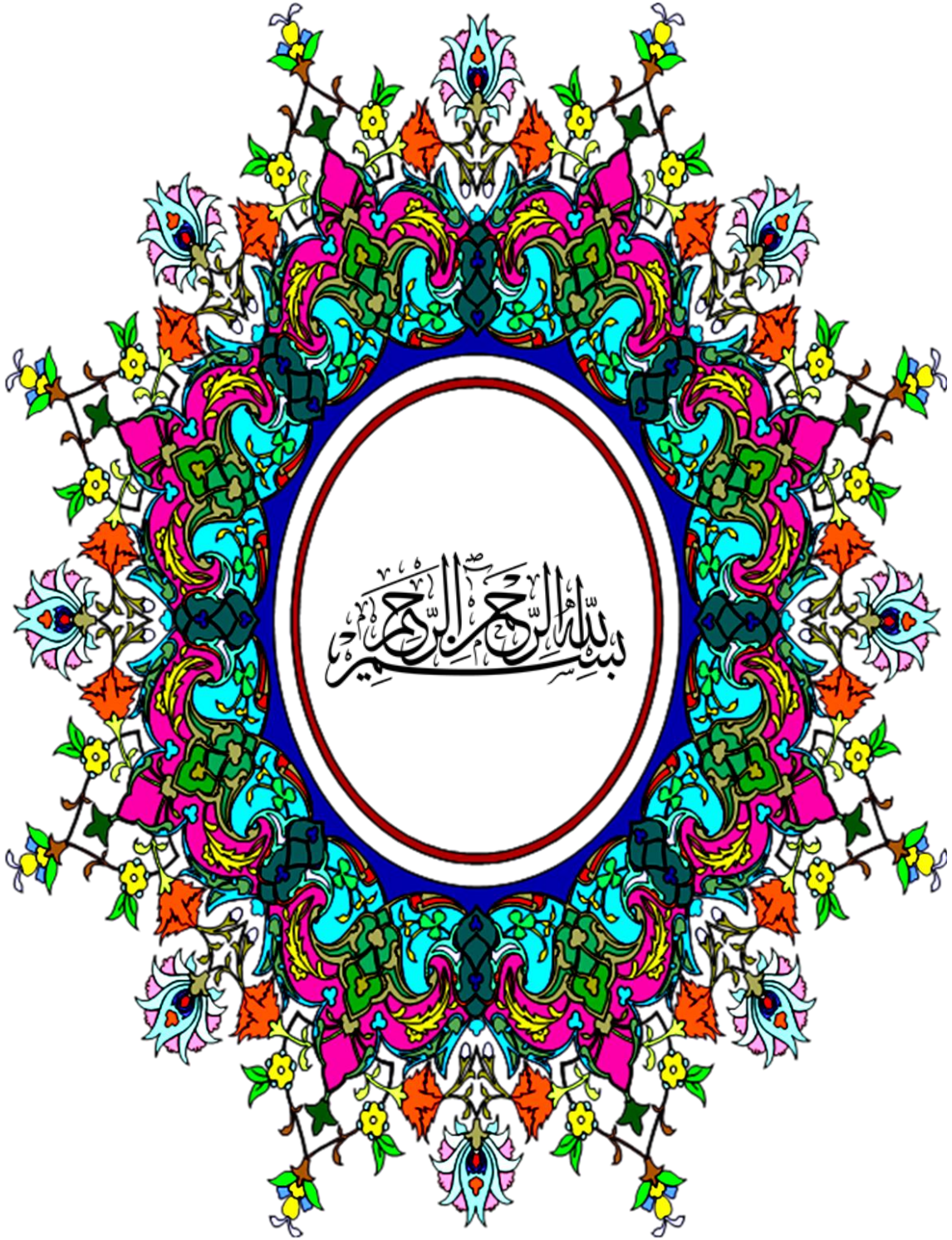






دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق

رشته مهندسی برق گرایش سیستم‌های قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

تشخیص خطای امپدانس بالا در سیستم توزیع با استفاده از روش

جداسازی انرژی زمان گسسته

نگارنده

سید علیرضا علائی

استاد راهنما

دکتر یاسر دامچی

آذر ۱۴۰۰

تقدیم به

خنده‌های شیرین پدر و مادرم که تمام سختی‌ها با لبخند آن‌ها به آسانی تبدیل می‌شوند
و برادران عزیز و مهربانم که در تمامی مراحل زندگی، همواره پشتیبان و همراه من بوده‌اند

سپاسگزاری از

به پاس تعبیر غنیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریادس است و سرگردانی و ترس در پناشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

و با پاس از سه وجود مقدس

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم...

موباشان سپید شد تا ما رو سفید شویم...

و عاشقانه سوختند تا که ما بخش وجود ما و رو شکر را همان باشند...

پدران... مادران... استادان...

و اینک جای شکر دارد از زحمات فراوان جناب آقای دکتر یاسر دامپی که در این فراز و نشیب های تحصیلی همراه و هم گام دانشجویان بودند

و با دلسوزی فراوان به یاری آنان پرداخته و با علم فراوان خود، بی دریغ در آموزش دانشجویان زحمت کشیدند

و همین طور نهایت شکر از اساتید بزرگوار جناب آقای دکتر سید میثم سید بزرگ و جناب آقای دکتر محسن امیلی که زحمت داوری این پایان نامه را کشیدند و همچنین

جناب آقای دکتر محبتی شویابی به عنوان نماینده تحصیلات تکمیلی و از تمامی دوستان و زحماتشان در امور آموزشی و رفاهی دانشگاه صنعتی شاهرود را دارم و از

خداوند منان بهترین ها را برای این عزیزان آرزو مندم تا شاید جبران قطره ای از زحمات این بزرگواران باشد

و نیز با شکر از خانواده عزیز خود که در این سال ها همچون کوه، استوار از بنده حقیر حمایت کرده اند و از خداوند مهربان بهترین ها را برایشان آرزو مندم

"أَلَا بِذِكْرِ اللَّهِ تَطْمَئِنُّ الْقُلُوبُ"

"هانا ما یاد خدا دل ها آرام می گیرد"

با شکر

سید علیرضا علایی

تعهدنامه

این جانب سید علیرضا علایی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق دانشکده برق دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع تشخیص خطای امپدانس بالا در سیستم توزیع با استفاده از روش جداسازی انرژی زمان گسسته تحت راهنمایی دکتر یاسر دامچی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام **دانشگاه صنعتی شاهرود** و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

خطاهای امپدانس بالا از آن دسته اغتشاش‌هایی هستند که به علت جریان خطای بسیار کم، توسط رله‌های اضافه جریان متداول تشخیص داده نمی‌شوند. این نوع خطا هنگامی اتفاق می‌افتد که هادی برق‌دار پاره شود و با سطح امپدانس بالایی مثل زمین، آسفالت، چمن، شن و شاخه‌ی درختان تماس پیدا کند. چنین خطاهایی ممکن است منجر به اتفاقات ناخوشایندی مثل جرقه و آتش‌سوزی، خطرات جانی و صدمه به تجهیزات شود. روش‌های مختلفی به منظور تشخیص خطای امپدانس بالا از ورود بانک خازنی و ورود بار غیرخطی در شبکه توزیع ارائه شده است که لزوماً به راحتی قابل اجرا نیستند یا نمی‌توانند عملکرد مناسب را در همه سناریوها تضمین کنند. در کنار تشخیص خطای امپدانس بالا، تشخیص خطای امپدانس پایین نیز از اهمیت بالایی در شبکه برخوردار است. در این پایان‌نامه یک روش جدید مبتنی بر الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته برای تشخیص خطای امپدانس بالا ارائه شده است. روش پیشنهادی دارای دو بخش کلی است که بخش اول شرایط عادی مثل کلیدزنی بار خطی، خروج بانک خازنی و خروج بار غیرخطی را از شرایط غیرعادی تشخیص می‌دهد. بخش دوم وظیفه‌ی تشخیص خطاهای امپدانس بالا و امپدانس پایین از شرایط غیرعادی مثل ورود بانک خازنی و ورود بار غیرخطی را بر عهده دارد. سرعت بالای تشخیص (۲ الی ۴ میلی‌ثانیه)، پیاده‌سازی ساده و بار محاسباتی کم؛ پیاده‌سازی روش پیشنهادی را به صورت زمان واقعی امکان‌پذیر می‌کند. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، انواع اغتشاشات مشابه در شرایط نویزی و با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان در تشخیص خطای امپدانس پایین در نرم‌افزار EMTP-Rv شبیه‌سازی و در نرم‌افزار MATLAB پردازش می‌شوند. نتایج به دست آمده، حاکی از کارایی مطلوب روش پیشنهادی در تشخیص خطای امپدانس بالا و پایین از سایر اغتشاشات، حتی در شرایط نویزی و همچنین تشخیص خطای امپدانس پایین با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان می‌باشد.

کلمات کلیدی: شبکه توزیع، خطای امپدانس بالا، خطای امپدانس پایین، الگوریتم جداسازی انرژی

زمان-گسسته، بانک خازنی، بار غیرخطی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

...

فهرست مطالب

فصل ۱- پیشگفتار.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- بیان مسئله.....	۳
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۵
۴-۱- روش تحقیق.....	۶
۵-۱- ساختار پایان نامه.....	۶
فصل ۲- انواع اغتشاش‌های شبکه توزیع و مفاهیم مرتبط با آن‌ها.....	۹
۱-۲- مقدمه.....	۱۰
۲-۲- خطای امپدانس بالا.....	۱۰
۳-۲- کلیدزنی بار غیرخطی.....	۲۰
۴-۲- کلیدزنی بانک خازنی.....	۲۱
۵-۲- خطای امپدانس پایین.....	۲۲
فصل ۳- مروری بر ادبیات موضوع.....	۲۳
۱-۳- مقدمه.....	۲۴
۲-۳- روش مکانیکی.....	۲۴
۳-۳- روش‌های الکتریکی.....	۲۴
فصل ۴- روش پیشنهادی.....	۳۷
۱-۴- مقدمه.....	۳۸
۲-۴- الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته.....	۳۸
۳-۴- روش پیشنهادی برای تشخیص خطاهای امپدانس بالا و پایین و سایر اغتشاشات.....	۴۲
۴-۴- بررسی موردی روش پیشنهادی در تشخیص اغتشاشات.....	۴۵
فصل ۵- شبیه‌سازی و نتایج.....	۵۱
۱-۵- مقدمه.....	۵۲
۲-۵- مدل خطای امپدانس بالا.....	۵۲
۳-۵- شبکه توزیع استاندارد IEEE 13-Node.....	۵۴
۴-۵- شبکه توزیع استاندارد IEEE 34-Node.....	۵۹
۵-۵- فیدر پالاش.....	۶۲
۶-۵- مقایسه‌ی عملکرد روش پیشنهادی با سایر روش‌ها در تشخیص خطای امپدانس بالا.....	۶۴

فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....	۶۴
۶-۱- جمع‌بندی	۶۶
۶-۲- نتیجه‌گیری	۶۶
۶-۳- پیشنهادها	۶۸
مراجع.....	۶۹

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲): وقوع خطای امپدانس بالا در اثر برخورد سیم هادی به درخت ۱۱
- شکل (۲-۲): جریان HIF به ازای سطوح مختلف ۱۱
- شکل (۳-۲): نمونه‌ای از جریان خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده ۱۲
- شکل (۴-۲): نمونه‌ای از جریان خطای امپدانس بالا واقعی ۱۲
- شکل (۵-۲): وقوع HIF در سطح چمن ۱۳
- شکل (۶-۲): مشخصه‌ی ولتاژ-جریان HIF ۱۴
- شکل (۷-۲): مدل مداری HIF بر اساس مدل امانوئل ۱۵
- شکل (۸-۲): مدل مداری HIF ۱۶
- شکل (۹-۲): مدل HIF مبتنی بر باز جرقه ۱۶
- شکل (۱۰-۲): مدل مداری HIF ۱۷
- شکل (۱۱-۲): مدل مداری HIF ۱۸
- شکل (۱۲-۲): مدل مداری HIF ۱۸
- شکل (۱۳-۲): مدل مداری HIF ۱۹
- شکل (۱۴-۲): مدل مداری HIF مبتنی بر مدل امانوئل ۱۹
- شکل (۱۵-۲): نمونه‌ای از جریان بار غیرخطی ۲۰
- شکل (۱۶-۲): نمونه‌ای از جریان کلیدزنی بانک خازنی ۲۱
- شکل (۱۷-۲): نمونه‌ای از جریان خطای اتصال کوتاه تکفاز ۲۲
- شکل (۱-۳): مدار معادل روش پیشنهادی تناسب رله‌ای ۲۵
- شکل (۲-۳): رله نسبت زمین ۲۶
- شکل (۱-۴): روندنمای روش پیشنهادی برای تشخیص خطاهای امپدانس بالا و امپدانس پایین ۴۵
- شکل (۲-۴): عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایط کلیدزنی بار خطی، (الف) سیگنال جریان، (ب) معیار تشخیص، (ج) سیگنال پیکاپ، (د) نوع اغتشاش، (ه) سیگنال بلاک، (و) دستور قطع ۴۶
- شکل (۳-۴): عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایط وقوع خطای امپدانس پایین، (الف) سیگنال جریان، (ب) معیار تشخیص، (ج) سیگنال پیکاپ، (د) نوع اغتشاش، (ه) سیگنال بلاک، (و) دستور قطع ۴۷
- شکل (۴-۴): عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایط ورود بانک خازنی، (الف) سیگنال جریان، (ب) معیار تشخیص، (ج) سیگنال پیکاپ، (د) نوع اغتشاش، (ه) سیگنال بلاک، (و) دستور قطع ۴۸
- شکل (۵-۴): عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایط وقوع خطای امپدانس بالا، (الف) سیگنال جریان، (ب) معیار تشخیص، (ج) سیگنال پیکاپ، (د) نوع اغتشاش، (ه) سیگنال بلاک، (و) دستور قطع ۴۹
- شکل (۶-۴): عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایط کلیدزنی ورود بار غیرخطی، (الف) سیگنال جریان، (ب) معیار تشخیص، (ج) سیگنال پیکاپ، (د) نوع اغتشاش، (ه) سیگنال بلاک، (و) دستور قطع ۵۰

- شکل (۱-۵): مدل HIF شبیه‌سازی شده ۵۳
- شکل (۲-۵): نمودار تک‌خطی شبکه توزیع استاندارد IEEE 13-Node ۵۴
- شکل (۳-۵): عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص HIF برای سطوح مختلف، (الف) سطح شن و ماسه، (ب) دستور قطع، (ج) سطح چمن، (د) دستور قطع، (ه) سطح خاک و بتن، (و) دستور قطع، (ز) سطح بتن مسلح، (ح) دستور قطع ۵۶
- شکل (۴-۵): جریان خطای امپدانس بالا در شرایط نویز ۲۰ دسی‌بل، (الف) سیگنال جریان، (ب) دستور قطع ۵۷
- شکل (۵-۵): نمودار تک‌خطی شبکه توزیع استاندارد IEEE 34-Node ۶۰
- شکل (۶-۵): نمودار تک‌خطی فیدر پالاش ۶۲
- شکل (۷-۵): عملکرد روش پیشنهادی برای جریان HIF واقعی در سطوح مختلف، (الف) سطح آسفالت با ضخامت ۲۰، (ج) سطح شن و ماسه با ضخامت ۱۰، (ه) سطح بتن با ضخامت ۱۰، (ز) سطح بتن مسلح با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر ۶۳

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۵): پارامترهای مدل HIF	۵۳
جدول (۲-۵): شرایط شبیه‌سازی انواع اغتشاشات ممکن برای شبکه IEEE 13-Node	۵۵
جدول (۳-۵): عملکرد روش پیشنهادی در شبکه IEEE 13-Node در شرایط غیرعادی	۵۸
جدول (۴-۵): ماتریس درهم‌ریختگی عملکرد روش پیشنهادی در شبکه IEEE 13-Node در شرایط غیرعادی	۵۹
جدول (۵-۵): شرایط شبیه‌سازی انواع اغتشاشات برای شبکه IEEE 34-Node	۶۰
جدول (۶-۵): عملکرد روش پیشنهادی در شبکه IEEE 34-Node در شرایط غیرعادی	۶۱
جدول (۷-۵): ماتریس درهم‌ریختگی عملکرد روش پیشنهادی در شبکه IEEE 34-Node در شرایط غیرعادی	۶۱
جدول (۹-۵): مقایسه‌ی عملکرد روش پیشنهادی با سایر روش‌ها در تشخیص HIF	۶۴

فصل اول

پیشگفتار

شبکه‌های توزیع^۱ به منظور پاسخگویی به نیاز مشترکین، روز به روز در حال گسترش می‌باشند. این امر سبب می‌شود که حفظ قابلیت اطمینان^۲ شبکه در سطح مطلوب، امری ضروری باشد چرا که پایین بودن قابلیت اطمینان، می‌تواند باعث تحمیل خسارات سنگین به مصرف‌کنندگان مختلف از جمله مصرف‌کنندگان خانگی، تجاری و صنعتی شود. سیستم توزیع، روزانه با انواع مختلفی از خطاهای امپدانس بالا^۳ (HIF) و امپدانس پایین^۴ (LIF) مواجه است که بروز این خطاها می‌تواند باعث کاهش قابلیت اطمینان شبکه گردد؛ بنابراین این خطاها در کمترین زمان باید رفع شوند. خطای امپدانس بالا، به دلیل داشتن مقاومت بالا و دامنه‌ی کم جریان خطا، توانایی تحریک رله‌های اضافه جریان^۵ را ندارد و به همین دلیل رله‌های اضافه جریان، در تشخیص HIF ناتوان می‌باشند. وقوع حوادثی مثل آتش‌سوزی، برق‌گرفتگی، تلفات توان و در بعضی موارد خاموشی‌های سراسری^۶، از پیامدهای ناتوانی در تشخیص HIF می‌باشند. از جمله این حوادث می‌توان به خاموشی رخ داده در ۱۴ آگوست ۲۰۰۳ اشاره کرد که برخورد هادی خط ۳۴۵ کیلوولت استوارت-آتلانتا^۷ منجر به خاموشی سراسری در ناحیه شمال شرق کشور آمریکا شد [۱]. از مشکلات تشخیص HIF، بروز اغتشاشات مشابه مثل ورود بانک خازنی و بار غیرخطی می‌باشد که این اغتشاشات ویژگی‌های متنوعی را در شرایط مختلف از خود نشان می‌دهند و در بعضی موارد کاملاً شبیه به HIF رفتار می‌کنند. تاکنون روش‌های مختلفی جهت تشخیص این نوع خطا ارائه شده است که با بررسی دقیق‌تر آن‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که بعضاً سرعت مناسبی ندارند و یا اینکه در تشخیص اغتشاشات مشابه ناتوان می‌باشند. از این‌رو، در این پایان‌نامه روش جدیدی مبتنی بر الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته^۸ (DESA) جهت تشخیص خطای امپدانس بالا ارائه شده است. این الگوریتم علاوه

^۱ Distribution Networks

^۲ Reliability

^۳ High Impedance Fault

^۴ Low Impedance Fault

^۵ Over-current Relay

^۶ Blackouts

^۷ Stewart-Atlanta

^۸ Discrete Energy Separation Algorithm

بر سرعت و دقت تشخیص بالا، توانایی تشخیص اغتشاشات مشابه با و بدون نویز را دارد. روش پیشنهادی می‌تواند همچنین خطای امپدانس پایین را با و بدون اشباع ترانسفورماتور جریان^۱ (CT) تشخیص دهد.

۱-۲- بیان مسئله

حفاظت در برابر خطای امپدانس بالا، یکی از مهم‌ترین چالش‌های شبکه‌های توزیع برق است. HIF معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که هادی برق دار پاره شده و با سطح زمین تماس پیدا کند و یا اینکه هادی به وسیله‌ی شاخه‌ی درختان یا هر جسم دیگری که مقاومت زیادی دارد، به زمین متصل شود؛ بنابراین، سطح جریان خطای امپدانس بالا، بسیار کم و تقریباً نزدیک به جریان بار است، به همین دلیل توسط رله‌های اضافه جریان قابل تشخیص نخواهد بود. چنین خطاهایی ممکن است منجر به وقوع اتفاقات ناخوشایندی از قبیل جرقه و آتش‌سوزی، خطرات جانی و صدمه به تجهیزات شوند. از چالش‌های مهم حفاظت شبکه توزیع، تشخیص انواع خطاهای اتصال کوتاه و در پی آن عملکرد رله حفاظتی برای پاک‌سازی خطا و عدم عملکرد برای پدیده‌های طبیعی شبکه مثل کلیدزنی انواع بارهای خطی و غیرخطی و بانک خازنی می‌باشد؛ بنابراین، تشخیص HIF از این اغتشاشات سیستم قدرت بسیار پیچیده است، زیرا طیف فرکانسی HIF بسیار شبیه به پدیده‌های گذرا مثل ورود بانک خازنی و بار غیرخطی می‌باشد [۲]. تاکنون روش‌های مختلفی برای تشخیص HIF از این پدیده‌ها، ارائه شده است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در مرجع [۲]، معیار تشخیص HIF، وجود مؤلفه‌های فرکانس بالا بین ۲-۱۰ کیلوهرتز سیگنال جریان می‌باشد. در [۳، ۴]، از نسبت اندازه توالی صفر ولتاژ و جریان فیدر به عنوان معیاری برای تشخیص HIF استفاده شده است. در [۵]، معیار تشخیص HIF، رفتار تصادفی و تغییرات نیم سیکل مثبت و منفی شکل موج جریان می‌باشد. در [۶]، مقدار متوسط و توالی منفی جریان شبکه، معیاری برای تشخیص HIF و LIF معرفی شده است.

¹ Current Transformer (CT)

در مراجع [۷-۹]، از روش مورفولوژی ریاضی^۱ (MM) و در [۱۰]، از روش ریاضی مبتنی بر الگوریتم انرژی کیزر^۲ برای تشخیص HIF، استفاده شده است. در [۱۱]، برای تشخیص و مکان‌یابی HIF از روش تجزیه اجزا متعامد^۳ و در [۱۲]، از روش پیش‌بینی خطی^۴، در یک شبکه توزیع واقعی در کشور برزیل برای تشخیص HIF استفاده شده است.

در [۱۳، ۱۴]، برای تشخیص HIF با استفاده از تبدیل فوریه سریع^۵ (FFT)، هارمونیک‌های موجود در سیگنال جریان، استخراج می‌شود. در [۱۵]، از تبدیل فوریه سریع با استفاده از رابطه‌ی نسبی مربوط به هارمونیک سوم، پنجم و هفتم به هم، تشخیص HIF انجام شده است. در [۱۶]، معیار تشخیص HIF بر اساس نسبت هارمونیک سوم جریان به مؤلفه اصلی آن، معرفی شده است. در [۱۷]، معیار تشخیص HIF، مؤلفه‌های هارمونیک و فرکانس بالا سیگنال جریان می‌باشد. در [۱۸]، از انرژی مؤلفه‌های هارمونیک کمتر از ۴۰۰ هرتز برای تشخیص HIF و از الگوریتم درخت تصمیم^۶ برای طبقه‌بندی اغتشاشات استفاده شده است. در [۱۹]، عملکرد روش‌های مبتنی بر فرکانس در مقایسه با روش‌های مبتنی بر زمان مورد بررسی قرار گرفتند. در [۲۰]، با کمک پردازش سیگنال مؤلفه‌های هارمونیک، وقوع HIF تشخیص داده شده است. در [۲۱]، تغییرات زمانی مؤلفه‌های هارمونیک با استفاده از فیلتر کالمن^۷، برای تشخیص HIF مورد بررسی قرار گرفته است.

در مراجع [۲۲-۲۶]، از تبدیل موجک^۸ (WT) برای تشخیص HIF از سایر اغتشاشات مشابه و در [۲۷-۲۹]، برای تشخیص HIF از تبدیل S استفاده شده است. در [۳۰]، از تبدیل گابور^۹ (GT) و در [۳۱]، برای تشخیص و مکان‌یابی HIF، به‌طور هم‌زمان از تبدیل موجک و شبکه عصبی چندلایه^{۱۰} (MLP)

¹ Mathematical Morphology

² Teager-Kaiser Energy Operators

³ Oscillogram Analysis

⁴ Linear Prediction

⁵ Fast Fourier Transform

⁶ Decision Tree

⁷ Kalman Filtering

⁸ Wavelet Transform

⁹ Gabor Transform

¹⁰ Multi-layer Perceptron Network

استفاده شده است. همچنین در [۳۲]، با استفاده از روش فیلتر پاسخ ضربه محدود^۱ (FIR) و روش خوشه‌بندی^۲ HIF تشخیص داده می‌شود. در [۳۳]، با استفاده از شبکه عصبی کانولوشن^۳ و در [۳۴]، با استفاده از تبدیل زمان-زمان^۴ (TT) و شبکه عصبی^۵ ART تشخیص HIF از سایر اغتشاشات مشابه انجام می‌شود.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

در زمان وقوع HIF، جریان خطا در حد بسیار کم و تقریباً نزدیک به جریان بار است. از طرفی دیگر حفاظت‌های جریانی مثل رله‌های اضافه جریان و رله زمین که در سیستم توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرند، بر اساس میزان اضافه جریان عمل می‌کنند، بنابراین HIF نمی‌تواند توسط رله‌های مذکور تشخیص داده شود؛ بنابراین وقوع این نوع خطا در سیستم توزیع ممکن است باعث به وجود آمدن مشکلاتی از جمله آتش‌سوزی و خطرات جانی شود. بر اساس گزارش «اداره آتش‌نشانی ایالات متحده» در سال ۲۰۱۶، آتش‌سوزی منجر به کشته شدن ۳۱۰ نفر، مصدومیت ۸۰۰ نفر و خسارتی حدود ۷/۰۹ میلیارد دلار شد که بسیاری از آن‌ها ناشی از خطاهای سیستم برق و جرقه بودند [۳۵]. با توجه به این توضیحات، تشخیص خطای امیدانس بالا از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این پایان‌نامه، روشی جدید مبتنی بر الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته برای تشخیص خطای HIF از ورود بانک خازنی و ورود بار غیرخطی ارائه می‌شود که از ویژگی‌های این روش می‌توان به محاسبات ساده، پنجره محاسباتی کوچک، سرعت و دقت بالا در تشخیص اغتشاشات مشابه اشاره کرد. همچنین این روش در محیط‌های نویری عملکرد قابل قبولی دارد. روش پیشنهادی علاوه بر توانایی تفکیک HIF از اغتشاشات مشابه، توانایی تشخیص LIF با و بدون اشباع ترانسفورماتور جریان در شرایط نویری و غیر نویری را نیز دارد.

¹ Finite Impulse Response

² Cluster Analysis

³ Convolutional Neural Network

⁴ Time-time Transform

⁵ Adaptive Resonance Theory

۴-۱- روش تحقیق

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، خطای امپدانس بالا تحت شرایط و سطوح جریان مختلفی از جمله شن و ماسه، چمن، علفزار، خاک و بتن، کلیدزنی بانک خازنی، کلیدزنی بار غیرخطی و خطای امپدانس پایین برای شرایط مختلف، در نرم‌افزار EMTP-Rv^۱ مدل‌سازی می‌شود. سپس الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص خطا از سایر اغتشاشات و شرایط عادی سیستم قدرت، در نرم‌افزار MATLAB^۲ پیاده‌سازی می‌گردد. در نهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها تحلیل می‌شود و کارایی الگوریتم پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تمام اغتشاشات ذکر شده در شرایط نویزی و خطای امپدانس پایین با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان و شرایط نویزی، روی دو شبکه توزیع استاندارد ۱۳ و ۳۴ فیدر IEEE، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین از اطلاعات واقعی HIF فیدر پالاش^۳ واقع در جنوب غرب استان تهران، برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی نیز استفاده می‌شود.

۵-۱- ساختار پایان‌نامه

ساختار این پایان‌نامه علاوه بر این فصل، شامل پنج فصل دیگر می‌باشد که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته می‌شود.

فصل دوم به مطالعه‌ی انواع اغتشاشات سیستم توزیع و مفاهیم مرتبط با آن‌ها و همچنین عملکرد مورد انتظار سیستم حفاظتی در مقابل با آن‌ها می‌پردازد. در فصل سوم به بررسی مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی روش‌های تشخیص خطا، جهت درک بهتر نقاط ضعف و قوت این روش‌ها پرداخته می‌شود. در فصل چهارم، ریاضیات الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته جهت آشنایی با منطق عملکرد این روش و همچنین روش پیشنهادی جهت تشخیص خطا ارائه می‌شود. در نهایت، خروجی الگوریتم پیشنهادی در برابر انواع اغتشاشات به‌صورت موردی برای درک بهتر عملکرد روش، ارائه و تحلیل می‌شود. در فصل

^۱ Electro Magnetic Transient Program

^۲ Matrix Laboratory

^۳ Palash Feeder

پنجم، ارزیابی جامع روش پیشنهادی برای تشخیص خطای امپدانس بالا با و بدون نویز از ورود بانک خازنی و ورود بار غیرخطی و خطای اتصال کوتاه با و بدون در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان¹ و شرایط نویزی، ارزیابی و تحلیل می‌شود. در فصل ششم جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادهایی برای انجام مطالعات آتی، ارائه می‌گردد.

¹ CT Saturation

فصل دوم

انواع اعتشاش‌های شبکه توزیع و

مفاهیم مرتبط با آن‌ها

۲-۱- مقدمه

به طور کلی زنجیره‌ی سیستم قدرت که شامل ژنراتورها^۱، ترانسفورماتورها، خطوط انتقال، پست‌های فوق توزیع و توزیع، وسایل کلیدزنی و مصرف‌کننده‌ها می‌باشند، برای تداوم عملکرد خود نیاز به حفاظت در برابر انواع اغتشاشات دارند. وظیفه حفاظت از سیستم قدرت بر عهده‌ی رله‌های حفاظتی می‌باشد که در مقابل اغتشاشات مختلف، باید رفتار به خصوصی داشته باشند. رفتار رله‌های حفاظتی به دو دسته کلی «عملکرد» برای انواع خطاهای به وجود آمده مثل خطای امپدانس پایین و خطای امپدانس بالا و «عدم عملکرد» برای اغتشاشات مشابه خطا مثل ورود بانک خازنی و ورود بار غیرخطی، تقسیم‌بندی می‌شود. در ادامه انواع اغتشاشات مذکور، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۲- خطای امپدانس بالا

خطای امپدانس بالا، به عنوان یکی از خطاهای سیستم توزیع با مقاومت خطا بالا می‌باشد؛ به طوری که جریان این خطا در مقایسه با خطای امپدانس پایین بسیار کم می‌باشد. در نتیجه رله‌های اضافه جریان در شناسایی و تشخیص خطای امپدانس بالا که معمولاً در سطح ولتاژ توزیع اتفاق می‌افتند، ناتوان می‌باشند و دچار اشتباه می‌شوند [۳۶]. دامنه‌ی HIF تا حد زیادی به سطح ولتاژ شبکه بستگی دارد، به طوری که در سطح ولتاژ ۱۳/۸ کیلوولت، HIF به طور مکرر اتفاق می‌افتد و در سطح ولتاژ توزیع ۴۸۰۰-۲۴۰۰ ولت، وقوع HIF بیشتر می‌شود [۳۷]. سطح جریان HIF معمولاً در محدوده‌ی ۷۵-۰ آمپر می‌باشد که این نوع خطا به دلایل زیر اتفاق می‌افتد [۳۸]:

* تماس هادی برق‌دار با یک جسم امپدانس بالا مثل شاخه‌ی درختان [۳۹].

* پاره شدن هادی برق‌دار و تماس با سطوح مختلف مثل چمن [۴۰]، شن [۴۰]، خاک [۴۱]، بتن [۴۲] و سیمان [۴۳].

حدود ۵-۱۰٪ خطاهای سیستم توزیع از نوع HIF می‌باشند [۴۴]. در مرجع [۴۵] اشاره شده است که

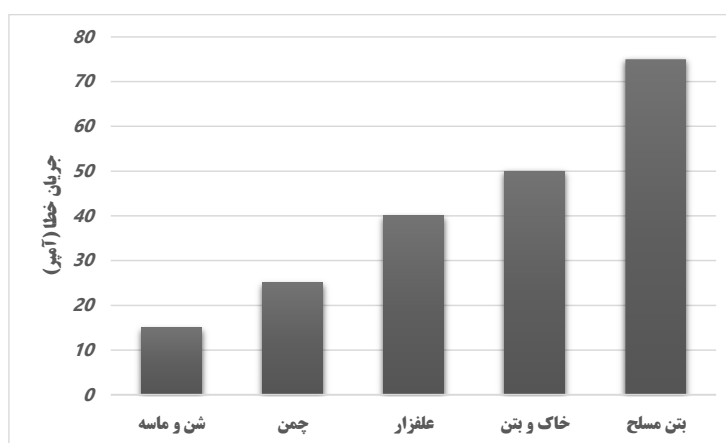
¹ Generators

۲۵٪ از هادی‌های افتاده توسط رله‌های اضافه جریان قابل تشخیص نیستند که به عنوان خطای امپدانس بالا در نظر گرفته می‌شوند. همچنین مطالعه‌ی دیگری این تعداد را تا ۳۲٪ گزارش کرده است [۳۶]. همه‌ی این گزارش‌ها به این حقیقت اشاره دارند که HIF جزء غیرقابل چشم‌پوشی از خطاهای سیستم توزیع هستند؛ بنابراین لازم است تا برخی اقدامات برای پاک‌سازی این نوع خطا از سیستم انجام شود. از این‌رو، شناسایی و مکان‌یابی HIF در سیستم توزیع از منظر حفاظت از تجهیزات، ایمنی شخصی و نقطه‌ی کار قابل‌اطمینان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

شکل (۱-۲)، نمونه‌ای از HIF به علت تماس هادی فاز با شاخه‌ی درختان و شکل (۲-۲)، دامنه جریان خطای امپدانس بالا را با توجه به نوع سطح نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، سطح شن و ماسه و بتن مسلح، به ترتیب دارای کمترین و بیشترین دامنه‌ی خطای امپدانس بالا می‌باشند.

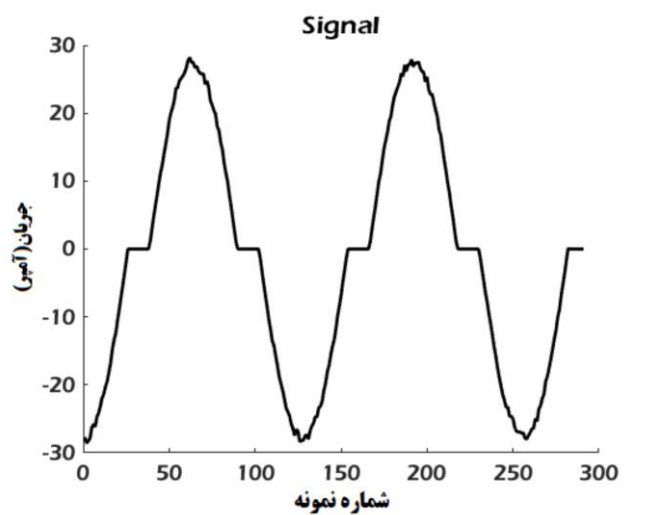


شکل (۱-۲): وقوع خطای امپدانس بالا در اثر برخورد سیم هادی به درخت

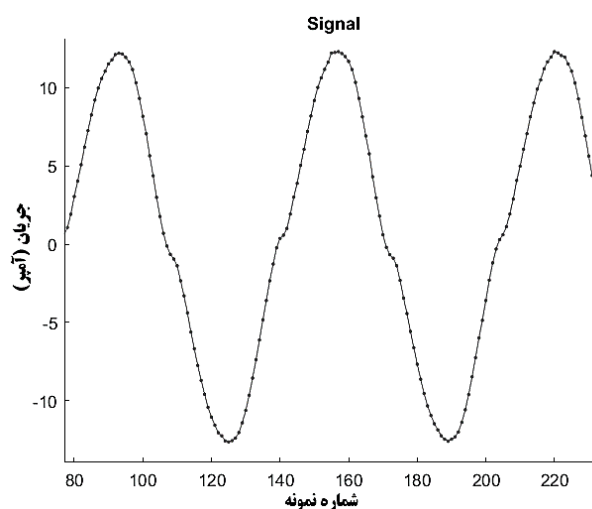


شکل (۲-۲): جریان HIF به ازای سطوح مختلف [۴۶]

در شکل (۳-۲) و شکل (۴-۲)، به ترتیب نمونه‌ای از جریان خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده و جریان خطای امپدانس بالا واقعی مشاهده می‌شود.



شکل (۲-۳): نمونه‌ای از جریان خطای امپدانس بالا شبیه‌سازی شده



شکل (۲-۴): نمونه‌ای از جریان خطای امپدانس بالا واقعی [۱۵]

HIF تحت تأثیر عوامل مختلف مثل مواد تشکیل‌دهنده‌ی سطح زمین، رطوبت سطحی، پیکربندی فیدر^۱، شرایط آب و هوایی و نوع بار قرار دارد [۱۶]. دو عامل بسیار تأثیرگذار و مؤثر روی ویژگی‌های HIF عبارت‌اند از رطوبت سطح و مواد تشکیل‌دهنده‌ی سطح که بررسی‌ها حاکی از آن است رطوبت بیشتر سطح منجر به تولید جریان خطای بالاتری می‌شود [۴۷]. علاوه بر آن، وقوع HIF در سطوح مختلف باعث به وجود آمدن مشخصات مختلف ولتاژ-جریان می‌شود [۴۳]. سطوحی که هادی‌های برق‌دار اغلب با آن‌ها در تماس هستند، شامل شاخه‌ی درختان، چمن، شن درشت و ریز، آسفالت، بتن، سنگ خردشده، بلوک

¹ Feeder Configuration

و سیمان می‌باشد. برخلاف اکثر خطاهای سیستم قدرت که در درجه اول تجهیزات الکتریکی را به خطر می‌اندازند، HIF تهدیدکننده امنیت جان انسان‌ها است و می‌تواند باعث به وجود آمدن آتش‌سوزی شود [۳۶]. در اثر وقوع HIF، تولید و تجمع گاز قابل اشتعال همراه با به وجود آمدن جرقه، می‌تواند منجر به آتش‌سوزی شود [۴۸]. علاوه بر این خطرات، احتمال اینکه کارکنان تعمیر و نگهداری خط و یا مردم عادی در معرض محیط برق‌دار ناشی از وقوع HIF قرار بگیرند، وجود دارد [۴۲].

شایع‌ترین مشخصه فیزیکی HIF این است که با جرقه‌ی الکتریکی همراه است که در شکل (۲-۵)، نمونه‌ای از این جرقه روی سطح چمن نشان داده شده است. به همین دلیل گاهی اوقات به این نوع خطا، خطای جرقه امیدانس بالا نیز گفته می‌شود [۴۱، ۴۹].

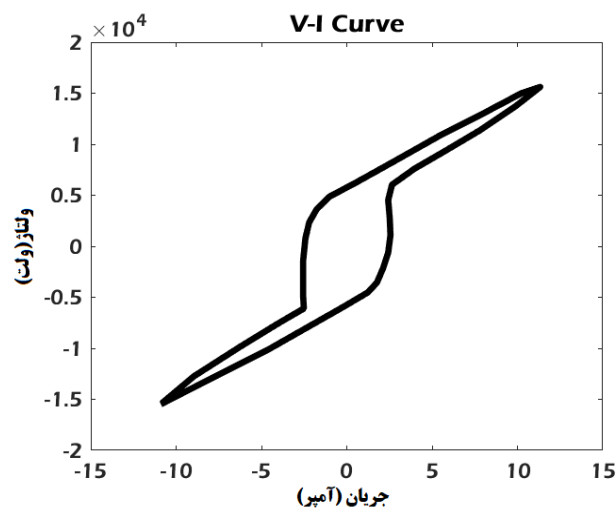


شکل (۲-۵): وقوع HIF در سطح چمن [۳۸]

جرقه‌ی الکتریکی زمانی اتفاق می‌افتد که ولتاژ هادی از سطح آستانه‌ی تحمل ولتاژ بیشتر باشد که به آن V_{br} گفته می‌شود. در نتیجه به محض اینکه ولتاژ از V_{br} کمتر شود، جرقه از بین می‌رود. علاوه بر دامنه‌ی کم جریان خطا و جرقه، HIF شامل مشخصات فیزیکی و الکتریکی دیگری نیز می‌باشد که در ادامه به تعریف آن‌ها پرداخته می‌شود.

- جرقه‌ی HIF رفتار پایدار و ثابت ندارد و در هر سیکل با توجه به شرایط، تغییر می‌کند [۴۸].
- با توجه به تفاوت ولتاژ شکست در نیم سیکل‌های مثبت و منفی، بین مقادیر حداکثر دامنه در

- نیم سیکل‌های مثبت و منفی جریان تفاوت وجود دارد که عدم تقارن نیم‌سیکلی^۱ نام دارد [۵۰].
- در مشخصه جریان HIF، مقدار جریان در بازه‌های زمانی مختلفی تغییری نمی‌کند و ثابت است که به آن شانه‌دار^۲ بودن شکل موج جریان، گفته می‌شود [۵۱].
- طیف فرکانسی جریان، متغیر با زمان است و جرقه منجر به تولید مؤلفه‌های فرکانس بالا در شکل موج جریان می‌شود [۵۲].
- دامنه‌ی جریان و هدایت جریان مقادیر تصادفی^۳ دارند [۵۳].
- مشخصه‌ی ولتاژ-جریان HIF در زمان وقوع جرقه، غیرخطی^۴ است که در شکل (۶-۲)، نشان داده شده است [۵۴].
- به دلیل غیرخطی بودن مشخصه‌ی ولتاژ-جریان HIF، محتوای هارمونیک بالاتر از ۶۰۰ هرتز برای جریان و هارمونیک‌های بالاتر از ۳۰۰ هرتز برای ولتاژ به وجود می‌آید [۵۵].
- دامنه‌ی مؤلفه‌های فرکانس بالا در HIF مربوط به تماس هادی با درخت، کمتر از سطوح دیگر می‌باشد [۵۶].



شکل (۶-۲): مشخصه‌ی ولتاژ-جریان HIF [۵۴]

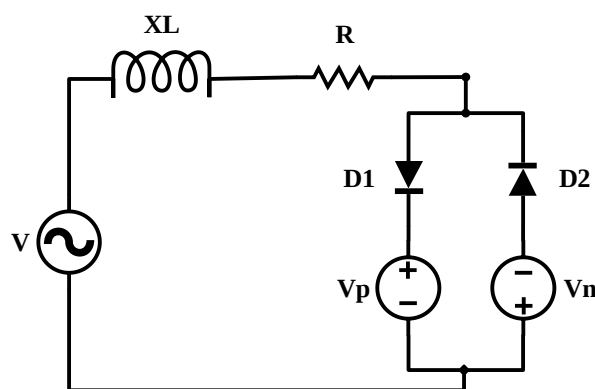
¹ Asymmetry

² Shoulder

³ Randomness

⁴ Nonlinearity

برای توسعه و بهبود الگوریتم‌های تشخیص HIF، شبیه‌سازی دقیق آن بسیار حائز اهمیت است. مدل مناسب برای شبیه‌سازی HIF، باید دارای ویژگی‌های غیرخطی و نامتقارن بودن سیگنال‌های ولتاژ و جریان باشد. در [۵۷]، مدل‌های ارائه شده برای مدل‌سازی HIF به دو گروه تقسیم‌بندی شده‌اند: گروه اول مبتنی بر مدل امانوئل^۱ است که در شکل (۷-۲) نشان داده شده است و بر پایه‌ی اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و محاسبات نظری می‌باشد. این مدل‌سازی به کمک دو منبع^۲ DC (V_n و V_p) که به دو دیود متصل می‌باشند، انجام می‌شود. در این مدل، راکتانس^۳ X_L و مقاومت R ، دامنه و جریان خطا را کنترل می‌کنند. از طرفی، V_n از V_p بزرگ‌تر بوده که حاصل آن باعث نامتقارن شدن نیم سیکل مثبت و منفی جریان و تولید هارمونیک دوم جریان می‌شود. مدل‌های دیگر به غیر از مدل امانوئل، به عنوان گروه دوم در نظر گرفته شدند که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته شده است.



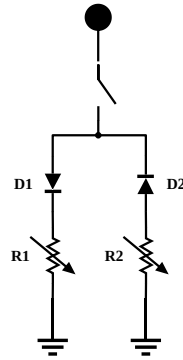
شکل (۷-۲): مدل مداری HIF بر اساس مدل امانوئل [۴۷]

روند تکمیلی مدل امانوئل در [۵۸]، با در نظر گرفتن غیرخطی بودن امپدانس زمین انجام شد که شکل (۸-۲) این مدل را نشان می‌دهد. در مدل جدید، دو مقاومت غیرخطی در مدل جرقه در نظر گرفته می‌شود. این مدل به دلیل نداشتن منابع ولتاژ، توانایی ساخت ویژگی نامتقارن بودن نیم‌سیکلی جریان HIF را ندارد.

¹ Emanuel

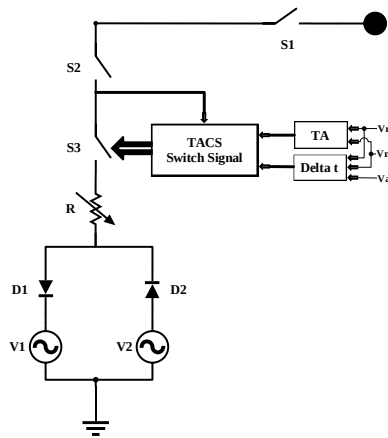
² Direct Current

³ Reactance



شکل (۸-۲): مدل مداری HIF ارائه شده در [۵۸]

در [۴۹] مطابق با شکل (۹-۲)، یک مدل جدید برای HIF متشکل از امپدانس غیرخطی، منبع ولتاژ متغیر با زمان، سیستم کنترلی تحلیل گذرا^۱ (TACS) و کلید کنترلی پیشنهاد شده است.



شکل (۹-۲): مدل HIF مبتنی بر باز جرقه [۴۹]

با توجه به شکل (۹-۲)، سه کلید (S3, S2, S1) در مدل جرقه برای حالات مختلف کنترلی استفاده می‌شوند. S1 و S2 کلیدهای کنترل شونده با زمان می‌باشند و S3 کلید کنترل‌شده با TACS است. وظیفه‌ی کلیدهای S1 و S2 جدا کردن فیدر از بار و اتصال مسیر خطا است. برای کنترل رفتار جرقه و احتراق مجدد و خاموشی از کلید S3 در این مدل استفاده شده است. عملکرد S3 به زمان گذر از صفر ولتاژ تا نقطه‌ی باز جرقه (Ta) و زمان انتقال قوس الکتریکی در نیم سیکل (Δt) بستگی دارد. این پارامترها به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$Ta = \frac{1}{w} \sin^{-1} \frac{Vr}{Vm} \quad (۱-۲)$$

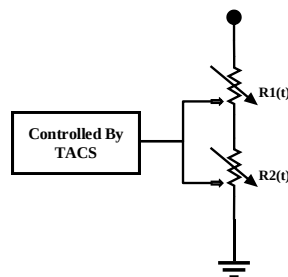
^۱ Transient Analysis of Control System

$$\Delta t = \frac{\pi V r + 2\sqrt{V_m^2 - V r^2}}{w(V a - V r)} \quad (2-2)$$

$$V = V_m \sin(\omega t) \quad (3-2)$$

که در آن $V a$ و V_m ، $V r$ به ترتیب ولتاژ باز جرقه، حداکثر دامنه‌ی ولتاژ اعمالی و ولتاژ جرقه می‌باشند و همچنین مقاومت غیرخطی (R) در این مدل به منظور کنترل دامنه‌ی جریان خطا استفاده می‌شود. وظیفه‌ی منابع ولتاژ V_1 و V_2 در مدل، هدایت جرقه برای شبیه‌سازی مشخصه $V-I$ و تنظیم اختلاف فاز بین ولتاژ اعمالی و جریان خطا است. شایان ذکر است که در این مدل، کنترل کلیدهای TACS دشواری می‌باشد.

در [۵۹]، یک مدل جدید با استفاده از دو مقاومت متغیر با زمان^۱ (TVR) که توسط کلیدهای TACS کنترل می‌شوند، ارائه شد که در شکل (۲-۱۰) قابل مشاهده است. وظیفه‌ی اولین TVR معرفی غیرخطی و نامتقارن بودن ویژگی $V-I$ و وظیفه‌ی TVR دیگر نشان‌دهنده‌ی ویژگی شانه‌دار بودن و ساخته شدن^۲ شکل موج HIF در حالت گذرا است. البته با توجه به مدل‌های ارائه شده، می‌توان به این نتیجه رسید که یک TVR به تنهایی توانایی ساختن ویژگی‌های منحصر به فرد HIF را ندارد.

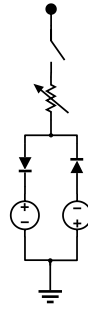


شکل (۲-۱۰): مدل مداری HIF ارائه شده در [۵۹]

در [۶۰]، مطابق با شکل (۲-۱۱) یک مدل پیشنهادی جدید با در نظر گرفتن دو منبع DC، دو دیود و مقاومت غیرخطی ارائه شد. دامنه‌ی منابع ولتاژ DC در هر نیم سیکل تغییر می‌کند و باعث به وجود آمدن مدل واقعی‌تر می‌شود. در این مدل به دلیل استفاده از یک مقاومت غیرخطی، نمی‌توان ویژگی عدم تقارن بین نیم سیکل‌های مثبت و منفی را به شکل واقعی ملاحظه کرد.

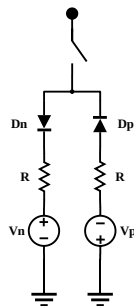
¹ Time Variable Resistor

² Buildup



شکل (۲-۱۱): مدل مداری HIF ارائه شده در [۶۰]

مدل دو دیودی امانوئل مبتنی بر جرقه، در سطح خاک ماسه‌ای در شکل (۲-۱۲) نشان داده شده است [۶۱]. در این مدل، منابع ولتاژ DC ولتاژ یونیزاسیون^۱ هوا و یا ولتاژ یونیزاسیون بین هادی و درختان را تعیین می‌کند. از آنجایی که مقادیر مقاومت خطا (R_p و R_n) برابر نیستند، جریان‌های خطا به صورت نامتقارن تولید می‌شوند. به محض اینکه ولتاژ فاز از ولتاژ مثبت DC بیشتر شود، جهت جریان خطا به سمت زمین جاری می‌شود؛ اما برای ولتاژهای کمتر از ولتاژ منفی DC، جریان خطا در جهت معکوس حرکت می‌کند و برای ولتاژهای بین V_p و V_n هیچ جریان خطایی وجود ندارد.

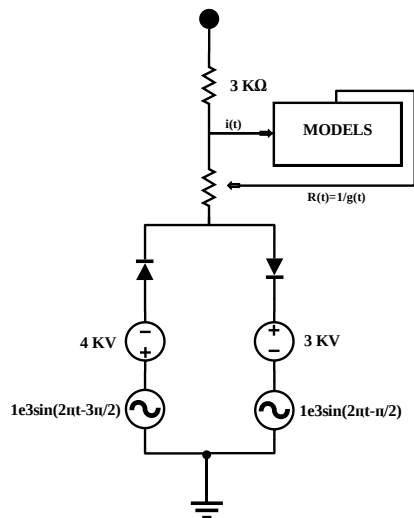


شکل (۲-۱۲): مدل مداری HIF ارائه شده در [۶۱]

مدل دیگری برای مدل‌سازی HIF در مرجع [۶۲] ارائه شده است که این مدل از دو منبع ولتاژ AC^۲، دو منبع ولتاژ DC و دو دیود بهره می‌گیرد که به صورت موازی با هم قرار دارند. لازم به ذکر است که مقاومت غیرخطی $R(t)$ بیانگر مقاومت دینامیکی جرقه و منابع ولتاژ AC تغییرات روشن و خاموش شدن جرقه‌ی HIF را مدل می‌کند و شکل (۲-۱۳)، این مدل را نشان می‌دهد. متغیر نبودن مقادیر منابع ولتاژ و مقاومت‌ها، به حد کافی خاصیت تصادفی بودن HIF را مدل‌سازی نمی‌کند.

¹ Ionization

² Alternating Current



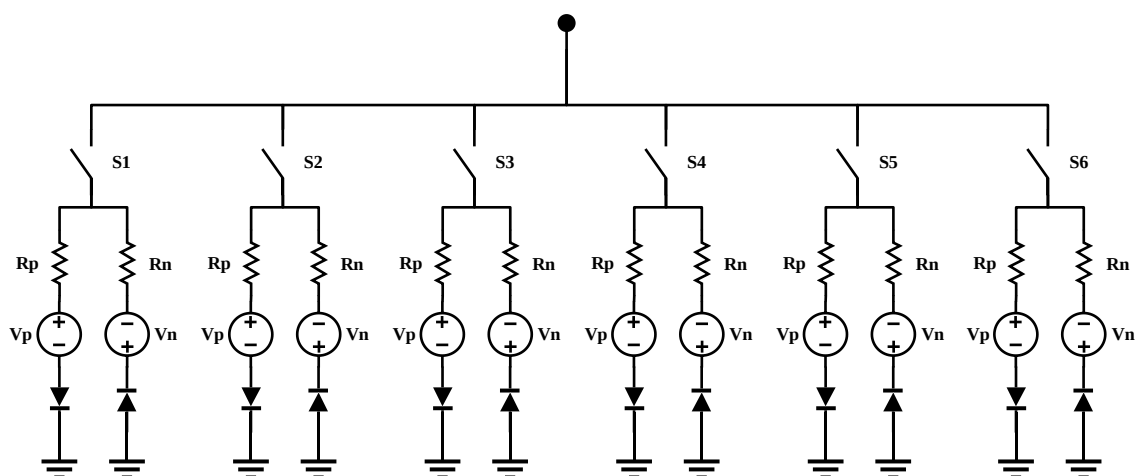
شکل (۲-۱۳): مدل مداری HIF ارائه شده در [۶۲]

در [۵۷]، شبیه‌سازی جریان HIF با استفاده از شش مدل موازی جرقه امانوئل انجام شد و طرح اولیه‌ی مدل در شکل (۲-۱۴) ارائه شده است. برای تولید حالت تصادفی HIF، تعدادی کلید در این مدل مورد استفاده قرار گرفته است که به صورت تصادفی کلیدزنی می‌شوند. پارامترهای جرقه در این مدل به داده‌های جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده بستگی دارد. در نقطه‌ی خطا، HIF از دو بخش تشکیل شده است:

(۱) جرقه‌ی الکتریکی بین هادی و جسم غیر رسانا.

(۲) مقاومت مسیر خطا که اغلب شاخه‌ی درختان، ساختمان‌ها و سطح زمین است.

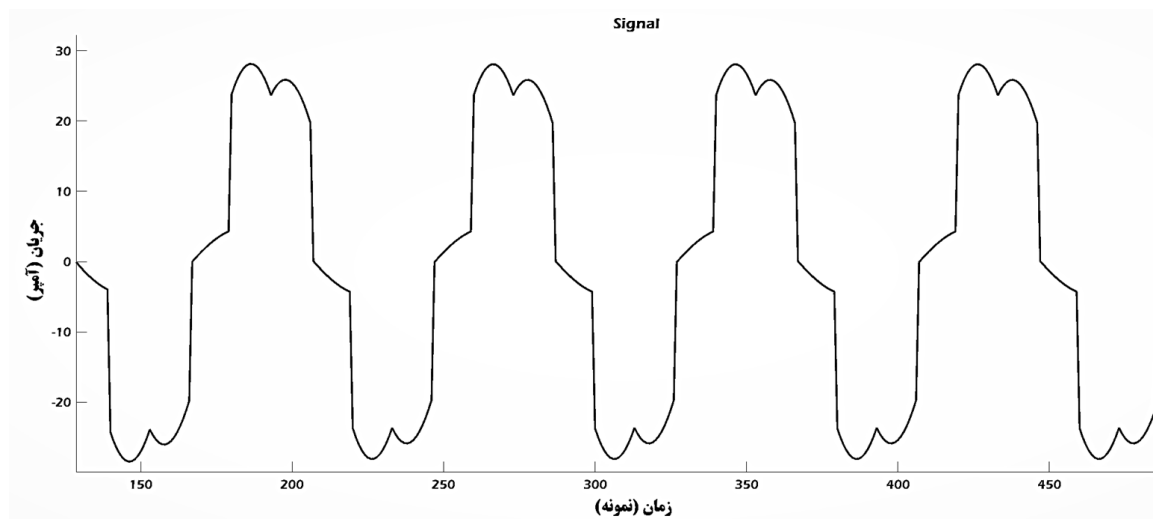
این مدل نسبت به مدل‌های ارائه‌شده‌ی دیگر، دارای ویژگی‌های واقعی‌تری برای بیان خصوصیات HIF می‌باشد که از مزایای آن به حساب می‌آید.



شکل (۲-۱۴): مدل مداری HIF مبتنی بر مدل امانوئل [۶۳]

۳-۲- کلیدزنی بار غیرخطی

بارهای توان ثابت، حجم گسترده‌ای از بار مصرفی شبکه توزیع را تشکیل می‌دهند که دو مقدار توان اکتیو^۱ و راکتیو^۲ اصلی‌ترین مشخصه‌ی آن‌ها می‌باشد و می‌تواند به صورت جداگانه در هر فاز و یا هر سه فاز وجود داشته باشد. از مبدل شش پالس^۳، می‌توان به عنوان یک نمونه بار غیرخطی مناسب نام برد که با استفاده از انواع مصرف بار DC مثل مقاومتی، سلفی و خازنی تنوع بالایی از بارهای غیرخطی به وجود می‌آورد. از طرفی دیگر، افزایش استفاده از بارهای غیرخطی مختلف مثل ادوات الکترونیک قدرت و جوشکاری، لوازم خانگی، کوره‌های قوس الکتریکی^۴ و تجهیزات الکتریکی، باعث تزریق جریان هارمونیکی به شبکه می‌شود. کلیدزنی بارهای غیرخطی، موجب تولید مؤلفه‌های فرکانس بالا می‌شود. از طرفی، جریان مصرفی این بارها شباهت زیادی به HIF دارد که در شکل (۲-۱۵)، نمونه‌ای از جریان بار غیرخطی یک مبدل شش پالس قابل مشاهده است.



شکل (۲-۱۵): نمونه‌ای از جریان بار غیرخطی

¹ Active Power

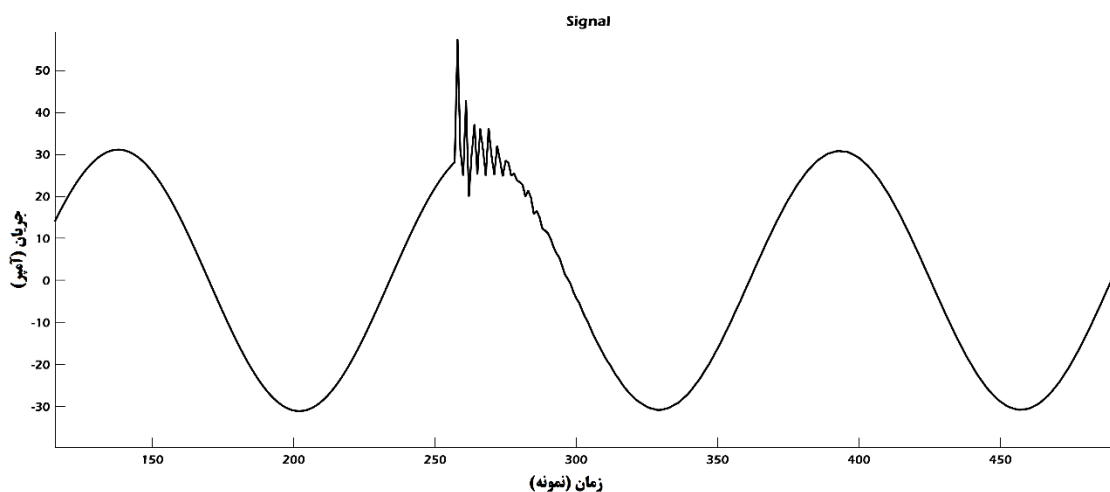
² Reactive Power

³ Six Pulse Converters

⁴ Electric Arc Furnace

۴-۲- کلیدزنی بانک خازنی

در سیستم قدرت، اکثر بارهای مصرفی، خطوط انتقال و ترانسفورماتورها ذاتاً خاصیت القایی دارند. خاصیت القایی این تجهیزات، باعث می‌شود که در ضریب توان^۱ پس‌فاز^۲ کار کنند. افزایش تلفات و کاهش ظرفیت و ولتاژ سیستم، از پیامدهای عملکرد سیستم در ضریب توان پس‌فاز می‌باشد [۶۴، ۶۵]. برای اصلاح ضریب توان، می‌توان از کندانسورهای سنکرون^۳ و یا بانک‌های خازنی استفاده نمود. موتورهای سنکرون بی‌بار که به کندانسورهای سنکرون معروف هستند، توانایی تزریق و دریافت توان راکتیو از شبکه را دارند؛ اما بانک‌های خازنی، تنها در مواقع ضروری توان راکتیو به شبکه تزریق می‌کنند. امروزه از بانک‌های خازنی برای اصلاح ضریب توان بیشتر از کندانسورهای سنکرون، استفاده می‌شود. از اهداف دیگر استفاده از بانک‌های خازنی در شبکه‌های توزیع، می‌توان به بهبود پروفیل ولتاژ، آزادسازی ظرفیت خطوط، بهبود نامتعادلی سیستم و بهبود شرایط هارمونیک‌های شبکه اشاره کرد. با توجه به خصوصیات ذاتی بانک خازنی، تولید جریان‌های گذرا با فرکانس بالا از نتایج کلیدزنی آن به حساب می‌آیند که بر روی شبکه تأثیرگذار است و باید حتماً مورد بررسی قرار بگیرد. شکل (۲-۱۶)، نمونه‌ای از جریان حاصل از کلیدزنی بانک خازنی را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱۶): نمونه‌ای از جریان کلیدزنی بانک خازنی

¹ Power Factor

² Lag

³ Synchronous Condenser

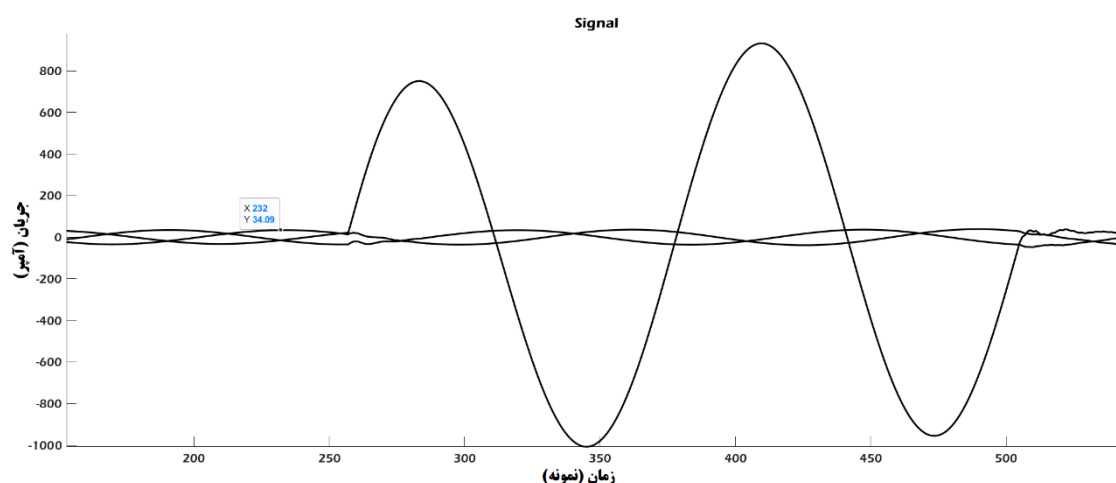
برای اصلاح ضریب توان به مقدار موردنظر از $\cos \varphi_1$ به $\cos \varphi_2$ ، نیاز به محاسبه‌ی ظرفیت بانک خازنی می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$KVAR = KW[\tan \theta_1 - \tan \theta_2] \quad (۴-۲)$$

که در این رابطه، KW توان اکتیو بار برحسب کیلووات و $KVAR$ ظرفیت بانک خازنی موردنظر می‌باشد [۶۵].

۲-۵- خطای امپدانس پایین

یکی از اغتشاشات دیگر سیستم قدرت که در مقابل آن باید عمل حفاظت به‌طور دقیق انجام شود، خطای اتصال کوتاه با امپدانس پایین می‌باشد. این عامل، سبب به وجود آمدن جریان خطا بالا حتی تا چندین برابر جریان نامی می‌شود که موجب تحمیل خسارات جبران‌ناپذیری به تجهیزات الکتریکی خواهد شد. خطای اتصال کوتاه امپدانس پایین به دو دسته کلی متقارن، شامل اتصال کوتاه سه فاز و نامتقارن، شامل انواع اتصال کوتاه دو فاز، دو فاز به زمین و تک‌فاز، تقسیم‌بندی می‌شود. در شکل (۲-۱۷)، نمونه‌ای از جریان خطای امپدانس پایین تک‌فاز ارائه شده است. اگرچه این نوع خطا توسط رله‌های اضافه جریان قابل تشخیص است؛ اما برای افزایش قابلیت اطمینان حفاظت شبکه باید مدنظر قرار بگیرد.



شکل (۲-۱۷): نمونه‌ای از جریان خطای اتصال کوتاه تک‌فاز

فصل سوم

مروری بر ادبیات موضوع

۳-۱- مقدمه

تشخیص و تمایز HIF از سایر اغتشاشات سیستم توزیع، مسئله بسیار پیچیده‌ای است، زیرا طیف فرکانسی HIF بسیار شبیه به پدیده‌های گذرا مثل ورود بانک خازنی و ورود بار غیرخطی است [۲]. همچنین تشخیص خطای امپدانس پایین نیز در حفاظت شبکه توزیع از اهمیت بالایی برخوردار است. تاکنون روش‌های مختلفی برای تفکیک خطای امپدانس بالا، خطای امپدانس پایین، کلیدزنی بانک خازنی و بار غیرخطی ارائه شده است که به‌طور کلی می‌توان این روش‌ها را، به دو دسته روش‌های الکتریکی و مکانیکی تقسیم نمود که در ادامه، این روش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۲- روش مکانیکی

یکی از ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین روش‌های تشخیص HIF، روش مکانیکی است که با استفاده از تجهیزات جانبی، وقوع خطا را شناسایی می‌کند. در [۶۶]، از نگاه‌دارنده‌های رسانا که زیر هادی‌های خطوط هوایی نصب می‌شوند، برای ایجاد خطای اتصال کوتاه با مقاومت کم استفاده شده است. این کار باعث ایجاد جریان خطای بسیار بالا و در نتیجه، عملکرد رله‌های اضافه جریان می‌شود. مزیت این روش این است که توانایی مهار هادی خط در اثر پارگی و جلوگیری از افتادن آن‌ها روی زمین را دارد، ولی دارای هزینه‌ی نصب و نگهداری بالایی می‌باشد. همچنین به وجود آمدن قندیل در هوای سرد، باد و وجود درختان می‌تواند منجر به تشخیص اشتباه این روش شود.

۳-۳- روش‌های الکتریکی

به‌طور کلی روش‌های الکتریکی تشخیص خطای امپدانس بالا، مبتنی بر اندازه‌گیری و تحلیل سیگنال‌های ولتاژ و جریان فیدر توزیع می‌باشند. این روش‌ها از اطلاعات زمانی سیگنال، به هم‌ریختگی و اعوجاج شکل موج جریان و ولتاژ جهت شناسایی HIF استفاده می‌کنند. به‌طور کلی اندازه‌گیری جریان و ولتاژ در سیستم توزیع، در ابتدای فیدر و پست اصلی انجام می‌شود؛ بنابراین سیگنال‌های حاصل از وقوع

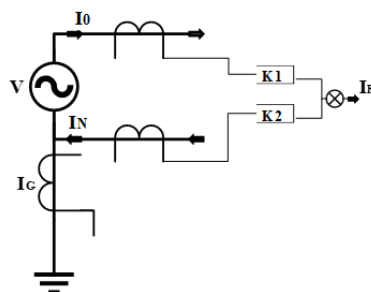
HIF دستخوش نرم شدن^۱ و جهش‌های ناگهانی می‌شوند که ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ^۲ (VT) در شدت کاهش این اعوجاج‌ها بسیار تأثیرگذار می‌باشند. این پدیده بیشترین تأثیر را روی سیگنال‌های جریان می‌گذارد، اما سیگنال‌های ولتاژ دچار تغییرات عمده‌ای نمی‌شوند [۶۷]. از طرفی دیگر، استفاده از سیگنال ولتاژ نیاز به نصب تجهیزات اندازه‌گیری دارد که سبب افزایش هزینه می‌شود. تعدادی از این روش‌ها در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در مرجع [۲]، از وجود مؤلفه‌های فرکانس بالا بین ۲-۱۰ کیلوهرتز سیگنال جریان، به عنوان معیاری برای تشخیص HIF استفاده شده است. میزان افزایش مؤلفه‌های فرکانس بالا جریان، اگر از یک مدت زمانی بیشتر طول بکشد، نشان از وقوع HIF می‌باشد. تأخیر زمانی زیاد در تشخیص، در نظر نگرفتن تأثیر کلیدزنی بار غیرخطی و نویز از معایب این روش به حساب می‌آیند.

در سیستم‌های توزیعی که در چند نقطه زمین می‌شوند، مقادیر دامنه و زاویه جریان نامتعادلی بار (I_0)، ثابت نیستند و در نتیجه برای رفع این مشکل باید حساسیت رله‌های اضافه جریان بیشتر شود که این امر موجب عملکرد اشتباه آن‌ها می‌شود. با اندازه‌گیری جریان‌های نامتعادلی بار (I_0) و جریان سیم نول (I_N)، می‌توان از رابطه (۱-۳) برای تشخیص HIF، جریان خطا (I_F) را محاسبه نمود [۶۸].

$$I_F = K_1 I_0 + K_2 I_N \quad (1-3)$$

که در آن، I_0 و I_N به ترتیب جریان عدم تعادل بار و جریان نول و K_1 و K_2 ثابت می‌باشند و مدار معادل آن، در شکل (۱-۳) ارائه شده است. اگر اندازه‌ی I_F از حد آستانه بیشتر شود، بیانگر وقوع HIF می‌باشد.

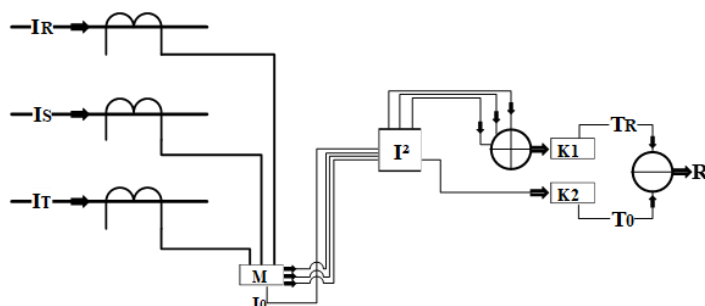


شکل (۱-۳): مدار معادل روش پیشنهادی تناسب رله‌ای [۶۸]

¹ Smoothing

² Voltage Transformer

روش رله نسبت زمین^۱، جهت رفع مشکلات ناشی از اثر تغییرات بار روی حساسیت رله‌های اضافه جریان طراحی شده است. گشتاور عملکرد رله به‌طور خودکار هم‌زمان با تغییرات بار عوض می‌شود که در شکل (۲-۳)، نشان داده شده است [۶۹].



شکل (۲-۳): رله نسبت زمین [۶۹]

برای محاسبه‌ی گشتاور عملکرد (T_0) و (T_R) و همچنین معیار تشخیص (R)، از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$T_0 = K_1 I_0^2 \quad (۲-۳)$$

$$T_R = K_2 (|I_R|^2 + |I_S|^2 + |I_T|^2) \quad (۳-۳)$$

$$R = K \left(\frac{T_0}{T_R} \right) \quad (۴-۳)$$

که در این روابط، I_R ، I_S و I_T جریان‌های سه فاز شبکه، I_0 جریان عدم تعادل بار و ضرایب K_1 ، K_2 و K_3 ثابت می‌باشند [۶۹]. مقدار R در شرایط عادی باید نزدیک به ۱ باشد. هرگاه این نسبت از حد آستانه‌ی تعیین شده بیشتر شود، نشان از وقوع HIF می‌باشد. به‌طور کلی این دو روش، به علت قابل اجرا نبودن در شبکه توزیع سه‌سیمه، کارایی زیادی ندارند.

روش‌های دیگری که از لحاظ بار محاسباتی پیچیده‌تر هستند، در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. در [۳]، نسبت اندازه توالی صفر ولتاژ و جریان فیدر به عنوان معیاری برای تشخیص HIF معرفی شده است. اگر معیار مذکور از حد آستانه تعیین شده بیشتر شود، حاکی از وقوع HIF است. علاوه بر صرف‌نظر کردن از شرایط نویزی، تأثیر اغتشاشات مشابه مثل کلیدزنی بانک خازنی و بار غیرخطی، در روش پیشنهادی

¹ Ratio Ground Relay

بررسی نشده است. در [۵]، رفتار تصادفی و تغییرات نیم سیکل مثبت و منفی شکل موج جریان که به فلیکر^۱ معروف است، به عنوان معیار تشخیص استفاده می‌شود. در نظر نگرفتن کلیدزنی بانک خازنی و شرایط نویزی از نقاط ضعف این مقاله به حساب می‌آید. همچنین نیاز به حداقل نیم سیکل داده برای انتخاب معیار، باعث کاهش سرعت این روش می‌شود.

در [۶]، از مقدار متوسط و توالی منفی جریان شبکه، برای تشخیص HIF استفاده می‌شود. هرگاه در فازی که جریان بار به اندازه‌ی ۲۰ درصد کاهش یا افزایش داشته باشد و یا اینکه در جریان توالی منفی، افزایش ۲۰ درصدی مشاهده شود، آن فاز به عنوان فاز دارای HIF تشخیص داده می‌شود. تشخیص LIF، بر اساس شرط تحریک رله توسط گیت‌های منطقی با اعمال منحنی قطع مناسب رله، انجام می‌شود. این روش حساسیت و دقت بالایی در تشخیص خطاهای امپدانس بالا و امپدانس پایین دارد. از طرفی این حساسیت بالا باعث می‌شود که نیاز به تجهیزات جداگانه‌ای برای تشخیص این نوع خطاها وجود نداشته باشد. همچنین این روش برای جریان‌های عادی بار عملکرد نایجایی ندارد. از معایب این روش می‌توان به مقدار تغییرات ۲۰ درصدی جریان توالی منفی بار، اشاره کرد که وقوع کلیدزنی بار غیرخطی باعث عملکرد اشتباه رله می‌شود.

در [۷]، از روش MM برای تشخیص HIF استفاده می‌شود، به‌طوری که سرعت تشخیص برای شبکه توزیع استاندارد IEEE 13-Node بین ۵۸۸-۱۷ میلی ثانیه و برای شبکه توزیع استاندارد IEEE 34-Node این مقدار بین ۶۶-۱۰ میلی ثانیه است. این روش تشخیص، نسبت به تغییرات جزئی سیگنال حساس است و به ازای آن‌ها در خروجی خود مقادیر بزرگی را نشان می‌دهد. به خاطر این ویژگی، الگوریتم MM توانایی استفاده در کنار سایر الگوریتم‌ها را به‌طور موازی دارد. همچنین از سیگنال ولتاژ شبکه استفاده می‌کند که تأثیرپذیری کمی از محیط اطراف دارد. بار محاسباتی کم و سادگی در پیاده‌سازی از مزیت‌های این روش به حساب می‌آیند؛ اما این روش در شناسایی کلیدزنی بار غیرخطی عملکرد مناسبی ندارد. در [۸]، یک شبکه توزیع شعاعی ۱۱ کیلوولت واقع در چنای^۲ کشور هند، با روش MM برای تشخیص خطای

¹ Flicker

² Chennai

امپدانس بالا مورد بررسی قرار گرفته شده است. از مزایای این مقاله می‌توان به در نظر گرفتن تمام اغتشاشات مشابه و همچنین تشخیص خطای امپدانس پایین نام برد، اما سرعت تشخیص روش پیشنهادی ۸۰ میلی‌ثانیه است.

در [۱۰]، از الگوریتم انرژی کیزر برای تشخیص HIF، استفاده شده است. ابتدا با استفاده از روش تجزیه سیگنال به مؤلفه‌های مود ذاتی^۱ (VMD)، مؤلفه‌های فرکانسی مختلف مؤلفه صفر جریان محاسبه می‌شود. سپس این مؤلفه‌ها به عنوان ورودی به الگوریتم کیزر برای استخراج معیار تشخیص HIF، داده می‌شود. سرعت تشخیص در این روش ۲/۸ میلی‌ثانیه عنوان شده است که نسبت به سایر روش‌ها، بسیار بالا می‌باشد. نیاز به تجهیزات متعدد اندازه‌گیری مؤلفه صفر جریان در مکان‌های مختلف از محدودیت‌های این روش به حساب می‌آید.

در [۱۱]، از روش تجزیه اجزا متعامد برای تشخیص HIF استفاده شده است که حدوداً ۷۰ و ۸۰ درصد به ترتیب به نوع و مکان خطا وابستگی دارد. این روش به ساختار شبکه وابستگی ندارد و همچنین، توانایی استفاده در کنار سایر روش‌های تحلیلی را دارد. عملکرد این روش تحت تأثیر نویز است و عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص کلیدزنی بار غیرخطی، مورد بررسی قرار نگرفته است.

در [۱۲]، از روش پیش‌بینی خطی، در یک شبکه توزیع واقعی در کشور برزیل برای تشخیص HIF استفاده شده است. در این مطالعه، تأثیر کلیدزنی بار غیرخطی در نظر گرفته نشده است. همچنین در فرآیند تشخیص، شرط پایداری اغتشاش بیش از ۱۰۰ میلی‌ثانیه برای تصمیم‌گیری در مورد وقوع HIF، باعث به وجود آمدن تأخیر در زمان تشخیص در حدود ۶ سیکل می‌شود.

روش‌های تشخیص HIF مبتنی بر هارمونیک و فرکانس، نسبت به روش‌های گذشته از دقت بالاتر و همچنین توانایی تشخیص دامنه وسیع‌تری از انواع اغتشاشات را برخوردار می‌باشند. این روش‌ها بر اساس اطلاعات حوزه فرکانس سیگنال‌ها عمل می‌نمایند و در اکثر موارد از تبدیل فوریه^۲ (FT) برای نگاشت سیگنال از حوزه‌ی زمان به فرکانس استفاده می‌شود. کاربرد تبدیل فوریه اکثراً برای سیگنال‌هایی که

¹ Variational Mode Decomposition

² Fourier Transform

دامنه‌ی متغیر با زمان دارند، تعریف می‌شود. هنگامی که هادی برق‌دار با سطح زمین برخورد می‌کند، قوس الکتریکی و در پی آن، ناهماهنگی و عدم تقارن در شکل موج جریان به وجود می‌آید و این عدم تقارن، باعث تولید هارمونیک‌های مختلف مثل هارمونیک دوم و سوم و همچنین تولید مؤلفه‌های فرکانس بالا و پایین در سیگنال جریان خطا می‌شود. تعدادی از روش‌های تشخیص بر این اساس طراحی شده‌اند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در [۱۳، ۱۴]، محققین از FFT برای استخراج هارمونیک‌های موجود در سیگنال جریان HIF به منظور تشخیص آن از سایر اغتشاشات مشابه، استفاده نمودند. ساختار ساده، بار محاسباتی کمتر و دقت بیشتر در مقایسه با روش‌های سنتی، از مزایای این روش به حساب می‌آید، اما وجود بار غیرخطی در سیستم توزیع، این طرح را ناکارآمد می‌کند. بنابراین در [۱۵]، با توجه به وجود بارهای غیرخطی در سیستم و امکان تشخیص قابل اطمینان، یک روش اصلاح شده بر اساس تبدیل فوریه سریع با توجه به رابطه‌ی نسبی مربوط به هارمونیک سوم، پنجم و هفتم به هم، در این روش ارائه شده است.

در [۱۶]، نسبت هارمونیک سوم جریان به مؤلفه اصلی آن، معیار تشخیص HIF معرفی شده است. تأثیرپذیری زیاد از نویز، نقطه ضعف این روش می‌باشد. در [۱۸]، کل انرژی هارمونیک‌های فرد، زوج و میان هارمونیک‌های کمتر از ۴۰۰ هرتز برای تشخیص HIF محاسبه شده و از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری برای طبقه‌بندی اغتشاشات استفاده می‌شود. در این روش با توجه به نیاز الگوریتم درخت تصمیم‌گیری به آموزش و پنجره نمونه‌برداری بزرگ، تأخیر زیادی در فرآیند تشخیص به وجود می‌آید. در [۱۷]، از مؤلفه‌های هارمونیک‌های و فرکانس بالا سیگنال جریان به عنوان معیار تشخیص HIF استفاده شده است. از مزیت اصلی این روش می‌توان به توانایی تشخیص HIF از دیگر پدیده‌های طبیعی مثل کلیدزنی بانک خازنی و بار هارمونیک‌ی اشاره کرد. حساسیت به نویز، از معایب روش‌های مبتنی بر هارمونیک می‌باشد.

در [۷۰]، برای تشخیص HIF از سایر اغتشاشات شبکه توزیع از تبدیل Z^1 استفاده شده است. در این روش، مؤلفه‌های هارمونیک‌ی مرتبه پایین استخراج می‌شوند. هرگاه به‌طور هم‌زمان هارمونیک مرتبه ۴

¹ Chirp Z Transform

بزرگ‌تر از مرتبه ۳، ۵، ۶ و همچنین هارمونیک مرتبه ۶ بزرگ‌تر از هارمونیک مرتبه ۵ باشد، وقوع HIF تأیید می‌شود. در نظر نگرفتن تأثیر شرایط نویزی، نقطه ضعف این روش به حساب می‌آید.

در [۷۱]، زاویه فاز هارمونیک سوم جریان توسط الگوریتم ST^1 استخراج می‌شود. هرگاه این مقدار از حد آستانه‌ی تعیین شده بیشتر شود، HIF تشخیص داده می‌شود. این روش دارای سرعت تشخیص بین ۱۱ الی ۳۰ سیکل می‌باشد.

در [۱۹]، به منظور مقایسه عملکرد این گروه از روش‌های تشخیص، روش رله تناسبی و رله نسبت زمین در مقایسه با روش‌های هارمونیک مرتبه دوم و سوم، مورد بررسی قرار گرفتند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، روش‌های مبتنی بر فرکانس در شناسایی خطاها با دامنه‌ی کمتر توانایی بیشتری دارند، اما روش‌های مبتنی بر زمان به دلیل استفاده از تعداد نمونه‌ی بیشتر، در تصمیم‌گیری نهایی مطمئن‌تر عمل می‌کنند. در [۲۰]، توسط پردازش سیگنال از یک شمارنده برای شمارش زیر هارمونیک‌های سیگنال به غیر از هارمونیک‌های اصلی، استفاده می‌شود. هنگامی که این تعداد از حد آستانه تعیین‌شده بیشتر شود، به‌منزله‌ی وقوع HIF است. این روش در شرایط کلیدزنی بار، عملکرد اشتباه داشته است.

تشخیص و طبقه‌بندی HIF در [۷۲]، با استفاده از تبدیل HS^2 و الگوریتم درخت تصمیم انجام شده است. ابتدا توسط تبدیل HS، مؤلفه‌های فرکانسی سیگنال استخراج می‌شوند. سپس این ویژگی‌ها برای آموزش الگوریتم درخت تصمیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نظر نگرفتن تأثیر کلیدزنی بار غیرخطی، نقطه ضعف این روش به حساب می‌آید.

فرض پریودیک بودن سیگنال ورودی، مشکل تبدیل فوریه به شمار می‌رود [۷۳]. همچنین در شبکه‌های مختلف ممکن است ادوات نصب شده متفاوت باشند که این امر می‌تواند سبب تغییر محتوای هارمونیک‌ی شود که از دیگر مشکلات این روش به شمار می‌رود. از طرفی به دلیل امکان استخراج ویژگی‌های مورد نیاز برای سایر روش‌ها، در تحقیقات زیادی مورد استفاده قرار گرفته است.

در [۲۱]، با استفاده از فیلتر کالمن، تغییرات زمانی مؤلفه‌های هارمونیک‌ی چهار مجموعه از اطلاعات

¹ Stockwell Transform

² Hubbard-Stanovich Transform

واقعی HIF در انواع مختلف خاک، مورد بررسی قرار گرفته است. مؤلفه‌های هارمونیکی مرتبه پایین و متغیر با زمان، در تشخیص HIF تأثیر بسیار زیادی دارند. در این روش، زمان تشخیص بین ۴ تا ۶ سیکل است که در مقایسه با سایر روش‌ها، تأخیر زیادی دارد.

به طور کلی روش‌های تشخیص مبتنی بر فرکانس، توانایی بسیار زیادی در استخراج ویژگی‌های منحصربه‌فرد HIF دارند. با این حال به دلیل اینکه مؤلفه‌های فرکانسی در فواصل زمانی معین مورد تحلیل قرار می‌گیرند، بازده این روش‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که پدیده‌های مختلف و طبیعی سیستم توزیع مثل کلیدزنی بانک خازنی و بار غیرخطی، منجر به تولید مؤلفه‌های فرکانسی مشابه با HIF می‌شوند که باعث تداخل در تشخیص این روش‌ها خواهد شد.

تبدیل موجک مزایای زیادی نسبت به تبدیل فوریه دارد که همین امر باعث شده تا در پردازش سیگنال‌های HIF مورد توجه بیشتری قرار بگیرد. تبدیل موجک، روش دیگری برای پردازش و تحلیل سیگنال است. با استفاده از این روش، سیگنال به چند ضریب که دارای باند فرکانسی متفاوت می‌باشند، تجزیه می‌شود [۷۴].

در [۲۲]، یک روش جدید مبتنی بر WT برای تشخیص HIF ارائه شده است. از مزیت‌های اصلی این روش می‌توان به عدم وابستگی به توپولوژی شبکه و سرعت بالا (حدود یک سیکل) اشاره کرد. این روش در برخی از موارد به علت از دست رفتن اطلاعات ناشی از نویز، دارای عملکرد اشتباه است. در [۲۳]، از موجک مادر مورلت^۱ با توجه به انجام آزمایش‌های عملی روی اطلاعات مربوط به چهار سطح مختلف وقوع HIF، برای تفکیک سیگنال‌ها استفاده شده است. در این روش از شیب و دامنه‌ی نمونه‌های متوالی سیگنال HIF برای استخراج ویژگی استفاده می‌شود. در [۲۴]، یک روش جدید برای تشخیص HIF با استفاده از انرژی مرزی ضریب موجک ارائه شده است که با در نظر گرفتن انرژی ضریب موجک مرزی بجای آنالیز موجک معمولی، معایب تأخیر زمانی برطرف می‌شود، اما چالش‌ها روی انتخاب موجک مادر بهینه همچنان وجود دارد. قابلیت اطمینان بالا، دقت بیشتر، سرعت بالا و بار محاسباتی پایین در کاربرد آنالیز، از مزایای

¹ Morlet

این روش به حساب می‌آید. عدم عملکرد مناسب برای سیگنال‌های نویزدار و پیچیدگی محاسباتی، نقطه ضعف روش WT به شمار می‌رود.

در [۲۵]، از آنالیز تبدیل موجک گسسته^۱ (DWT) و جزئیات طیف انرژی برای تشخیص خطای امپدانس بالا استفاده شده است. در این روش، پهنای باند کوچک‌تر در فرکانس پایین در مقایسه با فرکانس بالاتر، فرآیند استخراج ویژگی‌های اجزا سیگنال در یک سطح مشخص از فرکانس‌های بالا را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۷۵]. برای رفع این مشکل و بهبود وضوح فرکانس، الگوریتم تبدیل موجک پیوسته^۲ (CWT) معرفی شد. سیگنال‌های ولتاژ و جریان خروجی ترانسفورماتورهای ولتاژ و ترانسفورماتورهای جریان، از طریق تبدیل موجک گسسته برای به دست آوردن ضرایب تبدیل موجک پیوسته پردازش می‌شوند. سپس یک منطق تصمیم‌گیری با مقایسه‌ی این ضرایب با آستانه‌های از پیش تعیین‌شده، برای یک بازه‌ی زمانی مشخص طراحی می‌شود. در [۷۶]، با استفاده از DWT با موجک مادر db4 در کنار روش PSD^۳، خطای امپدانس بالا تشخیص داده شده است. در نظر نگرفتن تأثیر کلیدزنی بانک خازنی، نقطه ضعف این مقاله به حساب می‌آید.

در [۲۶]، از الگوریتم تبدیل موجک برای استخراج ویژگی‌های سیگنال و از سیستم فازی عصبی تطبیقی^۴ (ANFIS)، برای تشخیص HIF از سایر اغتشاشات مشابه مثل کلیدزنی بار غیرخطی و جریان ثانویه ترانسفورماتور جریان در حالت اشباع، استفاده شده است. در نظر نگرفتن نویز و کلیدزنی بانک خازنی از معایب این مقاله به حساب می‌آیند.

تبدیل موجک اساساً یک آنالیز زمانی می‌باشد که دارای ماهیت غیر سازگار است. مراحل پردازش در تبدیل موجک باعث به وجود آمدن تأخیر می‌شود و این امر یکی از محدودیت‌های کاربردی در تشخیص خطا به حساب می‌آید. همچنین، عدم عملکرد مناسب، در سیگنال‌های نویزدار و پیچیدگی محاسباتی از نقایص دیگر تبدیل موجک به شمار می‌رود. در [۲۷]، از تبدیل S برای استخراج زاویه فاز هارمونیک سوم

¹ Discrete Wavelet Transform

² ContinuousWavelet Transform

³ Power Spectral Density

⁴ Adaptive Neural Fuzzy Inference System

جریان فاز برای تشخیص HIF استفاده می‌شود. اگر مقدار انحراف استاندارد¹ (SD) این زاویه از مقدار آستانه تعیین‌شده، در بازه‌ی زمانی قبل کمتر باشد، HIF تشخیص داده می‌شود. دقت کم در شرایط نویزی از نقطه ضعف این روش به حساب می‌آید.

در [۲۸]، روش جدیدی برای تشخیص HIF مبتنی بر تبدیل S ارائه شد. این تبدیل برای استخراج زاویه فاز هارمونیک سوم جریان فاز استفاده می‌شود. SD این پارامتر به‌طور مداوم بررسی می‌شود. اگر مقدار انحراف استاندارد کمتر از آستانه‌ی تعیین شده برای دوره‌ی زمانی قبل باشد، حاکی از وقوع HIF است. در [۳۰]، از تبدیل گابور برای تشخیص HIF در چهار سطح مختلف استفاده شده است. از معایب این مقاله می‌توان به در نظر نگرفتن تأثیر نویز و اغتشاشات مشابه مثل کلیدزنی بانک خازنی و بار غیرخطی اشاره نمود.

خطای امیدانس بالا در زمان وقوع، دارای ماهیت‌های مختلفی می‌باشد که روش‌های تشخیص معمولاً تنها بعضی از این موارد را در نظر می‌گیرند. با توجه به تأثیر نوع خطا از سایر عوامل محیطی، یک روش منحصر به فرد توانایی شناسایی همه‌ی آن‌ها را ندارد. به همین دلیل، برای افزایش قابلیت اطمینان روش‌های تشخیص HIF، از روش‌های هوشمند و یا ترکیب چندین روش با هم استفاده می‌شود. به عنوان مثال شبکه عصبی به دلیل توانایی بالا در حل محاسبات مختلف، برای جداسازی و تشخیص HIF از اغتشاشات گذرا و همچنین افزایش دقت و حساسیت روش‌های تشخیص، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دیگر روش‌هایی که از آن‌ها می‌توان به عنوان مکمل سایر روش‌ها استفاده نمود، تبدیل موجک و تبدیل فوریه هستند که تبدیل موجک، علاوه بر استخراج شاخص‌های مهم، توانایی حذف نویز را دارند [۷۷].

در [۳۱]، برای تشخیص HIF، ضرایب انرژی حاصل از تبدیل موجک با موجک مادر db48، به شبکه عصبی چندلایه داده می‌شود تا وقوع HIF و مکان آن تشخیص داده شود. در نظر نگرفتن تأثیر اغتشاشات مشابه مثل کلیدزنی بانک خازنی و بار غیرخطی از نقاط ضعف این مقاله به حساب می‌آید.

¹ Standard Deviation

در [۳۲]، به صورت همزمان از روش فیلتر پاسخ ضربه محدود و روش خوشه‌بندی^۱ برای تشخیص HIF استفاده شده است. در ابتدا، پردازش سیگنال برای استخراج ویژگی و حذف نویز، استفاده می‌شود. سپس دسته‌بندی اغتشاشات، با استفاده از روش خوشه‌بندی انجام می‌گیرد. اگر در سطح شبکه توزیع، تعداد ادوات اندازه‌گیری کافی باشد، این روش توانایی شناسایی مکان خطا را نیز دارد. این روش در مقایسه با تبدیل موجک به دلیل تأثیرپذیری کمتر از نویز، از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار است.

در [۳۳]، برای تشخیص HIF، از شبکه عصبی کانولوشن^۲ استفاده نموده است. تبدیل موجک، وظیفه‌ی استخراج ویژگی‌های سیگنال را به عهده دارد. سپس این ویژگی‌های استخراج شده به عنوان ورودی شبکه عصبی داده می‌شود تا در مورد وقوع HIF، تصمیم‌گیری کند. تأثیر کلیدزنی بانک خازنی و بار غیرخطی، در این مطالعه بررسی نشده است و روش پیشنهادی دارای سرعت تشخیص ۴۰ میلی‌ثانیه است. در [۲۹]، برای تشخیص HIF یک روش استخراج مؤلفه‌ها مبتنی بر تبدیل S ارائه شده است. در این روش، چندین ویژگی شامل انحراف معیار، میانگین، آنتروپی و انرژی، از یک سیکل سیگنال جریان استخراج می‌شود. سپس این ویژگی‌ها به عنوان ورودی شبکه عصبی MLP، برای تشخیص HIF داده می‌شود.

در [۳۴]، از تبدیل TT برای استخراج ویژگی از جریان و ولتاژ خطا به عنوان ورودی شبکه عصبی ART برای تشخیص HIF استفاده می‌شود. در اینجا، نوع سطحی که هادی پس از قطع شدن بر روی آن قرار می‌گیرد توسط شبکه عصبی تشخیص داده می‌شود. به‌طور کلی، روش‌های هوش مصنوعی، با داشتن قابلیت استفاده‌ی موازی در کنار سایر روش‌ها، نیاز به حجم داده‌ی زیاد و وابستگی شدید به ساختار شبکه دارند.

در [۹]، یک روش حفاظت خطای دیفرانسیلی بر اساس روش MM برای ریز شبکه^۳ ارائه شده است. چندین خطای امپدانس پائین، خطای امپدانس بالا و چندین سیگنال بدون خطا از طریق MM برای

^۱ Hierarchical Clustering

^۲ Convolutional Neural Networks

^۳ Microgrid

استخراج ویژگی، پردازش می‌شود. سپس ویژگی‌های استخراج شده برای طبقه‌بندی خودکار رخ داده‌های خطا آموزش داده می‌شوند و مورد آزمایش قرار می‌گیرند. تجزیه تحلیل عملکرد مقایسه‌ای بین مدل‌های مختلف ماشین یادگیری مثل ELM^2 , ANN, SVM¹ و همچنین بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از MM انجام شده است که روش ELM برتری بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. در این مقاله کلیدزنی بانک خازنی، خروج منابع تولید پراکنده³ و خروج قسمتی از بار ریز شبکه به عنوان شرایط غیرخطی در نظر گرفته شده است؛ اما وجود بار غیرخطی که شباهت زیادی به HIF دارد، مورد تحلیل قرار نگرفته است. همچنین دقت پایین و تشخیص اشتباه در شرایط نویزی از معایب این روش به حساب می‌آید. در [۷۸]، برای تشخیص HIF از ماشین یادگیری استفاده شده است. در این روش، برای آموزش ML^4 به دو سیکل از نمونه‌های سیگنال ورودی نیاز است. در نظر گرفتن تمام اغتشاشات مشابه مثل کلیدزنی بانک خازنی و بار غیرخطی از مزایا و صرف نظر کردن از تأثیر نویز و سرعت پایین نقاط ضعف این مقاله به حساب می‌آیند. در [۷۹]، تشخیص و طبقه‌بندی HIF در خط انتقال با استفاده از الگوریتم HHT⁵ انجام شده است. در این روش، انرژی سیگنال با استفاده از تجزیه سیگنال به مؤلفه‌های ذاتی⁶ استخراج می‌شود. در نظر نگرفتن اثر نویز و کلیدزنی بانک خازنی از معایب این روش به حساب می‌آیند. در [۸۰]، از روش تخمین حالت^۷ برای تشخیص HIF در شبکه توزیع استفاده شده است. سرعت پایین و دقت تشخیص حدود ۹۵ درصد از معایب این روش به حساب می‌آیند.

¹ Support Vector Machine

² Extreme Learning Machine

³ Distributed Generation

⁴ Machine Learning

⁵ Hilbert-Huang Transform

⁶ Intrinsic Mode Function

⁷ State Estimation

فصل چهارم

روش پیمایشی

۴-۱- مقدمه

حفاظت مناسب شبکه توزیع در مقابل خطاهای امپدانس بالا و امپدانس پایین از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته جهت تشخیص خطای امپدانس بالا و پایین، با دقت و سرعت بالا از سایر اغتشاشات شبکه توزیع، پیشنهاد می‌شود. در سال‌های اخیر از این الگوریتم برای تحلیل سیگنال در مطالعات مختلفی استفاده شده است [۸۱-۸۹]. این الگوریتم با استفاده از یک اپراتور غیرخطی به نام تیگر-کیزر [۸۷]، پوش دامنه (A) و فرکانس لحظه‌ای (F_I) سیگنال را تخمین می‌زند [۸۴]. الگوریتم مذکور به دلیل نیاز به پنجره‌ی اطلاعات کوچک، از سرعت بالایی برای تحلیل سیگنال در حوزه‌ی زمان برخوردار است. در این فصل، در ابتدا عملکرد الگوریتم جداسازی انرژی برای سیگنال‌های زمان پیوسته شرح داده می‌شود و سپس در حالت زمان گسسته بررسی خواهد شد. در ادامه الگوریتم پیشنهادی برای تفکیک انواع اغتشاشات به منظور عملکرد مناسب سیستم حفاظتی تشریح و در نهایت، عملکرد الگوریتم برای شرایط مختلف به صورت موردی بررسی می‌شود.

۴-۲- الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته

از الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته در مقالات و پژوهش‌های متعددی، از جمله تشخیص خطا در شبکه قدرت [۸۱]، بررسی پایداری توربین آبی [۸۲]، تحلیل توربین بادی در شرایط غیرثابت [۸۴]، مدولاسیون سیگنال‌های AM و FM مخابراتی [۸۵]، بهبود حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور قدرت [۸۶]، تجزیه و تحلیل سیگنال گفتار [۸۸] و جداسازی سیگنال گفتار از موسیقی [۸۹]، استفاده شده است. به منظور فهم بهتر الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته، در ابتدا الگوریتم پیشنهادی برای سیگنال زمان-پیوسته تشریح می‌شود. اگر $x(t)$ یک سیگنال سینوسی زمان پیوسته با اندازه و فرکانس ثابت به صورت زیر باشد.

$$x(t) = a \cos(\omega_c t + \theta) \quad (۴-۱)$$

که در آن a اندازه، ω_c فرکانس زاویه‌ای و θ مقدار ثابت فاز می‌باشند؛ آنگاه مشتق اول و دوم سیگنال به

ترتیب مطابق با روابط (۲-۴) و (۳-۴) محاسبه می‌شوند.

$$\dot{x}(t) = -a \omega_c \sin(\omega_c t + \theta) \quad (۲-۴)$$

$$\ddot{x}(t) = a \omega_c^2 \cos(\omega_c t + \theta) \quad (۳-۴)$$

طبق مرجع [۸۸]، اپراتور انرژی در حالت زمان-پیوسته به کمک رابطه‌ی (۴-۴) تعریف می‌شود.

$$\Psi_c(x(t)) = \dot{x}^2(t) - x(t)\ddot{x}(t) \quad (۴-۴)$$

با جایگذاری رابطه‌های (۱-۴) الی (۳-۴) در رابطه‌ی (۴-۴)، انرژی سیگنال $x(t)$ بر اساس رابطه‌ی (۵-۴) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \Psi_c(x(t)) &= (-a \omega_c \sin(\omega_c t + \theta))^2 \\ &\quad - [(a \cos(\omega_c t + \theta))(a \omega_c^2 \cos(\omega_c t + \theta))] \end{aligned} \quad (۵-۴)$$

با ساده‌سازی رابطه‌ی (۵-۴)، رابطه‌ی (۶-۴) حاصل می‌شود.

$$\Psi_c(x(t)) = (a^2 \omega_c^2 \sin^2(\omega_c t + \theta)) + (a^2 \omega_c^2 \cos^2(\omega_c t + \theta)) = a^2 \omega_c^2 \quad (۶-۴)$$

به طور مشابه، اثبات می‌شود که انرژی مشتق سیگنال $x(t)$ به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\Psi_c(\dot{x}(t)) = a^2 \omega_c^4 \quad (۷-۴)$$

فرکانس زاویه‌ای لحظه‌ای سیگنال $x(t)$ با توجه به رابطه‌های (۶-۴) و (۷-۴)، به کمک رابطه (۸-۴) تعریف می‌شود [۸۸].

$$\omega_c(t) = \sqrt{\frac{\Psi(\dot{x}(t))}{\Psi(x(t))}} \quad (۸-۴)$$

در نهایت، فرکانس لحظه‌ای سیگنال پیوسته بر حسب هرتز، به کمک رابطه‌ی (۹-۴) محاسبه می‌شود.

$$F_I(t) = \omega_c(t)/2\pi \quad (۹-۴)$$

برای محاسبه‌ی پوش دامنه لحظه‌ای سیگنال $x(t)$ مطابق با رابطه‌ی (۱۰-۴) از رابطه‌های (۶-۴) و (۷-۴) استفاده می‌شود.

$$|A(t)| = \frac{\Psi(x(t))}{\sqrt{\Psi(\dot{x}(t))}} \quad (۱۰-۴)$$

رله‌های موجود در صنعت، از داده‌های گسسته برای تصمیم‌گیری استفاده می‌کنند. بر همین اساس، در ادامه الگوریتم جداسازی انرژی برای حالت زمان-گسسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. الگوریتم DESA بر اساس تخمین مشتق حالت زمان-گسسته به سه نوع DESA-1 و DESA-1a و DESA-2 تقسیم می‌شود. در الگوریتم‌های DESA-1 و DESA-1a از تفاضل دونقطه‌ای و در الگوریتم DESA-2 از تفاضل سه‌نقطه‌ای برای محاسبه‌ی پوش دامنه و فرکانس لحظه‌ای سیگنال استفاده می‌گردد. در این پایان‌نامه، از روش DESA-1 به دلیل عملکرد بهتر آن در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، برای تحلیل سیگنال‌ها و محاسبه‌ی شاخص پیشنهادی جهت تشخیص خطای امپدانس بالا و پایین از سایر اغتشاشات در شبکه توزیع، استفاده شده است. به طور کلی سیگنال‌های موجود در سیستم قدرت را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت.

$$x(t) = \sum_i a_i e^{\sigma_i t} \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (11-4)$$

که در آن a_i ، ω_i و φ_i به ترتیب دامنه، فرکانس و فاز مؤلفه i ام سیگنال می‌باشند. پوش دامنه و فرکانس زاویه‌ای لحظه‌ای یک سیگنال زمان-گسسته x_d به ترتیب به کمک رابطه‌های (۴-۱۲) و (۴-۱۳) محاسبه می‌شود [۸۸].

$$\Omega_d(n) \approx \omega_d T = \cos^{-1} \left(1 - \frac{\Psi[y_d(n)] + \Psi[z_d(n)]}{\frac{4}{T^2} \Psi[x_d(n)]} \right) \quad (12-4)$$

$$A(n) = \sqrt{\frac{\Psi[x_d(n)]}{\frac{1}{T^2} \left(1 - \left(1 - \frac{\Psi[y_d(n)] + \Psi[z_d(n)]}{\frac{4}{T^2} \Psi[x_d(n)]} \right)^2 \right)}} \quad (13-4)$$

در این روابط، T فاصله زمانی بین نمونه‌ها است. مشتق پیش‌رو (y_d) و پس‌رو (z_d) برای سیگنال x_d به کمک رابطه‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) تعریف می‌شود [۸۸].

$$y_d(n) = [x_d(n) - x_d(n-1)]/T \quad (14-4)$$

$$z_d(n) = [x_d(n+1) - x_d(n)]/T \quad (15-4)$$

در رابطه‌های فوق، $\Psi[x_d(n)]$ ، $\Psi[y(n)]$ و $\Psi[z(n)]$ به ترتیب اپراتور انرژی در حالت زمان-گسسته سیگنال‌های $x_d(n)$ ، $y_d(n)$ و $z_d(n)$ می‌باشند که با کمک رابطه‌های (۱۶-۴)، (۱۷-۴) و (۱۸-۴) تعریف می‌شوند [۸۸].

$$\Psi[x_d(n)] = [x^2(n) - x(n+1)x(n-1)]/T^2 \quad (۱۶-۴)$$

$$\begin{aligned} \Psi[y_d(n)] = [x^2(n-1) - x(n-1)x(n) - x(n+1)x(n-1) + x^2(n) \\ - x(n-2)x(n) + x(n+1)x(n-2)]/T^2 \end{aligned} \quad (۱۷-۴)$$

$$\begin{aligned} \Psi[z_d(n)] = [x^2(n+1) - x(n+1)x(n) - x(n-1)x(n+1) + x^2(n) \\ - x(n+2)x(n) + x(n-1)x(n+2)]/T^2 \end{aligned} \quad (۱۸-۴)$$

برای محاسبه‌ی پوش دامنه لحظه‌ای سیگنال بر اساس نمونه‌های سیگنال x_d می‌توان از رابطه‌ی (۱۹-۴) استفاده کرد.

$$\begin{aligned} A(n) \\ = \sqrt{\frac{x^2(n) - x(n+1)x(n-1)}{1 - \left(1 - \frac{2x^2(n) - x(n-1)x(n) - x(n+1)x(n) - x(n-2)x(n) - x(n+2)x(n) + x^2(n-1) + x^2(n+1) - 2x(n-1)}{x(n+1) + x(n-1)x(n+2) + x(n+1)x(n-2)}\right)}} \end{aligned} \quad (۱۹-۴)$$

به طور مشابه، فرکانس زاویه‌ای لحظه‌ای بر اساس نمونه‌های سیگنال x_d از رابطه‌ی (۲۰-۴) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \Omega_d(n) \\ = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2x^2(n) - x(n-1)x(n) - x(n+1)x(n) - x(n-2)x(n) - x(n+2)x(n) + x^2(n-1) + x^2(n+1) - 2x(n-1)}{x(n+1) + x(n-1)x(n+2) + x(n+1)x(n-2)}\right) \end{aligned} \quad (۲۰-۴)$$

مطابق با رابطه‌های (۱۹-۴) و (۲۰-۴)، مشاهده می‌شود که در روش پیشنهادی برای محاسبه‌ی پوش دامنه و فرکانس لحظه‌ای، به ۵ نمونه از سیگنال نیاز است. در نهایت با توجه به رابطه‌ی $F_d = \Omega_d/(2\pi T)$

فرکانس لحظه‌ای برای حالت زمان-گسسته، برحسب هرتز (Hz) به دست می‌آید. با توجه به روابط ذکر شده، در حالت زمان-گسسته باید نکات زیر مورد توجه قرار بگیرد.

- تغییرات فرکانس باید در محدوده‌ی $0 < \Omega_i(n) < \pi$ باشد و فرکانس نمونه‌برداری طبق قضیه نایکوئیست، حداقل باید دو برابر بیشترین فرکانس سیگنال باشد.
- زمانی که انرژی سیگنال یا انرژی مشتق آن صفر شود، امکان محاسبه و تخمین فرکانس لحظه‌ای و پوش دامنه لحظه‌ای سیگنال وجود ندارد. مقادیر پوش دامنه سیگنال و فرکانس لحظه‌ای به ترتیب برابر با صفر ($A(n_0) \approx 0$) و نمونه‌ی قبلی ($\Omega_i(n_0) = \Omega_i(n_0 - 1)$) در نظر گرفته می‌شود [۱۸۸].

۳-۴- روش پیشنهادی برای تشخیص خطاهای امپدانس بالا و پایین و سایر اغتشاشات

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، انرژی سیگنال و انرژی مشتق آن توسط روش کیزر به دست می‌آید و سپس با استفاده از الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته، پوش دامنه و فرکانس لحظه‌ای سیگنال محاسبه می‌شود. برای ایجاد وجه تمایز بین HIF و سایر اغتشاشات مشابه مثل ورود بانک خازنی و بار غیرخطی و همچنین تشخیص خطای امپدانس پایین، نیاز به ارائه یک معیار مناسب با توجه به ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال است. معیار پیشنهادی (SI) به کمک رابطه‌ی (۴-۲۱) تعریف می‌شود.

$$SI = \left(\frac{\sigma^2(\Psi(x_d))}{\sqrt{\mu(\frac{F_I}{A})}} \right) \quad (۴-۲۱)$$

$$\sigma^2(\Psi(x_d)) = \frac{\sum_{j=1}^N (\Psi_j(x_d) - \mu(\Psi(x_d)))^2}{N} \quad (۴-۲۲)$$

$$\mu(\frac{F_I}{A}) = \frac{\sum_{j=1}^N (\frac{F_I}{A})}{N} \quad (۴-۲۳)$$

در رابطه‌های فوق، σ^2 و μ به ترتیب بیانگر واریانس و میانگین متغیر مدنظر روی N نمونه می‌باشند. در شاخص پیشنهادی، x_d سیگنال جریان نمونه‌برداری شده در ابتدای فیدر می‌باشد که با توجه به رابطه‌ی (۴-۲۴)، نوع سیگنال آن مشخص می‌شود. NC، NLE، HIF، CBE و LIF به ترتیب بیانگر شرایط عادی،

ورود بار غیرخطی، خطای امپدانس بالا، ورود بانک خازنی و خطای امپدانس پایین می‌باشند. لازم به ذکر است، شرایط عادی شبکه شامل کلیدزنی بار خطی، خروج بانک خازنی و خروج بار غیرخطی می‌باشند. چگونگی تشخیص نوع سیگنال با توجه به چهار آستانه‌ی Tr_{LIF} ، Tr_{HIF} ، Tr_{NLS} و Tr_P به صورت زیر است.

- هرگاه معیار تشخیص، بزرگ‌تر یا مساوی آستانه‌ی Tr_{LIF} باشد، اغتشاش تحریک‌کننده رله از نوع

LIF است و دستور قطع (Trip) توسط رله صادر خواهد شد.

- در صورتی که معیار تشخیص، کوچک‌تر از آستانه‌ی Tr_{LIF} و بزرگ‌تر یا مساوی آستانه‌ی Tr_{HIF}

باشد، اغتشاش تحریک‌کننده از نوع کلیدزنی ورود بانک خازنی می‌باشد. در این شرایط با توجه

به اینکه معیار پیشنهادی از آستانه‌ی تحریک رله عبور کرده است رله پیکاپ می‌کند؛ اما رله

دستور قطع صادر نمی‌کند. در این حالت تا زمانی که مقدار شاخص پیشنهادی کمتر از Tr_{NLS}

شود، رله وارد بلاک می‌شود تا دستور قطع اشتباه صادر نشود.

- اگر معیار تشخیص، کوچک‌تر از آستانه‌ی Tr_{HIF} و بزرگ‌تر یا مساوی آستانه‌ی Tr_{NLS} باشد،

سیگنال تحریک‌کننده به عنوان خطای امپدانس بالا تشخیص داده می‌شود و بلافاصله رله باید

دستور قطع را به کلیدهای فشارقوی صادر کند تا خطای به وجود آمده، پاک‌سازی شود.

- اگر معیار تشخیص از حد آستانه‌ی Tr_{NLS} کوچک‌تر و از Tr_P بزرگ‌تر باشد، آنگاه سیگنال مورد

بررسی بیانگر وقوع کلیدزنی ورود بار غیرخطی می‌باشد؛ بنابراین رله در این شرایط پیکاپ می‌کند

ولی دستور قطع را صادر نمی‌کند.

- هرگاه شاخص پیشنهادی کمتر از Tr_P باشد، آنگاه سیگنال مورد بررسی به عنوان شرایط عادی

شبکه تشخیص داده می‌شود و رله پیکاپ نخواهد کرد.

اگرچه منطق تصمیم‌گیری در حالت کلی ثابت است؛ اما برای داشتن کارایی مطلوب روش پیشنهادی،

آستانه‌های Tr_{LIF} ، Tr_{HIF} ، Tr_{NLS} و Tr_P باید برای شبکه مورد مطالعه تنظیم شوند. برای درک بهتر روش

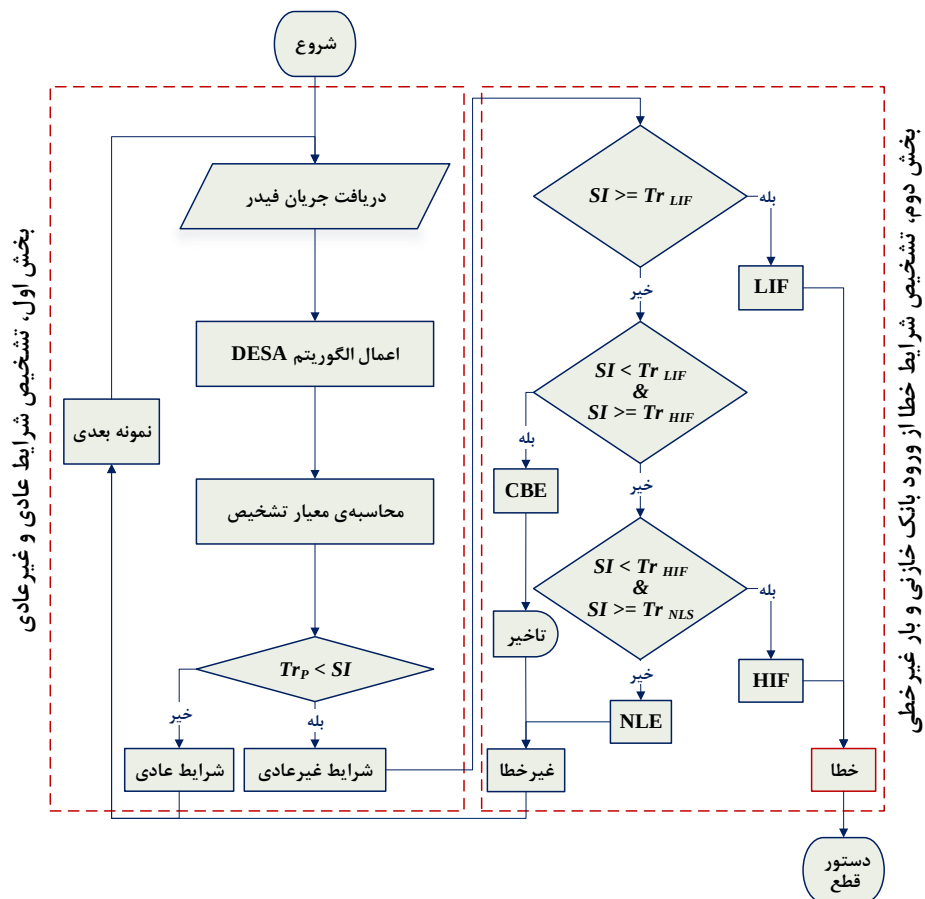
پیشنهادی برای تشخیص خطاهای امپدانس بالا و پایین از سایر اغتشاشات، روندنمای روش پیشنهادی

در شکل (۴-۱) و رابطه‌ی (۴-۲۴) ارائه شده است.

$$DST = \begin{cases} \text{NC} & SI < Tr_p \\ \text{NLS} & Tr_p \leq SI < Tr_{NLS} \\ \text{HIF} & \text{if } Tr_{NLS} \leq SI < Tr_{HIF} \\ \text{CBS} & Tr_{HIF} \leq SI < Tr_{LIF} \\ \text{LIF} & SI \geq Tr_{LIF} \end{cases} \quad (24-4)$$

طبق بررسی نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، مقدار SI در لحظه‌ی وقوع اغتشاش با یک پرش ناگهانی مواجه می‌شود که مقدار آن برای حالت‌های مختلف، متفاوت می‌باشد. از لحاظ اندازه، مقدار معیار تعیین‌شده برای LIF دارای بیشترین مقدار می‌باشد و به ترتیب برای ورود بانک خازنی، HIF، ورود بار غیرخطی و شرایط عادی کمتر است. مطابق با رابطه‌های (۴-۱۹) و (۴-۲۰)، با داشتن ۵ نمونه از سیگنال جریان، شاخص‌های انرژی، پوش دامنه و فرکانس لحظه‌ای سیگنال محاسبه می‌شوند. برای محاسبه‌ی معیار تشخیص از هر ۱۶ نمونه ($N=16$) انرژی سیگنال و نسبت فرکانس لحظه‌ای به پوش دامنه، به ترتیب واریانس و جذر میانگین گرفته می‌شود. سپس پنجره‌ی اطلاعات به اندازه‌ی یک نمونه جابجا می‌شود تا از روی نمونه‌های دیگر، معیار تشخیص محاسبه شود. طبق توضیحات گفته شده، برای به دست آوردن معیار تشخیص، به ۲۰ نمونه از سیگنال نیاز می‌باشد. تصمیم‌گیری نهایی به گونه‌ای انجام می‌شود که فقط برای وقوع HIF و LIF دستور قطع توسط حفاظت صادر شود و برای حالت‌های دیگر عملی انجام نمی‌شود تا از قطع بی‌مورد شبکه جلوگیری شود.

مطابق با شکل (۴-۱)، روش پیشنهادی دارای دو بخش است. بخش اول، الگوریتم انرژی زمان-گسسته روی سیگنال‌های ورودی (جریان فیدر) اعمال می‌شود؛ سپس شاخص تشخیص پیشنهادی محاسبه می‌گردد. اگر شاخص محاسبه شده از آستانه‌ی تحریک رله (Tr_p) بیشتر شود، سیگنال مورد بررسی به عنوان شرایط غیرعادی در نظر گرفته می‌شود، در غیر این صورت، شرایط سیستم به عنوان شرایط عادی تشخیص داده می‌شود و عملیاتی انجام نخواهد شد و نمونه‌های بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرند. بخش دوم، وظیفه‌ی تشخیص نوع اغتشاشی که سبب تحریک رله شده و در نهایت، تصمیم‌گیری در مورد عملکرد و یا عدم عملکرد حفاظت را بر عهده دارد.



شکل (۴-۱): روندنمای روش پیشنهادی برای تشخیص خطاهای امیدانس بالا و امیدانس پایین

۴-۴- بررسی موردی روش پیشنهادی در تشخیص اغتشاشات

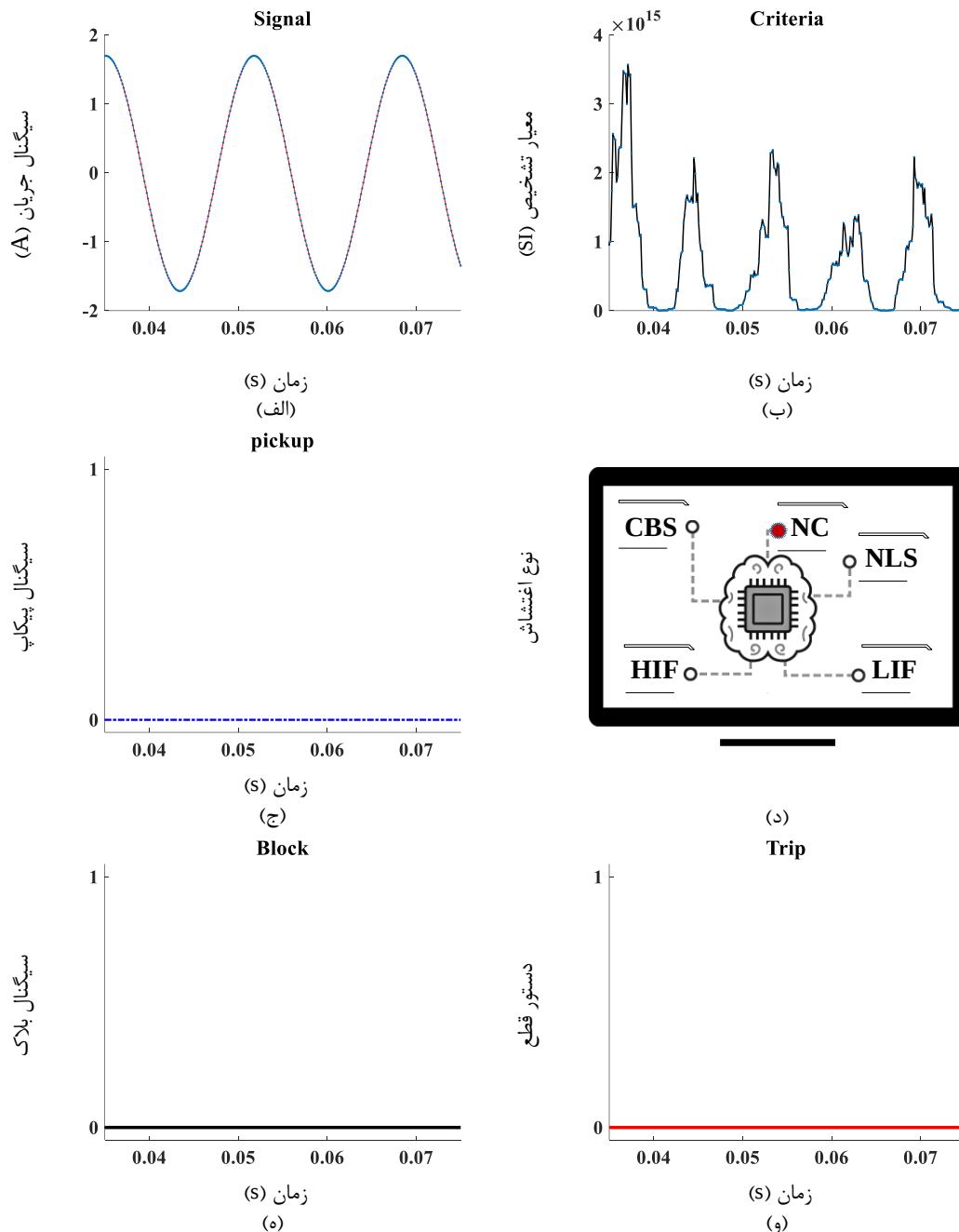
برای درک بهتر مفاهیم و عملکرد الگوریتم پیشنهادی، خروجی بخش تصمیم‌گیری الگوریتم برای خطاهای امیدانس بالا و پایین، ورود بانک خازنی، ورود بار غیرخطی و شرایط عادی مربوط به نتایج شبکه توزیع استاندارد IEEE 13-Node، در ادامه ارائه می‌شود. لازم به ذکر است منظور از سیگنال پیکاپ^۱ و سیگنال بلاک^۲، به ترتیب شرط تحریک و عدم عملکرد رله می‌باشد. در این شبکه آستانه‌های Tr_{LIF} ، Tr_{HIF} ، Tr_{NLS} و Tr_P با توجه به شبیه‌سازی‌های مختلف انجام شده، به ترتیب برابر با $۱۰^{۲۹}$ ، $۱۰^{۲۳}$ ، $۱۰^{۲۰}$ و $۱۰^{۱۶}$ می‌باشد.

- **شرایط عادی:** حالت‌های کلیدزنی بار خطی، خروج بانک خازنی و بار غیرخطی، به عنوان شرایط عادی در نظر گرفته می‌شوند. در صورت وقوع این حالت‌ها، رله نباید عملکردی داشته باشد. به عنوان

^۱ Pickup

^۲ Block

مثال شکل (۲-۴)، نحوه‌ی عملکرد روش پیشنهادی را در صورت وقوع کلیدزنی بار خطی نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۲-۴-ج)، دیده می‌شود که سیگنال پیکاپ برابر صفر است، چرا که معیار تشخیص از حد آستانه تعیین شده (Tr_p)، تجاوز نمی‌کند.

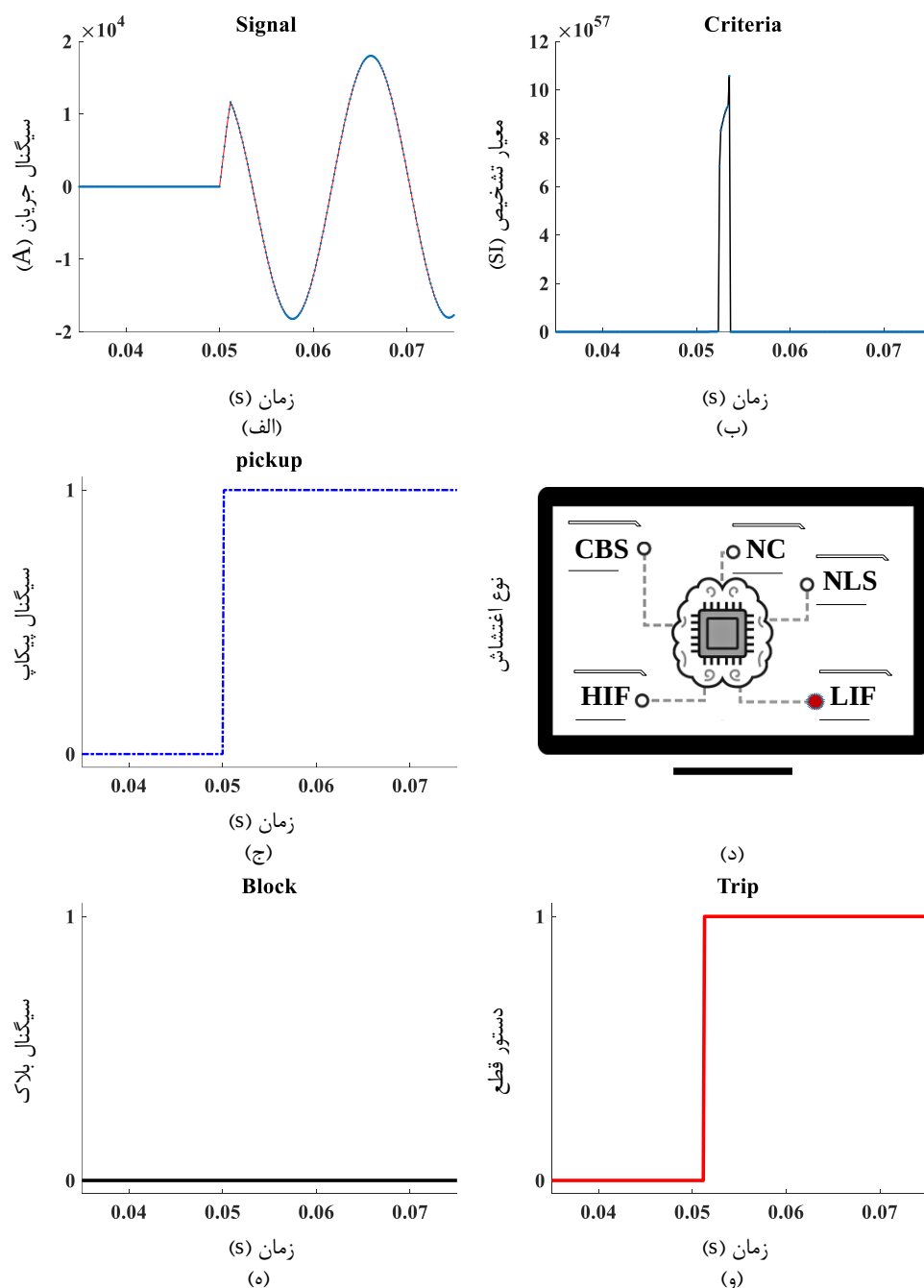


شکل (۲-۴): عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایط کلیدزنی بار خطی، (الف) سیگنال جریان، (ب) معیار تشخیص، (ج) سیگنال پیکاپ، (د) نوع اغتشاش، (ه) سیگنال بلاک، (و) دستور قطع

• وقوع خطای امپدانس پایین: یکی از اغتشاشات سیستم که باعث تحریک رله و صدور دستور قطع

می‌شود، وقوع خطای امپدانس پایین است. شکل (۳-۴)، نمونه‌ای از عملکرد روش پیشنهادی برای

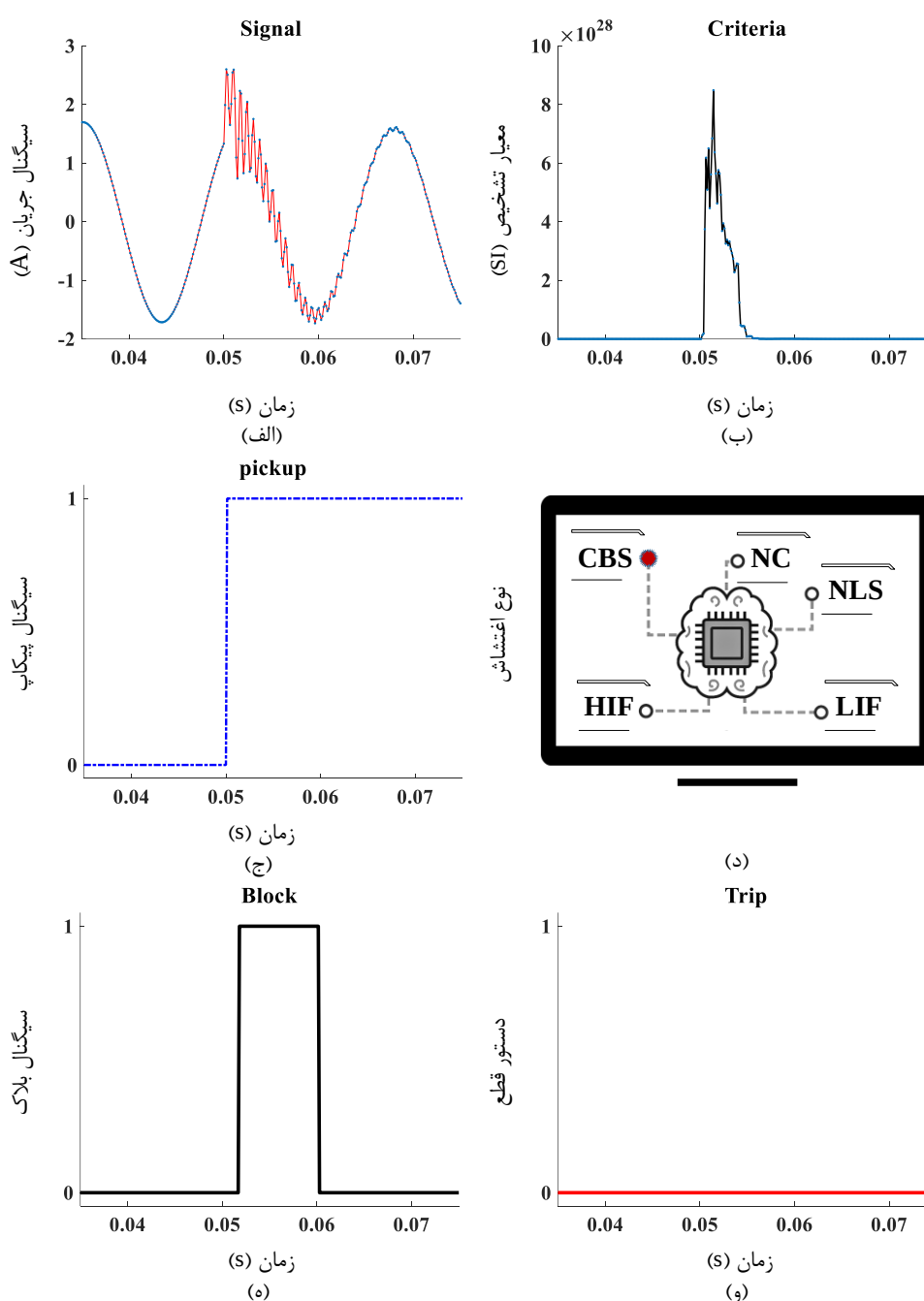
وقوع خطای امپدانس پایین را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که به دلیل عبور مقدار شاخص پیشنهادی از آستانه‌ی تعیین شده برای خطای امپدانس پایین (Tr_{LIF})، حفاظت پیکاپ کرده و در مدت زمان ۱/۱۷ میلی‌ثانیه بعد از وقوع خطا، دستور قطع را برای کلیدهای فشارقوی صادر می‌کند.



شکل (۳-۴): عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایط وقوع خطای امپدانس پایین، (الف) سیگنال جریان، (ب) معیار تشخیص، (ج) سیگنال پیکاپ، (د) نوع اغتشاش، (ه) سیگنال بلاک، (و) دستور قطع

• ورود بانک خازنی: شکل (۴-۴)، نمونه‌ای از عملکرد روش پیشنهادی در صورت وقوع ورود بانک

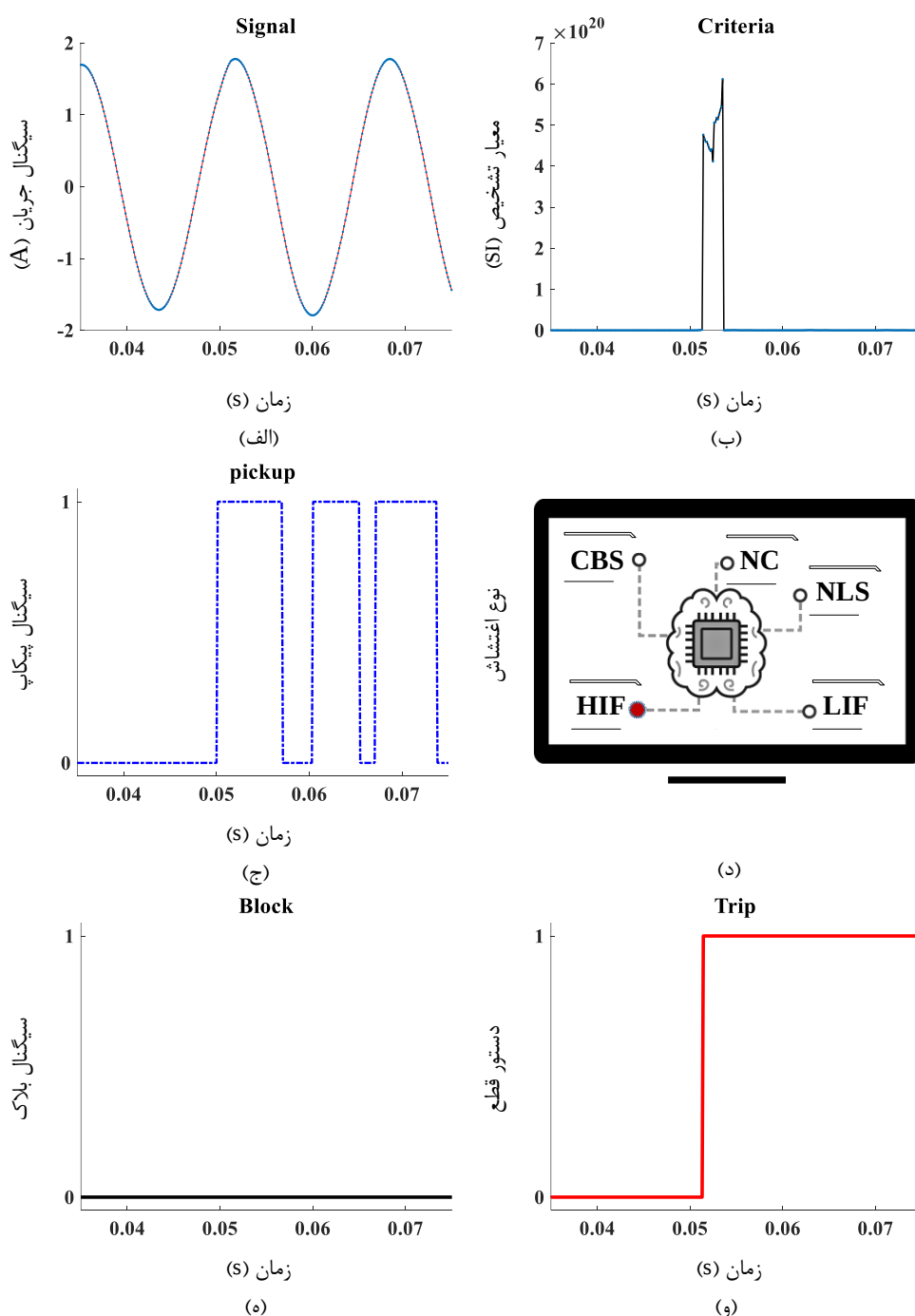
خازنی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴-۴-ب)، معیار تشخیص از حد آستانه‌ی تحریک تعیین شده رله عبور کرده و در محدوده‌ی $Tr_{HIF} \leq SI < Tr_{LIF}$ قرار می‌گیرد، این اغتشاش به عنوان ورود بانک خازنی شناخته می‌شود. مطابق شکل (۴-۴-د)، در این حالت، جهت جلوگیری از صدور دستور قطع نابجا، سیگنال بلاک صادر می‌شود.



شکل (۴-۴): عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایط ورود بانک خازنی، (الف) سیگنال جریان، (ب) معیار تشخیص، (ج) سیگنال پیکاپ، (د) نوع اغتشاش، (ه) سیگنال بلاک، (و) دستور قطع

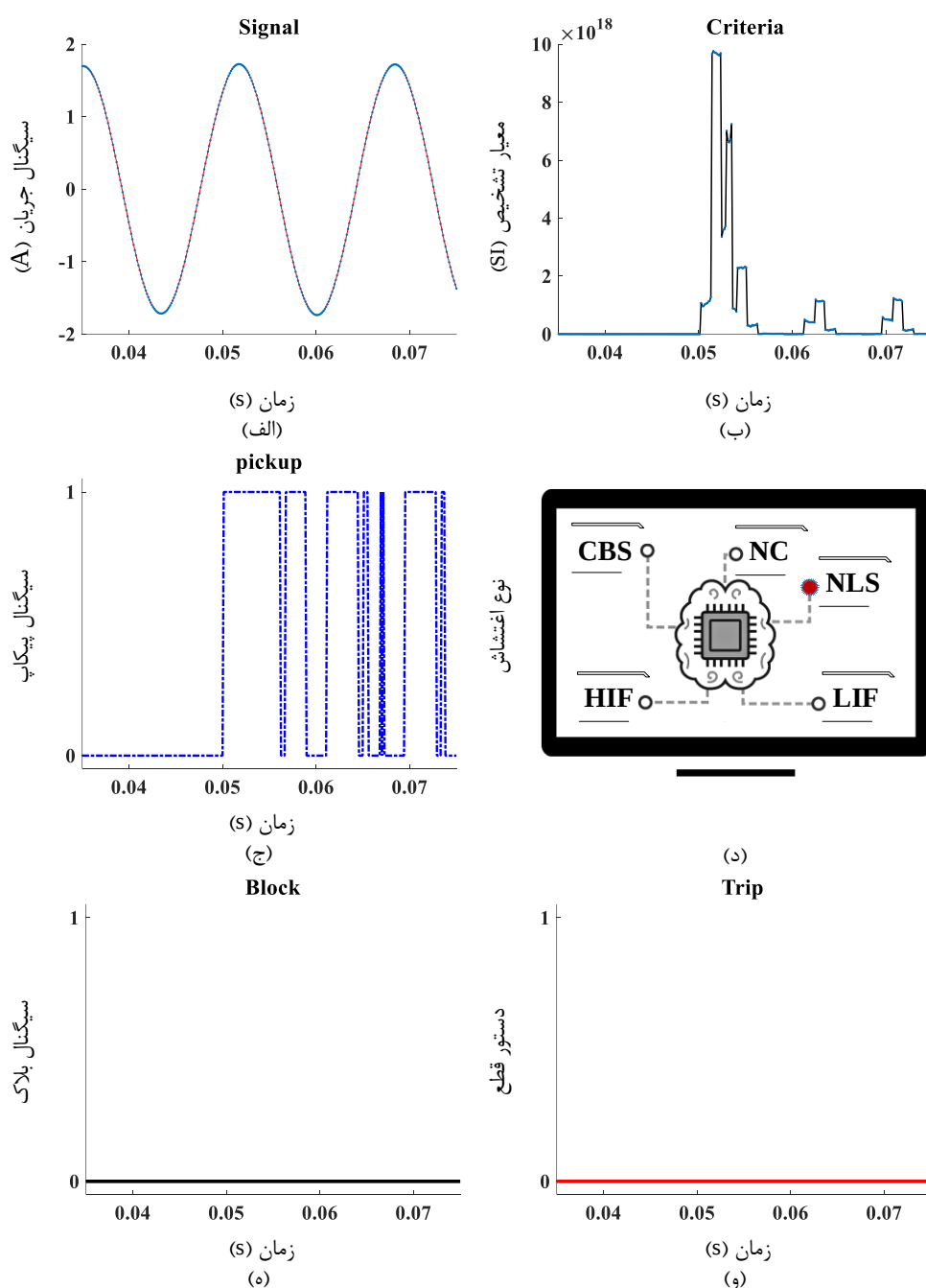
- وقوع خطای امپدانس بالا: اگرچه وقوع HIF در شبکه باعث به وجود آمدن جریان خطای زیادی

نمی‌شود، اما با توجه به امکان وقوع خطرات شدید و برق‌گرفتگی، در کمترین زمان باید پاک‌سازی شود. مطابق با شکل (۴-۵-ج)، شاخص تعیین شده در لحظه‌ی وقوع HIF با یک پرش ناگهانی همراه است و از حد آستانه‌ی تحریک رله بیشتر شده و در محدوده‌ی $Tr_{NLS} \leq SI < Tr_{HIF}$ قرار می‌گیرد؛ بنابراین، این اغتشاش به عنوان HIF (شکل (۴-۴-د)) شناخته می‌شود و دستور قطع صادر می‌گردد.



شکل (۴-۵): عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایط وقوع خطای امپدانس بالا، (الف) سیگنال جریان، (ب) معیار تشخیص، (ج) سیگنال پیکاپ، (د) نوع اغتشاش، (ه) سیگنال بلاک، (و) دستور قطع

- ورود بار غیرخطی: با توجه به ویژگی‌های ذاتی بار غیرخطی، معیار تشخیص با توجه به شکل (۴-۶-ب)، از حد آستانه‌ی تعیین شده بیشتر می‌شود که در پی آن، رله تحریک می‌شود با این حال به دلیل کمتر بودن مقدار معیار تشخیص از حد آستانه‌ی Tr_{NLS} ، این اغتشاش به عنوان ورود بار غیرخطی شناخته می‌شود و رله دستور قطع صادر نمی‌کند.



شکل (۴-۶): عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایط ورود بار غیرخطی، (الف) سیگنال جریان، (ب) معیار تشخیص، (ج) سیگنال پیکاپ، (د) نوع اغتشاش، (ه) سیگنال بلاک، (و) دستور قطع

فصل پنجم

شیء سازی و نتایج

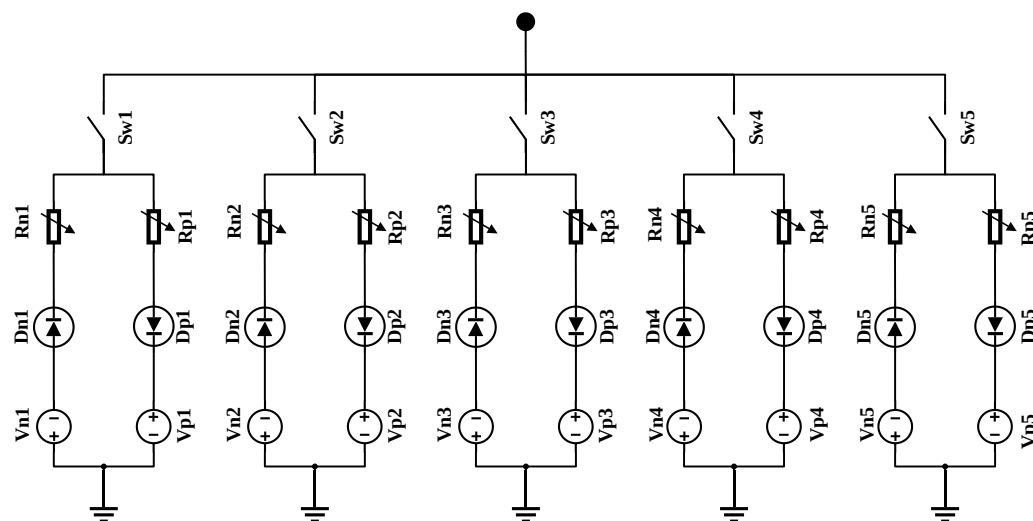
۵-۱- مقدمه

در این فصل عملکرد روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته جهت تشخیص خطاهای امپدانس بالا و امپدانس پایین از سایر اغتشاشات در شبکه توزیع از لحاظ سرعت و دقت عملکرد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور رسیدن به این هدف، دو شبکه‌ی توزیع استاندارد IEEE 13-Node و IEEE 34-Node در نرم‌افزار EMTP-Rv شبیه‌سازی شده و انواع اغتشاشات مختلف شامل خطای امپدانس بالا، ورود بانک خازنی (CBE)، ورود بار غیرخطی (NLE)، خطای امپدانس پایین، ورود و خروج بار خطی، خروج بانک خازنی و خروج بار غیرخطی بررسی می‌شوند. پردازش روش پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB انجام می‌گردد. همچنین کارایی الگوریتم پیشنهادی با اعمال نویز سفید گوسی بر روی سیگنال ورودی مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. در این پایان‌نامه، سیگنال‌های ورودی به الگوریتم برای پردازش، سیگنال جریان فیدر می‌باشد. علاوه بر بررسی کارایی الگوریتم در دو شبکه تست استاندارد فوق، کارایی الگوریتم در یک سیستم واقعی با توجه به اطلاعات واقعی فیدر پالاش واقع در جنوب غرب استان تهران نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۵-۲- مدل خطای امپدانس بالا

برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی جهت تشخیص HIF، نیاز به یک مدل دقیق از HIF می‌باشد. خروجی مدل شبیه‌سازی شده باید دارای ویژگی‌های غیرخطی و نامتقارن بودن سیگنال ولتاژ و جریان HIF باشد. با توجه به مطالب ارائه شده در فصل دوم، برای مدل‌سازی HIF در این پایان‌نامه از مدل ارائه شده در [۵۷]، استفاده می‌شود که در شکل (۵-۱)، مدل مداری HIF شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. HIF شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار EMTP-Rv، از پنج مدل موازی امانوئل تشکیل شده است تا دقت مدل‌سازی افزایش یابد. هر مدل شامل دو دیود، دو منبع ولتاژ DC و دو مقاومت متغیر به صورت موازی می‌باشد. منابع ولتاژ متغیر V_{pk} و V_{nk} ($k=1,2,\dots,5$)، وظیفه‌ی مدل‌سازی مشخصه‌ی عدم تقارن جریان خطا و خاموشی قوس الکتریکی را بر عهده دارند و مقاومت‌های متغیر R_{pk} و R_{nk} به‌طور تصادفی مقاومت

قوس را مدل سازی می کنند. در مدل ارائه شده، برای ساختن ویژگی نامتقارن بودن نیم سیکل های مثبت و منفی جریان، مقدار V_{pk} بزرگ تر از V_{nk} انتخاب می شود. این کار باعث می شود تا شبیه سازی انجام شده، ویژگی های بسیار نزدیک تری به جرقه ی واقعی داشته باشد.



شکل (۱-۵): مدل HIF شبیه سازی شده

مطابق با شکل (۱-۵)، هنگامی که ولتاژ شبکه بیشتر از ولتاژ V_{pk} شود، دیود D_{pk} روشن شده و جریان به سمت زمین جاری می شود؛ اما اگر ولتاژ شبکه کمتر از V_{nk} باشد، دیود D_{nk} روشن شده و جریان در جهت معکوس جاری می شود. همچنین هنگامی که ولتاژ فاز دارای مقداری بین ولتاژهای V_{pk} و V_{nk} باشد، جریان خطا جاری نمی شود. پارامترهای مدل HIF مورد استفاده، در جدول (۱-۵) ارائه شده است.

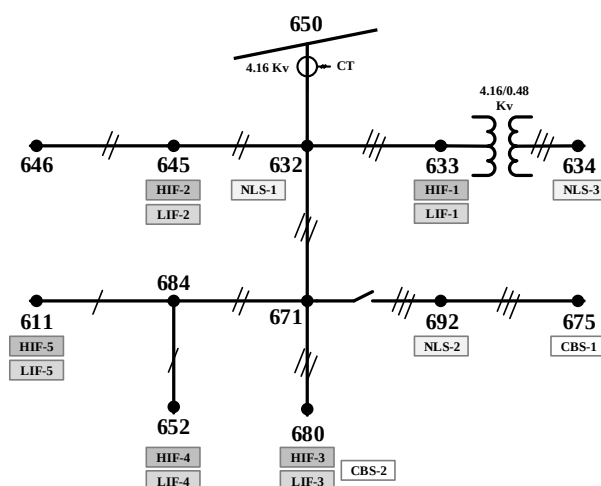
جدول (۱-۵): پارامترهای مدل HIF برای شبکه های توزیع IEEE 13-Node و IEEE 34-Node [۱۰]

شبکه	V_p (kV)	V_n (kV)	R_p (Ω)	R_n (Ω)
IEEE 13-Node	$1/0 \pm 1/10$	$0/5 \pm 1/10$	(۱۰۰ - ۱۵۰)	(۱۰۰ - ۱۵۰)
IEEE 34-Node	$7/5 \pm 1/10$	$6/5 \pm 1/10$	(۸۰۰ - ۱۰۰۰)	(۸۰۰ - ۱۰۰۰)

همان طور که در جدول (۱-۵) قابل مشاهده است، پارامترهای مدل HIF شبیه سازی شده دارای تغییرات تصادفی ۱۰ درصد می باشند که تحت عنوان عدم قطعیت در مدل سازی دقیق تر HIF در نظر گرفته می شود تا مدل مورد استفاده برای شبیه سازی به مدل واقعی نزدیک تر شود.

۵-۳- شبکه توزیع استاندارد IEEE 13-Node

اولین شبکه‌ای که برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد، شبکه توزیع استاندارد IEEE 13-Node است که در نرم‌افزار EMTP-Rv شبیه‌سازی شده و نمودار تک‌خطی این شبکه در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. این شبکه با ولتاژ نامی ۴/۱۶ کیلوولت و فرکانس نامی ۶۰ هرتز، دارای ویژگی‌های منحصر به فردی از جمله بارگذاری نامتقارن، عدم تعادل نسبتاً بالا، وجود اتصالات خطوط هوایی، کابل زیرزمینی، خطوط سه فاز جریان بالا، پایین و انشعابات تک‌فاز با سطوح جریان مختلف می‌باشد [۹۰]. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، فرکانس نمونه‌برداری برابر ۷۶۸۰ هرتز (۱۲۸ نمونه در هر سیکل) در نظر گرفته می‌شود [۱۰].



شکل ۵-۲: نمودار تک‌خطی شبکه توزیع استاندارد IEEE 13-Node [۹۰]

پارامترهای تأثیرگذار در ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی؛ سطح وقوع HIF، زاویه منبع، نوع خطای امپدانس پایین، مقاومت خطا، مکان وقوع خطا و نویز و همچنین اثر اشباع ترانسفورماتور جریان برای وقوع خطای امپدانس پایین می‌باشند. لازم به ذکر است که محل اندازه‌گیری جریان شبکه تنها در فیدر اصلی (گره ۶۵۰) با نسبت تبدیل ۲۰۰/۱ می‌باشد و برای بررسی تأثیر ورود بانک خازنی، از بانک خازنی موجود در شبکه (گره‌های ۶۷۵ و ۶۸۰) استفاده شده است. همچنین در حالت کلیدزنی بار غیرخطی، مقدار ۲۰ درصد بار شبکه به عنوان بار غیرخطی (گره‌های ۶۳۲، ۶۹۲ و ۶۳۴) در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از بررسی حالات مختلف در جدول (۵-۲) ارائه شده است.

جدول (۲-۵): شرایط شبیه‌سازی انواع اغتشاشات ممکن برای شبکه IEEE 13-Node

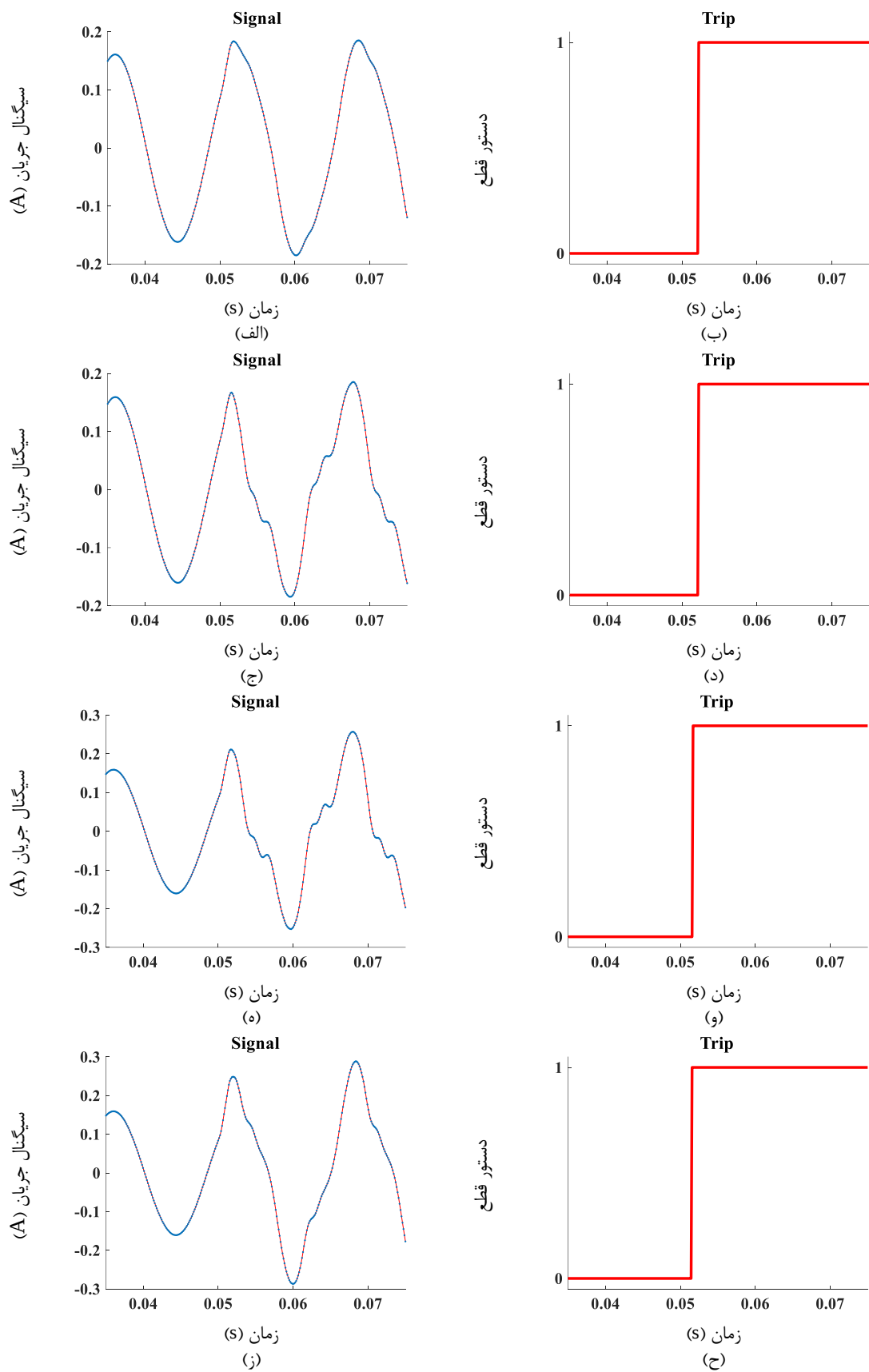
	LIF	CBE	HIF	NLE
نوع خطا	LG,LL,LLG,LLL,LLLG	—	—	—
نوع سطح	—	—	شن و ماسه، چمن، خاک و بتن، علفزار، بتن مسلح	—
زاویه منبع	۰,۴۵,۹۰,۱۳۵	۰,۴۵,۹۰,۱۳۵	۰,۴۵,۹۰,۱۳۵	۰,۴۵,۹۰,۱۳۵
مقاومت خطا (Ω)	۰, ۵, ۱۰, ۵۰, ۱۰۰	—	—	—
مکان اعمال اغتشاش	۶۳۳,۶۴۵,۶۸۰,۶۵۲,۶۱۱	۶۷۵,۶۸۰	۶۳۳,۶۴۵,۶۸۰,۶۵۲,۶۱۱	۶۳۲,۶۹۲,۶۳۴
مجموع	۲۲۰	۸	۱۰۰	۱۲

مطابق با جدول (۲-۵)، شبیه‌سازی‌های متعددی بر اساس پارامترهای مختلف شبکه مورد مطالعه انجام شده است. به عنوان مثال، خطای امپدانس بالا در ۵ سطح جریان مختلف شامل شن و ماسه، علفزار، خاک و بتن، چمن و بتن مسلح، ۴ زاویه کلیدزنی و در ۵ مکان از شبکه مورد مطالعه با در نظر گرفتن اثر نویز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین شرایط عادی شبکه (NC) شامل کلیدزنی بار خطی، خروج بانک خازنی و خروج بار غیرخطی نیز هرکدام در ۲۵ حالت مختلف شبیه‌سازی شده و کارایی روش پیشنهادی تحت این شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

نویز سفید گوسی با نسبت سیگنال به نویز (SNR^1) بین ۲۰ تا ۴۰ دسی‌بل با گام ۱۰ دسی‌بل، بر روی تمامی حالت‌های شبیه‌سازی اعمال گردیده است. لازم به ذکر است که نویز ۳۰ دسی‌بل یک سطح نویز طبیعی برای سیستم قدرت واقعی می‌باشد [۹۱]. با توجه به خاصیت تصادفی نویز سفید گوسی، تمام موارد شبیه‌سازی با ۱۰۰ مرتبه تکرار در نرم‌افزار MATLAB تحلیل می‌شود تا متوسط دقت و زمان تشخیص روش پیشنهادی محاسبه شوند.

در شکل (۳-۵)، نمونه‌ای از جریان HIF شبیه‌سازی شده در سطوح مختلف شامل شن و ماسه، خاک و بتن، چمن و بتن مسلح به همراه عملکرد روش پیشنهادی به ازای هر یک از سطوح، ارائه شده است.

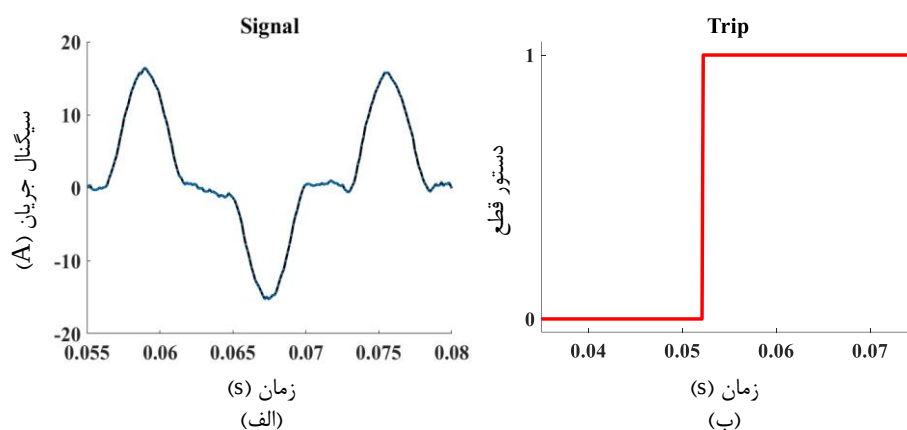
¹ Signal-Noise Ratio



شکل (۳-۵): عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص HIF برای سطوح مختلف، (الف) سطح شن و ماسه، (ب) دستور قطع، (ج) سطح چمن، (د) دستور قطع، (ه) سطح خاک و بتن، (و) دستور قطع، (ز) سطح بتن مسلح، (ح) دستور قطع

لازم به ذکر است که وقوع HIF در سطح شن و ماسه دارای جریان خطای ۱۵، چمن ۲۵، خاک و بتن ۵۰ و بتن مسلح ۷۵ آمپر در سمت اولیه ترانسفورماتور جریان است، در حالی که در این شکل جریان‌ها در سمت ثانویه این تجهیز نشان داده شده‌اند. با توجه به نتایج این شکل، روش پیشنهادی به درستی تمامی خطاهای امپدانس بالا در سطوح مختلف را تشخیص داده است.

عملکرد روش پیشنهادی برای شبیه‌سازی‌های مختلف در شرایط غیرنویزی و نویزی در جدول (۳-۵) ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که روش پیشنهادی تمامی اغتشاشات در شرایط غیر نویز را به‌طور کامل تشخیص می‌دهد اما در شرایط نویزی دارای کمی خطا در تشخیص است. به عنوان مثال، در نویز ۲۰ دسی‌بل (شرایط نویزی غیرمتعارف سیستم قدرت)، دقت تشخیص HIF به ازای ۱۰۰۰۰ مورد (۱۰۰ حالت شبیه‌سازی با ۱۰۰ تکرار در هر حالت)، ۰/۳ درصد خطا داشته و در شرایط نویز ۳۰ دسی‌بل، درصد خطا کاملاً قابل چشم‌پوشی می‌باشد. کمترین دقت تشخیص روش پیشنهادی مربوط به ورود بار غیرخطی با خطای ۱ درصد است و در بقیه موارد خطای تشخیص قابل چشم‌پوشی می‌باشد. به عنوان مثال برای نویز ۳۰ دسی‌بل، عملکرد روش پیشنهادی برای شرایط وقوع HIF به این صورت است که این شرایط با دقت ۹۹/۹ درصد با میانگین زمانی ۲/۱۶ میلی‌ثانیه تشخیص داده شده است. در شکل (۴-۵)، نمونه‌ای از عملکرد درست روش پیشنهادی در شرایطی که نویز ۲۰ دسی‌بل روی سیگنال جریان HIF اعمال می‌شود، ارائه شده است. همچنین روش پیشنهادی تمامی حالت‌های مربوط به شرایط عادی (NC) را در شرایط غیرنویزی و نویزی به درستی تشخیص می‌دهد.



شکل (۴-۵): جریان خطای امپدانس بالا در شرایط نویز ۲۰ دسی‌بل، (الف) سیگنال جریان، (ب) دستور قطع

جدول (۳-۵): عملکرد روش پیشنهادی در شبکه IEEE 13-Node در شرایط غیرعادی

شرایط	بدون نویز				نویز ۴۰ دسی بل				نویز ۳۰ دسی بل				نویز ۲۰ دسی بل			
	دقت		زمان عملکرد (ms)		دقت		زمان عملکرد (ms)		دقت		زمان عملکرد (ms)		دقت		زمان عملکرد (ms)	
	(%)	حداقل	حداکثر	میانگین	(%)	حداقل	حداکثر	میانگین	(%)	حداقل	حداکثر	میانگین	(%)	حداقل	حداکثر	میانگین
LIF	۱۰۰	۱/۱۷	۳/۳۸	۱/۲۵	۱۰۰	۱/۱۷	۳/۹	۱/۲۷	۱۰۰	۱/۱۷	۵/۴۶	۱/۴۳	۹۹/۹	۱/۱۷	۷/۶۸	۱/۴۸
HIF	۱۰۰	۱/۱۷	۱۳/۶۷	۱/۹۹	۹۹/۹	۱/۱۷	۱۳/۴۲	۲/۰۱	۹۹/۹	۱/۱۷	۱۳/۶۷	۲/۱۶	۹۹/۷۸	۱/۱۷	۱۳/۹۳	۲/۱۹
CBE	۱۰۰	-	-	-	۱۰۰	-	-	-	۹۹/۹	-	-	-	۹۹/۵	-	-	-
NLE	۱۰۰	-	-	-	۱۰۰	-	-	-	۹۹/۷	-	-	-	۹۹	-	-	-

مطابق با جدول (۳-۵)، نتایج نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که میانگین سرعت تشخیص روش پیشنهادی در تشخیص خطای امپدانس پایین کمتر از ۱/۵ میلی ثانیه است. به عنوان مثال، سرعت تشخیص در شرایط نویز ۲۰ دسی بل، ۱/۴۸ میلی ثانیه به دست آمده است. اگرچه حداکثر زمان تشخیص خطای امپدانس بالا در شرایط نویز ۲۰ دسی بل، ۱۳/۹۳ میلی ثانیه است، اما میانگین زمان تشخیص ۲/۱۹ میلی ثانیه (تقریباً یک‌هشتم سیکل در فرکانس ۶۰ هرتز) می‌باشد که حاکی از آن است در موارد کمی زمان پاک‌سازی خطا در روش پیشنهادی به‌طور نسبی زیاد می‌شود.

بررسی عملکرد روش پیشنهادی در شرایط اشباع CT در تشخیص LIF، مهم و ضروری می‌باشد. ترانسفورماتورهای جریان در واقعیت بلافاصله بعد از وقوع خطا وارد اشباع نمی‌شوند [۹۴]. همچنین با توجه به سرعت تشخیص بالای روش پیشنهادی (حدود ۱/۵ میلی ثانیه) در تشخیص LIF، این خطا قبل از اشباع ترانسفورماتورهای جریان تشخیص داده می‌شوند؛ بنابراین سرعت و دقت تشخیص LIF با در نظر گرفتن اثر اشباع ترانسفورماتور جریان، مشابه زمانی است که اثر اشباع لحاظ نشده باشد.

جدول (۴-۵) به‌طور تفکیک شده، دقت تشخیص روش پیشنهادی برای حالت‌های مختلف را توسط ماتریس درهم‌ریختگی^۱ نشان می‌دهد. مطابق با نتایج ارائه شده در جدول (۴-۵)، روش پیشنهادی در تمام حالات کمتر از ۱ درصد خطا را به ثبت رسانده است. به عنوان مثال، با توجه به این جدول روش پیشنهادی، در شرایط نویز ۲۰ دسی بل ۹۹/۷۸ درصد از موارد شبیه‌سازی شده برای HIF را به عنوان

¹ Confusion Matrix

HIF، ۰/۱۴ درصد (۱۴ عدد از ۱۰۰۰۰ مورد) را به عنوان NLE و ۰/۰۸ درصد (۸ عدد از ۱۰۰۰۰ مورد) را به عنوان CBE تشخیص می‌دهد.

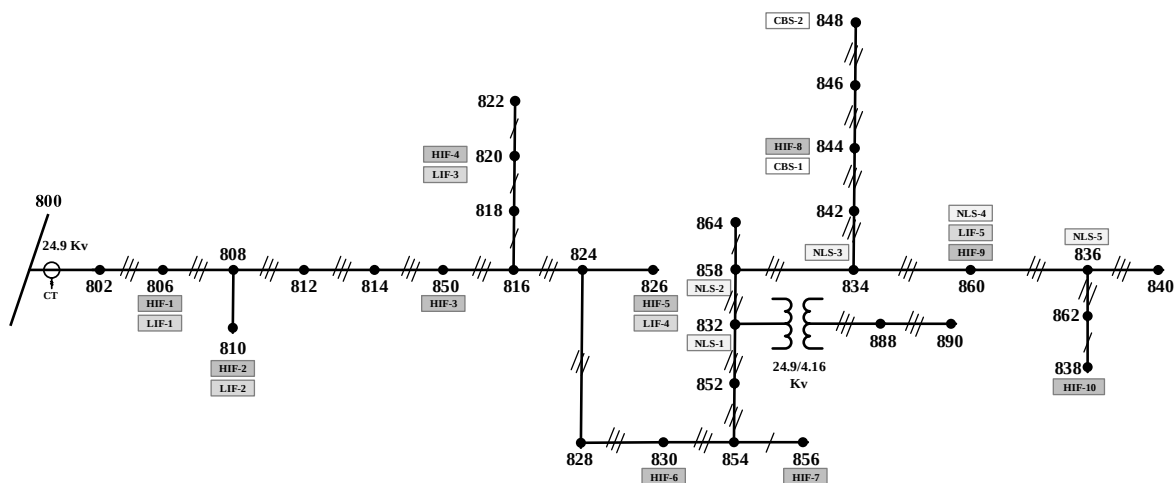
جدول (۴-۵): ماتریس درهم‌ریختگی عملکرد روش پیشنهادی در شبکه IEEE 13-Node در شرایط غیرعادی

تشخیص الگوریتم (%)																	
شرایط نویزی												بدون نویز				اغتشاش	
نویز ۲۰ دسی‌بل				نویز ۳۰ دسی‌بل				نویز ۴۰ دسی‌بل									
NLE	HIF	CBE	LIF	NLE	HIF	CBE	LIF	NLE	HIF	CBE	LIF	NLE	HIF	CBE	LIF	ر خداد شبیه‌سازی شده	
—	—	۰/۱	۹۹/۹	—	—	—	۱۰۰	—	—	—	۱۰۰	—	—	—	۱۰۰		LIF
—	۰/۳	۹۹/۵	۰/۲	—	۰/۱	۹۹/۹	—	—	—	۱۰۰	—	—	—	۱۰۰	—		CBE
۰/۱۴	۹۹/۷۸	۰/۰۸	—	۰/۱	۹۹/۹	—	—	۰/۱	۹۹/۹	—	—	—	۱۰۰	—	—		HIF
۹۹	۱	—	—	۹۹/۷	۰/۳	—	—	۱۰۰	—	—	—	۱۰۰	—	—	—		NLE

۴-۵- شبکه توزیع استاندارد IEEE 34-Node

شبکه توزیع استاندارد IEEE 34-Node به عنوان شبکه تست دیگری برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی تحت شرایط مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۵-۵)، نمودار تک‌خطی این شبکه را نشان می‌دهد. این شبکه که یک فیدر واقعی در آریزونا^۱ کشور آمریکا است که دارای ۴ نوع هادی مختلف، ولتاژ نامی ۲۴/۹ کیلوولت، فرکانس نامی ۶۰ هرتز، بارگذاری سبک و خطوط بلند می‌باشد، به‌طوری که دورترین گره تا منبع ۵۸ کیلومتر فاصله دارد [۹۲]. فرکانس نمونه‌برداری در شبیه‌سازی انجام شده برابر ۷۶۸۰ هرتز است. لازم به ذکر است که در این شبکه نیز ترانسفورماتورهای جریان، در فیدر اصلی شبکه (گره ۸۰۰) با نسبت تبدیل ۲۰۰/۱ قرار دارند. حالت‌های مختلف شبیه‌سازی در جدول (۵-۵) ارائه شده است. به عنوان مثال، تعداد ۲۵۲ حالت برای خطای LIF در فیدرهای مختلف (تک‌فاز و سه‌فاز) شبیه‌سازی می‌گردند. همچنین عملکرد روش پیشنهادی در ۲۵ حالت مختلف در شرایط عادی شبکه بررسی می‌شود. در این شبکه آستانه‌های Tr_{LIF} ، Tr_{HIF} ، Tr_{NLS} و Tr_P به ترتیب برابر با $۱۰^{۱۷}$ ، $۱۰^{۱۵}$ ، $۱۰^{۱۲}$ و $۱۰^{۱۱}$ می‌باشد.

^۱ Arizona



شکل (۵-۵): نمودار تک خطی شبکه توزیع استاندارد IEEE 34-Node [۹۰]

جدول (۵-۵): شرایط شبیه‌سازی انواع اغتشاشات برای شبکه تست IEEE 34-Node

	LIF	CBE	HIF	NLE
نوع خطا	LG,LL,LLG,LLL,LLLG	—	—	—
نوع سطح	—	—	شن و ماسه، چمن، خاک و بتن، علفزار، بتن مسلح	—
زاویه منبع	۰,۴۵,۹۰,۱۳۵	۰,۴۵,۹۰,۱۳۵	۰,۴۵,۹۰,۱۳۵	۰,۴۵,۹۰,۱۳۵
مقاومت خطا (Ω)	۰, ۵, ۱۰, ۵۰, ۱۰۰	—	—	—
مکان اعمال اغتشاش	۸۰۶,۸۱۰,۸۲۰,۸۲۶,۸۶۰	۸۴۴,۸۴۸	۸۰۶,۸۱۰,۸۱۴,۸۲۰,۸۲۶,۸۳۰,۸۵۶,۸۴۶,۸۶۰,۸۳۸	۸۳۲,۸۵۸,۸۳۴,۸۶۰,۸۳۶
مجموع	۲۵۲	۸	۲۰۰	۱۲

جدول (۵-۶)، دقت و زمان تشخیص الگوریتم پیشنهادی در تشخیص اغتشاشات برای شبکه تست IEEE 34-Node نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که تمامی اغتشاشات توسط روش پیشنهادی در شرایط غیر نویزی تشخیص داده می‌شود اما در شرایط نویزی کمی خطا در تشخیص وجود دارد. به‌طور مثال، در شرایط نویز ۳۰ دسی‌بل، دقت تشخیص HIF با ۰/۱۲ درصد خطا همراه بوده است. کمترین دقت تشخیص روش پیشنهادی در این سیستم، مربوط به ۸۰۰ مورد ورود بانک خازنی با خطای ۱ درصد است و در بقیه موارد خطای تشخیص صفر و یا بسیار کم می‌باشد. همچنین تمام حالت‌های مربوط به شرایط عادی در شرایط غیرنویزی و نویزی به کمک روش پیشنهادی به درستی تشخیص می‌دهد. این نتایج، حاکی از دقت بالای روش پیشنهادی می‌باشد.

نتایج جدول (۵-۶)، نشان‌دهنده‌ی این است که میانگین سرعت تشخیص روش پیشنهادی در تشخیص خطای امپدانس پایین کمتر از ۲/۰۳ میلی‌ثانیه است. به عنوان مثال، سرعت تشخیص LIF در شرایط غیرنویزی، ۲/۰۱ میلی‌ثانیه و در شرایط نویز ۲۰ دسی‌بل حدود ۲/۰۳ میلی‌ثانیه می‌باشد. همچنین میانگین زمان عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص HIF، ۴/۱۷ میلی‌ثانیه است.

جدول (۵-۶): عملکرد روش پیشنهادی در شبکه IEEE 34-Node در شرایط غیرعادی

شرایط	بدون نویز				نویز ۴۰ دسی‌بل				نویز ۳۰ دسی‌بل				نویز ۲۰ دسی‌بل			
	دقت (%)		زمان عملکرد (ms)		دقت (%)		زمان عملکرد (ms)		دقت (%)		زمان عملکرد (ms)		دقت (%)		زمان عملکرد (ms)	
	حداقل	حداکثر	میانگین		حداقل	حداکثر	میانگین		حداقل	حداکثر	میانگین		حداقل	حداکثر	میانگین	
LIF	۱۰۰	۱/۱۷	۱۲/۷۶	۲/۰۱	۱۰۰	۱/۴۱	۱۲/۸۹	۲/۰۲	۱۰۰	۱/۵۵	۱۲/۹۵	۲/۰۲	۱۰۰	۱/۷۳	۱۳/۹۳	۲/۰۳
HIF	۱۰۰	۱/۱۷	۱۲/۶۳	۴/۰۷	۹۹/۹	۱/۱۷	۱۴/۳۲	۴/۱۵	۹۹/۸۸	۱/۱۷	۱۶/۴۰	۴/۱۷	۹۹/۸۷	۱/۱۷	۱۸/۳۵	۴/۲۲
CBE	۱۰۰	-	-	-	۱۰۰	-	-	-	۹۹/۱	-	-	-	۹۹	-	-	-
NLE	۱۰۰	-	-	-	۱۰۰	-	-	-	۹۹/۵	-	-	-	۹۹/۲	-	-	-

جدول (۵-۷)، ماتریس درهم‌ریختگی روش پیشنهادی را در تشخیص انواع اغتشاشات غیرعادی نشان می‌دهد. به عنوان مثال، تمامی حالت‌های HIF شبیه‌سازی شده در شرایط غیرنویزی، به عنوان HIF شناخته شده‌اند. در حالی که در شرایط نویز ۲۰ دسی‌بل، ۹۹/۸۷ درصد آن‌ها به عنوان HIF و ۰/۱۳ درصد (۲۶ عدد از ۲۰۰۰۰ مورد (۲۰۰ حالت شبیه‌سازی با ۱۰۰ تکرار در هر حالت)) به عنوان ورود بار غیرخطی (NLE)، تشخیص داده شده‌اند.

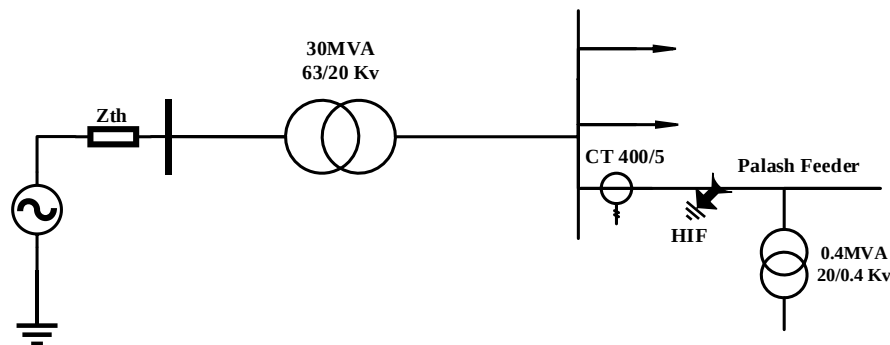
جدول (۵-۷): ماتریس درهم‌ریختگی عملکرد روش پیشنهادی در شبکه IEEE 34-Node در شرایط غیرعادی

تشخیص الگوریتم (%)																
شرایط نویزی												بدون نویز				اغتشاش
نویز ۲۰ دسی‌بل				نویز ۳۰ دسی‌بل				نویز ۴۰ دسی‌بل								
NLE	HIF	CBE	LIF	NLE	HIF	CBE	LIF	NLE	HIF	CBE	LIF	NLE	HIF	CBE	LIF	
—	—	—	۱۰۰	—	—	—	۱۰۰	—	—	—	۱۰۰	—	—	—	۱۰۰	LIF
—	۰/۶	۹۹	۰/۴	—	۰/۴	۹۹/۱	۰/۵	—	—	۱۰۰	—	—	—	۱۰۰	—	CBE
۰/۱۳	۹۹/۸۷	—	—	۰/۱	۹۹/۸۸	۰/۰۲	—	۰/۱	۹۹/۹	—	—	—	۱۰۰	—	—	HIF
۹۹/۲	۰/۸	—	—	۹۹/۵	۰/۵	—	—	۱۰۰	—	—	—	۱۰۰	—	—	—	NLE

ر خداداد شیپه‌سازی شده

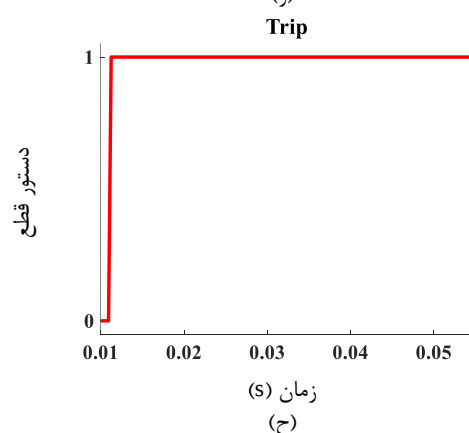
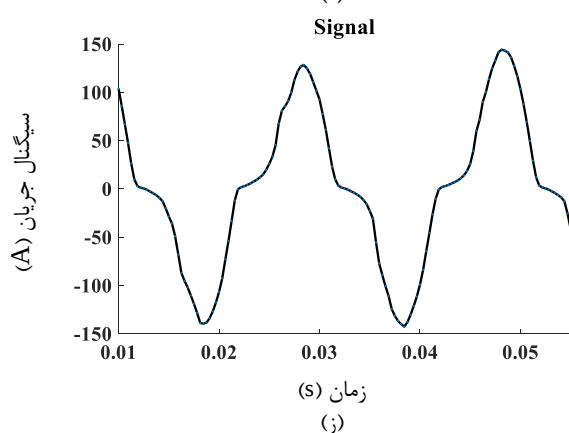
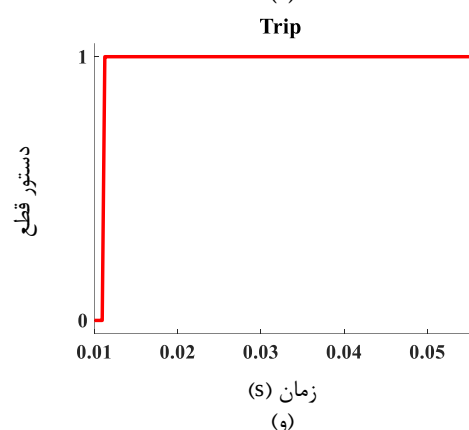
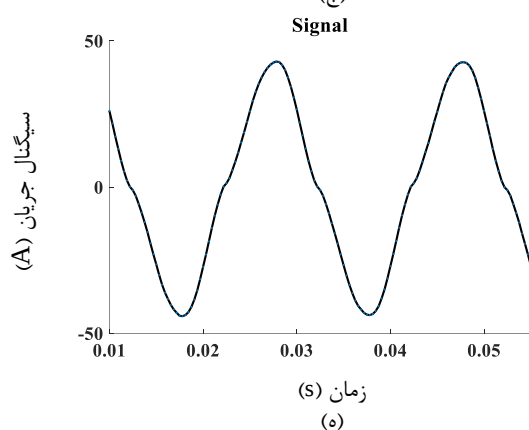
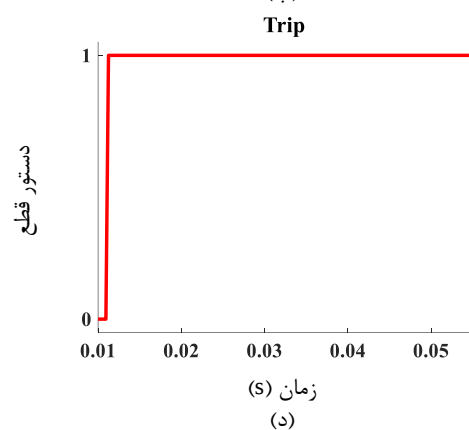
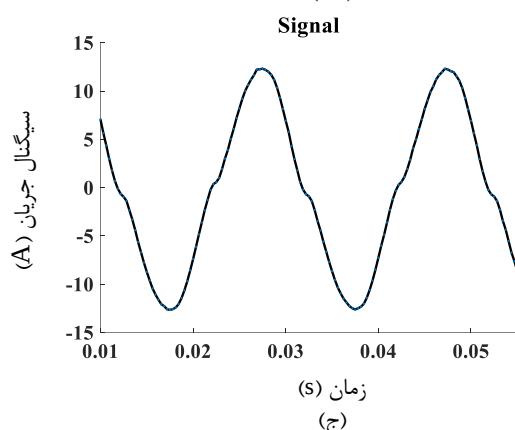
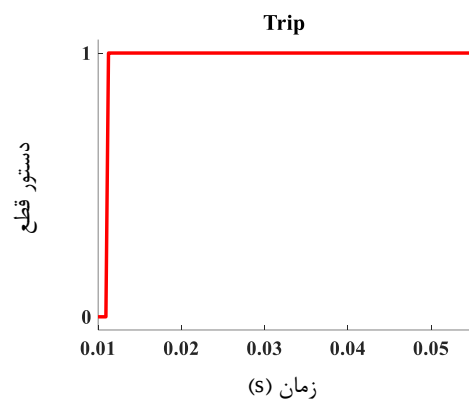
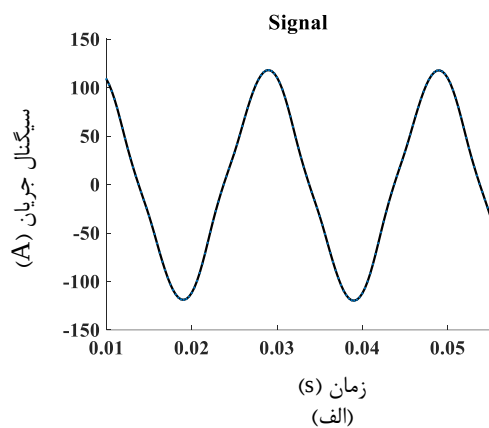
۵-۵- فیدر پالاش

به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص خطای امپدانس بالا در شرایط واقعی، اطلاعات تست واقعی انجام شده بر روی فیدر بدون بار پالاش واقع در جنوب غرب استان تهران جهت انجام این ارزیابی استفاده می‌شود. نمودار تک‌خطی این فیدر در شکل (۵-۴)، ارائه شده است. این فیدر از طریق اتصال به یک ترانسفورماتور قدرت ۶۳/۲۰ کیلوولت با توان نامی ۳۰ مگا ولت‌آمپر و فرکانس ۵۰ هرتز تغذیه می‌گردد. ترانسفورماتور قدرت دارای اتصال ستاره در سمت فشارقوی و مثلث در سمت فشار ضعیف می‌باشد. سیگنال‌های ناشی از وقوع HIF با نرخ نمونه‌برداری ۳۲۰۰ هرتز (۶۴ نمونه در هر سیکل) از طریق دستگاه اندازه‌گیری ION7650 ثبت شده‌اند [۹۳].



شکل (۵-۴): نمودار تک‌خطی فیدر پالاش [۹۳]

شکل (۵-۷)، عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص جریان HIF در اثر برخورد هادی با سطوح ذکر شده را نشان می‌دهد. سیگنال خطای امپدانس بالا برای سطوح مختلف شامل سطح آسفالت با ضخامت ۲۰، سطح بتن با ضخامت ۱۰، سطح ترکیبی شن و ماسه با ضخامت ۱۰ و سطح بتن مسلح با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر توسط دستگاه اندازه‌گیر مذکور ثبت شده است. نتایج حاصل از ارزیابی روش پیشنهادی در اثر وقوع HIF واقعی در فیدر پالاش، حاکی از آن است که روش پیشنهادی خطای امپدانس بالا را روی سطوح مذکور، به درستی با زمان عملکرد حدود ۱/۱ میلی‌ثانیه (حدود یک‌پانزدهم سیکل) تشخیص می‌دهد.



شکل (۷-۵): عملکرد روش پیشنهادی برای جریان HIF واقعی در سطوح مختلف، (الف) سطح آسفالت با ضخامت ۲۰، (ج) سطح شن و ماسه با ضخامت ۱۰، (ه) سطح بتن با ضخامت ۱۰، (ز) سطح بتن مسلح با ضخامت ۲۰ سانتی متر

۵-۶- مقایسه‌ی عملکرد روش پیشنهادی با سایر روش‌ها در تشخیص خطای امیدانس بالا

به منظور مقایسه‌ی زمان و دقت عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص HIF با سایر روش‌ها، جدول (۵-۹) ارائه شده است. با مقایسه‌ی نتایج ارائه شده، مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی دارای زمان تشخیص کمتری نسبت به سایر روش‌ها به جز روش پیشنهادی مرجع [۱۰] می‌باشد. به عنوان مثال، زمان تشخیص HIF در شبکه IEEE 13-Node به کمک روش ارائه شده در [۷۶]، ۵۵ میلی‌ثانیه است، در حالی که در روش پیشنهادی ۲/۰۸ میلی‌ثانیه می‌باشد. لازم به ذکر است که زمان تشخیص ارائه شده در [۱۰] و روش پیشنهادی تقریباً در یک اندازه می‌باشند، اما روش ارائه شده در [۱۰]، علاوه بر نیاز به ترانسفورماتورهای جریان در فیدرهای مختلف، به ترانسفورماتورهای جریان توالی صفر نیز نیازمند است.

جدول (۵-۸): مقایسه‌ی عملکرد روش پیشنهادی با سایر روش‌ها در تشخیص HIF

مراجع	IEEE 13-Node		IEEE 34-Node	
	سرعت (ms)	دقت	سرعت (ms)	دقت
[۷]	۱۷~۵۸۸	%۱۰۰	۱۰~۶۶	%۱۰۰
[۱۰]	۲/۸	%۱۰۰	۲/۸	%۱۰۰
[۷۶]	۵۵	۹۸/۸۵%	-	-
[۸۰]	۳۸~۵۸۸	%۱۰۰	۷/۸~۶۶	%۱۰۰
[۹۵]	۳۰	۹۸/۳۳%	۳۰	۹۸/۸۸%
[۹۶]	۷۶	۹۲/۴۲%	-	-
روش پیشنهادی	۲/۰۸	۹۹/۸%	۴/۱۵	۹۹/۸%

فصل ششم

نتیجہ گیری و پیشہ ہادہ

۵-۷- جمع بندی

خطای امپدانس بالا به عنوان یکی از خطاهای شبکه توزیع با داشتن مقادیر امپدانس بالا در نظر گرفته می شود؛ بنابراین جریان این خطا در مقایسه با خطاهای امپدانس پایین بسیار کم می باشد. در نتیجه رله های اضافه جریان در شناسایی و تشخیص خطای امپدانس بالا ناتوان هستند و دچار اشتباه می شوند. تاکنون روش های زیادی برای تشخیص خطای امپدانس بالا در شبکه توزیع پیشنهاد شده که این روش ها به طور کلی برای موارد خاص پیشنهاد شده و یا اینکه تمامی اغتشاشات مشابه توسط روش ها بررسی نشده اند. بر همین اساس، در این پایان نامه روش جدیدی بر اساس الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته برای تشخیص خطای امپدانس بالا و امپدانس پایین در شبکه توزیع ارائه شده است. جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، اغتشاشات مشابه از جمله ورود بانک خازنی و ورود بار غیرخطی و خطای امپدانس پایین با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان و تأثیر نویز سفید گوسی در دو شبکه توزیع استاندارد IEEE 13-Node و IEEE 34-Node مورد مطالعه قرار گرفته اند. همچنین از اطلاعات وقوع HIF واقعی در فیدر پالاش نیز برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی در شرایط واقعی استفاده شده است. شبیه سازی شبکه های مذکور در نرم افزار EMTP-Rv و پردازش سیگنال های مدنظر در نرم افزار MATLAB انجام شده است.

۵-۸- نتیجه گیری

الگوریتم جداسازی انرژی زمان-گسسته با داشتن پنجره ای اطلاعات کوچک (۵ نمونه ای) و انجام محاسبات ساده، دارای دقت و سرعت بالایی در تشخیص خطای امپدانس بالا و امپدانس پایین از سایر اغتشاشات شبکه توزیع می باشد. روش پیشنهادی دارای دو بخش کلی است که بخش اول شرایط عادی مثل کلیدزنی بار خطی، خروج بانک خازنی و خروج بار غیرخطی را از شرایط غیرعادی تشخیص می دهد. بخش دوم وظیفه ی تشخیص خطاهای امپدانس بالا و امپدانس پایین از شرایط غیرعادی مثل ورود بانک خازنی و ورود بار غیرخطی را بر عهده دارد. در این قسمت تنها برای خطاهای امپدانس بالا و امپدانس

پایین دستور قطع صادر می‌شود و برای حالت‌های دیگر، دستور قطع صادر نمی‌شود. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مختلف، موارد زیر را می‌توان بیان نمود:

- روش پیشنهادی در این پایان‌نامه، برای تشخیص خطاهای امپدانس بالا و امپدانس پایین در شبکه‌های مورد تست و در شرایط غیرنویزی، دارای دقت ۱۰۰ درصد و در شرایط نویز ۲۰ دسی‌بل، خطای تشخیص کمتر از ۱ درصد می‌باشد.
- میانگین سرعت تشخیص خطای امپدانس بالا در بدترین شرایط نویز سفید گوسی (۲۰ دسی‌بل) که با توجه به نویز طبیعی موجود در شبکه قدرت، مقداری نامتعارف است، در شبکه توزیع استاندارد IEEE 13-Node، به طور میانگین ۲/۱۹ میلی‌ثانیه و در شرایط غیرنویزی کمتر از ۲ میلی‌ثانیه می‌باشد. همچنین سرعت تشخیص خطای امپدانس بالا در شبکه توزیع استاندارد IEEE 34-Node، در شرایط نویزی مذکور به طور میانگین ۴/۲۲ میلی‌ثانیه است. در حالی که سرعت تشخیص در شرایط غیرنویزی ۴/۰۷ میلی‌ثانیه می‌باشد.
- روش پیشنهادی دارای دقت تشخیص بیش از ۹۹/۹ درصد در تشخیص خطاهای امپدانس پایین در شرایط عدم اشباع و اشباع ترانسفورماتورهای جریان در شرایط غیرنویزی و نویزی است. همچنین سرعت تشخیص الگوریتم در تشخیص این خطاها در شبکه‌های توزیع استاندارد IEEE 13-Node و IEEE 34-Node به ترتیب به طور میانگین کمتر از ۱/۴۸ میلی‌ثانیه و ۲/۰۳ میلی‌ثانیه در شرایط غیرنویزی و نویزی است. لازم به ذکر است با توجه به سرعت بالای تشخیص روش پیشنهادی، این روش قبل از اشباع شدن ترانسفورماتور جریان، خطاهای امپدانس پایین را تشخیص می‌دهد.
- روش پیشنهادی خطای امپدانس بالا را بر اساس اطلاعات جریانی ثبت شده روی سطوح مختلف شامل سطح آسفالت با ضخامت ۲۰، سطح بتن با ضخامت ۱۰، سطح ترکیبی شن و ماسه با ضخامت ۱۰ و سطح بتن مسلح با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در فیدر پالاش را با زمان عملکرد ۱/۱ میلی‌ثانیه به درستی تشخیص داده است.

۵-۹- پیشنهادها

در پایان، موارد زیر به منظور انجام مطالعات آتی در زمینه‌ی تشخیص خطاهای امپدانس بالا و امپدانس پایین از سایر اغتشاشات شبکه توزیع پیشنهاد می‌شود:

- عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص پدیده‌ی بزرگنمایی در شبکه پایین‌دست، ناشی از ورود بانک خازنی در شبکه بالادست، از خطاهای امپدانس بالا و امپدانس پایین به منظور داشتن عملکرد مناسب سیستم حفاظتی مورد بررسی قرار گیرد.
- تأثیر مدل‌سازی دقیق انواع بارها و انواع منابع تولید پراکنده بر روی عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص انواع اغتشاشات در شبکه توزیع، بررسی شود.
- از روش پیشنهادی جهت استخراج سیگنال‌های مناسب به منظور مکان‌یابی HIF در شبکه توزیع استفاده شود.

- [1] E. H. Allen, R. B. Stuart, and T. E. Wiedman, "No light in August: power system restoration following the 2003 North American blackout", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 12, no. 1, pp. 24-33, 2013.
- [2] B. M. Aucoin, and B. D. Russell, "Distribution high impedance fault detection utilizing high frequency current components", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no. 6, pp. 1596-1606, 1982.
- [3] A. Samanfar, and B. Mahamedi, "Directional high-resistance earth fault detector based on zero-sequence components and wavelet transform", *IEEE International Conference on Power and Energy*, pp. 151-155, 2010.
- [4] D. Hou, and N. Fischer, "Deterministic high-impedance fault detection and phase selection on ungrounded distribution systems", *Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*, pp. 112-122, 2006.
- [5] A. Sultan, G. Swift, and D. J. Fedirchuk, "Detecting arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle asymmetry", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 1, pp. 461-470, 1994.
- [6] D. Yu, and S. H. Khan, "An adaptive high and low impedance fault detection method", *IEEE transactions on power delivery*, vol. 9, no. 4, pp. 1812-1821, 1994.
- [7] S. Gautam, and S. M. Brahma, "Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1226-1234, 2012.
- [8] S. Kavaskar, and N. K. Mohanty, "Detection of high impedance fault in distribution networks", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 5-13, 2019.
- [9] M. Mishra, R. R. Panigrahi, and P. K. Rout, "A combined mathematical morphology and extreme learning machine techniques based approach to micro-grid protection", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 307-318, 2019.
- [10] X. Wang, J. Gao, X. Wei, G. Song, L. Wu, J. Liu, Z. Zeng, and M. J. Kheshti, "High impedance fault detection method based on variational mode decomposition and Teager-Kaiser energy operators for distribution network", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 6, pp. 6041-6054, 2019.
- [11] O. E. Batista, R. A. Flauzino, M. A. de Araujo, L. A. de Moraes, and P. da Silva, "Methodology for information extraction from oscillograms and its application for high-impedance faults analysis", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 76, pp. 23-34, 2016.
- [12] R. B. Grimaldi, T. S. Chagas, J. Montalvao, N. S. Brito, W. C. dos Santos, and T. Ferreira, "High impedance fault detection based on linear prediction", *Electric Power Systems Research*, vol. 190, pp. 106846, 2021.
- [13] C. Benner, P. Carswell, and B. Russell, "Improved algorithm for detecting arcing faults using random fault behavior", *Electric Power Systems Research*, vol. 17, no. 1, pp. 49-56, 1989.
- [14] A. Soheili, J. Sadeh, H. Lomei, and K. Muttaqi, "A new high impedance fault detection scheme: Fourier based approach", *IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, pp. 1-6, 2016.
- [15] A. Soheili, J. Sadeh, and R. Bakhshi, "Modified FFT based high impedance fault detection technique considering distribution non-linear loads: Simulation and experimental data analysis", *International Journal of Electrical Power & Energy*

- Systems, vol. 94, pp. 124-140, 2018.
- [16] C. Kim, B. D. Russell, and K. Watson, "A parameter-based process for selecting high impedance fault detection techniques using decision making under incomplete knowledge", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 3, pp. 1314-1320, 1990.
 - [17] T. Cui, X. Dong, Z. Bo, and S. Richards, "Integrated scheme for high impedance fault detection in MV distribution system", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 1-6, 2008.
 - [18] S. M. Shahrtash, and M. Sarlak, "High impedance fault detection using harmonics energy decision tree algorithm", *International Conference on Power System Technology (Chongqing, China)*, pp. 1-5, 2006.
 - [19] M. T. Chen, H. Y. Chu, C. L. Huang, and F. Wu, "Performance evaluation of high impedance fault detection algorithms based on staged fault tests", *Electric Power Systems Research*, vol. 18, no. 1, pp. 75-82, 1990.
 - [20] S. Aliouat, W. Korzet, A. Nacer, K. Boudjit, and H. Moulai, "Detection of high impedance faults in electrical power network", *3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)*, pp. 1-6, 2015.
 - [21] A. Girgis, W. Chang, and E. Makram, "Analysis of high-impedance fault generated signals using a Kalman filtering approach", *IEEE Transactions on Power delivery*, vol. 5, no. 4, pp. 1714-1724, 1990.
 - [22] A. Lazkano, J. Ruiz, E. Aramendi, and L. Leturiondo, "A new approach to high impedance fault detection using wavelet packet analysis", *International Conference on Harmonics and Quality of Power*, pp. 1005-1010, 2000.
 - [23] S. J. Huang, and C. T. Hsieh, "High-impedance fault detection utilizing a Morlet wavelet transform approach", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 4, pp. 1401-1410, 1999.
 - [24] F. B. Costa, B. Souza, N. Brito, J. Silva, and W. Santos, "Real-time detection of transients induced by high-impedance faults based on the boundary wavelet transform", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 6, pp. 5312-5323, 2015.
 - [25] T. A. Ramamurthy, and K. S. Swarup, "High Impedance Fault detection using DWT for transmission and distribution networks", *IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, pp. 1-6, 2016.
 - [26] A. Etemadi, and M. Sanaye-Pasand, "High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system", *IET generation, transmission & distribution*, vol. 2, no. 1, pp. 110-118, 2008.
 - [27] M. Mishra, P. Routray, and P. kumar, "A universal high impedance fault detection technique for distribution system using S-transform and pattern recognition", *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 1-14, 2016.
 - [28] E. M. Lima, N. Brito, and B. de Souza, "High impedance fault detection based on Stockwell transform and third harmonic current phase angle", *Electric Power Systems Research*, vol. 175, pp. 105931, 2019.
 - [29] P. Routray, M. Mishra, and P. Rout, "High impedance fault detection in radial distribution system using S-transform and neural network", *IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC)*, pp. 545-551, 2015.
 - [30] J. Y. Cheng, S. J. Huang, and C. T. Hsieh, "Application of Gabor–Wigner transform to inspect high-impedance fault-generated signals", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 192-199, 2015.

- [31] J. da Silva, F. B. Costa, W. C. Santos, W. L. Neves, and B. A. Souza, "High impedance fault location-case study using wavelet transform and artificial neural networks", International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 2013.
- [32] Y. Li, X. Meng, and X. Song, "Application of signal processing and analysis in detecting single line-to-ground (SLG) fault location in high-impedance grounded distribution network", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 2, pp. 382-389, 2016.
- [33] S. Wang, and P. J. I. T. o. I. A. Dehghanian, "On the use of artificial intelligence for high impedance fault detection and electrical safety," vol. 56, no. 6, pp. 7208-7216, 2020.
- [34] I. Nikoofekr, M. Sarlak, and S. Shahrtash, "Detection and classification of high impedance faults in power distribution networks using ART neural networks", 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 1-6, 2013.
- [35] K. Yang, R. Zhang, J. Yang, C. Liu, S. Chen, and F. Zhang, "A novel arc fault detector for early detection of electrical fires", vol. 16, no. 4, pp. 500, 2016.
- [36] M. Aucoin, "Status of high impedance fault detection", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, no. 3, pp. 637-644, 1985.
- [37] M. Aucoin, B. Russell, and C. Benner, "High impedance fault detection for industrial power systems", *Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1788-1792, 1989.
- [38] A. Ghaderi, H. L. Ginn, and H. Mohammadpour, "High impedance fault detection: A review", Electric Power Systems Research, vol. 143, pp. 376-388, 2017.
- [39] J. L. Guardado, V. Torres, S. Maximov, and E. Melgoza, "Analytical approach to modelling the interaction between power distribution systems and high impedance faults", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 12, no. 9, pp. 2190-2198, 2018.
- [40] A. Lazkano, J. Ruiz, E. Aramendi, L. Leturiondo, and J. Gonzalez, "Study of high impedance fault detection in Levante area in Spain", International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 1011-1016.
- [41] N. I. Elkalashy, M. Lehtonen, H. A. Darwish, M. A. Izzularab, I. 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.
- [42] M. Carpenter, R. Hoad, T. D. Bruton, R. Das, S. A. Kunsman, and J. Peterson, "Staged-fault testing for high impedance fault data collection", 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp. 9-17, 2005.
- [43] A. R. Sedighi, M. R. Haghifam, O. Malik, and M. H. Ghassemian, "High impedance fault detection based on wavelet transform and statistical pattern recognition", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 4, pp. 2414-2421, 2005.
- [44] M. Adamiak, C. Wester, M. Thakur, and C. Jensen, "High impedance fault detection on distribution feeders", *GE Industrial solutions*, 2006.
- [45] B. D. Russell, and C. Benner, "Arcing fault detection for distribution feeders: security assessment in long term field trials", IEEE Transactions on power delivery, vol. 10, no. 2, pp. 676-683, 1995.
- [46] M. Mishra, and R. Panigrahi, "Taxonomy of high impedance fault detection algorithm", Measurement, vol. 148, pp. 106955, 2019.
- [47] S. J. Shiller, "High impedance fault arcing on sandy soil in 15kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 2, 1990.

- [48] A. Hamel, A. Gaudreau, and M. J. Cote, "Intermittent arcing fault on underground low-voltage cables", IEEE transactions on power delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1862-1868, 2004.
- [49] D. Wai, and X. Yibin, "A novel technique for high impedance fault identification", IEEE Transactions on Power delivery, vol. 13, no. 3, pp. 738-744, 1998.
- [50] N. Zamanan, and J. K. Sykulski, "Modelling arcing high impedances faults in relation to the physical processes in the electric arc", WSEAS Transactions on power systems, vol. 1, no. 8, pp. 1507-1512, 2006.
- [51] W. Santos, F. Lopes, N. Brito, B. Souza, D. Fernandes Jr, and W. Neves, "High impedance fault detection and location based on electromagnetic transient analysis", International Conference on Power Systems Transients (IPST), 2013.
- [52] A. Ghaderi, H. A. Mohammadpour, H. L. Ginn, and Y. Shin, "High-impedance fault detection in the distribution network using the time-frequency-based algorithm", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 3, pp. 1260-1268, 2014.
- [53] G. Parise, U. Grasselli, and V. Di Luozzo, "Arcing fault in sub-distribution branch-circuits", IEEE transactions on power delivery, vol. 8, no. 2, pp. 580-583, 1993.
- [54] E. Acha, A. Semlyen, and N. Rajakovic, "A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its application to electric arcs", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 3, pp. 1390-1397, 1990.
- [55] T. Lai, L. Snider, E. Lo, and D. Sutanto, "High-impedance fault detection using discrete wavelet transform and frequency range and RMS conversion", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 397-407, 2005.
- [56] T. Marxsen, "Power line bushfire safety program", Department of Economic Development, Jobs, Transport and Resources, 2015.
- [57] A. Sedighi, and M. Haghifam, "Simulation of high impedance ground fault in electrical power distribution systems", International Conference on Power System Technology, pp. 1-7, 2010.
- [58] A. Sharat, L. Snider, and K. Debnath, "A neural network based back error propagation relay algorithm for distribution system high impedance fault detection", 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, pp. 613-620, 1993.
- [59] R. Paththamperuma, I. Perera, K. Perera, C. Perera, N. De Silva, and U. Javatunga, "High impedance arcing fault detection in low voltage distribution network", Faculty of Engineering Research Unit (ERU & MERCon), 2010.
- [60] Y. Sheng, and S. Rovnyak, "Decision tree-based methodology for high impedance fault detection", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 2, pp. 533-536, 2004.
- [61] T. Lai, L. Snider, and E. J. Lo, "Wavelet transform based relay algorithm for the detection of stochastic high impedance faults", Electric power systems research, vol. 76, no. 8, pp. 626-633, 2006.
- [62] M. Michalik, W. Rebizant, M. Lukowicz, S. J. Lee, and S. H. Kang, "Wavelet transform approach to high impedance fault detection in MV networks", IEEE Russia Power Tech, pp. 1-7, 2005.
- [63] T. Cui, X. Dong, Z. Bo, A. Klimek, and A. Edwards, "Modeling study for high impedance fault detection in MV distribution system", 43rd International Universities Power Engineering Conferences, pp. 1-5, 2008.
- [64] E. Camm, "Shunt capacitor overvoltages and a reduction technique", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition New Orleans, pp. 180-T72, 1999.
- [65] I. S, "IEEE guide for application of shunt power capacitors", 2011.

- [66] C. G. Wester, "High impedance fault detection on distribution systems", Rural Electric Power Conference Presented at 42nd Annual Conference, pp. c5-1, 1998.
- [67] J. Carr, and G. Hood, "High impedance fault detection on primary distribution systems", CEA Final Report, Project, no. 78-75, 1979.
- [68] J. Carr, "Detection of high impedance faults on multi-grounded primary distribution systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, no. 4, pp. 2008-2016, 1981.
- [69] H. Calhoun, M. T. Bishop, C. H. Eichler, and R. E. Lee, "Development and testing of an electro-mechanical relay to detect fallen distribution conductors", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, no. 6, pp. 1643-1650, 1982.
- [70] M. Karimi, and N. Ghaffarzadeh, "High impedance fault detection based on current harmonic analysis using Chirp Z transform", Energy Systems, pp. 1-21, 2021.
- [71] É. M. Lima, R. de Almeida Coelho, N. S. Brito, and B. A. de Souza, "High impedance fault detection method for distribution networks under non-linear conditions", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 131, pp. 107041, 2021.
- [72] A. Nakho, K. Moloi, and Y. Hamam, "High Impedance Fault Detection Based on HS-Transform and Decision Tree Techniques", Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA), pp. 1-5, 2021.
- [73] M. R. Haghighi, A. R. Sedighi, and O. Malik, "Development of a fuzzy inference system based on genetic algorithm for high-impedance fault detection", IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 153, no. 3, pp. 359-367, 2006.
- [74] A. J. Graps, "An introduction to wavelets", IEEE computational science and engineering, vol. 2, no. 2, pp. 50-61, 1995.
- [75] C. T. Hsieh, J. M. Lin, and S. Huang, "Enhancement of islanding-detection of distributed generation systems via wavelet transform-based approaches", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 30, no. 10, pp. 575-580, 2008.
- [76] S. Roy, and S. Debnath, "PSD based high impedance fault detection and classification in distribution system", Measurement, vol. 169, pp. 108366, 2021.
- [77] A. F. Sultan, G. W. Swift, and D. Fedirchuk, "Detection of high impedance arcing faults using a multi-layer perceptron", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 4, pp. 1871-1877, 1992.
- [78] K. Rai, F. Hojatpanah, F. Badrkhani Ajaei, and K. J. Grolinger, "Deep Learning for High-Impedance Fault Detection: Convolutional Autoencoders", Energies, vol. 14, no. 12, pp. 3623, 2021.
- [79] A. Anand, and S. Affijulla, "Hilbert-Huang transform based fault identification and classification technique for AC power transmission line protection", International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 30, no. 10, pp. e12558, 2020.
- [80] A. T. Langeroudi, and M. Abdelaziz, "Preventative high impedance fault detection using distribution system state estimation", Electric Power Systems Research, vol. 186, pp. 106394, 2020.
- [81] Z. German-Sallo, and G. Strnad, "Machinery fault diagnosis using signal analysis", Procedia Manufacturing, vol. 32, pp. 585-590, 2019.
- [82] Z. Feng, F. Chu, and M. Zuo, "Time-frequency analysis of time-varying modulated signals based on improved energy separation by iterative generalized demodulation", Journal of Sound and Vibration, vol. 330, no. 6, pp. 1225-1243, 2011.

- [83] Z. Feng, M. Liang, Y. Zhang, and S. Hou, "Fault diagnosis for wind turbine planetary gearboxes via demodulation analysis based on ensemble empirical mode decomposition and energy separation", *Renewable Energy*, vol. 47, pp. 112-126, 2012.
- [84] Z. Feng, S. Qin, and M. Liang, "Time–frequency analysis based on Vold-Kalman filter and higher order energy separation for fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox under nonstationary conditions", *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 45-56, 2016.
- [85] Y. Qin, "Multicomponent AM–FM demodulation based on energy separation and adaptive filtering", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 38, no. 2, pp. 440-459, 2013.
- [86] S. M. L. Moosavi, Y. Damchi, and M. Assili, "A new fast method for improvement of power transformer differential protection based on discrete energy separation algorithm", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 136, pp. 107759, 2022.
- [87] J. F. Kaiser, "On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal", *International conference on acoustics, speech, and signal processing*, pp. 381-384, 1990.
- [88] P. Maragos, J. F. Kaiser, and T. Quatieri, "Energy separation in signal modulations with application to speech analysis", *IEEE transactions on signal processing*, vol. 41, no. 10, pp. 3024-3051, 1993.
- [89] Y. Litvin, I. Cohen, and D. Chazan, "Monaural speech/music source separation using discrete energy separation algorithm", *Signal Processing*, vol. 90, no. 12, pp. 3147-3163, 2010.
- [90] W. Kersting, "Radial distribution test feeders", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 975-985, 1991.
- [91] T. Ji, Q. He, M. Shi, M. Li, and Q. Wu, "CT saturation detection and compensation using mathematical morphology and linear regression", *IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia)*, pp. 1054-1059, 2016.
- [92] S. H. Mortazavi, Z. Moravej, and S. M. Shahrtash, "A searching based method for locating high impedance arcing fault in distribution networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 2, pp. 438-447, 2018.
- [93] M. Sarlak, S. M. Shahrtash, "High impedance fault detection using combination of multi-layer perceptron neural networks based on multi-resolution morphological gradient features of current waveform", *IET generation, transmission & distribution*, vol. 5, no. 5, pp. 588-595, 2011.
- [94] ABB, "Transformer protection RET670, Version 2.1 IEC: Technical manual", 2016.
- [95] K. Sekar and N. Mohanty, "Combined mathematical morphology and data mining based high impedance fault detection", *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 417-423, 2017.
- [96] V. Veerasamy, V. Wahab, and M. Othman, "LSTM recurrent neural network classifier for high impedance fault detection in solar PV integrated power system", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 32672-32687, 2021.

Abstract

Due to the low fault current, High Impedance Faults (HIF) are among those types of faults which could not being identified by conventional overcurrent relays. This type of fault occurs when the energized conductor is cut off and makes contact with a high impedance area, namely earth, asphalt, grass, sands, and trees. It is very possible that these faults result in unpleasant events like flashovers, conflagration, risk of life, and determination of power elements. Different approaches have been proposed in distribution system to identify HIF from capacitor bank switching and nonlinear loads which neither are easily implementable nor have an appropriate performance in all scenarios. Alongside the identification of HIFs, identification of low impedance faults is a significant task in power system. In this thesis, a novel method based on Discrete-time Energy Separation Method is proposed to identify the high impedance faults. The proposed method has two major sections, the first section identifies the normal condition like normal load switching, capacitor bank and nonlinear loads outage from abnormal conditions. Second part must identify high and low impedance faults from abnormalities like applying capacitor bank and nonlinear loads. High identification speed (2-4 milliseconds), simple implementation, and low computation burden possible the real-time implementation of the proposed method. To assess the proposed method, different similar disturbances under noisy conditions and by considering the saturation of the current transformer in identification of low impedance faults have been simulated in EMTP-Rv and have been processed in MATLAB. Results show that the performance of the proposed method has a high efficiency in identification of high and low impedance faults from other disturbances even in noisy condition. This method can also identify the low impedance fault by consideration of saturation of the current transformer.

Index terms- Distribution Grid, High Impedance Fault, Low Impedance Fault, Discrete-time Energy Separation Method, Capacitor Bank, Nonlinear Load.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical Engineering

MSc Thesis in Electrical Power System Engineering

**High Impedance Fault Detection in Power
Distribution Systems Using Discrete-Time Energy
Separation Method**

By:

Seyed Alireza Alaei

Supervisor:

Dr. Yaser Damchi

December 2021