



Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2024) 4(1):19-38

High Impedance Fault Detection in Distribution Systems Using a Method Based on Similarity Measurement

Ammar Abduladheem Ahmed Dibes¹, *M.Sc Student*, Mohammad Mahdi Rezaei^{2,3}, *Assistant Professor*¹ Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Khorasgan, Isfahan, Iran² Department of Electrical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran³ Efficiency and Smartization of Energy Systems Research Center, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Abstract:

The electric arc is one of the most intense electrical events. This phenomenon occurs due to the electric discharge between two conductors or between a conductor and the ground, through the air. When the short-circuit current intensity is high, it can be easily detected by traditional protection equipment. However, when the short-circuit current is low, traditional protection methods cannot detect these faults. Faults that do not generate enough fault current to be detected by conventional protective equipment are called high-impedance faults (HIFs). HIFs can cause serious safety hazards in power distribution systems and damage to equipment due to the risk of arc ignition. This paper presents a new detection scheme for HIFs in electrical distribution systems based on similarity measurement. In this method, based on the waveform of two consecutive half-cycles of the current, an index is extracted that can be used to detect HIFs. The proposed HIF detection algorithm can distinguish these events from other non-fault events with waveforms that may be similar to HIF waveforms. In this paper, four case studies are simulated to verify the proposed HIF detection algorithm. The simulation results demonstrate the acceptable performance of the proposed method in detecting HIFs and distinguishing them from other events.

Keywords: High impedance fault, Distribution networks, Similarity measurement, Load switching, Capacitor switching.

Received: 24 February 2024**Revised:** 03 May 2024**Accepted:** 24 May 2024**Corresponding Author:** Dr. Mohammad Mahdi Rezaei, mm.rezaei@iaukhsh.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2025.1103680



تشخیص خطای اتصال کوتاه امپدانس بالا در سیستم های توزیع با استفاده از یک روش مبتنی بر اندازه گیری مشابهت

عمار عبدالعظیم احمد دیس^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، محمدمهدی رضایی^{۲،۳}، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، خوراسگان، اصفهان، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

۳- مرکز تحقیقات بهره وری و هوشمندسازی سامانه های انرژی، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

چکیده: قوس الکتریکی یکی از شدیدترین رخدادهای الکتریکی است. این پدیده به دلیل تخلیه بارهای الکتریکی بین هادی ها یا بین هادی و زمین، از طریق هوا رخ می دهد. هنگامی که شدت جریان اتصال کوتاه زیاد باشد، می توان آن را به راحتی با تجهیزات حفاظتی سنتی تشخیص داد. با این حال، روش های حفاظت سنتی نمی توانند این خطاها را زمانی که جریان اتصال کوتاه کم است، تشخیص دهند. خطاهایی که جریان خطای کافی برای شناسایی توسط تجهیزات حفاظتی معمولی تولید نمی کنند، خطاهای امپدانس بالا نامیده می شوند. خطاهای امپدانس بالا در سیستم های توزیع برق می توانند خطرات جدی ایمنی و آسیب به تجهیزات را به دلیل خطر اشتعال ناشی از قوس الکتریکی ایجاد کنند. این مقاله یک طرح تشخیص جدید برای خطاهای امپدانس بالا در سیستم های توزیع الکتریکی بر اساس اندازه گیری مشابهت ارائه می کند. در این روش بر اساس شکل موج دو نیم سیکل متوالی جریان، شاخصی استخراج می شود که با استفاده از آن می توان خطاهای امپدانس بالا را تشخیص داد. الگوریتم پیشنهادی تشخیص خطای امپدانس بالا می تواند این رخدادها را از سایر رخدادها بدون خطا با شکل موجهایی که ممکن است مشابه شکل موج های خطای امپدانس بالا باشند، متمایز کند. در این مقاله، چهار مورد مطالعاتی برای تأیید الگوریتم پیشنهادی تشخیص خطاهای امپدانس بالا شبیه سازی شده است. نتایج شبیه سازی، توانایی قابل قبول عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص خطا با امپدانس بالا و تفکیک آنها از دیگر رخدادها را به نمایش می گذارد.

واژه های کلیدی: خطای امپدانس بالا، شبکه های توزیع، اندازه گیری مشابهت، کلید زنی بار، کلید زنی خازن.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۴

نویسنده مسئول: دکتر محمدمهدی رضایی، mm.rezaei@iaukhsh.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2025.1103680



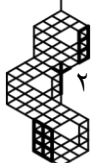
۱-۱- انگیزه پژوهش

یکی از دغدغه‌های اصلی سیستم‌های توزیع برق، به حداقل رساندن هزینه بهره برداری و زمان قطعی ناشی از خطاهای اتصال کوتاه است. بنابراین، توسعه یک سیستم حفاظتی مؤثر برای ارضای این الزامات بسیار مهم است [۳-۱]. خطاهای امپدانس بالا (HIF) در سیستم‌های توزیع چالش منحصر به فردی را برای مهندسين حفاظت ایجاد می‌کند. این خطاها با ماهیت قوس متناوب و جریان بسیار کم، حاوی محتوای هارمونیک با طیف نويز فرکانس بالا هستند و رخدادهای مضرى هم برای مردم و هم برای شرکت‌های توزیع برق به شمار می‌روند. چنین حوادثی می‌تواند باعث ایجاد آتش سوزی و آسیب به تجهیزات شبکه شود و درصد قابل توجهی (بیش از ۲۰ درصد) در بین انواع عیب‌های شبکه توزیع دارد [۴]. خطای امپدانس بالا، بیشتر با پدیده قوس الکتریکی مرتبط است و ویژگی‌های اصلی آن، جریان کم، تصادفی بودن، غیرخطی بودن و عدم تقارن است [۵]. دو نوع خطای امپدانس بالا وجود دارد: هادی شکسته نشده و هادی شکسته. در نوع اول، هادی توزیع با یک جسم با امپدانس بالا مانند تنه درختان و حصارهای چوبی تماس برقرار می‌کند، در حالی که نوع دوم زمانی رخ می‌دهد که یک هادی گرم پاره شود و با سطح زمین مانند پیاده رو، بتن، آسفالت و یا ماسه تماس الکتریکی برقرار کند [۶،۲]. هدف اصلی در تشخیص خطاهای امپدانس بالا، بر خلاف خطاهای اتصال کوتاه، حفاظت از سیستم نیست، بلکه حفاظت از جان انسان‌ها و جلوگیری از خطرات آتش سوزی ناشی از پدیده قوس الکتریکی است [۷]. به دلیل جریان محدود یک خطای امپدانس بالا، تجهیزات حفاظت اضافه جریان معمولی قادر به تشخیص سریع و مطمئن آن نیستند. از سوی دیگر، رخدادهای کلیدزنی خازن و بار، الگوی رفتار جریان مشابهی را نشان می‌دهند، که تشخیص خطای امپدانس بالا را دشوارتر می‌کند. یک خطای امپدانس بالا شناسایی نشده ممکن است برای مدت طولانی روی فیدر توزیع باقی بماند و در نتیجه باعث ایجاد آتش سوزی و شوک الکتریکی شود و تهدیدی جدی برای سلامت انسان و تجهیزات شبکه باشد.

۱-۲- مرور پیشینه پژوهش

بمنظور بررسی پیشینه پژوهش مرتبط با پدیده خطاهای امپدانس بالا، ابتدا کمیت‌های اندازه‌گیری شده برای تشخیص خطا مورد مطالعه قرار می‌گیرند و پس از آن، تکنیک‌های تشخیص خطاهای امپدانس بالا طبقه‌بندی و ارزیابی می‌شوند. خطای امپدانس بالا تغییرات واضحی را در مقادیری که معمولاً برای تشخیص خطا استفاده می‌شود، یعنی ولتاژ و جریان، ایجاد نمی‌کند. با این حال، اگر پردازش سیگنال مناسب (اندازه‌گیری، استخراج ویژگی، تنظیم آستانه) انجام شود، می‌توان تغییرات معنی داری را شناسایی کرد. بنابراین برای ارزیابی تکنیک‌های تشخیص موجود و توسعه روش‌های قابل اعتمادتر، لازم است تکنیک‌های تشخیص عیب معرفی شده ادبیات موضوع به طور جداگانه و بر اساس دیدگاه‌های مختلف، مورد مطالعه و بحث قرار گیرند. برای تشخیص خطای امپدانس بالا از اندازه‌گیری کمیت‌های مختلفی از جمله جریان، ولتاژ و شدت میدان مغناطیسی استفاده می‌شود. در [۸-۱۰] از اندازه‌گیری ولتاژ برای تشخیص خطای امپدانس بالا استفاده شده است. اما، این اندازه‌گیری تنها زمانی کارآمد است که افت ولتاژ کافی از محل خطا به رله وجود داشته باشد. بنابراین، از آنجایی که مقدار جریان خطای امپدانس بالا نسبتاً کم است، چنین اندازه‌گیری فقط در سیستم‌های توزیع بسیار ضعیف قابل استفاده است. در [۱۱]، از اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی برای تشخیص خطای امپدانس بالا استفاده شده است. چنین اندازه‌گیری، اگرچه بسیار قابل اعتماد است، اما هزینه و پیچیدگی تکنیک‌های تشخیص را افزایش می‌دهد. خطای امپدانس بالا را می‌توان به عنوان یک بار غیر خطی تصادفی فرض کرد که جریانی غیر استاتیکی با مشخصات غیر خطی می‌کشد. در نتیجه، شکل موج جریان محتوای هارمونیک فرکانس بالا و پایین را نشان می‌دهد که می‌تواند برای تشخیص خطای امپدانس بالا استفاده شود [۱۲]. با این حال، باید توجه داشت که اندازه‌گیری جریان در شبکه‌های توزیع قوی‌تر (شبکه‌هایی با قدرت اتصال کوتاه بالاتر)، کارآمدتر است.

در همه روش‌های تشخیص خطا، مساله اصلی آشکار کردن ویژگی‌های پنهان خطای امپدانس بالا با تبدیل داده‌های اندازه‌گیری شده به حوزه‌های تحلیلی کارآمدتر است. حوزه تحلیلی که قادر به نمایش ویژگی‌های خطای امپدانس بالا، مانند تصادفی بودن، غیرخطی بودن، ماهیت غیر ثابت و عدم تقارن باشد، بسیار مهم است. حوزه‌های تحلیلی که تاکنون برای تشخیص خطای امپدانس بالا استفاده شده‌اند را میتوان به چهار دسته تقسیم کرد: حوزه زمان، حوزه فرکانس، حوزه مقیاس زمانی و حوزه زمان-فرکانس [۷، ۱۳]. در این بین، به





دلیل استفاده روزافزون از بارهای غیر خطی و هارمونیک‌های ناشی از آن، روش‌های حوزه فرکانس و روش‌های حوزه زمان-فرکانس مانند روش موجک دچار چالش‌های اساسی در تمیز خطای امپدانس بالا از سایر رخداد‌های معمول شبکه شده‌اند. روش‌های حوزه مقیاس زمان مانند روش‌های مبتنی بر شبکه عصبی، منطبق فازی و ماشین بردار پشتیبان نیز به دلیل نیاز به مجموعه‌های قابل توجه داده اولیه برای آموزش و همچنین تجربه قبلی طراح در انتخاب پارامترها، کاربرد وسیعی پیدا نکرده‌اند [۷، ۱۳]. تجزیه و تحلیل حوزه زمان، بی‌نظمی‌های زمانی شکل موج جریان خطای امپدانس بالا را استخراج می‌کند [۱۳]. با این حال، شاخص‌های حوزه زمانی ساده، مانند اندازه، مقدار موثر، پیک و مقدار میانگین جریان نمی‌توانند به طور موثر بی‌نظمی‌های پنهان موجود در خطای امپدانس بالا را نشان دهند.

اخیراً روش‌های کارآمدتری در حوزه زمان برای تشخیص خطای امپدانس بالا ارائه شده‌اند [۱۹-۱۴]. در [۱۴]، از روشی مبتنی بر الگوریتم مورفولوژی برای تشخیص خطای امپدانس بالا استفاده شده است. الگوریتم مورفولوژی تکنیکی نسبتاً جدید در زمینه پردازش سیگنال و تصویر است که ایده اصلی آن بر مبنای آنالیز اطلاعات هندسی با یک الگوی هندسی کوچک می‌باشد. این روش قادر است خطای امپدانس بالا را به خوبی تشخیص دهد، اما نمی‌تواند بین این خطاها و بارهای غیر خطی تمیز قائل شود. در [۱۵]، سیگنال‌های جریان هر دو انتهای خط از طریق تجزیه حالت تجربی^۱ پردازش می‌شود و سپس انرژی سیگنال جریان استخراج می‌شود. با اندازه گیری اختلاف انرژی و تخمین آنتروپی وقوع خطای امپدانس بالا از سایر رخداد‌های شبکه تمیز داده می‌شود. اما، نیاز به ارتباط مخبراتی با پهنای باند بالا و اندازه گیری جریان هر دو طرف هر یک از خطوط، از مشکلات روش مذکور است. در [۱۶]، بر اساس یک ماشین یادگیری شدید هسته^۲ یک روش تشخیص خطای امپدانس بالا ارائه شده است. یک طرح انتخاب ویژگی خطا، مبتنی بر XGBoost برای غربالگری خصوصیات حساس در [۱۶] استفاده شده است که می‌تواند بطور تطبیقی ویژگی‌های این خطاها را با حساسیت شناسایی کند. در [۱۷]، یک روش جدید تشخیص خطای امپدانس بالا مبتنی بر یادگیری افزایشی^۳ برای مدیریت جریان داده‌های غیر ثابت^۴ با تغییر توزیع‌ها ارائه شده است. در این روش، برای استخراج ویژگی‌های سیگنال خطا، از خوشه‌بندی فضایی مبتنی بر چگالی برنامه‌های کاربردی با نویز^۵ برای نظارت بر توزیع داده‌های جریان توالی صفر تحلیل می‌شوند. اما روش‌های ارائه شده در [۱۶، ۱۷] نیازمند حجم قابل توجهی از داده برای آموزش فرایند یادگیری می‌باشند. در [۱۸]، از همبستگی متقابل برای استخراج ویژگی‌های سیگنال جریان خطا، شناخت و طبقه بندی آنها استفاده شده است. در این روش، ویژگی‌های پیچیده، نامتقارن و غیر خطی سیگنال جریان خطای امپدانس بالا با استفاده از روش همبستگی متقاطع بازیابی شده است. در [۱۹]، روشی پیشنهاد شده است که در آن با استفاده از واگرایی کولیک-لایبلر^۶ ویژگی‌های غیر خطی و عدم تقارن دو نیم سیکل شکل موج جریان خطای امپدانس بالا استخراج می‌شود. بدون هیچ گونه تجزیه و تحلیل محتوای هارمونیک یا استفاده از مجموعه داده‌های آموزشی، این روش می‌تواند خطاهای مذکور را با روش اندازه گیری مشابهت شناسایی کند.

۱-۳- نوآوری

در این مقاله، یک روش جدید برای تشخیص خطای امپدانس بالا در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. روش پیشنهادی مبتنی بر پردازش سیگنال جریان و اندازه گیری مشابهت با استفاده از یک شاخص نوآورانه می‌باشد. روش پیشنهادی بار محاسباتی کمتری نسبت به روش‌های اندازه گیری مشابهت موجود دارد و علاوه بر این، به حافظه کمتری برای ذخیره سازی داده‌ها نیاز دارد. این روش قادر است خطاهای امپدانس بالا را هم در مواردی که خطا در نزدیکی محل نصب تجهیزات حفاظتی رخ می‌دهد و هم در مواردی که خطا در پایین دست شبکه رخ می‌دهد، تشخیص دهد. علاوه بر این، روش پیشنهادی چنان طراحی شده است که بین رخداد‌های معمول شبکه و خطاهای امپدانس بالا تمیز قائل شود. صحت عملکرد و کارایی روش پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی شبکه ۱۳ باس IEEE و مقایسه با چند روش دیگر، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- روش پیشنهادی برای تشخیص خطای امپدانس بالا

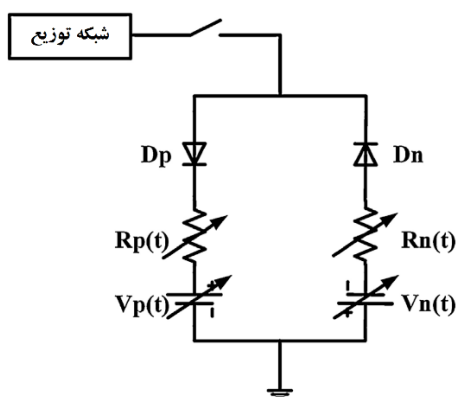
۲-۱- مدل خطای امپدانس بالا

شبیه‌سازی دقیق خطای امپدانس بالا برای توسعه الگوریتم‌های موثر تشخیص این خطا ضروری است. داده‌های مدل خطای امپدانس بالا باید منعکس کننده ویژگی‌های پیچیده چنین خطایی، مانند غیرخطی بودن و عدم تقارن باشد و علاوه بر این شامل کیفیت‌های تصادفی و دینامیکی پدیده‌های قوس الکتریکی نیز باشد. محققان از چندین سال قبل مدل‌های مختلفی را برای شبیه‌سازی پدیده



قوس الکتریکی در خطاهای امپدانس بالا با هدف نشان دادن ویژگی‌های خاص این خطاها ارائه کرده اند. این مدل‌ها را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: مدل‌های دینامیکی مبتنی بر معادلات دیفرانسیل، مدل‌های مبتنی بر عناصر الکتریکی و مدل‌های ناشی از ترکیب آنها [۲۰]. در دسته اول، برای محاسبه رسانایی قوس الکتریکی از معادلات دینامیکی در مدل‌های خطاهای امپدانس بالا استفاده می‌شود [۲۱، ۲۲]. در این مدل‌ها، رسانایی قوس به عنوان یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول ارائه می‌شود. این معادلات در دهه‌های بعد بهبود و اصلاح شدند [۲۳]. سپس ترکیبی از مدل‌های قبلی که به مدل عمومی قوس معروف است ارائه شد [۲۴]، که در بسیاری از مطالعات تأیید شده و مورد استفاده قرار گرفته است. در دسته دوم، استفاده از پارامترهای الکتریکی در حوزه زمان برای تقلید از رفتار خطاهای امپدانس بالا ارائه شده است. در ابتدا، فقط یک مقاومت ثابت برای مدل خطاهای امپدانس بالا پیشنهاد شد. تقریباً یک دهه بعد، یک محقق دیگر استفاده از امپدانس غیرخطی را به عنوان یک مدل خطاهای امپدانس بالا ساده پیشنهاد کرد [۲۰]. یک مدل پیچیده‌تر معروف به امانوئل که نشان دهنده دو ویژگی جریان خطاهای امپدانس بالا است، در [۲۵] ارائه شد. این ویژگی‌ها ویژگی‌های غیرخطی و عدم تقارن خطاهای امپدانس بالا بود. سه سال بعد در [۲۶]، استفاده از دو مقاومت خطای متغیر را برای تقلید تصادفی بودن خطاهای امپدانس بالا پیشنهاد شد. بنابراین، سه رفتار اصلی خطاهای امپدانس بالا یعنی غیرخطی بودن، عدم تقارن و تصادفی بودن با این مدل در نظر گرفته شد. در سال ۲۰۰۳، یک مدل جدید و ساده شده بر اساس مدل [۲۵]، در [۲۷] ارائه شد. بعنوان دسته سوم، با ترکیب مدل‌های مبتنی بر معادلات دیفرانسیل و مبتنی بر عناصر الکتریکی مدلی در [۲۸] ارائه شده است. برای تقلید از ویژگی‌های دینامیکی، مدل قوس دیجیتالی پیشنهاد شده در [۲۳] به عنوان مقاومت غیرخطی در مدل اعمال شده است. در این مدل از منابع ولتاژ DC و AC به ترتیب برای به دست آوردن ویژگی‌های عدم تقارن و احتراق قوس استفاده می‌شود. اما در بین همه این مدل‌ها، مدل ارائه شده در [۲۷] کاربرد وسیعی در زمینه مدل سازی خطاهای امپدانس بالا پیدا کرده است [۷].

در این پژوهش از مدلی استفاده شده است که در سال ۲۰۰۳ ارائه شد [۱۳]. در شکل (۱)، مدل استفاده شده در این مقاله نشان داده شده است. دو منبع DC نشان دهنده در شکل (۱)، ولتاژ اولیه بین هادی و خاک یا درخت را مدل می‌کنند. دو مقاومت نابرابر، R_1 و R_2 ، مقاومت‌های خطا را نشان می‌دهند و مقادیر نابرابر آنها می‌تواند جریان‌های نامتقارن خطا را مدل کند. هنگامی که ولتاژ لحظه‌ای فاز بالاتر از ولتاژ DC مثبت V_p باشد، جریان خطا به سمت زمین جریان می‌یابد. هنگامی که ولتاژ لحظه‌ای فاز کمتر از ولتاژ DC منفی V_n باشد، جریان خطا معکوس می‌شود. برای مقادیر لحظه‌ای ولتاژ فاز بین V_p و V_n نیز، هیچ جریان خطای جاری نمی‌شود [۱۳].



شکل (۱): مدل خطای امپدانس بالا، ارائه شده در [۱۳]

ولتاژهای V_p و V_n به ترتیب برابر با یک دوم و یک چهارم ولتاژ فاز در نظر گرفته می‌شوند که ۱۰٪ نسبت به مقادیر مذکور بصورت تصادفی تغییر می‌کنند. مقادیر مقاومت‌های R_p و R_n نیز بصورت تصادفی بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ اهم در نظر گرفته می‌شوند [۱۹].

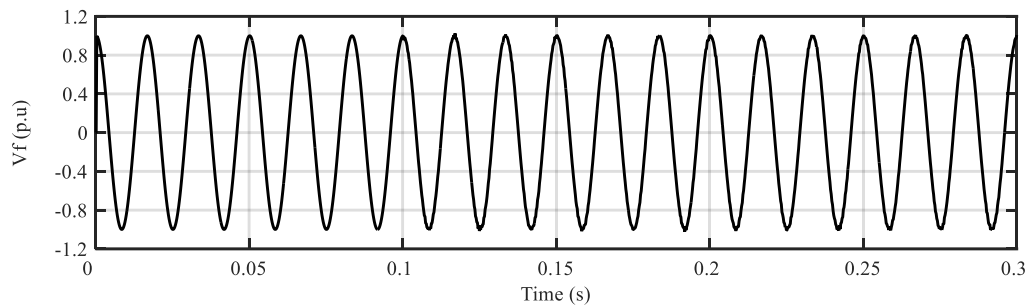
۲-۲- روش تشخیص خطای امپدانس بالا

شکل (۲) تغییرات ولتاژ و جریان محل وقوع یک خطای امپدانس بالا را نشان می‌دهد. دامنه کوچک جریان خطاهای امپدانس بالا باعث می‌شود که رله‌های اضافه جریان مرسوم قادر به تشخیص این خطاها نباشند. اما غیر خطی بودن، تصادفی بودن تغییرات و نامتقارن

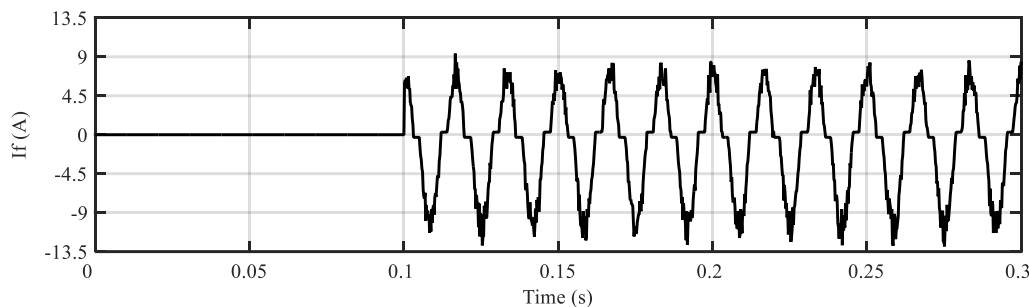


بودن، ویژگی‌هایی هستند که باعث می‌شوند نیم سیکل‌های شکل موج جریان متفاوت باشند و به کمک همین ویژگی‌ها است که می‌توان خطاهای امپدانس بالا را تشخیص داد.

در پردازش اطلاعات و حوزه‌های یادگیری ماشین، تعداد زیادی از تکنیک‌ها از اندازه‌گیری مشابهت برای انجام بسیاری از محاسبات مختلف استفاده می‌کنند. خوشه‌بندی و طبقه‌بندی پرکاربردترین تکنیک‌های مبتنی بر اندازه‌گیری مشابهت برای کشف دانش در حوزه‌های علمی هستند [۲۹]. در [۲۹]، پنج روش اندازه‌گیری مشابهت، شامل فاصله اقلیدسی^۷، فاصله منهن^۸، شباهت کسینوسی^۹، ضریب باتاچاریا^{۱۰} و شاخص کولبک-لایبر، که به عنوان پرکاربردترین معیارها برای خوشه‌بندی و طبقه‌بندی داده کاربرد دارند، معرفی شده‌اند. در این مقاله، یک روش جدید مبتنی بر پردازش سیگنال جریان و اندازه‌گیری مشابهت ارائه شده است. بمنظور بررسی کارایی و اعتبار سنجی آن، روش پیشنهادی با هر پنج روش فوق‌الذکر مقایسه شده است. در ادامه، به تشریح جزئیات روش پیشنهادی پرداخته شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۲): شکل موج الف) ولتاژ و ب) جریان محل وقوع خطای امپدانس بالا

در روش پیشنهادی داده‌های شکل موج جریان به ازای یک دوره تناوب نمونه برداری می‌شود و این پنجره داده بصورت پیوسته مورد پردازش قرار می‌گیرد. اگر T دوره تناوب جریان شبکه و T_s دوره تناوب نمونه برداری جریان باشد، بطوریکه T همواره مضرب صحیح و زوجی از T_s باشد، $k = \frac{T}{2T_s}$ می‌توان داده‌های نمونه برداری شده جریان را در یک دوره تناوب بصورت یک بردار مرتب کرد:

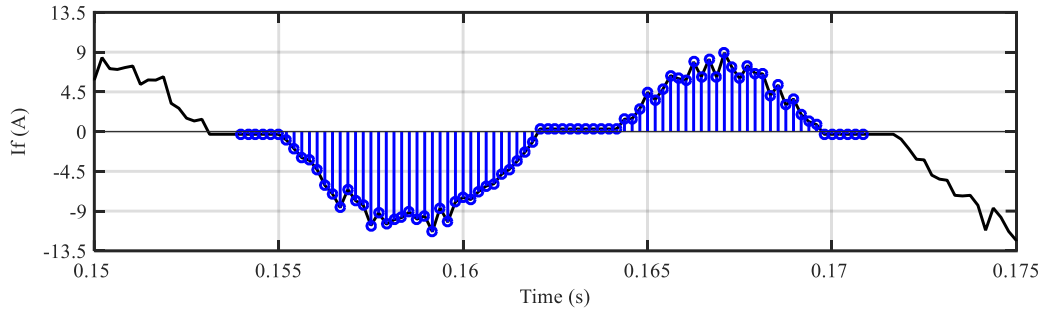
$$\mathbf{I} = [I_1 \quad I_2 \quad \dots \quad I_k \quad I_{k+1} \quad I_{k+2} \quad \dots \quad I_{2k}] \quad (1)$$

که در آن، مقدار k برابر با ۴۰ در نظر گرفته شده است. بطور مثال در یک شبکه با فرکانس نامی ۵۰ هرتز، T برابر با ۰/۰۲ ثانیه و مقدار T_s برابر با ۲۵۰ میکروثانیه خواهد بود. شکل (۳) نمودار بزرگ‌نمایی شده جریان خطا و نحوه نمونه برداری از آن را نشان می‌دهد. اکنون می‌توان بردار جریان \mathbf{I} را به دو بخش مساوی تقسیم کرد بطوری‌که هر بخش، داده‌های یک نیم سیکل را در بر داشته باشد:

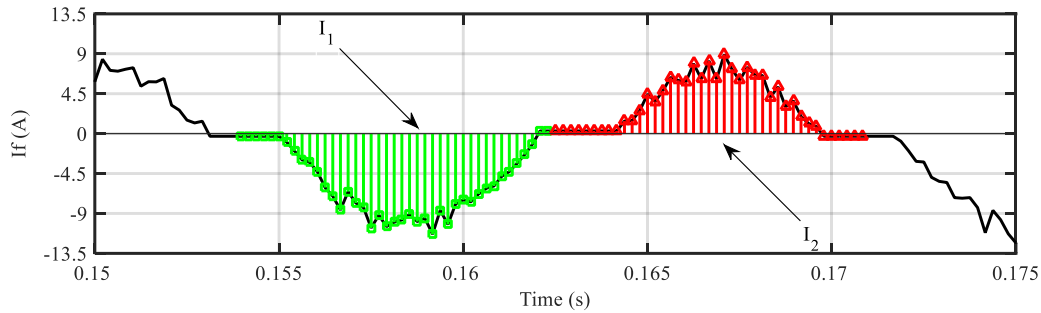
$$\mathbf{I}_{hc1} = [I_1 \quad I_2 \quad \dots \quad I_k] \quad (2)$$

$$\mathbf{I}_{hc2} = [I_{k+1} \quad I_{k+2} \quad \dots \quad I_{2k}] \quad (3)$$





(الف)



(ب)

شکل (۳)، نمودار بزرگ‌نمایی شده جریان خطا و نحوه نمونه برداری از آن، (الف) جریان I_1 ، (ب) جریان‌های I_1 و I_2

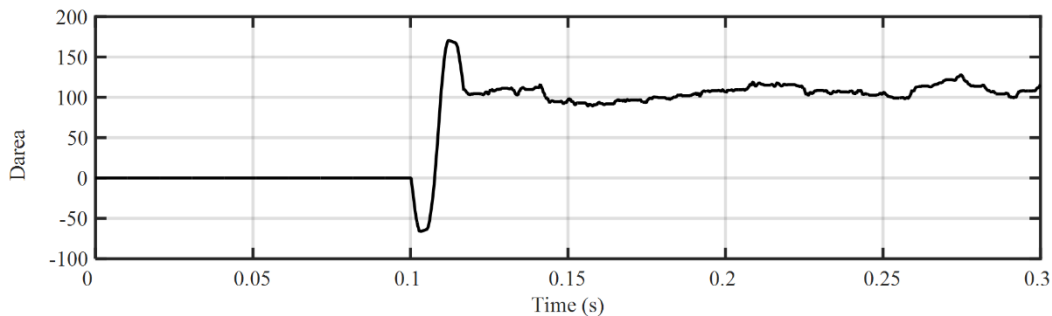
معیار پیشنهادی در این مقاله در رابطه (۴) ارائه شده است. در این معیار، جمله اول متناسب با سطح زیر نمودار نیم سیکل اول و جمله دوم نیز متناسب با سطح زیر نمودار نیم سیکل دوم است. در حالت عادی، این دو جمله با یکدیگر برابر هستند و اختلاف آنها صفر خواهد بود. اما در شرایط وقوع خطای امپدانس بالا، معیار پیشنهادی به خوبی می‌تواند چنین خطاهایی را آشکار کند.

$$D_{area} = A_{hc1} + A_{hc2} \quad (۴)$$

$$A_{hc1} = \sum_{j=1}^k I_{hc1}(j) \quad (۵)$$

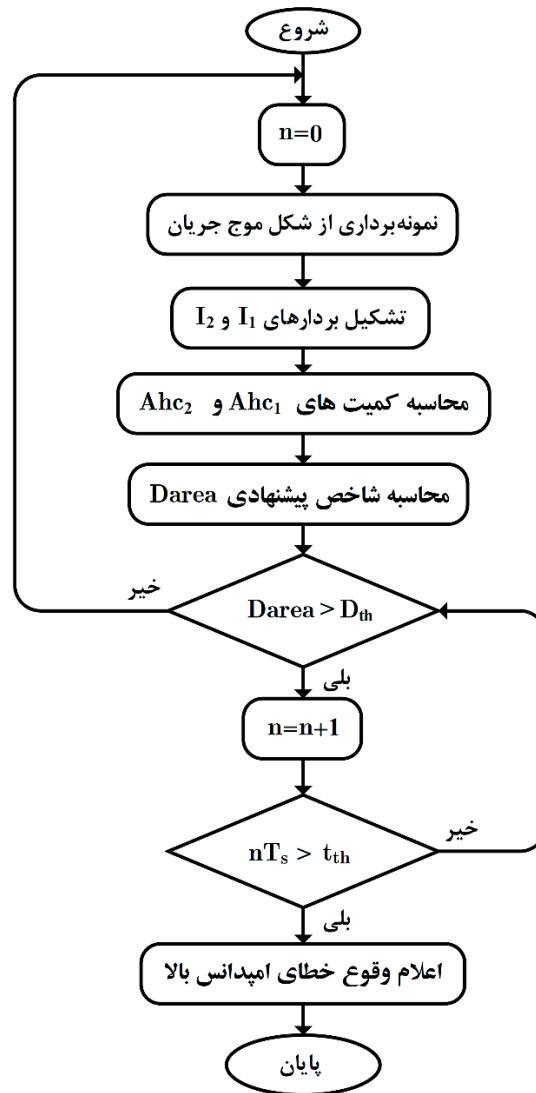
$$A_{hc2} = \sum_{j=1}^k I_{hc2}(j) \quad (۶)$$

شکل (۴) تغییرات شاخص پیشنهادی، پیش و پس از بروز یک خطای امپدانس بالا در لحظه ۰/۱ ثانیه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، شاخص پیشنهادی تغییرات نسبی قابل توجهی نسبت به شرایط پیش از خطا دارد که موجب می‌شود خطای امپدانس بالا را هم بتوان تشخیص داد و هم آنها را از رویدادهای معمول شبکه تمیز داد.



شکل (۴)، تغییرات شاخص پیشنهادی قبل و پس از بروز یک خطای امپدانس بالا





شکل (۵)، فرایند تشخیص خطاهای امپدانس بالا در روش پیشنهادی

۲-۳- تمیز رخداد های معمول شبکه از خطای امپدانس بالا

از آنجا که بسیاری از رخداد های معمول شبکه مانند کلید زنی بار، کلید زنی خازن و ... در کوتاه مدت ممکن است باعث ایجاد عدم تقارن شکل موج جریان شوند، لازم است تمهیداتی اندیشیده شود که سیستم حفاظتی بتواند رخداد های معمول شبکه را از خطای امپدانس بالا تمیز دهد. بدین منظور، لازم است هم در مقدار معیار پیشنهادی یک سطح آستانه تعریف شود و هم در بازه زمانی باقیماندن علائم خطا یک زمان آستانه تعیین گردد. از اینرو، تنها هنگامی یک رخداد شبکه، بعنوان خطای امپدانس بالا تشخیص داده می شود که هر دو شرط زیر هم زمان برقرار باشند:

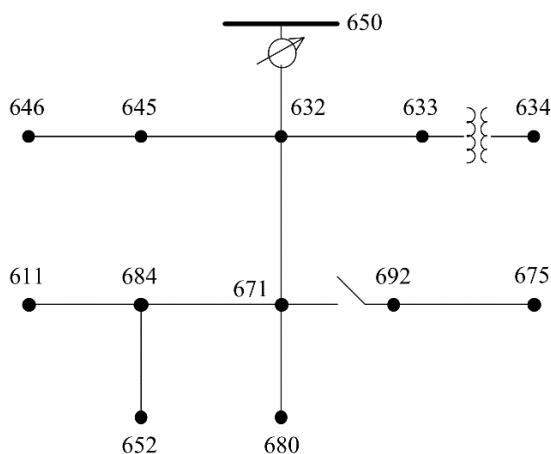
$$D_{area} \geq D_{th} \quad (7)$$

$$t \geq t_{th} \quad (8)$$

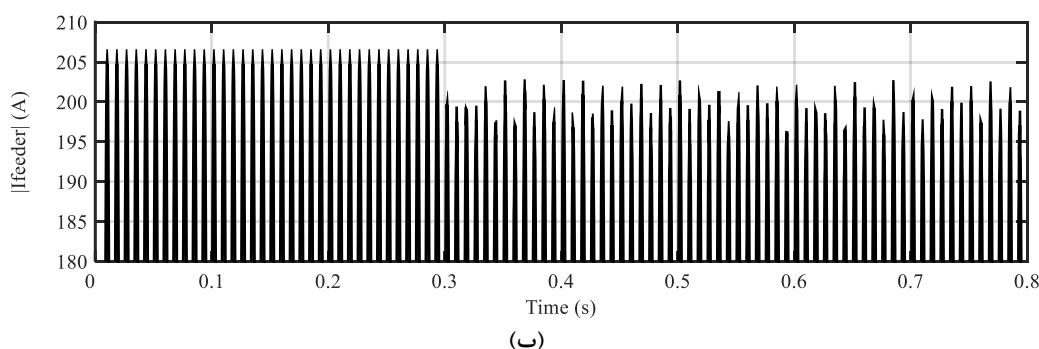
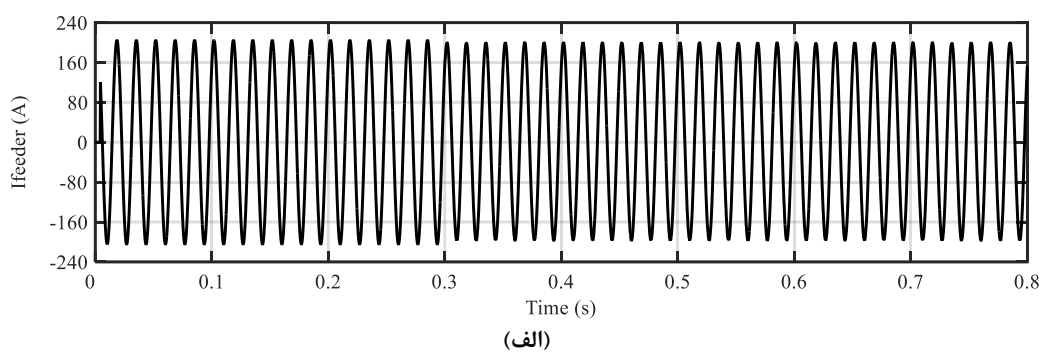
که در آن، D_{th} و t_{th} مقادیر آستانه معیار پیشنهادی و زمان می باشند. این مقادیر بصورت تجربی و بر اساس رخداد های معمول شبکه انتخاب میشوند. در این مقاله، برای پارامترهای مذکور به ترتیب مقادیر ۲۰ آمپر و ۹۰ میلی ثانیه انتخاب شده است [۱۹]. فرایند تشخیص خطاهای امپدانس بالا در روش پیشنهادی در روندنمای شکل (۵) نشان داده شده است.

۳- شبیه‌سازی‌ها و تحلیل نتایج

بمنظور بررسی کارایی روش پیشنهادی در تشخیص خط‌های امیدانس بالا، شبکه توزیع ۱۳ باس IEEE در محیط کدنویسی نرم افزار MATLAB مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. نمودار تک خط این سیستم در شکل (۶) نشان داده شده است. داده‌های این سیستم نیز در [۳۰] ارائه شده است. در مطالعات انجام شده، کارایی روش پیشنهادی در برابر چالش‌های مختلفی از جمله بروز خط‌های امیدانس بالا و رخدادهای معمول شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم کامپیوتری مورد استفاده، یک کامپیوتر شخصی با پردازنده Intel® Core™i7 و فرکانس کاری ۲.۵ گیگاهرتز و با رم ۸ گیگابایت در محیط ۶۴ بیتی سیستم عامل ویندوز ۱۰ انجام شده است.



شکل (۶)، نمودار تک خط شبکه توزیع ۱۳ باس IEEE



شکل (۷)، شکل موج جریان لحظه ای ابتدای فیدر، هنگام بروز خطای امیدانس بالا در باس ۶۳۲

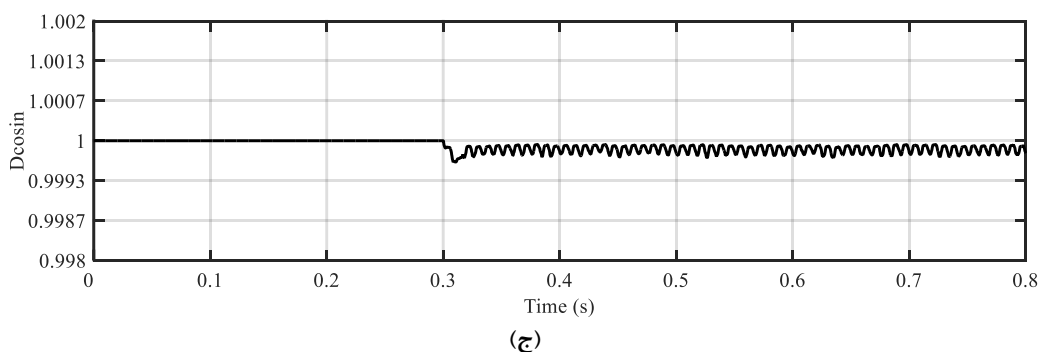
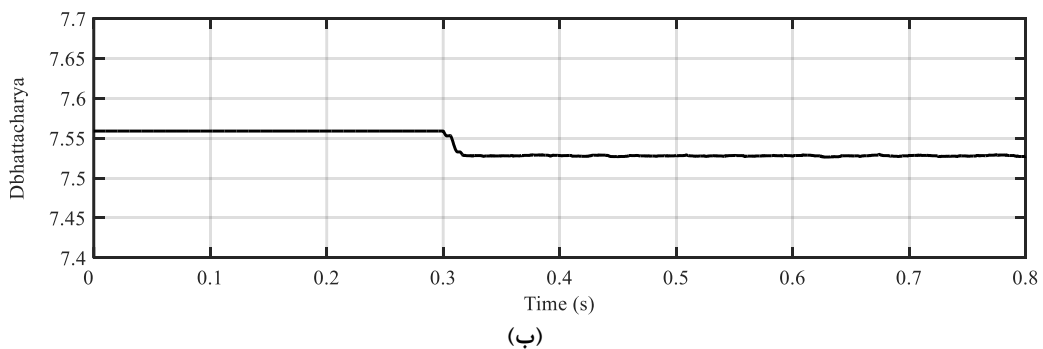
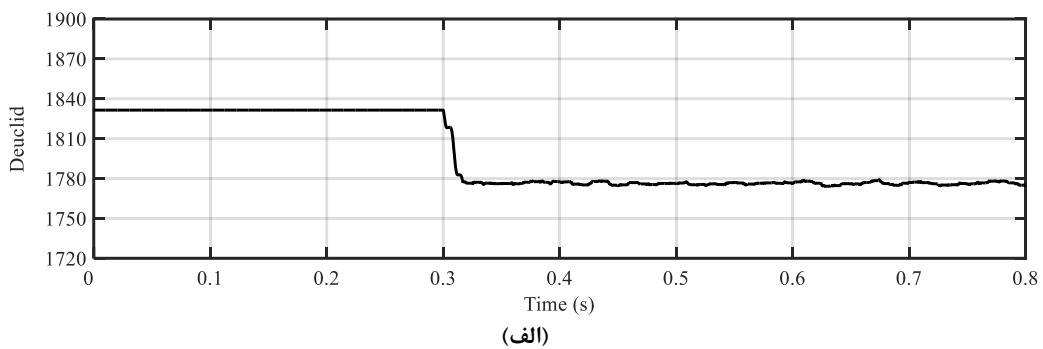
۳-۱- بروز خطای امیدانس بالا در ابتدای فیدر

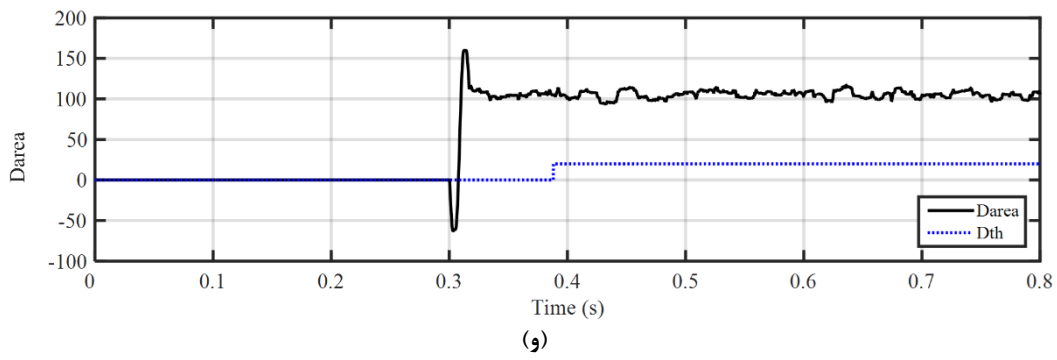
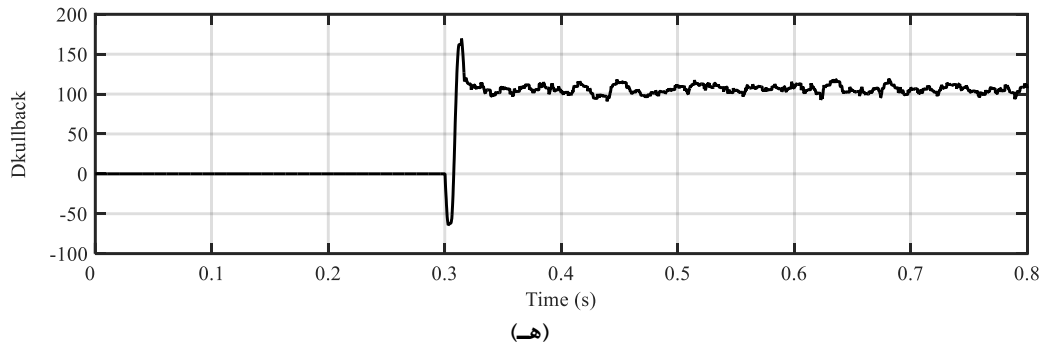
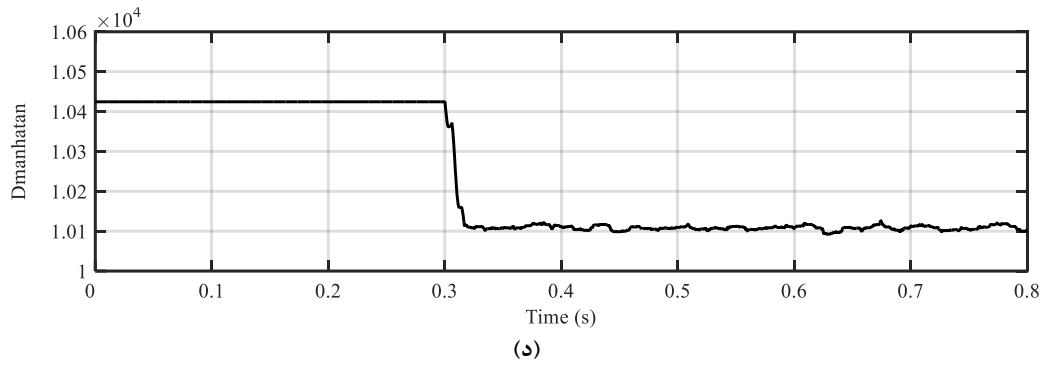
در این بخش، با فرض نصب سیستم حفاظتی در ابتدای فیدر، به بررسی کارایی روش پیشنهادی در شرایط بروز خطای امیدانس بالا در نزدیکی سیستم حفاظتی پرداخته شده است. بدین منظور، از لحظه ۰/۳ ثانیه یک خطای امیدانس بالا در باس ۶۳۲ در فاز A رخ



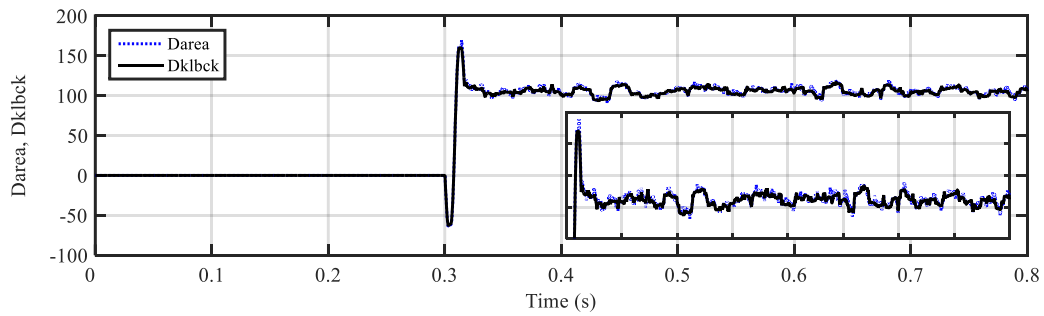
می دهد. شکل (۷-الف) تغییرات جریان فاز A ابتدای فیدر (بعد از ترانسفورمر) در بازه زمانی قبل و بعد از بروز خطای امپدانس بالا را نشان می دهد. از آنجا که علاوه بر جریان نسبتا ناچیز خطا، جریان بار کل شبکه نیز از ابتدای فیدر جاری می شود، تشخیص بروز چنین خطایی در شکل (۷-الف) مشکل است. برای نمایش بهتر، در شکل (۷-ب) شکل موج بزرگنمایی شده ی قدر مطلق جریان ابتدای فیدر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، بدلیل کاهش ولتاژ، پس از بروز خطا مقدار مطلق جریان ابتدای فیدر افت می کند. بنابراین رله های حفاظتی مرسوم قادر به تشخیص بروز خطا نخواهند بود. اما نکته مهم این است که پس از بروز خطا تقارن شکل موج جریان ابتدای فیدر کاهش یافته است.

شکل (۸) نمودار تغییرات شاخص های اقلیدسی، باتاچاریا، کسینوسی، منهتن، کولبک و شاخص پیشنهادی را پس از بروز خطای امپدانس بالا در باس ۶۳۲ نشان می دهد. شایان ذکر است همه این شاخص ها بر اساس جریان ابتدای فیدر محاسبه شده اند. همانطور که در شکل های (۸-الف) تا (۸-د) مشاهده میشود، شاخص های اقلیدسی، باتاچاریا، کسینوسی و منهتن پس از بروز خطا تغییرات نسبی قابل ملاحظه ای ندارند و بنابراین استفاده از این روش ها چندان قابل اطمینان نیست. اما مطابق شکل های (۸-ه) و (۸-و)، تغییرات نسبی شاخص کولبک و شاخص پیشنهادی بطوری است که می توان خطای امپدانس بالا را به خوبی تشخیص داد. شاخص آستانه و زمان آستانه، که بمنظور تمیز خطاهای امپدانس بالا از رخداد های معمول شبکه در فصل قبل تعریف شد، نیز در شکل (۸-و) رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود، با استفاده از شاخص پیشنهادی خطای امپدانس بالای رخ داده در باس ۶۳۲ به خوبی قابل تشخیص خواهد بود.





شکل (۸)، تغییرات شاخص‌های الف) اقلیدسی، ب) باتاچاریا، ج) کسینوسی، د) منهنن، ه) کولبک و و) شاخص پیشنهادی، هنگام بروز خطای امپدانس بالا در باس ۶۳۲



شکل (۹)، مقایسه شاخص کولبک و شاخص پیشنهادی، هنگام بروز خطای امپدانس بالا در باس ۶۳۲

نکته مهمی که در شکل (۸) وجود دارد، شباهت شاخص کولبک و شاخص پیشنهادی است. به همین دلیل، در شکل (۹) این دو شاخص با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با وجود اینکه این دو شاخص روابط ریاضی و محاسبات کاملاً متفاوتی دارند، نمودار تغییرات این دو شاخص شباهت بسیار زیادی با یکدیگر دارند. اما، مزیتی که روش پیشنهادی دارد، سهولت بیشتر، سرعت بالاتر محاسبات و حافظه

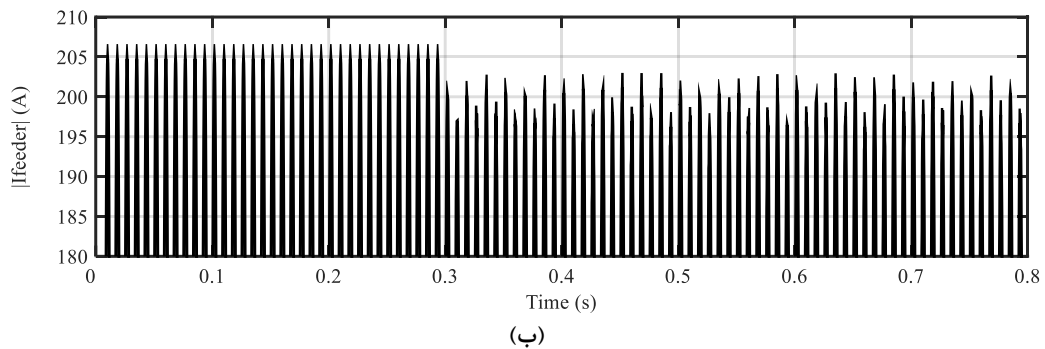
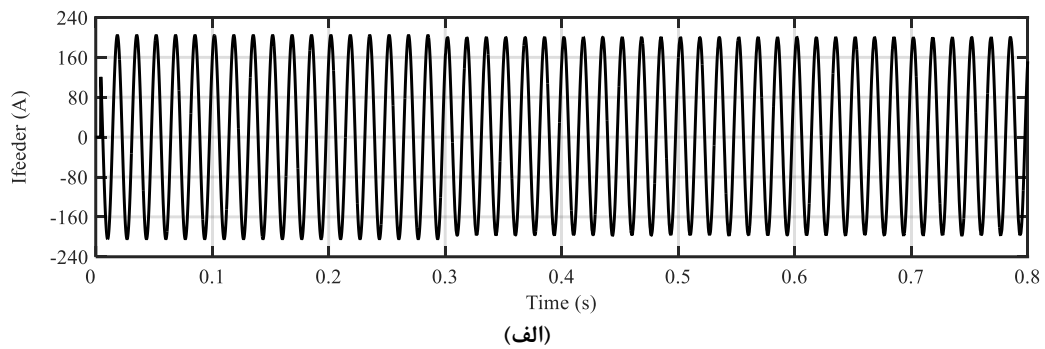




مورد نیاز کمتر می‌باشد. در جدول (۱)، زمان محاسبات روش پیشنهادی بار روش کولبک مقایسه شده است. شایان ذکر است زمان محاسبات بر اساس شبیه‌سازی با استفاده سیستم کامپیوتری شخصی، که مشخصات فنی آن در ابتدای بخش ۳ ارائه شد، بدست آمده است. اهمیت این تفاوت در تجهیزات حفاظتی که از محدودیت سرعت پردازنده و حافظه برخوردارند، بشتر نمایان خواهد بود.

۳-۲- بروز خطای امپدانس بالا در انتهای فیدر

در این بخش، به بررسی کارایی روش پیشنهادی در شرایط بروز خطای امپدانس بالا در دورترین نقاط شبکه نسبت به محل نصب سیستم حفاظتی پرداخته شده است. بدین‌منظور، یک خطای امپدانس بالا از لحظه $0/3$ ثانیه در باس ۶۵۲ در فاز A در نظر گرفته شده است. شکل (۱۰-الف) تغییرات جریان فاز A ابتدای فیدر در بازه زمانی قبل و بعد از بروز خطای امپدانس بالا در باس ۶۵۲ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، از آنجا که هنگام بروز خطا در انتهای فیدر جریان بار کل شبکه کمتر تحت الشعاع بروز خطا قرار می‌گیرد، اثر جریان خطا کمتر خواهد شد و همین موضوع تشخیص بروز چنین خطایی را کمی مشکل‌تر می‌کند.



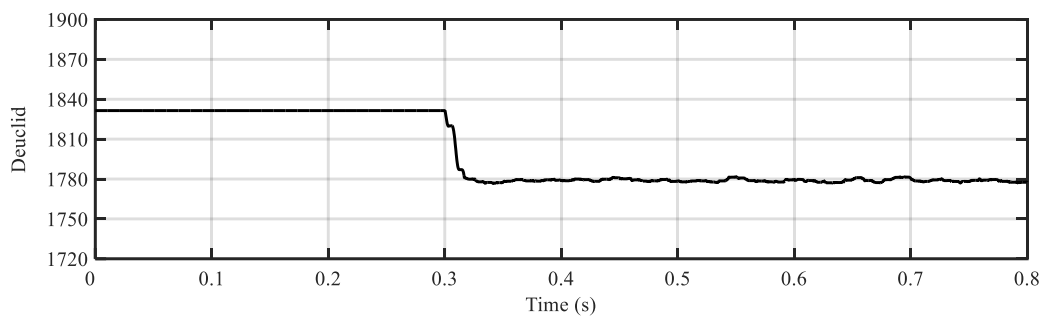
شکل (۱۰)، شکل موج جریان لحظه ای ابتدای فیدر، هنگام بروز خطای امپدانس بالا در باس ۶۵۲

برای نمایش بهتر، در شکل (شکل ۱۰-ب) شکل موج بزرگنمایی شده‌ی قدر مطلق جریان ابتدای فیدر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در اینجا نیز بدلیل کاهش ولتاژ، جریان ابتدای فیدر پس از بروز خطا افت می‌کند. اما، در مقایسه با شکل (شکل ۱۰-ب)، پس از بروز خطا هم دامنه جریان کمتر کاهش یافته است و هم تقارن شکل موج جریان ابتدای فیدر به شدت شکل (شکل ۱۰-ب) نیست. بنابراین، رله‌های اضافه جریان معمولی سخت‌تر می‌توانند چنین خطاهایی را تشخیص دهند.

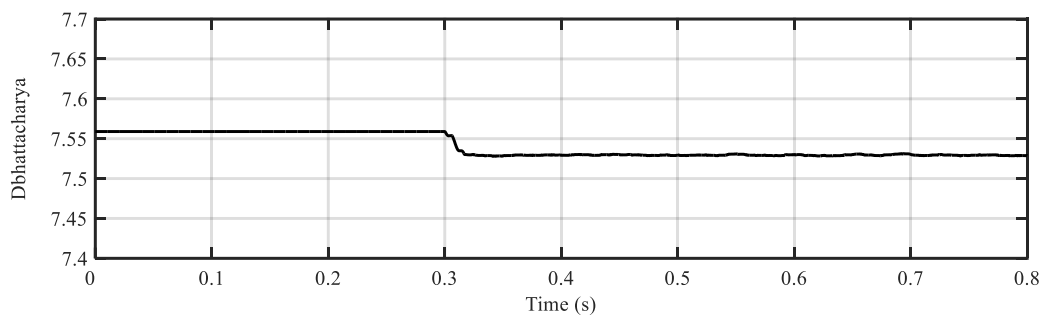
جدول (۱)، زمان محاسبات روش‌های کولبک و پیشنهادی، هنگام بروز خطا در باس ۶۳۲

زمان محاسبات روش کولبک	۰/۰۵۴۲۴۲ ثانیه
زمان محاسبات روش پیشنهادی	۰/۰۲۵۰۰۹ ثانیه

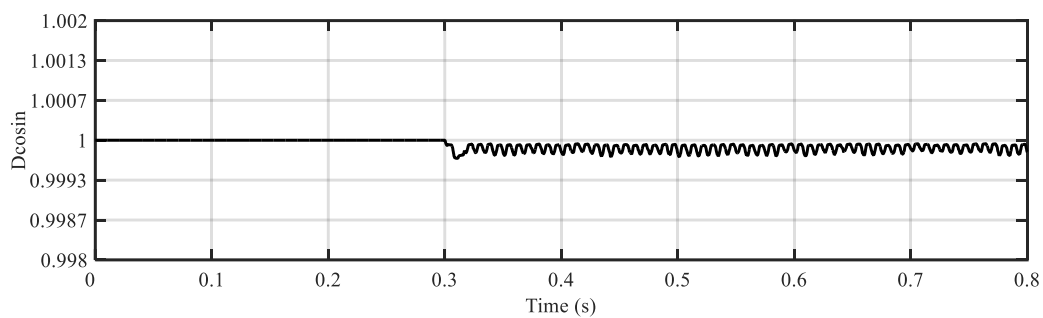




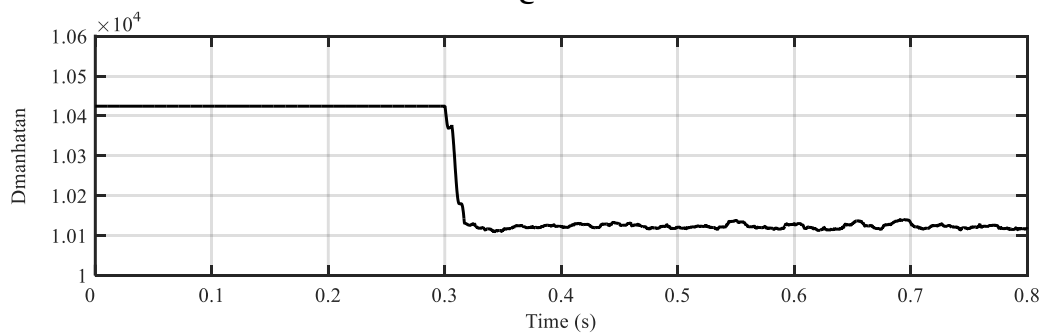
(الف)



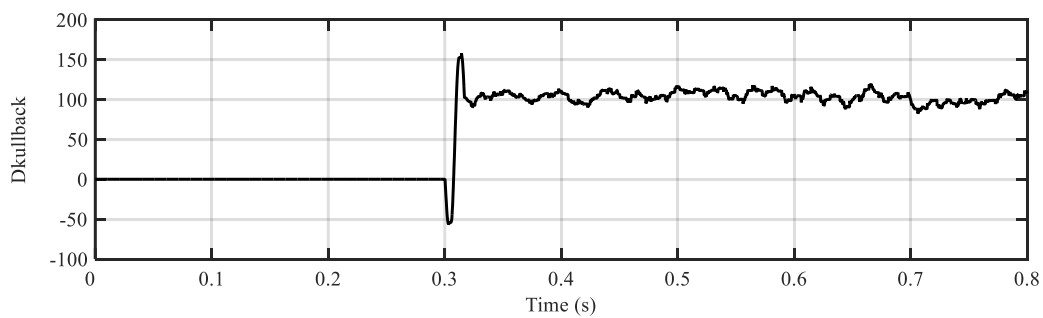
(ب)



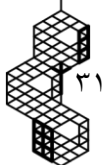
(ج)

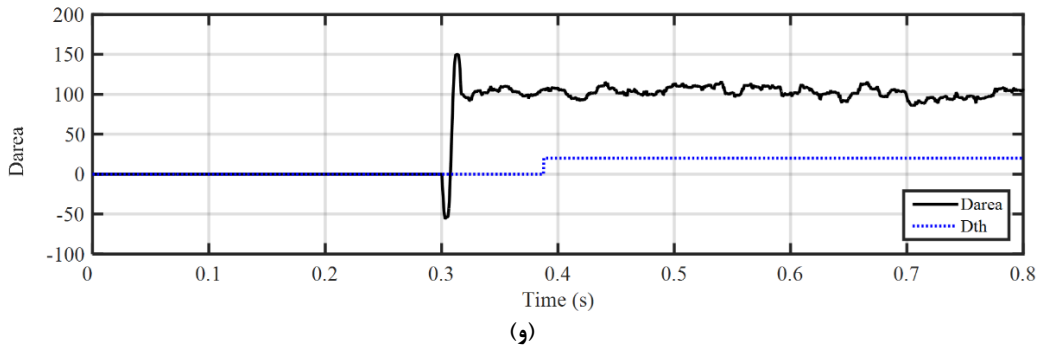


(د)



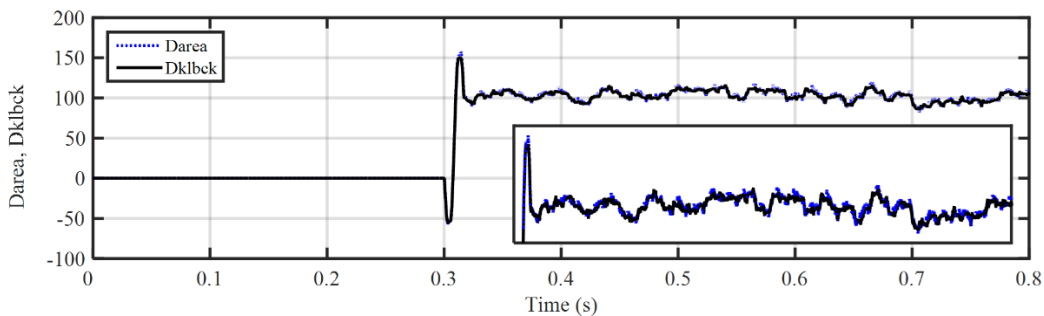
(هـ)





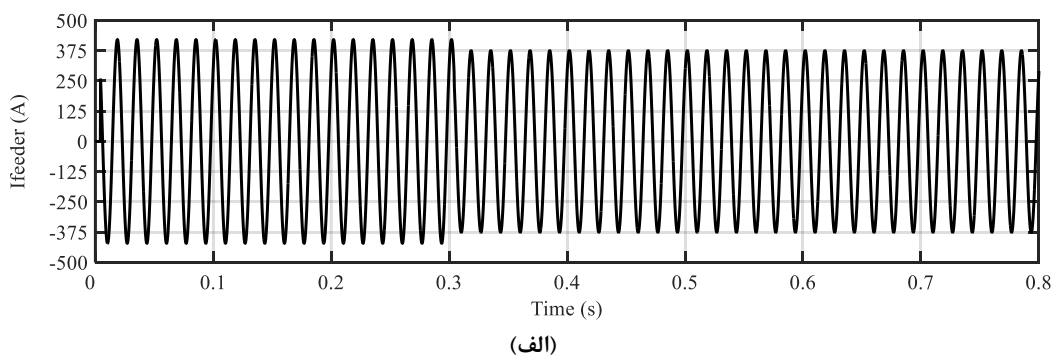
شکل (۱۱)، تغییرات شاخص های الف (اقلیدسی، ب) باتاچاریا، ج) کسینوسی، د) منهتن، ه) کولبک و و) شاخص پیشنهادی، هنگام بروز خطای امیدانس بالا در باس ۶۵۲

در شکل (۱۱) نمودار تغییرات شاخص های به ترتیب الف) اقلیدسی، ب) باتاچاریا، ج) کسینوسی، د) منهتن، ه) کولبک و و) شاخص پیشنهادی، هنگام بروز خطای امیدانس بالا در باس ۶۵۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، در هنگام بروز خطا در باس ۶۵۲ نیز تنها شاخص های کولبک و شاخص پیشنهادی تغییرات نسبی قابل ملاحظه ای دارند و تغییرات نسبی مابقی شاخص ها نسبت به شکل (۸) کمتر نیز شده است. مطابق شکل (۱۱-و) روش پیشنهادی به خوبی توانسته است با عبور از حد آستانه شاخص و حد آستانه زمانی، به خوبی خطای امیدانس بالا را تشخیص دهد.



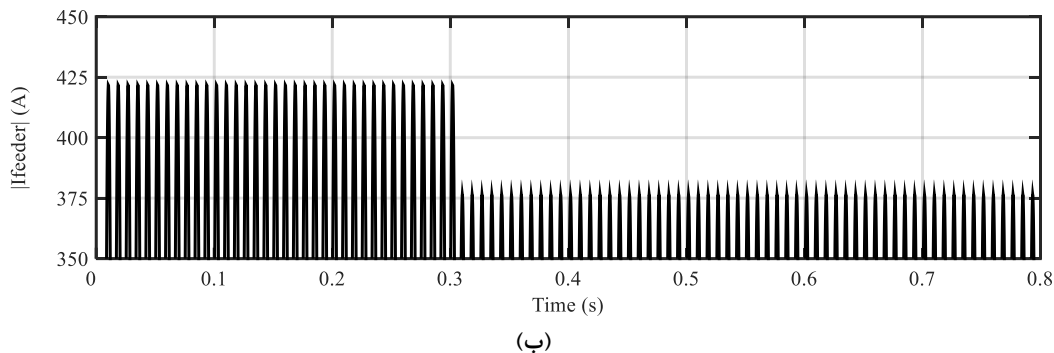
شکل (۱۲)، مقایسه شاخص کولبک و شاخص پیشنهادی، هنگام بروز خطای امیدانس بالا در باس ۶۵۲

در شکل (۱۲) نیز به دلیل شباهت شکل های (۱۱-ه) با (۱۱-و)، شاخص پیشنهادی با شاخص کولبک مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود، علی رغم کاهش مقدار هر دو شاخص نسبت به شکل (۹)، تغییرات هر دو شاخص نسبت به حالت عادی همچنان در حدی است که به عملکرد هر دو روش می توان اطمینان داشت. علاوه بر این، شکل (۱۲) نشان می دهد بجز نقاط محدودی، تقریباً این دو شاخص منطبق بر یکدیگر می باشند. این مساله می تواند تایید کننده صحت روش پیشنهادی نیز باشد.



(الف)

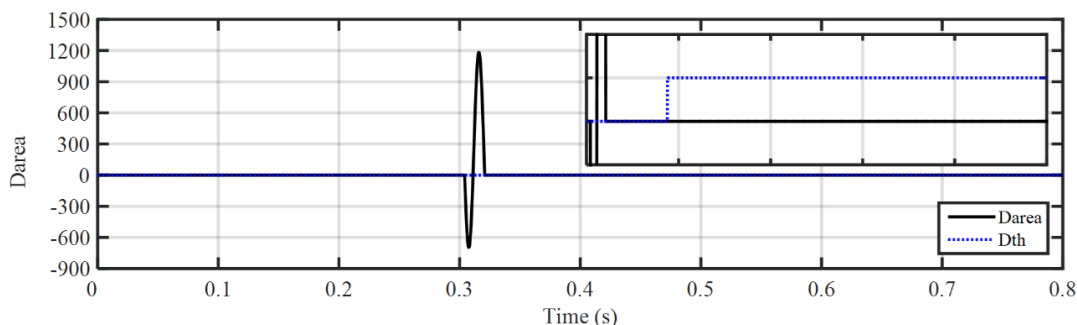




شکل (۱۳)، شکل موج جریان لحظه ای ابتدای فیدر، هنگام کلیدزنی بار

۳-۳- تغییر ناگهانی بار از طریق کلیدزنی

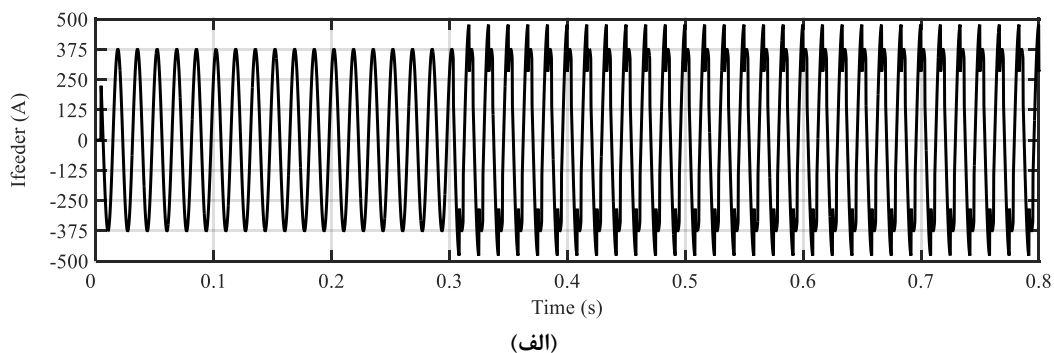
در این بخش بمنظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی در تمیز رخدادهای معمول شبکه از خطاهای امپدانس بالا، درحالی که کلید بین باس های ۶۷۱ و ۶۹۲ از ابتدا بسته است، در لحظه ۰/۳ ثانیه کلید مذکور باز شده است و بارهای متصل در این انشعاب از مدار خارج شده اند. شکل های (۱۳-الف) و (۱۳-ب) به ترتیب نمودار تغییرات جریان فاز B ابتدای فیدر و نمودار بزرگنمایی شده قدرمطلق جریان مذکور را نشان می دهند. همانطور که در این شکل مشاهده میشود، پس از باز شدن کلید مذکور نیز تقارن شکل موج جریان همچنان برقرار است. شکل (۱۴) تغییرات شاخص پیشنهادی، هنگام کلیدزنی بار را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، علی رغم تغییرات شدید شاخص در لحظه کلیدزنی، این تغییرات گذراست و از آنجا که بلافاصله کاهش یافته است و از آستانه مقدار شاخص و آستانه زمانی عبور نکرده است، چنین رخدادی بعنوان خطای امپدانس بالا تشخیص داده نمی شود.

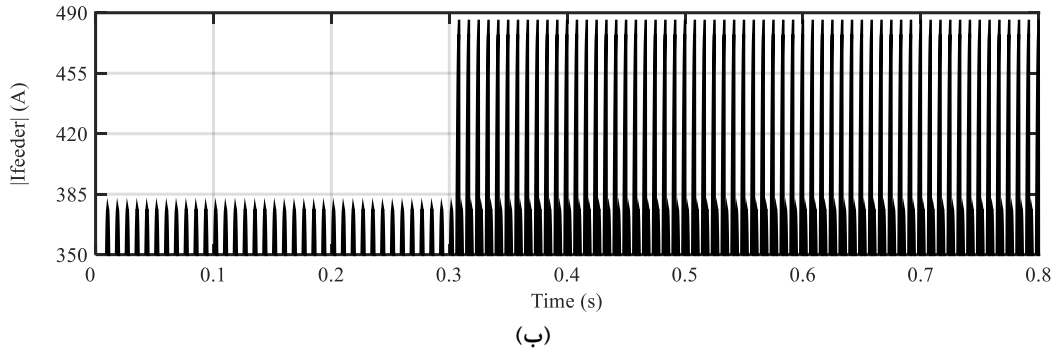


شکل (۱۴)، نمودار تغییرات شاخص پیشنهادی، هنگام کلیدزنی بار

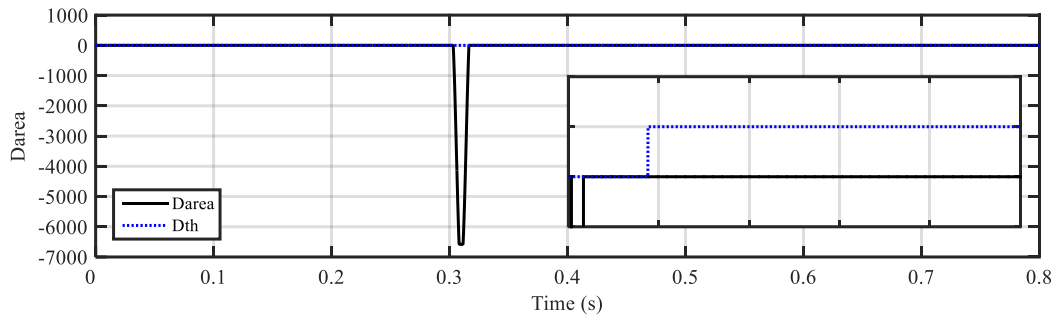
۳-۴- کلیدزنی بار غیر خطی

در این بخش بمنظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی در تمیز بارهای غیر خطی از خطاهای امپدانس بالا، درحالی که کلید بین باس های ۶۷۱ و ۶۹۲ از ابتدا بسته است، در لحظه ۰/۳ ثانیه یک بار غیر خطی به باس ۶۹۲ شده است. بار مذکور یک یکسوساز قدرت است که برای مدار شارژ باتری استفاده شده است.

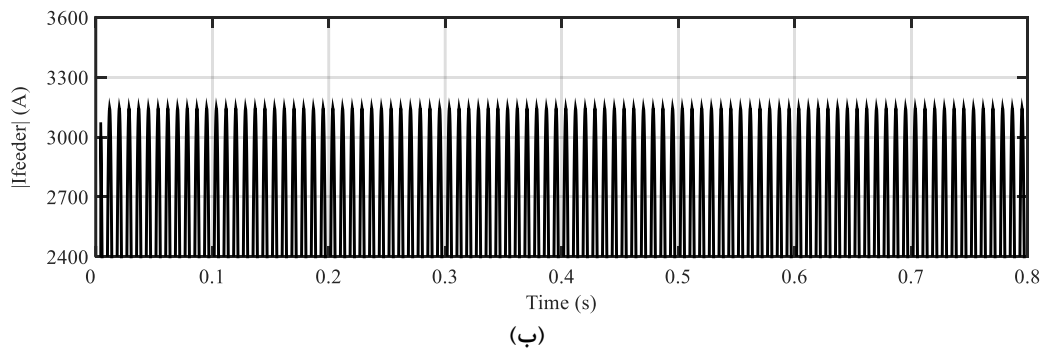
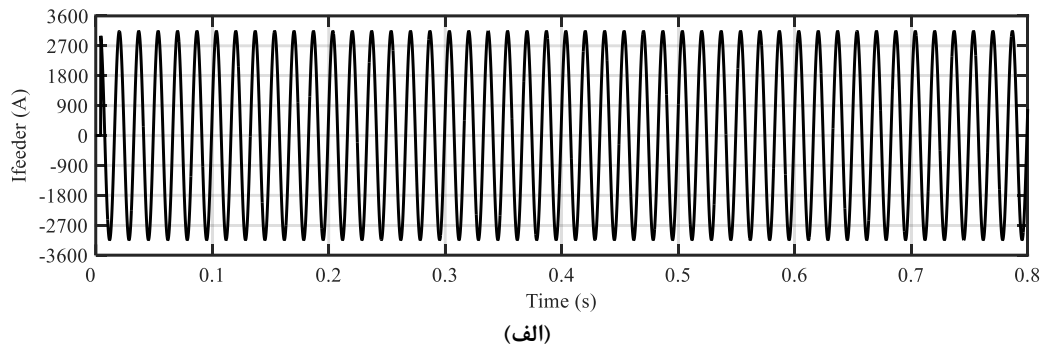




شکل (۱۵)، شکل موج جریان لحظه ای ابتدای فیدر، هنگام کلیدزنی بار غیرخطی



شکل (۱۶)، نمودار تغییرات شاخص پیشنهادی، هنگام کلیدزنی بار غیرخطی



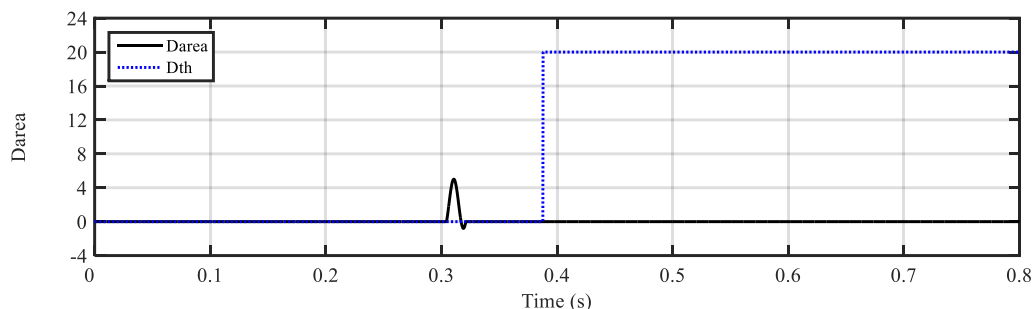
شکل (۱۷)، شکل موج جریان لحظه ای ابتدای فیدر، هنگام کلیدزنی خازن

شکل های (۱۵-الف) و (۱۵-ب) به ترتیب نمودار تغییرات جریان فاز B ابتدای فیدر و نمودار بزرگنمایی شده قدرمطلق جریان مذکور را نشان می دهند. همانطور که قابل مشاهده است، با ورود بار غیرخطی جریان ابتدای فیدر بطور چشمگیری فرم سینوسی خود را از دست داده و هارمونیک شده است. تغییرات شاخص پیشنهادی هنگام کلیدزنی بار غیرخطی در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همانطور که





مشاهده می‌شود، علی‌رغم تغییرات شدید شاخص در اثر کلیدزنی بار غیر خطی، روش پیشنهادی به خوبی موفق به تمیز این رخداد از خطای امپدانس بالا شده است.



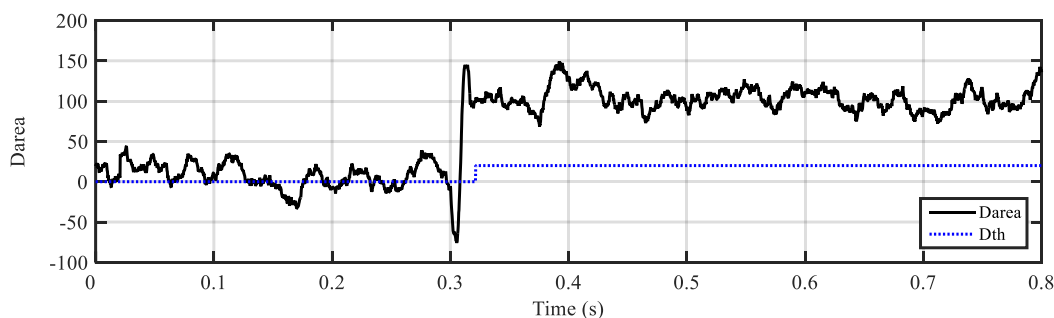
شکل (۱۸)، نمودار تغییرات شاخص پیشنهادی هنگام کلید زنی خازن

۳-۵- کلیدزنی خازن

در این بخش، کارایی روش پیشنهادی در تمیز دادن رخدادهایی مانند کلیدزنی خازن از خطای امپدانس بالا، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، از لحظه 0.3 ثانیه یک خازن تکفاز 100 کیلوواری به باس 611 و یک خازن سه فاز 600 کیلوواری به باس 675 متصل می‌شوند. شکل‌های (الف-۱۷) و (ب-۱۷) به ترتیب شکل موج جریان فاز C ابتدای فیدر و شکل موج بزرگنمایی شده قدر مطلق جریان مذکور را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات جریان ناشی از این رخداد قابل توجه نیست. در شکل (۱۸)، تغییرات شاخص پیشنهادی هنگام کلید زنی خازن نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با توجه به حد آستانه مقدار شاخص و حد آستانه زمانی در نظر گرفته شده، کلید زنی خازن به خوبی از خطای امپدانس بالا تمیز داده می‌شود و عملکرد روش پیشنهادی قابل اطمینان است.

۳-۶- اثر نویز

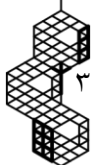
کارایی روش پیشنهادی در شرایط حضور نویز مساله ای است که در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور، در حالی که یک نویز سفید گوسی، با نسبت دامنه سیگنال به نویز 40 دسی بل، به سیگنال جریان اندازه‌گیری شده در ابتدای فیدر اضافه شده است، از لحظه 0.3 ثانیه یک خطای امپدانس بالا در باس 632 رخ می‌دهد. شکل (۱۹) نمودار تغییرات شاخص پیشنهادی، شاخص آستانه و زمان آستانه را پس از بروز خطای مذکور نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در حضور نویز نیز با استفاده از شاخص پیشنهادی خطای امپدانس بالای رخ داده در باس 632 به خوبی قابل تشخیص خواهد بود.



شکل (۱۹)، تغییرات شاخص پیشنهادی در حضور نویز، هنگام بروز خطای امپدانس بالا در باس 632

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی مبتنی بر اندازه‌گیری مشابهت برای تشخیص خطاهای امپدانس بالا ارائه شده است. در این روش، شاخصی ارائه شده است که مبتنی بر پردازش سیگنال جریان خطا است. این شاخص در حقیقت سطح زیر نمودار دو نیم سیکل جریان را بطور





پیوسته با یکدیگر مقایسه می‌کند. در حالت عادی مقدار این شاخص، صفر است. اما پس از بروز خطای امپدانس بالا، مقدار شاخص بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد و تشخیص چنین خطاهایی را ممکن می‌سازد. از آنجا که رخدادهای معمول شبکه مانند تغییرات ناگهانی بار بار و کلید زنی خازن هم می‌توانند موجب تغییر شاخص پیشنهادی شوند، بمنظور ایجاد قابلیت تمیز خطای امپدانس بالا از رخدادهای معمول شبکه، یک حد آستانه مقدار شاخص و یک حد آستانه زمانی نیز در نظر گرفته شده است. بمنظور تایید کارایی روش پیشنهادی، شبکه ۱۳ باس IEEE که یک شبکه توزیع نامتقارن می‌باشد، مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، بروز خطای امپدانس بالا در نقاط مختلف شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد روش پیشنهادی قادر است این خطاها را، چه در نزدیکی محل نصب تجهیزات حفاظتی و چه دور از آنها، به خوبی تشخیص دهد. علاوه بر این، تغییر ناگهانی بار، کلید زنی بار غیر خطی و همچنین کلید زنی خازن نیز در شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است که نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد روش پیشنهادی توانسته است چنین رخدادهای معمول شبکه را از خطای امپدانس بالا تمیز داده و دچار عملکرد اشتباه نشده است.

سپاسگزاری

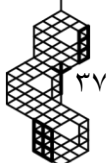
نویسندگان این مقاله، از آقای دکتر ایمان صادق خانی، عضو محترم هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، بابت استفاده از راهنمایی‌ها و کمک‌های ایشان کمال سپاسگزاری و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] B. Fani, H. Bisheh, and I. Sadeghkhan, "Protection coordination scheme for distribution networks with high penetration of photovoltaic generators," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 8, pp. 1802-1814, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1229
- [2] A. Khoshnami and I. Sadeghkhan, "Sample entropy-based fault detection for photovoltaic arrays," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 16, pp. 1966-1976, 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5220.
- [3] M. M. Rezaei and J. Soltani, "Sliding mode control of a grid-connected distributed generation unit under unbalanced voltage conditions," *automatika*, vol. 57, no. 1, pp. 89-98, 2016, doi: 10.7305/automatika.2016.07.870.
- [4] C. Athanasiadis, T. Papadopoulos, G. Kryptonidis, and D. Doukas, "A review of distribution network applications based on smart meter data analytics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 191, p. 114151, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114151.
- [5] S. Nezamzadeh-Ejeh and I. Sadeghkhan, "Cross Entropy-Based High-Impedance Fault Detection Algorithm for Distribution Networks," *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, vol. 8, no. 1, pp. 62-71, 2019.
- [6] K. Sarwagya, S. De, and P. K. Nayak, "High-impedance fault detection in electrical power distribution systems using moving sum approach," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 1-8, 2018, doi: 10.1049/iet-smt.2017.0231.
- [7] A. Soheili and J. Sadeh, "Evidential reasoning based approach to high impedance fault detection in power distribution systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 5, pp. 1325-1336, 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1657.
- [8] M. S. Ali, A. H. Abu Bakar, H. Mokhlis, H. Arof, and H. Azil Illias, "High-impedance fault location using matching technique and wavelet transform for underground cable distribution network," *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 176-182, 2014, doi: 10.1002/tee.21953.
- [9] A. H. A. Bakar, M. Ali, C. Tan, H. Mokhlis, H. Arof, and H. Illias, "High impedance fault location in 11 kV underground distribution systems using wavelet transforms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 55, pp. 723-730, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.10.003.
- [10] R. Varghese P, M. Subathra, S. T. George, N. M. Kumar, E. S. Suviseshamuthu, and S. Deb, "Application of signal processing techniques and intelligent classifiers for high-impedance fault



- detection in ensuring the reliable operation of power distribution systems," *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, p. 1114230, 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1114230.
- [11] A. I. Sifat, F. J. S. McFadden, J. Bailey, R. Rayudu, and A. Hunze, "Characterization of 400 volt high impedance fault with current and magnetic field measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 6, pp. 3538-3549, 2020, doi: 10.1109/tpwrd.2020.3044545.
- [12] Z. Moravej, S. H. Mortazavi, and S. M. Shahrtash, "DT-CWT based event feature extraction for high impedance faults detection in distribution system," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 25, no. 12, pp. 3288-3303, 2015, doi: 10.1002/etep.2035.
- [13] A. Ghaderi, H. L. Ginn III, and H. A. Mohammadpour, "High impedance fault detection: A review," *Electric power systems research*, vol. 143, pp. 376-388, 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2016.10.021.
- [14] M. Salehi, M. Zolfaghari, and J. M. Maritz, "A Simple Approach to Detect High Impedance Fault Using Morphological Gradient Edge Detector," *IEEE Access*, 2024, doi: 10.1109/access.2024.3351565.
- [15] A. Chandra, G. K. Singh, and V. Pant, "A novel high impedance fault detection strategy for microgrid based on differential energy signal of current signatures and entropy estimation," *Electric Power Components and Systems*, vol. 52, no. 4, pp. 532-554, 2024, doi: 10.1080/15325008.2023.2227193.
- [16] W. Sheng, K. Liu, D. Jia, and Y. Wang, "An improved high-impedance fault identification scheme for distribution networks based on kernel extreme learning machine," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 155, p. 109543, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109543.
- [17] M. F. Guo, M. Yao, J. H. Gao, W. L. Liu, and S. Lin, "An incremental high impedance fault detection method under non-stationary environments in distribution networks," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 156, 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109705.
- [18] V. Ashok and A. Yadav, "Fault diagnosis scheme for cross-country faults in dual-circuit line with emphasis on high-impedance fault syndrome," *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 2087-2097, 2020, doi: 10.1109/jsyst.2020.2991770.
- [19] S. Nezamzadeh-Ejeh and I. Sadeghkhani, "HIF detection in distribution networks based on Kullback–Leibler divergence," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 1, pp. 29-36, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.0001.
- [20] E. Baharozu, S. Ilhan, and G. Soykan, "High impedance fault localization: A comprehensive review," *Electric Power Systems Research*, vol. 214, p. 108892, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108892.
- [21] N. I. Elkalashy, M. Lehtonen, H. A. Darwish, M. A. Izzularab, and I. T. Abdel-maksoud, "Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 14, no. 2, pp. 375-383, 2007, doi: 10.1109/tdei.2007.344617.
- [22] M. Michalik, W. Rebizant, M. Lukowicz, S.-J. Lee, and S.-H. Kang, "High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 1793-1802, 2006, doi: 10.1109/tpwrd.2006.874581.
- [23] P. H. Schavemaker and L. Van der Slui, "An improved Mayr-type arc model based on current-zero measurements [circuit breakers]," *IEEE Transactions on Power delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 580-584, 2000, doi: 10.1109/61.852988.
- [24] H. A. Darwish and N. I. Elkalashy, "Universal arc representation using EMTP," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 772-779, 2005, doi: 10.1109/tpwrd.2004.838462.
- [25] A. Emanuel, D. Cyganski, J. Orr, S. Shiller, and E. Gulachenski, "High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 2, pp. 676-686, 1990, doi: 0.1109/61.53070.
- [26] A. Sharat, L. Snider, and K. Debnath, "A neural network based back error propagation relay algorithm for distribution system high impedance fault detection," in *1993 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-93.*, 1993: IET, pp. 613-620.
- [27] I. Baqui, I. Zamora, J. Mazón, and G. Buigues, "High impedance fault detection methodology using wavelet transform and artificial neural networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 7, pp. 1325-1333, 2011, doi: 10.1016/j.epsr.2011.01.022.
- [28] Y.-Y. Hong and W.-S. Huang, "Locating High-Impedance Fault Section in Electric Power Systems Using Wavelet Transform,-Means, Genetic Algorithms, and Support Vector Machine," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/823720.





- [29] A. A. Amer and H. I. Abdalla, "A set theory based similarity measure for text clustering and classification," *Journal of Big Data*, vol. 7, no. 1, p. 74, 2020, doi: 10.1186/s40537-020-00344-3.
- [30] K. Dubey and P. Jena, "A novel high impedance fault detection technique in smart active distribution systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, doi: 10.1109/tie.2023.3285975.

زیر نویس ها

-
- ¹ Empirical mode decomposition
 - ² Kernel extreme learning machine
 - ³ Incremental learning
 - ⁴ Non-stationary data stream
 - ⁵ Density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN)
 - ⁶ Kullback–Leibler divergence
 - ⁷ Euclidean distance
 - ⁸ Manhattan distance
 - ⁹ Cosine similarity
 - ¹⁰ Bhattacharya coefficient

