

High impedance faults detection in distribution system using S transform and fuzzy system

Aida Abedzadeh Janiabadi¹ Saeid Hasheminejad²

¹-Ph.D Student, Department of electrical and computer engineering, Graduate university of advanced technology, Kerman, Iran, Email: aaida.abedzadeh@gmail.com

²-Assistant Professor, Department of electrical and computer engineering, Graduate university of advanced technology, Kerman, Iran, Email: S.hasheminejad@kgut.ac.ir

Abstract:

Overcurrent relays are the main protective devices in a distribution system. These relays perform their task according to the current amplitude of the distribution system feeder. If the current amplitude exceeds a predefined threshold, the relay will send a trip command the respective breaker. The problem is that, the current amplitude does not highly increase for a high impedance fault (HIF). Therefore, these faults are not identified by the ordinary protective devices. A new intelligent algorithm is proposed in this paper to identify the HIF in distribution systems. S transform is a powerful time-frequency analyzing technique which is able to extract all time and frequency information of a signal. After a close analysis on the S transform (ST) and its output specifications, all amplitude and phase information of the input signal in both time and frequency domains are extracted. ST output information is extracted by some curves. Then, to quantify the ST output information, four numerical indices named as total harmonic distortion (THD), even harmonic energy (EHE), variation coefficient (VC) and phase difference (PD) are extracted from the ST output curves. Each of the indices represents one of the amplitude or phase information of the signal in time and frequency domains. To identify the numerical indices related to the high impedance faults from other distribution system events, the indices are used as the inputs of the fuzzy system. Using fuzzy system and its inputs, the HIF is identified from other distribution systems such as the normal situation, load switching, capacitor switching and transformer inrush current. In the proposed algorithm, phase deviation before and after the event is used for the first time and using this parameter, the algorithm implementation time is reduced to 0.02 seconds. Simulation results show that in a 30dB noisy environment, the accuracy of the proposed algorithm is higher than 98.5%. Test signals are extracted from a real 20kV network simulated in PSCAD software. Results of testing the proposed algorithm show its superior performance in real distribution systems. Having high speed and low computational burden of the proposed algorithm, make it a good choice for applying on the real protective relays.

Keywords: High impedance faults, distribution system, S transform, fuzzy system

Date of sending the article: 2024/08/09

Acceptance date of the article: 2025/04/19

Name of the Corresponding Author: Saeid Hasheminejad

Corresponding Author's Address: Haft bagh alavi boulevard, Graduate university of advanced technology, Kerman, Iran

شناسایی خطاهای امپدانس بالا در شبکه توزیع با استفاده از تبدیل S و سیستم فازی

نوع مطالعه: پژوهشی

آیدا عابدزاده جانی آبادی، سعید هاشمی نژاد^۱، استادیار

۱- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، کرمان، ایران

Saeidhasheminejad@yahoo.com, S.hasheminejad@kgut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک الگوریتم هوشمند جدید برای شناسایی خطاهای امپدانس بالا^۱ (HIF) در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. پس از بررسی دقیق تبدیل S و خروجی‌های آن، تمامی اطلاعات دامنه و فاز در هر دو حوزه زمان و فرکانس از سیگنال جریان شبکه توزیع استخراج شده است. این اطلاعات به صورت منحنی‌هایی از خروجی تبدیل S اخذ شده است. سپس برای کمی‌سازی اطلاعات خروجی تبدیل S، چهار شاخص اعوجاج هارمونیک کل^۲ (THD)، انرژی هارمونیک زوج^۳ (EHE)، ضریب تغییرات^۴ (VC) و تغییرات فاز (PD) از منحنی‌های خروجی تبدیل S استخراج شده‌اند. هر کدام از اندیس‌ها، اطلاعات دامنه و فاز سیگنال در هر یک از حوزه‌های زمان و فرکانس هستند. سپس شاخص‌های عددی به عنوان ورودی سیستم فازی استفاده می‌شوند تا خطای امپدانس بالا از دیگر شرایط شبکه توزیع مثل شرایط نرمال، کلیدزنی بار، کلیدزنی خازنی و شرایط جریان هجومی ترانسفورماتور تشخیص داده شود. الگوریتم پیشنهادی فقط به یک سیکل از سیگنال جریان ورودی برای تصمیم‌گیری نهایی نیاز دارد. با استفاده از سیستم فازی، حتی با وجود نویز در سیگنال شبکه نیز تشخیص خطای امپدانس بالا به درستی انجام خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از سیگنال‌های شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار PSCAD، عملکرد بسیار خوب الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: خطای امپدانس بالا، شبکه توزیع، تبدیل S، تئوری فازی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۵/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: سعید هاشمی نژاد

نشانی نویسنده‌ی مسئول: کرمان، انتهای بلوار هفت باغ، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

^۱ . High impedance fault
^۲ . Total harmonic distortion
^۳ . Even harmonic energy
^۴ . Variation coefficient

۱- مقدمه

الف) اهمیت و اهداف

یکی از مسائل مهم در حفاظت از شبکه های توزیع، شناسایی و بی برق کردن خطاهای امیدانسی بالا (HIF) است. در شرایط بروز HIF، جریان ناشی از خطا افزایش زیادی ندارد و به همین دلیل به وسیله تجهیزات مرسوم شبکه توزیع قابل شناسایی نیست. بنابراین نیاز به روش های جدیدی برای شناسایی این نوع خطاست.

ب) کلیات موضوع

HIF ها مشخصاتی دارند که به وسیله آن ها می توان این نوع خطاها را شناسایی کرد. الگوریتم هایی که برای شناسایی این نوع خطا استفاده می کنند اغلب دو مرحله دارند. در ابتدا باید با روش مناسب، اطلاعات موجود در سیگنال شبکه استخراج شود. سپس، با استفاده از اطلاعات استخراج شده، وجود HIF تشخیص داده شود.

ج) مروری بر مقالات

در مرجع (Soheili, A., et. al., 2018)، برای استخراج مشخصات فرکانسی سیگنال، از تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) استفاده و سپس با استفاده از هارمونیک های ۳، ۵ و ۷، HIF شناسایی شده است. واضح است که برخی بارهای شبکه هم ممکن است که این هارمونیک ها را تولید کنند. بنابراین، استفاده از فقط اطلاعات فرکانسی نمی تواند روش دقیق و قابل اطمینانی را برای شناسایی HIF ها باشد. در (Wei, M., et. Al., 2021)، از هر دو نوع اطلاعات زمانی و فرکانسی برای شناسایی این نوع خطاها استفاده شده که از تبدیل موجک (WT) برای استخراج این مشخصات بهره می برد. شناسایی HIF ها در (Gao, J., et. Al., 2022) در دو مرحله انجام می شود. در مرحله اول شاخصی برای کمی سازی تغییرات هارمونیک سیگنال تعریف شده و در مرحله دوم، WT اطلاعات زمانی سیگنال را برای رسیدن به هدف استخراج می کند. در مرجع (Wei, M., et. Al., 2020) و (Chakaraborty, S., et. Al., 2019) هم از WT برای استخراج مشخصات سیگنال استفاده شده است. برای مثال در (Chakaraborty, S., et. Al., 2019)، از اندازه گیرهای هوشمند^۵ برای ثبت سیگنال ولتاژ از نقاط مختلف شبکه استفاده می شود. سپس دامنه ی هارمونیک های زوج با استفاده از WT استخراج می شود. در صورتی که انرژی هارمونیک های زوج از حد معینی بیشتر باشد، خطای امیدانسی بالا تشخیص داده می شود. مهمترین عیب الگوریتم هایی که از WT استفاده می کنند این است که این اجزاء در شرایط وجود نویز نمی تواند عملکرد مناسبی را ارائه نماید.

استخراج همزمان اطلاعات زمانی و فرکانسی سیگنال، با استفاده از تبدیل S^A (ST) امکان پذیر است (Lopes, G. N., et. Al., 2022).

^۵ . Short time Fourier transform

^۶ . Wavelet transform

^۷ . Smart meter

^۸ . S transform

در این مرجع، ۹ سیکل از سیگنال جریان ورودی برای تصمیم گیری استفاده می شود که باعث کاهش سرعت تصمیم گیری و افزایش حجم محاسباتی الگوریتم است. در مرجع (Lopes, G. N., et. Al., 2021) از اطلاعات زمانی سیگنال شبکه برای شناسایی HIF ها استفاده شده است. به دلیل استفاده از اطلاعات محدود، این الگوریتم هم نمی تواند قابل اطمینان باشد. در بعضی از مراجع، از اپراتور انرژی تیجر^۹ (TEO) برای استخراج مشخصات زمانی سیگنال استفاده شده است (Wnag, X., et. Al., 2019 و M., et. Al., 2021). از آنجا که TEO معمولاً اطلاعات فرکانس بالا را استخراج می کند، روش مناسبی برای هدف مورد بحث نیست. در مرجع (Alaei, S. A., et. Al., 2023) یک روش احتمالاتی برای شناسایی HIF پیشنهاد شده است. در این روش، دامنه و فرکانس لحظه ای با استفاده از TEO استخراج شده و سپس یک اندیس احتمالاتی محاسبه می شود. در صورتی که مقدار این اندیس بیشتر از یک مقدار از پیش تعیین شده باشد، شرایط HIF تشخیص داده می شود.

پس از استخراج اطلاعات، به الگوریتمی نیاز است که با استفاده از این اطلاعات، وقایع شبکه توزیع را دسته بندی کند. در مراجع (Gu, J., et. Al., 2021 و C., et. Al., 2020) و (Lala, H., et. Al., 2020) شبکه های عصبی مصنوعی برای این منظور به کار رفته است. در (Chaitanya, . B. K., et. Al., 2020)، بردار ماشین پشتیبان^{۱۰} (SVM) شناسایی HIF از دیدگاه وقایع شبکه را برعهده دارد. در (Xiao, Q. M., et. Al., 2022)، تحلیل جریان توالی صفر همراه با یک درخت تصمیم گیری نویسندگان را به هدف رسانده است. مشکل روش های برپایه هوش مصنوعی این است که به داده های زیادی جهت آموزش نیاز دارند و دقت تصمیم گیری هم به ماهیت سیگنال های آموزش بستگی دارد.

در مراجع می مثل (Wunderlich, S. S., et. Al., 2021) از الگوریتم های فراابتکاری برای شناسایی HIF ها استفاده شده است. در این مرجع، با مشتق گیری از امواج ولتاژ و جریان، این نوع خطا شناسایی می شود. در (Sifat, A. I., et. Al., 2021)، میدان مغناطیسی و جریان ورودی به فیدر برای رسیدن به هدف به کار رفته اند. در (Bhandia, R., et. Al., 2020) هم اعوجاجات سیگنال های ولتاژ و جریان برای شناسایی این خطاها استفاده شده است. در (Wang, B., et. Al., 2018)، مشخصه غیرخطی ولتاژ-جریان تحلیل شده است تا خطاهای امیدانسی بالا از دیگر وقایع شبکه جدا سازی شوند. با نصب خازن هایی در دو انتهای خط توزیع، یک الگوریتم براساس فرکانس های بالای تولید شده توسط خطا در (Xiong, Q., et. Al., 2020) پیشنهاد شده است. سپس با تحلیل اطلاعات فرکانسی استخراج شده، خطای امیدانسی بالا شناسایی می شود. در (Pirmani, S. K., et. Al., 2023)، با انتگرال گیری از حاصل ضرب جریان فاز و جریان توالی صفر فیدر، پارامتری به نام ضریب شباهت استخراج می-

^۹ . Teager energy operator

^{۱۰} . Support vector machine

سازی، در بخش ۶ بررسی شده و نتیجه‌گیری مقاله هم در بخش ۷ آمده است.

۲- تبدیل S

تبدیل S (ST) در سال ۱۹۹۶ توسط استاکول معرفی شد (Stockwell, R. G., 1996). ST یکی از تبدیلات زمان-فرکانس است که عملکرد بهتری را نسبت به تبدیلات قبل از خود مثل WT و تبدیل فوریه زمان کوتاه ارائه می‌دهد.

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)g(\tau - t, f)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

که در این رابطه، g تابع گوسی است که به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$g(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، δ پهنای پنجره گاوسی است که با فرکانس سیگنال رابطه معکوس دارد و به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$\sigma(f) = T = \frac{1}{|f|} \quad (3)$$

ST می‌تواند به صورت یک تبدیل فوریه زمان کوتاه هم در نظر گرفته شود که پنجره داده آن گوسی شکل است. پهنای این پنجره گاوسی با فرکانس سیگنال رابطه مستقیم دارند. بنابراین، با افزایش فرکانس، وضوح اطلاعات استخراج شده نیز افزایش می‌یابد. مطابق رابطه (۴)، ST می‌تواند از تبدیل فوریه سیگنال به دست آید. در اینجا، $H(f)$ تبدیل فوریه سیگنال زمانی $h(t)$ است.

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha + f) e^{-\left(\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}\right)} e^{j2\pi \alpha \tau} d\alpha \quad (4)$$

در این مقاله، ماتریس‌های دامنه و فاز خروجی تبدیل S توسط روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید.

$$A(kT, f) = \left| S \left[kT, \frac{n}{NT} \right] \right| \quad (5)$$

$$P(kT, f) = \tan^{-1} \left(\frac{\operatorname{Im} \left(S \left[kT, \frac{n}{NT} \right] \right)}{\operatorname{Re} \left(S \left[kT, \frac{n}{NT} \right] \right)} \right) \quad (6)$$

هر دو ماتریس دامنه و فاز خروجی ST برای سیگنالی با n نمونه، n ستون و $n/2$ ردیف دارند. در این ماتریس‌ها، هر ردیف شامل مقادیر زمانی برای هر فرکانس و هر ستون شامل مقادیر مختلف فرکانسی در هر زمان است. بنابراین، (۵) دامنه سیگنال را در هر دو حوزه زمان و فرکانس و (۶) فاز سیگنال را در هر دو حوزه نشان می‌دهد. حال می‌توان از این اطلاعات، شاخص‌های مورد نیاز را جوری استخراج کرد که بالاترین دقت و سرعت، شرایط HIF تشخیص داده شود.

شود. هر چه این پارامتر مقدار بیشتری داشته باشد، احتمال وقوع HIF بیشتر است. در این مرجع، فقط از اطلاعات جریان فیدر استفاده شده است و خطای انتگرالگیری جریان عملکرد الگوریتم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. استفاده از ریخت شناسی ریاضی^{۱۱} (MM) به عنوان راه حلی برای شناسایی HIFها در (Hojatpanah, F., et. Al., 2023) استفاده شده است. عملکرد این روش بر اساس اعمال MM به ولتاژ توالی صفر فیدر است. در (Cui, L., et. Al., 2023) هم HIF با محاسبه انحراف معیار سیگنال شبکه توزیع، قبل و بعد از وقوع اغتشاش شناسایی می‌شود.

د) نوآوری مقاله

در الگوریتم‌های ذکر شده، برای یک تصمیم‌گیری مطمئن نیاز است که از چندین سیکل سیگنال ورودی استفاده شود. چرا که در سیکل اول، شکل موج سیگنال جریان یا ولتاژ HIF با بعضی از اغتشاشات، مثل کلیدزنی خازنی، مشابهت زیادی دارد. در این مقاله، از تبدیل S برای استخراج مشخصات سیگنال استفاده شده است. با مطالعه دقیق بر روی ماهیت تبدیل S، اطلاعات بسیار کاملی از سیگنال جریان شبکه استخراج شده است که برای اولین بار، شامل هم اطلاعات دامنه و هم اطلاعات فاز سیگنال، در هر دو حوزه زمان و فرکانس است. با داشتن اطلاعات کافی در الگوریتم پیشنهادی، در همان سیکل اول، سیگنال ناشی از HIF از سایر سیگنال‌های شبکه توزیع تشخیص داده شده است. بر اساس اطلاعات استخراج شده، چهار شاخص عددی تعریف می‌شود که عبارتند از اعوجاج هارمونیکی کل (THD)، انرژی هارمونیک‌های زوج (EHE)، تغییرات فاز (PD) و ضریب تغییرات (VC). به این ترتیب، شاخص‌هایی برای ارزیابی مشخصات فرکانسی، مشخصات دامنه و مشخصات فاز در دسترس خواهد بود. برای این که الگوریتم پیشنهادی، در شرایط وجود نویز در سیستم نیز به خوبی HIFها را تشخیص دهد، در این مقاله از تئوری فازی برای تصمیم‌گیری استفاده شده است. در این مقاله، مدل جدیدی برای شبیه سازی HIF در نرم‌افزار PSCAD پیشنهاد شده است که مدل‌های قبلی را تکمیل کرده و به شکل بسیار مناسبی رفتار تصادفی HIFها را شبیه‌سازی می‌کند. اتفاقات در نظر گرفته شده در این مقاله، کلیدزنی بار، کلیدزنی خازنی، جریان هجومی و HIF هستند. الگوریتم پیشنهادی به خوبی توانسته است HIF را از شرایط عادی شبکه و دیگر اتفاقات ذکر شده تشخیص دهد.

ه) ساختار مقاله

در بخش ۲ مقاله، تبدیل S همراه با روابط ریاضی مربوطه تشریح می‌شود. در بخش‌های ۳ و ۴، مدل خطای امیدانس بالا و فیدر شبیه‌سازی شده توضیح داده می‌شود. توضیح کامل الگوریتم پیشنهادی در فصل ۵ ارائه شده است. کارایی الگوریتم پیشنهادی با ارائه نتایج شبیه‌

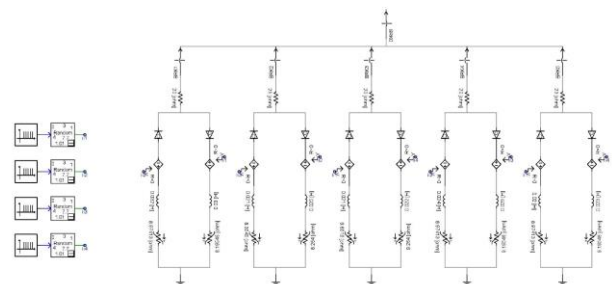
¹¹ Mathematical morphology

۳- مدل HIF

برای داشتن مدل دقیقی از HIF، در این قسمت، مشخصات مختلف HIFها بررسی شده است. مهمترین مشخصات HIFها به شرح زیر آمده است:

- به دلیل وجود جرقه در سیگنال جریان HIF، این سیگنال ماهیتی تصادفی دارد.
- دامنه سیگنال جریان به صورت تدریجی افزایش می‌یابد تا به میزان بیشینه خود برسد.
- ولتاژ شکست برای نیم سیکل‌های مثبت و منفی متفاوت است. بنابراین، سیگنال جریان HIF تقارن نیم‌موج ندارد.
- شکل سینوسی موج جریان، در لحظه عبور از صفر مقدار لحظه‌ای، مختل شده و از حالت سینوسی خارج می‌شود.

بر اساس مشخصات معرفی شده، مدل HIF نشان داده شده در شکل (۱) پیشنهاد شده است. با اضافه شدن بلوک تصادفی سمت چپ، شکل موج حاصل شباهت بسیار زیادتری نسبت به مدل‌های قبلی به موج واقعی پیدا می‌کند.

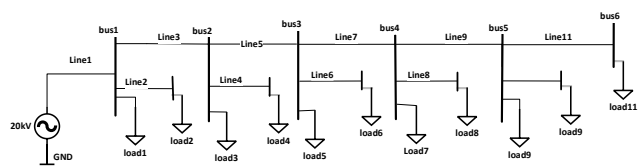


شکل (۱): مدل HIF شبیه‌سازی شده در PSCAD

برای شبیه‌سازی نامتقارن بودن نیم‌سیکل‌های مثبت و منفی، دو دیود و منابع DC با مقادیر متفاوت در مدل HIF استفاده شده است. برای محدود کردن دامنه جریان بین محدوده‌های تعریف شده، از دو مقاومت استفاده شده است. شاخه‌های مختلف هم برای شبیه‌سازی افزایش تدریجی دامنه جریان بوده است. در نهایت، شرایط تصادفی که جرقه به وجود می‌آورد، با بلوک‌هایی که نمونه‌های منابع ولتاژ را به صورت تصادفی تغییر می‌دهد، شبیه‌سازی می‌شود.

۴- شبکه شبیه‌سازی شده

در این مقاله، قسمتی از یک سیستم توزیع ۲۰kV واقعی از شهرستان سیرجان در نرم‌افزار PSCAD شبیه‌سازی شده است. نمودار تک خطی شبکه شبیه‌سازی شده در شکل (۲) نشان داده شده است.



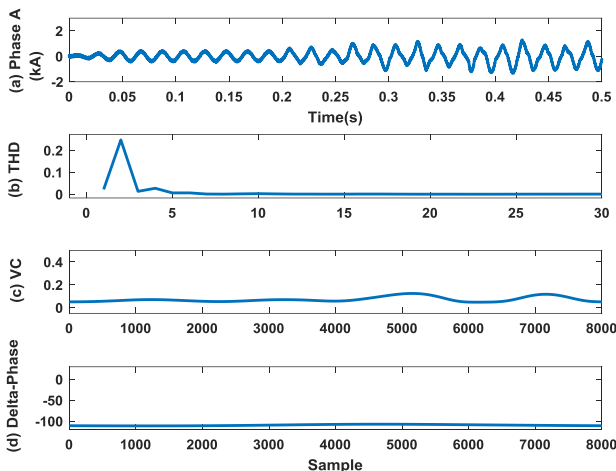
شکل (۲): نمودار تک خطی فیدر شبیه‌سازی شده

نمونه‌های مختلف HIF و اتفاقات دیگر در مکان‌های مختلف در شبکه طراحی شده، شبیه‌سازی شده است. سپس با تحلیل عمیق مشخصات سیگنال‌های ناشی از اتفاقات مختلف، الگوریتم جدید پیاده‌سازی شده است.

۵- الگوریتم پیشنهادی

۵-۱- شکل موج مربوط به وقایع مختلف

شکل ۳(a) نمونه‌ای از شکل موج مربوط به یک خطای امپدانس بالا را نشان می‌دهد. این خطا در شین شماره ۴ از شکل ۲، ۰/۲ ثانیه بعد از آغاز شبیه‌سازی اتفاق افتاده است.



شکل ۳: شکل موج HIF و منحنی‌های خروجی تبدیل S

اطلاعات زمانی و فرکانسی مختلفی که از این شکل موج استخراج شده‌اند، برای شناسایی HIFها از دیگر اغتشاشات سیستم توزیع استفاده شده است. شکل ۳(b) محتوای هارمونیک سیگنال جریان را نشان می‌دهد. این منحنی مربوط به ستون اول خروجی ماتریس دامنه تبدیل S است. در این مقاله، این منحنی THD نامیده می‌شود. چرا که THD سیگنال جریان از این منحنی به دست می‌آید. شکل ۳(c)، مربوط است به مقادیر زمانی آن سطری که مربوط به فرکانس پایه سیستم (۵۰Hz) است. پارامتر ضریب تغییرات (VC) از این منحنی استخراج می‌شود. شکل ۳(d) مقادیر فاز را بر حسب زمان نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که پنجره داده در این الگوریتم فقط یک سیکل است و برای بدست آوردن شکل ۳(d) تفاوت فاز^{۱۲} (PD) یک سیکل قبل و یک سیکل بعد از خطا در نظر گرفته می‌شود.

به منظور تحلیل منحنی‌های خروجی ST برای کلیدزنی بار، یک بار تکفاز ۱/۲MW، ۰/۹MVAR، روی شین ۵ قرار داده شده که ۰/۲۰۲۵ ثانیه پس از شروع فرایند شبیه‌سازی، کلیدزنی می‌شود. شکل موج جریان و خروجی ST مربوطه در شکل ۴ نشان داده شده است.

^{۱۲} Phase difference

۲-۵- تعریف پارامترها

در ادامه الگوریتم نیاز است که خروجی‌های ST به یک سری پارامترهای عددی تبدیل شوند تا بتواند به عنوان ورودی سیستم فازی به کار گرفته شود. پارامترهای عددی و شیوه به دست آمدن آن‌ها در ادامه توضیح داده شده است.

۱-۲-۵- ضریب تغییرات (VC)

معمولاً خطاهای امپدانس بالا با جرقه همراه هستند و بنابراین، نمونه‌های سیگنال جریان ناشی از این خطاها به طور تصادفی تغییر می‌کنند. پارامتر VC این تصادفی بودن را کمی سازی می‌کند. همانطور که قبلاً بیان شد، هر سطر از ماتریس دامنه خروجی ST، مقادیر مختلف زمانی در هر فرکانس است. از آنجا که تغییرات دامنه سیگنال در فرکانس ۵۰Hz در اینجا مهم است، VC میزان تغییرات نمونه‌های سیگنال مربوط به همین سطر را به وسیله روابط زیر نشان می‌دهد.

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^N Xi, j}{N} \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Xi, j - \mu)^2}{N}} \quad (8)$$

$$VC = \frac{\sigma}{\mu} \quad (9)$$

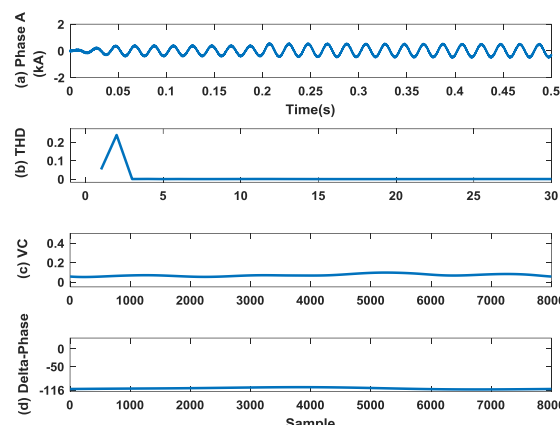
در اینجا X_{ij} در واقع ژانمین درایه از ماتریس دامنه ST، i سطر مربوط به فرکانس پایه، j شماره ستون و N تعداد مقادیر زمانی است. برای تعیین دامنه تغییرات مقدار VC، تعداد زیادی سیگنال از اغتشاشات مختلف ساخته شده و VC مربوط به آن‌ها استخراج شده است. جدول ۱ دامنه تغییرات مقدار VC برای هر یک از اغتشاشات را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقدار VC برای پارامترهای مختلف

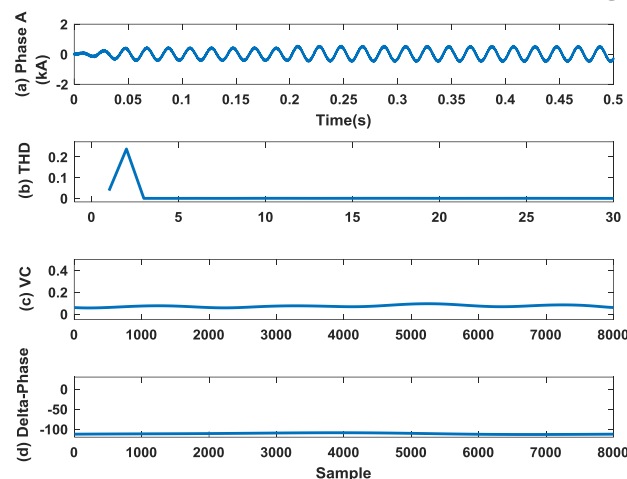
اتفاق	حداقل مقدار VC	حداکثر مقدار VC
HIF	۰/۰۳۹۹	۰/۱۶۹۹
کلیدزنی بار	۰/۰۰۲۶	۰/۰۹۲۷
کلیدزنی خازن	۰/۰۰۰۸	۰/۱۳۷
جریان هجومی ترانسفورماتور	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۵۳۱

۲-۲-۵- اعوجاج هارمونیک کل (THD)

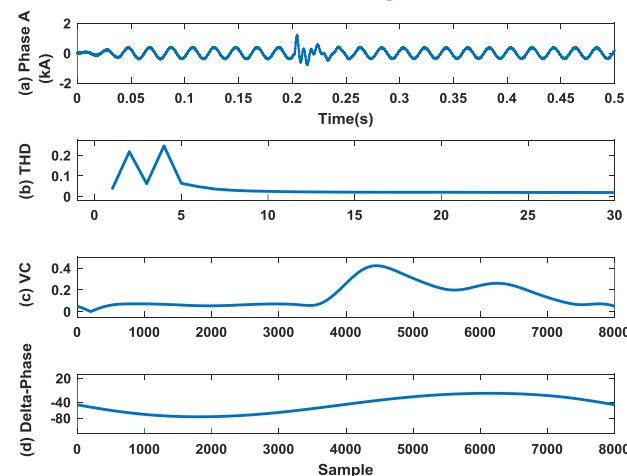
ماهیت غیرخطی HIF باعث می‌شود که سیگنال جریان ناشی از آن حاوی هارمونیک باشد. برای آشکارسازی وجود هارمونیک‌ها در یک



شکل ۴: سیگنال جریان کلیدزنی بار و خروجی‌های ST اغتشاش بعدی که در یک شبکه توزیع ممکن است وجود داشته باشد، انرژی‌دار کردن ترانسفورماتور است. شکل ۵ امواج مربوط به کلیدزنی یک ترانسفورماتور ۱MVA به شین ۵ را در ۰/۲۰۷۵ ثانیه را نشان می‌دهد.



شکل ۵: موج جریان مربوط به انرژی‌دار کردن ترانسفورماتور و خروجی‌های ST شکل ۶، امواج مربوط به کلیدزنی یک خازن ۷۰μf به باس ۱، در لحظه ۰/۲۱۷۵ را نشان می‌دهد.



شکل ۶: موج جریان کلیدزنی خازنی و خروجی‌های ST

این همان جایی است که باعث می‌شود که الگوریتم‌های مراجع قبل مجبور باشند چند سیکل صبر کنند تا گذرای ناشی از کلیدزنی خازنی حذف شود که HIF به درستی تشخیص داده شود.

در این مقاله برای اولین بار از پارامتر PD استفاده شده است. وقوع HIF تغییر خیلی زیادی را در فاز سیگنال ایجاد نمی‌کند. اما کلیدزنی خازن‌های بزرگ، تغییر قابل توجهی را در فاز سیگنال ایجاد می‌کند. در مجموع می‌توان گفت کلیدزنی خازن‌های کوچک، که تغییر فاز بزرگی را منجر نمی‌شوند، پارامترهای VC، THD و EHE کوچکی در مقایسه با HIF دارند. اما وقتی ظرفیت خازن کلیدزنی شده زیاد شود، پارامترهای سه‌گانه ناشی از آن مقدار بزرگی دارند که با HIF تداخل دارد. اما همزمان، کلیدزنی این خازن‌ها، تغییر زیادی را در فاز سیگنال ایجاد می‌کند که بسیار بیشتر از تغییر فاز معمول ناشی از HIF است و به همین ترتیب در همان سیکل اول از HIF تشخیص داده می‌شود. جدول ۴، محدوده مقادیر PD را برای وقایع مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۴: محدوده مقادیر PD برای پارامترهای مختلف

اتفاق	حداقل مقدار PD	حداکثر مقدار PD
HIF	۰/۷۳۱۲	۱۴/۲۳۵۸
کلیدزنی بار	۰/۰۶۱۸	۶/۹۳۹۴
کلیدزنی خازن	۰/۱۱۵۵	۶۳/۹۴۸۵
جریان هجومی ترانسفورماتور	۰/۰۰۳۴	۴/۱۴۳

۳-۵- سیستم فازی

سیستم فازی عملکرد مناسبی را در فرایندهای تصمیم‌گیری از خود نشان داده است. در این مقاله هم از سیستم فازی استفاده شده است تا مقدار شاخص‌های چهارگانه را گرفته و تصمیم‌گیری را بر اساس این مقادیر انجام دهد. در این مقاله، برای هر پارامتر، دو تابع عضویت فازی دوزنقه‌ای تعریف شده است. جدول ۵ مشخصات توابع عضویت فازی تعریف شده را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر جدول ۵ بر اساس بازه تغییرات مقادیر چهار پارامتر تعیین شده است.

جدول ۵: مقادیر توابع عضویت سیستم فازی

	VC	PD	THD	EHE
MF ₁	۰/۰۱-۰/۰۳۹	۲۰/۱-۲۰	۰/۰۲۵-۰/۰۲۴	۰/۰۵۵-
MF ₂	۰/۰۴۱-۰/۰۳۹	۲۰/۱-۲۰	۰/۰۲۵-۰/۰۲۴	۰/۰۵۱-۰/۰۴۹
	۱/۰۱-۱-	۹۰-۸۰	۱/۰۲-۱-	۲-۱

سیگنال، می‌توان از پارامتر THD استفاده کرد. پارامتر THD توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^H i_h^2}}{i_1} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، i_h هارمونیک مرتبه h ام از سیگنال جریان و H مجموع تعداد فرکانس‌های موجود در ماتریس دامنه خروجی ST است. جدول (۲) محدوده مقدار THD برای وقایع مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۲: محدوده مقادیر THD برای وقایع مختلف

اتفاق	حداقل مقدار THD	حداکثر مقدار THD
HIF	۰/۰۲۳۴	۰/۲۶۹۲
کلیدزنی بار	۰/۰۲۱۱	۰/۰۵۶۸
کلیدزنی خازن	۰/۰۲۷۲	۱/۰۰۷۶
جریان هجومی ترانسفورماتور	۰/۰۰۳۵	۰/۱۷۷۷

۳-۲-۵- انرژی هارمونیک‌های زوج (EHE)

هنگام وقوع HIF، ولتاژ شکست برای نیم‌سیکل‌های مثبت و منفی یکسان نیست. بنابراین، سیگنال جریان HIF تقارن نیم موج ندارد و سیگنالی که تقارن نیم موج ندارد، حاوی هارمونیک زوج است. پارامتر EHE در واقع وقوع هارمونیک‌های زوج را کمی‌سازی می‌کند و با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$EHE = \frac{\sqrt{\sum_{h=2,4,6,\dots} i_h^2}}{i_1} \quad (13)$$

محدوده مقادیر EHE برای وقایع مختلف در جدول ۳ آمده است.

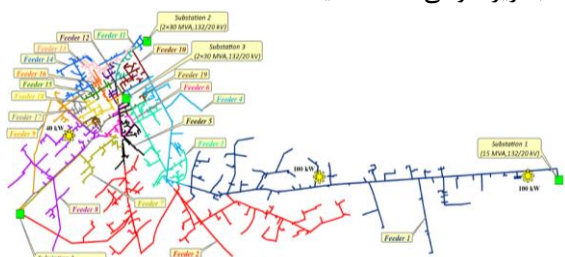
جدول ۳: محدوده مقادیر EHE برای وقایع مختلف

اتفاق	حداقل مقدار EHE عمل	حداکثر مقدار EHE
HIF	۰/۰۵۲	۰/۱۸۱
کلیدزنی بار	۰/۰۰۰۸	۰/۰۳۸۱
کلیدزنی خازن	۰/۰۰۵۱	۱/۴۱۷۶
جریان هجومی ترانسفورماتور	۰/۰۰۲۲	۰/۱۷۱۴

۳-۲-۵- تغییر فاز (PD)

با استفاده از پارامترهای معرفی شده تا قبل از این، HIF از دیگر وقایع به غیر از کلیدزنی خازنی تشخیص داده می‌شود. در واقع پارامترهای THD، EHE و VC برای HIF و کلیدزنی خازنی می‌توان مشابه باشد.

این فیدر شبیه‌سازی شده‌اند. لازم به ذکر است که تمامی سیگنال‌های تست با نویز گاوسی ۳۰dB آمیخته شده‌اند.



شکل ۸: بخشی از شبکه توزیع شهرستان سیرجان

۴-۱- شناسایی خطای امپدانس بالا

برای نشان دادن عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی، تعداد زیادی سیگنال جریان ناشی از HIF با مشخصات متفاوت، در زمان‌ها و مکان‌های مختلف در فیدر شهرستان سیرجان شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی قادر است شرایط خطای امپدانس بالا را با دقت بسیار بالایی شناسایی کند. جدول ۶ بخشی از نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۶: نتایج شناسایی خطای امپدانس بالا

اتفاق	زمان وقوع	محل	VC	PD (درجه)	THD	EHE	خروجی فازی
HIF ₁	۰/۲	باس ۴	۰/۰۸۵۴	۳/۹۵۷	۰/۱۱۶	۰/۱۰۹	۱
HIF	۰/۲۰۲۵	باس ۲	۰/۱۲۹۴	۱/۵۸۹	۰/۱۴۵	۰/۱۳۷	۱
HIF ₃	۰/۲۰۷۵	باس ۴	۰/۰۴۸۰	۱/۴۸۸	۰/۱۳۶	۰/۱۰۴	۱
HIF ₄	۰/۲۱	خط ۳	۰/۰۷	۱/۳۲۷	۰/۱۳۹	۰/۱۳	۱
HIF ₅	۰/۲۱۵	خط ۴	۰/۰۶۷۷	۵/۳۲۸	۰/۱۳۸	۰/۰۸۷	۱

به عنوان مثال، برای HIF₃ مقدار THD برابر است با ۰/۱۳۶ که در محدوده MF₂ قرار می‌گیرد. مقدار EHE برابر است با ۰/۱۰۴ که باز هم در محدوده MF₂ است. مقادیر VC و PD به ترتیب ۰/۰۴۸ و ۱/۴۸۸ است که به ترتیب در محدوده MF₂ و MF₁ در تابع عضویت فازی خود هستند. بنابراین، بر اساس پنج‌مین قانون سیستم فازی، خروجی فازی یک بوده و HIF نتیجه خواهد شد.

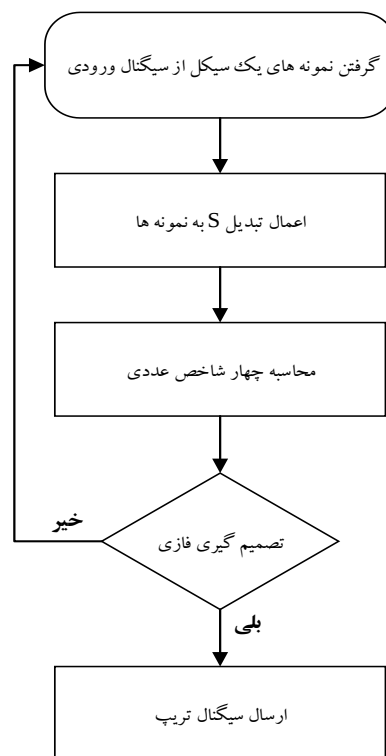
۴-۲- کلیدزنی بار

کلیدزنی بار نه تنها جریان عبوری از فیدر را تغییر می‌دهد، بلکه یک سری تغییرات دینامیکی را هم در سیگنال جریان به وجود می‌آورد. سیستم حفاظتی باید این شرایط را از حالت HIF تشخیص داده و از عملکرد اشتباه رله جلوگیری کند. در این قسمت، بارهایی با مقادیر مختلف، در زمان‌های مختلف به محل‌های مختلفی از فیدر کلیدزنی

سیستم فازی استفاده شده از نوع تاکاگی-سوگنو است و خروجی آن اعداد ۰ و ۱ هستند. عدد ۱ شرایط HIF و عدد ۰ عدم وجود HIF را نشان می‌دهد. قوانین فازی مطابق زیر تعریف می‌شوند.

- اگر THD در محدوده MF₁ بود، خروجی صفر است.
- اگر THD در محدوده MF₂ و EHE در محدوده MF₁ بود، خروجی صفر است.
- اگر THD در محدوده MF₂ و EHE در محدوده MF₂ و VC در محدوده MF₁ بود، خروجی صفر است.
- اگر THD در محدوده MF₂ و EHE در محدوده MF₂ و VC در محدوده PD و MF₂ بود، خروجی صفر است.
- اگر THD در محدوده MF₂ و EHE در محدوده MF₂ و VC در محدوده PD و MF₂ بود، خروجی یک است.

فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

۴- نتایج شبیه‌سازی

شکل ۸ بخشی از شبکه ۲۰kV شهرستان سیرجان از استان کرمان را نشان می‌دهد. یکی از فیدرهای این شبکه (که در شکل ۸ به Substation1 متصل است) در نرم‌افزار PSCAD شبیه‌سازی شده است. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، HIF و بقیه وقایع در

همین است که الگوریتم‌های حفاظتی پیشین مجبور بودند زمان عملکرد رله را معادل با میرا شدن گذرای ناشی از یک کلیدزنی خازنی به تأخیر بیندازند (مثلاً ۸ سیکل). اما با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، نیاز به این تأخیر زمانی نیست. در این قسمت، عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی سیگنال جریان ناشی از کلیدزنی خازنی بررسی شده است. در واقع بررسی شده است که آیا الگوریتم پیشنهادی می‌تواند در همان سیکل اول سیگنال جریان ناشی از کلیدزنی خازنی را از سیگنال ناشی از HIF تشخیص دهد یا خیر. به این منظور تعداد زیادی سیگنال ناشی از کلیدزنی خازنی تولید شده و به عنوان سیگنال تست به الگوریتم پیشنهادی داده شده است. جدول ۹ برخی از نتایج را نشان می‌دهد.

جدول ۹: نتایج شناسایی کلیدزنی خازنی

اتفاق	مقدار خازن (μf)	زمان کلیدزنی	محل	VC	PD (درجه)	THD	EHE	خروجی فازی
CS1	۳	۰/۲	باس ۳	۰/۰۰۶	۱/۰۹۱	۰/۰۳۴	۰/۰۱۵	۰
CS2	۸۳	۰/۲۰۲۵	خط ۱۰	۰/۱۰۴	۵۹/۰۷۲	۰/۲۱۱	۰/۵۸۱	۰
CS3	۱۲	۰/۲۱	باس ۳	۰/۰۲۶	۴/۸۲۷	۰/۰۷	۰/۰۴۷	۰
CS4	۳۵/۳	۰/۲۱۵	خط ۱۰	۰/۰۷۷	۲۳/۰۰۴	۰/۹۶	۰/۳۶۸	۰
CS5	۲/۳	۰/۲۱۷۵	باس ۱	۰/۰۰۵	۰/۹۷۵	۰/۲۰۸	۰/۰۹۲	۰

ایده‌ی شناسایی کلیدزنی خازنی و HIF در الگوریتم پیشنهادی شامل دو قسمت است. برای کلیدزنی خازن‌های بزرگ مثل CS2 در جدول ۹، با استفاده از پارامتر PD کلیدزنی خازنی با مقدار زیاد PD (۵۹/۰۷۳) تشخیص داده می‌شود. چرا که این مقدار در محدوده MF₂ تعریف شده برای این پارامتر قرار می‌گیرد. برای خازن‌های کوچک مثل CS3 در جدول ۹، مقدار VC نشان می‌دهد که سیگنال ورودی ناشی از یک خطای امپدانس بالا نیست.

۷- نتیجه‌گیری

برای شناسایی سریع خطاهای امپدانس بالا، یک الگوریتم بر اساس تبدیل S و سیستم فازی در این مقاله ارائه شد. در این الگوریتم، فقط با یک سیکل از سیگنال ورودی بعد از وقوع اغتشاش، خطای امپدانس بالا با اطمینان بسیار بالایی شناسایی می‌شود. تمام سیگنال‌های تست هم با نویز ۳۰dB ترکیب شدند تا این اطمینان حاصل شود که الگوریتم پیشنهادی در شرایط عملی هم قابل استفاده خواهد بود. داشتن دانش بالا در مورد خصوصیات خروجی تبدیل S این امکان را به نویسندگان داد تا حداکثر اطلاعات لازم را از آن استخراج کنند و همین مورد هم باعث شد تا الگوریتمی سریع و دقیق حاصل شود. وجود ۴ شاخص عددی، که هر کدام ممکن بود نشان دهنده نوع خاصی از اغتشاش در شبکه باشند، باعث شد که نویسندگان از سیستم

شده است و سیگنال جریان ناشی از آن‌ها به عنوان سیگنال تست برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است. جدول ۷ برخی از نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۷: نتایج شبیه‌سازی برای کلیدزنی بار

اتفاق	توان (MVA)	زمان کلیدزنی	محل	VC	PD (درجه)	THD	EHE	خروجی فازی
L1	۳	۰/۲	باس ۱	۰/۰۹۳	۶/۸۶۴	۰/۰۲۸	۰/۰۰۶	۰
L2	۱	۰/۲۰۷۵	خط ۸	۰/۰۲۸	۱/۲۲۸	۰/۰۳۱	۰/۰۱	۰
L3	۰/۲۵	۰/۲۱	باس ۴	۰/۰۰۸	۰/۵۶۹	۰/۰۲۱	۰/۰۰۱	۰
L4	۰/۲۵	۰/۲۱۵	باس ۱	۰/۰۰۷	۰/۱۲۶	۰/۰۲۷	۰/۰۰۴	۰
L5	۲/۵	۰/۲۱۷۵	خط ۸	۰/۰۶۳۸	۲/۸۲۶	۰/۰۵۷	۰/۰۳۸	۰

برای مثال، L4 در جدول ۷ را در نظر بگیرید. در اینجا مقدار EHE برابر با ۰/۰۰۴ بوده و در محدوده MF₁ این متغیر است. بنابراین، بر اساس قانون اول سیستم فازی، خروجی فازی صفر بوده و نیازی به ارسال سیگنال تریپ نیست.

۳-۶- جریان هجومی ترانسفورماتور

در لحظه‌ی برقرار شدن ترانسفورماتور، جریانی در ترانسفورماتور جاری می‌شود که هم دامنه بزرگتری نسبت به جریان نامی فیدر دارد و هم حاوی هارمونیک است. الگوریتم پیشنهادی نباید این شرایط را با شرایط خطا اشتباه بگیرد. برای تحلیل این مورد، الگوریتم پیشنهادی با چندین سیگنال ناشی از برقرار کردن ترانسفورماتور تست شده است. جدول ۸ برخی از نتایج این تحلیل را نشان می‌دهد.

جدول ۸: نتایج شبیه‌سازی برای جریان هجومی ترانسفورماتور

اتفاق	توان (MVA)	زمان کلیدزنی	محل	VC	PD (درجه)	THD	EHE	خروجی فازی
I1	۰/۵	۰/۲	خط ۶	۰/۱۵	۱/۱۹۶	۰/۰۲۴	۰/۰۰۲	۰
I2	۳/۳	۰/۲۰۵	خط ۶	۰/۰۰۳	۱/۰۱	۰/۰۵۴	۰/۰۲۵	۰
I3	۱	۰/۲۱	باس ۵	۰/۰۰۳	۰/۲۶۴	۰/۰۲۷	۰/۰۰۲	۰
I4	۰/۳	۰/۲۱۲۵	باس ۲	۰/۰۰۹	۰/۴۵۳	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۰
I5	۰/۵	۰/۲۱۷۵	باس ۱	۰/۰۵۲	۰/۵۹۳	۰/۰۳۳	۰/۰۱۴	۰

۴-۶- کلیدزنی خازن

مشخصات سیگنال جریان ناشی از کلیدزنی خازنی، در لحظات ابتدایی کلیدزنی، بسیار شبیه به مشخصات سیگنال ناشی از یک HIF است.

مراجع

- using empirical mode decomposition. *IEEE systems journal*, vol. 14, no. 3, pp. 3494-3505.
- Chaitanya, B. K., Yadav, A., Pazoki, M. (2020). An intelligent detection of high impedance faults for distribution lines integrated with distributed generators. *IEEE systems journal*, vol. 14, no. 1, pp. 870-879.
- Xiao, Q. M., Guo, M. F., Chen, D. Y. (2022). High-impedance fault detection method based on one-dimensional variational prototype encoder for distribution networks. *IEEE systems journal*, vol. 16, no. 1, pp. 966-976.
- Wunderlich, S. S., Bauer, D., Santi, E., Dougal, R. A., Benigni, A., Bennett, R., Zubi, L. E. (2021). Protection scheme for fast detection and interruption of high-impedance faults on rate-limited distribution networks. *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, vol. 9, no. 3, pp. 2540-2549.
- Sifat, A. I., Mcfadden, F. JS., Bailey, J., Rayudu, R., Hunze, A. (2021). Characterization of 400V high impedance fault with current and magnetic field measurements. *IEEE transactions on power delivery*, vol. 36, no. 6, pp. 3538-3549.
- Bhandia, R., Chavez, J. D. J., Cvetkovic, M., Palensky, P. (2020). High impedance fault detection using advanced distortion detection technique. *IEEE transactions on power delivery*, vol. 35, no. 6, pp. 2598-2611.
- Wang, B., Geng, J., Dong, X. (2018). High impedance fault detection based on nonlinear voltage-current characteristic profile identification. *IEEE transactions on smart grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3783-3791.
- Xiong, Q., Feng, X., Gattozzi, A. L., et al. (2020). Series arc fault detection and localization in DC distribution system. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 69, no. 1, pp. 122-134.
- Pirmani, S. K., Mahmud, M. A., Islam, S. N., Arif, M. T. (2023). A modified charge similarity approach for detecting high impedance earth faults in resonant grounded power distribution networks. *Electric power systems Research*, vol. 220, 109264.
- Hojatpanah, F., Badrkhani Ajaei, F., Tiwari, H. (2023). Reliable detection of high impedance faults using mathematical morphology. *Electric power systems Research*, vol. 216, 109078.
- Cui, L., Liu, Y., Wang, L., Chen, J., Zhang, X. (2023). High-impedance faults detection method based on sparse data divergence discrimination in distribution networks. *Electric power systems Research*, vol. 223, 109514.
- Stockwell, R. G., Mansinha, L., Lowe, R. P. (1996). Localization of the complex spectrum: The S transform. *IEEE transactions on signal processing*, vol. 44, no. 4, pp. 998-1001.
- فازی برای نتیجه‌گیری درست استفاده کنند. الگوریتم ارائه شده با داده‌های استخراج شده از مدل یک شبکه واقعی در نرم‌افزار PSCAD مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان دهنده قابلیت بسیار بالای الگوریتم در شناسایی خطاهای امپدانس بالا بود.
- Soheili, A., Sadeh, J., Bakhshi, R. (2018). Modified FFT based high impedance fault detection technique considering distribution non-linear loads: simulation and experimental data analysis. *Electric power systems Research*, vol. 94, pp. 124-140.
- Wei, M., Liu, W., Zhang, H., Shi, F., Chen, W. (2021). Distortion-based detection of high impedance fault in distribution systems *IEEE transactions on power delivery*, vol. 36, no. 3, pp. 1603-1618.
- Gao, J., Wang, X., Yang, A., Yuan, H., Wei, X. (2022). A high impedance fault detection method for distribution systems based on empirical wavelet transform and differential faulty energy. *IEEE transactions on smart grid*, vol. 13, no. 2, pp. 900-912.
- Wei, M., Shi, F., Zhang, H., Jin, Z., Terzija, V., Zhou, J., Bao, H. (2020). High impedance arc fault detection based on the harmonic randomness and waveform distortion in the distribution system. *IEEE transactions on power delivery*, vol. 35, no. 2, pp. 837-850.
- Chakraborty, S., Das, S. (2019). Application of smart meters in high impedance fault detection on distribution systems, *IEEE transactions on smart grid*, vol. 10, no. 3, pp. 3465-3473.
- Lopes, G. N., Menezes, T. S., Santos, G. G., Trondoli, L. H. P. C., Vieira, J. C. M. (2022). High impedance fault detection based on harmonic energy variation via s-transform. vol. 136, 107681.
- Lopes, G. N., Lacerda, V. A., Vieira, J. C. M., Coury, D. V. (2021). Analysis of signal processing techniques for high impedance fault detection in distribution systems. *IEEE transactions on power delivery*, vol. 36, no. 6, pp. 3438-3447.
- Biswal, M., Ghore, S., Malik, O. P., Bansal, R. C. (2021). Development of the time-frequency based approach to detect high impedance fault in an inverter interfaced distribution system. *IEEE transactions on power delivery*, vol. 36, no. 6, pp. 3825-3833.
- Wang, X., Gao, J., Wei, X., Song, G., Wu, L., Liu, J., Zeng, Z., Kheshti, M. (2019). High-impedance fault detection method based on the variational mode decomposition and Teager-Kaiser energy operator for distribution network. *IEEE transactions on smart grid*, vol. 10, no. 6, pp. 6041-6054.
- Alaei, S. A., Damchi, Y. (2023). A new method based on the discrete time energy separation algorithm for high and low impedance faults detection in distribution systems. *Electric power systems Research*, vol. 218, 109200.
- Gu, J. C., Huang, Z. J., Wang, J. M., Hsu, L. C., Yang, M. T. (2021). High impedance fault detection in overhead distribution feeders using a DSP-based feeder terminal unit. *IEEE transactions on industry applications*, vol. 57, no. 1, pp. 179-186.
- Lala, H., Karmakar, S. (2020). Detection and experimental validation of high impedance arc fault in distribution system

زیر نویس ها

1. High impedance fault
2. Total harmonic distortion
3. Even harmonic energy
4. Variation coefficient
5. Short time Fourier transform
6. Wavelet transform
7. Smart meter
8. S transform
9. Teager energy operator
10. Support vector machine
11. Mathematical morphology
12. Phase difference