
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 امیدانس 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 امیدانس 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 امیدانس بالا استفاده می‌کنند، در روش پیشنهاد شده با استفاده از الگوریتم تشخیص بروز اغتشاش در شبکه، از تغییرات نرمال شده ویژگی‌های انتخاب شده به منظور مقایسه بین پنجره‌های داده پس از بروز خطا و پیش از بروز خطا، استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از پنجره‌های داده پسا-اغتشاش و توسعه یک سیستم تصمیم‌گیری بر اساس خروجی طبقه‌بندی کننده SVM و مقایسه مقدار قطعیت رخداد سایر وقایع شبکه با خطای امیدانس 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 امیدانس بالا، تبدیل فوریه گسسته، تبدیل فوریه سریع، تشخیص اغتشاش، 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

خطای امیدانس^۱ بالا یکی از خطاهای رایج در شبکه‌های توزیع می‌باشد. این نوع خطا می‌تواند در اثر تماس هادی برق‌دار در خطوط هوایی 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 گزارش‌شده خطای امیدانس بالا در شبکه‌های توزیع ۱۵-۲۵ kV می‌باشد [۲]. با توجه به بالا بودن امیدانس بین زمین و هادی، جریان جاری در محل خطا 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 منتشرشده جریان خطای امیدانس بالا بین ۰/۵ تا ۷۵ آمپر گزارش‌شده است [۳]. در واقع می‌توان خطای امیدانس بالا را به‌صورت خطایی که به‌اندازه کافی جریان نمی‌کشد تا باعث عملکرد تجهیزات رایج حفاظتی شبکه مانند (فیوز و رله و ...) تعریف کرد [۴]. از ویژگی‌های خطای امیدانس بالا علاوه بر کم بودن مقدار جریان جاری در محل خطا و قوس الکتریکی می‌توان به غیر سینوسی بودن جریان خطا، عدم تقارن در شکل موج جریان، ماهیت پویا و خاصیت مقاومتی خطای امیدانس بالا اشاره کرد [۵]. از اهداف و انگیزه‌های حفاظت در برابر خطای امیدانس بالا می‌توان به جلوگیری از صدمه دیدن افراد (به دلیل برق‌گرفتی ناشی از تماس با هادی شکسته)، جلوگیری از آتش‌سوزی (ناشی از قوس الکتریکی بر روی اجسام مانند درخت) و کاهش مدت‌زمان خاموشی اشاره کرد.

روش‌های مورداستفاده برای شناسایی خطای امیدانس بالا از اواسط دهه‌ی 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 زمینه‌ی پردازش سیگنال‌های گسسته و پردازنده سیگنال دیجیتال انواع روش‌ها و الگوریتم‌های پردازش سیگنال و تکنیک‌های هوش مصنوعی و تشخیص الگو استفاده‌شده‌اند. برای تشخیص خطای امیدانس بالا روش‌های مختلفی ارائه‌شده است که می‌توان به شکل‌های مختلف دسته‌بندی و بررسی کرد. در این مقاله روش‌های تشخیص به دو دسته اصلی استخراج ویژگی‌ها و تصمیم‌گیری دسته‌بندی‌شده است.

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

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

تصمیم‌گیری با استفاده از مقادیر آستانه^۳ می‌باشد [۱۵، ۱۶]. مشکل اصلی روش‌هایی که از مقادیر آستانه برای تشخیص خطا 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 راه‌حل مناسبی به‌جای استفاده از مقادیر آستانه می‌باشد. منظور از روش‌های هوشمند تشخیص الگو برای تشخیص خطای امیدانس بالا به‌کارگیری طبقه‌بندی‌کننده‌های^۴ است که برای تشخیص خطا توسط مجموعه‌ای از ویژگی‌ها آموزش‌دیده‌اند و پس از آموزش قادر به تمایز بین ویژگی‌های مربوط به خطا از وقایع غیر خطا هستند که این طبقه‌بندی‌کننده‌ها شامل شبکه‌های عصبی^۵ [۱۷-۱۹]، ماشین بردار پشتیبان^۶ [۲۰-۲۲]، منطق فازی^۷ [۷، ۲۳] و ترکیب روش‌های فازی و عصبی [۸، ۹] می‌باشند. جهت کسب اطلاعات بیشتر به‌منظور مرور و بررسی روش‌های تشخیص خطای امیدانس بالا می‌توان از مرجع [۵] استفاده نمود.

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

- استفاده از تبدیل فوریه گسسته^۸ جهت استخراج ویژگی‌ها (به‌منظور پیاده‌سازی بهینه تبدیل فوریه گسسته از نظر تعداد عملیات ریاضی لازم برای محاسبه تبدیل، از تبدیل فوریه سریع^۹ استفاده‌شده است) و اعمال آن‌ها به طبقه‌بندی‌کننده SVM جهت تشخیص خطای امیدانس بالا
 - استفاده از یک سیستم تصمیم‌گیری مبتنی بر رأی بر اساس تجمع خروجی طبقه‌بندی‌کننده SVM (جهت بهبود دقت تصمیم‌گیری در مورد خطای HIF) و مقایسه مقدار قطعیت^{۱۰} رخداد سایر وقایع شبکه با خطای امیدانس بالا (جهت بهبود افزایش امنیت طرح حفاظتی پیشنهادشده)
- به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی، شبکه ۳۴ شینه IEEE انتخاب و همچنین سایر رویدادهای شبکه در نرم‌افزار EMT-P-RV شبیه‌سازی‌شده است. نرخ نمونه‌برداری مورد استفاده توسط الگوریتم ۶۴۰۰ هرتز و یا ۱۲۸ نمونه در سیکل برای فرکانس ۵۰ هرتز می‌باشد. در بخش ۲ به چگونگی تشخیص اغتشاش و تشکیل پنجره 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 امیدانس بالا و سیستم توزیع پرداخته خواهد شد و در بخش ۵ به نتایج ارائه‌شده روش پیشنهادی برای تشخیص خطای HIF و مقایسه آن با سایر روش‌های اختصاص‌یافته، پرداخته خواهد شد.

۲- تشخیص اغتشاش و تشکیل پنجره داده

منظور از اغتشاش^{۱۱} 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 ($S^{[Dstrb]}$) 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.

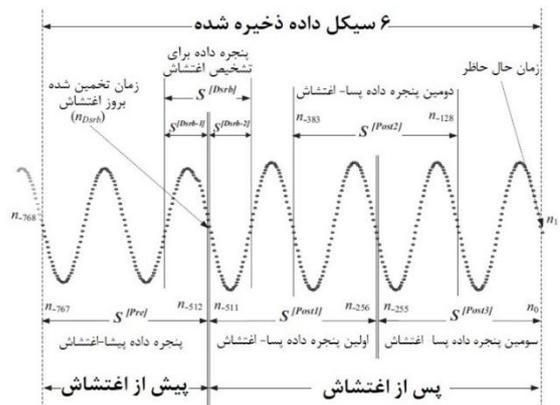
$$rms(S^{[Dstrb-1]}) = \sqrt{\frac{1}{N_s/2} \sum_{n=1}^{N_s/2} (S(n))^2} \quad (۱)$$

$$rms(S^{[Dstrb-2]}) = \sqrt{\frac{1}{N_s/2} \sum_{n=(N_s/2)+1}^{N_s} (S(n))^2} \quad (۲)$$

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

$$E_{Dstrb} - S = |rms(S^{[Dstrb-2]}) - rms(S^{[Dstrb-1]})| \quad (۳)$$

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 به‌عنوان 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) به‌عنوان لحظه بروز اغتشاش^{۱۲} تعیین می‌گردد و به همراه فاز خطا به واحد آماده‌سازی پنجره‌های داده اطلاعات ارسال می‌گردد. نمونه‌ها در پنجره‌های داده، در هر یک چهارم سیکل جدید می‌شوند و فرایند تشخیص اغتشاش بر روی داده‌های جدید انجام

می‌گیرد. پنجره‌های داده شامل پنجره داده پیش-اغتشاش^{۱۳} و پنجره داده پس-اغتشاش^{۱۴} هستند و هر یک از این پنجره‌ها شامل دو سیکل داده می‌شوند که در شکل (۱) با $S^{[Pre]}$ و $S^{[Post]}$ مشخص شده‌اند.

با توجه به اینکه در داده‌های اولین پنجره پس-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 پس-اغتشاش برای تشخیص خطای HIF استفاده شده است. هر دو پنجره متوالی پس-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 تصمیم‌گیری می‌باشد.

۳-۱- محاسبه و استخراج ویژگی‌ها

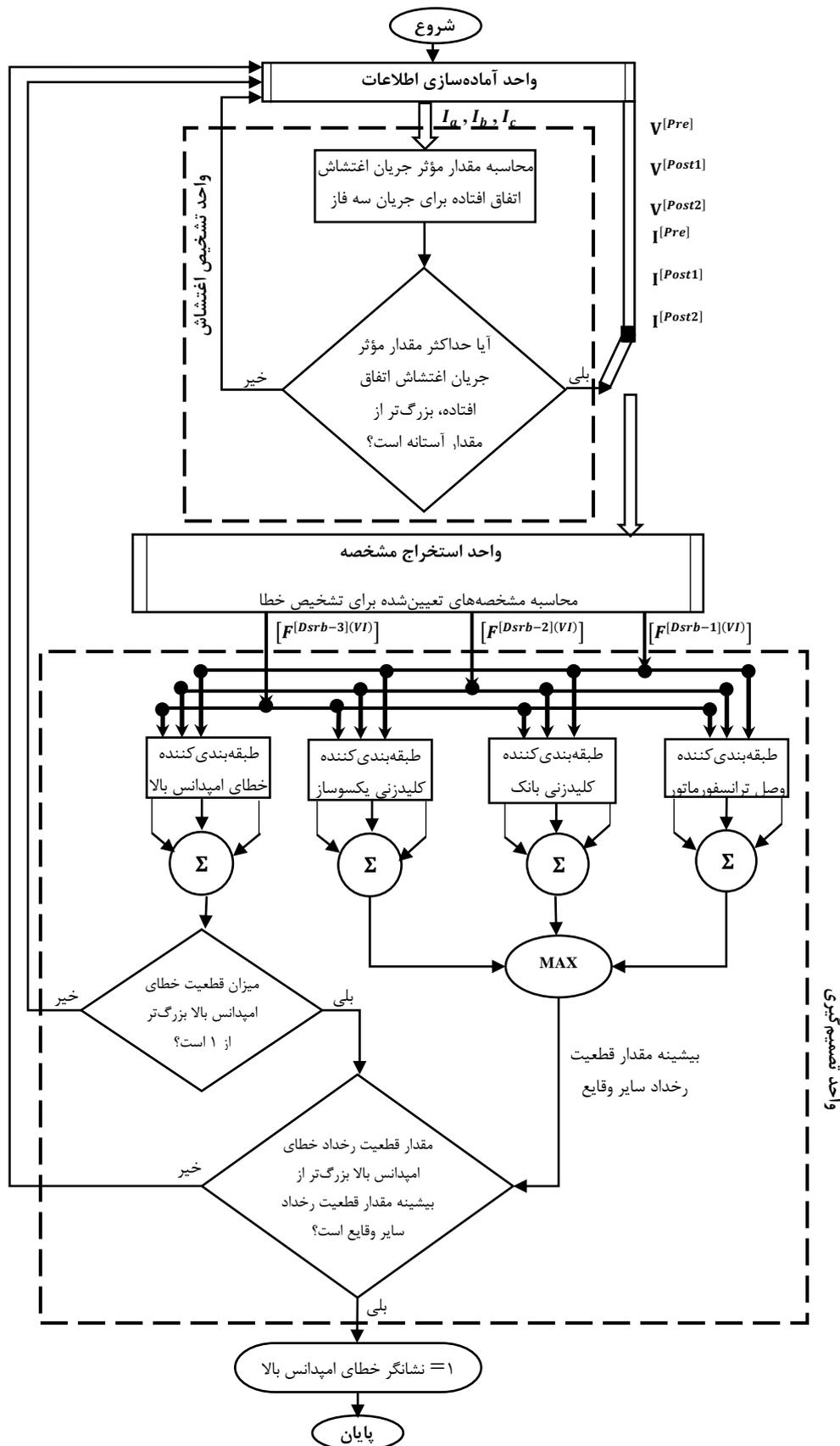
برای محاسبه ویژگی‌ها، ابتدا پنجره داده پیش-اغتشاش و پس-اغتشاش تشکیل شده از نمونه‌های سیگنال‌های ولتاژ و جریان با استفاده از تبدیل فوریه گسسته تجزیه می‌شوند و مؤلفه‌های فرکانسی هارمونیکی و بین هارمونیکی آن به دست می‌آید، سپس ویژگی‌های نرمال شده اغتشاش با استفاده از ضرایب فوریه به‌دست آمده محاسبه می‌شوند.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

$$FG_{FFT-k}^{[Dstrb](VI)} = \frac{FG_{FFT-k}^{[Post](VI)} - FG_{FFT-k}^{[Pre](VI)}}{FG_{FFT-k}^{[Dstrb](VI)}} \quad (۴)$$

در این رابطه G نشانگر کمیت موردنظر و زیر نوشت آن یعنی $FFT-k$ بیانگر این است که این کمیت با استفاده از تبدیل مؤلفه k ام تبدیل فوریه محاسبه شده است. زیر نوشت $[Dstrb]$ 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 عبارت‌اند از:

- تغییر نرمال شده مقدار مؤثر مؤلفه‌های فرکانسی جریان:

$$Frms_{FFT-k}^{[Dstrb](I)} = \frac{Frms_{FFT-k}^{[Post](I)} - Frms_{FFT-k}^{[Pre](I)}}{Frms_{FFT-1}^{[Dstrb](VI)}}, \quad k > 1 \quad (۵)$$



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

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

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

گسسته

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

که $Frms_{FFT-k}^{[Post](I)}$ و $FG_{FFT-k}^{[Pre](I)}$ به ترتیب مقدار مؤثر مؤلفه فرکانسی k حاصل از تبدیل فوریه پنجره داده پسا-اغتاش و پشا-اغتاش سیگنال جریان هستند و

$$FG_{FFT-1}^{[Dsrb](I)} = Frms_{FFT-1}^{[Post](I)} - FG_{FFT-1}^{[Pre](I)} \quad (6)$$

• تغییر نرمال شده مقدار مؤثر مؤلفه‌های فرکانسی ولتاژ:

$$Frms_{FFT-k}^{[Dsrb](V)} = \frac{Frms_{FFT-k}^{[Post](V)} - FG_{FFT-k}^{[Pre](V)}}{FG_{FFT-k}^{[Dsrb](V)}}, \quad k > 1 \quad (7)$$

که $Frms_{FFT-k}^{[Post](V)}$ و $FG_{FFT-k}^{[Pre](V)}$ و به ترتیب مقدار مؤثر مؤلفه فرکانسی k حاصل از تبدیل فوریه پنجره داده پسا-اغتاش و پشا-اغتاش سیگنال ولتاژ هستند که

$$Frms_{FFT-1}^{[Dsrb](V)} = Frms_{FFT-1}^{[Post](V)} - FG_{FFT-1}^{[Pre](V)} \quad (8)$$

• تغییر نرمال شده مقدار توان اکتیو مؤلفه‌های فرکانسی:

$$F_{P-FFT-k}^{[Dsrb](VI)} = \frac{F_{P-FFT-k}^{[Post](VI)} - F_{P-FFT-k}^{[Pre](VI)}}{F_{P-FFT-1}^{[Dsrb](VI)}} \quad (9)$$

$$F_{P-FFT-1}^{[Dsrb](VI)} = F_{P-FFT-1}^{[Post](VI)} - F_{P-FFT-1}^{[Pre](VI)} \quad (10)$$

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

$$F_{P-FFT-k}^{[Dsrb](VI)} = P_k^{[Dsrb]} = |\bar{I}_k| \cdot |\bar{V}_k| \cdot \cos(\varphi_{V_k} - \varphi_{I_k}) \quad (11)$$

که $|\bar{I}_k|$ ، $|\bar{V}_k|$ ، φ_{V_k} و φ_{I_k} به ترتیب اندازه و زاویه مؤلفه k در تبدیل فوریه پنجره داده نمونه‌های جریان و ولتاژ هستند.

• تغییر نرمال شده مقدار توان راکتیو مؤلفه‌های فرکانسی:

$$F_{Q-FFT-k}^{[Dsrb](VI)} = \frac{F_{Q-FFT-k}^{[Post](VI)} - F_{Q-FFT-k}^{[Pre](VI)}}{F_{Q-FFT-1}^{[Dsrb](VI)}} \quad (12)$$

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

$$F_{Q-FFT-k}^{[Dsrb](VI)} = P_Q^{[Dsrb]} = |\bar{I}_k| \cdot |\bar{V}_k| \cdot \sin(\varphi_{V_k} - \varphi_{I_k}) \quad (13)$$

• تغییر نرمال شده مقدار توان راکتیو مؤلفه‌های فرکانسی:

$$Frms\ Ratio_{FFT-k/m}^{[Dsrb](I)} = \frac{Frms_{FFT-k}^{[Dsrb](I)}}{FG_{FFT-m}^{[Dsrb](I)}} \quad (14)$$

$Frms_{FFT-k}^{[Dsrb](I)}$ مقدار مؤثر مؤلفه فرکانسی k جریان و $FG_{FFT-m}^{[Dsrb](I)}$ مقدار مؤثر مؤلفه فرکانسی m جریان می‌باشد.

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

۲-۲-۳- تصمیم‌گیری

پس از استخراج ویژگی‌ها، مجموعه ویژگی‌های آماده‌شده به SVM که توسط نرم‌افزار MATLAB آموزش‌دیده، 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 چندبعدی ابر صفحه) را به‌عنوان مرز الگوهای مختلف انتخاب کند که حداکثر حاشیه اطمینان را فراهم سازد [۲۴].

به‌منظور دقت تصمیم‌گیری در مورد وقوع خطای HIF از سه پنجره داده پسا-اغتشاش استفاده شده است. برای این منظور سه بردار ویژگی برای سه پنجره داده پسا-اغتشاش یعنی $F^{[Dsrb-2](VI)}$ و $F^{[Dsrb-1](VI)}$ و $F^{[Dsrb-3](VI)}$ به سه SVM آموزش‌دیده برای تشخیص خطا وارد می‌شوند. خروجی SVM برای هر مجموعه ویژگی به‌صورت 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 طبقه‌بندی‌کننده SVM به‌عنوان مقدار قطعیت بروز خطای امپدانس بالا تعیین می‌شود. اگر برای داده‌های استخراج‌شده از دو پنجره پسا-اغتشاش، خروجی SVM برابر با یک شود، خطای امپدانس بالا تشخیص داده‌شده و نشانگر مربوط به بروز خطای امپدانس بالا فعال می‌شود. همچنین به‌منظور افزایش امنیت طرح حفاظتی پیشنهادشده از سه طبقه بندی کننده SVM آموزش داده شده برای طبقه‌بندی کلید زنی بانک خازنی، کلید زنی ترانسفورماتور و کلید زنی بارهای غیرخطی (یک‌سوسازها) و همچنین از طبقه‌بندی‌کننده خطای امپدانس بالا استفاده شده است. سه بردار ویژگی تشکیل شده به هر یک از طبقه‌بندی‌کننده‌ها به‌عنوان 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 به‌صورت 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 طبقه‌بندی‌کننده‌ها برای پنجره‌های داده بعدی می‌باشد.

- اگر مقدار قطعیت بروز همه وقایع کوچک‌تر و یا مساوی با یک باشد، اغتشاش رخ داده به‌عنوان عدم بروز خطای امپدانس بالا اعلام می‌شود.

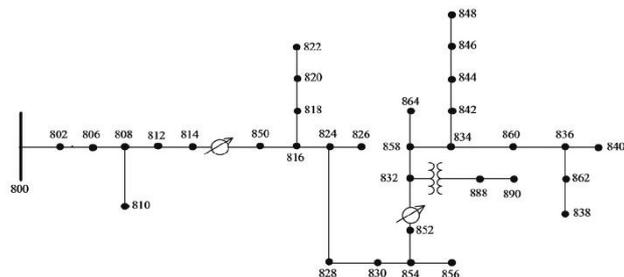
۴- مدل‌سازی و شبیه‌سازی

به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی برای تشخیص خطای امپدانس بالا و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر ویژگی‌های محاسبه‌شده 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 ۲۴/۹ kV 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 به‌صورت پارامتر ثابت (مدل CP در نرم‌افزار EMTP-RV) مدل شده‌اند.

در این شبکه از دو تنظیم‌کننده ولتاژ $kV(24/9/4/16)$ 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.

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

که $V_{Nominal}$ ولتاژ نامی شبکه و برابر با ۲۴/۹ kV 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.



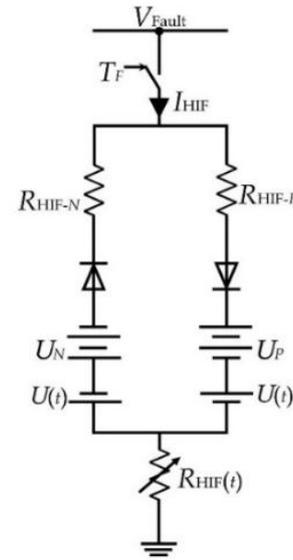
شکل (۳): نقشه تک‌خطی شبکه ۳۴ شینه IEEE

۴-۱-۲- مدل‌سازی بار

تمامی بارهای در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی، بارهای نقطه‌ای می‌باشند که این بارها به‌طور پیوسته و به‌صورت تصادفی در محدوده $\pm 10\%$ تغییر می‌کند همچنین دو بار یک‌سوساز شش پالس در باس‌های ۸۳۰ و ۸۴۸ در نظر گرفته شده‌اند که بیانگر بارهای هارمونیک سیستم می‌باشند. تمامی بارهای مورد استفاده در سیستم در جدول (۲) ذکر شده است.

۲-۴- مدل سازی خطای امیدانس بالا

برای مدل سازی خطای امیدانس بالا از مد دو دیودی به دلیل سادگی و توانایی ارائه مشخصات اصلی خطای امیدانس بالا که در بخش ۱ به معرفی آن پرداخته شد، توسط محققین بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷،۶،۲۱،۲۰]. مدل مداری خطای امیدانس بالای شبیه سازی شده در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): مدل مداری خطای امیدانس بالای شبیه سازی شده

مقاومت قوس می باشند که در شبیه سازی ها به نحوی تنظیم شده اند که مقدار مؤثر خطا بین ۰.۱٪ تا ۱۵٪ جریان بار کامل سیستم باشد. U_N و U_P مقادیر ولتاژ آستانه شروع خطا در نیم سیکل های مثبت و منفی می باشند $U_P < U_N$. در شرایطی که ولتاژ خطا بزرگتر از مقدار ولتاژ آستانه شروع خطا در نیم سیکل مثبت $V_{Fault} > U_P$ و ولتاژ خطا کوچکتر از مقدار ولتاژ آستانه شروع خطا در نیم سیکل منفی $V_{Fault} < U_N$ باشد، جریان خطا در مدار جاری می شود ولی اگر $U_N < V_{Fault} < U_P$ باشد، جریان خطای امیدانس بالا مساوی با صفر می باشد و جریان در مدار جاری نمی شود. $R_{HIF}(t)$ مقاومت متغیر با زمان می باشد که در هر سیکل مقدار آن به صورت تصادفی تغییر می کند و $U(t)$ بیانگر ماهیت پویا و متغیر با زمان خطای امیدانس بالا می باشد. بازه تغییرات مقادیر تعیین شده برای این پارامترها در شبیه سازی های مختلف در جدول (۳) نشان داده شده است. خطای امیدانس بالا در نقاط مختلف شبکه و فازهای مختلف با مشخصاتی که به صورت تصادفی تعیین شده اند، شبیه سازی شده و مقادیر ولتاژ و جریان در محل تغذیه اصلی شبکه برای تحلیل و بررسی ذخیره شده اند. در شکل (۵) نمونه از جریان خطای امیدانس بالای شبیه سازی شده را نشان می دهد.

جدول (۲): مقدار متوسط بارهای سیستم قدرت

Load no.	Node	Phase a		Phase b		Phase c	
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
L1	۸	۱۳۵	۱۰۵	۱۳۵	۱۰۵	۱۳۵	۱۰۵
L2	۸۹۰	۷۵	۴۰	۷۵	۴۰	۷۵	۴۰
L3	۸۹۰	۷۵	۳۵	۷۵	۳۵	۷۵	۳۵
L4	۸۳۰	۷	۴	۷	۴	۷	۴
L5	۸۴۸	۶	۳	۶	۳	۶	۳
L6	۸۳۰	۲	۲	۲	۲	۲	۲
L7	۸۴۰	۹	۷	۹	۷	۹	۷
L8	۸۴۸	۲	۳	۲	۳	۲	۳
L9	۸۶۰	۲	۸	۶	۱۰	۹۶	۵۵
L10	۸۴۰	۱۸	۹	۲۲	۱۱	۰	۰
L11	۸۰۶	۰	۰	۳۰	۱۵	۲۵	۱۴
L12	۸۱۰	۰	۰	۱۶	۸	۰	۰
L13	۸۲۰	۳۴	۱۷	۰	۰	۰	۰
L14	۸۲۲	۱۳۵	۷۰	۰	۰	۰	۰
L15	۸۲۴	۰	۰	۵	۲	۴	۲
L16	۸۲۶	۰	۰	۴۰	۲۰	۰	۰
L17	۸۲۸	۷	۳	۰	۰	۰	۰
L18	۸۵۶	۰	۰	۴	۲	۰	۰
L19	۸۳۴	۴	۲	۱۵	۸	۱۳	۷
L20	۸۶۴	۲	۱	۰	۰	۰	۰
L21	۸۳۶	۳۰	۱۵	۱۰	۶	۴۲	۲۲
L22	۸۳۸	۰	۰	۲۸	۱۴	۰	۰
L23	۸۴۴	۲۸	۱۴	۰	۰	۰	۰
L24	۸۴۶	۰	۰	۲۵	۱۲	۲۰	۱۱
L25	۸۴۸	۰	۰	۲۳	۱۱	۰	۰
Total		۵۷۱	۳۳۸	۵۳۳	۳۱۸	۵۱۱	۳۱۰

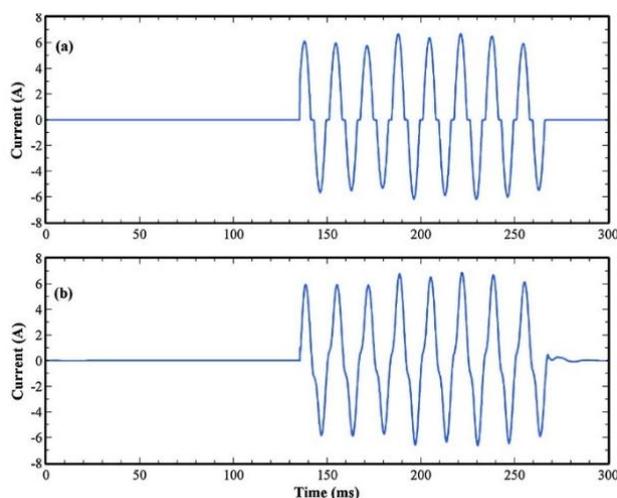
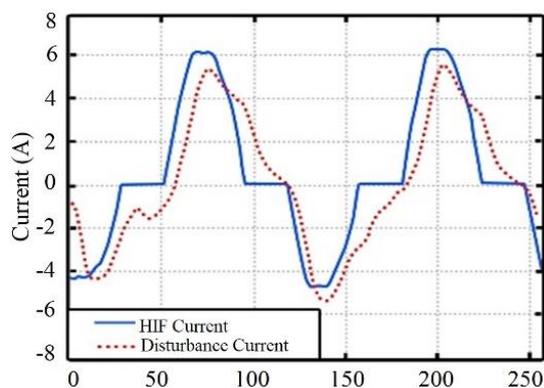
جدول (۳): بازه تغییرات مقادیر پارامترهای مدل خطای امیدانس بالا

پارامتر مدل خطای امیدانس بالا	بازه تغییرات پارامتر در شبیه سازی ها
R_{HIF-P}	۱ (kΩ) تا ۰/۰۹
R_{HIF-N}	۱ (kΩ) تا ۰/۱
$R_{HIF}(t)$	$\pm 0/1 \cdot R_{HIF-P}(t)$
$U_P (kV)$	۷ تا ۴ (kV)
$U_N (kV)$	۵ تا ۸/۵ (kV)
$U(t)$	$\pm 0/1 \cdot U_P(t)$
مقدار مؤثر جریان خطا	۳ تا ۵۰ (A)

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 القایی
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 بالای شبیه‌سازی شده در فاز b گر 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 خطا و اختلاف بین دامنه مقادیر مؤثر مؤلفه‌های فرکانسی جریان، جریان اندازه‌گیری شده در محل تغذیه اصلی شبکه بعد از وقوع خطا در مقایسه با مقادیر مؤثر مؤلفه‌های فرکانسی بعد از وقوع خطا برای فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است. همچنین در شکل (۷) سیگنال جریان یک خطای امپدانس بالای شبیه‌سازی شده در فاز c گر 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 خطا و اختلاف بین دامنه مقادیر مؤثر مؤلفه‌های فرکانسی جریان، جریان اندازه‌گیری شده در محل تغذیه اصلی شبکه بعد از وقوع خطا در مقایسه با مقادیر مؤثر مؤلفه‌های فرکانسی 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 موتور القایی نشان داده شده‌اند.



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

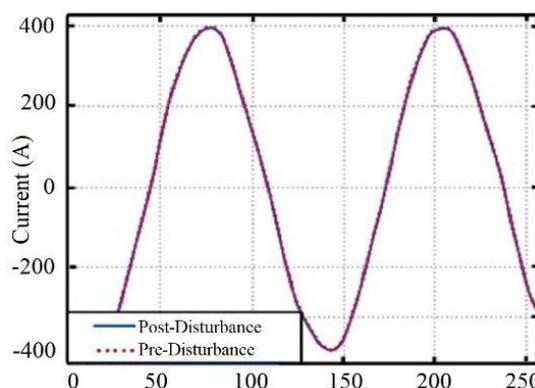
(a) در محل خطا (گره ۸۲۰)

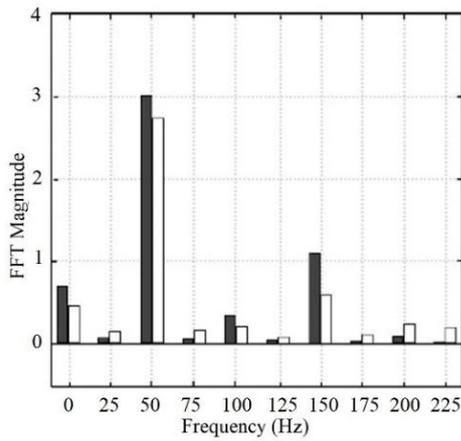
(b) جریان گره ۸۰۰ به دلیل رخ داد خطا در گره ۸۳۰

۳-۴- شبیه‌سازی وقایع شبکه

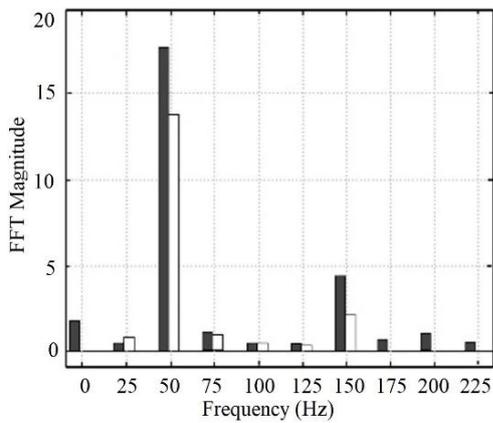
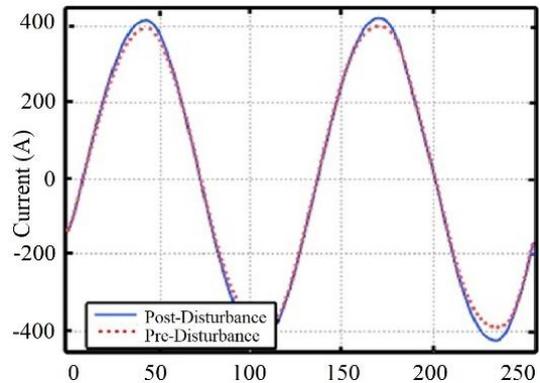
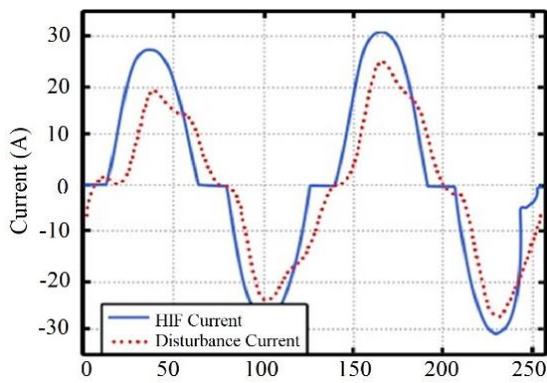
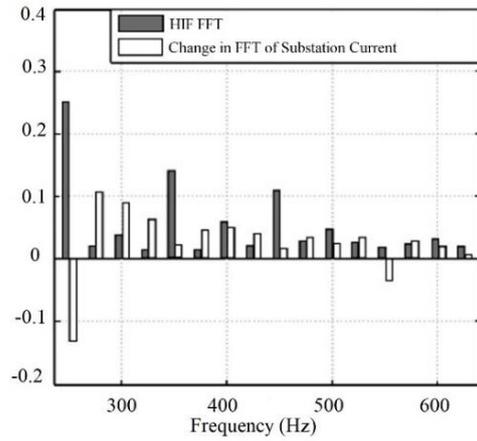
علاوه بر خطای امپدانس بالا، وقایع دیگری نیز که در شبکه‌های توزیع اتفاق می‌افتند مانند قطع و وصل بارهای خطی، یک‌سوسازها، موتورهای القایی، بانک‌های خازنی و خطای امپدانس پایین (بدون قوس) نیز در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده‌اند تا بتوان عملکرد روش تشخیص خطا به‌درستی را ارزیابی کرد. فهرست وقایع شبیه‌سازی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

زمان شروع خطا در شبیه‌سازی‌های مختلف به‌صورت 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 نمونه‌برداری ۶۴۰۰ هرتز یا ۱۲۸ نمونه در سیکل برای فرکانس ۵۰ هرتز می‌باشد.

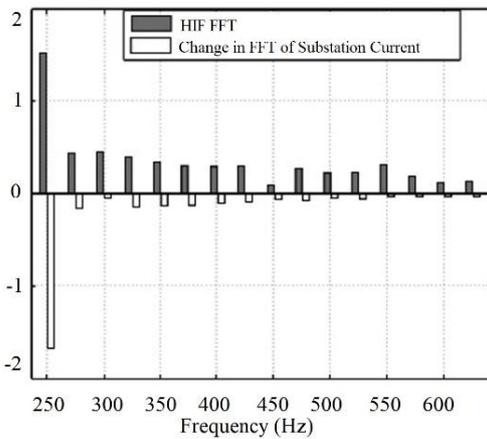


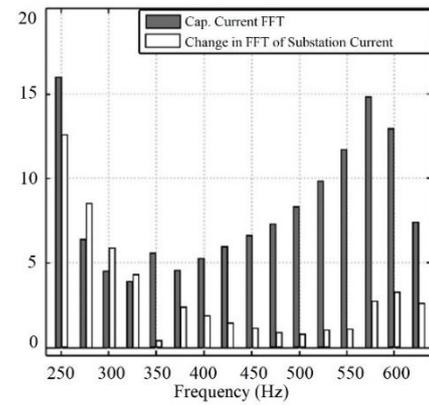
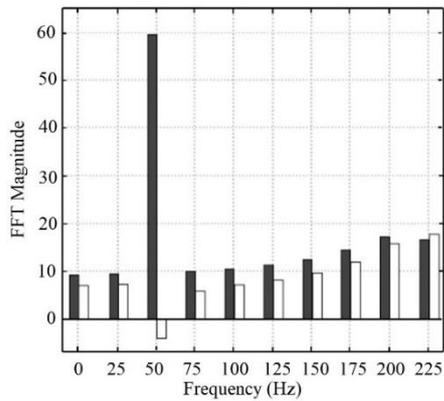
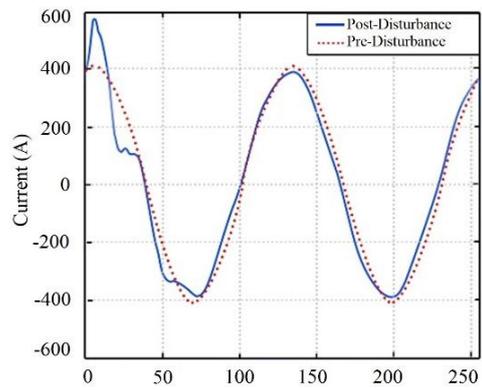
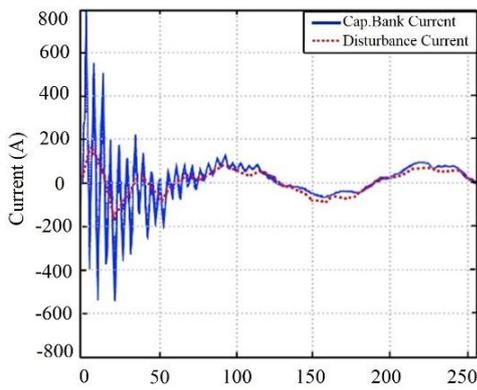


شکل (۶): خطای امپدانس بالای شبیه‌سازی شده با دامنه کم

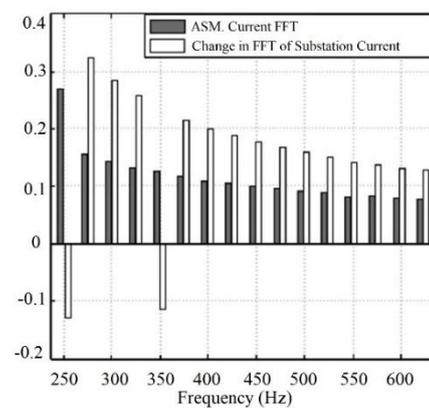
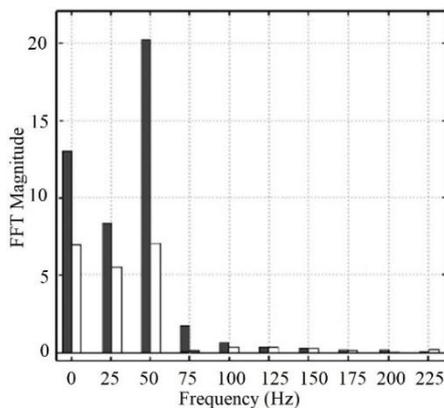
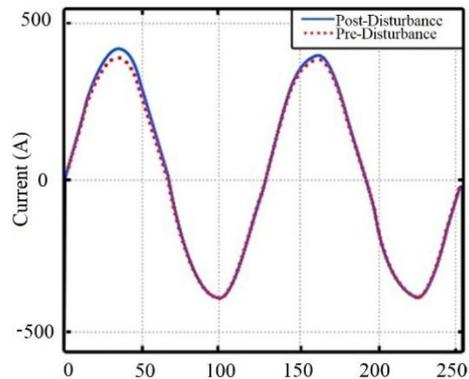
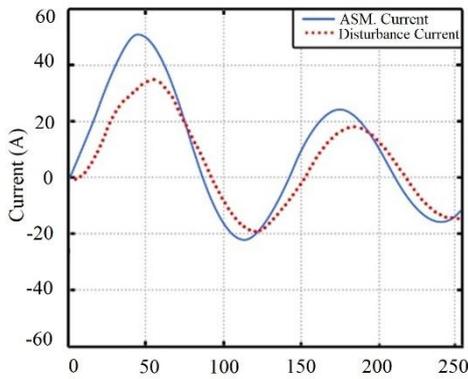


شکل (۷): خطای امپدانس بالای شبیه‌سازی شده با دامنه متوسط

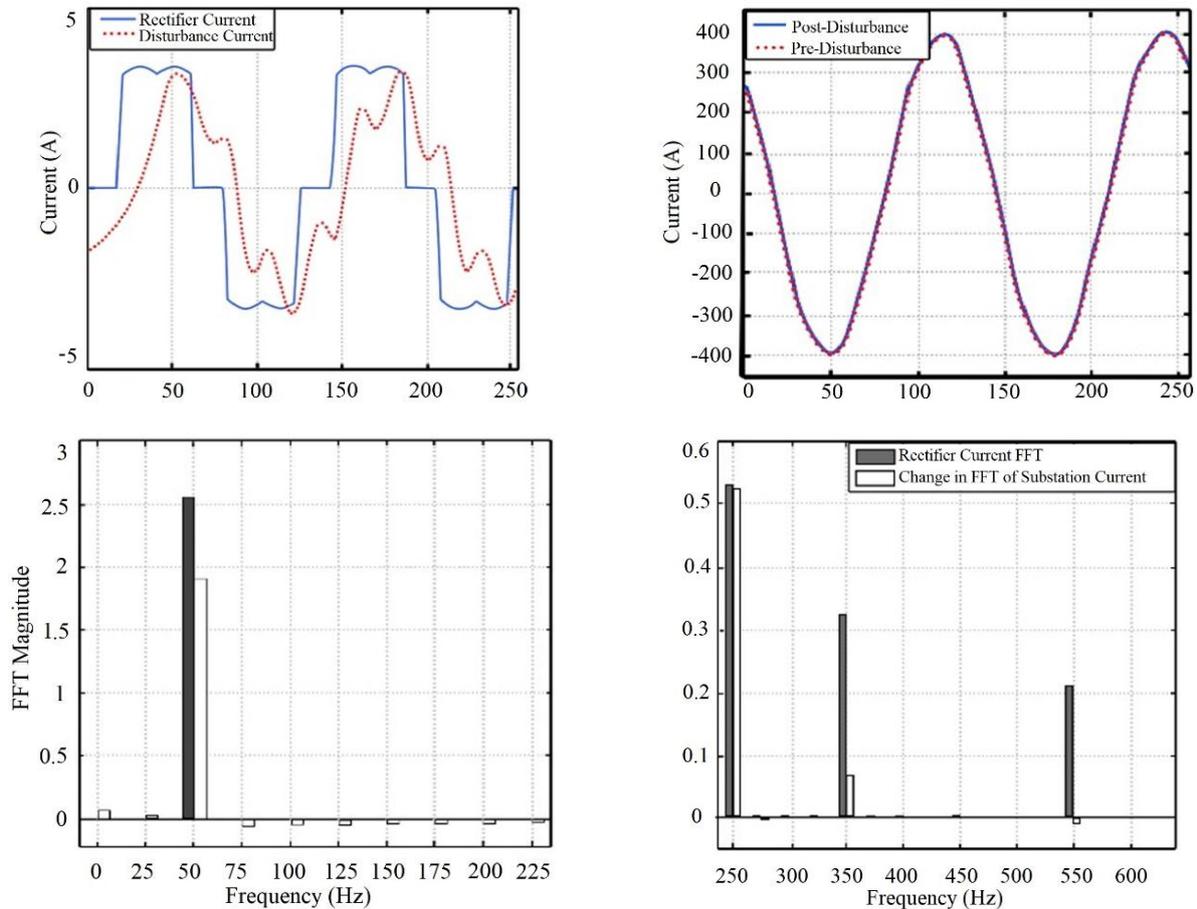




شکل (۸): وصل بانک خازنی (بانک خازنی متصل به گره ۲۴)



شکل (۹): وصل موتور القائی (موتور ۲۵۰ کیلووات ۶ کیلوولت متصل به گره ۴۰)



شکل (۱۰): وصل یکسو ساز (یک سوساز متصل به گره ۸۴۸)

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 طبقه‌بندی‌کننده 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 خطا که خطا تشخیص داده شده‌اند به تعداد کل وقایع غیر خطا در مجموعه داده‌های استفاده شده، به دست می‌آید.

در این مقاله برای آموزش طبقه‌بندی‌کننده 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

آموزش و آزمایش طبقه‌بندی‌کننده 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.

جدول (۵): عملکرد کلی روش پیشنهادی تشخیص خطای

امپدانس بالا

مجموعه داده‌های آموزش (۱۲۱ مورد)			مجموعه داده‌های آزمایش (۳۰ مورد)		
امنیت	قابلیت اطمینان	دقت	امنیت	قابلیت اطمینان	دقت
۹۶/۳	۹۶	۹۵/۲	۹۸/۸	۹۸/۵	۹۷/۲

جدول (۶): مقایسه نتایج برخی از روش‌های منتشرشده با روش

پیشنهادی

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

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 را با سایر وقایع سیستم توزیع بدرستی 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.

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.
- Mamshiev, 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.
- Ghadery, 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. *IEEE 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

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., & Seyed, 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 μ -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.