت با فرکانس ۵۰ هرتز بوده و طول آن‌ها ۱۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. همچنین دو ژنراتور در دو سمت خط انتقال قرار دارند که قدرت اتصال کوتاه آن‌ها ۱،۲۵ گیگا ولت آمپر بوده و نسبت X/R برابر ۱۰ است. مدل خط انتقال دو مداره استفاده شده، مدل خط انتقال بلند در نظر گرفته شده است. نمونه‌برداری از سیگنال‌های ولتاژ و جریان با استفاده از اندازه‌گیرهای نصب‌شده در ابتدای این خط با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰ kHz صورت گرفته است. این سیستم نیز در نرم افزار سیمولینک متلب (MATLAB/SIMULINK) شبیه‌سازی شده است. تعداد داده‌های این سیستم برای ارزیابی الگوریتم‌های پیشنهادی بیش از ۱۵۰ داده برای هر مدار یعنی ۳۰۰ داده در کل است. شماتیک تک‌مداره در شکل ۷ و اطلاعات این خط دومداره در جدول ۱ آورده شده است:

جدول ۱: پارامترهای خط انتقال دو مداره شبیه‌سازی شده [۱۸]

مقاومت توالی مثبت $R1, \Omega/km$	0.1809
مقاومت توالی صفر $R0, \Omega/km$	0.2188
مقاومت توالی صفر متقابل $R0m, \Omega/km$	0.20052
اندوکتانس توالی مثبت $L1, H/km$	0.00092974
اندوکتانس توالی صفر $L0, H/km$	0.00032829
اندوکتانس توالی صفر متقابل $L0m, H/km$	0.00020802
خازن توالی مثبت $C1, F/km$	$1/2571 \times 10^{-8}$
خازن توالی صفر $C0, F/km$	$7/8555 \times 10^{-9}$
اندوکتانس توالی صفر متقابل $L0m, H/km$	$-2/0444 \times 10^{-9}$

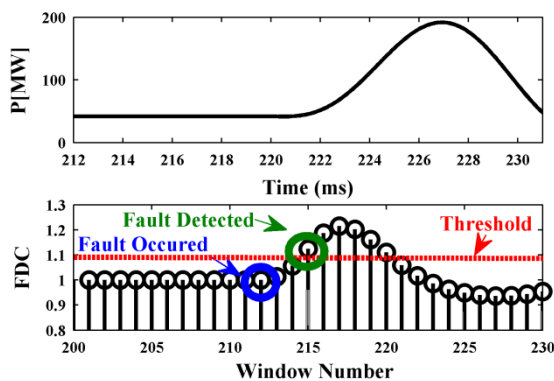


شکل ۱۱: خط دومداره نمونه [۱۷]

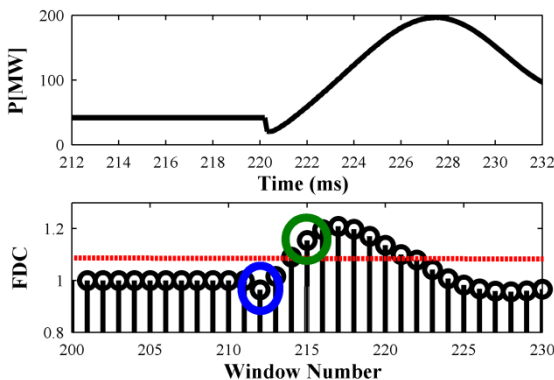
۳-۳- سیستم سوم: سیستم ۹ باسه استاندارد IEEE

سیستم ۹ باسه استاندارد IEEE یکی از سیستم‌هایی است که برای ارزیابی و اعتبارسنجی در مطالعات گذرا و حفاظتی در سال‌های اخیر توسط مراجع مختلف [۳، ۱۹] مورد توجه بوده است. این سیستم دارای ۳ ژنراتور، سه ترانسفورمر، ۶ خط انتقال، ۹ باس، سه بار متصل

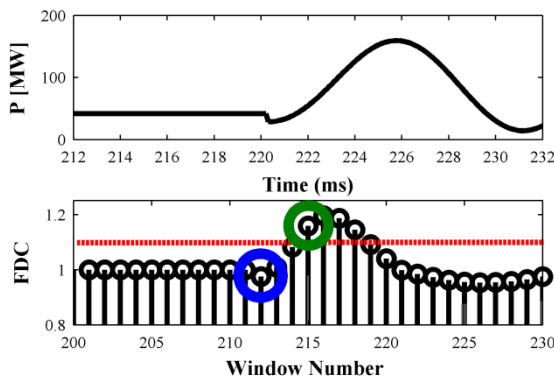
خطا در آن رخ داده (اولین داده مرتبط با خطا در این پنجره وارد شده) و دایره سبز رنگ، نشانگر پنجره‌ای است که خطا تشخیص داده شده است. پنجره‌ها در این الگوریتم به اندازه یک میلی‌ثانیه جابجا می‌شوند، پس می‌توان گفت تفاوت شماره پنجره‌ای که خطا شناسایی شده و خطا رخ داده، مشخص‌کننده زمان تأخیر شناسایی خطا بوده است. برای مثال در خطای تک‌فاز در شکل ۱۱، در پنجره ۲۱۲ خطا رخ داده و در پنجره شماره ۲۱۵ خطا شناسایی شده است. در نتیجه میزان تأخیر روش پیشنهادی در این حالت ۳ میلی‌ثانیه است. برای خطاهای دیگر نیز، روند به همین ترتیب خواهد بود.



شکل ۱۱: سیگنال $p_{3\phi}$ و FDC برای خطای تک‌فاز با مقاومت ناچیز



شکل ۱۲: سیگنال $p_{3\phi}$ و FDC برای خطای دوفاز به زمین با مقاومت ناچیز



شکل ۱۳: سیگنال $p_{3\phi}$ و FDC برای خطای دوفاز به هم با مقاومت ناچیز

۳-۵- سیستم پنجم: داده‌های آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهادی از سیستم ساده‌ای در آزمایشگاه استفاده شده است. این سیستم از دو ترانسفورمر کاهنده در دو طرف یک خط انتقال تشکیل شده است. برای مدل‌سازی خط انتقال از مقاومت متغیر، خازن، سلف و مقاومت‌های مناسب استفاده شده است. برای نمونه‌برداری از جریان و ولتاژ این سیستم آزمایشگاهی از یک دیتالاگر که به طور هم‌زمان از سیگنال‌های ولتاژ و جریان نمونه‌برداری می‌کند، استفاده می‌شود. نرخ نمونه‌گیری این دیتالاگر ۱۵۶ نمونه در یک سیکل قدرت (فرکانس نمونه‌برداری ۷/۸ kHz) است. شکل ۱۰ یک سیستم پیاده‌سازی شده در آزمایشگاه همراه با اطلاعات ذکر شده بر روی ادوات آن را نشان می‌دهد. برای ایجاد خطاهای مختلف، تغییرات زمان وقوع خطا، مقاومت خطا و مکان خطا در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی الگوریتم‌های پیشنهادی با توجه به داده‌های عملی از بیش از ۶۰ داده که از شرایط مختلف خطا به دست آمده، استفاده می‌شود.



شکل ۱۰: سیستم پیاده‌سازی شده در آزمایشگاه

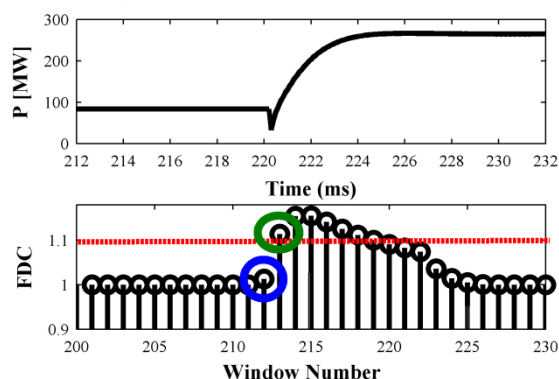
۴- شبیه‌سازی و نتایج

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی تشخیص خطا، از داده‌های به دست آمده از سیستم‌های قسمت قبل در شرایط مختلف استفاده می‌شود. این شرایط عبارتند از: انواع مختلف خطا، خط دومداره و تأثیر اندوکتانس متقابل، خطا با مقاومت بالا، تغییرات بار یا کلیدزنی آن، وجود نویز در سیگنال‌های مورد استفاده، خطای خارجی، بروز نوسان توان، انجام عملیات تک‌فاز در خط انتقال، خطای بین دو مدار در سیستم دومداره، خطای نزدیک به رله، تغییر فرکانس، خروج از سنکرونیزم، اشباع ترانسفورمر جریان و داده‌های آزمایشگاهی. برای سنجش عملکرد روش پیشنهادی، شرایط مذکور به ترتیب مورد بررسی قرار گرفته و برای نمونه خروجی روش در نمودارهایی نشان داده خواهد شد. در انتها نیز نتایج به صورت جدول برای هر سیستم ارائه می‌گردد.

۴-۱- ارزیابی تأثیر انواع مختلف خطا

در شکل‌های ۱۱ الی ۱۴، چهار نوع خطای مختلف در سیستم ۵ باسه نمونه شبیه‌سازی شده و کمیت $p_{3\phi}$ و شاخص پیشنهادی FDC مرتبط برای هر چهار نوع نمایش داده شده است. در این حالت مقاومت خطا ناچیز در نظر گرفته شده و لحظه وقوع خطا زمان ۲۲۰ میلی‌ثانیه است. دایره آبی رنگی نشان داده شده، بیانگر FDC پنجره‌ای بوده که

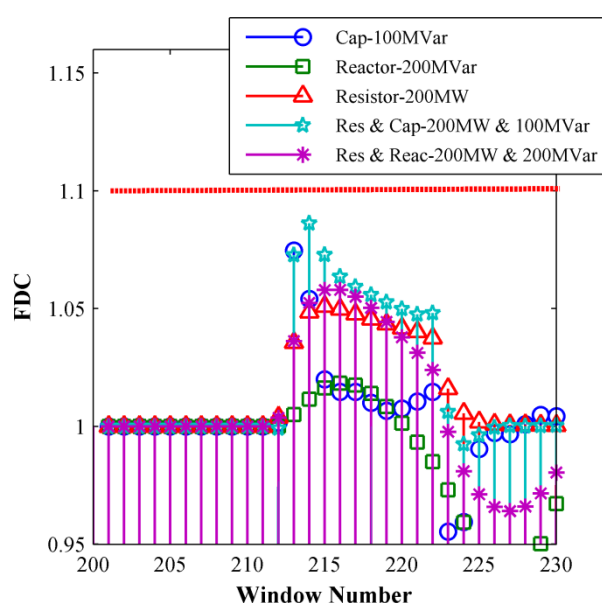
یک خطای سه فاز با مقاومت ۲۰۰ اهم در سیستم اول نمایش داده شده است. در این شکل مشخص است که روش پیشنهادی بعد از گذشت یک میلی ثانیه خطا را شناسایی کرده است. بیشترین مقدار مقاومت خطایی که این الگوریتم قادر به شناسایی بوده به ترتیب مقدار ۲۰۰، ۲۳۰، ۱۸۰ و ۱۹۰ اهم برای سیستم اول تا چهارم است.



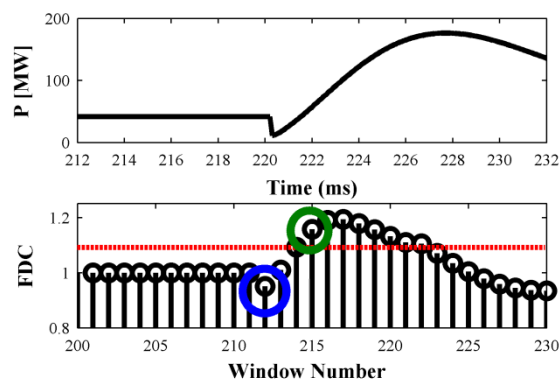
شکل ۱۶: سیگنال $p_{3\phi}$ و FDC برای خطای سه فاز با مقاومت ۲۰۰ اهم

۴-۴-۴ ارزیابی تأثیر تغییرات بار یا کلیدزنی آن

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده، سیگنال $p_{3\phi}$ برای موارد تغییرات و کلیدزنی بار متفاوت از وقوع خطا در خط انتقال است. این تفاوت باعث می شود که شاخص FDC برای موارد کلیدزنی بار به مقدار آستانه ۱/۱ نرسیده و با خطا اشتباه گرفته نمی شود. شکل ۱۷ نشان دهنده شاخص FDC برای کلیدزنی بار مقاومتی (۲۰۰ مگاوات)، بار مقاومتی سلفی (۲۰۰ مگاوات و ۲۰۰ مگاوار)، بار سلفی (۲۰۰ مگاوار)، بار مقاومتی خازنی (۲۰۰ مگاوات و ۲۰۰ مگاوار) و بانک خازنی (۱۰۰ مگاوار) در سیستم اول است. در این شکل واضح است که الگوریتم پیشنهادی به درستی توانسته این موارد را به عنوان خطا شناسایی نکند. نتایج برای سیستم های دوم تا چهارم نیز نشان از صحت عملکرد روش در این حالت است.



شکل ۱۷: مشخصه FDC برای کلیدزنی بارهای مختلف در سیستم اول

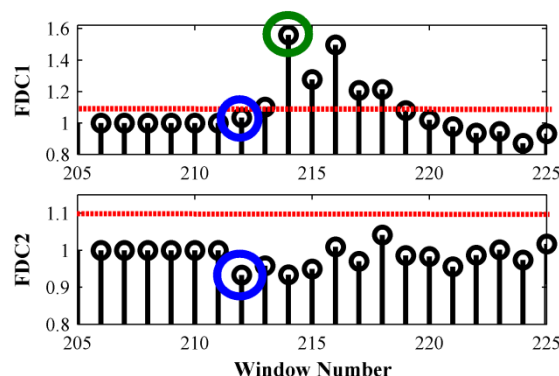


شکل ۱۴: سیگنال $p_{3\phi}$ و FDC برای خطای سه فاز با مقاومت ناچیز

۴-۲-۴ ارزیابی تأثیر خط دومداره

خطوط دومداره در سطح وسیع در شبکه های انتقال در حال استفاده هستند. در این نوع خطوط به علت وجود اندوکتانس متقابل بین آن ها مشکلاتی از قبیل تشخیص اشتباه مدار دارای خطا و نوع خطا وجود دارد. الگوریتم های تشخیص خطا در این نوع خطوط باید مدار خطادار را از مدار سالم تشخیص داده و به اشتباه عمل نکند. در این نوع خطوط، نمونه برداری از سیگنال های ولتاژ و جریان در یک مرکز انجام می گیرد. در این حالت سیگنال ولتاژ در دو مدار مشابه بوده اما سیگنال جریان به علت وجود کوپل متقابل بین دو مدار، متفاوت است. بنابراین سیگنال $p_{3\phi}$ و شاخص FDC نیز متفاوت خواهد بود.

در شکل ۱۵ نتایج الگوریتم پیشنهادی برای سیستم دوم در حالت خطای تک فاز به صورت نمونه نمایش داده شده است. همان طور که دیده می شود مدار خطادار به سرعت شناسایی شده و الگوریتم پیشنهادی در مدار سالم نیز به اشتباه عمل نکرده است. در این حالت خطای شبیه سازی بر روی مدار ۱ بوده که شاخص FDC1 برای مدار ۱ و شاخص FDC2 برای مدار ۲ در نظر گرفته شده است. در این حالت مقاومت خطا ۱۰ اهم بوده و پنجره شروع خطا ۲۱۲ است.



شکل ۱۵: مشخصه های FDC برای خطای تک فاز به زمین در خط دومداره

۴-۳-۴ ارزیابی تأثیر خطا با مقاومت بالا

وقوع خطا با مقاومت بالا از محتمل ترین حالات خطا در خطوط انتقال است. به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در این حالت، خطا با مقاومت های مختلف شبیه سازی گردیده است. برای نمونه در شکل ۱۶

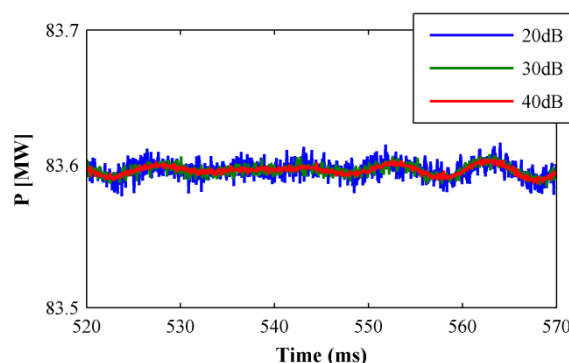
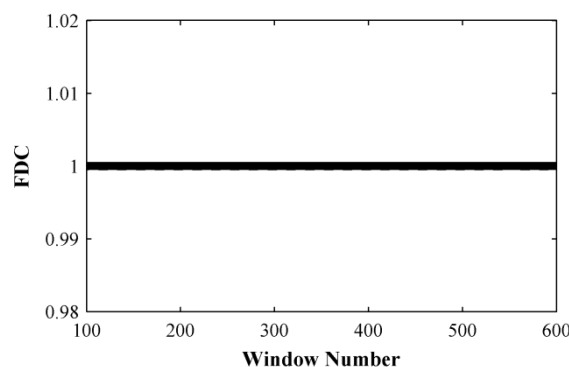
۴-۵- ارزیابی تأثیر نویز

وجود نویز در شبکه قدرت و ادوات اندازه‌گیری، غیرقابل‌انکار است. برای بررسی اثر نویز، کارایی روش در نسبت سیگنال به نویز SNR های مختلف بررسی می‌شود. این کمیت بیان‌کننده نسبت توان سیگنال به توان نویزی است که سیگنال را آلوده می‌کند که واحد آن دسی‌بل بوده و با رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$SNR = 10 \log\left(\frac{P_s}{P_n}\right) \text{ (dB)} \quad (9)$$

در رابطه ۹، SNR نشان‌دهنده نسبت سیگنال به نویز، P_s نشان‌دهنده توان سیگنال مطلوب و P_n نشان‌دهنده توان نویز است. برای شبیه‌سازی نویز، از نویز سفید گوسی استفاده می‌شود که اطلاعات تکمیلی آن در مرجع [۲۰] آورده شده است. میزان SNR شبیه‌سازی شده به ترتیب ۲۰، ۳۰ و ۴۰ دسی‌بل در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود لگاریتم در تعریف SNR، میزان ۲۰ دسی‌بل بیشترین مقدار توان نویز در سه حالت در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۸ نشان‌دهنده سیگنال $p_{3\phi}$ برای سه حالت نویز بوده و شکل ۱۹ شاخص FDC مربوطه را نمایش می‌دهد. واضح است که حضور نویز باعث اشتباه الگوریتم پیشنهادی نشده است.

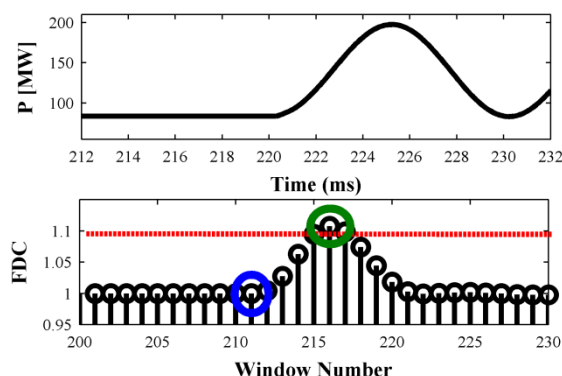
شکل ۱۸: کمیت $p_{3\phi}$ در حالت حضور نویز برای سیستم اول

شکل ۱۹: مشخصه FDC در حالت حضور نویز

۴-۶- ارزیابی وقوع خطای خارجی

خطای خارجی خطایی است که در محدوده حفاظتی رله خط انتقال قرار نداشته باشد. به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد روش پیشنهادی در این حالت، به‌عنوان نمونه خطای تک‌فاز به زمین با مقاومت ۲۰ اهم

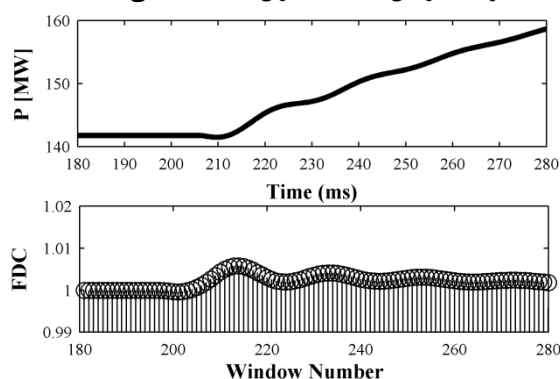
در خط انتقال بین دو باس ۲ و ۵ سیستم اول موردبررسی قرار می‌گیرد (این خطا برای رله خط انتقال بین باس ۱ و ۲ خطای خارجی محسوب می‌شود). همان‌طوری که در شکل ۲۰ دیده می‌شود، این خطا بعد از ۴ میلی‌ثانیه تشخیص داده شده است.

شکل ۲۰: سیگنال $p_{3\phi}$ و FDC برای خطای خارجی تک‌فاز به زمین

۴-۷- عملکرد در برابر نوسان توان

نوسان توان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های دینامیکی سیستم قدرت است که در اثر وقوع برخی اختلالات دینامیکی نظیر تغییرات ناگهانی بار، اتصال کوتاه‌ها، اتصال زمین، عملکرد بازبسته‌ها، عملیات کلیدزنی و غیره به‌وجود می‌آید. رخداد این پدیده ممکن است منجر به عملکرد اشتباه رله‌های دیستانس و قطع نابه‌جای خطوط انتقال شود که این موضوع پایداری سیستم قدرت را به خطر می‌اندازد. در نتیجه باید از عملکرد اشتباه رله دیستانس در هنگام نوسان توان جلوگیری شود. بنابراین در اولین مرحله از حفاظت دیستانس یعنی مرحله تشخیص خطا، باید نوسان توان از خطا تفکیک داده‌شود.

به‌منظور شبیه‌سازی تأثیر نوسان توان بر عملکرد روش پیشنهادی، فرض می‌کنیم در سیستم اول، زاویه ولتاژ ژنراتور ۱ تا مقدار ۴۵ درجه با فرکانس ۱ هرتز نوسان کند. این شرایط، نوسان توان در شبکه را شبیه‌سازی می‌نماید. نتیجه این حالت در شکل ۲۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل واضح است شاخص FDC به مقدار آستانه ۱/۱ نرسیده و این حالت به‌عنوان خطا شناسایی نشده است.

شکل ۲۱: سیگنال $p_{3\phi}$ و FDC برای حالت وقوع نوسان توان

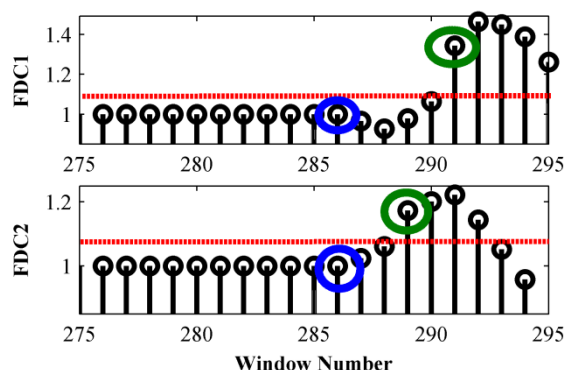
۴-۸- عملکرد در برابر خطا پس از انجام عملیات تک‌فاز

پیشنهادهی در زمان وقوع خطای بین دو مدار در خطوط دومداره، حالات زیر در نظر گرفته شده است:

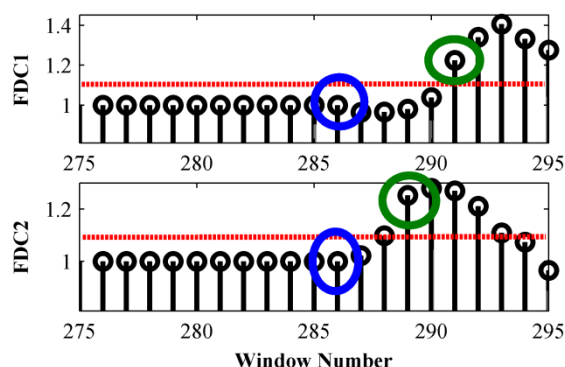
۱. وقوع خطای دو فاز به هم A1B2

۲. وقوع خطای دو فاز به زمین A1B2G

شکل ۲۴ نشان‌دهنده نتایج ارزیابی روش در حالت ۱ و شکل ۲۵ این نتایج را برای حالت ۲ نشان می‌دهد. در هر دو شکل واضح است که روش به درستی وقوع خطا را در هر دو مدار تشخیص می‌دهد.



شکل ۲۴: مشخصه‌های FDC برای خطای بین دو مدار A1B2 در خط دومداره



شکل ۲۵: مشخصه‌های FDC برای خطای بین دو مدار A1B2G در خط دومداره

۴-۱۰- ارزیابی تأثیر خطای نزدیک به رله

خطاهای نزدیک به رله یکی از خطرناک‌ترین انواع خطا بوده که باید به سرعت توسط سیستم حفاظتی شناسایی شود. همان‌طور که در قسمت ۲-۱ بیان شد روش پیشنهادی، خطا با مقاومتی در حدود ۲ اهم را با استفاده از شاخص FDC شناسایی می‌کند. اما وقوع خطا با مقاومت صفر باعث می‌گردد که مقدار این شاخص به حد آستانه ۱/۱ نرسد. در این حالت مقدار این شاخص کمتر از ۰/۹۵ خواهد بود که باعث می‌شود روند استفاده از شاخص کمکی VC فعال گردد.

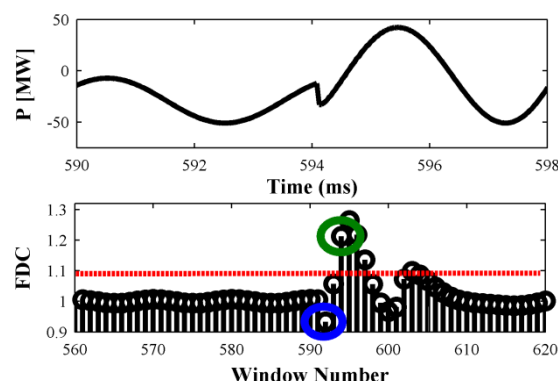
شکل ۲۶ نشان‌دهنده عملکرد الگوریتم برای خطای تک‌فاز با مقاومت صفر در سیستم اول است. همان‌طور که واضح است شاخص FDC کمتر از ۰/۹۵ بوده و شاخص VC بعد از گذشت ۴ میلی‌ثانیه به درستی خطا را شناسایی کرده است.

عملیات تک‌فاز در خط انتقال ممکن است برای بهبود پایداری گذرا مورد استفاده قرار گیرد. در این شرایط تنها فاز خطادار در خطای تک‌فاز به زمین تریپ داده و دو فاز سالم دیگر وظیفه انتقال توان را برعهده می‌گیرند. در این حالت ممکن است عدم تعادل در سیگنال ولتاژ و جریان ایجاد شود. این موضوع در نهایت می‌تواند باعث ایجاد مشکل در توابع حفاظتی از جمله تشخیص خطا در خط انتقال گردد. برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی در شرایط پس از انجام عملیات تک‌فاز، دو حالت زیر در سیستم اول فرض می‌شود (در ابتدا فرض بر این است که فاز A به عنوان فاز خطادار از سیستم جدا شده و فازهای B و C توان را انتقال دهند):

۱. وقوع خطای تک‌فاز به زمین در سیستم دو فازه

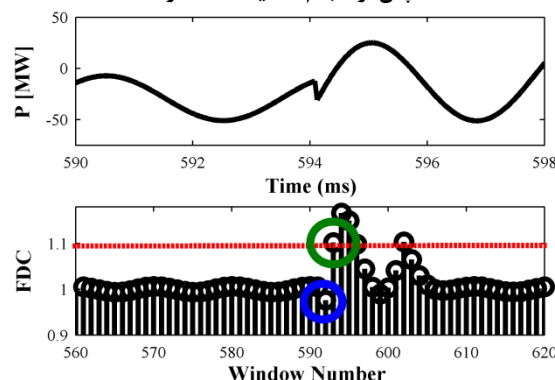
۲. وقوع خطای دو فاز به هم یا دو فاز به زمین در سیستم دو فازه

شکل ۲۲ و ۲۳ به ترتیب نشان‌دهنده نتایج الگوریتم در حالت ۱ و ۲ است. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود روش پیشنهادی به سرعت (به ترتیب با تأخیر زمانی ۲ و ۱ میلی‌ثانیه) خطا را شناسایی کرده است.



شکل ۲۲: سیگنال $p_{3\phi}$ و FDC برای حالت خطای تک‌فاز به زمین

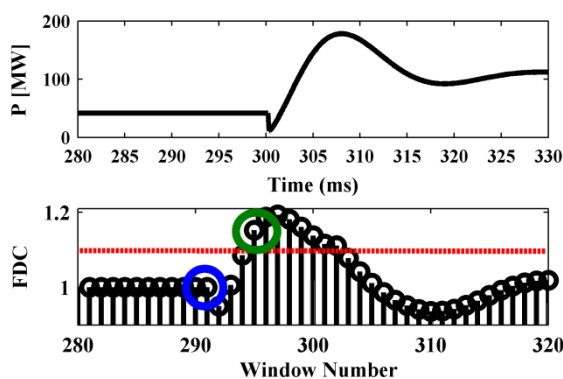
پس از انجام عملیات تک‌فاز



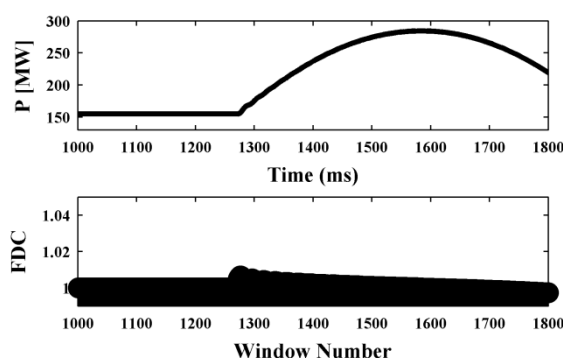
شکل ۲۳: سیگنال $p_{3\phi}$ و FDC برای حالت خطای دو فاز به زمین پس از انجام عملیات تک‌فاز

۴-۹- ارزیابی تأثیر خطای بین دو مدار در خطوط دومداره

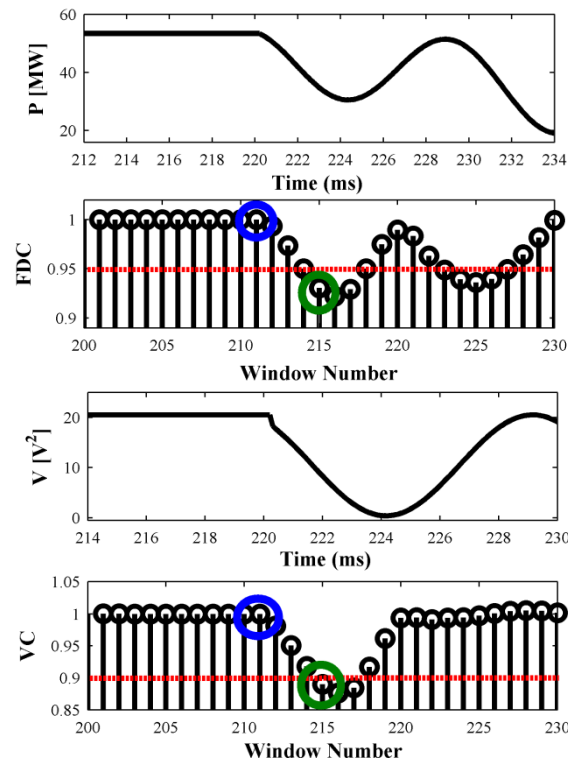
رله حفاظتی در خطوط دومداره باید در زمان خطای بین دو مدار، هر دو را به عنوان مدار خطادار شناسایی کند. به منظور ارزیابی روش



شکل ۲۷: سیگنال $p_{3\phi}$ و FDC برای خطای سه فاز با در نظر گرفتن تغییر فرکانس به ۴۸ هرتز



شکل ۲۸: سیگنال $p_{3\phi}$ و FDC در حالت خروج از سنکرونیزم



شکل ۲۶: سیگنال $p_{3\phi}$ ، FDC، $V_{3\phi}$ و VC برای خطای سه فاز نزدیک به رله با مقاومت ناچیز

۴-۱۱- ارزیابی تأثیر تغییر فرکانس

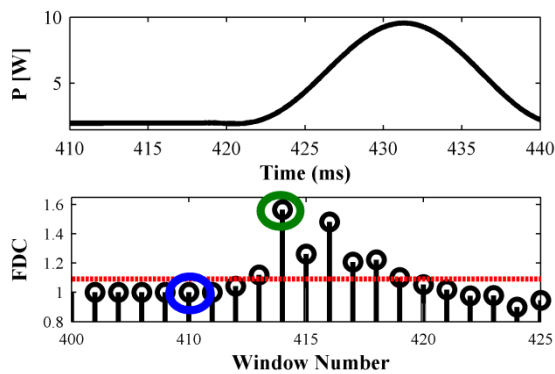
در شرایط عادی و غیرعادی شبکه همانند تغییر بار شدید و خطا، فرکانس شبکه قدرت تغییر می‌کند. این تغییرات در صورتی که در محدوده مجاز (۴۹/۵ تا ۵۰/۵ هرتز) باشد، تجهیزات تثبیت کننده فرکانس وارد عمل نشده و در شرایطی که فرکانس از این محدوده خارج شود، این تجهیزات فرکانس را تثبیت خواهند نمود. چه تغییرات فرکانس در محدوده مجاز و چه تغییرات وسیع تر آن تا زمانی که تجهیزات فرکانس را دوباره به محدوده مجاز برگردانند، نیاز است الگوریتم‌های تشخیص خطا کارایی خود را حفظ نمایند.

برای شبیه سازی تأثیر حالات مختلف تغییر فرکانس بر عملکرد روش پیشنهادی از ۹ حالت تغییر فرکانس در محدوده $\pm 2\text{Hz}$ از فرکانس اصلی شبکه (۴۸، ۴۸/۵، ۴۹، ۴۹/۵، ۵۰، ۵۰/۵، ۵۱، ۵۱/۵، و ۵۲ هرتز) استفاده می‌شود. نتایج این شبیه سازی نشان می‌دهد که عملکرد روش پیشنهادی تحت تأثیر تغییر فرکانس به هنگام وقوع خطا نبوده و الگوریتم پیشنهادی کارایی خود را حتی در بیشترین تغییرات فرکانس نیز حفظ نموده است. یکی از نتایج این ارزیابی در شکل ۲۷ برای حالت فرکانس ۴۸ هرتز ارائه گردیده است. در این شکل دیده می‌شود که خطا بعد از گذشت ۴ میلی ثانیه شناسایی شده و الگوریتم پیشنهادی، کارایی خود را در بیشترین حالت تغییر فرکانس نیز حفظ نموده است.

۴-۱۲- ارزیابی تأثیر خروج از سنکرونیزم

پدیده خروج از سنکرونیزم می‌تواند به دو دلیل عمده خروج از همگامی و یا قطع تحریک رخ دهد. زمانی که سنکرونیزم یک ژنراتور با سیستم از دست برود، امکان ادامه عملکرد پایدار آن وجود ندارد و بایستی به سرعت از سیستم جدا شود تا از آسیب به تجهیز جلوگیری به عمل آید، لذا شناسایی و تشخیص وضعیت خروج از سنکرونیزم یکی از حفاظت‌های اساسی نیروگاه است. حفاظت ژنراتورها در مقابل پدیده خروج از سنکرونیزم عمدتاً بر عهده توابع حفاظتی نیروگاهی مبتنی بر اندازه گیری امپدانس در پایانه ژنراتور است.

به منظور شبیه سازی تأثیر خروج از سنکرونیزم بر عملکرد روش پیشنهادی، از سیستم چهارم مقاله برای نمونه استفاده می‌شود. برای شبیه سازی این پدیده فرض می‌کنیم که خطای سه فاز در خط انتقال بین دو باس ۲ و ۳ رخ دهد. در این حالت ژنراتور متصل به باس ۳۷ (ژنراتور ۸) به علت تغییر زاویه رتور از سنکرونیزم خارج خواهد شد. واحد تشخیص خطا در رله موجود خط مورد مطالعه (خط انتقال بین باس ۲۵ و ۲۶) در این حالت، تغییرات جریان و ولتاژ ورودی و در نتیجه تغییر در سیگنال توان لحظه ای اکتیو را تجربه خواهد کرد. شکل ۲۸ نشان دهنده تغییرات سیگنال $p_{3\phi}$ و شاخص FDC در این حالت است. همان طوری که در این شکل مشخص است، مقادیر شاخص



شکل ۳۰: کمیت $p_{3\phi}$ و مشخصه FDC برای خطای تک فاز به زمین در سیستم آزمایشگاهی

۴-۱۵- جمع بندی و بحث در نتایج

در این قسمت نتایج عملکرد روش پیشنهادی برای تمامی داده های هر پنج سیستم در جدول ۲ آورده شده است. نتایج در این جدول به صورت میانگین زمان تشخیص خطا برحسب میلی ثانیه و دقت تشخیص خطا برحسب درصد ارائه شده است. میانگین زمان تشخیص خطا از میانگین گیری زمان شناسایی برای تمام داده های هر سیستم به دست آمده و دقت تشخیص خطا نیز از میانگین دقت روش در تمامی حالات مذکور محاسبه شده است. همان طوری که در این جدول مشخص است، تأخیر زمانی روش پیشنهادی در حدود ۲/۷ میلی ثانیه بوده و دقت آن بیش از ۹۸ درصد است. بیشترین میانگین زمان تشخیص خطا این روش در داده های آزمایشگاهی بوده که درصد تشخیص خطای آن نیز به نسبت بقیه سیستم ها کمتر است.

جدول ۲: نتایج روش پیشنهادی تشخیص خطا در چهار سیستم معرفی شده

	سیستم اول	سیستم دوم	سیستم سوم	سیستم چهارم	سیستم پنجم
میانگین زمان تشخیص خطا (ms)	۲/۶۵	۲/۵۸	۲/۶۳	۲/۶۱	۳/۱۲
دقت تشخیص خطا (درصد)	٪۹۹	٪۹۸	٪۹۷	٪۹۹	٪۹۶/۶۷

۵- مقایسه با روش های پیشین

در این قسمت کارایی الگوریتم پیشنهادی با هفت الگوریتم مطرح شده پیشین مقایسه می شود. برای این منظور ابتدا اصول این روش ها به صورت اجمالی بیان شده، سپس عملکرد آن ها با استفاده از تمامی داده های سیستم های معرفی شده ارزیابی می گردد. در انتها نتایج در جدول ۳ که در ادامه آورده می شود، ارائه خواهد شد.

۵-۱- روش الف: مقایسه هر نمونه سیگنال جریان با نمونه قبل [۲۰]

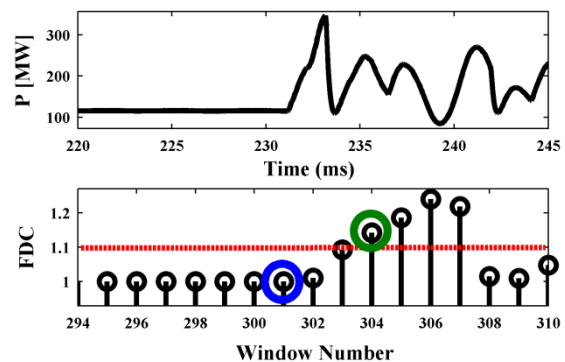
این روش یکی از ساده ترین روش های مطرح شده برای شناسایی خطا در خطوط انتقال است. مبنای این روش، تفاضل هر نمونه با نمونه

FDC کمتر از مقدار آستانه بوده و روش پیشنهادی به درستی این حالت را به عنوان خطا شناسایی نکرده است.

۴-۱۳- ارزیابی تأثیر اشباع ترانسفورمرهای جریان

اشباع ترانسفورمرهای اندازه گیری جریان (CT) یکی از شایع ترین حالات ممکن در زمان وقوع خطا در خطوط انتقال است. اشباع CT می تواند اطلاعات مفید سیگنال های مورد استفاده در الگوریتم های حفاظتی را از بین ببرد و منجر به عملکرد اشتباه آن ها شود.

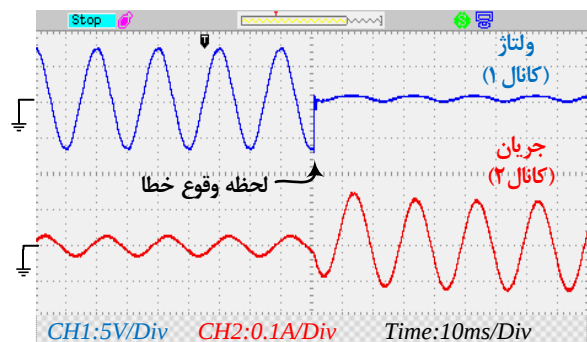
با توجه به نکات فوق، اثر اشباع این ترانسفورمرها در ارزیابی روش پیشنهادی لحاظ گردید که نتایج نشان دهنده صحت عملکرد روش پیشنهادی می باشند. برای نمونه یک حالت از خطای دوفاز به هم با در نظر گرفتن مورد مذکور در شکل ۲۹ نمایش داده شده است که خطا بعد از گذشت ۳ میلی ثانیه به درستی شناسایی شده است.



شکل ۲۸: سیگنال $p_{3\phi}$ و FDC برای خطای دوفاز به هم در حالت اشباع CT

۴-۱۴- ارزیابی داده های آزمایشگاهی

برای ارزیابی نهایی، الگوریتم پیشنهادی تشخیص خطا به داده های آزمایشگاهی اعمال گردید. نمودار ولتاژ و جریان یک نمونه از خطای پیاده سازی شده، برای یکی از فازها (فاز خطا دار) در لحظه وقوع خطای تک فاز به زمین در شکل ۲۹ نمایش داده شده است. با توجه مشخصه FDC نشان داده شده در شکل ۳۰، می توان گفت الگوریتم پیشنهادی به سرعت خطا را تشخیص داده و به درستی عمل کرده است.



شکل ۲۹: نمودار ولتاژ و جریان عملی فاز خطا دار در خطای تک فاز به زمین سیستم آزمایشگاهی

$$MS(k) = \left| \sum_{x=k-N+1}^k i(k) \right| \quad (12)$$

$$MS(k) \geq TH \rightarrow Fault$$

در رابطه ۱۲، کمیت MS مشخص‌کننده مقدار عددی مجموع یک سیکل سیگنال جریان است. در صورتی که مقدار این کمیت از حد آستانه بیشتر شود، خطا در خط انتقال تشخیص داده خواهد شد.

۴-۵- روش د: جمع تجمعی نمونه‌های سیگنال جریان [۲۳]

این روش به‌طور وسیع برای تشخیص و دنبال کردن خطا در فرآیندهای صنعتی در حال استفاده است. این الگوریتم در واقع ترکیبی از روش قبل و روش مقایسه هر نمونه با نمونه یک سیکل قبل است [۲۳]. رابطه ۱۳ نشان‌دهنده رابطه ریاضی این روش است. همان‌طور که در این رابطه مشخص است، سیگنال به دو قسمت نمونه‌های مثبت و منفی تقسیم می‌شود. در مرحله بعد مشخصه‌های g برای تشخیص خطا ارائه شده‌اند که ماکزیمم جمع تجمعی سیگنال‌های تحت بررسی است. این روش نیز مانند روش‌های قبل به حافظه یک سیکلی نیازمند است و نحوه عملکرد آن نیز دقیقاً شبیه به روش‌های قبل است. در صورتی که کمیت‌های $g_1(k)$ و $g_2(k)$ که معرف جمع تجمعی نمونه‌های جریان است، از مقدار آستانه از پیش تعیین شده بزرگ‌تر شد، خطا شناسایی خواهد شد.

$$\begin{aligned} s_k(1) &= s_k \\ s_k(2) &= -s_k \\ g_k(1) &= \max(g_{k-1}(1) + s_k(1) - T, 0) \\ g_k(2) &= \max(g_{k-1}(2) + s_k(2) - T, 0) \\ g_k(1) \text{ or } g_k(2) &\geq TH \rightarrow Fault \end{aligned} \quad (13)$$

۵-۵- روش ه: اختلاف انرژی تبدیل S سیگنال جریان [۲۴]

تبدیل S یک روش زمان-فرکانسی است که بعد از تبدیل فوریه و تبدیل موجک مطرح شده است. خروجی تبدیل S به صورت ماتریس مختلطی است که اطلاعات مربوط دامنه بر حسب زمان و دامنه بر حسب فرکانس را در خود دارد. اعمال تبدیل S به سیگنال جریان، اطلاعات مفیدی بر حسب زمان و فرکانس را در اختیار قرار می‌دهد. وقوع خطا در خط انتقال باعث تغییر در دامنه بر حسب فرکانس تبدیل S سیگنال جریان می‌شود که این تغییرات ایده اصلی روش مطرح شده در مرجع [۲۴] است. روش پیشنهادی در این مرجع بر اساس تغییر انرژی تبدیل S سیگنال جریان خطا برای نیم سیکل قبل از خطا و نیم سیکل بعد از خطا است. با مقایسه اختلاف انرژی مذکور برای هر فاز با یک مقدار آستانه از پیش تعیین شده خطا تشخیص داده می‌شود. لازم به ذکر است که انرژی سیگنال در واقع مجموع توان دوم داده‌های هر سیگنال در یک بازه N داده‌ای است.

همان‌طور که ذکر شد تأخیر زمانی این روش به علت ثابت بودن پنجره محاسبه انرژی، نیم سیکل قدرت بوده که این مقدار در حالت‌های مختلف خطا تغییر نمی‌کند. با توجه به توانایی الگوریتم‌های

قبلی سیگنال جریان در نظر گرفته شده است [۲۰]. در شرایط عملکرد عادی شبکه، تفاضل دو نمونه متوالی مقداری ثابت داشته و روند سینوسی خود را طی می‌کند، اما در شرایط وقوع خطا، تغییر قابل ملاحظه‌ای در کمیت تفاضلی ایجاد شده و از مقایسه این مقدار با مقدار آستانه از پیش تعیین شده، خطا قابل شناسایی خواهد بود. رابطه ریاضی این روش به صورت زیر قابل نمایش است:

$$SBS(k) = |i(k) - i(k-1)| \quad (10)$$

$$SBS(k) \geq TH \rightarrow Fault$$

در رابطه ۱۰، کمیت SBS مشخص‌کننده تفاضل هر نمونه جریان با نمونه قبلی آن است. همچنین کمیت k مشخص‌کننده نمونه مورد بررسی برای تشخیص خطا است. جریان نمونه k نیز با $i(k)$ نمایش داده شده است. از معایب این روش می‌توان به تأثیرپذیری شدید از نویز موجود در شبکه، سختی انتخاب مقدار آستانه، تشخیص به اشتباه کلیدزنی بار و خازن و ... اشاره نمود.

۵-۲- روش ب: مقایسه هر نمونه سیگنال جریان با نمونه یک سیکل قبل [۲۰]

این روش بر پایه مقایسه هر نمونه سیگنال جریان با نمونه متناظر یک سیکل قبل است [۲۰]. مقدار این تفاضل در حالت عادی شبکه بسیار ناچیز و نزدیک به صفر بوده اما در هنگام وقوع خطا، این کمیت مقدار قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. برای تشخیص خطا، کمیت معرفی شده با مقدار آستانه از پیش تعیین شده مقایسه شده و در صورت بیشتر بودن کمیت تفاضلی، خطا شناسایی خواهد شد. رابطه ریاضی این روش به شرح زیر است:

$$CBC(k) = |i(k) - i(k-N+1)| \quad (11)$$

$$CBC(k) \geq TH \rightarrow Fault$$

در رابطه ۱۱، کمیت CBC مشخص‌کننده تفاضل هر نمونه جریان با نمونه یک سیکل قبل است. در این روش واضح است در زمان وقوع خطا، تغییرات زیادی در خروجی روش مشاهده خواهد شد. بر اساس همین تغییرات خطا در خطوط انتقال شناسایی می‌شود. عیب این روش همانند روش قبل، تشخیص نابجا تغییرات بار به عنوان خطا است. همچنین این روش به بافر یا حافظه یک سیکلی نیاز دارد.

۵-۳- روش ج: جمع متحرک یک سیکلی نمونه‌های سیگنال جریان [۲۱، ۲۲]

در حالت عملکرد عادی شبکه قدرت، مجموع عددی نمونه‌های یک سیکل سیگنال جریان به علت حالت سینوسی و متقارن بودن شبکه، مقداری بسیار ناچیز است [۲۱، ۲۲]. در هنگام وقوع خطا، جریان تغییرات شدیدی خواهد داشت و مجموع نمونه‌های موجود در یک سیکل صفر نخواهد بود. با استفاده از همین موضوع کمیتی همانند زیر تعریف شده و با استفاده از مقدار آستانه از پیش تعیین شده، خطا شناسایی خواهد شد:

۵-۸- جمع بندی

هر هفت الگوریتم معرفی شده در تشخیص کلیدزنی بار سنگین دچار مشکل می شوند. علت این موضوع استفاده از سیگنال های جریان سه فاز است. شباهت بسیار زیاد سیگنال های جریان در حین کلیدزنی بار سنگین و خطای سه فاز باعث می شود این روش ها در این شرایط به اشتباه عمل نمایند.

همچنین باید یادآور شد که دقت عملکرد این هفت روش به انتخاب مقدار آستانه برای آن ها وابسته بوده و در سیستم های گوناگون این مقدار آستانه متفاوت است. این موضوع یکی از معایب این روش ها است. هرگونه تغییر در توپولوژی شبکه باعث تغییر در مقدار پایه جریان شبکه باعث می شود. در نتیجه مقادیر آستانه قبلی در این حالات معتبر نبوده و نیازمند تغییر باشند. سرعت این روش ها نیز وابستگی زیادی به این مقادیر آستانه دارد و هرگونه تغییری در انتخاب آن، می تواند باعث تندرشدن و یا کندترشدن آن ها بشود. یکی دیگر از موارد چالش برانگیز تشخیص خطای مقاومت بالا است که این هفت الگوریتم نتایج متفاوتی در آن خواهند داشت.

روش مقایسه هر نمونه با نمونه قبل تأثیرپذیری زیادی از نویز موجود در سیگنال های جریان دارد. همچنین این روش برای جداسازی مدار سالم از مدار خطا دار در خطوط دومداره به شدت ضعیف عمل می کند و توانایی تفکیک این دو حالت از هم را ندارد. این روش توانایی تشخیص خطای مقاومت بالا را نیز ندارد و در بسیاری از موارد آن را تشخیص نمی دهد.

روش مقایسه نمونه با نمونه یک سیکل قبل علاوه بر مشکلات مذکور قبل، در خطوط دومداره دارای سرعت کافی نیست. دلیل این موضوع به انتخاب مقدار آستانه مناسب بستگی دارد، زیرا در هنگام خطا جریان مدار سالم نیز تغییراتی به همراه خواهد داشت و در صورت انتخاب مقدار آستانه نامناسب، ممکن به عنوان مدار خطا دار شناسایی شود. تشخیص خطای مقاومت بالا در این الگوریتم بستگی بسیاری به مقدار آستانه دارد. اگر مقدار آستانه مناسبی انتخاب شود، این روش توانایی شناخت این نوع از خطا را دارد.

روش جمع متحرک یک سیکل جریان به علت مجموع گیری از تمامی داده های یک سیکل در هر تکرار، بار محاسباتی سنگینی بر پردازشگر رله اعمال می کند. انتخاب مقدار آستانه به علت زیادبودن مقدار خروجی روش به هنگام وقوع خطا، ساده تر است. این روش نیز همانند روش قبل در صورت انتخاب مناسب مقدار آستانه، قادر به شناسایی خطا با مقاومت بالا است.

روش جمع تجمعی به علت استفاده از دو مشخصه برای نیم سیکل مثبت و منفی، بار محاسباتی سنگینی به رله اعمال می کند. همچنین وجود مقدار ثابت در این الگوریتم یکی از معایبی است که باعث شده کارایی آن به شدت به آن وابسته باشد. انتخاب نامناسب این مقدار ثابت می تواند باعث شود کوچک ترین تغییرات بار و یا هر تغییر منجر به

جدید در تشخیص خطا در کمتر از ۳ میلی ثانیه، این روش جزو روش های کند محسوب می شود. همچنین این روش به علت روابط پیچیده تبدیل S بار محاسباتی نسبتاً زیادی دارد. اما تعیین مقدار آستانه در این روش در مقایسه با دیگر روش ها ساده تر است. این موضوع به اختلاف قابل توجه شاخص معرفی شده در حالت خطا با حالت عملکرد سالم شبکه برمی گردد. مشکل تشخیص کلیدزنی بار سنگین به عنوان خطا در این روش همچنان مشهود است.

۵-۶- روش و: تبدیل موجک گسسته سیگنال جریان [۲۵]

تبدیل موجک گسسته یکی از تبدیل های پراستفاده در تجزیه و تحلیل سیگنال های سیستم قدرت است. این تبدیل، سیگنال را از نظر پهنای باند فرکانسی به دو قسمت فرکانس پایین و فرکانس بالا تجزیه می کند. در مراحل بعدی تجزیه، فقط قسمت پهنای باند مربوط به فرکانس پایین به دو قسمت دیگر تبدیل می شود. در روش پیشنهادی مرجع [۲۵]، از تبدیل موجک گسسته جهت تشخیص خطا استفاده شده است. این روش از تبدیل موجک مادر دابچیز برای تجزیه فرکانسی سیگنال جریان استفاده می کند. در مرحله بعد از جمع جزییات مرحله سوم سیگنال تجزیه شده در یک پنجره نیم سیکلی به عنوان شاخص برای تشخیص خطا استفاده می شود. خطا در خط انتقال با استفاده از مقایسه شاخص معرفی شده با یک مقدار آستانه از پیش تعیین شده شناسایی می شود.

بار محاسباتی این روش در مقایسه با روش های ساده مطرح شده در این زمینه به مراتب بیشتر است. همچنین سرعت و دقت این روش وابستگی شدیدی به مقدار آستانه تعیین شده دارد. به طور مثال این مقدار در شرایط مختلف خطا و سیستم های متفاوت نیاز به تنظیم دوباره داشته تا بتواند عملکرد مناسبی را ارائه دهد. تأثیرپذیری عملکرد این روش از نویزهای مختلف همانند نویز اندازه گیری و نیاز به انتخاب فرکانس های نمونه گیری مختلف در باندهای مختلف تحلیل از دیگر ضعف های این روش است.

۵-۷- روش ز: اختلاف ضریب همبستگی سیگنال جریان [۲۶]

ضریب همبستگی ابزاری آماری برای تعیین نوع و درجه رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر است. مقدار این ضریب، عددی بین ۱ تا ۱- بوده و در صورت عدم وجود رابطه بین دو متغیر، صفر است. تغییرات سیگنال جریان بعد از خطا و ارتباط آن با شرایط قبل از خطا ایده اصلی روش مطرح شده در مرجع [۲۶] است. در این روش، از اختلاف ضریب همبستگی روی دو نیم سیکل از سیگنال جریان با پلاریته یکسان متوالی استفاده شده است.

از معایب این روش می توان به عملکرد نامناسب در شرایط خطا با مقاومت بالا و عدم تشخیص خطا در زمان عبور از صفر جریان اشاره نمود. تشخیص کلیدزنی بار سنگین به عنوان خطا در شبکه یکی دیگر از معایب این روش است.

کندتر است. اما مشکل انتخاب مقدار آستانه در آن دیده نمی‌شود. همچنین این روش مانند سایر روش‌ها در موارد کلید زنی بار سنگین به اشتباه عمل کرده و توانایی تفکیک آن را از خطا در خط انتقال ندارد.

نوسان در سیگنال جریان را به عنوان خطا شناسایی کرده و به اشتباه عمل نماید. این روش همانند روش‌های قبل در صورت انتخاب مناسب مقدار آستانه، قادر به شناسایی خطا با مقاومت بالا است.

روش اختلاف انرژی در تبدیل S جریان به علت پیچیدگی، حجم محاسباتی زیادی دارد. همچنین این روش در مقایسه با سایر روش‌ها

جدول ۳- مقایسه روش پیشنهادی با هفت روش پیشین

روش	دقت عملکرد در سیستم‌های مورد مطالعه (%)					مقدار آستانه (pu)	میانگین زمان تشخیص (ms)	بیشینه زمان تشخیص (ms)	حجم محاسباتی
	سیستم ۱	سیستم ۲	سیستم ۳	سیستم ۴	سیستم ۵				
الف [۲۰]	۶۷/۵	۳۵/۶	۵۵/۳	۵۱	۴۶/۳۳	۱۰	۴/۰۸	۷/۳۵	کم
ب [۲۰]	۸۲/۶	۷۷/۵	۷۶/۶۷	۷۹	۸۱/۶۷	۲۰	۴/۱۵	۷/۴۸	کم
ج [۲۱]	۸۵/۵	۷۹/۴	۶۷/۳۳	۷۷	۸۱/۶۷	۵۰	۳/۷۵	۶/۸۶	کم
د [۲۲]	۸۷/۸	۹۱/۵	۸۵/۶	۸۸	۸۷/۳۳	۲۵	۳/۸۸	۶/۹۵	زیاد
ه [۲۴]	۹۴/۵	۹۵	۹۳	۹۴	۹۵	۱۲	۵	۵	زیاد
و [۲۵]	۹۱/۲	۹۳/۵	۹۰/۸۷	۹۲	۹۱/۶۷	۲۵	۲/۹۵	۴/۷۱	زیاد
ز [۲۶]	۸۹/۳	۹۲/۴۵	۸۸/۲۵	۸۹	۸۷/۳۳	۰/۸	۳/۱۱	۵/۱۲	کم
روش پیشنهادی	۹۹	۹۸	۹۷	۹۹	۹۶/۶۷	۱/۱	۲/۷۲	۴	کم

مراجع

- [1] P. Gopakumar, M. J. B. Reddy and D. K. Mohanta, "Transmission line fault detection and localisation methodology using PMU measurements," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 9, No. 11, pp. 1033-1042, 2015.
- [2] K. Chen, C. Huang and J. He, "Fault detection, classification and location for transmission lines and distribution systems: a review on the methods," High Voltage, Vol. 1, No. 1, pp. 25-33, 2016.
- [3] A.R. Adly, R. A. El Sehiemy, A.Y. Abdelaziz and N. M. Ayad, "Critical aspects on wavelet transforms based fault identification procedures in HV transmission line," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, No. 2, pp. 508-517, 2016.
- [4] A.G. Shaik and R. R. V. Pulipaka, "A new wavelet based fault detection, classification and location in transmission lines," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 64, pp. 35-40, 2015.
- [5] K. M. Silva, B. A. Souza and N. S. D. Brito, "Fault detection and classification in transmission lines based on wavelet transform and ANN," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 4, pp. 2058-2063, 2006.
- [6] D. Das, N. K. Singh and A. K. Sinha, "A comparison of Fourier transform and wavelet transform methods for detection and classification of faults on transmission lines," Power India Conference, pp. 7-11, 2006.
- [7] J.A. Jiang, J.Z. Yang, Y.H. Lin, C.W. Liu and J.C. Ma, "An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. I. Theory and

روش تبدیل موجک علاوه بر حجم محاسباتی نسبتاً زیاد، عملکرد مناسبی در شرایط نویز در شبکه را دارا نیست. همچنین انتخاب مقدار آستانه بر دقت و سرعت آن تأثیر زیادی دارد. در انتها روش اختلاف ضریب همبستگی با این‌حالی که در مقایسه با سایر روش‌ها سریع‌تر است، از عدم دقت کافی در زمان کلیدزنی بار سنگین برخوردار است. در جدول ۳ عملکرد روش پیشنهادی در پنج سیستم معرفی شده با روش‌های پیشین مقایسه شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص است، سرعت روش پیشنهادی کمتر از ۲/۷ میلی‌ثانیه بوده و دقت آن بیش از ۹۸ درصد است که نشان‌دهنده کارایی آن در مقایسه با هفت روش دیگر است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید برای تشخیص خطا در خطوط انتقال براساس توان اکتیو لحظه‌ای سلفاز میانگیری متحرک ارائه شده. روش پیشنهادی در پنج سیستم مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و با روش‌های پیشین مقایسه گردید. نتایج نشان‌دهنده دقت و سرعت قابل‌ملاحظه روش پیشنهادی بود. همچنین روش پیشنهادی شرایط چالش‌برانگیز تشخیص خطا در خطوط انتقال برای روش‌های پیشین را به‌خوبی پوشش داد.

- [17] H. Samet, A. Shabanpour-Haghighi and T. Ghanbari, "A fault classification technique for transmission lines using an improved alienation coefficients technique," International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 27, No. 1, 2017.
- [18] M.A. Jarrahi, H. Samet, H. Raayatpisheh, A. Jafari and M. Rakhshan, "An ANFIS-Based Fault Classification Approach in Double-Circuit Transmission Line Using Current Samples," International Work-Conference on Artificial Neural Networks, pp. 225-236, Springer, 2015.
- [19] D. Guillen, M. R. A. Paternina, A. Zamora, J. M. Ramirez and G. Idarraga, "Detection and classification of faults in transmission lines using the maximum wavelet singular value and Euclidean norm," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 9, No. 15, pp. 2294-2302, 2015.
- [20] A.G. Phadke and J. S. Thorp, Computer relaying for power systems. John Wiley & Sons, 2009.
- [21] A. K. Pradhan, A. Routray and S. R. Mohanty, "A moving sum approach for fault detection of power systems," Electric Power Components and Systems, Vol. 34, No. 4, pp. 385-399, 2006.
- [22] M. Biswal, "Faulty phase selection for transmission line using integrated moving sum approach," IET Science, Measurement & Technology, Vol. 10, No. 7, pp. 761-767, 2016.
- [23] S. R. Mohanty, A. K. Pradhan and A. Routray, "A cumulative sum-based fault detector for power system relaying application," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 1, pp. 79-86, 2008.
- [24] P. K. Dash, S. Das and J. Moirangthem, "Distance protection of shunt compensated transmission line using a sparse S-transform," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 9, No. 12, pp. 1264-1274, 2015.
- [25] A. R Adly, R. A. El Sehiemy and A. Y. Abdelaziz, "A novel single end measuring system based fast identification scheme for transmission line faults," Measurement, Vol. 103, pp. 263-274, 2017.
- [26] M. M.Eissa and M. M. A. Mahfouz, "New high-voltage directional and phase selection protection technique based on real power system data," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 6, No. 11, pp. 1075-1085, 2012.
- algorithms," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, pp. 486-493, 2000.
- [8] S. R Samantaray and P. K. Dash, "Transmission line distance relaying using a variable window short-time Fourier transform," Electric Power Systems Research, Vol. 78, No. 4, pp. 595-604, 2008.
- [9] R. N. Mahanty and P.B.D Gupta, "A fuzzy logic based fault classification approach using current samples only," Electric Power Systems Research, Vol. 77, No. 5, pp. 501-507, 2007.
- [10] M. E. Masoud and M. M. A. Mahfouz, "Protection scheme for transmission lines based on alienation coefficients for current signals," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 4, No. 11, pp. 1236-1244, 2010.
- [11] X.N. Lin, M. Zhao, K. Alymann and P. Liu, "Novel design of a fast phase selector using correlation analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1283-1290, 2005.
- [۱۲] سعید هاشمی نژاد، سید قدرت اله سیف السعادات، مرتضی رزاز و محمود جورابیان، «دسته بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا در سیستم‌های قدرت با استفاده از تئوری امواج سیار و سیستم فازی» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۴، ۱۳۹۴.
- [۱۳] فرهاد نامداری و مسلم صالحی، «یک طرح حفاظتی خیلی سریع مبتنی بر امواج اولیه سیار جریان برای خطوط انتقال با استفاده از ریخت شناسی ریاضی» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۱، ۱۳۹۶.
- [14] B. Mahamedi and J. G. Zhu, "Fault classification and faulted phase selection based on the symmetrical components of reactive power for single-circuit transmission lines," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, No. 4, pp. 2326-2332, 2013.
- [15] P. Dutta, A. Esmailian and M. Kezunovic, "Transmission-line fault analysis using synchronized sampling," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 2, pp. 942-950, 2014.
- [16] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 9, No. 1, pp. 62-66, 1979.