Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 1-13

Vol. 10 / No. 4/ Winter 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

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

Mehrdad Ghahremani[1], Zahra Moravej[2]

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۱۳-۱

Vol. 10 / No. 4/ Winter 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

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

نوع مطالعه: پژوهشی

مهرداد قهرمانی[1] ، دانشجو دکتری، زهرا مروج[2]، 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) ارائه‌شده است. برخلاف روش‌های رایج که از ویژگی‌های استخراج‌شده از پنجره‌های داده پس از بروز خطا برای تشخیص خطای امپدانس بالا استفاده می‌کنند، در روش پیشنهادشده با استفاده از الگوریتم تشخیص بروز اغتشاش در شبکه، از تغییرات نرمال شده ویژگی‌های انتخاب‌شده به‌منظور مقایسه‌ی 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 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 نرم‌افزارEMTP-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 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.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]

۱- مقدمه

خطای امپدانس[۱] بالا یکی از خطاهای رایج در شبکه‌های توزیع می‌باشد. این نوع خطا می‌تواند در اثر تماس هادی برق‌دار 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 گزارش‌شده خطای امپدانس بالا در شبکه‌های توزیع kV ۲۵-۱۵ می‌باشد [۲]. با توجه به بالا بودن امپدانس 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 امپدانس بالا بین ۰/۵ تا ۷۵ آمپر گزارش‌شده است [۳]. درواقع می‌توان خطای امپدانس 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 امپدانس 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 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 مدت‌زمان خاموشی اشاره کرد.

روش‌های مورداستفاده برای شناسایی خطای امپدانس 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 درزمینه‌ی پردازش سیگنال‌های گسسته و پردازنده سیگنال دیجیتال انواع روش‌ها و الگوریتم‌های پردازش سیگنال و تکنیک‌های هوش مصنوعی و تشخیص الگو استفاده‌شده‌اند. برای تشخیص خطای امپدانس 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 امپدانس 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 امپدانس بالا می‌توان از مرجع [۵] استفاده نمود.

در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص خطای امپدانس 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 امپدانس بالا
- استفاده از یک سیستم تصمیم‌گیری مبتنی بر رأی بر اساس تجمیع خروجی طبقه‌بندی‌کننده SVM (جهت بهبود دقت تصمیم‌گیری در مورد خطای HIF) و مقایسه مقدار قطعیت[۱۰] رخداد سایر وقایع شبکه با خطای امپدانس بالا (جهت بهبود افزایش امنیت طرح حفاظتی پیشنهادشده)

به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی، شبکه ۳۴ شینه IEEE انتخاب و همچنین سایر رویدادهای شبکه در نرم‌افزار EMTP-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 امپدانس 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.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]

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 تعیین‌شده برای تشخیص خطا باشد. ساده‌ترین روشی که با آن تمامی اغتشاشات موردنیاز در سیستم قابل‌شناسایی باشند، اندازه تغییر مقدار مؤثر جریان‌های فاز در دو نیم سیکل متوالی جریان می‌باشد. هر پنجره داده برای تشخیص بروز اغتشاش ($S^{[Dsrb]}$ 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.

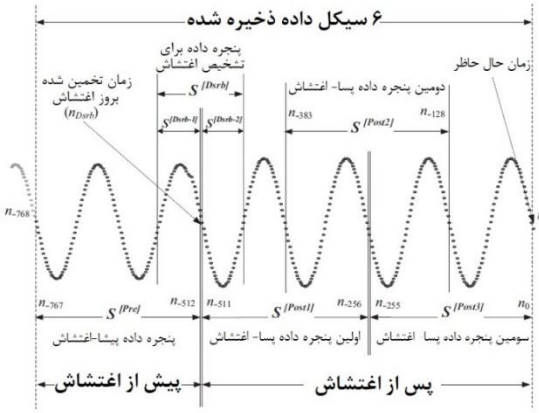
$$rms\left(S^{[Dsrb-1]}\right)=\sqrt{\frac{1}{N_S/2}\sum_{n=1}^{N_S/2}\left(S(n)\right)^2} \qquad (۱)$$

$$rms\left(S^{[Dsrb-2]}\right)=\sqrt{\frac{1}{N_S/2}\sum_{n=(N_S/2)+1}^{N_S}\left(S(n)\right)^2} \qquad (۲)$$

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.

$$E_{Dsrb}-S=\left|rms\left(S^{[Dsrb-2]}\right)-rms\left(S^{[Dsrb-1]}\right)\right| \qquad (۳)$$

اگر اندازه تغییر در مقدار مؤثر برای هر یک از فازهای جریان از مقدار آستانه تعیین‌شده 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 تعیین‌شده است.



شکل (۱): تشکیل پنجره‌های داده برای تشخیص اغتشاش

بعد از تشخیص بروز اغتشاش نقطه میانی پنجره داده تشکیل‌شده $S^{[Dsrb]}$ 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 یک‌چهارم سیکل جدید می‌شوند و فرایند تشخیص اغتشاش بر روی داده‌های جدید انجام 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 $S^{[Pre]}$ و $S^{[Post1]}$ مشخص‌شده‌اند.

با توجه به اینکه در داده‌های اولین پنجره پسا-اغتشاش به دلیل وجود خطا در زمان تخمین زده‌شده بروز اغتشاش در سیکل‌های اول، امکان عدم‌تشخیص صحیح اغتشاش وجود داشته باشد از سه پنجره پسا-اغتشاش برای تشخیص خطای HIF استفاده‌شده است. هر دو پنجره متوالی پسا-اغتشاش در یک سیکل داده همپوشانی دارند که در شکل (۱) نشان داده‌شده 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 داده‌شده 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 پیشا-اغتشاش و پسا-اغتشاش تشکیل‌شده 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 به‌دست‌آمده محاسبه می‌شوند. برای محاسبه ویژگی اغتشاش واقع‌شده مقدار کمیت انتخاب‌شده در پنجره پیشا-اغتشاش از مقدار آن کمیت در پنجره پسا-اغتشاش کاسته می‌شود. برای نرمال کردن آن، حاصل تفریق به‌دست‌آمده بر مقدار مؤلفه اصلی کمیت اغتشاش تقسیم می‌شود. به‌عبارت‌دیگر:

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

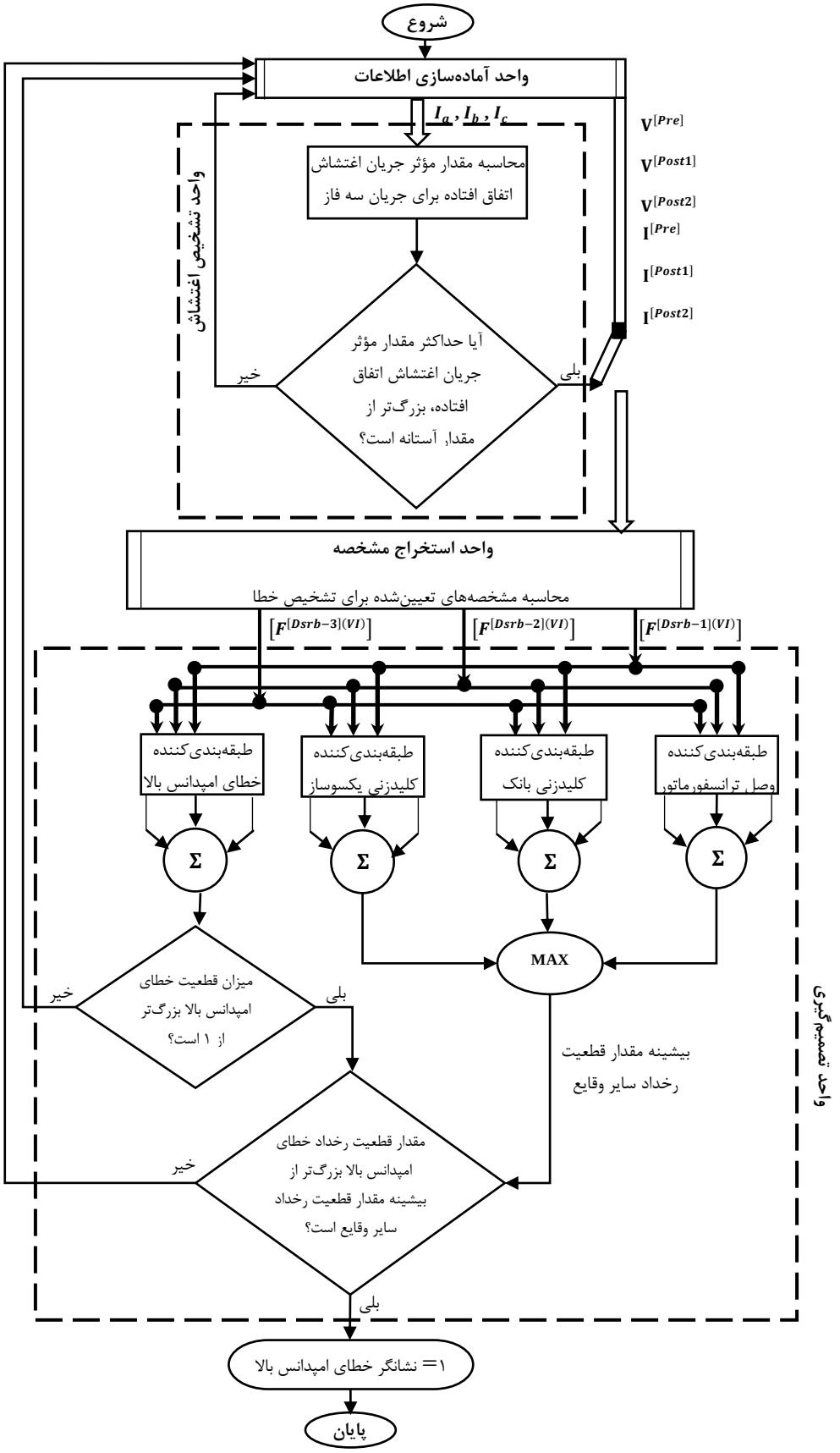
در این رابطه G نشانگر کمیت موردنظر و زیر نوشت آن یعنی $FFT-K$ بیانگر این است که این کمیت با استفاده از تبدیل مؤلفه k ام تبدیل فوریه محاسبه‌شده است. زبر نوشت $[Dsrb]$ در بالای هر کمیت نشانگر این است که این کمیت مربوط به تغییر در مقدار ویژگی انتخاب‌شده بعد از بروز یک اغتشاش است. زبر نوشت (VI) نیز بیانگر این است که برای محاسبه این کمیت هم از مقادیر ولتاژ و هم از مقادیر جریان استفاده‌شده است. کمیت‌های محاسبه‌شده در حوزه فرکانس برای استفاده در طبقه‌بندی‌کننده عبارت‌اند از:

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

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]



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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]

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-اغتشاش و پیشا-اغتشاش سیگنال جریان هستند و

$$FG_{FFT-1}^{[Dsrb](I)} = Frms_{FFT-1}^{[Post](I)} - FG_{FFT-1}^{[Pre](I)} \quad (۶)$$

- **تغییر نرمال شده مقدار مؤثر مؤلفه‌های فرکانسی ولتاژ:**

$$Frms_{FFT-k}^{[Dsrb](V)} = \frac{Frms_{FFT-k}^{[Post](V)} - FG_{FFT-k}^{[Pre](V)}}{FG_{FFT-k}^{[Dsrb](V)}}, \quad k>1 \quad (۷)$$

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-اغتشاش و پیشا-اغتشاش سیگنال ولتاژ هستند که

$$Frms_{FFT-1}^{[Dsrb](V)} = Frms_{FFT-1}^{[Post](V)} - FG_{FFT-1}^{[Pre](V)} \quad (۸)$$

- **تغییر نرمال شده مقدار توان اکتیو مؤلفه‌های فرکانسی:**

$$F_{P\,FFT-k}^{[Dsrb](VI)} = \frac{F_{P\,FFT-k}^{[Post](VI)} - F_{P\,FFT-k}^{[Pre](VI)}}{F_{P\,FFT-1}^{[Dsrb](VI)}} \quad (۹)$$

$$F_{P\,FFT-1}^{[Dsrb](VI)} = F_{P\,FFT-1}^{[Post](VI)} - F_{P\,FFT-1}^{[Pre](VI)} \quad (۱۰)$$

که $F_{P\,FFT-k}^{[Pre](VI)}$ و $F_{P\,FFT-k}^{[Post](VI)}$ و به ترتیب مقدار توان اکتیو فرکانسی k 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:

$$F_{P\,FFT-K}^{[Dsrb](VI)} = P_k^{[Dsrb]} = \left|\bar{I}_k\right| \cdot \left|\bar{V}_k\right| \cdot \cos\left(\varphi_{\bar{V}_k} - \varphi_{\bar{I}_k}\right) \quad (۱۱)$$

$\left|\bar{I}_k\right|$، $\left|\bar{V}_k\right|$، $\varphi_{\bar{V}_k}$ و $\varphi_{\bar{I}_k}$ 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:**

$$F_{Q\,FFT-k}^{[Dsrb](VI)} = \frac{F_{Q\,FFT-k}^{[Post](VI)} - F_{Q\,FFT-k}^{[Pre](VI)}}{F_{Q\,FFT-k}^{[Dsrb](VI)}} \quad (۱۲)$$

$F_{Q\,FFT-k}^{[Pre](VI)}$ و $F_{Q\,FFT-k}^{[Post](VI)}$ به ترتیب مقدار توان راکتیو فرکانسی k 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:

$$F_{Q\,FFT-k}^{[Dsrb](VI)} = P_Q^{[Dsrb]} = \left|\bar{I}_k\right| \cdot \left|\bar{V}_k\right| \cdot \sin\left(\varphi_{\bar{V}_k} - \varphi_{\bar{I}_k}\right) \quad (۱۳)$$

- **تغییر نرمال شده مقدار توان راکتیو مؤلفه‌های فرکانسی:**

$$Frms\,Ratio_{FFT-k/m}^{[Dsrb](I)} = \frac{Frms_{FFT-k}^{[Dsrb](I)}}{FG_{FFT-m}^{[Dsrb](I)}} \quad (۱۴)$$

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

فهرست ویژگی‌های استخراج‌شده با استفاده از تبدیل فوریه گسسته در جدول (۱) نشان داده‌شده است. برای به‌کارگیری سیستم تصمیم‌گیری مبتنی بر رأی و استفاده از داده‌های سه پنجره پسا-اغتشاش برای استخراج ویژگی‌ها، ابتدا ضرایب تبدیل فوریه برای نمونه‌های ولتاژ و جریان در هر یک از چهار پنجره داده‌ی $S^{[Pre]}$، $S^{[Post\,1]}$، $S^{[Post\,2]}$ و $S^{[Post\,3]}$ که در شکل (۱) نشان داده‌شده‌اند، محاسبه می‌شود. در جدول (۱) برای پنجره داده پسا-اغتشاش $S^{[Post\,1]}$ در مقایسه با پنجره داده پیشا-اغتشاش $S^{[Pre]}$ محاسبه‌شده و به‌صورت 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 محاسبه‌شده و به واحد تصمیم‌گیری فرستاده شوند.

جدول (۱): ویژگی‌های استخراج‌شده 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 مؤلفه بین هارمونیکی اول جریان (فرکانس ۲۵ هرتز)
F_6	$Frms_{FFT-1.5}^{[Dsrb](I)}$	مقدار مؤثر تغییر نرمال مؤلفه بین هارمونیکی 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 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 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]

۳-۲- 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 ازجمله 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 استفاده‌شده است. برای این منظور سه بردار ویژگی برای سه پنجره داده پسا-اغتشاش یعنی $F^{[Dsrb-1](VI)}$، $F^{[Dsrb-2](VI)}$ 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 سه‌طبقه بندی کننده SVM آموزش داده‌شده برای طبقه‌بندی کلید زنی بانک خازنی، کلید زنی ترانسفورماتور و کلید زنی بارهای غیرخطی (یک‌سوسازها) و همچنین از طبقه‌بندی‌کننده خطای امپدانس بالا استفاده‌شده است. سه بردار ویژگی تشکیل‌شده به هر یک از طبقه‌بندی‌کننده‌ها اعمال می‌شوند و مقدار بیشینه حاصل هر یک از طبقه‌بندی‌کننده‌ها به‌عنوان مقدار قطعیت بروز سایر وقایع تعیین‌شده 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 رخدادِ 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 رخدادِ منوط به خروجی طبقه‌بندی‌کننده‌ها برای پنجره‌های داده بعدی می‌باشد.
- اگر مقدار قطعیت بروز همه وقایع کوچک‌تر و یا مساوی با یک باشد، اغتشاش رخداده به‌عنوان عدم بروز خطای امپدانس بالا اعلام می‌شود.

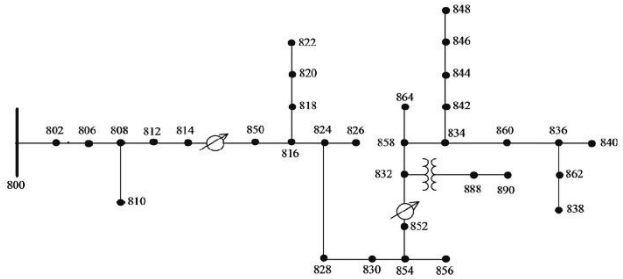
۴- مدل‌سازی و شبیه‌سازی

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 شبیه‌سازی‌شده است که نمودار تک‌خطی آن در شکل (۳) نشان داده‌شده است. این شبکه ۲۴/۹ kV از پنج‌خط هوایی سه فاز و تک فاز با چهار نوع هادی مختلف استفاده‌شده است که آرایش خطوط و مشخصات هادی‌ها در هر بخش مطابق با مقادیر ارائه‌شده در [۲۵] در نظر گرفته‌شده است. خطوط به‌صورت پارامتر ثابت (مدل CP در نرم‌افزار EMTP-RV) مدل شده‌اند.

در این شبکه از دو تنظیم‌کننده ولتاژ $\left(۲۴/۹ \diagup ۴/۱۶\right)$kV که هر تنظیم‌کننده ولتاژ توسط سه ترانسفورماتور تک فاز شبیه‌سازی‌شده‌اند، استفاده‌شده است همچنین از یک ترانسفورماتور توزیع ۲۵۰۰kVA و $\left(۶۹ \diagup ۲۴/۹\right)$kV در گره ۸۰۰ استفاده‌شده است. تمامی بارهای شبکه (تک فاز و سه فاز) با امپدانس سری مطابق رابطه‌ی زیر معادل شده‌اند.

$$Z_{Load} = R_{Load} + jX_{Load} = \frac{\left(V_{Nominal}\right)^2}{P_{Load} + jQ_{Load}} \qquad (۱۵)$$

که $V_{Nominal}$ ولتاژ نامی شبکه و برابر با ۲۴/۹ kV در نظر گرفته‌شده است و P_{Load} و Q_{Load} نیز توان اکتیو و راکتیو بار هستند که مقادیر آن‌ها در [۲۵] ارائه‌شده است.



شکل (۳): نقشه تک‌خطی شبکه ۳۴ شینه IEEE

۴-۱- مدل‌سازی بار

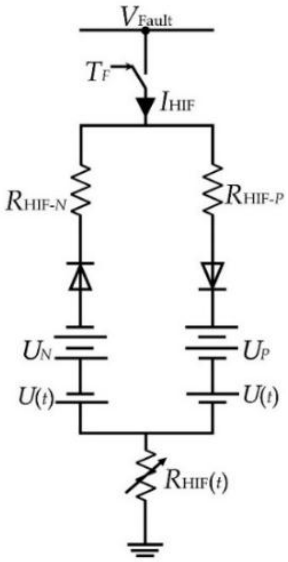
تمامی بارهای در نظر گرفته‌شده برای شبیه‌سازی، بارهای نقطه‌ای می‌باشند که این بارها به‌طور پیوسته و به‌صورت تصادفی در محدوده ±۱۰ تغییر می‌کند همچنین دو بار یک‌سوساز شش پالسه در باس‌های ۸۳۰ و ۸۴۸ در نظر گرفته‌شده‌اند که بیانگر بارهای هارمونیکی سیستم می‌باشند. تمامی بارهای مورداستفاده در سیستم در جدول (۲) ذکرشده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]

۴-۲- مدل‌سازی خطای امپدانس بالا

برای مدل‌سازی خطای امپدانس بالا از مد دو دیودی به دلیل سادگی و توانایی ارائه مشخصات اصلی خطای امپدانس بالا که در بخش ۱ به معرفی آن پرداخته شد، توسط محققین بسیاری مورد استفاده قرارگرفته است [۱۷،۶،۲۱،۲۰]. مدل مداری خطای امپدانس بالای شبیه‌سازی‌شده در شکل (۴) نشان داده‌شده است.



شکل (۴): مدل مداری خطای امپدانس بالای شبیه‌سازی‌شده

R_{HIF-P} و R_{HIF-N} مقاومت قوس می‌باشند که در شبیه‌سازی‌ها به نحوی تنظیم‌شده‌اند که مقدار مؤثر خطا بین 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 $U_P < U_N$. 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 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 به‌صورت تصادفی تغییر می‌کند و $U(t)$ بیانگر ماهیت پویا و متغیر بازمان خطای امپدانس بالا می‌باشد. بازه تغییرات مقادیر تعیین‌شده برای این پارامترها در شبیه‌سازی‌های مختلف در جدول (۳) نشان داده‌شده است. خطای امپدانس بالا در نقاط مختلف شبکه و فازهای مختلف با مشخصاتی که به‌صورت تصادفی تعیین‌شده‌اند، شبیه‌سازی‌شده و مقادیر ولتاژ و جریان در محل تغذیه اصلی شبکه برای تحلیل و بررسی ذخیره‌شده‌اند. در شکل (۵) نمونه از جریان خطای امپدانس بالای شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد.

جدول (۲): مقدار متوسط بارهای سیستم قدرت

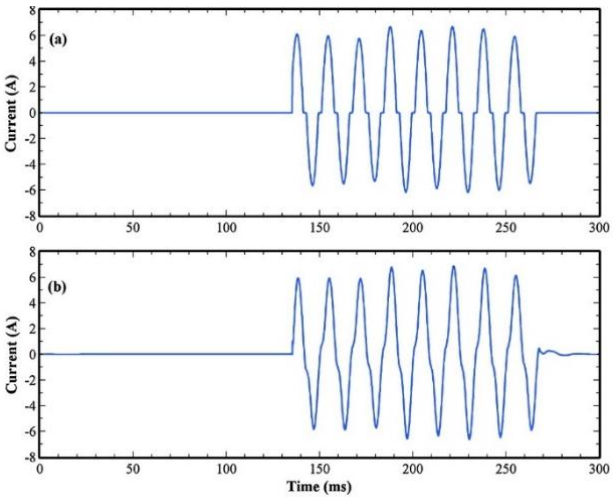
		Phase a		Phase b		Phase c	
Load no.	Node	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
L۱	۸	۱۳۵	۱۰۵	۱۳۵	۱۰۵	۱۳۵	۱۰۵
L۲	۸۹۰	۷۵	۴۰	۷۵	۴۰	۷۵	۴۰
L۳	۸۹۰	۷۵	۳۵	۷۵	۳۵	۷۵	۳۵
L۴	۸۳۰	۷	۴	۷	۴	۷	۴
L۵	۸۴۸	۶	۳	۶	۳	۶	۳
L۶	۸۳۰	۲	۲	۲	۲	۲	۲
L۷	۸۴۰	۹	۷	۹	۷	۹	۷
L۸	۸۴۸	۲	۳	۲	۳	۲	۳
L۹	۸۶۰	۲	۸	۶	۱۰	۹۶	۵۵
L۱۰	۸۴۰	۱۸	۹	۲۲	۱۱	۰	۰
L۱۱	۸۰۶	۰	۰	۳۰	۱۵	۲۵	۱۴
L۱۲	۸۱۰	۰	۰	۱۶	۸	۰	۰
L۱۳	۸۲۰	۳۴	۱۷	۰	۰	۰	۰
L۱۴	۸۲۲	۱۳۵	۷۰	۰	۰	۰	۰
L۱۵	۸۲۴	۰	۰	۵	۲	۴	۲
L۱۶	۸۲۶	۰	۰	۴۰	۲۰	۰	۰
L۱۷	۸۲۸	۷	۳	۰	۰	۰	۰
L۱۸	۸۵۶	۰	۰	۴	۲	۰	۰
L۱۹	۸۳۴	۴	۲	۱۵	۸	۱۳	۷
L۲۰	۸۶۴	۲	۱	۰	۰	۰	۰
L۲۱	۸۳۶	۳۰	۱۵	۱۰	۶	۴۲	۲۲
L۲۲	۸۳۸	۰	۰	۲۸	۱۴	۰	۰
L۲۳	۸۴۴	۲۸	۱۴	۰	۰	۰	۰
L۲۴	۸۴۶	۰	۰	۲۵	۱۲	۲۰	۱۱
L۲۵	۸۴۸	۰	۰	۲۳	۱۱	۰	۰
Total		**۵۷۱**	**۳۳۸**	**۵۳۳**	**۳۱۸**	**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}	۰/۰۹ تا ۱$(k\Omega)$
R_{HIF-N}	۰/۱ تا ۱ $(k\Omega)$
$R_{HIF}(t)$	$\pm$۰/۱ $(t)\cdot R_{HIF-P}$
$U_P(kV)$	۷ تا ۴ (kV)
$U_N(kV)$	۸/۵ تا ۵ (kV)
$U(t)$	$\pm$۰/۱ $(t)\cdot U_P$
مقدار مؤثر جریان خطا	۵۰ تا ۳ (A)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]



شکل (۵): نمونه‌ای از شکل موج جریان خطای HIF شبیه‌سازی‌شده

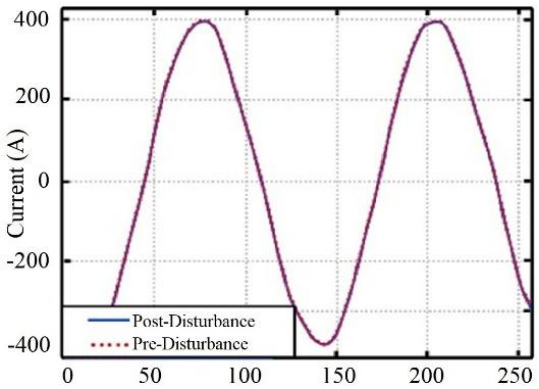
***a*) در محل خطا (گره ۸۳۰)**

***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 می‌افتند مانند قطع و وصل بارهای خطی، یک‌سوسازها، موتورهای القایی، بانک‌های خازنی و خطای امپدانس پایین (بدون قوس) نیز در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته‌شده‌اند تا بتوان عملکرد روش تشخیص خطا به‌درستی را ارزیابی کرد. فهرست وقایع شبیه‌سازی‌شده در جدول (۴) نشان داده‌شده است.

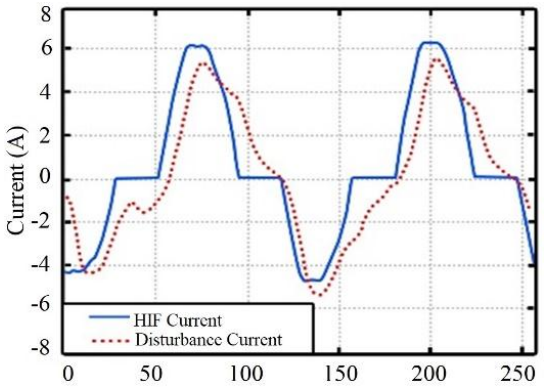
زمان شروع خطا در شبیه‌سازی‌های مختلف به‌صورت تصادفی بین ۱۰۰ تا ۱۴۰ میلی‌ثانیه پس از شروع شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته‌شده است. بازه زمانی در شبیه‌سازی‌ها ۸۶۸ نانوثانیه انتخاب‌شده و سیگنال‌های ولتاژ و جریان در محور اصلی تغذیه شبکه (گره ۸۰۰) با نرخ ۱۵۰ ذخیره‌شده‌اند. این نرخ معادل فرکانس نمونه‌برداری ۶۴۰۰ هرتز یا ۱۲۸ نمونه در سیکل برای فرکانس ۵۰ هرتز می‌باشد.



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

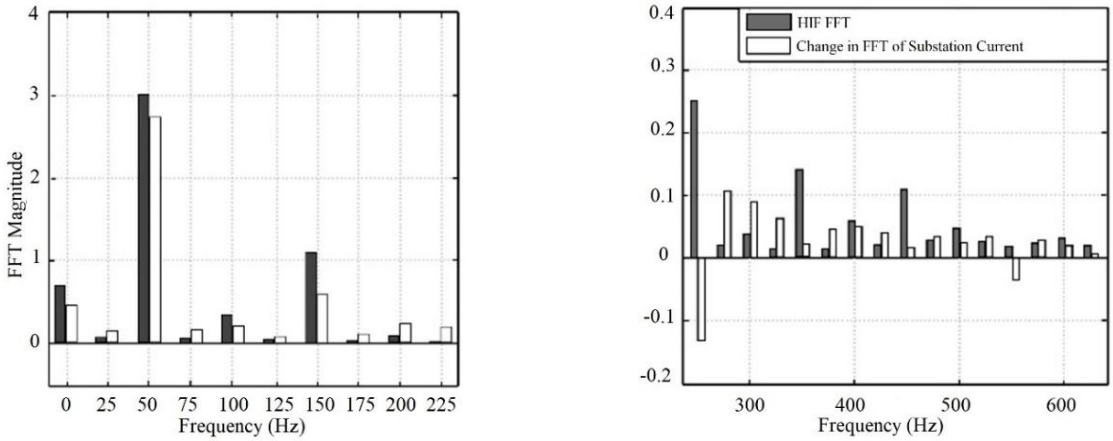
وقایع شبیه‌سازی‌شده	تعداد موارد شبیه‌سازی‌شده	تعداد موارد تشخیص داده‌شده توسط الگوریتم تشخیص اغتشاش
خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی‌شده	۵۵	۵۵
قطع و وصل بارهای خطی	۳۰	۲۷
قطع و وصل یک‌سوسازها	۱۴	۱۲
قطع و وصل موتورهای القائی	۱۲	۱۲
قطع و وصل بانک‌های خازنی	۱۶	۱۶
خطای امپدانس پایین (بدون قوس)	۲۹	۲۹
جمع کل موارد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

شکل (۶) سیگنال جریان یک خطای امپدانس بالای شبیه‌سازی‌شده 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 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 داده‌شده است. همچنین در شکل (۷) سیگنال جریان یک خطای امپدانس بالای شبیه‌سازی‌شده 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 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 داده‌شده است. در شکل‌های (۸ تا ۱۰) نیز سیگنال‌های جریان وصل بانک خازنی، وصل یک‌سوساز و وصل موتور القایی نشان داده‌شده‌اند.

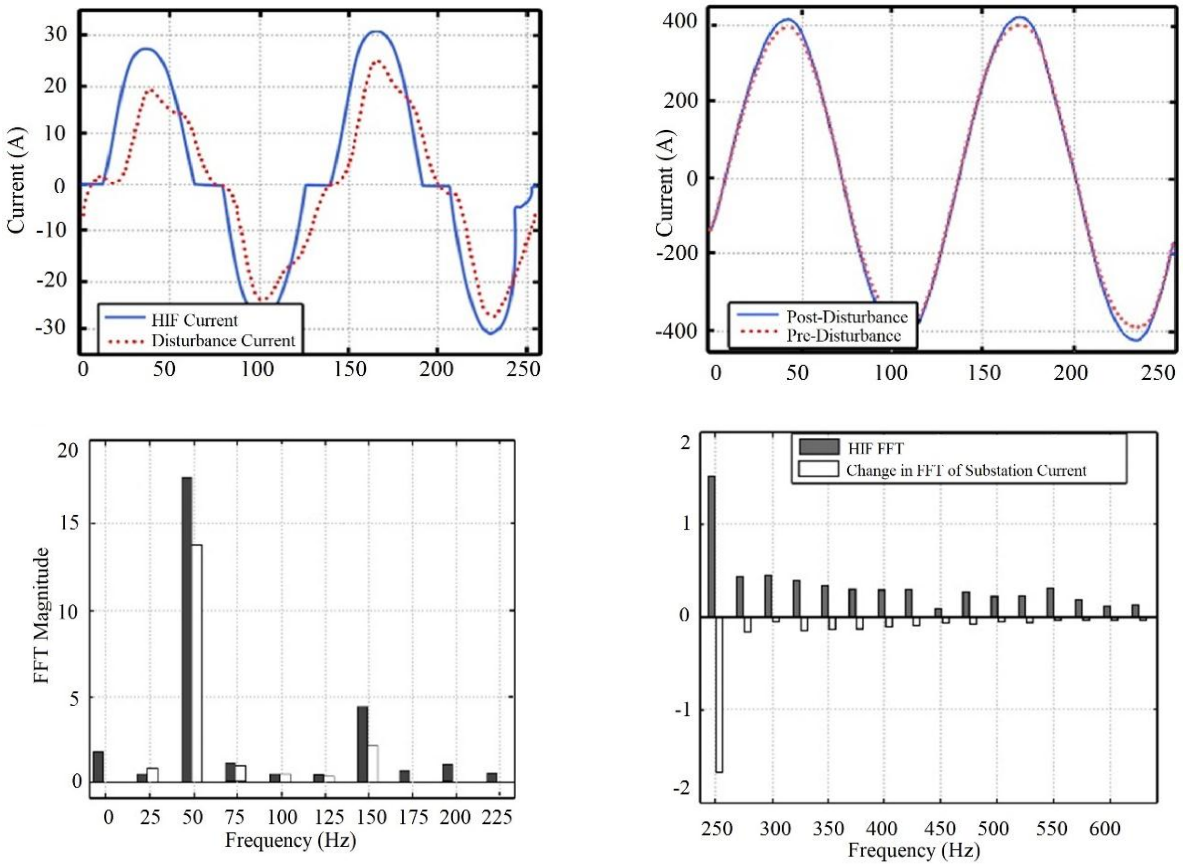


[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]



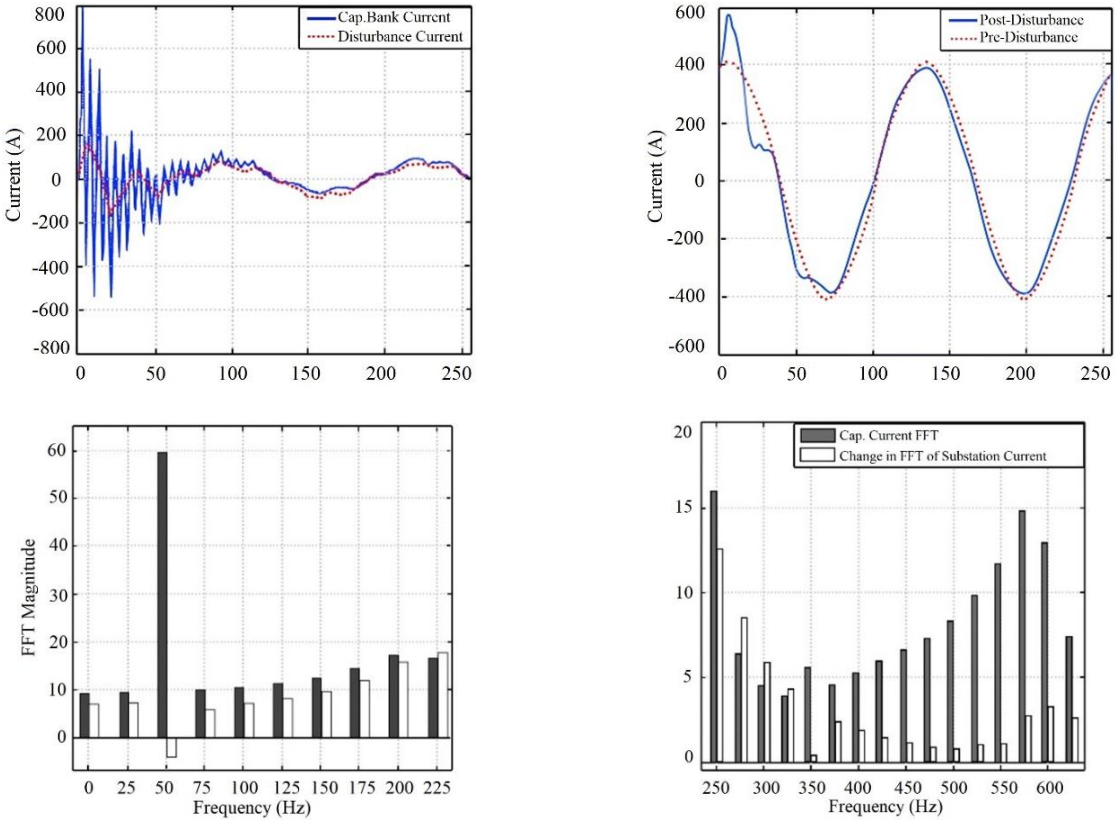
شکل (۶): خطای امپدانس بالای شبیه‌سازی‌شده با دامنه کم



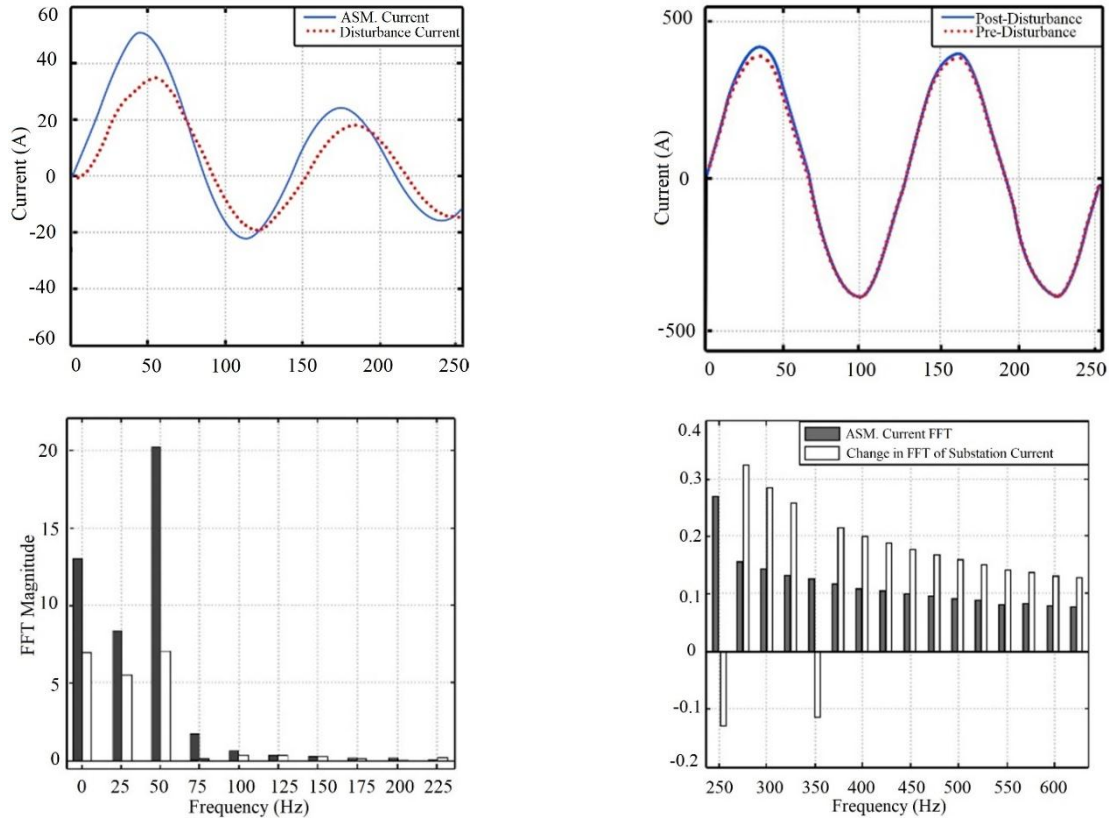
شکل (۷): خطای امپدانس بالای شبیه‌سازی‌شده با دامنه متوسط

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]



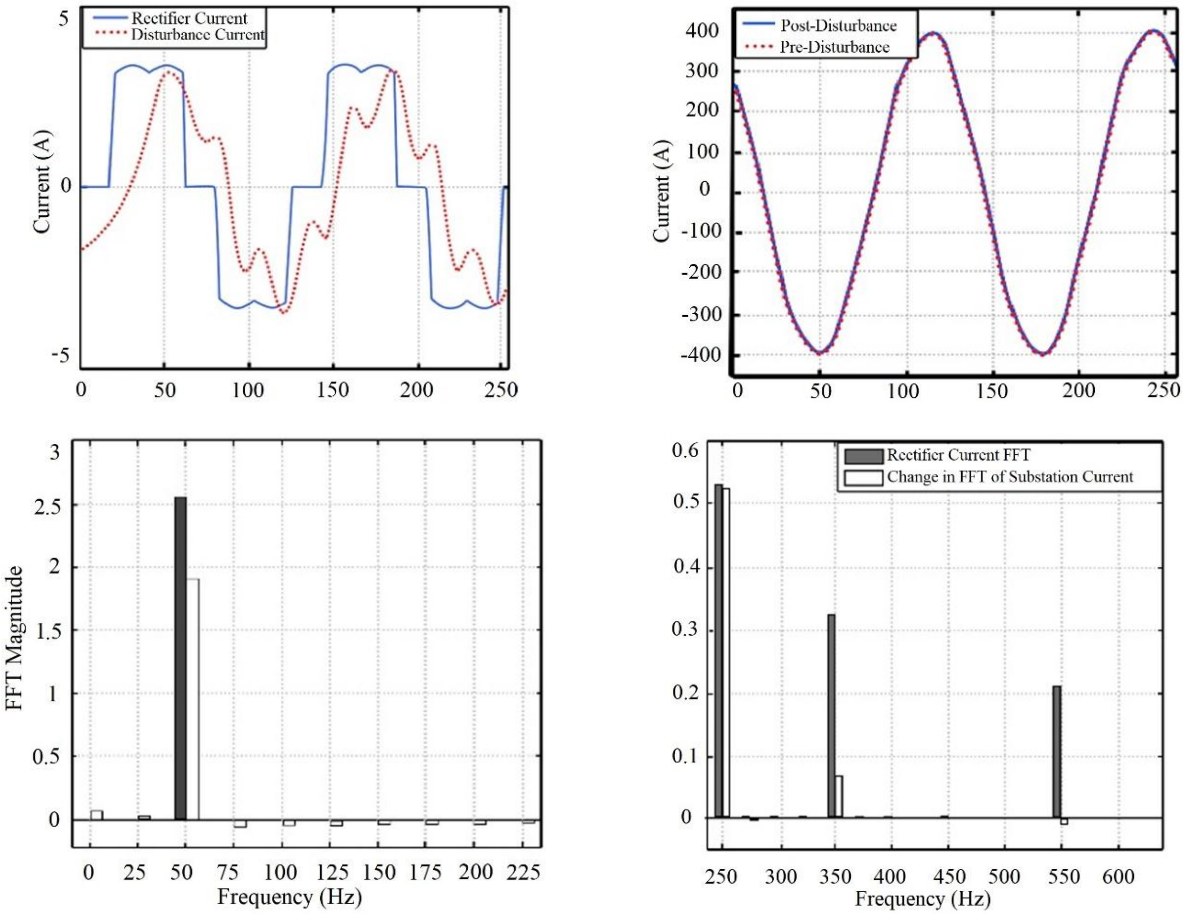
شکل (۸): وصل بانک خازنی (بانک خازنی متصل به گره ۸۲۴)



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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]



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

۵- نتایج عددی

در این بخش از مقاله، نتایج به‌کارگیری روش پیشنهادی تشخیص خطای امپدانس بالا ارائه خواهد شد. به‌منظور تحلیل مناسب نتایج روش پیشنهادی از شاخص‌های دقت، قابلیت اطمینان و امنیت استفاده‌شده است. دقت یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی یک طبقه‌بندی‌کننده است که با تقسیم مواردی که صحیح طبقه‌بندی‌شده‌اند به تعداد کل موارد مورد آزمایش محاسبه می‌شود. شاخص قابلیت اطمینان طرح حفاظتی از طریق تقسیم تعداد خطاهای امپدانس بالا تشخیص داده‌شده به تعداد کل خطاهای امپدانس بالا در مجموعه داده‌های استفاده‌شده به دست می‌آید و امنیت با تقسیم تعداد وقایع غیر خطا که خطا تشخیص داده‌شده‌اند به تعداد کل وقایع غیر خطا در مجموعه داده‌های استفاده‌شده، به دست می‌آید.

در این مقاله برای آموزش طبقه‌بندی‌کننده SVM از روش ارزیابی متقابل پنج-بخشی برای محاسبه شاخص‌ها استفاده‌شده است و کلیه شاخص‌های ارائه‌شده در این قسمت میانگین نتایج پنج بار آموزش و آزمایش طبقه‌بندی‌کننده SVM می‌باشد، به این معنی که در هر مرحله ۸۰٪ مجموعه داده فراهم‌شده از وقایع شبیه‌سازی‌شده در جدول (۴) برای آموزش استفاده‌شده 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 داده‌شده است.

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]

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

مجموعه داده‌های آزمایش (۳۰ مورد)			مجموعه داده‌های آموزش (۱۲۱ 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 ارائه‌شده است. روش پیشنهادی با استفاده از ویژگی‌های استخراج‌شده ناشی از ولتاژ و جریان از طریق تبدیل فوریه گسسته، تفاوت بین خطای امپدانس بالا را با سایر وقایع سیستم توزیع به‌درستی 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، به‌طور چشم‌گیری افزایش داده است. برای ارزیابی روش پیشنهادی، شبکه ۳۴ شینه IEEE همراه با سایر رویدادهای شبکه در محیط نرم‌افزاری EMTP-RV شبیه‌سازی‌شده 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.

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]

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 $\mu $-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.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.1.2]