

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۲۱

روشی هوشمند برای حفاظت ریزش شبکه‌های DC چندپایانه‌ای با استفاده از phaselet آنلاین، ریخت‌شناسی ریاضی و سیستم استنتاج فازی

مصطفی دودانگه^۱، نوید غفارزاده^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

mostafadodangh@edu.ikiu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

ghaffarzadeh@eng.ikiu.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی جدید برای تشخیص خطا و تعیین محل خطا در ریزش شبکه DC چندپایانه‌ای (MTDC) ارائه شده است. مسائلی از جمله گسترش منابع و بارهای DC و تلاش برای افزایش کیفیت توان باعث گسترش شبکه‌های MTDC شده است. تشخیص انواع و محل خطا برای تداوم سرویس‌دهی و جلوگیری از خرابی بیشتر مورد اهمیت است. در این روش یک کیت مداری به شبکه متصل می‌شود. در صورت رخداد خطا در شبکه با عبور جریان از کیت‌های متصل شده و اندازه‌گیری امواج سیار مشتق جریان خطا و اعمال آن به یک فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی، تشخیص خطا صورت می‌گیرد. تعیین محل خطا با استفاده از معادلات مداری و محاسبات جریانی صورت می‌گیرد. در تعیین نوع خطا از خروجی phaselet و سیستم استنتاج فازی استفاده شده است. روش ارائه شده در یک ریزش شبکه MTDC متصل به منابع ذخیره‌کننده و تجدیدپذیر انرژی با خطاهای بسیاری آزموده شد. نتایج بیان‌کننده صحت روش پیشنهادی است. خطای روش پیشنهادی کمتر از ۷ درصد است. و نسبت به تغییر فرکانس نمونه‌برداری (بین ۵۰۰ هرتز تا ۵۰ کیلوهرتز)، مقاومت خطا (تا ۱۲۵ اهم) و بارگذاری (تا ۱۲۰٪ بار نامی) به صورت مقاوم عمل می‌کند و در خطاهای با امپدانس بالا عملکرد بسیار خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: حفاظت ریزش شبکه MTDC، سیستم استنتاج فازی، دسته‌بندی خطا، تشخیص و تعیین محل خطا، تزریق جریان، phaselet آنلاین و فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی.

۱. مقدمه

قدرت جهت تزریق سیگنال AC ارائه شده است [۱۶ و ۲۱-۲۴]. در این روش‌ها از سوئیچ‌های موجود در مبدل به‌عنوان کلید قدرت DC استفاده می‌شود. در جدول (۱) به بررسی و مقایسه روش‌های موجود پرداخته شده است.

اتصال منابع تولید پراکنده سبب پیدایش شبکه‌های مدرن توزیع انرژی الکتریکی شد. با گسترش و تنوع منابع تولید انرژی تجدیدپذیر، شبکه‌های مدرن انرژی الکتریکی نیز متنوع‌تر شدند. ظهور، بروز و گسترش منابع تولید انرژی پاک و شبکه‌های مدرن سبب کاهش تولید مواد آلاینده حفظ محیط‌زیست، کاهش تلفات و... بوده و مشکلاتی در زمینه کنترل و حفاظت شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی ایجاد می‌کند. یکی از انواع شبکه‌های مدرن توزیع، ریزشبه DC چندپایانه‌ای (MTDC) است که با گسترش منابع تولید و بارهای جریان مستقیم به وجود آمد.

جدول (۱): مقایسه مزایا و معایب روش‌های موجود

[۱]	کاهش ولتاژ و اضافه جریان و نرخ تغییرات	کاربرد در شبکه‌های متداول	عدم کاربرد در شبکه‌های مدرن
[۲]	جریان و نرخ تغییرات	استفاده از پارامترهای دو طرف خط	نیاز به پارامترهای دو طرف
[۳]	جریان	استفاده از تبدیل موجک گسسته	وابستگی روش به اندازه‌گیری ولتاژ، افزایش قیمت و پیچیدگی نسبت به حفاظت جریان زیاد
[۴]	استفاده از پارامترهای دو طرف خط	کاربرد در شبکه‌های هوشمند	نیاز به پارامترهای دو طرف
[۵]	استفاده از تبدیل موجک گسسته	استفاده از تابع جریان ساده، تشخیص خط امپدانس بالا و شناسایی انواع خط	وابستگی روش به اندازه‌گیری ولتاژ، افزایش قیمت و پیچیدگی نسبت به حفاظت جریان زیاد
[۶]	استفاده از روش اضافه جریان و مبدل الکترونیک قدرت به‌عنوان بریکر	کاربرد در شبکه MTDC استفاده از اندازه‌گیری‌های محلی	وابستگی روش به نوع مبدل الکترونیک قدرت
[۱۲]	استفاده از جهت جریان DC و چندین رله هوشمند الکترونیکی	ترکیب رله‌ها با کلیدهای حالت جامد برای تشخیص و تعیین محل خطا DC بررسی چالش‌های کلیدی با روش‌های حفاظت پیشرفته	پیچیدگی روش پیشنهادی و استفاده از چندین رله عدم کارایی در ریزشبه‌هایی که قسمتی از آن شبکه AC است.
[۲۸]	روشی متمرکز برای حفاظت از شبکه‌های توزیع ولتاژ پایین DC	کاهش تعداد کلیدهای DC	کاهش قدرت مانوری و بهره‌برداری افزایش پارامترهایی همچون انرژی از دست‌رفته و خاموشی کاهش قابلیت اعتماد
[۱۶]	استفاده از حفاظت دیفرانسیل	کاربرد در شبکه MTDC	پیچیدگی روش طبقه‌بندی سرعت کم
[۹]	استفاده از تبدیل موجک در آنالیز خطا در خطوط انتقال	بهبود عملکرد زمان واقعی مدل در LabVIEW	وابستگی عملکرد به استفاده از تجهیزات ساخته شده
[۱۰]	استفاده از سیستم استنتاج فازی در حفاظت و آنالیز خطا در خطوط انتقال	سرعت بالا و پیچیدگی کمتر با استفاده از سیستم استنتاج فازی	نیاز به اندازه‌گیری از جریان و ولتاژ افزایش قیمت
[۷]	استفاده از امواج سیار برای حفاظت خطوط انتقال مولاری	سرعت بالا	وابستگی روش به محل رخداد خطا
[۱۱]	استفاده از SVM برای حفاظت از خطوط HVDC	سادگی روش نیاز به اطلاعات یک سمت از خط انتقال	وابستگی به ولتاژ و جریان افزایش قیمت
[۸]	استفاده از تبدیل موجک، فوریه و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تخمین محل خطا	کاهش زمان آموزش شبکه عصبی با استفاده از تبدیل فوریه	وابستگی به ولتاژ و جریان افزایش قیمت
[۱۲]	حفاظت خطوط کابلی AC زیرزمینی با تبدیل موجک	بررسی خطای امپدانس بالا دقت بالا	عدم بررسی تأثیر نویز
[۱۴]	حفاظت از شبکه توزیع DC با مبدل الکترونیک قدرت مجهز به محدودکننده جریان خطا	سریع و هوشمند برای حفاظت از شبکه توزیع DC	وابستگی روش به مبدل الکترونیک قدرت مجهز به محدودکننده جریان خطا

روش‌های مرسوم حفاظت بر پایه کاهش ولتاژ و اضافه جریان [۱] و [۲] و نرخ تغییرات ولتاژ یا جریان [۳] حتی بدون عملکرد مناسب در خط‌های با امپدانس بالا یا نبود کانال‌های مخابراتی قابل اعتماد برای حفاظت شبکه‌های MTDC استفاده شده است. حفاظت اضافه جریان پسو با استفاده از تبدیل موجک گسسته برای تشخیص و طبقه‌بندی انواع خطا ارائه شده است [۴]. با وجود این هیچ‌یک از روش‌های ارائه شده سرعت مناسبی برای حفاظت از ریزشبه DC ارائه نمی‌دهد [۳] و [۵]. مرجع [۶] از حفاظتی بر مبنای اضافه جریان جهت برای حفاظت کاهش ولتاژ در شبکه‌های ولتاژ پائین DC ارائه کرده است. قابلیت اطمینان برخی از روش‌های بالا نسبت به اختلالات مخابراتی کم است. کاربرد فیبر نوری مخابراتی با پهنای باند زیاد در ریزشبه MTDC بسیار گران‌قیمت و غیرقابل اجراست.

روش‌های حفاظتی بر پایه امواج سیار به‌طور گسترده در تشخیص خطاهای خطوط انتقال استفاده می‌شود [۷ و ۸]. در برخی روش‌ها تبدیل موجک با روش‌های هوشمند همچون سیستم‌های استنتاج فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی ترکیب شده و این امر جهت بهبود کارایی روش ارائه شده می‌شود [۷-۱۴]. بعضی از این روش‌ها وابسته به محل رخداد خطا و زمان رسیدن امواج سیار هستند [۱۵].

تعیین محل خطا در ریزشبه MTDC به دلیل وجود انشعابات متعدد و با طول کم باید با دقت بالایی انجام شود. در مراجع [۱۶] و [۱۷] روش حفاظت با سیار در شبکه‌های توزیع DC ارائه شده است. روشی با استفاده از تقریب امپدانس واقعی در یک شبکه ارائه شده است. در مراجع [۱۸-۲۰] روش‌های تشخیص افت ولتاژ در ریزشبه MTDC با استفاده از حفاظت شبکه در محل اتصال به منابع تولید توان ارائه شده است. برخی از روش‌های حفاظت از با سیار متصل به تولیدات پراکنده بر اساس مبدل‌های الکترونیک

است. در صورتی که خطایی در شبکه رخ ندهد، با توجه به ولتاژ و جریان DC شبکه و مقادیر المان‌های کیت متصل شده جریانی از آن عبور نمی‌کند. در صورت رخداد خطا با توجه به نوسانات جریان و ولتاژ شبکه، از کیت مذکور جریان عبور می‌کند.

معادله جریان قسمتی از شبکه که دچار خطا شده، به صورت رابطه (۱) و (۲) است.

$$\frac{d^2 i_p(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di_p(t)}{dt} + \frac{1}{LC} i_p(t) = 0 \quad (1)$$

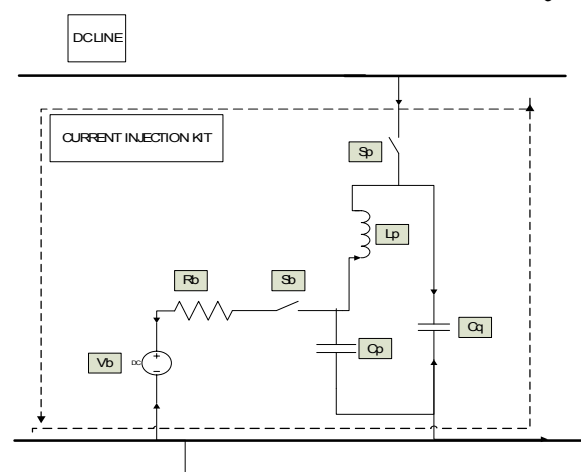
$$i_p(t) = M_1 e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t) + M_2 e^{-\alpha t} \cos(\omega_d t) \quad (2)$$

$$(3)$$

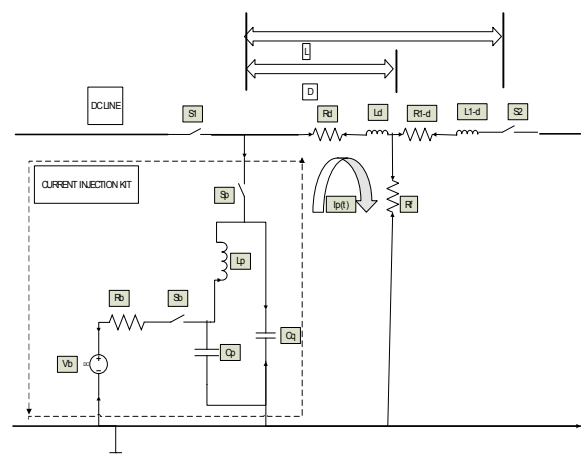
$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \alpha^2} \quad \alpha = \frac{R}{2L}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{L_d + C_q}{C_p(C_q L_d + C_q L_p + L_d L_p)}}$$

با توجه به وابستگی امپدانس خط به طول، فرکانس طبیعی به صورت رابطه (۳) است.



شکل (۱): کیت تزریق جریان ارائه شده



شکل (۲): مدار معادل شبکه و کیت در حالت رخداد خطا

با توجه به موارد اشاره شده و جدول (۱) نیاز به روشی دقیق بدون نیاز به کانال‌های مخابراتی سرعت بالا، پارامترهای دو طرف و مناسب حفاظت از ریزش‌های MTDC با انشعابات متعدد روشن است.

در این مقاله، روشی هوشمند با دقت بالا برای محلیابی خطا در ریزش‌های MTDC با استفاده از تزریق جریان و ریخت‌شناسی ریاضی ارائه شد. با استفاده از امواج سیار حاصل از تبدیل phaselet آنالیز و ریخت‌شناسی ریاضی رخداد خطا تشخیص داده می‌شود. نوع خطا با خروجی phaselet و سیستم استنتاج فازی تعیین می‌گردد. ضریب کاهش α بر مبنای نمونه‌گیری از مشتق جریان خطا در شبکه محاسبه می‌شود. این روش در یک ریزش‌شبکه MTDC با خطاهای بسیاری آزموده شد. خطاهای مورد مطالعه در خطوط با سطح ولتاژ متفاوت، و فواصل متفاوت از انواع نیروگاه‌های با توان‌های مختلف و ساختار شبکه متنوع اعمال شده و بیان‌کننده دقت و صحت روش پیشنهادی است.

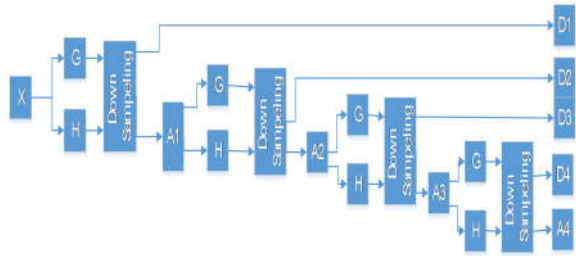
در بخش دوم مقاله به ارائه کیت تزریق جریان و معادلات مداری و ابزار ریاضی مورد استفاده در روش پیشنهادی به ترتیب استفاده پرداخته شده است. بخش سوم پس از شبیه‌سازی شبکه مورد مطالعه و انواع خطا، نتایج روش دسته‌بندی و تعیین محل خطا برای انواع خطا را ارائه می‌دهد. تأثیر مقاومت خطا و خطای امپدانس بالا بر روش پیشنهادی در بخش‌های چهارم و پنجم بررسی می‌شود. در قسمت ششم و هفتم به بررسی اثرات تغییرات شرایط بار و فرکانس نمونه‌برداری پرداخته می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۰.۲. کیت تزریق جریان^۱

با افزودن شاخه Cq به کیت تزریق جریان ارائه شده در مرجع [۲۵] با عبور قسمتی از جریان سوئیچینگ از این شاخه سبب کاهش تلفات سوئیچینگ شده و خطای تعیین محل خطا در خطاهای ابتدای خط را کاهش می‌دهد. انتخاب مقدار بهینه برای Cq با توجه به کاهش مجموع تلفات سوئیچینگ، هزینه نصب خازن و تلفات راکتیو، و با استفاده از چند روش بهینه‌سازی انجام و نتایج بهینه‌سازی با الگوریتم PSO در طراحی کیت مورد استفاده قرار گرفت. با اتصال کیت تزریق جریان شکل (۱) به ابتدای خط DC و قبل از CT تجهیز حفاظتی در صورت رخداد خطا با عبور جریان از کیت، مدار معادل شبکه و کیت به صورت شکل (۲) قابل مشاهده

مؤلفه تقسیم می‌شود، یعنی نمونه‌های آن به نصف کاهش می‌یابد و سپس به G و H منتقل می‌شوند تا به ترتیب مؤلفه‌های تقریبی و جزئی سطح بعدی ایجاد شوند. ادامه این روش تا سطح جزم، سیگنال اولیه را به اجزای جزئیات جزم و یک تقریب تقسیم می‌کند. این طرح در شکل (۳) تا چهار سطح تجزیه ارائه شده است.



شکل (۳): چهار مرحله تجزیه سیگنال X با استفاده از تبدیل phaselet گسسته

با توجه به توضیحات بالا مؤلفه‌های تقریبی و جزئی مرتبه جزم سیگنال اصلی با استفاده از روابط (۸) و (۹) به دست می‌آید.

$$A_j = A_{j-1} \times G \quad (8)$$

$$D_j = D_{j-1} \times H \quad (9)$$

بدین ترتیب تجزیه سیگنال نیازمند پردازش سری کانولوشن سیگنال اصلی و مؤلفه‌های آن با فیلترهای میان‌گذر و پایین‌گذر تا رسیدن به مرحله مورد نظر است.

در کاربردهای به هنگام تبدیل ویولت-phaselet رسیدن به مؤلفه مورد نظر با روش کانولوشن‌های متوالی ارائه‌شده، زمان‌بر و غیرقابل قبول است؛ اما طبق معادلات (۸) و (۹)، اجزای سطح جزم نمی‌توانند محاسبه شوند، مگر اینکه مؤلفه تقریبی سطح $(j-1)$ م به‌طور کامل تکمیل شود. در این بخش، یک فیلتر دیجیتال برای کاربردهای آن‌لاین تبدیل phaselet گسسته شکل گرفته است. اولین ویژگی این فیلتر این است که مؤلفه‌های مرحله k ام از سیگنال اصلی به دست می‌آید و وابستگی آن‌ها به مؤلفه‌های مراحل قبلی از بین می‌رود. برای این منظور روابط (۸) و (۹) به صورت (۱۰) و (۱۱) برای مرحله دوم بازنویسی می‌شود.

$$A_2 = A_1 \times G = X \times G \times G \quad (10)$$

$$D_2 = A_1 \times H = X \times G \times H \quad (11)$$

بنابراین:

$$G_j = H_{jj} G_{j-1} = \left(\prod_{m=2}^j H_{mm} \right) G \quad (12)$$

$$A_j = X \times G^j \quad (13)$$

$$D_j = X \times G_j \quad (14)$$

با این استفاده از این روش، ماتریسی برای تولید مؤلفه‌های

$$\omega_n = \sqrt{\frac{L_u d + C_q}{C_p (C_q L_u d + C_q L_p + L_u d L_p)}} \quad (3)$$

بدین ترتیب محل رخداد خطا با استفاده از رابطه (۴) و درصد خطا در تعیین محل خطا به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$d = \frac{C_q - C_p L_p C_q \omega_n^2}{L_u (C_p (L_p + C_q) \omega_n^2 - 1)} \quad (4)$$

$$= \frac{C_q - C_p L_p C_q (\omega_d^2 + \alpha^2)}{L_u (C_p (L_p + C_q) (\omega_d^2 + \alpha^2) - 1)}$$

$$\varepsilon = \left| \frac{d_{cal} - d_{act}}{d_{act}} \right| \times 100 \quad (5)$$

$$i_{p_p}(t) = M e^{-\alpha t} \quad (6)$$

$$\alpha_n = \frac{\ln(i_n) - \ln(i_{n+1})}{t_{n+1} - t_n} \quad (7)$$

پوش منحنی جریان خطا و مشتقات آن به صورت رابطه (۶) است و با داشتن دو نمونه از مشتق جریان ضریب کاهش α با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید. از تقسیم فاصله زمانی دو پیک مشتق جریان بر 2π محاسبه و فرکانس طبیعی ω_n به صورت $\omega_n = \sqrt{\omega_d^2 + \alpha_n^2}$ محاسبه می‌شود.

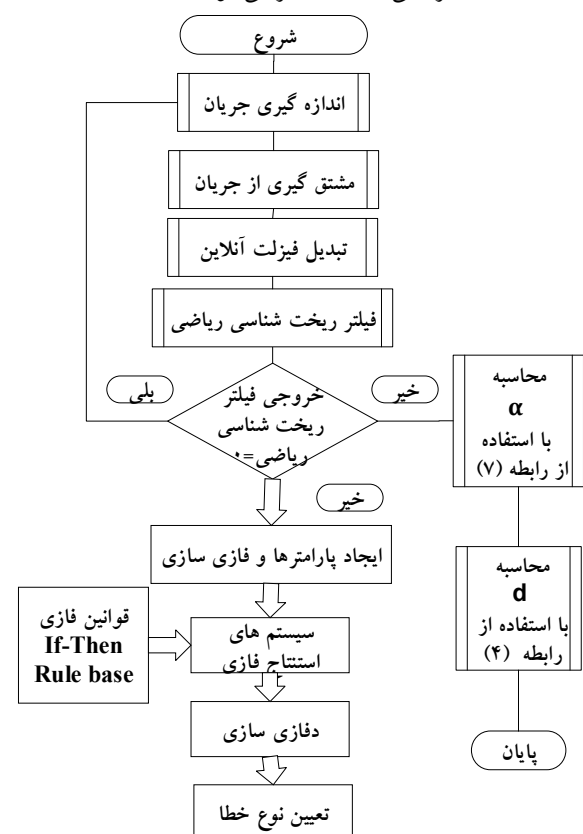
۲.۲. تبدیل phaselet آن‌لاین^۱

تبدیل موجک ارتباط بین فرکانس و زمان یک سیگنال مشاهده‌شده را حفظ می‌کند و قابلیت بسیار خوبی در رزولوشن زمان-فرکانس دارد. از این ویژگی تبدیل ویولت می‌توان برای تعیین زمان رسیدن موج سیار اولیه و بازتاب‌های بعدی آن استفاده کرد. تبدیل موجک گسسته^۲ برای تجزیه سیگنال‌های دیجیتال مختلفی استفاده شده است. تبدیل phaselet، شیفت‌یافته تبدیل ویولت است که در آن تابع مادر phaselet از حاصل ضرب تابع مادر ویولت و یک شیفت فاز حاصل می‌شود. به‌منظور اعمال تبدیل phaselet سیگنال اصلی از یک فیلتر میان‌گذر^۳ (G) که فیزلت مادر^۴ نامیده می‌شود، عبور داده می‌شود و مؤلفه جزئیات سیگنال مرحله اول ایجاد می‌شود. در همان مرحله از کانولوشن سیگنال اصلی و فیلتر پایین‌گذر^۵ (H) مؤلفه تقریبی سیگنال حاصل می‌شود. G و H بردارهای متعامد با عناصر $N \times 1$ هستند [۲۶]. برای سطح دوم، مؤلفه تقریبی به دو

1. Online Phaselet Transform
2. Discrete Wavelet Transform
3. Band Pass Filter
4. Mother Wavelet
5. Low Pass Filter

به طوری که: $n \in D_f$ و $D_f = \{0, 1, 2, \dots, N - 1\}$ و $m \in D_g$ و $D_g = \{0, 1, 2, \dots, M - 1\}$

دلیل استفاده از فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی، بررسی تغییرات ظاهری سیگنال در نتیجه به وجود آمدن اعوجاجات ناشی از رخداد خطاست. رابطه (۱۹) در تشخیص دامنه اغتشاشات با دقت بالایی عمل می‌کند. همچنین، هنگامی که تغییر ناگهانی در سیگنال اولیه وجود ندارد، سیگنال‌های فرسایش و گشایش اختلاف فازی با هم نداشته است و خروجی MMF صفر می‌شود.



شکل (۴): روندنمای روش پیشنهادی تشخیص، دسته‌بندی و محل‌یابی خطا

۴.۲. سیستم استنتاج فازی

با استفاده از توبلاکس فازی نرم‌افزار MATLAB برای تعیین نوع خطا یک سیستم استنتاج فازی ایجاد شد. استفاده از سیستم استنتاج فازی جهت هوشمندسازی و افزایش کارایی و سرعت طبقه‌بندی خطاست. خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی به‌عنوان ورودی سیستم استنتاج فازی در نظر گرفته شد و پس از فازی‌سازی به ۳ تابع عضویت دوزنقه‌ای تقسیم شد. خروجی سیستم استنتاج فازی نیز شامل ۳ تابع عضویت دوزنقه‌ای است که خروجی دفازی‌شده سیستم

مرتبه بالاتر می‌توان تعریف کرد [۲۹]. استفاده از تبدیل فیزیت آنالین، با ادغام چهار مرحله تجزیه سیگنال در یک مرحله سبب افزایش سرعت روش پیشنهادی شده است.

با در نظر گرفتن $\frac{\pi}{3}$ به‌عنوان شیفت فازی، شش مقدار برای خروجی phaselet $(M_1 - M_6)$ داریم که در صورت رخداد خطا در ریزشبه‌کد DC روابط جدول (۲) بین خروجی‌های phaselet برقرار است.

۳.۲. استفاده از فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی^۱ در تشخیص خطا

ریخت‌شناسی ریاضی یک روش تحلیل سیگنال با پیچیدگی محاسباتی کم و دقیق است که می‌تواند برای استخراج اطلاعات از سیگنال‌های فرکانس بالا استفاده شود. ریخت‌شناسی ریاضی در حوزه زمان و با پنجره‌های اطلاعاتی کوتاه به بررسی شکل ظاهری سیگنال‌های فرکانس بالا می‌پردازد. روابط گشایش و کاهش سیگنال ورودی F با دامنه Df و عنصر ساختاری G با دامنه Dg به‌صورت رابطه (۱۵) و (۱۶) تعریف می‌شود. و با استفاده از روابط گشایش و کاهش دو رابطه باز بودن و بسته بودن به‌صورت رابطه (۱۷) و (۱۸) تعریف شده و فیلتر ریخت‌شناسی با توجه به چهار رابطه معرفی شده به‌صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌گردد.

جدول (۲): انواع خطا در شبکه DC و روابط بین خروجی‌های phaselet در حین خطا	
نوع خطا	روابط حاکم
PG	$M_6 - M_3 = 0, M_1 = M_2 ,$ $Phase(M_1) \neq Phase(M_2)$
NG	$M_2 - M_4 = 0, M_1 - M_2 = M_3 ,$ $Phase(M_1 - M_2) \neq Phase(M_3)$
PN	$M_4 M_6 - M_5^2 = 0, \sqrt{2} M_4 - \sqrt{3} M_5 = 0,$ $Phase(\sqrt{2} M_4 - \sqrt{3} M_5) < 0$

$$f_d(n) = (f \oplus g)(n) = \max\{f(n-m) + g(m)\} \quad (15)$$

$$f_e(n) = (f \ominus g)(n) = \max\{f(n+m) - g(m)\} \quad (16)$$

$$f_o(n) = (f \circ g)(n) = ((f \oplus g) \ominus g)(n) \quad (17)$$

$$f_c(n) = (f \cdot g)(n) = ((f \ominus g) \oplus g)(n) \quad (18)$$

$$MF(n) = (f(n) \circ (f \cdot g)(n) + f(n) \cdot (f \circ g)(n)) / 2 \quad (19)$$

تعیین نوع خطا با اعمال خروجی phaselet آنلاین به سیستم استنتاج فازی انجام شد. تعیین محل خطا و درصد خطا محاسبه آن در هر حالت با استفاده از روابط (۴) و (۵) محاسبه شد. سناریوهای متفاوت و متعددی از خطاهای سه‌گانه قطب مثبت به زمین، قطب منفی به زمین و قطب مثبت به قطب منفی در خطوط شبکه مورد مطالعه اعمال شد و نتایج برخی از حالات در جدول (۳) آمده است. در فاصله ۴۵٪ از طول خط بین باس ۴Bb-B و باس ۱Bb-B و مقاومت ۲۵ اهم سه نوع خطا شامل قطب مثبت به زمین، قطب منفی به زمین و قطب مثبت به قطب منفی اعمال شد. جریان‌های خطا در سه حالت اندازه‌گیری شد. شکل (۶ الف) جریان‌های خطا مربوط به انواع خطای اعمالی را نمایش می‌دهد.

با استفاده از 4db آنلاین به‌عنوان موجک مادر و $\frac{\pi}{3}$ به‌عنوان شیفت فازی، phaselet مشتق جریان‌های خطا سه حالت محاسبه شد. استفاده از phaselet آنلاین سبب افزایش سرعت در تشخیص رخداد خطا و تعیین نوع خطا شد. شکل (۶ ب) نمودارهای آن را نمایش می‌دهد.

شکل (۶ ج) خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی را برای سه خطا نمایش می‌دهد. با توجه به نمودارهای شکل (۶ ج) روش پیشنهادی در تشخیص انواع خطا با دقت و سرعت بالایی عمل می‌کند.

استنتاج فازی بیان‌کننده نوع خطای رخ داده است. با توجه به موارد گفته‌شده در بخش قبل درباره انواع خطا و روابط حاکم بر خروجی‌های phaselet، قوانین فازی برای سیستم استنتاج فازی ایجاد شده رول‌نویسی شد.

با اعمال امواج سیار مشتق جریان حاصل از اغتشاش در شبکه‌های توزیع DC چندترمیناله به فیلتر ریخت‌شناسی این فیلتر توانایی تشخیص انواع خطا را دارد. انواع خطا در قسمت ۳ در شبکه شبیه‌سازی می‌شود و صحت روش پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. طرح‌واره روش پیشنهادی به‌صورت شکل (۴) است.

۳. شبیه‌سازی و نتایج

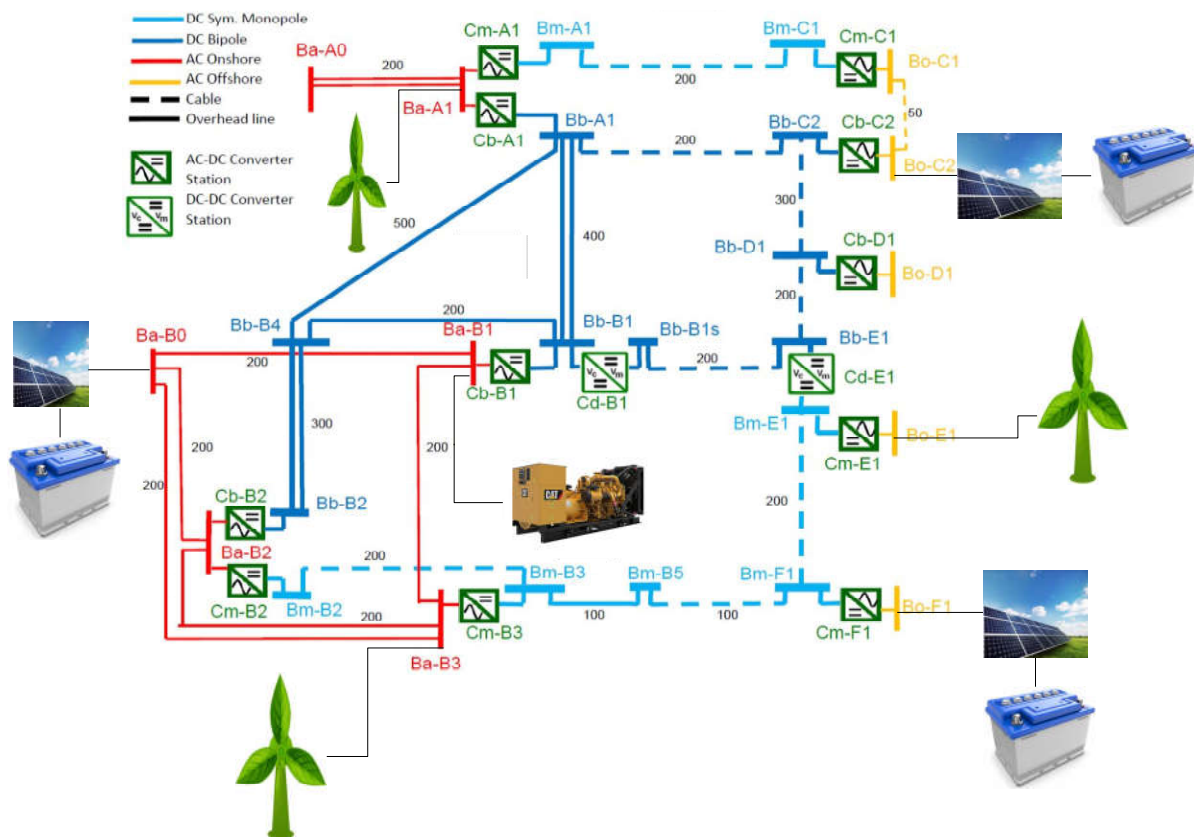
برای بررسی روش پیشنهادی یک ریزش‌بکه چندترمیناله DC در نرم‌افزار PSCAD شبیه‌سازی شد. شکل (۵) ریزش‌بکه MTDC را نمایش می‌دهد. اطلاعات شبکه آزمون در ضمیمه یک آمده است. انواع خطا با شرایط مختلف از نظر محل رخداد خطا، مقاومت خطا و نوع خطا شبیه‌سازی شد.

سیگنال‌های جریان خطا در هر حالت اندازه‌گیری شد. در هر حالت با استفاده از روش دو نمونه‌ای مشتق جریان خطا محاسبه شد. با استفاده از نرم‌افزار MATLAB امواج سیار مشتق جریان خطا محاسبه شد. با اعمال امواج سیار حاصل به فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی تشخیص خطا برای حالات مختلف با دقت بالا انجام شد.

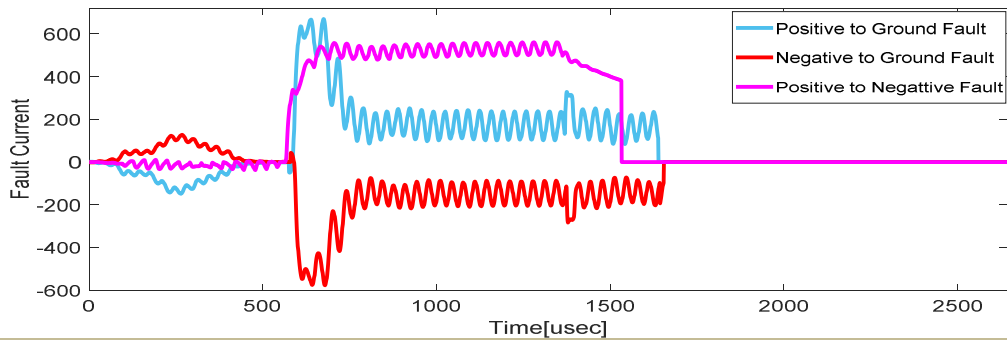
جدول (۳): نتایج روش دسته‌بندی و تعیین محل خطا برای انواع خطا

ردیف	محل خطا			ردیف	خطای PG			خطای NG			خطای PN		
	ابتدا خط	انتهای خط	فاصله واقعی (درصد)		فاصله محاسبه شده (%)	خطای تعیین فاصله (%)	ردیف	فاصله محاسبه شده (%)	خطای تعیین فاصله (%)	ردیف	فاصله محاسبه شده (%)	خطای تعیین فاصله (%)	ردیف
۱	Bm-B5	Bm-F1	۵	۰/۰۵	۴/۹۹۹۸	۰/۰۰۴	PG	۴/۹۹۹۷۷	۰/۰۰۴۶	NG	۴/۹۹۹۸	۰/۰۰۳۲	PN
۲	Bb-B1	Bb-A1	۵	۰/۰۵	۴/۹۹۹۷	۰/۰۰۶	PG	۴/۹۹۹۸۱	۰/۰۰۳۸	NG	۴/۹۹۹۸	۰/۰۰۴۴	PN
۳	Bm-B5	Bm-F1	۱۵	۰/۰۵	۱۴/۹۹۹۸	۰/۰۰۱۳۳	PG	۱۵	۰	NG	۱۴/۹۹۹	۰/۰۰۱۵۳	PN
۴	Bb-B4	Bb-A1	۳۰	۰/۰۵	۳۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۷۳۳	PG	۳۰	۰	NG	۳۰/۰۱۹	۰/۰۰۶۳۳۳	PN
۵	Bb-B4	Bb-B1	۲۵	۰/۰۵	۲۴/۹۹۸۹	۰/۰۰۴۴	PG	۲۵/۰۰۱۹	۰/۰۰۷۶	NG	۲۴/۹۹۹۹	۰/۰۰۳۶	PN
۶	Bb-A1	Bb-C2	۴۵	۰/۰۵	۴۴/۹۹۸۶	۰/۰۰۳۱۱	PG	۴۴/۹۹۷۹	۰/۰۰۴۷	NG	۴۵	۰	PN
۷	Bb-A1	Bb-B4	۶۰	۵	۶۰	۰	PG	۶۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱۵	NG	۵۹/۹۹۹	۰/۰۰۱۳۳	PN
۸	Bb-B4	Bb-B2	۴۰	۵	۴۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۷۷۵	PG	۴۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۱۸	NG	۳۹/۹۹۹	۰/۰۰۳۵	PN
۹	Bb-E1	Bb-B1s	۸۵	۵	۸۵/۰۰۲۹	۰/۰۰۳۴۱	PG	۸۵/۰۰۲	۰/۰۰۲۳۵	NG	۸۵/۰۱۸	۰/۰۰۲۱۱۸	PN
۱۰	Bb-E1	Bb-B1s	۵	۵۰	۵	۰	PG	۵/۰۰۰۲۳	۰/۰۰۴۶	NG	۵/۰۰۱۸	۰/۰۰۳۶	PN
۱۱	Bb-B4	Bb-B1	۵	۵۰	۵/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۴	PG	۵/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۶	NG	۵/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۳	PN
۱۲	Bm-E1	Bm-F1	۱۵	۵۰	۱۵/۰۰۰۵	۰/۰۰۳۳۳	PG	۱۵/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۷۳	NG	۱۵/۰۰۳	۰/۰۰۲۰۶۷	PN

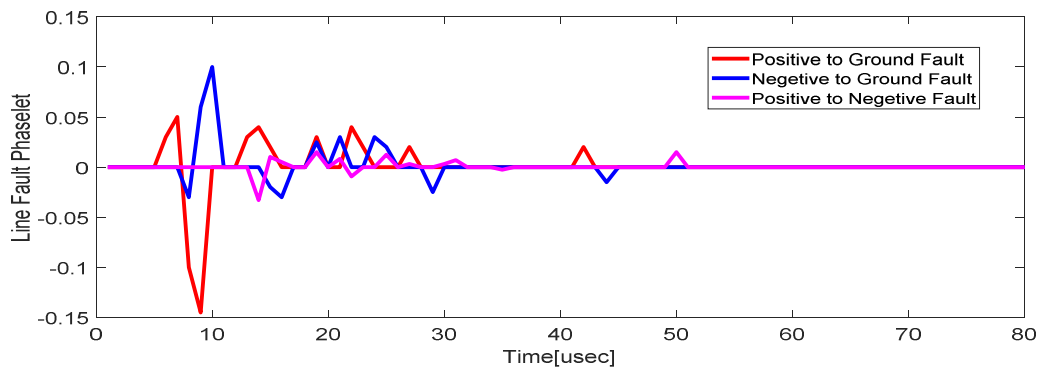
۱۳	Bb-B1	Bb-A1	۳۰	۵۰	۳۰/۰۰۴	۰/۰۱۳۳	PG	۳۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۷	NG	۳۰/۰۱۳	۰/۰۴۳۳	PN
۱۴	Bm-B3	Bm-B2	۹۹	۰/۰۵	۹۹	۰	PG	۹۸/۹۹۹	۰/۰۰۱۰	NG	۹۹/۰۰۸	۰/۰۰۸۰۸	PN
۱۵	Bb-B1	Bb-A1	۴۵	۰/۰۵	۴۴/۹۹۸	۰/۰۰۴۴۴	PG	۴۴/۹۹۸۹	۰/۰۰۲۴	NG	۴۵	۰	PN
۱۶	Bm-B3	Bm-B5	۵۵	۰/۰۵	۵۵/۰۰۲۲	۰/۰۰۴	PG	۵۴/۹۹۹۱	۰/۰۰۱۷	NG	۵۵/۰۰۳	۰/۰۰۵۶۴	PN
۱۷	Bb-E1	Bb-D1	۴۰	۰/۰۵	۴۰	۰	PG	۳۹/۹۹۸۹	۰/۰۰۲۷	NG	۴۰	۰	PN
۱۸	Bm-C1	Bm-A1	۸۰	۰/۰۵	۸۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	PG	۸۰	۰	NG	۸۰	۰	PN
۱۹	Bb-D1	Bb-C2	۵۰	۵	۵۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۲۲	PG	۵۰/۰۰۳	۰/۰۰۶	NG	۵۰/۰۲۳	۰/۰۴۶	PN
۲۰	Bm-E1	Bm-F1	۷۰	۵	۷۰	۰	PG	۷۰/۰۳۲۲	۰/۰۴۶	NG	۶۹/۰۳	۰/۱	PN
۲۱	Bb-E1	Bb-D1	۱۰	۵	۱۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۹	PG	۱۰	۰	NG	۱۰	۰	PN
۲۲	Bm-B2	Bm-B3	۹۵	۵۰	۹۵/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵۳	PG	۹۵/۰۰۶۴	۰/۰۰۶۷	NG	۹۵	۰	PN
۲۳	Bm-B2	Bm-B5	۶۵	۵۰	۶۵/۰۰۳۱	۰/۰۰۴۷	PG	۶۵/۰۰۴۷	۰/۰۰۷۲	NG	۶۵/۰۰۳	۰/۰۰۴۱۵	PN
۲۴	Bm-A1	Bm-C1	۵	۵۰	۵/۰۰۰۱	۰/۰۰۲	PG	۰/۰۰۰۴۱	۰/۰۰۸۲	NG	۵/۰۰۹۹	۰/۱۹۸	PN
۲۵	Bb-D1	Bb-C2	۱۰	۵۰	۱۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۷۱	PG	۱۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۳۱	NG	۱۰/۰۰۶	۰/۰۶۲	PN
۲۶	Bm-E1	Bm-F1	۳۵	۵۰	۳۵	۰	PG	۳۵/۰۰۱۸	۰/۰۰۵۱	NG	۳۵/۰۰۲	۰/۰۰۵۷۱	PN
۲۷	Bm-B2	Bm-B3	۲۰	۳۵	۱۹/۸۳۱۴	۰/۸۴۳	PG	۱۹/۹۳۱	۰/۳۴۵	NG	۲۰/۲۳۹	۱/۱۹۵	PN
۲۸	Bm-B2	Bm-B5	۶۵	۳۵	۶۴/۵۲۰۴	۰/۸۳۷۸۴۶	PG	۶۵/۶۲۲	۰/۹۵۶۹۲	NG	۶۴/۵۳۱	۰/۸۲۱۵۳۸	PN
۲۹	Bb-B4	Bb-A1	۶۵	۳۵	۶۵/۷۷۸	۱/۱۹۶۹۲۳	PG	۶۴/۳۵۴	۰/۹۹۳۸۵	NG	۶۵/۸۸۴	۱/۳۶	PN
۳۰	Bb-B4	Bb-B1	۲۰	۳۵	۱۹/۷۵۶	۱/۲۲	PG	۲۰/۱۵۳	۰/۷۶۵	NG	۲۰/۲۴۹	۱/۲۴۵	PN



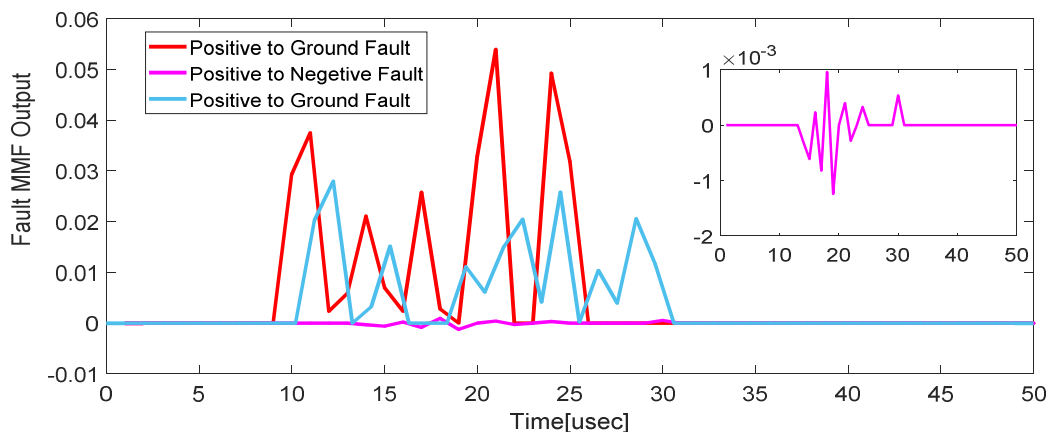
شکل (۵): شبکه آزمون ریز شبکه MTDC



الف



ب



ج

شکل (۶): الف: جریان خطا سه حالت، ب: خروجی phaselet آنلاین سه خطا، ج: خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی سه خطا

داده شده است. با اعمال خطاهای مختلف در طول خط و با مقادیر متغیر مقاومت خطا از صفر تا ۱۲۵ اهم با استفاده از روش ارائه‌شده، محل رخداد انواع خطا محاسبه شد و در شکل (۸) خطای روش پیشنهادی تعیین محل خطا نشان داده شد.

۴. تأثیر مقاومت خطا بر دقت روش پیشنهادی تعیین

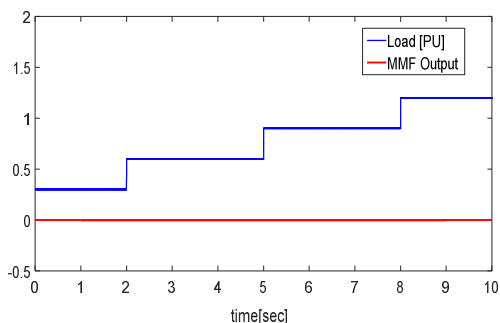
محل خطا

با افزودن شاخه Cq به کیت تزریق جریان ارائه‌شده در مرجع [۲۵] و نصب کیت‌های ارائه‌شده و استفاده از روش پیشنهادی، خطای تعیین محل خطا کاهش یافت. همچنین نسبت به روش ارائه‌شده در مرجع [۲۵] برای خطاهای نزدیک به ابتدای خط که دارای مقاومت خطای بالایی هستند خطای تعیین محل خطا تا حدود ۳۰٪ کاهش یافت. خطای روش ارائه‌شده در مرجع [۲۵] در شکل (۷) نشان

به ترتیب از ۰/۳ به ۰/۶، از ۰/۶ به ۰/۹، از ۰/۹ به ۱/۲ پریونیت و به صورت پله‌ای تغییر یافت و خروجی فیلتر ریخت‌شناسی پیشنهادی به صورت شکل (۹) و بدون عملکرد است. با توجه به شکل (۹) تغییرات بار سبب اشتباه عملکرد روش پیشنهادی نمی‌شود.

جدول (۴): صحت روش پیشنهادی در شرایط عادی و تغییرات بارگذاری

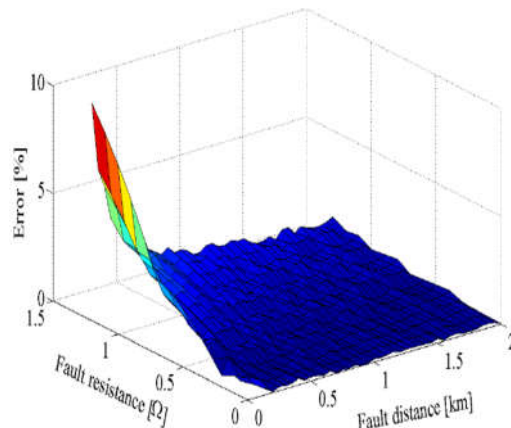
بارگذاری		بدون خطا	محل خطا	درصد بارگذاری
PN	NG	PG	بدون خطا	درصد بارگذاری
PN	NG	PG	بدون عملکرد	۳۰
PN	NG	PG	بدون عملکرد	۶۰
PN	NG	PG	بدون عملکرد	۹۰
PN	NG	PG	بدون عملکرد	۳۰
PN	NG	PG	بدون عملکرد	۶۰
PN	NG	PG	بدون عملکرد	۹۰
PN	NG	PG	بدون عملکرد	۳۰
PN	NG	PG	بدون عملکرد	۶۰
PN	NG	PG	بدون عملکرد	۹۰
PN	NG	PG	بدون عملکرد	۳۰
PN	NG	PG	بدون عملکرد	۶۰
PN	NG	PG	بدون عملکرد	۹۰



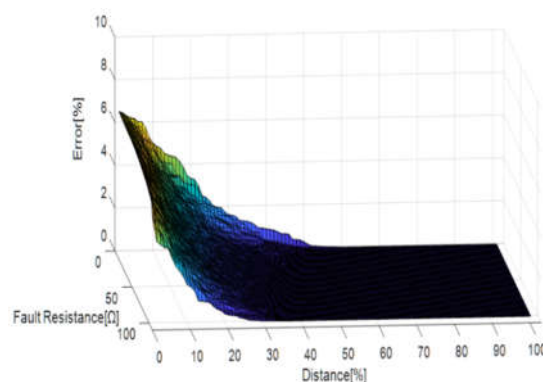
شکل (۹): خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی به‌ازای تغییرات بار

۷. تأثیر فرکانس نمونه‌برداری

با تغییر فرکانس نمونه‌برداری از مقدار ۵۰۰ هرتز تا ۵۰ کیلوهرتز روش پیشنهادی برای خطاهای مختلف استفاده شد و نتایج برای سه فرکانس‌های نمونه‌برداری ۰.۵، ۱، ۲، ۵، ۱۲، ۲۰، ۳۲، ۴۰ و ۵۰ کیلوهرتز در جدول (۵) آمده است. نتایج جدول (۵) به‌وضوح نشان می‌دهد که تغییر فرکانس نمونه‌برداری در محدوده وسیع ۱۰۰ برابری تغییری در کارایی و دقت روش پیشنهادی در تعیین محل خطا ایجاد نمی‌کند و برای انواع خطا با استفاده از روش پیشنهادی محل خطا با خطای بسیار پایین محاسبه شد.



شکل (۷): خطا تعیین محل خطا با استفاده از روش ارائه‌شده در مرجع [۲۵]



شکل (۸): خطا تعیین محل خطا با استفاده از روش پیشنهادی

۵. بررسی تأثیر خطای امپدانس بالا

با توجه به شکل (۸) و نتایج جدول (۳) روش ارائه‌شده در برابر خطای امپدانس بالا نیز دارای پاسخ مناسبی است. خطا با مقاومت ۱۲۵ اهم در نقاط مختلف طول خط اعمال شده و تعیین محل خطا با استفاده از روش پیشنهادی با خطای کمتر از ۷٪ انجام شده است.

۶. تأثیر میزان بارگذاری و تغییرات بار

از ویژگی‌های مهم سیستم حفاظت عدم عملکرد اشتباه در شرایط عادی شبکه و تغییرات بار است. با تغییر شرایط بارگذاری به میزان ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰٪ بار نامی صحت عملکرد روش ارائه‌شده بررسی و نتایج در جدول (۴) ارائه شد. بر اساس نتایج جدول (۴) روش پیشنهادی در محل‌های متفاوت و با بارگذاری و خطاهای مختلف آزموده شد. تغییرات میزان بارگذاری تأثیر محسوسی در کارایی روش پیشنهادی ایجاد نمی‌کند.

همچنین برای بررسی عملکرد روش حفاظتی در شرایط تغییرات بار مطابق شکل (۹) میزان بار در لحظات ۲، ۵ و ۸ ثانیه

۸ نتیجه‌گیری

تشخیص خطا صورت می‌گیرد. تعیین نوع خطا با توجه به خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی و اعمال آن به یک سیستم استنتاج فازی انجام شد. تعیین محل خطا با استفاده از معادلات مداری و محاسبات جریانی صورت می‌گیرد. صحت روش ارائه‌شده در یک ریزشکته DC با خطاهای مختلفی از نظر نوع، محل، مقاومت و فرکانس نمونه‌برداری، میزان بارگذاری و شرایط اضافه جریان آزموده شد. روش ارائه‌شده نسبت به تغییر فرکانس نمونه‌برداری به‌صورت مقاوم عمل می‌کند. تغییرات مقاومت خطا تأثیر چندانی در کارایی این روش نداشته است و در خطاهای با امپدانس بالا عملکرد بسیار خوبی دارد.

در این مقاله روشی جدید برای تشخیص خطا و تعیین نوع و محل خطا در ریزشکته DC چندترمیناله ارائه شد. روش پیشنهادی به‌دلیل استفاده از فیزیت آنالاین و سیستم استنتاج فازی و فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی، در تشخیص و تعیین انواع خطای در شبکه‌های MTDC به‌صورت سریع، دقیق و با کارایی بالا عمل می‌کند. تعیین دقیق محل خطا با اتصال یک کیت مداری به شبکه انجام شد. استفاده از کیت مداری پیشنهادی سبب کاهش خطای تعیین محل خطا شد؛ به‌ویژه خطاهایی که در ابتدای خط و نزدیک کیت رخ می‌دهد. در صورت رخداد خطا با اندازه‌گیری امواج سیار مشتق جریان خطا و اعمال آن به یک فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی،

ضمایم

جدول (۵): تأثیر فرکانس نمونه‌برداری بر دقت محلیابی خطا

نمونه‌برداری فرکانس	فاصله واقعی محل خطا (درصد)	۵	۵	۲۵	۳۰	۴۵	۶۰	۸۵	۹۵
		مقاومت خطا (اهم)	۰/۰۵	۵۰	۰/۰۵	۵۰	۵	۵۰	۰/۰۵
۵۰۰ Hz	فاصله محاسبه‌شده (درصد)	۴/۹۹۹۶	۴/۹۹۹	۲۵/۰۲	۳۰/۰۰۱۹	۴۴/۹۷	۶۰/۱	۸۴/۹۴	۹۵/۵۴
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰/۰۰۸	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۰۶۳۴	۰/۰۶۶۶۷	۰/۱۶۶۷	۰/۰۷۰۶	۰/۰۴۶۳۲
۱ kHz	فاصله محاسبه‌شده (درصد)	۵	۵/۰۰۱	۲۴/۹۹	۳۰/۰۰۵۷	۴۵/۰۴	۶۰/۰۳	۸۵/۱۸	۹۴/۹۳
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۱۸۹۹	۰/۰۸۸۱۹	۰/۰۵	۰/۲۱۱۸	۰/۰۷۳۷
۲ kHz	فاصله محاسبه‌شده (درصد)	۴/۹۹۹	۴/۹۹۹۴	۲۵/۱۲۳۶	۳۰/۰۰۳	۴۴/۹۸۶	۶۰	۸۵/۰۵۸	۹۴/۷۱
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰/۰۲	۰/۰۱۲	۰/۴۹۴۴	۰/۰۱	۰/۰۳۱۱	۰	۰/۰۶۸۳	۰/۳۰۵۳
۵ kHz	فاصله محاسبه‌شده (درصد)	۵/۰۰۳۷	۵	۲۵/۰۰۳	۳۰	۴۴/۹۷۲	۶۰/۱۵۶	۸۵/۰۸	۹۵
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰/۰۷۴	۰	۰/۰۱۲	۰	۰/۰۶۲۲۳	۰/۲۶	۰/۰۹۴۱۲	۰
۱۲ kHz	فاصله محاسبه‌شده (درصد)	۵	۵/۰۰۵	۲۴/۹۹۴	۲۹/۹۹	۴۵	۵۹/۸	۸۴/۹۶	۵۹/۱۹
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰	۰/۰۱	۰/۰۲۴	۰/۰۳۳۳۴	۰	۰/۳۳۳۴	۰/۰۴۷۰۶	۰/۲
۲۰ kHz	فاصله محاسبه‌شده (درصد)	۴/۹۹۲	۵/۰۰۷	۲۴/۹۹۲۶	۲۹/۹۹۳	۲۴/۹۷۹	۶۰	۸۴/۹	۹۴/۵۴
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۲۹۶	۰/۰۲۳۳۴	۰/۰۴۶۶۷	۰	۰/۱۱۷۶	۰/۴۸۴۲
۳۲ kHz	فاصله محاسبه‌شده (درصد)	۴/۹۹۹۵	۵/۰۰۰۸	۲۵/۰۰۶	۳۰/۱	۴۵/۱	۵۹/۶۹	۸۵/۲	۹۵
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰/۰۱	۰/۰۱۶	۰/۰۲۴	۰/۳۳۳۴	۰/۲۲۲۲۳	۰/۵۱۶۷	۰/۲۳۵۲	۰
۴۰ kHz	فاصله محاسبه‌شده (درصد)	۵/۰۰۶	۴/۹۹۹۱	۲۵/۰۰۹	۲۹/۹۸۹	۴۵	۶۰/۰۸	۸۵/۰۹	۹۴/۶۲
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰/۱۲	۰/۰۱۸	۰/۰۳۶	۰/۰۳۶۶۷	۰	۰/۱۳۳۴	۰/۱۵۸۸	۰/۳۹۴۸
۵۰ kHz	فاصله محاسبه‌شده (درصد)	۴/۹۹۹	۵/۰۰۹	۲۵/۰۱۹	۳۰/۰۱۵	۴۵	۶۰/۰۷	۸۴/۹۶	۹۵/۰۸
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰/۰۲	۰/۰۱۸	۰/۰۷۶	۰/۰۵	۰	۰/۱۱۶۷	۰/۰۰۴۷	۰/۰۸۴۲

ضمیمه یک:

اطلاعات شبکه آزمون			
اطلاعات خطوط			
ولتاژ نامی	اندوکتانس	مقاومت	
۴۰۰ V	۰/۲۵ mH/km	۱۲۵ mΩ/km	خطوط هوایی
۴۰۰ V	۰/۱۸ mH/km	۱۰۰ mΩ/km	خطوط کابلی
اطلاعات منابع تولید توان			
ولتاژ نامی	توان نامی		
۳.۶ kV	۳۰ kW		نیروگاه بادی
۷۰۰ V	۷ kW		نیروگاه خورشیدی
۰.۶ kV	۴ kVA		دیزل ژنراتور
۰.۷ kV	۳.۵ kW		باتری
۱۱ kV	۶۰ kVA		شبکه AC
اطلاعات ترانسفورماتورها			
ولتاژ LV	ولتاژ HV	توان نامی	
۴۰۰ V	۳/۶ kV	۳۶ kVA	بین نیروگاه بادی و مبدل ریزشبه
۴۰۰ V	۷۰۰ V	۹ kVA	بین نیروگاه خورشیدی و مبدل ریزشبه
۴۰۰ V	۱۱ kV	۸۰ kVA	بین شبکه AC و مبدل ریزشبه

ضمیمه دو:

فهرست علائم			
R	مقاومت معادل کیت و شبکه	\square_n	فرکانس طبیعی
L	اندوکتانس معادل کیت و شبکه	α	ضریب میرایی
C	خازن معادل کیت و شبکه	NG	خطای قطب منفی به زمین
i_p	جریان عبوری از شبکه در حالت خطا	PG	خطای قطب مثبت به زمین
d	فاصله از محل خطا	PN	خطای قطب مثبت منفی به قطب منفی
C_p, C_q	خازن‌های کیت	f_d	سیگنال گشایش
S_b, S_p	سوئیچ‌های کیت	f_e	سیگنال کاهش
L_p	اندوکتانس کیت	f_c	تابع بسته بودن
V_b, R_b	باتری و مقاومت کیت	f_o	تابع باز بودن

ضمیمه سه: مسئله بهینه‌سازی و نتایج انتخاب بهینه عناصر کیت تزریق جریان

$$OF = \sum_m \left(\int_{t_{sm}}^{t_{sm}+T_{sm}} V_{Sbm} I_{Sbm} + \int_{t_{sm}}^{t_{sm}+T_{sm}} V_{Spm} I_{Spm} + \int_{t_{sm}}^{t_{sm}+T_{sm}} V_{Cbm} I_{Cbm} + \int_{t_{sm}}^{t_{sm}+T_{sm}} V_{Cpm} I_{Cpm} \right)$$

Minimize (OF)

Such _that $\min imize(\sum_m C_{qm} + C_{bm})$ & $\min imize(\sum_m L_{qm})$

انتخاب بهینه عناصر کیت تزریق جریان

روش بهینه‌سازی	$C_q[\mu F]$	$C_b[\mu F]$	$L_q[\mu H]$	OF
GA	۲۸	۱۹۹	۷۱۷	۰/۰۲۵۴۸
GA PSO	۳۲	۱۸۶	۶۵۳	۰/۰۲۳۱۳
PSO	۲۵	۱۶۶	۶۳۱	۰/۰۱۵۱۶

ضمیمه چهار:

تفاوت‌های کلی مقاله حاضر با مرجع [۵۱] برای مقایسه بهتر			
ردیف	عنوان	مقاله حاضر	مرجع [۵۱]
۱	شبکه مورد مطالعه	ریزشکته MTDC	شبکه سولار
۲	منابع تولید توان	بادی، خورشیدی، باتری، دیزل و...	خورشیدی، باتری
۳	تشخیص رخداد خطا	با فیلتر ریخت‌شناسی $MF(n) = (f(n) \circ (f \cdot g)(n) + f(n) \cdot (f \circ g)(n)) / 2$	با فیلتر ریخت‌شناسی $MMF(k) = \begin{cases} MF_d(k) - MF_e(k) \Leftrightarrow MF_d(k-1) < MF_d(k) \\ MF_e(k) - MF_d(k) \Leftrightarrow MF_e(k-1) < MF_e(k) \end{cases}$
۴	استفاده از threshold در دسته‌بندی خطا	خیر	بلی
۵	استفاده از خروجی‌های فیزلت در دسته‌بندی خطا	استفاده از هر شش خروجی	استفاده از فقط یک خروجی
۶	استفاده از روابط بین فیزلت‌ها در دسته‌بندی خطا	بلی	خیر
۷	استفاده از سیستم استنتاج فازی در دسته‌بندی خطا	بلی	خیر
۸	دسته‌بندی نوع روش حفاظتی	هوشمند (Smart)	مرسوم (Conventional)
۹	بررسی اثرات میزان بارگذاری	بلی	خیر
۱۰	بررسی اثرات تغییرات بار	بلی	خیر
۱۱	بررسی عملکرد حفاظت در شرایط عادی شبکه	بلی	خیر
۱۲	بررسی اثرات اضافه‌بار	بلی	خیر

- [1] Emhemed, A. A. S. and Burt, G. M., "An advanced protection scheme for enabling an LVDC last mile distribution network", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 5, No. 5, pp. 2602–2609, 2014.
- [2] Baran, M. E. and Mahajan, N. R., "Overcurrent protection on voltage source- converter-based multiterminal dc distribution systems", IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 1, pp. 406–412, Jan 2007.
- [3] Chaudhuri, N., Chaudhuri, B., Majumder, R. and Yazdani, A., "Multiterminal direct-current grids: Modeling, analysis, and control", John Wiley & Sons, ch. 6, 2014.
- [4] Fletcher, S. D. A., Norman, P. J., Galloway, S. J., Crolla, P. and Burt, G. M., "Optimizing the roles of unit and non-unit protection methods within dc microgrids", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 3, No. 4, pp. 2079–2087, Dec 2012.
- [5] Saleh, K. A., Hooshyar, A. and El-Saadany, E. F., "Hybrid passive overcurrent relay for detection of faults in low-voltage dc grids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, No. 3, pp. 1129–1138, May 2017.
- [6] Emhemed, A. A. S., Fong, K., Fletcher, S. and Burt, G., "Validation of fast and selective protection scheme for an LVDC distribution network", IEEE Trans. Power Del., Vol. 32, no. 3, pp. 1432–1440, June 2017.
- [7] Hasheminejad, S., Seifossadat, S.G., Razaz, M., et al., "Traveling-wave-based protection of parallel transmission lines using Teager energy operator and fuzzy systems", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 10, No. 4, pp. 1067–1074, 2016.
- [8] Abdollahi, A. and Seyedtabaii, S., "Transmission line fault location estimation by Fourier & wavelet transforms using ANN", Fourth Int. Power Engineering and Optimization Conf. (PEOCO), January, pp. 573–578, 2010.
- [9] Ananthan, S.N., Padmanabhan, R., Meyur, R. and et al., "Real-time fault analysis of transmission lines using wavelet multi-resolution analysis based frequency domain approach", IET Sci. Meas. Technol., Vol. 10, No. 7, pp. 693–703, 2016.
- [10] Yadav, A. and Swetapadma, A., "Enhancing the performance of transmission line directional relaying, fault classification and fault location schemes using fuzzy inference system", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 9, No. 6, pp. 580–591, 2015.
- [11] Johnson, J.M. and Yadav, A., "A complete protection scheme for fault detection, classification and location estimation in HVDC transmission lines using support vector machine", IET Sci. Meas. Technol., Vol. 11, No. 3, pp. 279–287, 2017.
- [12] Rafinia, A. and Moshtagh, J., "A new approach to fault location in three-phase underground distribution system using combination of wavelet analysis with ANN and FLS", Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 55, pp. 261–274, 2014.
- [13] Youssef, O.A.S. "Combined fuzzy-logic wavelet-based fault classification technique for power system relaying", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 19, No. 2, pp. 582–589, 2004.
- [14] Feng, X., Qi, L. and Pan, J., "A novel location method and algorithm for dc distribution protection", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. PP, No. 99, pp. 1–1, 2017.
- [15] Rathore, B. and Shaik, A.G., "Wavelet-alienation based transmission line protection scheme", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 11, no. 4, pp. 995–1003, 2017.
- [16] Dhar, S., Patnaik, R. K. and Dash, P. K., "Fault detection and location of photovoltaic based dc microgrid using differential protection strategy", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. PP, No. 99, pp. 1–1, 2017.
- [17] Fletcher, S., Norman, P. J., Fong, K., Galloway, S. J. and Burt, G., "High-speed differential protection for smart dc distribution systems", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 5, No. 5, pp. 2610–2617, Sept 2014.
- [18] Xu, M.M., Xiao, L.Y. and Wang, H.F., "A prony-based method of locating short circuit fault in DC distribution system", 2nd IET Renewable Power Generation Conf., Beijing, China, September, pp. 1–4, 2013.
- [19] Mohanty, R., Balaji, U.S.M. and Pradhan, A.K., "An accurate noniterative fault location technique for low-voltage DC microgrid", IEEE Trans. Power Del., Vol. 31, No. 2, pp. 475–481, 2016.
- [20] Park, J.D., Candelaria, J., Ma, L. and et al., "DC ring-bus microgrid fault protection and identification of fault location", IEEE Trans. Power Del., Vol. 28, No. 4, pp. 2574–2584, Oct. 2013.
- [21] Park, J. "Ground fault detection and location for ungrounded DC traction power systems", IEEE Trans. Veh. Technol., 2015, Vol. 64, No. 12, pp. 5667–5676, 2013.
- [22] Christopher, E., Sumner, M., Thomas, D. and et al. "Fault location in a zonal DC marine power system using active impedance estimation", IEEE Trans. Appl. Ind., Vol. 49, No. 2, pp. 860–865, 2013.
- [23] Jia, K., Bi, T., Liu, B. and et al., "Marine power distribution system fault location using a portable injection unit", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 30, No. 2, pp. 818–826, 2015.
- [24] Zadsar, M., Haghifam, M.R. and Larimi, S.M.M., "Approach for self-healing resilient operation of active distribution network with microgrid", 2017, Vol. 11, No. 18, pp. 4633–4643, 2017.
- [25] Pradhan, A. K. and Mohanty, R., "Cable fault location in a dc microgrid using current injection technique", in 2016 National Power Systems Conference (NPSC), pp. 1–6, Dec 2016.
- [26] Mallat S. "A Wavelet Tour of Signal Processing", Academic Press, California, 1999.
- [27] Hooshyar, A., and Irvani, R., "Microgrid protection", Proceedings of the IEEE, Vol. 105, No. 7, pp. 1332–1353, July 2017.
- [28] Monadi, M., Gavriluta, C., Luna, A., Candela, I. and Rodriguez, P., "Centralized protection strategy for medium voltage dc microgrids", IEEE Trans. Power Del., Vol. 32, No. 1, pp. 430–440, Feb 2017.
- [29] Shahrtash, S.M. and Haghjoo, F., "Instantaneous wavelet transform decomposition filter for on-line applications", Iranian Journal of Sci. and Technol., Vol. 33, no. B6, pp. 491–510, 2009.
- [30] Xu, Q. and et al., "Analysis and Control of Modular Multi-Terminal DC Power Flow Controller with Fault Current Limiting Function", in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 9, No. 6, pp. 1378–1385, 2021.
- [31] Sati, T. and M. Azzouz, A., "Optimal Protection Coordination for Inverter Dominated Islanded Microgrids Considering N-1 Contingency", in IEEE Transactions on Power Delivery, , Vol. 37, No. 3, pp. 2256–2267, 2022.
- [32] Ordóñez, M., Sonnaillon, M. O., Quaicoe, J. E. and

- Iqbal, M. T., "An embedded frequency response analyzer for fuel cell monitoring and characterization", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 57, No. 6, pp. 1925–1934, Jun. 2010.
- [33] Paz, F. and Ordonez, M., "High-performance solar mppt using switching ripple identification based on a lock-in amplifier", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 63, No. 6, pp. 3595–3604, 2016.
- [34] Anun, M., Ordonez, M., Zurbriggen, I. G. and Oggier, G. G., "Circular switching surface technique: High-performance constant power load stabilization for electric vehicle systems", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 30, No. 8, pp. 4560–4572, Aug. 2015.
- [35] Gautam, S. and Brahma, S. M., "Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 28, No. 2, pp. 1226–1234, 2013.
- [36] Zhang, L.L., Li, M.S., Ji, T.Y. and et al., "Morphology singular entropy-based phase selector using short data window for transmission lines", IEEE Trans. Power Del., Vol. 26, No. 5, pp. 2162–2171, 2011.
- [37] Namdari, F. and Salehi, M., "A high-speed protection scheme based on initial current traveling wave for transmission lines employing mathematical morphology", IEEE Trans. Power Del., Vol. 32, No. 1, pp. 246–253, 2017.
- [38] Aki, H. "Demand-side resiliency and electricity continuity, experiences and lessons learned in Japan", Vol. 105, No. 7, pp. 1443–1455, 2017.
- [39] Duan, J., Zhang, K. and Cheng, L., "A novel method of fault location for single phase microgrids", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 7, No. 2, pp. 915–925, 2016.
- [40] Paz, F. and Ordonez, M., "An embedded impedance measurement for DC microgrids based on a lock-in amplifier", in Proc. IEEE 7th Int. Symp. Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), pp. 1–6, Jun. 2016.
- [41] Livera, A. and et al., "Recent advances in failure diagnosis techniques based on performance data analysis for grid-connected photovoltaic systems", Renewable energy, Vol. 113, pp. 126-143, 2018.
- [42] Mellit, A., Tina, G.M. and Kalogirou, S. A., "Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems, A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 91, pp. 1-17, 2018.
- [43] Livera, A. and et al. "On-line failure diagnosis of grid-connected photovoltaic systems based on fuzzy logic", IEEE 12th Int. Conf. on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), pp. 1-6, 2018.
- [44] Kasar, K. and P. Tapre. "A new fast detection module for short-circuit current detection in PV grid system", 2nd Int. Conf. on Inventive Systems and Control (ICISC). pp. 468-472, 2018.
- [45] Dodangeh M. and Ghaffarzadeh N., "A New Fast and Accurate Fault Location and Classification Method on MTDC Microgrids Using Current Injection Technique, Traveling-Waves, Online Wavelet, and Mathematical Morphology", IJEEE. Vol. 16, No. 2, pp. 248-258, 2020.
- [46] Dodangeh M. and Ghaffarzadeh N., "Fault detection, location, and classification method on compressed air energy storages based inter-connected micro-grid clusters using traveling-waves, current injection method, on-line wavelet, and mathematical morphology ", International transaction of electrical energy systems , Vol. 31, No. 12, pp. 1–19, 2021.
- [47] Liang, Y. and et al., "Fault Analysis and Traveling Wave Protection Based on Phase Characteristics for Hybrid Multi terminal HVDC Systems", in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, , Vol. 10, No. 1, pp. 575–588,.
- [48] Li, Z. L., Hu, J. and Chan, K. W., "A New Current Limiting and Overload Protection Scheme for Distributed Inverters in Microgrids under Grid Faults", in IEEE Transactions on Industry Applications, doi: 10.1109/TIA.2021.3104269.
- [49] Veerasamy, V. and et al., "Recurrent network based power flow solution for voltage stability assessment and improvement with distributed energy sources", Applied Energy, Vol. 302, 2021.
- [50] Saber, A., Zeineldin, H.H., EL-Fouly, Tarek H.M. and Al-Durra, Ahmed, "A new fault location scheme for parallel transmission lines using one-terminal data", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 135, 2022.
- [51] Ghaffarzadeh, N. and Dodangeh, M., "Solar microgrids fast and accurate fault detection, location and classification strategy using on-line phaselet, current injection kits', traveling-waves, and mathematical morphology", Journal of Solar Energy Research, Vol. 6, No. 3, pp.785-798, 2021.