

Detection of high impedance faults in distribution networks using Discrete Fourier Transform

Mehrdad Ghahremani¹, Zahra Moravej²

1-Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University
mehrdad_ghahremani@semnan.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University
zmoravej@semnan.ac.ir

Abstract

This paper proposes a new method for extracting dynamic properties for high impedance fault (HIF) detection using discrete Fourier transform (DFT). Unlike conventional methods that use features extracted from data windows after fault to detect high impedance fault, in the proposed method, using the disturbance detection algorithm in the network, the normalized changes of the selected features are used to compare the data windows after the fault occurrence and before the fault occurrence. It also uses the post-disturbance data windows, develops a decision system based on the output of the support vector machines (SVM) classifier, and compares the amount of certainty of other network events with high impedance fault. The reliability and security of the proposed method have been improved. The proposed method is implemented on an IEEE 34 bus network in EMTP-RV software. The simulation results show 97.2% accuracy, 98.5% reliability, and 98.8% security..

Key words: High impedance fault, discrete Fourier transform, fast Fourier transform, disturbance detection, distribution networks, support vector machine.

Received:2020/12/08

Accepted:2021/08/09

تشخیص خطای امپدانس بالا در شبکه‌های توزیع با استفاده از تبدیل فوریه گسسته

نوع مطالعه: پژوهشی

مهرداد قهرمانی^۱ ، دانشجو دکتری، زهرا مروج^۲، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه سمنان- سمنان- ایران- mehrdad_ghahremani@semnan.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه سمنان - سمنان- ایران- zmoravej@semnan.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روشی جدید برای استخراج ویژگی‌های دینامیک برای تشخیص خطای امپدانس بالا با استفاده از تبدیل فوریه گسسته (DFT) ارائه شده است. برخلاف روش‌های رایج که از ویژگی‌های استخراج شده از پنجره‌های داده پس از بروز خطا برای تشخیص خطای امپدانس بالا استفاده می‌کنند، در روش پیشنهادشده با استفاده از الگوریتم تشخیص بروز اختشاش در شبکه، از تغییرات نرمال شده ویژگی‌های انتخاب شده به منظور مقایسه‌ی بین پنجره‌های داده پس از بروز خطا و پیش از بروز خطا، استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از پنجره‌های داده پسا-اختشاش و توسعه یک سیستم تصمیم‌گیری بر اساس خروجی طبقه‌بندی‌کننده SVM و مقایسه مقدار قطعیت رخداد سایر وقایع شبکه با خطای امپدانس بالا، قابلیت اطمینان و امنیت روش پیشنهادی بهبود بخشیده شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه ۳۴ شینه IEEE در نرم‌افزار EMTP-RV پیاده‌سازی شده است؛ که نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر دقت ۹۷/۲٪، قابلیت اطمینان ۹۸/۵٪ و امنیت ۹۸/۸٪ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خطای امپدانس بالا، تبدیل فوریه گسسته، تبدیل فوریه سریع، تشخیص اختشاش، شبکه‌های توزیع، ماشین بردار پشتیبان.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۱۸

نام نویسنده‌ی مسئول: زهرا مروج

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - سمنان - بلوار امام رضا - دانشگاه سمنان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

تصمیم‌گیری با استفاده از مقادیر آستانه^۳ می‌باشد [۱۵، ۱۶]. مشکل اصلی روش‌هایی که از مقادیر آستانه برای تشخیص خطای استفاده می‌کنند، تعیین مقادیر آستانه برای هر ویژگی می‌باشد و با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن فضای ویژگی‌ها استفاده از روش‌های هوشمند تشخیص الگو را حل مناسبی به جای انتقاده از مقادیر آستانه می‌باشد. منظور از روش‌های هوشمند تشخیص الگو برای تشخیص خطای امپدانس بالا به کارگیری طبقه‌بندی کننده‌های^۴ است که برای تشخیص خطای توسط مجموعه‌ای از ویژگی‌ها آموزش دیده‌اند و پس از آموزش قادر به تمایز بین ویژگی‌های مربوط به خطای واقعی غیرخطای هستند که این طبقه‌بندی کننده‌ها شامل شبکه‌های عصبی^۵ [۱۷-۱۹]، ماشین بردار پشتیبان^۶ [۲۰-۲۲]، منطق فازی^۷ [۷، ۲۳] و ترکیب روش‌های فازی و عصبی^۸ [۸، ۹] می‌باشند. جهت کسب اطلاعات بیشتر به منظور مرور و بررسی روش‌های تشخیص خطای امپدانس بالا می‌توان از مرجع [۵] استفاده نمود.

در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص خطای امپدانس بالا در حضور سایر رخدادهای شبکه ارائه شده است؛ روش پیشنهادی شامل مراحل زیر می‌باشد.

- استفاده از تبدیل فوریه گستته^۹ جهت استخراج ویژگی‌ها (به منظور پیاده‌سازی بهینه تبدیل فوریه گستته از نظر تعداد عملیات ریاضی لازم برای محاسبه تبدیل، از تبدیل فوریه سریع^{۱۰} استفاده شده است) و اعمال آن‌ها به طبقه‌بندی کننده SVM جهت تشخیص خطای امپدانس بالا
- استفاده از یک سیستم تصمیم‌گیری مبتنی بر رأی بر اساس تجمعی خروجی طبقه‌بندی کننده SVM (جهت بهبود دقت تصمیم‌گیری در مورد خطای HIF) و مقایسه مقدار قطعیت^{۱۱} رخداد سایر وقایع شبکه با خطای امپدانس بالا (جهت بهبود افزایش امنیت طرح حفاظتی پیشنهادشده)
- به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، شبکه IEEE ۳۴ شینه EMTP-RV و همچنین سایر رویدادهای شبکه در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. نرخ نمونه‌برداری مورد استفاده توسعه الگوریتم ۶۴۰۰ هرتز و یا ۱۲۸ نمونه در سیکل برای فرکانس ۵۰ هرتز می‌باشد. در بخش ۲ به چگونگی تشخیص اغتشاش و تشکیل پنجه داده پرداخته خواهد شد. در بخش ۳ به ارائه طرح پیشنهادی و نحوه استخراج ویژگی‌های نرمال شده و سیستم تصمیم‌گیری پیشنهادی (SVM) پرداخته خواهد شد. در بخش ۴ به جزئیات مدل‌سازی و شبیه‌سازی خطای امپدانس بالا و سیستم توزیع پرداخته خواهد شد و در بخش ۵ به نتایج ارائه شده روش پیشنهادی برای تشخیص خطای HIF و مقایسه آن با سایر روش‌های اختصاص‌یافته، پرداخته خواهد شد.

خطای امپدانس^۱ بالا یکی از خطاهای رایج در شبکه‌های توزیع می‌باشد. این نوع خطای می‌تواند در اثر تماس هادی برق دار در خطوط هوائی با جسمی مانند یک درخت و یا قطع و افتادن هادی بر روی زمین به وجود آید؛ که در هنگام بروز چنین خطایی در محل برخورد هادی با جسم قوس الکتریکی^۲ به وجود می‌آید [۱]. بیشترین آمار گزارش شده خطای امپدانس بالا در شبکه‌های توزیع ۱۵-۲۵ kV می‌باشد [۲]. با توجه به بالا بودن امپدانس بین زمین و هادی، جریان جاری در محل خطای کم خواهد بود (در محدوده جریان‌های مجاز شبکه) و وابسته به مشخصات محل تماس (سطح تماس، رطوبت سطح، نوع بار، شرایط آب و هوایی و سطح ولتاژ) می‌تواند بسیار متفاوت باشد. طبق گزارش‌های منتشر شده جریان خطای امپدانس بالا بین ۰/۵ تا ۷۵ آمپر گزارش شده است [۳]. درواقع می‌توان خطای امپدانس بالا را به صورت خطایی که به اندازه کافی جریان نمی‌کشد تا باعث عملکرد تجهیزات رایج حفاظتی شبکه مانند (فیوز و رله و ...) تعریف کرد [۴]. از ویژگی‌های خطای امپدانس بالا علاوه بر کم بودن مقدار جریان جاری در محل خطای و قوس الکتریکی می‌توان به غیر سینوسی بودن جریان خطای، عدم تقارن در شکل موج جریان، ماهیت پویا و خاصیت مقاومتی خطای امپدانس بالا اشاره کرد [۵]. از اهداف و انگیزه‌های حفاظت در برابر خطای امپدانس بالا می‌توان به جلوگیری از صدمه دیدن افراد (به دلیل برق گرفتی ناشی از تماس با هادی شکسته)، جلوگیری از آتش‌سوزی (ناشی از قوس الکتریکی بر روی اجسام مانند درخت) و کاهش مدت زمان خاموشی اشاره کرد.

روش‌های مورداستفاده برای شناسایی خطای امپدانس بالا از اواسط دهه ۷۰ میلادی شروع شد که در ابتدا بیشتر مبتنی بر انرژی و مشخصات آماری و مؤلفه‌های فرکانسی جریان بوده‌اند و در سال‌های بعد با پیشرفت در زمینه پردازش سیگنال‌های گستته و پردازندۀ سیگنال دیجیتال انواع روش‌ها و الگوریتم‌های پردازش سیگنال و تکنیک‌های هوش مصنوعی و تشخیص الگو استفاده شده‌اند. برای تشخیص خطای امپدانس بالا روش‌های مختلف دسته‌بندی و بررسی کرد. در این مقاله می‌توان به شکل‌های مختلف دسته‌بندی و بررسی کرد. در این مقاله روش‌های تشخیص به دو دسته اصلی استخراج ویژگی‌ها و تصمیم‌گیری دسته‌بندی شده است.

منظور از فرایند استخراج ویژگی‌ها، انتخاب و محاسبه کمیت‌های عددی از داده‌های اندازه‌گیری و یا شبیه‌سازی شده برای تشخیص می‌باشد که می‌تواند در قالب حوزه زمان [۸-۶]، حوزه فرکانس مانند روش‌های مبتنی بر تبدیل فوریه^{۱۲} [۹-۱۱] و تبدیل‌های مبتنی بر حوزه زمان-فرکانس [۱۲-۱۴] طبقه‌بندی شده است.

پس از استخراج ویژگی‌های لازم، باید در مورد وقوع خطای HIF تصمیم‌گیری شود. یکی از روش‌های ساده برای تشخیص خطای

می‌گیرد. پنجره‌های داده شامل پنجره داده پیشا-اغتشاش^{۱۳} و پنجره داده پسا-اغتشاش^{۱۴} هستند و هر یک از این پنجره‌ها شامل دو سیکل داده می‌شوند که در شکل (۱) با $S^{[Pre]}$ ^{۱۵} و $S^{[Post]}$ ^{۱۶} مشخص شده‌اند. با توجه به اینکه در داده‌های اولین پنجره پسا-اغتشاش به دلیل وجود خطا در زمان تخمین زده شده بروز اغتشاش در سیکل‌های اول، امکان عدم تشخیص صحیح اغتشاش وجود داشته باشد از سه پنجره پسا-اغتشاش برای تشخیص خطای HIF استفاده شده است. هر دو پنجره متواالی پسا-اغتشاش در یک سیکل داده همپوشانی دارند که در شکل (۱) نشان داده شده است؛ بنابراین طول داده‌های موردنیاز برای الگوریتم، شش سیکل می‌باشد که دو سیکل آن قبل از بروز اغتشاش و چهار سیکل آن پس از لحظه بروز اغتشاش می‌باشد.

۳- طرح پیشنهادی جهت تشخیص خطای HIF

طرح کلی پیشنهادی برای تشخیص خطای امپدانس بالا در شکل (۲) نشان داده شده است. الگوریتم طرح پیشنهادی شامل ۳ مرحله اصلی می‌باشد؛ تشخیص اغتشاش و تشکیل پنجره داده (بخش ۲)، استخراج ویژگی‌ها و تضمیم گیری می‌باشد.

۳-۱- محاسبه و استخراج ویژگی‌ها

برای محاسبه ویژگی‌ها، ابتدا پنجره داده پیشا-اغتشاش و پسا-اغتشاش تشکیل شده از نمونه‌های سیگنال‌های ولتاژ و جریان با استفاده از تبدیل فوریه گسسته تجزیه می‌شوند و مؤلفه‌های فرکانسی هارمونیکی و بین هارمونیکی آن به دست می‌آید، سپس ویژگی‌های نرمال شده اغتشاش با استفاده از ضرایب فوریه به دست آمده محاسبه می‌شوند. برای محاسبه ویژگی اغتشاش واقع شده مقدار کمیت انتخاب شده در پنجره پیشا-اغتشاش از مقدار آن کمیت در پنجره پسا-اغتشاش کاسته می‌شود. برای نرمال کردن آن، حاصل تفیریق به دست آمده بر مقدار مؤلفه اصلی کمیت اغتشاش تقسیم می‌شود. به عبارت دیگر:

$$FG_{FFT-k}^{[Dsrh][VI]} = \frac{FG_{FFT-k}^{[Post][VI]} - FG_{FFT-k}^{[Pre][VI]}}{FG_{FFT-k}^{[Dsrh][VI]}} \quad (4)$$

در این رابطه G نشانگر کمیت موردنظر و زیر نوشت آن یعنی k_{FFT-K} بیانگر این است که این کمیت با استفاده از تبدیل مؤلفه ام تبدیل فوریه محاسبه شده است. زیر نوشت $[Dsrh]$ در بالای هر کمیت نشانگر این است که این کمیت مربوط به تغییر در مقدار ویژگی انتخاب شده بعد از بروز یک اغتشاش است. زیر نوشت (VI) نیز بیانگر این است که برای محاسبه این کمیت هم از مقادیر ولتاژ و هم از مقادیر جریان استفاده شده است. کمیت‌های محاسبه شده در حوزه فرکانس برای استفاده در طبقه‌بندی کننده عبارت اند از:

- **تغییر نرمال شده مقدار مؤلفه‌های فرکانسی جریان:**

$$Frms_{FFT-k}^{[Dsrh][I]} = \frac{Frms_{FFT-k}^{[Post][I]} - FG_{FFT-k}^{[Pre][I]}}{FG_{FFT-k}^{[Dsrh][VI]}}, \quad k > 1 \quad (5)$$

۲- تشخیص اغتشاش و تشکیل پنجره داده

منظور از اغتشاش^{۱۷} در این مقاله، بروز هر نوع واقعه‌ای در شبکه توزیع مانند قطع و وصل بار، ترانسفورماتور، بانک خازنی و یا بروز خطا به‌گونه‌ای باشد که تغییر جریان در شبکه بیش از مقدار آستانه تعیین شده برای تشخیص خطا باشد. ساده‌ترین روشی که با آن تمامی اغتشاشات موردنیاز در سیستم قابل شناسایی باشند، اندازه تغییر مقدار مؤثر جریان‌های فاز در دو نیم سیکل متوالی جریان می‌باشد. هر پنجره داده برای تشخیص بروز اغتشاش ($S^{[Dsrh]}$) در شکل (۱) شامل یک سیکل از نمونه‌های جریان فاز می‌باشد که داده‌های هر پنجره به دو نیم سیکل مساوی تقسیم می‌شود. مقدار مؤثر جریان در هر نیم سیکل از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

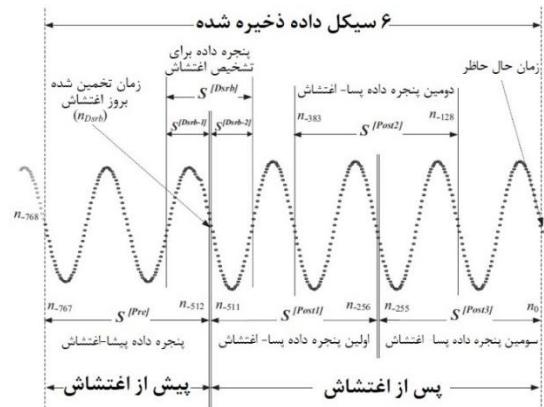
$$rms\left(S^{[Dsrh-1]}\right) = \sqrt{\frac{1}{N_S/2} \sum_{n=1}^{N_S/2} (S(n))^2} \quad (1)$$

$$rms\left(S^{[Dsrh-2]}\right) = \sqrt{\frac{1}{N_S/2} \sum_{n=(N_S/2)+1}^{N_S} (S(n))^2} \quad (2)$$

که N_S تعداد نمونه در هر سیکل و n نمونه جریان سیگنال می‌باشد. اندازه تغییر مقدار مؤثر در هر پنجره داده برای هر فاز مطابق زیر می‌باشد.

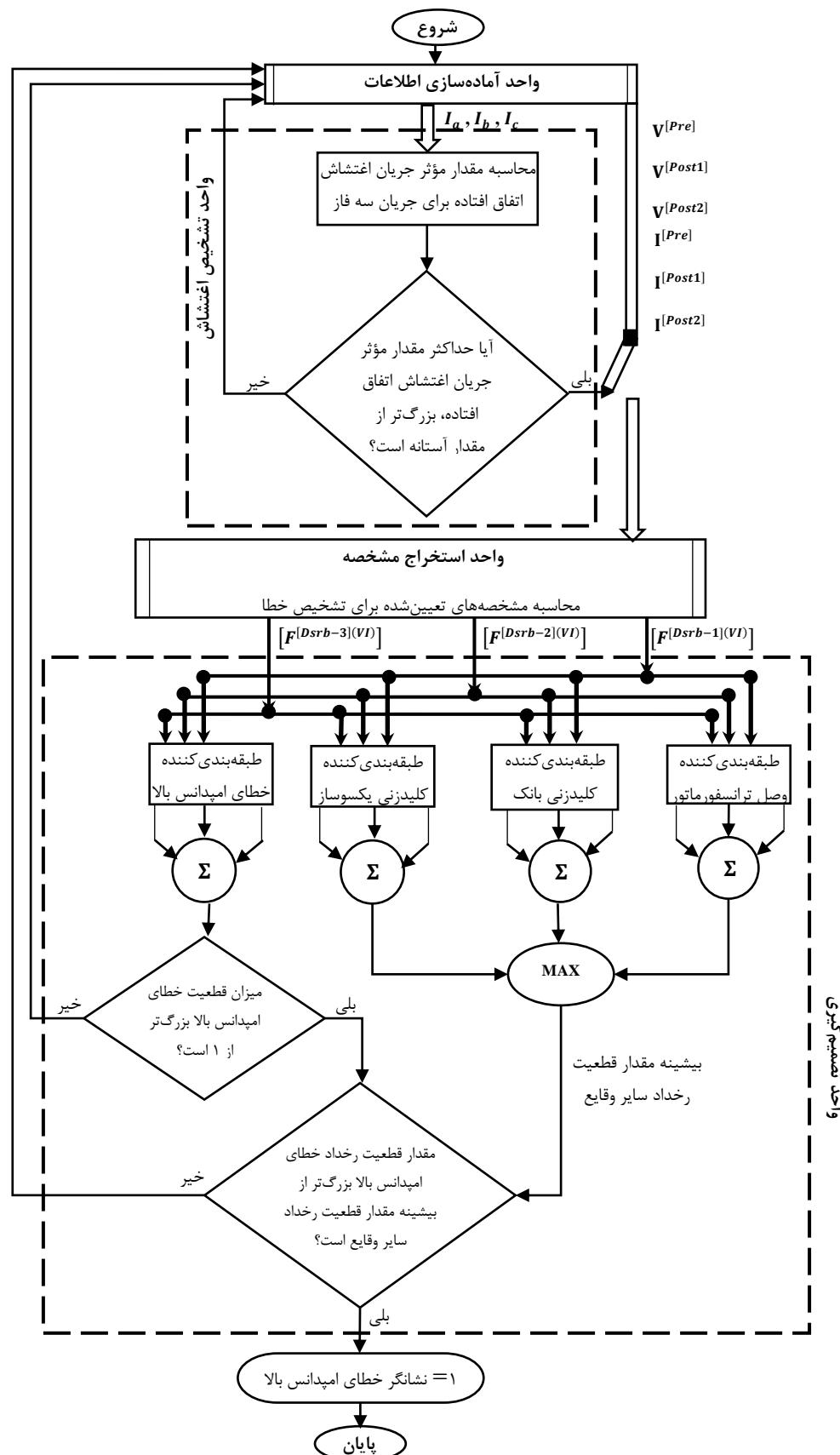
$$E_{Dsrh} - S = |rms\left(S^{[Dsrh-2]}\right) - rms\left(S^{[Dsrh-1]}\right)| \quad (3)$$

اگر اندازه تغییر در مقدار مؤثر برای هر یک از فازهای جریان از مقدار آستانه تعیین شده برای تشخیص اغتشاش بزرگ‌تر باشد، فازی که دارای بیشترین مقدار تغییر باشد به عنوان محتمل‌ترین فاز دچار خطا تعیین می‌گردد. در این مقاله با توجه به اینکه هدف تشخیص خطاهای امپدانس بالا با مقدار مؤثر بزرگ‌تر از دو آمپر بوده است، مقدار آستانه برابر با یک آمپر تعیین شده است.



شکل (۱): تشکیل پنجره‌های داده برای تشخیص اغتشاش

بعد از تشخیص بروز اغتشاش نقطه میانی پنجره داده تشکیل شده در شکل (۱) به عنوان لحظه میانی پنجره داده بروز اغتشاش^{۱۸} تعیین می‌گردد و به همراه خطا به واحد آماده‌سازی پنجره‌های داده اطلاعات ارسال می‌گردد. نمونه‌ها در پنجره‌های داده، در هر یک‌چهارم سیکل جدید می‌شوند و فرایند تشخیص اغتشاش بر روی داده‌های جدید انجام



شکل (۲): روند نمای کلی تشخیص خطای امپدانس بالا

نمونه‌های ولتاژ و جریان در هر یک از چهار پنجره داده‌ی $S^{[Post]}_1$ ، $S^{[Pre]}_1$ نمودار مؤثر تغییر نرمال شده مؤلفه دوم جریان و $S^{[Post]}_2$ ، $S^{[Pre]}_2$ که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند، محاسبه می‌شود. در جدول (۱) برای پنجره داده پسا-اغتشاش $S^{[Post]}_1$ در مقایسه با پنجره داده پیشا-اغتشاش $S^{[Pre]}_1$ محاسبه شده و به صورت مجموعه ویژگی‌های اولین پنجره داده اغتشاش $F^{[Dsrh-1](VI)}_1$ به واحد تصمیم‌گیری فرستاده می‌شود. این فرایند برای $S^{[Post]}_3$ و $S^{[Pre]}_3$ نیز انجام می‌شود تا ویژگی‌های پنجره داده اغتشاش دوم و سوم $F^{[Dsrh-2](VI)}_2$ و $F^{[Dsrh-3](VI)}_3$ نیز محاسبه شده و به واحد تصمیم‌گیری فرستاده شوند.

جدول (۱): ویژگی‌های استخراج شده با استفاده از تبدیل فوریه گسسته

شرح	نماد ویژگی	شماره ویژگی
مقادیر مؤثر تغییر نرمال شده مؤلفه دوم جریان (فرکانس ۱۰۰ هرتز)	$Frms^{[Dsrh](I)}_{FFT-2}$	F_1
مقادیر مؤثر تغییر نرمال شده مؤلفه دوم جریان (فرکانس ۱۵۰ هرتز)	$Frms^{[Dsrh](I)}_{FFT-3}$	F_2
مقادیر مؤثر تغییر نرمال شده مؤلفه دوم جریان (فرکانس ۲۵۰ هرتز)	$Frms^{[Dsrh](I)}_{FFT-5}$	F_3
مقادیر مؤثر تغییر نرمال شده مؤلفه دوم جریان (فرکانس ۳۵۰ هرتز)	$Frms^{[Dsrh](I)}_{FFT-7}$	F_4
مقادیر مؤثر تغییر نرمال شده مؤلفه بین هارمونیکی اول جریان (فرکانس ۲۵ هرتز)	$Frms^{[Dsrh](I)}_{FFT-0.5}$	F_5
مقادیر مؤثر تغییر نرمال شده مؤلفه بین هارمونیکی اول جریان (فرکانس ۷۵ هرتز)	$Frms^{[Dsrh](I)}_{FFT-1.5}$	F_6
مقادیر مؤثر تغییر نرمال شده مؤلفه دوم ولتاژ	$Frms^{[Dsrh](I)}_{FFT-1.5}$	F_7
مقادیر مؤثر تغییر نرمال شده مؤلفه سوم ولتاژ	$Frms^{[Dsrh](V)}_{FFT-3}$	F_8
مقادیر مؤثر تغییر نرمال شده مؤلفه پنجم ولتاژ	$Frms^{[Dsrh](V)}_{FFT-5}$	F_9
مقادیر مؤثر تغییر نرمال شده مؤلفه هفتم ولتاژ	$Frms^{[Dsrh](V)}_{FFT-7}$	F_{10}
تغییر مقادیر توان راکتیو نرمال شده مؤلفه سوم	$F^{[Dsrh](VI)}_{P FFT-3}$	F_{11}
تغییر مقادیر توان راکتیو نرمال شده مؤلفه پنجم	$F^{[Dsrh](VI)}_{P FFT-5}$	F_{12}
تغییر مقادیر توان راکتیو نرمال شده مؤلفه هفتم	$F^{[Dsrh](VI)}_{P FFT-7}$	F_{13}
تغییر مقادیر توان راکتیو نرمال شده مؤلفه فرکانس اصلی	$F^{[Dsrh](VI)}_{Q FFT-1}$	F_{14}
تغییر مقادیر توان راکتیو نرمال شده مؤلفه سوم	$F^{[Dsrh](VI)}_{Q FFT-3}$	F_{15}
تغییر مقادیر توان راکتیو نرمال شده مؤلفه پنجم	$F^{[Dsrh](VI)}_{Q FFT-5}$	F_{16}
تغییر مقادیر توان راکتیو نرمال شده مؤلفه هفتم	$F^{[Dsrh](VI)}_{Q FFT-7}$	F_{17}
نسبت تغییر مقادیر مؤثر مؤلفه سوم جریان به تغییر مقادیر مؤثر مؤلفه پنجم جریان	$Frms Ratio^{[Dsrh](I)}_{FFT-3/5}$	F_{18}
نسبت تغییر مقادیر مؤثر مؤلفه سوم جریان به تغییر مقادیر مؤثر مؤلفه هفتم جریان	$Frms Ratio^{[Dsrh](I)}_{FFT-3/7}$	F_{19}

که $FG^{[Pre](I)}_{FFT-k}$ و $Frms^{[Post](I)}_{FFT-k}$ به ترتیب مقدار مؤثر مؤلفه فرکانسی k حاصل از تبدیل فوریه پنجره داده پسا-اغتشاش و پیشا-اغتشاش سیگنال جریان هستند و

$$FG^{[Dsrh](I)}_{FFT-1} = Frms^{[Post](I)}_{FFT-1} - FG^{[Pre](I)}_{FFT-1} \quad (6)$$

• تغییر نرمال شده مقدار مؤثر مؤلفه‌های فرکانسی ولتاژ:

$$Frms^{[Dsrh](V)}_{FFT-k} = \frac{Frms^{[Post](V)}_{FFT-k} - FG^{[Pre](V)}_{FFT-k}}{FG^{[Dsrh](V)}_{FFT-k}}, \quad k > 1 \quad (7)$$

که $FG^{[Pre](V)}_{FFT-k}$ و $Frms^{[Post](V)}_{FFT-k}$ به ترتیب مقدار مؤثر مؤلفه فرکانسی k حاصل از تبدیل فوریه پنجره داده پسا-اغتشاش و پیشا-اغتشاش سیگنال ولتاژ هستند که

$$Frms^{[Dsrh](V)}_{FFT-1} = Frms^{[Post](V)}_{FFT-1} - FG^{[Pre](V)}_{FFT-1} \quad (8)$$

• تغییر نرمال شده مقدار توان راکتیو مؤلفه‌های فرکانسی:

$$F^{[Dsrh](VI)}_P = \frac{F^{[Post](VI)}_{P FFT-k} - F^{[Pre](VI)}_{P FFT-k}}{F^{[Dsrh](VI)}_{P FFT-1}} \quad (9)$$

$$F^{[Dsrh](VI)}_P = F^{[Post](VI)}_{P FFT-1} - F^{[Pre](VI)}_{P FFT-1} \quad (10)$$

که $F^{[Pre](VI)}_{P FFT-k}$ و $F^{[Post](VI)}_{P FFT-k}$ به ترتیب مقدار توان راکتیو فرکانسی حاصل از تبدیل فوریه پنجره داده پسا-اغتشاش و پیشا-اغتشاش سیگنال جریان و ولتاژ هستند و از طریق زیر برای هر پنجره داده محاسبه می‌شوند:

$$F^{[Dsrh](VI)}_P = P_k^{[Dsrh]} = |\bar{I}_k| \cdot |\bar{V}_k| \cdot \cos(\varphi_{\bar{V}_k} - \varphi_{\bar{I}_k}) \quad (11)$$

فوریه پنجره داده نمونه‌های جریان و ولتاژ هستند.

• تغییر نرمال شده مقدار توان راکتیو مؤلفه‌های فرکانسی:

$$F^{[Dsrh](VI)}_Q = \frac{F^{[Post](VI)}_{Q FFT-k} - F^{[Pre](VI)}_{Q FFT-k}}{F^{[Dsrh](VI)}_{Q FFT-k}} \quad (12)$$

از تبدیل فوریه پنجره داده پسا-اغتشاش و پیشا-اغتشاش سیگنال جریان و ولتاژ هستند و از طریق زیر برای هر پنجره داده محاسبه می‌شوند:

$$F^{[Dsrh](VI)}_Q = P_Q^{[Dsrh]} = |\bar{I}_k| \cdot |\bar{V}_k| \cdot \sin(\varphi_{\bar{V}_k} - \varphi_{\bar{I}_k}) \quad (13)$$

• تغییر نرمال شده مقدار توان راکتیو مؤلفه‌های فرکانسی:

$$Frms Ratio^{[Dsrh](I)}_{FFT-k/m} = \frac{Frms^{[Dsrh](I)}_{FFT-k}}{FG^{[Dsrh](I)}_{FFT-m}} \quad (14)$$

مقدار مؤثر مؤلفه فرکانسی مؤلفه k جریان و $FG^{[Dsrh](I)}_{FFT-m}$ مقدار مؤثر مؤلفه فرکانسی مؤلفه m جریان می‌باشد.

فهرست ویژگی‌های استخراج شده با استفاده از تبدیل فوریه گسسته در جدول (۱) نشان داده شده است. برای به کارگیری سیستم تصمیم‌گیری مبتنی بر رأی و استفاده از داده‌های سه پنجره پسا-اغتشاش برای استخراج ویژگی‌ها، ابتدا ضرایب تبدیل فوریه برای

- اگر مقدار قطعیت بروز همه وقایع کوچکتر و یا مساوی با یک باشد، اغتشاش رخداده به عنوان عدم بروز خطای امپدانس بالا اعلام می‌شود.

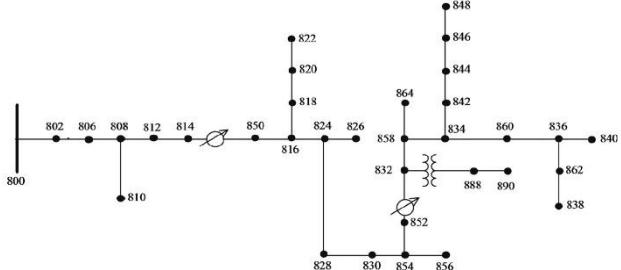
۴- مدل سازی و شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی برای تشخیص خطای امپدانس بالا و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر ویژگی‌های محاسبه شده و عملکرد روش پیشنهادی، شبکه ۳۴ شینه IEEE انتخاب و در نرم‌افزار EMTP-RV شبیه‌سازی شده است که نمودار تکخطی آن در شکل (۳) نشان داده شده است. این شبکه kV ۲۴/۹ از پنج خط هوایی سه فاز و تک فاز با چهار نوع هادی مختلف استفاده شده است که آرایش خطوط و مشخصات هادی‌ها در هر بخش مطابق با مقادیر ارائه شده در [۲۵] در نظر گرفته شده است. خطوط به صورت پارامتر ثابت (مدل CP در نرم‌افزار EMTP-RV) مدل شده‌اند.

در این شبکه از دو تنظیم‌کننده ولتاژ $kV_{\text{Nominal}} = 24/9/16$ که هر تنظیم‌کننده ولتاژ توسط سه ترانسفورماتور تک فاز شبیه‌سازی شده‌اند، استفاده شده است همچنین از یک ترانسفورماتور توزیع ۲۵۰۰ kVA و $kV = 69/24/9$ در گره ۸۰۰ استفاده شده است. تمامی بارهای شبکه (تک فاز و سه فاز) با امپدانس سری مطابق رابطه‌ی زیر معادل شده‌اند.

$$Z_{\text{Load}} = R_{\text{Load}} + jX_{\text{Load}} = \frac{(V_{\text{Nominal}})^2}{P_{\text{Load}} + jQ_{\text{Load}}} \quad (15)$$

که V_{Nominal} ولتاژ نامی شبکه و برابر با $kV = 24/9$ در نظر گرفته شده است و P_{Load} و Q_{Load} نیز توان اکتیو و راکتیو بار هستند که مقادیر آن‌ها در [۲۵] ارائه شده است.



شکل (۳): نقشه تکخطی شبکه ۳۴ شینه IEEE

۱-۴- مدل سازی بار

تمامی بارهای در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی، بارهای نقطه‌ای می‌باشند که این بارها به طور پیوسته و به صورت تصادفی در محدوده ± 10 تغییر می‌کند همچنین دو بار یکسوساز شش پالسه در باس‌های 830 و 840 در نظر گرفته شده‌اند که بیانگر بارهای هارمونیکی سیستم می‌باشند. تمامی بارهای مورد استفاده در سیستم در جدول (۲) ذکر شده است.

۲-۳- تصمیم‌گیری

پس از استخراج ویژگی‌ها، مجموعه ویژگی‌های آماده شده به SVM که توسط نرم‌افزار MATLAB آموزش دیده، وارد می‌شوند تا در مورد وجود و یا عدم وجود خطای امپدانس بالا تحلیل و بررسی صورت گیرد. SVM از جمله روش‌های تشخیص الگو می‌باشد که در مقایسه با شبکه‌های عصبی و منطق فازی روش جدیدتری می‌باشد که مبنای کار آن دسته‌بندی خطی داده‌ها می‌باشد و در تقسیم‌بندی خطی سعی می‌کند که خطوطی (و در حالت چند بعدی ابر صفحه) را به عنوان مرز الگوهای مختلف انتخاب کند که حداکثر حاشیه اطمینان را فراهم سازد [۲۶].

به منظور دقت تصمیم‌گیری در مورد وقوع خطای HIF از سه پنجره داده پسا-اغتشاش استفاده شده است. برای این منظور سه بردار $F^{[Dsr-2](VI)}$, $F^{[Dsr-1](VI)}$ و $F^{[Dsr-3](VI)}$ به سه SVM آموزش دیده برای تشخیص خطا وارد می‌شوند. خروجی SVM برای هر مجموعه ویژگی به صورت یک یا صفر می‌باشد که یک بیانگر، احتمال تعلق داده‌های ورودی به دسته‌ی خطای امپدانس بالا بیشتر از عدم تعلق آن می‌باشد. حاصل جمع خروجی طبقه‌بندی کننده SVM به عنوان مقدار قطعیت بروز خطای امپدانس بالا تعیین می‌شود. اگر برای داده‌های استخراج شده از دو پنجره پسا-اغتشاش، خروجی SVM برابر با یک شود، خطای امپدانس بالا تشخیص داده شده و نشانگر مربوط به بروز خطای امپدانس بالا فعال می‌شود. همچنین به منظور افزایش امنیت طرح حفاظتی پیشنهاد شده از سه طبقه‌بندی کننده SVM آموزش داده شده برای طبقه‌بندی کلید زنی بانک خازنی، کلید زنی ترانسفورماتور و کلید زنی بارهای غیرخطی (یکسوسازها) و همچنین از طبقه‌بندی کننده خطای امپدانس بالا استفاده شده است. سه بردار ویژگی تشکیل شده به هر یک از طبقه‌بندی کننده‌ها اعمال می‌شوند و مقدار بیشینه حاصل هر یک از طبقه‌بندی کننده‌ها به عنوان مقدار قطعیت بروز سایر وقایع تعیین شده و با مقدار قطعیت بروز خطای امپدانس بالا مقایسه می‌شود.

فرایند تصمیم‌گیری در مورد خطای امپدانس بالا را می‌توان به صورت قواعد زیر بیان کرد:

- اگر مقدار قطعیت بروز خطای امپدانس بالا بزرگ‌تر از یک و بزرگ‌تر از مقدار قطعیت بروز سایر وقایع باشد، اغتشاش رخداد خطای امپدانس بالا می‌باشد.
- اگر مقدار قطعیت بروز خطای امپدانس بالا بزرگ‌تر از یک و مساوی با مقدار قطعیت بروز سایر وقایع باشد، تصمیم‌گیری در مورد اغتشاش رخداد منوط به خروجی طبقه‌بندی کننده‌ها برای پنجره‌های داده بعدی می‌باشد.

جدول (۲): مقدار متوسط بارهای سیستم قدرت

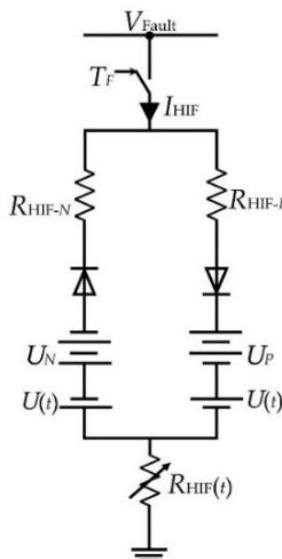
Load no.	Node	Phase a		Phase b		Phase c	
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
L ₁	۸	۱۳۵	۱۰۵	۱۳۵	۱۰۵	۱۳۵	۱۰۵
L ₂	۸۹۰	۷۵	۴۰	۷۵	۴۰	۷۵	۴۰
L ₃	۸۹۰	۷۵	۳۵	۷۵	۳۵	۷۵	۳۵
L ₄	۸۳۰	۷	۴	۷	۴	۷	۴
L ₅	۸۴۸	۶	۳	۶	۳	۶	۳
L ₆	۸۳۰	۲	۲	۲	۲	۲	۲
L ₇	۸۴۰	۹	۷	۹	۷	۹	۷
L ₈	۸۴۸	۲	۳	۲	۳	۲	۳
L ₉	۸۶۰	۲	۸	۶	۱۰	۹۶	۵۵
L ₁₀	۸۶۰	۱۸	۹	۲۲	۱۱	۰	۰
L ₁₁	۸۰۶	۰	۰	۳۰	۱۵	۲۵	۱۴
L ₁₂	۸۱۰	۰	۰	۱۶	۸	۰	۰
L ₁₃	۸۲۰	۳۴	۱۷	۰	۰	۰	۰
L ₁₄	۸۲۲	۱۳۵	۷۰	۰	۰	۰	۰
L ₁₅	۸۲۴	۰	۰	۵	۲	۴	۲
L ₁₆	۸۲۶	۰	۰	۴۰	۲۰	۰	۰
L ₁₇	۸۲۸	۷	۳	۰	۰	۰	۰
L ₁₈	۸۵۶	۰	۰	۴	۲	۰	۰
L ₁₉	۸۳۴	۴	۲	۱۵	۸	۱۳	۷
L ₂₀	۸۶۴	۲	۱	۰	۰	۰	۰
L ₂₁	۸۳۶	۳۰	۱۵	۱۰	۶	۴۲	۲۲
L ₂₂	۸۳۸	۰	۰	۲۸	۱۴	۰	۰
L ₂₃	۸۴۴	۲۸	۱۴	۰	۰	۰	۰
L ₂₄	۸۴۶	۰	۰	۲۵	۱۲	۲۰	۱۱
L ₂₅	۸۴۸	۰	۰	۲۳	۱۱	۰	۰
Total		۵۷۱	۳۲۸	۵۲۳	۲۱۸	۵۱۱	۳۱۰

جدول (۳): بازه تغییرات مقادیر پارامترهای مدل خطای امپدانس بالا

پارامتر مدل خطای امپدانس بالا	بازه تغییرات پارامتر در شبیه‌سازی‌ها
R_{HIF-P}	$0.09 \text{ تا } 1(k\Omega)$
R_{HIF-N}	$0.1 \text{ تا } 1(k\Omega)$
$R_{HIF}(t)$	$\pm 0.1(t) \cdot R_{HIF-P}$
$U_P(kV)$	$4 \text{ تا } 27(kV)$
$U_N(kV)$	$5 \text{ تا } 8.5(kV)$
$U(t)$	$\pm 0.1(t) \cdot U_P$
مقدار مؤثر جریان خطا	۳ تا ۵۰(A)

۴-۲- مدل‌سازی خطای امپدانس بالا

برای مدل‌سازی خطای امپدانس بالا از مدل دو دیوبدی به دلیل سادگی و توانایی ارائه مشخصات اصلی خطای امپدانس بالا که در بخش ۱ به معروفی آن پرداخته شد، توسط محققین بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷، ۲۱، ۲۰]. مدل مداری خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده در شکل (۴) نشان داده شده است.



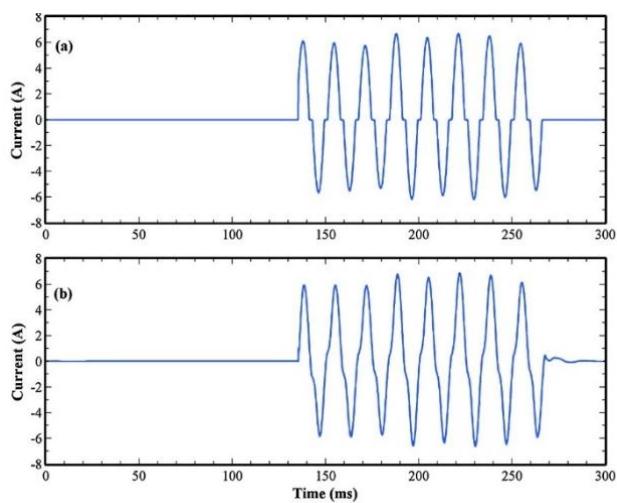
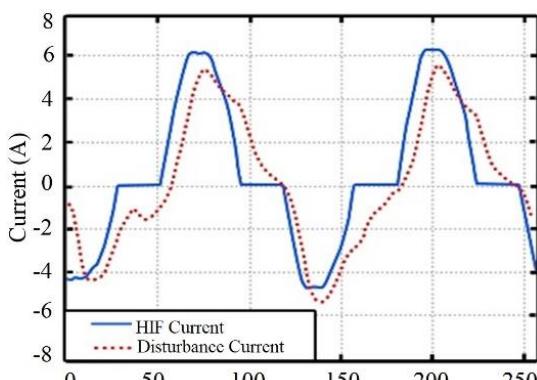
شکل (۴): مدل مداری خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده

مقدار مقاومت قوس می‌باشدند که در شبیه‌سازی‌ها به نحوی تنظیم شده‌اند که مقدار مؤثر خطا بین ۰.۱٪ تا ۱۵٪ جریان بار کامل سیستم باشد. U_P و U_N مقادیر ولتاژ آستانه شروع خطا در نیم سیکل‌های مثبت و منفی می‌باشند $U_N < U_P$. در شرایطی که ولتاژ خطا بزرگ‌تر از مقدار ولتاژ آستانه شروع خطا در نیم سیکل مثبت باشد و $V_{Fault} > U_P$ ولتاژ خطا کوچک‌تر از مقدار ولتاژ آستانه شروع خطا در نیم سیکل منفی $U_N < V_{Fault}$ باشد، جریان خطا در مدار جاری می‌شود ولی اگر $U_N < V_{Fault} < U_P$ باشد، جریان خطای امپدانس بالا مساوی با صفر می‌باشد و جریان در مدار جاری نمی‌شود. $R_{HIF}(t)$ مقاومت متغیر بازمان می‌باشد که در هر سیکل مقدار آن به صورت تصادفی تغییر می‌کند و $U(t)$ بیانگر ماهیت پویا و متغیر بازمان خطای امپدانس بالا می‌باشد. بازه تغییرات مقادیر تعیین شده برای این پارامترها در شبیه‌سازی‌های مختلف مختلف در جدول (۳) نشان داده شده است. خطای امپدانس بالا در نقاط مختلف شبکه و فازهای مختلف با مشخصاتی که به صورت تصادفی تعیین شده‌اند، شبیه‌سازی شده و مقادیر ولتاژ و جریان در محل تعذیب اصلی شبکه برای تحلیل و بررسی ذخیره شده‌اند. در شکل (۵) نمونه از جریان خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

جدول (۴): مجموعه وقایع شبیه‌سازی شده برای آموزش و ارزیابی روش پیشنهادی

تعداد موارد تشخیص داده شده توسط الگوریتم تشخیص اغتشاش	تعداد موارد شبیه‌سازی شده	وقایع شبیه‌سازی شده
۵۵	۵۵	خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده
۲۷	۳۰	قطع و وصل بارهای خطی
۱۲	۱۴	قطع و وصل یکسوسازها
۱۲	۱۲	قطع و وصل موتورهای القائی
۱۶	۱۶	قطع و وصل بانکهای خازنی
۲۹	۲۹	خطای امپدانس پایین (بدون قوس)
۱۵۱	۱۵۶	جمع کل موارد شبیه‌سازی شده

شکل (۶) سیگنال جریان یک خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده در فاز b گره ۸۵۸ شبکه و اختلاف جریان اندازه‌گیری شده در محل تغذیه اصلی شبکه بعد از وقوع خطا (سیگنال اغتشاش) در مقایسه با قبل از وقوع خطا را نشان می‌دهد. دامنه مؤثر مقادیر مؤلفه‌های فرکانسی جریان خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده در محل تغذیه اصلی شبکه بعد از وقوع خطا در مقایسه با مقادیر مؤثر مؤلفه‌های فرکانسی جریان خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده در فاز c گره ۸۶۰ شبکه و اختلاف جریان اندازه‌گیری شده در محل تغذیه اصلی شبکه بعد از وقوع خطا (سیگنال اغتشاش) در مقایسه با قبل از وقوع خطا را نشان می‌دهد. دامنه مؤثر مقادیر مؤلفه‌های فرکانسی جریان خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده در محل تغذیه اصلی شبکه بعد از وقوع خطا در مقایسه با مقادیر مؤثر مؤلفه‌های فرکانسی جریان خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده در فاز d گره ۸۶۸ شبکه و اختلاف جریان اندازه‌گیری شده در محل تغذیه اصلی شبکه بعد از وقوع خطا برای فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است. همچنین در شکل (۷) سیگنال جریان یک خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده در فاز e گره ۸۷۰ شبکه و اختلاف جریان اندازه‌گیری شده در محل تغذیه اصلی شبکه بعد از وقوع خطا برای فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است. در شکل‌های (۸) تا (۱۰) نیز سیگنال‌های جریان وصل بانک خازنی، وصل یکسوساز و وصل مotor القائی نشان داده شده‌اند.



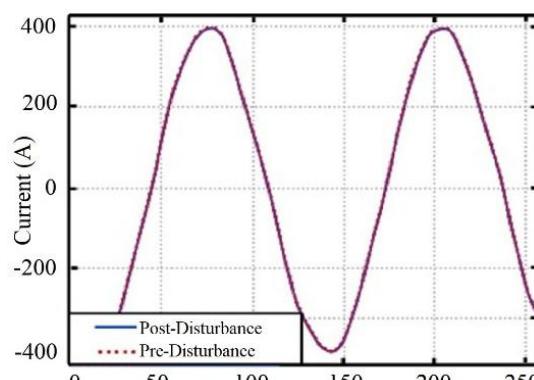
شکل (۵): نمونه‌ای از شکل موج جریان خطای HIF شبیه‌سازی شده

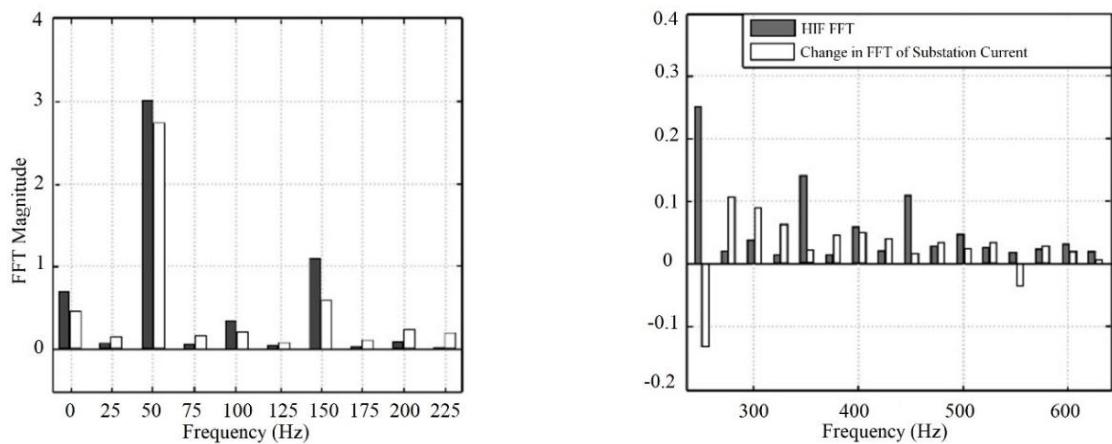
- (a) در محل خطا (گره ۸۳۰)
(b) جریان گره ۸۰۰ به دلیل رخ داد خطا در گره ۸۳۰

۴-۳- شبیه‌سازی وقایع شبکه

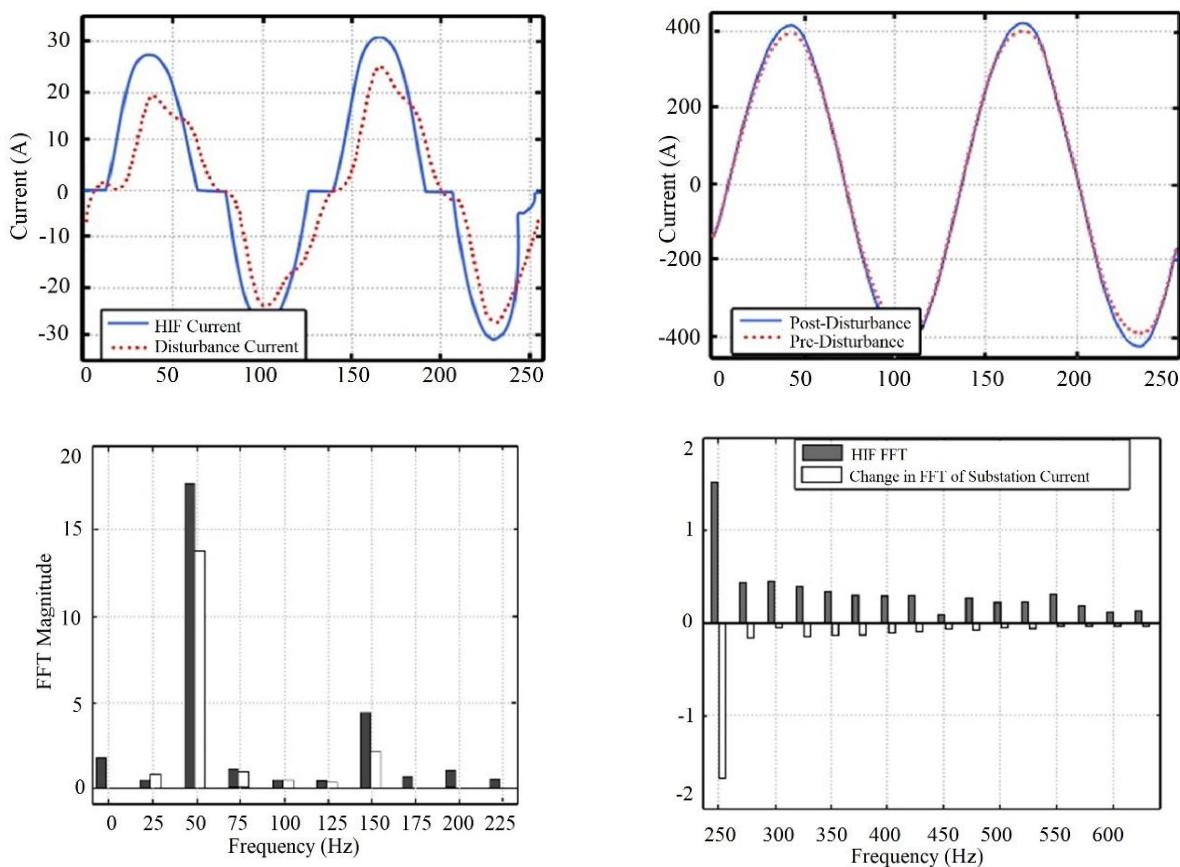
علاوه بر خطای امپدانس بالا، وقایع دیگری نیز که در شبکه‌های توزیع اتفاق می‌افتد مانند قطع و وصل بارهای خطی، یکسوسازها، موتورهای القائی، بانک‌های خازنی و خطای امپدانس پایین (بدون قوس) نیز در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده‌اند تا بتوان عملکرد روش تشخیص خطای به درستی را ارزیابی کرد. فهرست وقایع شبیه‌سازی شده در جدول (۴) نشان داده شده است.

زمان شروع خطا در شبیه‌سازی‌های مختلف به صورت تصادفی بین ۱۰۰ تا ۱۴۰ میلی‌ثانیه پس از شروع شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. بازه زمانی در شبیه‌سازی‌ها ۸۶۸ نانوثانیه انتخاب شده و سیگنال‌های ولتاژ و جریان در محور اصلی تغذیه شبکه (گره ۸۰۰) با نرخ ۱۵۰ ذخیره شده‌اند. این نرخ معادل فرکانس نمونه برداری ۶۴۰۰ هرتز یا ۱۲۸ نمونه در سیکل برای فرکانس ۵۰ هرتز می‌باشد.

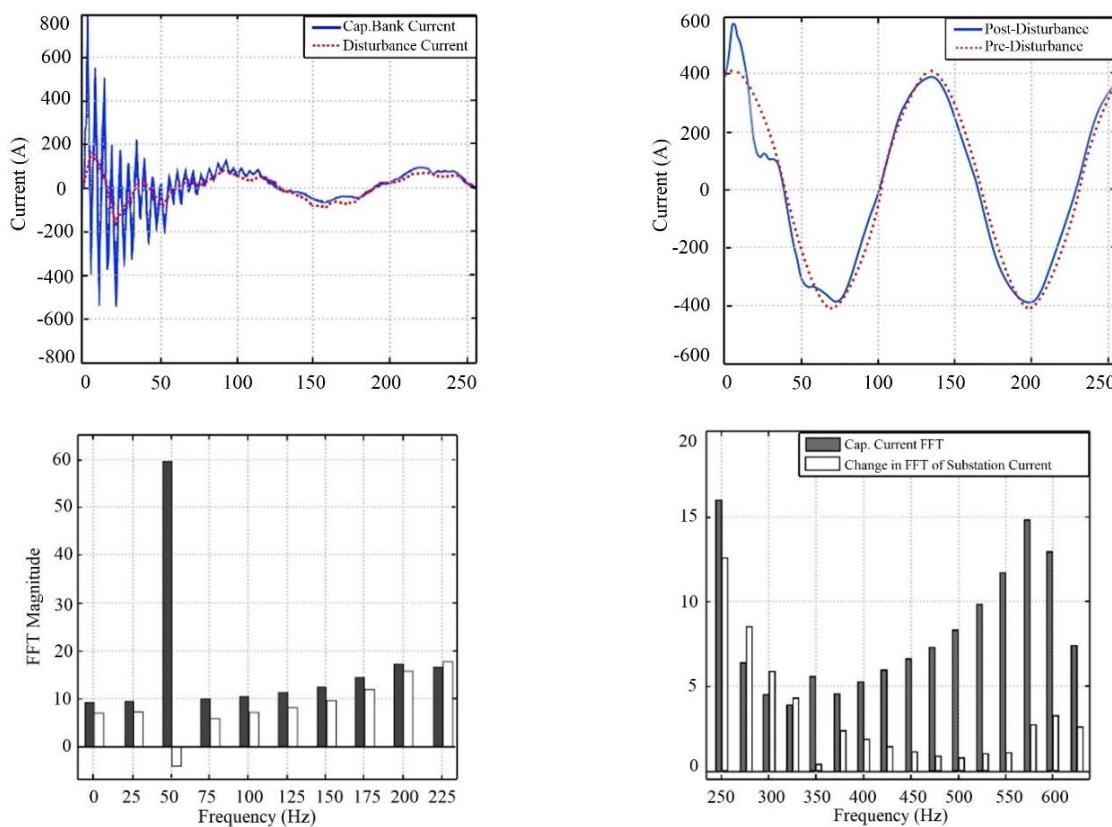




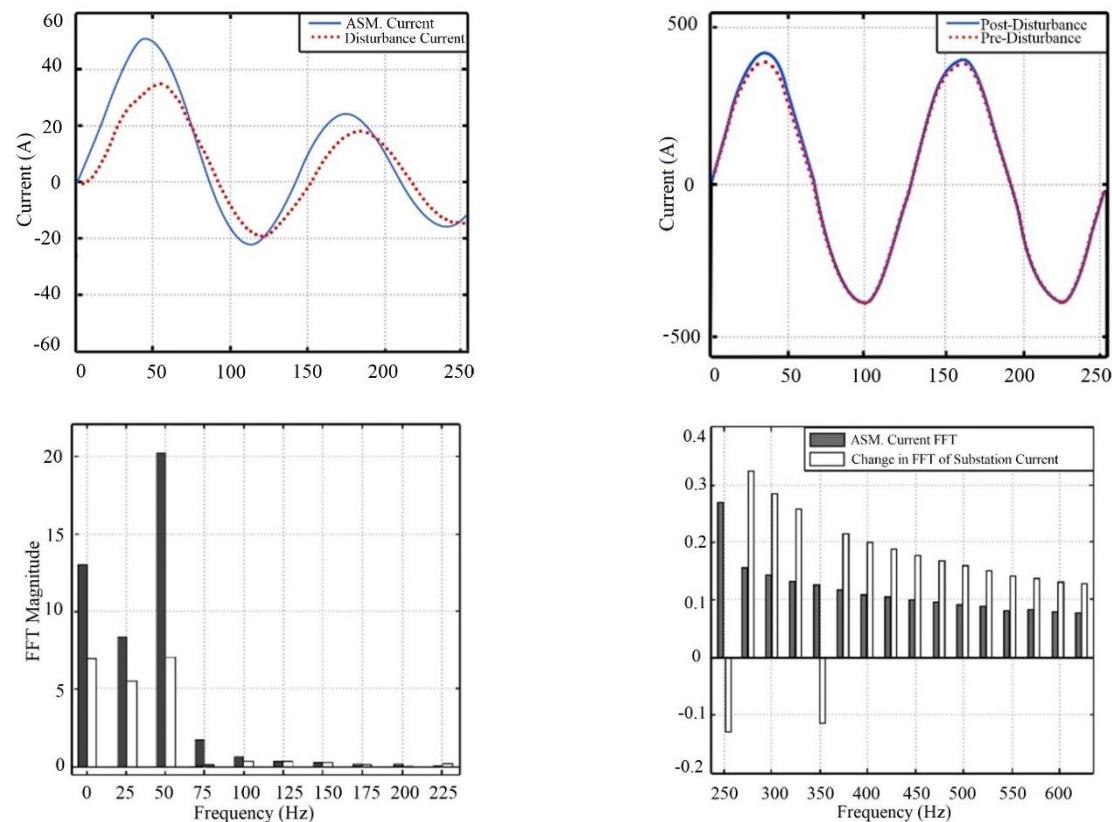
شکل (۶): خطای امپدانس بالای شبیه‌سازی شده با دامنه کم



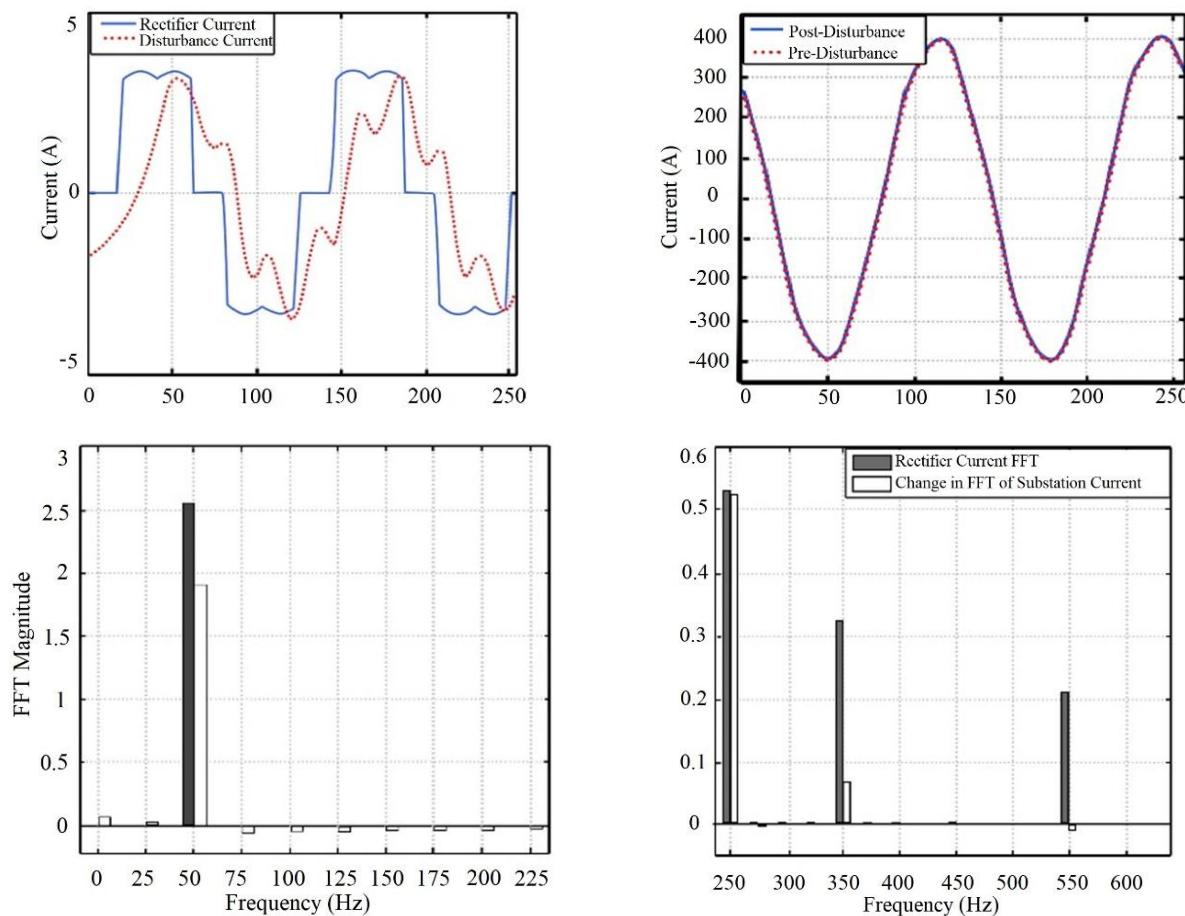
شکل (۷): خطای امپدانس بالای شبیه‌سازی شده با دامنه متوسط



شکل (۸): وصل بانک خازنی (بانک خازنی متصل به گره ۸۲۴)



شکل (۹): وصل موتور القائی (موتور ۲۵۰ کیلووات ۶ کیلوولت متصل به گره ۸۴۰)



شکل (۱۰): وصل یکسوز ساز (یکسوساز متصل به گره ۸۴۸)

آموزش و آزمایش طبقه‌بندی کننده SVM می‌باشد، به این معنی که در هر مرحله %۸۰ مجموعه داده فراهم شده از وقایع شبیه‌سازی شده در جدول (۴) برای آموزش استفاده شده و %۲۰ برای آزمایش و این کار پنج بار تکرار شده است و نتایج حاصل از عملکرد کلی روش پیشنهادی تشخیص خطای امپدانس بالا در جدول (۵) نشان داده شده است.

در جدول (۶) مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی و برخی از مقالات پر استناد منتشر شده سال‌های اخیر در زمینه تشخیص خطای امپدانس بالا، در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. با توجه به اینکه نتایج هر مقاله بر روی شبکه‌های توزیع مختلف که هر کدام ویژگی‌های خاص خود را دارند و همچنین مدل‌های مداری خطای امپدانس بالا، بارها و رویدادهای غیر خطای HIF شبیه‌سازی شده و شرایط کار مختلف، مقایسه روش‌ها صرفاً با نتایج کمی روش قابل اعتمادی نیست. از مشاهده جدول (۶) می‌توان مشاهده کرد که روش پیشنهادی نتایج قابل قبولی از خود ارائه کرده است.

۵- نتایج عددی

در این بخش از مقاله، نتایج به کارگیری روش پیشنهادی تشخیص خطای امپدانس بالا ارائه خواهد شد. به منظور تحلیل مناسب نتایج روش پیشنهادی از شاخص‌های دقت، قابلیت اطمینان و امنیت استفاده شده است. دقت یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی یک طبقه‌بندی کننده است که با تقسیم مواردی که صحیح طبقه‌بندی شده‌اند به تعداد کل موارد مورد آزمایش محاسبه می‌شود. شاخص قابلیت اطمینان طرح حفاظتی از طریق تقسیم تعداد خطاهای امپدانس بالا تشخیص داده شده به تعداد کل خطاهای امپدانس بالا در مجموعه داده‌های استفاده شده به دست می‌آید و امنیت با تقسیم تعداد وقایع غیر خطای که خطای تشخیص داده شده‌اند به تعداد کل وقایع غیر خطای در مجموعه داده‌های استفاده شده، به دست می‌آید.

در این مقاله برای آموزش طبقه‌بندی کننده SVM از روش ارزیابی متقابل پنج-بخشی برای محاسبه شاخص‌ها استفاده شده است و کلیه شاخص‌های ارائه شده در این قسمت میانگین نتایج پنج بار

مراجع

- Gadanayak, D. A. (2021). A Review on High-Impedance Ground Fault Detection Techniques in Distribution Networks. *Green Technology for Smart City and Society*, 299-309.
- Tengdin, J., & Westfall, R. (1994). High impedance fault detection technology report of PSRC working group D15.
- Benner, C. L., & Russell, B. D. (1997). Practical high-impedance fault detection on distribution feeders. *IEEE Transactions on Industry applications*, 33(3), 635-640.
- Mamishev, A. V., Russell, B. D., & Benner, C. L. (1995, May). Analysis of high impedance faults using fractal techniques. In *Proceedings of Power Industry Computer Applications Conference* (pp. 401-406). IEEE.
- Ghaderi, A., Ginn III, H. L., & Mohammadpour, H. A. (2017). High impedance fault detection: A review. *Electric Power Systems Research*, 143, 376-388.
- Sekar, K., & Mohanty, N. K. (2020). A fuzzy rule base approach for High Impedance Fault detection in distribution system using Morphology Gradient filter. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 32(3), 177-185.
- Kavaskar, S., & Mohanty, N. K. (2019). Detection of high impedance fault in distribution networks. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(1), 5-13.
- Silva, S., Costa, P., Santana, M., & Leite, D. (2020). Evolving neuro-fuzzy network for real-time high impedance fault detection and classification. *Neural Computing and Applications*, 32(12), 7597-7610.
- Sekar, K., & Mohanty, N. K. (2018). Data mining-based high impedance fault detection using mathematical morphology. *Computers & Electrical Engineering*, 69, 129-141.
- Aziz, M. A., Hassan, M. M., & Zahab, E. A. (2012). High-impedance faults analysis in distribution networks using an adaptive neuro fuzzy inference system. *Electric Power Components and Systems*, 40(11), 1300-1318.
- Sahoo, S., & Baran, M. E. (2014, April). A method to detect high impedance faults in distribution feeders. In *2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition* (pp. 1-6). IEEE.
- Zhang, S., Xiao, X., & He, Z. (2020). Detection of high- impedance fault in distribution network based on time-frequency entropy of wavelet transform. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 15(6), 844-853.
- Biswal, M., Ghore, S., Malik, O. P., & Bansal, R. C. (2021). Development of time-frequency based approach to detect high impedance fault in an inverter interfaced distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- Bhat, A. U. Q., Prakash, A., Tayal, V. K., & Choudekar, P. (2021). High Impedance Fault Analysis

جدول (۵): عملکرد کلی روش پیشنهادی تشخیص خطای امپدانس بالا

		مجموعه داده‌های آزمایش (۳۰ مورد)		
امنیت	قابلیت اطمینان	دقیق	دقیق	امنیت
۹۶/۲	۹۸/۵	۹۸/۸	۹۵/۲	۹۶

جدول (۶): مقایسه نتایج برخی از روش‌های منتشر شده با روش پیشنهادی

روش	دقیق	قابلیت اطمینان	امنیت	پنجره‌های داده
روش پیشنهادی	۹۷/۲	۹۸/۵	۹۸/۸	۴ سیکل
[۸]	۹۹/۳۴	۹۸/۴۷	۱۰۰	۲
[۹]	-	۹۶/۴	۹۸/۰	-
[۱۰]	-	۹۶/۵	۹۶	-
[۱۱]	۹۴/۹	۹۰	۹۰/۹	۱/۵
[۱۲]	۹۸/۳	۹۵	۱۰۰	۴
[۱۷]	۹۶/۱	۹۸/۵	۹۳/۵	۲
[۱۸]	۹۷/۳	۹۸/۳	۹۶/۳	۱/۵
[۲۰]	۹۳/۶	۱۰۰	۸۱/۵	۱
[۲۱]	۹۵/۲	۹۶/۳	۹۴	۴

۶- نتیجه

در این مقاله، روشی دقیق و ایمن برای تشخیص خطای امپدانس بالا ارائه شده است. روش پیشنهادی با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده ناشی از ولتاژ و جریان از طریق تبدیل فوریه گسسته، تفاوت بین خطای امپدانس بالا با سایر وقایع سیستم توزیع به درستی تشخیص داده و همچنین با استفاده از سیستم تصمیم‌گیری مبتنی بر رأی و مقایسه مقدار قطعیت رخداد سایر وقایع شبکه با خطای امپدانس بالا قابلیت اطمینان و امنیت طرح پیشنهادی، به طور چشم‌گیری افزایش داده است. برای ارزیابی روش پیشنهادی، شبکه ۳۴ شینه IEEE همراه با سایر رویدادهای شبکه در محیط نرم‌افزاری EMTP-RV شبیه‌سازی شده است که نتایج حاصل از روش پیشنهادی نشان‌دهنده عملکرد مطلوب این روش جهت تشخیص و تمایز خطای امپدانس بالا با سایر وقایع شبکه می‌باشد.

زیرنویس‌ها

- ¹ High Impedance Fault (HIF)
- ² Arc
- ³ Threshold
- ⁴ Classifiers
- ⁵ Neural Networks
- ⁶ Support Vector Machine (SVM)
- ⁷ Fuzzy Logic
- ⁸ Discrete Fourier Transform (DFT)
- ⁹ Fast Fourier Transform (FFT)
- ¹⁰ Degree of Confidence
- ¹¹ Disturbance
- ¹² Inception
- ¹³ Pre- Disturbance
- ¹⁴ Post- Disturbance

- of Distributed Power System Network Using Discrete Wavelet Transform. In Advances in Smart Communication and Imaging Systems (pp. 561-576). Springer, Singapore.
- Gadanayak, D. A., & Mallick, R. K. (2019). Interharmonics based high impedance fault detection in distribution systems using maximum overlap wavelet packet transform and a modified empirical mode decomposition. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 112, 282-293.
- Silva, S., Costa, P., Gouvea, M., Lacerda, A., Alves, F., & Leite, D. (2018). High impedance fault detection in power distribution systems using wavelet transform and evolving neural network. Electric power systems research, 154, 474-483.
- Moravej, Z., Mortazavi, S. H., & Shahrtash, S. M. (2015). DT- CWT based event feature extraction for high impedance faults detection in distribution system. International Transactions on Electrical Energy Systems, 25(12), 3288-3303.
- Sarlak, M., & Shahrtash, S. M. (2011). High impedance fault detection using combination of multi-layer perceptron neural networks based on multi-resolution morphological gradient features of current waveform. IET generation, transmission & distribution, 5(5), 588-595.
- AsghariGovar, S., Pourghasem, P., & Seyedi, H. (2019). High impedance fault protection scheme for smart grids based on WPT and ELM considering evolving and cross-country faults. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 107, 412-421.
- Ghaderi, A., Mohammadpour, H. A., Ginn, H. L., & Shin, Y. J. (2014). High-impedance fault detection in the distribution network using the time-frequency-based algorithm. IEEE Transactions on Power Delivery, 30(3), 1260-1268.
- Mortazavi, S. H., Moravej, Z., & Shahrtash, S. M. (2018). A hybrid method for arcing faults detection in large distribution networks. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 94, 141-150.
- Mohammadnian, Y., Amraee, T., & Soroudi, A. (2019). Fault detection in distribution networks in presence of distributed generations using a data mining–driven wavelet transform. IET Smart Grid, 2(2), 163-171.
- Cui, Q., & Weng, Y. (2019). Enhance High Impedance Fault Detection and Location Accuracy via \$PMUs. IEEE Transactions on Smart Grid, 11(1), 797-809.
- Vapnik, V., & Chervonenkis, A. (1991). The necessary and sufficient conditions for consistency in the empirical risk minimization method. Pattern Recognition and Image Analysis, 1(3), 283-305.
- Feeders, D. T. (2013). IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee's, Distribution Test Feeder Working Group. ed.