الگوریتم مبتنی بر آنتروپی متقاطع برای آشکارسازی خطای امپدانس بالا در شبکه‌های توزیع

شیوا نظام زاده اژیه[1]، کارشناسی ارشد، ایمان صادق‌خانی[1]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق – واحد نجف‌آباد – دانشگاه آزاد اسلامی – نجف‌آباد - ایران
shiva.nezamzadeh@sel.iaun.ac.ir
sadeghkhani@pel.iaun.ac.ir

چکیده: جریان خطای کوچک خطاهای امپدانس بالا یکی از چالش‌های مهم حفاظت شبکه‌های توزیع است. عدم توانایی آشکارسازی این نوع خطا توسط رله‌های اضافه جریان مرسوم منجر به تداوم قوس الکتریکی ناشی از آنها می‌شود که نتیجه آن اتلاف انرژی، خطر آتش‌سوزی و شوک الکتریکی می‌باشد که تهدیدی برای جان انسان‌ها و تجهیزات شبکه است. در این مقاله یک الگوریتم آشکارسازی خطای امپدانس بالا بر مبنای کمّی سازی ویژگی‌های غیرخطی بودن و نامتقارن بودن شکل موج حاصل از خطا ارائه می‌گردد. به این منظور ابتدا از جریان پست توزیع نمونه‌برداری شده و سپس مؤلفه تحمیلی خطای سیگنال آنتروپی متقاطع حاصل از مقایسه شکل موج دو نیم سیکل متوالی جریان به عنوان شاخص آشکارسازی خطا محاسبه می‌شود. از سوی دیگر برای غلبه بر چالش تشابه گذراهای ناشی از کلیدزنی تجهیزات و خطا، از زمان تداوم گذرا به عنوان قید شاخص پیشنهادی بهره برده می‌شود. طرح پیشنهادی در حضور بارهای غیرخطی به خوبی کار کرده و نیازی به داده‌های آموزشی، تبدیل و محاسبه مؤلفه‌های هارمونیکی و متقارن ندارد. کارآیی الگوریتم پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی حوزه زمانی سیستم تست استاندارد ۱۳ باسه IEEE نشان داده می‌شود.

واژه های کلیدی: خطای امپدانس بالا، شبکه توزیع، آنتروپی متقاطع، حفاظت.

تاریخ ارسال مقاله ۹۷/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۲/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول : ایمان صادق خانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق – واحد نجف‌آباد – دانشگاه آزاد اسلامی – نجف‌آباد - ایران

.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.8.9]

۱- مقدمه

خطر برق گرفتگی و خسارت‌های وارده به تجهیزات از جمله مهمترین پیامدهای وقوع اتصال کوتاه در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی است. بنابراین ایجاد یک سیستم حفاظتی کارآمد به منظور افزایش قابلیت اطمینان شبکه و تأمین انرژی الکتریکی مصرف کنندگان برای رفع این نیاز ضروری می‌باشد [۱]. خطاهای امپدانس بالا چالش‌های فنی ویژه‌ای برای مهندسین حفاظت شبکه‌های توزیع ایجاد می‌کنند [۲]. نامگذاری خطاهای امپدانس بالا که معمولاً از نوع تک فاز به زمین هستند از آن جهت است که هنگام برخورد هادی برقدار به زمین، معمولاً امپدانس مسیر جریان خطا دارای مقدار بزرگی است. خطاهای امپدانس بالا را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. در نوع اول هادی برقدار شبکه توزیع با یک شیء امپدانس بالا همچون شاخه درختان و یا نرده‌های چوبی در معرض تماس قرار می‌گیرد؛ در حالی که نوع دوم زمانی اتفاق می‌افتد که هادی برقدار بریده شده و روی سطح زمینی با امپدانس بالا همچون پیاده‌رو، بتن، آسفالت و یا شن می‌افتد [۳-۵]. متداولترین مشخصه فیزیکی خطای امپدانس بالا این است که این پدیده اغلب همراه با قوس الکتریکی است؛ از این رو برخی مواقع خطای امپدانس بالا را خطای قوس امپدانس بالا نیز می‌نامند [۶]. ویژگی‌های اصلی یک خطای امپدانس بالا عبارتند از [۳،۴،۷،۸]:

- دامنه کم جریان خطا که نتیجه تماس هادی برقدار با شیء یا سطح امپدانس بالا است؛
- تصادفی بودن ماهیت آن که ناشی از تخلیه الکتریکی سریع و رقص هادی روی سطح زمین است؛
- عدم تقارن شکل موج حاصل از آن که ناشی از حضور سیلیکا در سطح تماس می‌باشد؛
- ماهیت غیرخطی بودن آن که نتیجه مقاومت متفاوت لایه‌های خاک است.

هنگامی‌که یک خطای امپدانس بالا در شبکه توزیع رخ می‌دهد، به علت پایین بودن سطح ولتاژ شبکه و زیاد بودن امپدانس مسیر اتصال کوتاه، جریان اندکی از محل خطا عبور می‌کند. از آنجایی که حفاظت مرسوم مورد استفاده در شبکه توزیع، حفاظت اضافه جریان است که بر مبنای جریان اتصال کوتاه بزرگ شبکه کار می‌کند، این نوع حفاظت قادر به تشخیص خطاهای امپدانس بالا نمی‌باشد. در نتیجه خطا تا مدت زمان زیادی بدون اینکه تشخیص داده شود در سیستم باقی می‌ماند که این امر منجر به اتلاف انرژی می‌شود. از طرفی به علت وجود قوس الکتریکی حاصل از خطا، احتمال شوک الکتریکی برای موجودات زنده و یا خطر آتش‌سوزی در سیستم وجود خواهد داشت. موضوع دیگری که بایستی مورد توجه قرار گیرد این است که رخدادهای معمول شبکه توزیع همچون کلیدزنی بار و بانک خازنی منجر به گذراهای مشابهی با این نوع خطا می‌شوند. این امر آشکارسازی خطا را برای سیستم حفاظت دشوارتر می‌کند. همچنین با افزایش روزافزون مصرف‌کننده‌های دیجیتال، بارهای غیرخطی در سطح شبکه توزیع پخش شده‌اند. مشابه رخداد کلیدزنی، این بارها نیز منجر به الگوی مشابهی با خطای امپدانس بالا در شکل‌موج‌های ولتاژ و جریان شبکه می‌شوند. بنابراین حضور بارهای غیرخطی می‌تواند روش‌های متداول آشکارسازی خطاهای امپدانس بالا را به اشتباه بیندازد. در نتیجه تشخیص خطاهای امپدانس بالا یک چالش اساسی در شبکه توزیع است [۴،۵،۹] زیرا یک طرح حفاظتی کارا باید قادر باشد علاوه بر آشکارسازی خطا، امکان تمییز آن از رخدادهای کلیدزنی و حضور بارهای غیرخطی را نیز دارا باشد.

روش‌های آشکارسازی خطاهای امپدانس بالا را می‌توان به چهار گروه تقسیم کرد: روش‌های حوزه فرکانس، روش‌های حوزه زمان، روش‌های ابتکاری و روش‌های ترکیبی (حوزه زمان-فرکانس). از آنجایی که وقوع یک خطای امپدانس بالا تغییر چندانی در دامنه شکل موج ولتاژ و جریان شبکه ایجاد نمی‌کند، روش‌های موجود سعی در آشکارکردن ویژگی‌های خاص موجود در این شکل موج‌ها دارند.

هنگامی که خطای امپدانس بالا رخ می‌دهد، به علت ایجاد قوس الکتریکی، مؤلفه‌های هارمونیکی خاصی در شکل موج جریان و ولتاژ پدیدار می‌شوند که باعث شده است محققین به تحلیل طیف فرکانسی برای آشکارسازی این خطا ترغیب شوند. روش‌های آشکارسازی مبتنی بر حوزه فرکانس بر اساس مؤلفه‌های فرکانس بالا و فرکانس پایین در شکل موج خطای امپدانس بالا عمل می‌کنند. در مرجع [۱۰] به منظور آشکارسازی خطاهای امپدانس بالا از واریانس انرژی برای جریان‌های هارمونیک دوم، پنجم و ششم استفاده شده است. الگوریتم ارائه شده در [۴] بر مبنای پردازش اطلاعات دریافتی از سامانه اندازه‌گیری هوشمند و محاسبه هارمونیک‌های زوج در شکل موج ولتاژ کار می‌کند. در روش پیشنهادی در [۱۱]، از چهار شاخص مقایسه هارمونیک‌های سوم و پنجم جریان، اختلاف زاویه فاز بین مؤلفه اصلی ولتاژ و هارمونیک سوم جریان، مقدار جریان توالی منفی و مقدار جریان هارمونیک سوم استفاده شده است. افزایش مؤلفه‌های فرکانس بالا در جریان فیدر، اساس روش ارائه شده در مرجع [۱۲] است. در مرجع [۱۳] از جریان هارمونیک سوم برای آشکارسازی خطای امپدانس بالا استفاده شده است. در مرجع [۱۴] روشی بر پایه سیگنال‌های نویز برست در فرکانس‌های نزدیک به مؤلفه اصلی و هارمونیک‌های مرتبه پایین پیشنهاد شده است. در روش آشکارسازی خطای امپدانس بالای ارائه شده در مرجع [۱۵] از دو معیار برای آشکارسازی خطا استفاده شده است که یکی مقایسه جریان هارمونیک‌های زوج با هارمونیک سوم و دیگری مقایسه اعوجاج هارمونیک کل (THD) جریان فاز معیوب و میانگین THD جریان تمامی فازها می‌باشد. در سال‌های اخیر استفاده از بارهای غیرخطی توسط مصرف‌کنندگان افزایش یافته

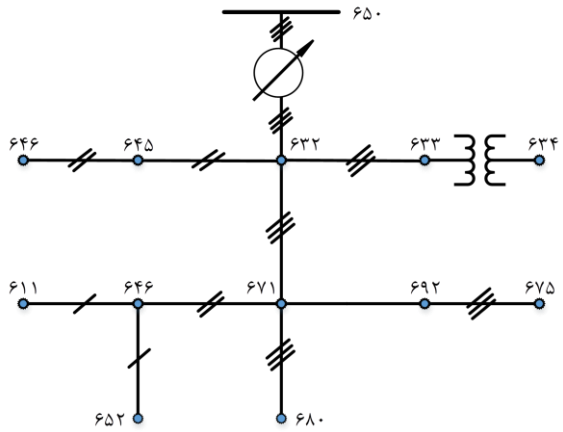
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.8.9]

است که برخی از این بارها هارمونیک‌های متغیر با زمان ایجاد می-کنند. در این شرایط ممکن است کارآیی روش‌های آشکارسازی خطای امپدانس بالای مبتنی بر مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ و جریان تحت تأثیر قرار گیرد. همچنین روش‌هایی که از هارمونیک‌های فرد برای آشکارسازی خطای امپدانس بالا استفاده کرده‌اند، اغلب در حضور بار-های غیرخطی مثل ادوات الکترونیک قدرت دچار مشکل خواهند شد زیرا این ادوات هارمونیک‌های فرد را به سیستم تزریق می‌کنند [۴].

روش‌های حوزه زمان بر اساس اندازه‌گیری‌های ولتاژ و یا جریان کار می‌کنند. از ابزار پردازش سیگنال ریخت شناسی ریاضی در مرجع [۳] استفاده شده است. این روش در کنار رله‌های اضافه جریان متعارف اجرا شده و عملکرد این رله‌ها را بهبود می‌بخشد. در مرجع [۱۶] نیز از همین ابزار برای آشکارسازی خطای امپدانس بالا بهره برده شده است؛ اما این روش در حضور بارهای غیرخطی به اشتباه عمل می‌کند. در مرجع [۵] از مؤلفه تحمیلی خطای ولتاژ باقی‌مانده برای آشکارسازی خطای امپدانس بالا و از مؤلفه تحمیلی خطای جریان توالی منفی برای تشخیص مکان این نوع خطا استفاده شده است. در مرجع [۱۷] از اندازه‌گیری ولتاژ برای آشکارسازی خطای امپدانس بالا استفاده شده است؛ اما به دلیل کوچک بودن جریان خطا و فاصله زیاد محل خطا تا رله ممکن است افت ولتاژ حاصل آنقدر زیاد نشود که این روش قابل اعتماد باشد. روش پیشنهادی در مرجع [۱۸] از ضریب همبستگی برای آشکارسازی خطا بهره می‌برد. در مرجع [۱۹] از سیگنال شدت میدان مغناطیسی که در نزدیکی هادی‌های فیدر اندازه‌گیری می‌شود، با هدف آشکارسازی خطاهای امپدانس بالا استفاده شده است. با استفاده از روش فراکتال، بی‌نظمی حاصل از خطای امپدانس بالا در مرجع [۲۰] مورد تحلیل قرار گرفته است. این روش قابلیت تشخیص خطا و تمییز آن از دیگر گذراهای سیستم را دارا است؛ اما زمانی‌که سیگنال نمونه-برداری دارای نویز می‌باشد و دامنه آن کم است، دقت در آشکارسازی خطا کاهش می‌یابد [۱۷]. با استفاده از اندازه‌گیری جریان در دو طرف ناحیه حفاظتی، مرجع [۲۱] از حفاظت تفاضلی برای آشکارسازی خطای امپدانس بالا استفاده می‌کند. نیاز به زیرساخت مخابراتی و همزمانی داده‌ها از معایب این روش است. همچنین حفاظت تفاضلی قادر به آشکارسازی خطاهایی که جریان آن‌ها کمتر از ۱۰٪ جریان نامی است، نمی‌باشد.

روش‌های بر پایه استفاده از درخت تصمیم‌گیری [۲۲]، شبکه‌های عصبی مصنوعی [۲۳]، سیستم استنتاج عصبی-فازی وفقی [۲۴]، ماشین بردار پشتیبان [۲۵] و الگوریتم ژنتیک [۲۶] از جمله طرح‌های آشکارسازی خطای امپدانس بالای در گروه روش‌های ابتکاری هستند. نیاز به مجموعه داده‌های آموزشی از معایب اصلی این گروه است. در میان روش‌های گروه چهارم، مرجع [۲۷] از انرژی ضریب موجک برای آشکارسازی گذراهای ناشی از خطاهای امپدانس بالا استفاده کرده



شکل (۱): سیستم تست استاندارد ۱۳ باسه IEEE

است. همچنین استخراج ویژگی‌های خطای امپدانس بالا با استفاده از تبدیل موجک گسسته در [۲۸، ۲۹] پیشنهاد شده است. در مرجع [۳۰] از ترکیب تبدیل بسته موجک و ماشین یادگیری شدید برای آشکارسازی خطای امپدانس بالا استفاده شده است. تقریباً ۴۰٪ از تمام تکنیک‌های آشکارسازی HIF بر اساس تبدیل موجک بوده است [۱۷]. اما بار محاسباتی بالا و عدم قابلیت تشخیص خطای امپدانس بالا در حضور بارهای غیرخطی از معایب بزرگ این دسته هستند.

عدم حساسیت بالا، نیاز به ارتباط مخابراتی، نیاز به تبدیل فوریه و موجک، نیاز به داده‌های آموزشی، ناتوانی در تمییز خطای امپدانس بالا از رخدادهای معمول کلیدزنی و عملکرد اشتباه در حضور بارهای غیرخطی از جمله معایب روش‌های پیشین می‌باشند. این مقاله الگوریتم جدیدی در حوزه زمان برای آشکارسازی خطاهای امپدانس بالا ارائه می‌کند که علاوه بر داشتن حساسیت مناسب، قادر است این نوع خطا را از دیگر رخدادهای معمول شبکه که ویژگی‌های مشابهی با آن دارند، متمایز کند. مبنای الگوریتم پیشنهادی این است که هنگام وقوع یک خطای امپدانس بالا، ویژگی‌های غیرخطی بودن و نامتقارن بودن آن باعث می‌شود که شکل موج هر نیم سیکل از جریان پست با نیم سیکل قبل از خود متفاوت باشد. هدف این مقاله کمّی کردن عدم تشابه دو نیم سیکل متوالی شکل موج جریان اندازه‌گیری شده در پست توزیع با استفاده از مفهوم آنتروپی متقاطع است. ویژگی‌های روش پیشنهادی از قرار زیر است:

- حساسیت مناسب در آشکارسازی خطای امپدانس بالا
- عدم نیاز به ارتباط مخابراتی و تجهیزات اضافی
- عدم نیاز به استفاده از تبدیل‌های فوریه و موجک
- عدم نیاز به داده‌های آموزشی
- امکان تمییز خطاهای امپدانس بالا از رخدادهای معمول کلیدزنی
- عملکرد صحیح در حضور بارهای غیرخطی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.8.9]

این مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است. در بخش دوم ابتدا سیستم توزیع تحت مطالعه و مدل مورد استفاده برای خطای امپدانس بالا معرفی شده و سپس چالش‌های آشکارسازی این نوع خطاها بیان می‌شوند. بخش سوم به تشریح الگوریتم پیشنهادی برای آشکارسازی خطای امپدانس بالا می‌پردازد. نتایج شبیه‌سازی حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در سیستم تست در بخش چهارم بیان می‌شوند. همچنین در این بخش عملکرد الگوریتم پیشنهادی با برخی روش‌های مرسوم مقایسه می‌شود. در نهایت، نتایج حاصل از این مقاله در بخش پنجم ارائه می‌شوند.

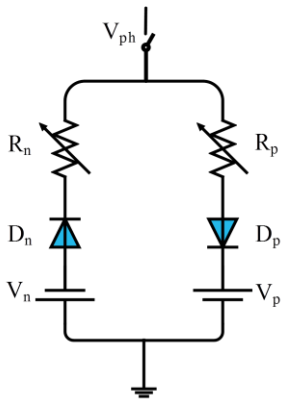
۲- مدلسازی و آشکارسازی خطای امپدانس بالا

۲-۱- سیستم تحت مطالعه

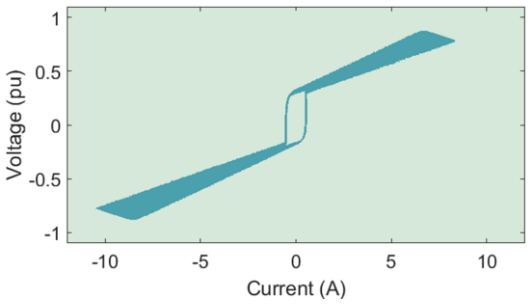
برای ارزیابی الگوریتم ارائه شده در این مقاله از سیستم تست استاندارد ۱۳ باسه IEEE استفاده شده است. سطح ولتاژ این شبکه ۴/۱۶ kV است و پست توزیع در باس ۶۵۰ قرار دارد که شامل یک رگولاتور ولتاژ می‌باشد. نمودار تک خطی سیستم تست در شکل (۱) نشان داده شده است. این شبکه دارای دو بانک خازنی است که در باس‌های ۶۱۱ و ۶۷۵ نصب شده‌اند. کوتاه بودن طول فیدرها و وجود بارهای به نسبت بزرگ از ویژگی‌های مهم این شبکه هستند. همچنین به دلیل وجود بارهای تکفاز و دو فاز، شبکه نامتعادل است. این سیستم یکی از رایج‌ترین شبکه‌های مورد استفاده برای مطالعات خطاهای امپدانس بالا است. پارامترهای سیستم تست در مرجع [۳۱] ارائه شده‌اند.

۲-۲- چالش‌های آشکارسازی خطای امپدانس بالا

برای انتخاب یک روش دقیق و مناسب برای شناسایی خطای امپدانس بالا لازم است که قوس الکتریکی این خطا مدلسازی شود. مدلسازی دقیق منجر به نتایج شبیه‌سازی دقیق‌تر و استخراج یک روش آشکارسازی جامع‌تر می‌شود. داده‌های مدل خطای امپدانس بالا باید ویژگی‌های پیچیده این خطا همچون غیرخطی بودن، نامتقارن بودن و تصادفی بودن شکل موج جریان خطا را بازتاب دهند. چندین مدل خطای امپدانس بالا در مقالات [۵، ۳۲] پیشنهاد شده است. شکل (۲) مدل انتخاب شده در این مقاله را نشان می‌دهد که مدل محبوبی در میان محققین می‌باشد [۸،۷،۵]. این مدل شامل دو دیود، دو مقاومت متغیر و دو منبع ولتاژ متغیر می‌باشد که با آرایش موازی و معکوس با یکدیگر قرار گرفته‌اند. مقادیر نامساوی منابع ولتاژ V_P و V_n جریان خطای غیرخطی و اطفاء قوس الکتریکی و مقادیر نامساوی مقاومت‌های R_n و R_P تغییرات تصادفی مقاومت قوس را مدلسازی می‌کنند. V_{Ph} ولتاژ فاز به زمین در محل خطا است. اگر $V_{Ph} > V_P$ باشد، جریان به سمت زمین جاری می‌شود و هنگامی که $V_{Ph} < V_n$ است، جهت جریان خطا برعکس می‌شود. همچنین اگر $V_P < V_{Ph} < V_n$ باشد، هیچ جریان خطایی جاری نمی‌شود. مقدار V_P و V_n به ترتیب نصف و یک چهارم



شکل (۲): مدل خطای امپدانس بالا



شکل (۳): مشخصه ولتاژ-جریان خطای امپدانس بالا

V_{Ph} انتخاب می‌شوند که بین ٪۱۰± مقدار خود تغییر داده می‌شوند. همچنین مقادیر R_P و R_n نیز بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ اهم متغیر هستند.

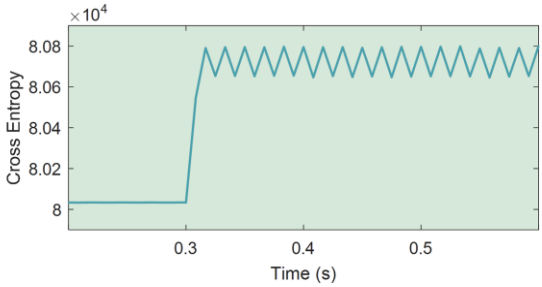
شکل (۳) مشخصه ولتاژ-جریان یک خطای امپدانس بالا را نشان می‌دهد که ویژگی‌های غیرخطی بودن و نامتقارن بودن در آن نمایان است. همانگونه که مشاهده می‌شود دامنه جریان خطا حدود ۱۰ A است که کمتر از ٪۲ جریان حالت کار عادی می‌باشد. این جریان کوچک تغییر قابل توجهی در دامنه جریان پست توزیع ایجاد نکرده و برای تحریک رله‌های اضافه جریان موجود در شبکه توزیع کافی نیست؛ در نتیجه خطا در سیستم باقی خواهد ماند. همچنین کلیدزنی بارها و بانک‌های خازنی ویژگی‌هایی مشابهی با خطای امپدانس بالا در شکل موج‌ها ایجاد می‌کنند که تشخیص این خطا را با چالش مواجه می‌کند. از طرفی وجود بارهای غیرخطی در شبکه توزیع نیز منجر به حضور اعوجاجات هارمونیکی در شکل موج جریان و ولتاژ می‌شود که این امر کارآیی روش‌های سنتی آشکارسازی خطای امپدانس بالای مبتنی بر تحلیل فرکانسی شکل موج را محدود می‌کند.

۳- الگوریتم پیشنهادی برای آشکارسازی خطای امپدانس بالا

همانطور که در بخش‌های قبل عنوان شد، به علت دامنه کوچک جریان خطای امپدانس بالا، رله‌های اضافه جریان مرسوم قادر به تشخیص این نوع خطا نیستند. با توجه به این نکته، باید تحلیل شکل‌موج‌های جریان و ولتاژ را مد نظر قرار داد. یک طرح حفاظتی مناسب برای

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.8.9]



شکل (۴): آنتروپی متقاطع حاصل از شکل موج جریان پست توزیع. خطا در ۰/۳ ثانیه رخ داده است.

مقابله با خطاهای امپدانس بالا باید علاوه بر داشتن حساسیت مناسب، قادر به تمییز رخدادهای متداول شبکه توزیع و بارهای غیرخطی از خطا باشد.

۳-۱- شاخص آشکارسازی خطا

ویژگی‌های غیرخطی بودن و نامتقارن بودن خطای امپدانس بالا، باعث تغییر در شکل موج جریان شبکه می‌شود به گونه‌ای که شکل موج هر نیم سیکل آن با نیم سیکل قبل خود متفاوت است. در تئوری اطلاعات، آنتروپی متقاطع شاخصی معروف برای تعیین اختلاف دو توزیع احتمال است [۳۳]. در این مقاله از این شاخص که روشی در حوزه زمان است، برای کمّی کردن عدم تجانس ذکر شده حاصل از خطای امپدانس بالا در شکل موج دو نیم سیکل متوالی جریان پست توزیع استفاده می‌شود.

در این روش ابتدا از شکل موج جریان پست با فرکانس ۴/۸ kHz نمونه‌برداری شده و داده‌های یک سیکل از جریان به عنوان یک پنجره اطلاعات در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین هر پنجره اطلاعات شامل یک سیکل جریان در شبکه ۶۰ Hz، شامل ۸۰ نمونه است. در نتیجه بردار جریان در فاز زام به صورت زیر شکل می‌گیرد:

$$\mathbf{I_j} = \left[i_j(t_0 + T_S) \quad i_j(t_0 + 2T_S) \quad \dots \quad i_j(t_0 + KT_S)\right]^{\mathrm{T}} \qquad (۱)$$

که در آن T_S دوره تناوب نمونه برداری و K تعداد نمونه‌ها در یک سیکل می‌باشد. در گام بعد، پنجره داده فوق به دو زیر پنجره تقسیم شده تا بردارهای دو نیم سیکل متوالی بدست آیند. از آنجایی که هدف مقایسه داده‌های دو نیم سیکل با یکدیگر است، مقادیر قدر مطلق نمونه‌ها در این دو بردار قرار داده می‌شوند تا تفاوت علامت نمونه‌ها منجر به اختلاف شکل‌موج‌ها نشود:

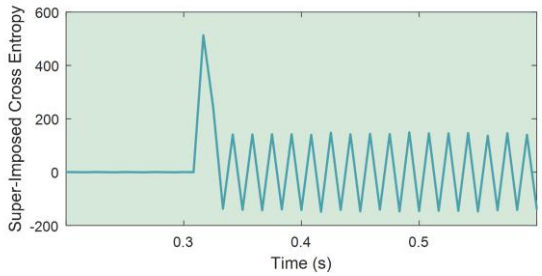
$$\mathbf{I_{1,j}} = \left[\left|i_j(t_0 + T_S)\right| \quad \dots \quad \left|i_j(t_0 + (K/2)T_S)\right|\right]^{\mathrm{T}} \qquad (۲)$$

$$\mathbf{I_{2,j}} = \left[\left|i_j(t_0 + (K/2 + 1)T_S)\right| \quad \dots \quad \left|i_j(t_0 + KT_S)\right|\right]^{\mathrm{T}} \qquad (۳)$$

که در آن $\mathbf{I_{1,j}}$ و $\mathbf{I_{2,j}}$ به ترتیب بردارهای جریان پست در نیم سیکل اول و دوم در فاز زام هستند.

در گام بعد تفاوت موجود در داده‌های دو بردار فوق با استفاده از مفهوم آنتروپی متقاطع [۳۳] محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{CE}_j\left(\mathbf{I_{1,j}} \square \mathbf{I_{2,j}}\right) = -\sum_{r=1}^{N} \mathbf{I_{1,j}}(r) \times \log \mathbf{I_{2,j}}(r) \qquad (۴)$$



شکل (۵): مؤلفه تحمیلی خطای سیگنال آنتروپی متقاطع. خطا در ۰/۳ ثانیه رخ داده است.

که در آن N تعداد نمونه‌های جریان در هر نیم سیکل است؛ یعنی $N = K/2$. برای محاسبه آنتروپی متقاطع، پنجره اطلاعات شامل یک سیکل نمونه‌های جریان به طور لغزان حرکت کرده که در هر گام به اندازه نیم سیکل T_h به سمت جلو حرکت می‌کند. در شرایط کار عادی شبکه، قدر مطلق شکل موج جریان در دو نیم سیکل متوالی مشابه یکدیگر است؛ در نتیجه $\mathbf{I_{1,j}} = \mathbf{I_{2,j}}$. در این حالت آنتروپی متقاطع محاسبه شده از رابطه (۴) در پنجره‌های داده‌ی متفاوت، یکسان است. اما زمانی که یک خطای امپدانس بالا رخ می‌دهد، ویژگی‌های غیرخطی بودن و نامتقارن بودن باعث متفاوت شدن نیم سیکل‌های مثبت و منفی شده و مقدار آنتروپی متقاطع نسبت به حالت کار عادی افزایش می‌یابد. شکل موج آنتروپی متقاطع برای یک خطای امپدانس بالای نمونه در شکل (۴) نشان داده شده است.

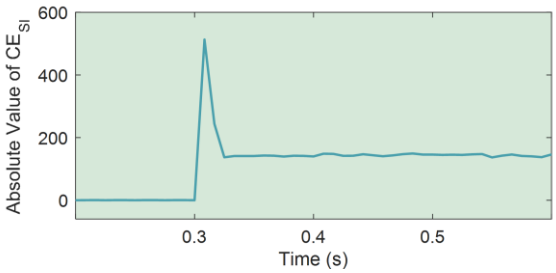
همانگونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، آنتروپی متقاطع در حالت کار عادی عددی ثابت ولی غیر صفر (۸۰۰۰۰) است و پس از وقوع خطا، مقدار آن افزایش (۸۰۷۰۰) می‌یابد. با وجود اینکه با تعریف یک مقدار آستانه می‌توان این دو حالت را از هم تشخیص داد، اما این کار قابلیت تعمیم الگوریتم پیشنهادی را برای شرایط کاری و یا شبکه‌های توزیع مختلف کاهش می‌دهد زیرا در این شرایط، باید مقادیر آستانه متفاوتی را لحاظ کرد. برای رفع این مشکل، در این مقاله از مفهوم مؤلفه تحمیلی خطا استفاده می‌شود. این مؤلفه وقتی ظاهر می‌شود که خطایی در شبکه رخ دهد. مؤلفه تحمیلی خطا ویژگی‌های خاص خطا را دربر داشته و مستقل از مؤلفه حالت کار عادی است [۳۴]. بر اساس تئوری جمع آثار، هر کمیت را می توان شامل دو مؤلفه در نظر گرفت: ۱) مؤلفه حالت کار عادی و ۲) مؤلفه تحمیلی خطا. شکل موج یک کمیت در حین خطا را می‌توان به صورت مجموع شکل موج آن کمیت در حالت کار عادی و شکل موج تحمیلی خطا در نظر گرفت. بنابراین مؤلفه تحمیلی خطای سیگنال آنتروپی متقاطع $\mathrm{CE_{SI}}$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{CE_{SI},}_j(kT_s) = \mathrm{CE_{F,}}_j(kT_s) - \mathrm{CE_{N,}}_j(kT_s) \qquad (۵)$$

که در آن $\mathrm{CE_F}$ و $\mathrm{CE_N}$ به ترتیب سیگنال آنتروپی متقاطع در حین خطا و در حالت کار عادی هستند. همچنین k گام نمونه‌برداری است. یکی از روش‌های متداول محاسبه $\mathrm{CE_{SI}}$ استفاده از فیلتر دلتا [۳۴] است که در آن نسخه فعلی سیگنال از نسخه تأخیر یافته آن کاسته می‌شود:

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.8.9]



شکل (۶): دامنه سیگنال مؤلفه تحمیلی خطای آنتروپی متقاطع. خطا در ۰/۳ ثانیه رخ داده است.

$$\mathrm{CE}_{\mathrm{SI},j}(kT_s) = \mathrm{CE}_j(kT_s) - \mathrm{CE}_j(kT_s - T_d) \qquad (۶)$$

که در آن T_d میزان تأخیر زمانی فیلتر دلتا است. مزیت استفاده از مؤلفه تحمیلی خطا این است که مستقل از شبکه تحت مطالعه، مقدار آن در حالت کار عادی برابر تقریباً برابر با صفر بوده در حالی که با وقوع اختلال در شبکه، مقدار آن غیر صفر می‌شود. این امر تعریف مقدار آستانه مناسب برای شبکه‌های مختلف را ساده‌تر می‌کند. شکل (۵) مؤلفه تحمیلی خطای محاسبه شده از سیگنال آنتروپی متقاطع شکل (۴) را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، مؤلفه تحمیلی خطا قبل از وقوع خطا در ۰/۳ s دارای مقدار ثابت صفر است در حالی که پس از وقوع خطا دارای مقداری غیر صفر می‌شود.

اما مشکل این مؤلفه در مورد خطای امپدانس بالا آن است که به دلیل تفاوت شکل موج نیم سیکل‌های حاصل از پنجره‌های داده مختلف، آنتروپی متقاطع پس از وقوع خطا دارای مقدار ثابتی نیست. این امر باعث می‌شود که مقدار مؤلفه تحمیلی خطا در حین خطا حول نقطه صفر نوسان کرده و دامنه آن مرتباً مثبت و منفی شود. این امر تشخیص وقوع خطا را برای رله دشوار می‌کند. برای رفع این مشکل، از قدر مطلق مؤلفه تحمیلی خطا استفاده می‌شود. شاخص آشکارسازی خطای امپدانس بالا به صورت بیشینه مقادیر قدر مطلق سیگنال $\mathrm{CE}_{\mathrm{SI}}$ بین سه فاز تعریف می‌شود:

$$\mathrm{HIFD} = \max\left(|\mathrm{CE}_{\mathrm{SI},a}|, |\mathrm{CE}_{\mathrm{SI},b}|, |\mathrm{CE}_{\mathrm{SI},c}|\right) \qquad (۷)$$

شکل (۶) شاخص HIFD را برای سیگنال شکل (۵) نشان می‌دهد. این شاخص به خوبی در حالت کار عادی دارای مقدار صفر بوده در حالی که پس از وقوع خطا، مقدار آن غیر صفر شده و غیر صفر باقی می‌ماند. بنابراین به آسانی می‌توان با استفاده از یک مقدار آستانه $\mathrm{HIFD}_{\mathrm{th}}$، وقوع خطا را از شرایط کار عادی تمییز داد.

۳-۲- تمییز خطای امپدانس بالا از دیگر رخدادهای معمول شبکه

یکی از چالش‌های مهم روش‌های آشکارسازی خطای امپدانس بالا این است که رخدادهای متداول شبکه توزیع همچون کلیدزنی بارها و بانک‌های خازنی گذراهای مشابهی در شکل موج جریان ایجاد می‌کنند که این امر ممکن است منجر به عملکرد اشتباه رله شود. اما تفاوت این رخدادها با خطای امپدانس بالا در مدت زمان تداوم این گذراها است؛ کلیدزنی رخدادی کوتاه مدت است و پس از مدت زمان اندکی، گذراها برطرف می‌شوند در حالی که خطای امپدانس بالا رخدادی دائمی است و تا زمانی که خطا برطرف نشود، معمولاً قوس آن برقرار می‌ماند. بنابراین می‌توان با تعریف یک مقدار آستانه برای مدت زمان تداوم گذراها در شکل موج جریان، از عملکرد اشتباه رله جلوگیری کرد. از طرف دیگر، هر چند بارهای غیرخطی باعث ایجاد اعوجاج دائمی در شکل موج جریان می‌شوند، اما این گذراها معمولاً در نیم سیکل‌های متوالی مشابه هستند؛ در نتیجه مقدار شاخص در حضور بارهای غیرخطی کوچک است.

بنابراین الگوریتم پیشنهادی تنها در صورتی وقوع خطای امپدانس بالا را تأیید می‌کند که هر دو شرط زیر برقرار باشند:

$$\begin{cases} \mathrm{HIFD} > \mathrm{HIFD}_{\mathrm{th}} \\ t_{\mathrm{event}} > t_{\mathrm{th}} \end{cases} \rightarrow \quad \mathrm{HIF} \qquad (۸)$$

که در آن t_{event} مدت زمان تداوم گذرا و t_{th} مقدار آستانه زمانی تشخیص خطای امپدانس بالا می‌باشند. مقادیر آستانه باید به دقت انتخاب شوند تا عملکرد الگوریتم پیشنهادی تحت تأثیر قرار نگیرد. مقادیر آستانه به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\begin{cases} \mathrm{HIFD}_{\mathrm{th}} = k_d \times \mathrm{HIFD}_{\mathrm{N}} \\ t_{\mathrm{th}} = k_t \times t_{\mathrm{N}} \end{cases} \qquad (۹)$$

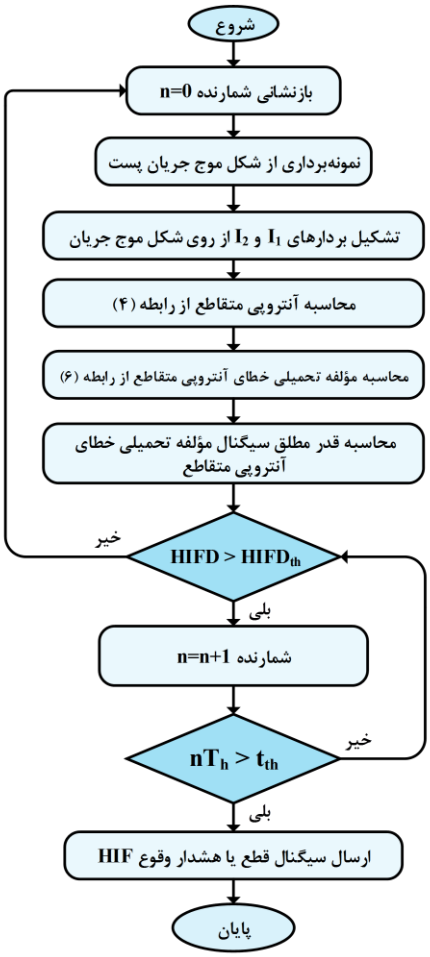
که در آن $\mathrm{HIFD}_{\mathrm{N}}$ و t_{N} به ترتیب مقادیر مؤلفه تحمیلی خطای آنتروپی متقاطع در حالت کار عادی و مدت زمان تداوم گذراها برای رخدادهای معمول شبکه هستند. از ضرایب k_d و k_t برای افزایش قابلیت اطمینان روش پیشنهادی در زمان وقوع رخدادهای پیش‌بینی نشده استفاده می‌شود.

۳-۳- روندنمای الگوریتم پیشنهادی

شکل (۷) روندنمای الگوریتم آشکارسازی خطای پیشنهادی را نشان می‌دهد. ابتدا با نمونه‌برداری از شکل موج جریان اندازه‌گیری شده در محل پست توزیع، بردار جریان شامل داده‌های یک سیکل تشکیل می‌شود. سپس با استفاده از مقادیر قدر مطلق این نمونه‌ها، بردارهای جریان دو نیم سیکل متوالی تشکیل شده و با استفاده از شاخص آنتروپی متقاطع میزان تشابه آنها تعیین می‌گردد. در گام بعدی، مؤلفه تحمیلی خطای سیگنال آنتروپی محاسبه شده و مقدار قدر مطلق آن استخراج می‌گردد. مقدار بیشینه این مقادیر بین سه فاز، شاخص آشکارسازی وقوع خطا خواهد بود. اگر مقدار شاخص آشکارسازی از مقدار آستانه بیشتر شود، تایمر الگوریتم شروع به کار کرده و مدت زمان تداوم شاخص پیشنهادی در بالای مقدار آستانه را محاسبه می‌نماید. اگر این مدت زمان از مقدار آستانه زمانی الگوریتم بیشتر شود، وقوع خطای امپدانس بالا تأیید شده و فرمان قطع یا هشدار ارسال می‌گردد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.8.9]



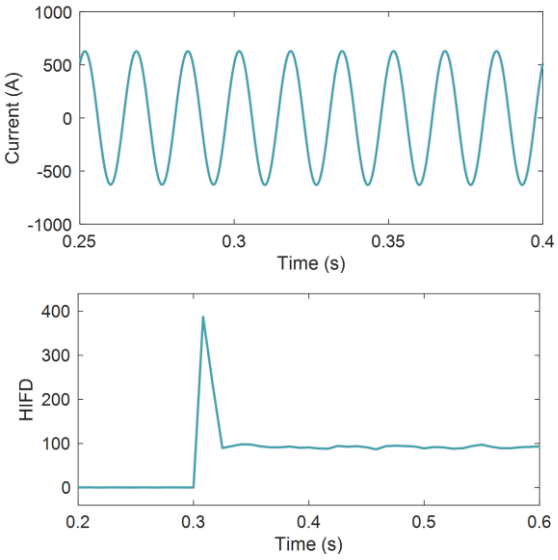
شکل (۷): روندنمای الگوریتم آشکارسازی خطای امپدانس بالای پیشنهادی

۴- نتایج مطالعات

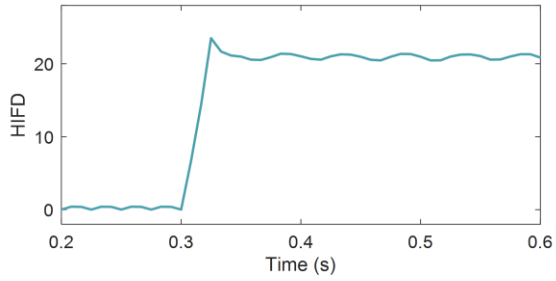
این بخش به بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شرایط مختلف وقوع خطا و رخدادهای متداول شبکه توزیع می‌پردازد. به این منظور شبکه توزیع ۱۳ باسه IEEE با استفاده از نرم افزار سیمولینک متلب شبیه‌سازی می‌شود. همانگونه که پیش از این بیان شد، طول پنجره داده برابر با یک سیکل در نظر گرفته می‌شود. همچنین تأخیر زمانی فیلتر دلتا نیم سیکل لحاظ می‌گردد. مقادیر $HIFD_N$ و t_N به ترتیب برابر با ۱۶ (به دلیل در نظر گرفتن بار غیرخطی) و ۶۰ ms می‌باشند و ضرایب k_d و k_t نیز به ترتیب برابر با ۱/۲۵ و ۱/۵ انتخاب می‌شوند. بنابراین مقادیر آستانه $HIFD_{th}$ و t_{th} به ترتیب برابر با ۲۰ و ۹۰ ms هستند.

۴-۱- مطالعه موردی اول: خطای امپدانس بالا

در ابتدا با استفاده از مدل ارائه شده در بخش دوم، یک خطای امپدانس بالا در فاز C و در گره ۶۳۳ به عنوان گره نزدیک به پست توزیع شبیه‌سازی می‌شود. این خطا در زمان ۰/۳ ثانیه رخ می‌دهد. نتایج مطالعات در شکل (۸) نشان داده شده است. عدم تغییر قابل



شکل (۸): جریان پست توزیع و شاخص آشکارسازی خطای پیشنهادی هنگام وقوع خطا در باس ۶۳۳



شکل (۹): شاخص پیشنهادی هنگام وقوع خطا در باس ۶۵۲

توجه در دامنه جریان پست توزیع در حین خطا مشهود است. اما در هنگام وقوع خطا، دامنه شاخص پیشنهادی به ۳۸۷/۲ افزایش یافته و از مقدار آستانه تجاوز می‌کند. همچنین این شاخص تا زمان رفع خطا، بالاتر از مقدار آستانه باقی می‌ماند. در نتیجه الگوریتم پیشنهادی این پدیده را به عنوان خطای امپدانس بالا تشخیص می‌دهد.

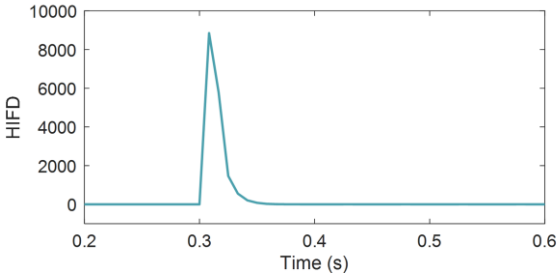
برای ارزیابی عملکرد شاخص پیشنهادی هنگام وقوع خطاهای دور از پست توزیع، یک خطای امپدانس بالا در فیدر تکفاز باس ۶۵۲ شبیه‌سازی می‌شود. شکل (۹) شاخص آشکارسازی خطای مبتنی بر آنتروپی متقاطع را نشان می‌دهد. با آنکه محل خطا از پست توزیع دور است، اما مقدار شاخص در قبل و در حین خطا کاملاً با هم متفاوت است. در نتیجه الگوریتم پیشنهادی قادر است این دو شرایط کاری را از یکدیگر تمییز دهد. همچنین با توجه به تداوم گذراها در حین خطا، الگوریتم پیشنهادی این رخداد را به عنوان یک خطای امپدانس بالا نشانه‌گذاری می‌کند.

۴-۲- مطالعه موردی دوم: کلیدزنی بار

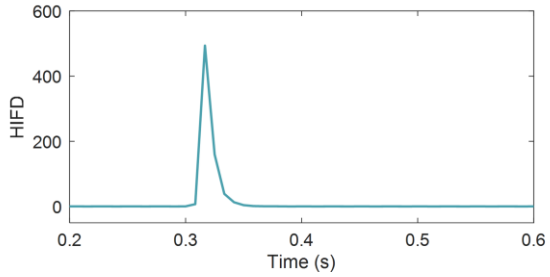
همانگونه که پیش از این اشاره شد، یک الگوریتم آشکارسازی خطای امپدانس بالای مناسب باید علاوه بر قابلیت تشخیص این نوع خطا، نباید در هنگام وقوع رخدادهای کلیدزنی معمول شبکه دچار عملکرد اشتباه شود. در این سناریو عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حین وقوع

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.8.9]



شکل (۱۰): شاخص پیشنهادی هنگام کلیدزنی بار در باس ۶۷۱



شکل (۱۱): شاخص پیشنهادی هنگام کلیدزنی خازن در باس ۶۱۱

کلیدزنی بار که متداول‌ترین رخداد معمول در شبکه‌های توزیع است، ارزیابی می‌گردد. بدین منظور بزرگترین بار شبکه یعنی بار سه فاز متصل به باس ۶۷۱ در لحظه ۰/۳ s وصل می‌شود. نتیجه این مطالعه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در لحظات اول پس از وقوع خطا، $\mathbf{I_1} \neq \mathbf{I_2}$؛ در نتیجه مقدار شاخص آشکارسازی خطا به مقدار قابل توجه ۸۸۵۰ افزایش می‌یابد. اما پس از گذشت مدت زمان کوتاهی، این شاخص به زیر مقدار آستانه بر می‌گردد زیرا شبکه به حالت پایدار برگشته و میزان تشابه نیم سیکل‌های متوالی جریان مجدداً زیاد می‌شود. بنابراین الگوریتم پیشنهادی این رخداد را به عنوان خطای امپدانس بالا تشخیص نمی‌دهد.

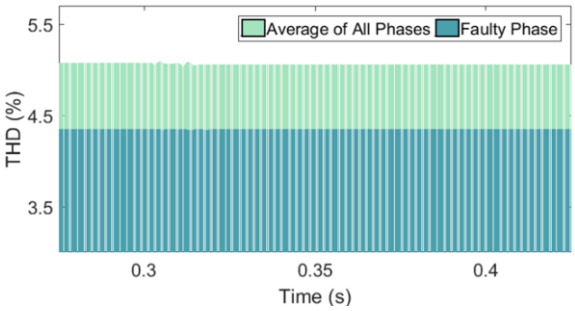
۴-۳- مطالعه موردی سوم: کلیدزنی بانک خازنی

هدف این سناریو ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی هنگام کلیدزنی بانک‌های خازنی است که از جمله تجهیزات متداول شبکه‌های توزیع بوده و گذراهای مشابه با خطای امپدانس بالا ایجاد می‌کنند. به این منظور خازن تکفاز (فاز C) نصب شده در باس ۶۱۱ در لحظه ۰/۳ s از شبکه جدا می‌شود. شاخص آشکارسازی پیشنهادی در این حالت در شکل (۱۱) نشان داده شده است. علیرغم افزایش شاخص آشکارسازی به ۴۹۳/۷، مدت زمان تداوم شاخص در بالای مقدار آستانه، در حدود ۳۰ ms است که از مقدار t_{th} کمتر است. در نتیجه این رخداد به عنوان خطای امپدانس بالا نشانه‌گذاری نمی‌شود. لازم به ذکر است که الگوریتم پیشنهادی در زمان کلیدزنی فیدر و منابع پراکنده و وقوع کمبود و بیشبود ولتاژ نیز به اشتباه عمل نمی‌کند که به دلیل محدودیت تعداد صفحات از ارائه نتایج آن اجتناب می‌شود.

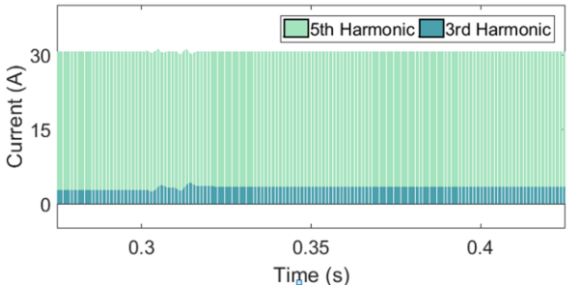
۴-۴- مقایسه با کارهای گذشته

در این قسمت عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های آشکارسازی خطای مبتنی بر تحلیل طیف فرکانسی و محاسبه انرژی ضریب موجک مقایسه می‌گردد. بدین منظور عملکرد هر روش در دو حالت حضور بارهای غیرخطی و وقوع خطای امپدانس بالا بررسی می‌شود. بار غیرخطی یک بار DC با توان ۶۵۰ kW و ولتاژ ۳/۶ kV است که به واسطه یک مبدل ۶ پالس و یک ترانس به باس ۶۳۲ متصل می‌شود [۵]. خطای امپدانس بالا نیز در همین باس و در فاز a شبیه‌سازی می‌گردد. مبنای عملکرد الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۵] این است که در هنگام وقوع خطای امپدانس بالا، THD جریان فاز معیوب از متوسط THD جریان سه فاز بیشتر است. شکل (۱۲) عملکرد این الگوریتم را در حضور بار غیرخطی نشان می‌دهد. همانگونه که این شکل نشان می‌دهد، THD متوسط سه فاز چه قبل از خطا و چه بعد از خطا از THD فاز معیوب بزرگتر است که نتیجه آن عدم توانایی این روش در آشکارسازی خطای امپدانس بالا در حضور بارهای غیرخطی می‌باشد. روش پیشنهادی در مرجع [۱۱] بر این اساس عمل می‌کند که در حین خطای امپدانس بالا، هارمونیک سوم جریان بزرگتر از هارمونیک پنجم جریان است. اما اندازه‌گیری هارمونیک‌های سوم و پنجم جریان نشان داده شده در شکل (۱۳) نشان می‌دهد که در حضور بار غیر خطی شبیه‌سازی شده، دامنه هارمونیک سوم چه در قبل و چه در بعد از وقوع خطا در حدود ۳ A است در حالی که دامنه هارمونیک پنجم در حدود ۳۰ A می‌باشد. در نتیجه روش مرجع [۱۱] قادر به تشخیص صحیح خطای امپدانس بالا در حضور بار غیرخطی نمی‌باشد. شکل (۱۴) عملکرد روش ارائه شده در مرجع [۲۷] را نشان می‌دهد که بر اساس محاسبه انرژی ضریب موجک کار می‌کند. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است کلیدزنی بار غیرخطی و وقوع خطای امپدانس بالا باعث می‌شوند که انرژی ضریب موجک در هر دو حالت پس از وقوع خطا افزایش یافته اما هیچکدام به مقدار پیش از خطا بر نمی‌گردند؛ در نتیجه تمییز آنها از یکدیگر مشکل است. در نهایت شکل (۱۵) عملکرد روش پیشنهادی را هنگام وقوع خطای امپدانس بالا در حضور بار غیرخطی نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، مقدار شاخص آشکارسازی خطا در حضور بار غیرخطی پیش از خطا کمتر از مقدار آستانه است اما پس از وقوع خطا تا حدود ۵۳۰ افزایش یافته و از مقدار آستانه تجاوز می‌کند. همچنین شاخص پیشنهادی تا زمان رفع خطا بیش از مقدار آستانه HIFD_{th} باقی می‌ماند. بنابراین روش پیشنهادی قادر است در حضور بارهای غیرخطی نیز عملکرد مناسبی از خود نشان دهد.

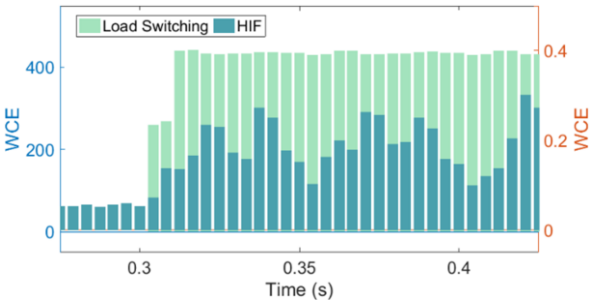
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.8.9]



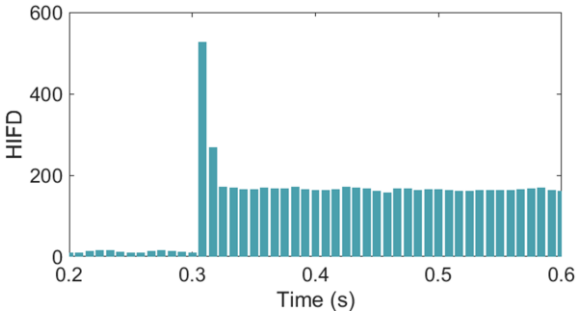
شکل (۱۲): عملکرد روش مبتنی بر THD جریان هنگام وقوع خطای امپدانس بالا در باس ۶۳۲ در حضور بار غیرخطی



شکل (۱۳): عملکرد روش مبتنی بر هارمونیک‌های سوم و پنجم جریان هنگام وقوع خطای امپدانس بالا در باس ۶۳۲ در حضور بار غیرخطی



شکل (۱۴): عملکرد روش مبتنی بر انرژی ضریب موجک هنگام وقوع خطای امپدانس بالا و کلیدزنی بار غیرخطی در باس ۶۳۲



شکل (۱۵): عملکرد الگوریتم پیشنهادی هنگام وقوع خطای امپدانس بالا در باس ۶۳۲ در حضور بار غیرخطی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش مبتنی بر حوزه زمان برای آشکارسازی خطای امپدانس بالا ارائه شد که بر اساس پایش شکل موج جریان پست کار می‌کند. در این روش با استفاده از مفهوم آنتروپی متقاطع، میزان عدم تشابه دو نیم سیکل متوالی جریان پست حاصل از دو ویژگی عدم تقارن و غیرخطی بودن شکل موج جریان خطای امپدانس بالا کمّی می‌شود. برای تسهیل پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در شرایط کاری گوناگون، مقدار قدر مطلق مؤلفه تحمیلی خطای سیگنال آنتروپی متقاطع به عنوان شاخص آشکارسازی خطا محاسبه می‌گردد. همچنین برای تمییز خطای امپدانس بالا از رخدادهای کلیدزنی متداول شبکه توزیع، مدت زمان تداوم گذراهای حاصل از رخداد نیز به عنوان قید الگوریتم لحاظ شده است. مزیت روش پیشنهادی این است که نیازی به داده‌های آموزشی و یا محاسبات مؤلفه‌های هارمونیکی و متقارن نداشته و در حضور بارهای غیرخطی نیز به خوبی کار می‌کند. نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در سیستم تست ۱۳ باسه IEEE نشان داد که روش مبتنی بر تحلیل شکل موج حاصل از خطای امپدانس بالا منجر به نتایج بهتری در مقایسه با روش های مبتنی بر تحلیل مؤلفه‌های هارمونیکی و یا انرژی ضریب موجک می‌شود.

مراجع

[1] Hooshyar, A., Iravani, R., "*Microgrid Protection*," *Proceedings of the IEEE*, 105 (7), pp. 1332-1353, 2017.

[2] Nunes, J.U.N., Bretas, A.S., Bretas, N.G., Herrera-Orozco, A.R., Iurinic, L.U., "*Distribution systems high impedance fault location: A spectral domain model considering parametric error processing*," Int J Elec Power, 109, pp. 227-241, 2019.

[3] Gautam, S., Brahma, S.M., "*Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology*," IEEE Trans Power Syst, 28 (2), pp. 1226–1234, 2018.

[4] Chakraborty, S., Das, S., "*Application of smart meters in high impedance fault detection on distribution systems*," IEEE Trans Smart Grid, 10 (3), pp. 3465-3473, 2019.

[5] Sarwagya, K., De, S., Nayak, P.K., "*High-impedance fault detection in electrical power distribution systems using moving sum approach*," IET Sci Meas Technol, 12 (1), pp. 1–8, 2018.

[6] Ghaderi, A., Herbert L. Ginn III, H.L., Mohammadpour, H.A., "*High impedance fault detection: A review*," Electr. Pow. Syst. Res., 143, pp. 376-388, 2017.

[7] Soheili, A., Sadeh, J., "*Evidential reasoning based approach to high impedance fault detection in power distribution systems*," IET Gener Transm Dis, 11(5), pp. 1325–1336, 2017.

[8] Lima, E.M., dos Santos.Junqueira, C.M., Brito, N.S.D., de Souza, B.A., de Almeida Coelho, R., de Medeiros, H.G.M.S., "*High impedance fault detection method based on the short-time fourier transform*," IET Gener Transm Dis, 12 (11), pp. 2577–2584, 2018.

[9] Fani, B., Bisheh, H., Sadeghkhani, I., "*Protection coordination scheme for distribution networks with high penetration of photovoltaic generators*," IET Gener Transm Dis 12 (8), pp.1802–1814, 2018.

[10] Lien, K.Y., Chen, S.L., Liao, C.J., Guo, T.Y., Lin, T.M., Shen, J.S., "*Energy variance criterion and threshold tuning scheme for high impedance fault detection*," IEEE Trans Power Del, 14, (3), pp. 810–817, 1999.

[11] Yu, D.C., Khan, S.H., "*An adaptive high and low impedance fault detection method*," IEEE Trans Power Del, 9, (4), pp. 1812–1821, 1994.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.8.9]

[12] Russell, B.D., "*Detection of arcing faults on distribution feeders*," Texas A&M University, EPRI Report EL-2757, 1982.
[13] Hughes Aircraft Company, Research Laboratories, I. Lee, "*High impedance fault detection using third harmonic current*," Electric Power Research Institute EPRI EL-2430, 1982.
[14] Aucoin, M., Russell, B.D., "*Detection of distribution high impedance faults using burst noise signals near 60 Hz*," IEEE Trans Power Del, 2, (2), pp. 342–348, 1987.
[15] Torres, V., Guardado, J.L., Ruiz, H.F., Maximov, S., "*Modeling and detection of high impedance faults*," Int J Elec Power, 61, pp. 163–172, 2014.
[16] Kavi, M., Mishra, Y., Vilathgamuwa, M.D., "*High-impedance fault detection and classification in power system distribution networks using morphological fault detector algorithm*," IET Gener Transm Dis, 12, (15), pp. 3699–3710, 2018.
[17] Ghaderi, A., Ginn, H.L., Mohammadpour, H.A., "*High impedance fault detection: A review*," Electr Pow Syst Res, 143, pp. 376–388, 2017.
[18] Faridnia, N., Samet, H., Doostani.Dezfuli, B., "*A new approach to high impedance fault detection based on correlation functions*," In: Artificial Intelligence Applications and Innovations. (Berlin), pp. 453–462, 2012.
[19] Sarlak, M., Shahrtash, S.M., "*High-impedance faulted branch identification using magnetic-field signature analysis*," IEEE Trans Power Del, 28, (1), pp. 67– 74, 2013.
[20] Mamishev, A.V., Russell, B.D., Benner, C.L., "*Analysis of high impedance faults using fractal techniques*," In: Proceedings of Power Industry Computer Applications Conference, pp. 401–406, 1995.
[21] Sortomme, E., Venkata, S.S., Mitra, J., "*Microgrid protection using communication-assisted digital relays*," IEEE Trans Power Del, 25, (4), pp. 2789–2796, 2010.
[22] Sheng, Y., Rovnyak, S.M., "*Decision tree-based methodology for high impedance fault detection*," IEEE Trans Power Del, 19, (2), pp. 533–536, 2004.
[23] Michalik, M., Lukowicz, M., Rebizant, W., Lee, S., Kang, S., "*New ANN-based algorithms for detecting HIFs in multigrounded MV networks*," IEEE Trans Power Del, 23, (1), pp. 58–66, 2008.
[24] Etemadi, A.H., Sanaye Pasand, M., "*High-impedance fault detection using multiresolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system*," IET Gener Transm Dis, 2, (1), pp. 110–118, 2008.
[25] Samantaray, S.R., Dash, P.K., "*High impedance fault detection in distribution feeders using extended kalman filter and support vector machine*," Eur T Electr Power, 20, (3), pp. 382–393, 2010.
[26] Sedighi, A.R., Haghifam, M.R., Malik, O.P., "*Soft computing applications in high impedance fault detection in distribution systems*," Electr Pow Syst Res, 76, (1), pp. 136–144, 2005.
[27] Costa, F.B., Souza, B.A., Brito, N.S.D., Silva, J.A.C.B., Santos, W.C., "*Real-time detection of transients induced by high-impedance faults based on the boundary wavelet transform*," IEEE Trans Ind Applicat, 51, (6), pp. 5312–5323, 2015.
[28] Elkalashy, N.I., Lehtonen, M., Darwish, H.A., Taalab, A.I., Izzularab, M.A., "*DWT-based detection and transient power direction-based location of high impedance faults due to leaning trees in unearthed MV networks*," IEEE Trans Power Del, 23, (1), pp. 94–101, 2008.
[29] Elkalashy, N.I., Lehtonen, M., Darwish, H.A., Izzularab, M.A., Taalab, A.I., "*Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks*," IEEE T Dielect El In, 14, (2), pp. 375–383, 2007.
[30] AsghariGovar, S., Pourghasem, P., Seyedi, H., "*High impedance fault protection scheme for smart grids based on WPT and ELM considering evolving and cross-country faults*," Int J Elec Power, 107, pp. 412-421, 2019.
[31] "*Distribution test feeders*". IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee. [Online]. Available: http://sites.ieee.org/pes-testfeeders/resources, 2000.
[32] Soheili, A., Sadeh, J., Bakhshi, R., "*Modified FFT based high impedance fault detection technique considering distribution non-linear loads: simulation and experimental data analysis*," Int J Elec Power, 94, pp. 124–140, 2018.
[33] M. Moher and T. A. Gulliver, "*Cross-entropy and iterative decoding*," IEEE T Inform Theory, 44 (7), pp. 3097-3104, 1998.
[34] Zamani, M.A., Yazdani, A., Sidhu, T.S., "*A communication-assisted protection strategy for inverter-based medium-voltage microgrids*," IEEE Trans Smart Grid, 3 (4), pp. 2088–2099, 2012.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.8.9]