

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱/۳۱

روشی جدید برای حفاظت ریزش شبکه سولار MTDC با استفاده از فیزلت آنالین، ریخت‌شناسی ریاضی و تحلیل انرژی سیگنال

مصطفی دودانگه^۱، نوید غفارزاده^{۲*}

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

mostafadodangeh@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 سولار MTDC ارائه شده است. مسائلی از جمله گسترش منابع تولیدات تجدیدپذیر و بارهای DC و تلاش برای افزایش کیفیت توان و کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید برق باعث گسترش شبکه‌های سولار شده است. تشخیص انواع و محل خطا برای تداوم سرویس‌دهی و جلوگیری از خرابی بیشتر و تقویت ویژگی انتخابگری حفاظت 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. خطاهای اتصال قطب مثبت به زمین (PG)، اتصال قطب منفی به زمین (NG) و اتصال قطب مثبت به منفی (PN) به‌عنوان اغتشاشات خط DC در نظر گرفته شد. در تعیین نوع خطا از خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی و تحلیل انرژی سیگنال استفاده شده است. روش ارائه‌شده در یک ریزش شبکه MTDC متصل به منابع ذخیره‌کننده و تجدیدپذیر انرژی با خطاهای بسیاری آزموده شد. نتایج، بیان‌کننده صحت روش پیشنهادی است. این روش نسبت به نویز با نسبت سیگنال به نویز بین ۱۰ تا ۷۰ درصد و تغییرات فرکانس نمونه‌برداری از ۰/۵ تا ۵۰ کیلوهرتز و مقاومت خطا تا ۱۰۰ اهم به‌صورت مقاوم عمل می‌کند و درصد خطای روش پیشنهادی کمتر از ۳ می‌باشد. در خطاهای با امپدانس بالا تا ۱۰۰۰ اهم عملکرد بسیار خوب بوده و در بدترین شرایط خطا کمتر از ۷ درصد است.

واژه‌های کلیدی: حفاظت ریزش شبکه سولار MTDC، انرژی سیگنال، فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی، دسته‌بندی خطا، تشخیص و تعیین محل خطا، فیزلت آنالین و تزریق جریان.

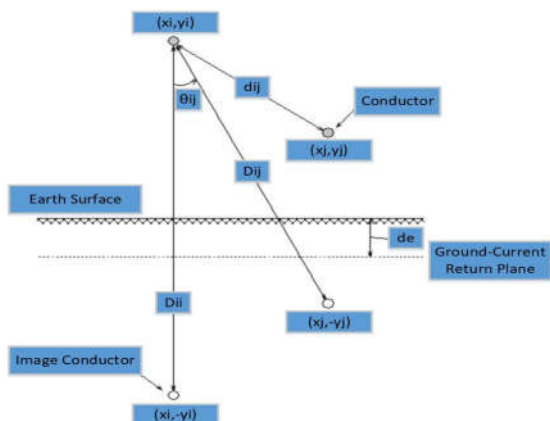
۱. مقدمه

ویولت مادر db^3 و تحلیل انرژی سیگنال و فیلتر ریخت‌شناسی قوی‌تر و بهینه‌سازی المان‌های کیت نوسان‌ساز سبب افزایش سرعت و کاهش میزان خطا در روش پیشنهادی نسبت به مرجع [۲۸] شد. با استفاده از امواج سیار حاصل از تبدیل فیزیت آنالین و ریخت‌شناسی ریاضی رخداد خطا تشخیص داده می‌شود. نوع خطا با محاسبه انرژی سیگنال خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی تعیین شد. ضریب کاهش β بر مبنای نمونه‌گیری از مشتق جریان خطا در شبکه محاسبه می‌شود. این روش در یک ریزشبه سولار MTDC با خطاهای بسیاری آزموده شد و نتایج تست بیان‌کننده صحت روش پیشنهادی است.

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

۲. مدل خط DC

یکی از دقیق‌ترین مدل‌ها برای بررسی رفتار خط DC مدلی است که J. R. Carson ارائه کرده است. در این مدل، مطابق شکل (۱) و با استفاده از رابطه انتگرالی دقیق (۱) که به رابطه کارسون مشهور است، امپدانس خط DC محاسبه شده است.



شکل (۱): طرح‌واره مدل خط DC

تعیین محل خطا در ریزشبه سولار به دلیل وجود انشعابات متعدد و طولانی باید با دقت بالایی انجام شود. همچنین با توجه به سطح ولتاژ شبکه و تجهیزات به کار برده‌شده، پیچیدگی و هزینه

روش‌های مرسوم حفاظت بر پایه کاهش ولتاژ و اضافه‌جریان [۱ و ۲] و نرخ تغییرات ولتاژ یا جریان [۳] حتی بدون عملکرد مناسب در خطاهای با امپدانس بالا یا فقدان کانال‌های مخابراتی قابل اعتماد برای حفاظت شبکه‌های MTDC استفاده شده است. حفاظت اضافه‌جریان پسیو با استفاده از تبدیل موجک گسسته برای تشخیص و طبقه‌بندی انواع خطا ارائه شده است [۴]. با وجود این، هیچ‌یک از روش‌های ارائه‌شده سرعت مناسبی را برای حفاظت از ریزشبه DC ارائه نمی‌دهد [۴ و ۵]. مرجع [۶] از حفاظتی بر مبنای اضافه‌جریان، جهت‌ی 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 بالا در ریزشبه MTDC بسیار گران‌قیمت و غیر قابل اجراست. روش‌های حفاظتی بر پایه امواج سیار به‌طور گسترده در تشخیص خطاهای خطوط انتقال استفاده می‌شود [۷-۹]. در برخی روش‌ها تبدیل موجک با روش‌های هوشمند همچون سیستم‌های استنتاج فازی [۷-۱۰] و شبکه‌های عصبی مصنوعی [۱۰-۱۴] ترکیب شده است؛ این امر برای بهبود کارایی روش ارائه می‌شود [۱۵]. بعضی از این روش‌ها وابسته به محل رخداد خطا و زمان رسیدن امواج سیار هستند [۱۶].

تعیین محل خطا در میکروگرید MTDC به دلیل وجود انشعابات متعدد و طولانی باید با دقت بالایی انجام شود. در مراجع [۱۷ و ۱۸] روش حفاظت باسبار در شبکه‌های توزیع DC بررسی شده است [۱۹]. روشی با استفاده از تقریب امپدانس واقعی در یک شبکه ارائه شده است. روش‌هایی در [۲۰-۲۲] برای تشخیص افت ولتاژ در میکروگرید MTDC با استفاده از حفاظت نقطه تزریق توان ارائه شده است. برخی از روش‌های حفاظت از نقطه تزریق توان بر اساس مبدل‌های الکترونیک قدرت برای تزریق سیگنال AC ارائه شده است [۲۲-۲۵]. حفاظت از میکروگرید با استفاده از بریکرهای DC [۲۶] و با استفاده از محدودکننده‌های جریان خطا [۹ و ۲۷] انجام شده است.

مرجع [۲۸] از ویولت آنالین و ریخت‌شناسی ریاضی برای تشخیص و تعیین محل خطا در خطوط استفاده شده است. در این مقاله، روشی با دقت بالا برای محل‌یابی خطا در خطوط ریزشبه MTDC با استفاده از تزریق جریان، فیزیت آنالین و ریخت‌شناسی ریاضی ارائه شد. استفاده از فیزیت آنالین با تابع

لازم برای حفاظت از این شبکه‌ها باید کم باشد.

جدول (۱): دقت و پیچیدگی برخی از روش‌های حفاظتی موجود

مرجع	روش	پارامترها	دقت	پیچیدگی/هزینه
[۲۹]	ویولت	V, I, P	بالا	بالا
[۳۰]	ویولت	V, I	بالا	بالا
[۳۱]	SSTDR	SSTDR	بالا	بالا
[۳۲]	تلفات و نسبت ولتاژ	V, I, P,..	پایین	بالا
[۳۳]	ولتاژ- جریان	V, I, P,..	بالا	بالا
[۳۴]	ANN	I, T	بالا	بالا
[۳۵]	ANN	V, I, ..	پایین	بالا
[۳۶]	خوشه‌بندی	V, I, P,..	پایین	بالا
[۳۷]	یادگیری ماشین	V, I, P,..	بالا	بالا
[۳۸]	میانگین	V, I, P,..	بالا	بالا
[۳۹]	وزنی- نمایی	V, I, P,..	پایین	بالا
[۴۰]	ویولت	V, I, P,..	پایین	بالا

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{D_{ij}}{|d_e|} \leftrightarrow i \neq j \\ \frac{2h_i}{|d_e|} \leftrightarrow i = j \end{cases}$$

x_i & $x_j [m]$: مؤلفه افقی محل قرار گرفتن سیم‌های i, j

y_i & $y_j [m]$: مؤلفه عمودی محل سیم‌های i, j

$h_i [m]$: ارتفاع هادی i از سطح زمین

$r_i [m]$: شعاع هادی i

$$d_e = \sqrt{\frac{\rho}{j \omega \mu}} [m] \text{ : عمق نفوذ جریان در زمین}$$

۳. روش پیشنهادی

۱.۳. کیت تزریق جریان

با افزودن شاخه Cq به کیت تزریق جریان ارائه‌شده در مرجع [۴۱] با عبور قسمتی از جریان سوئیچینگ از این شاخه، سبب کاهش تلفات سوئیچینگ می‌شود 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 شد و نتایج بهینه‌سازی با الگوریتم PSO در طراحی کیت مورد استفاده قرار گرفت. کیت تزریق جریان پیشنهادی به صورت شکل (۲) است. با اتصال کیت تزریق جریان شکل (۲) به ابتدای خط DC در صورتی که خطایی در شبکه رخ ندهد، با توجه به ولتاژ و جریان DC شبکه و مقادیر المان‌های کیت متصل‌شده جریانی از آن عبور نمی‌کند. در صورت رخداد خطا با عبور جریان از کیت، مدار معادل شبکه و کیت به صورت شکل (۳) قابل مشاهده است. 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 (۲) و (۳) است.

$$\frac{d^2 i_p(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di_p(t)}{dt} + \frac{1}{LC} i_p(t) = 0 \quad (۲)$$

$$i_p(t) = M_1 e^{-\beta t} \sin(\omega_d t) + M_2 e^{-\beta t} \cos(\omega_d t) \quad (۳)$$

در جدول (۱) میزان دقت و پیچیدگی اجرای چندین روش حفاظتی ارائه‌شده آمده است. با توجه به جدول (۱) و موارد اشاره‌شده، نیاز به روش دقیق حفاظتی، بدون نیاز به پارامترهای دو طرف و کانال‌های مخابراتی سرعت بالا در ریزشبکه‌های سولار وجود دارد. در روش پیشنهادی بر اساس نمونه‌گیری از جریان به تشخیص و دسته‌بندی خطا با دقت بالا و پیچیدگی کم انجام می‌شود.

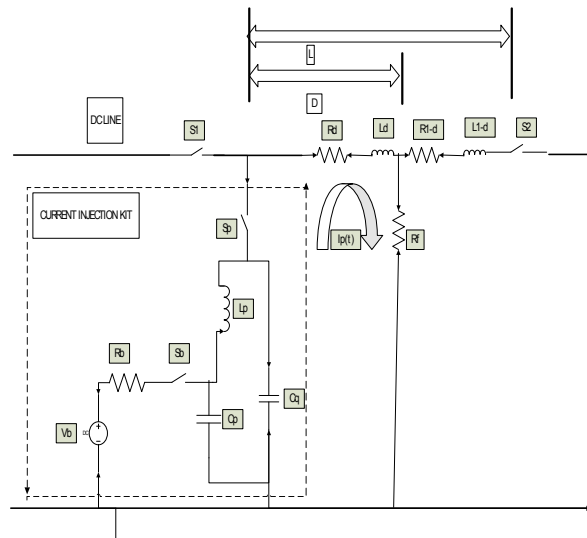
$$z_0 = j \omega \left(\frac{\mu}{2\pi} \right) \left[\text{Ln} \left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right) \right] \quad (۱)$$

$$+ 2 \int_0^\infty \frac{e^{-\alpha \cos(\theta_{ij})}}{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + jr_{ij}^2}} \cos(\alpha \sin(\theta_{ij})) d\alpha]$$

$$D_{ij} = \begin{cases} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leftrightarrow i \neq j \\ 2h_i \leftrightarrow i = j \end{cases}$$

$$d_{ij} = \begin{cases} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leftrightarrow i \neq j \\ r_i \leftrightarrow i = j \end{cases}$$

$$\theta_{ij} = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{(x_i - x_j)}{(y_i - y_j)} \right) \leftrightarrow i \neq j \\ 0 \leftrightarrow i = j \end{cases}$$



شکل (۳): مدار معادل شبکه و کیت در حالت رخداد خطا

۲.۳. 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 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 فیزیت شیفت‌یافته تبدیل ویولت است که در آن تابع مادر فیزیت از حاصل ضرب تابع مادر ویولت و یک شیفت فاز حاصل می‌شود. به‌منظور اعمال تبدیل فیزیت، سیگنال اصلی از یک فیلتر میان‌گذر^۳ (G) که فیزیت 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. H و G بردارهای متعامد با عناصر $N \times 1$ هستند [۴۲]. برای سطح دوم، مؤلفه تقریبی به دو مؤلفه تقسیم می‌شود؛ یعنی نمونه‌های آن به نصف کاهش می‌یابد و سپس به H و G منتقل می‌شوند تا به ترتیب مؤلفه‌های تقریبی و جزئی سطح بعدی ایجاد شوند. ادامه این روش تا سطح لازم، سیگنال اولیه را به اجزای جزئیات لازم و یک تقریب تقسیم می‌کند. این طرح در شکل (۴) تا سطح سوم تجزیه ارائه شده است. [۴۲-۴۴]

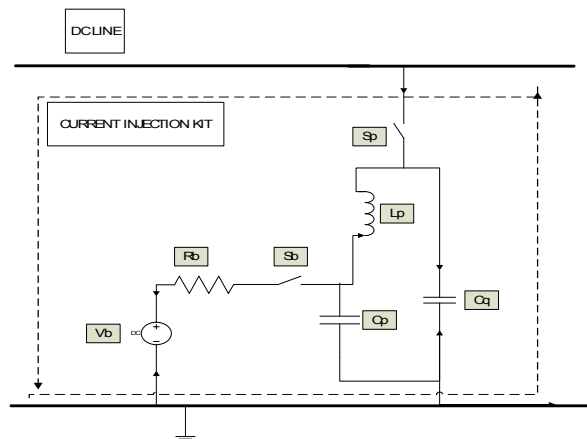
1. Online phaselet transform
2. Discrete wavelet transform
3. Band pass filter
4. Mother wavelet
5. Low pass filter

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

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

با توجه به وابستگی امپدانس خط به طول، فرکانس طبیعی به‌صورت (۴) قابل بازنویسی است.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{L_u d + C_q}{C_p(C_q L_u d + C_q L_p + L_u d L_p)}} \quad (۴)$$



شکل (۴): کیت تزریق جریان ارائه‌شده

بدین ترتیب محل رخداد خطا در خط DC با استفاده از روابط (۱)، (۳) و (۵) و درصد خطا در تعیین محل خطا به‌صورت (۶) محاسبه می‌شود.

پوش منحنی جریان خطا و مشتقات آن به‌صورت (۶) است و با داشتن ۲ نمونه از مشتق جریان ضریب کاهش α با استفاده از (۷) به دست می‌آید. از تقسیم فاصله زمانی دو پیک مشتق جریان بر 2π محاسبه و فرکانس طبیعی ω_n به‌صورت $\omega_n = \sqrt{\omega_d^2 + \alpha^2}$ محاسبه می‌شود.

$$d = \frac{C_q - C_p L_p C_q \omega_n^2}{L_u (C_p (L_p + C_q) \omega_n^2 - 1)} \quad (۵)$$

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

$$\varepsilon = \left| \frac{d_{cal} - d_{act}}{d_{act}} \right| \times 100 \quad (۶)$$

$$i_{p^p}(t) = K e^{-\beta t} \quad (۷)$$

$$\beta_n = \frac{\ln(i_n) - \ln(i_{n+1})}{t_{n+1} - t_n} \quad (۸)$$

۳.۳. 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 [۴۵]. 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 به صورت (۱۶) و (۱۷) تعریف می‌شود. و با استفاده از روابط گشایش و کاهش دو رابطه باز بودن و بسته بودن به صورت (۱۸) و (۱۹) تعریف شده و فیلتر ریخت‌شناسی با توجه به چهار رابطه معرفی شده، به صورت رابطه (۲۱) تعریف می‌گردد.

رابطه (۲۱) در تشخیص دامنه اغتشاشات با دقت بالایی عمل می‌کند. تغییرات ظاهری به وجود آمده در سیگنال در نتیجه اعوجاجات ناشی از رخداد خطا با استفاده از فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی، تشخیص داده می‌شود. همچنین، هنگامی که تغییر ناگهانی در سیگنال اولیه وجود ندارد، سیگنال‌های فرسایش و گشایش اختلاف فازی با هم نداشته و خروجی MMF صفر می‌شود.

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

$$f_e(n) = (f \ominus g)(n) = \max\{f(n+m) - g(m)\} \quad (17)$$

$$f_o(n) = (f \circ g)(n) = ((f \oplus g) \ominus g)(n) \quad (18)$$

$$f_c(n) = (f \cdot g)(n) = ((f \ominus g) \oplus g)(n) \quad (19)$$

$$M F(n) = (f(n) \circ (f \cdot g)(n) + f(n) \cdot (f \circ g)(n)) / 2 \quad (20)$$

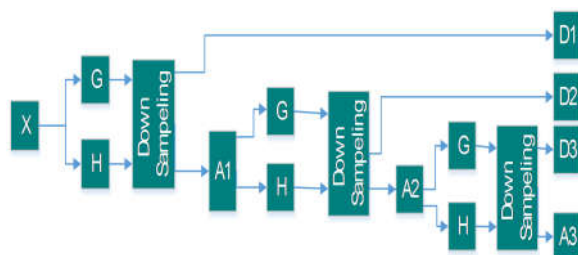
$$MMF(n) = (MF \oplus g)(n) - (MF \ominus g)(n) \quad (21)$$

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

و $m \in D_g$ و $D_s = \{0, 1, 2, \dots, M-1\}$

۴.۳. انرژی سیگنال

در پردازش سیگنال برای بیان قدرت سیگنال از عبارت اندازه سیگنال استفاده می‌شود. دانستن اندازه سیگنال در کاربردهای متعدد مهم و ضروری است. لذا روش‌های متفاوتی برای محاسبه اندازه سیگنال ارائه شده است. مساحت زیر منحنی سیگنال، مساحت زیر



شکل (۴): سه مرحله تجزیه سیگنال X با استفاده از تبدیل فیزلت گسسته

با توجه به توضیحات بالا مؤلفه‌های تقریبی و جزئی مرتبه j ام سیگنال اصلی با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) به دست می‌آید.

$$A_j = A_{j-1} \times G \quad (9)$$

$$D_j = D_{j-1} \times H \quad (10)$$

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 بهنگام تبدیل ویولت-فیزلت رسیدن به مؤلفه مورد نظر با روش کانولوشن‌های متوالی ارائه شده، زمان‌بر و غیرقابل قبول است. اما طبق معادلات (۹) و (۱۰)، اجزای سطح j ام نمی‌توانند محاسبه شوند، مگر اینکه مؤلفه تقریبی سطح $(j-1)$ ام به‌طور کامل تکمیل شود. در این بخش، یک فیلتر دیجیتال برای کاربردهای آنلاین تبدیل فیزلت 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 (۹) و (۱۰) به صورت (۱۱) و (۱۲) برای مرحله دوم بازنویسی می‌شود.

$$A_2 = A_1 \times G = X \times G \times G \quad (11)$$

$$D_2 = A_1 \times H = X \times G \times H \quad (12)$$

بنابراین با استفاده از این روش، ماتریسی برای تولید مؤلفه‌های مرتبه بالاتر می‌توان تعریف کرد [۴۲].

$$G_j = H_{jj} G_{j-1} = \left(\prod_{m=2}^j H_{mm} \right) G \quad (13)$$

$$A_j = X \times G^j \quad (14)$$

$$D_j = X \times G_j \quad (15)$$

در این مقاله از db^3 و $\frac{\pi}{3}$ به عنوان شیفت فازی، تابع فیزلت مادر برای افزایش سرعت روش حفاظت از خطوط ایجاد و استفاده شد. و با استفاده از تبدیل فیزلت آنلاین، با ادغام چهار مرحله تجزیه سیگنال در یک مرحله، سبب افزایش سرعت روش پیشنهادی شده است.

DC در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شد. شکل (۶) این ریزشبه‌سولار را نمایش می‌دهد. انواع خطا با شرایط مختلف از نظر محل رخداد خطا، مقاومت خطا و نوع خطا شبیه‌سازی شد. برخلاف شبکه‌های AC که ۱۱ نوع خطا (شامل سه فاز به زمین، سه فاز، سه نوع دوفاز و سه نوع تک‌فاز به زمین و سه نوع دوفاز به زمین) در خطوط انتقال و توزیع آن می‌تواند رخ بدهد و یافتن محل این خطاها برای تعمیر و بازیابی شبکه مهم است. در خطوط DC سه نوع خطا شامل اتصال قطب مثبت به زمین (PG⁺)، اتصال قطب منفی به زمین (NG⁻) و اتصال قطب مثبت به منفی (PN[±]) به‌عنوان اغتشاشات خط DC اهمیت بیشتری داشته و نیاز به یافتن سریع محل خطا و تعمیر و برگرداندن شبکه دارد.

سیگنال‌های جریان خطا در هر حالت اندازه‌گیری شد. در هر حالت با استفاده از روش دونمونه‌ای 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. تعیین نوع خطا با اعمال خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی به شبکه عصبی مصنوعی انجام شد. تعیین محل خطا و درصد خطای محاسبه آن در هر حالت با استفاده از روابط (۵) و (۶) محاسبه شد. نتایج برای برخی از حالات در جدول (۲) آمده است. در فاصله ۲۵٪ از طول خط بین باس Bb-B4 و باس Bb-B2 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 (۷ الف) جریان‌های خطای مربوط به انواع خطای اعمالی را نمایش می‌دهد.

با استفاده از db3 آنلاین با شیف‌فازی ۶۰ درجه به‌عنوان موجک مادر، فیزیت مشتق جریان‌های خطا سه حالت محاسبه شد. استفاده از فیزیت آنلاین سبب افزایش سرعت در تشخیص رخداد خطا و تعیین نوع خطا شد. شکل (۷ ب) نمودارهای آن را نمایش می‌دهد.

شکل (۷ ج) خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی را برای سه خطا نمایش می‌دهد. با توجه به نمودارهای شکل (۷ ج) روش پیشنهادی در تشخیص انواع خطا با دقت و سرعت بالایی عمل می‌کند.

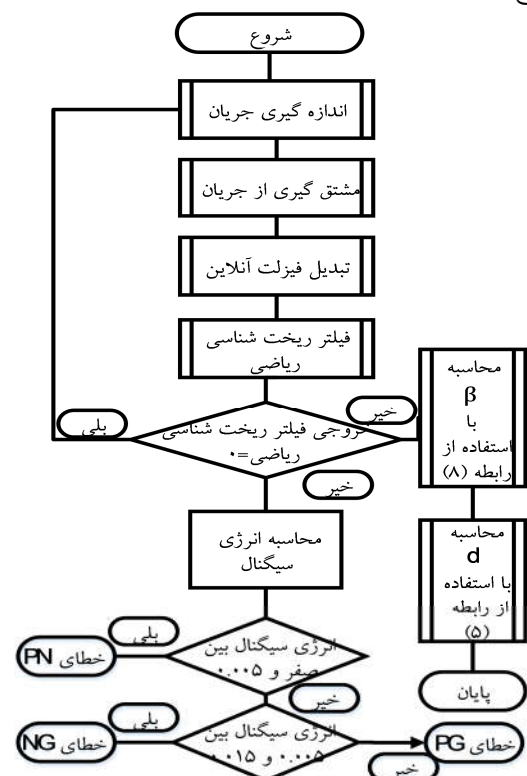
منحنی قدر مطلق و مساحت زیر نمودار مجذور سیگنال، از روش‌های محاسبه اندازه سیگنال است. از بین این روش‌ها محاسبه مساحت زیر نمودار مجذور سیگنال کاربردهای بیشتری دارد و با عنوان انرژی سیگنال شناخته می‌شود. انرژی سیگنال خروجی MMF با رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود.

$$E_{MMF} = \int_{-\infty}^{+\infty} |MMF|^2 dt \quad (22)$$

تشخیص خطا با استفاده از خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی و دسته‌بندی نوع خطا با استفاده از مقدار انرژی سیگنال خروجی MMF انجام می‌شود. انواع خطا در قسمت ۴ در شبکه شبیه‌سازی و صحت روش پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. فلوجارت روش پیشنهادی به‌صورت شکل (۵) است.

۴. شبیه‌سازی و نتایج

برای بررسی روش پیشنهادی، یک ریزشبه‌سولار چندترمیناله DC در نرم‌افزار PSCAD شبیه‌سازی شد. شکل (۵) این ریزشبه‌سولار 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.

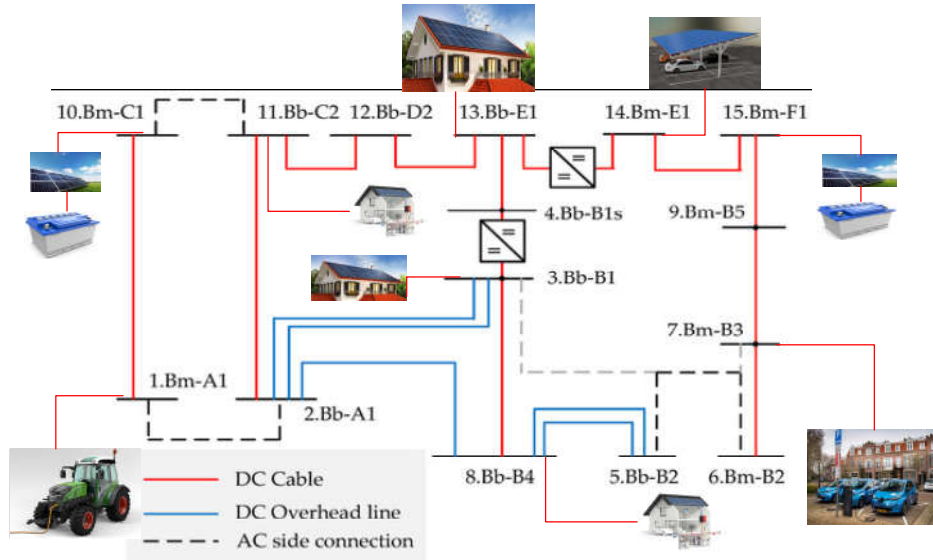


شکل (۵): روندنمای روش پیشنهادی تشخیص، دسته‌بندی و

محل‌یابی خطا

برای بررسی روش پیشنهادی، یک شبکه توزیع چندترمیناله

1. Positive pole to Ground
2. Negative pole to Ground
3. Positive pole to Negative pole

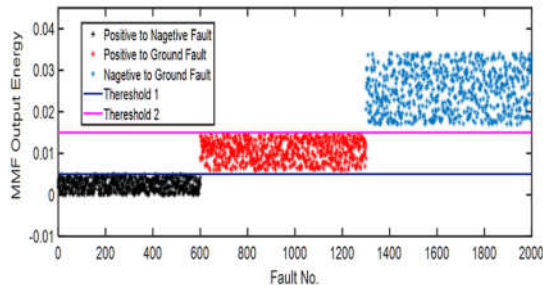


شکل (۶): شبکه آزمون ریزشبکه MTDC

جدول (۲): نتایج روش تعیین جایابی و دسته‌بندی خطا برای انواع خطا

ردیف	محل خطا			فواصل واقعی (درصد)	خطای NG			خطای PN			خطای PG		
	ابتدای خط	انتهای خط	فاصله واقعی (درصد)		فاصله محاسبه شده (درصد)	خطای تعیین فاصله (درصد)	ردیف خطا	فاصله محاسبه شده (درصد)	خطای تعیین فاصله (درصد)	ردیف خطا	فاصله محاسبه شده (درصد)	خطای تعیین فاصله (درصد)	ردیف خطا
۱	Bb-B1	Bb-A1	۵	۵۰	۵/۰۰۲	۰/۰۰۴	NG	۵/۰۰۳	۰/۰۰۶	PN	۵/۰۰۱۵	۰/۰۰۳	PG
۲	Bm-B3	Bm-B2	۱۵	۵۰	۱۵/۰۰۰۵	۰/۰۰۳۳۳	NG	۱۵/۰۰۱۱	۰/۰۰۷۳	PN	۱۵/۰۰۳	۰/۰۰۲۰۶۷	PG
۳	Bb-B1	Bb-A1	۳۰	۵۰	۳۰/۰۰۴	۰/۰۱۳۳	NG	۳۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۷	PN	۳۰/۰۱۳	۰/۰۰۴۳۳۳	PG
۴	Bm-A1	Bm-C1	۹۹	۰/۰۰۵	۹۹	۰	NG	۹۹/۹۹۹	۰/۰۰۰۱	PN	۹۹/۰۰۸	۰/۰۰۰۸۰۸	PG
۵	Bb-D1	Bb-C2	۴۵	۰/۰۰۵	۴۴/۹۹۸	۰/۰۰۴۴۴	NG	۴۴/۹۹۸۹	۰/۰۰۲۴	PN	۴۵	۰	PG
۶	Bm-E1	Bm-F1	۳۵	۵۰	۳۵	۰	NG	۳۵/۰۰۱۸	۰/۰۰۵۱	PN	۳۵/۰۰۲	۰/۰۰۵۷۱	PG
۷	Bb-A1	Bb-B4	۲۰	۳۵	۱۹/۸۳۱۴	۰/۸۴۳	NG	۱۹/۹۳۱	۰/۳۴۵	PN	۲۰/۲۳۹	۱/۱۹۵	PG
۸	Bb-B4	Bb-B2	۶۵	۳۵	۶۴/۵۲۰۴	۰/۸۳۷۸۴۶	NG	۶۵/۶۲۲	۰/۹۵۶۹۲	PN	۶۴/۵۳۱	۰/۷۲۱۵۳۸	PG
۹	Bb-E1	Bb-B1s	۶۵	۳۵	۶۵/۷۷۸	۱/۱۹۶۹۲۳	NG	۶۴/۳۵۴	۰/۹۹۳۸۵	PN	۶۴/۸۸۴	۱/۳۶	PG
۱۰	Bb-E1	Bb-B1s	۲۰	۳۵	۱۹/۷۵۶	۱/۲۲	NG	۲۰/۱۵۳	۰/۷۶۵	PN	۲۰/۲۴۹	۱/۲۴۵	PG
۱۱	Bb-B4	Bb-B1	۵	۰/۰۰۵	۴/۹۹۹۸	۰/۰۰۰۴	NG	۴/۹۹۹۷۷	۰/۰۰۰۴۶	PN	۴/۹۹۹۸	۰/۰۰۰۳۲	PG
۱۲	Bm-E1	Bm-F1	۵	۰/۰۰۵	۴/۹۹۹۷	۰/۰۰۰۶	NG	۴/۹۹۹۸۱	۰/۰۰۰۳۸	PN	۴/۹۹۹۸	۰/۰۰۰۴۴	PG
۱۳	Bm-E1	Bm-F1	۱۵	۰/۰۰۵	۱۴/۹۹۹۸	۰/۰۰۱۳۳	NG	۱۵	۰	PN	۱۴/۹۹۹۸	۰/۰۰۱۵۳	PG
۱۴	Bb-E1	Bb-D1	۳۰	۰/۰۰۵	۳۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۷۳۳	NG	۳۰	۰	PN	۳۰/۰۱۹	۰/۰۰۶۳۳۳	PG
۱۵	Bm-B5	Bm-F1	۲۵	۰/۰۰۵	۲۵/۹۹۸۹	۰/۰۰۰۴۴	NG	۲۵/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۷۶	PN	۲۴/۹۹۹	۰/۰۰۰۳۶	PG
۱۶	Bb-B1	Bb-A1	۴۵	۰/۰۰۵	۴۴/۹۹۸۶	۰/۰۰۰۳۱۱	NG	۴۴/۹۹۷۹	۰/۰۰۰۴۷	PN	۴۵	۰	PG
۱۷	Bm-B3	Bm-B5	۶۰	۵	۶۰	۰	NG	۶۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۱۵	PN	۵۹/۹۹۹	۰/۰۰۰۱۳۳	PG
۱۸	Bb-E1	Bb-D1	۴۰	۵	۴۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۰۷۷۵	NG	۴۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۱۸	PN	۳۹/۹۹۹	۰/۰۰۰۳۵	PG
۱۹	Bm-C1	Bm-A1	۸۵	۵	۸۵/۰۰۲۹	۰/۰۰۰۳۴۱	NG	۸۵/۰۰۲	۰/۰۰۲۳۵	PN	۸۵/۰۱۸	۰/۰۰۲۱۱۸	PG
۲۰	Bb-D1	Bb-C2	۵	۵۰	۵	۰	NG	۵/۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۴۶	PN	۵/۰۰۱۸	۰/۰۰۰۳۶	PG
۲۱	Bm-B5	Bm-F1	۵۵	۰/۰۰۵	۵۵/۰۰۲۲	۰/۰۰۰۴	NG	۵۴/۹۹۹۱	۰/۰۰۰۱۷	PN	۵۵/۰۰۳	۰/۰۰۵۶۴	PG
۲۲	Bm-B2	Bm-B3	۴۰	۰/۰۰۵	۴۰	۰	NG	۳۹/۹۹۸۹	۰/۰۰۲۷	PN	۴۰	۰	PG
۲۳	Bm-B2	Bm-B5	۸۰	۰/۰۰۵	۸۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۵	NG	۸۰	۰	PN	۸۰	۰	PG
۲۴	Bb-B4	Bb-A1	۵۰	۵	۵۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۲۲	NG	۵۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۶	PN	۵۰/۰۲۳	۰/۰۰۰۴۶	PG
۲۵	Bb-B4	Bb-B1	۷۰	۵	۷۰	۰	NG	۷۰/۰۳۲۲	۰/۰۰۰۴۶	PN	۶۹/۰۰۳	۰/۰۰۰۱	PG

۰/۰۰۵ و ۰/۰۱۵ و برای خطای NG بیش از ۰/۰۱۵ محاسبه شد. خطوط ۱ Threshold و ۲ Threshold در شکل (۸) بیان‌کننده معیار دسته‌بندی انواع خطای شبکه DC در ریزشکبه MTDC مورد مطالعه است.



شکل (۸): مقدار انرژی سیگنال خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی برای ۲۰۰۰ خطا

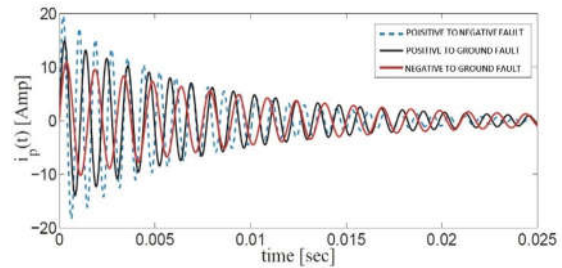
۶. تأثیر مقاومت خطا بر دقت روش پیشنهادی تعیین

محل خطا

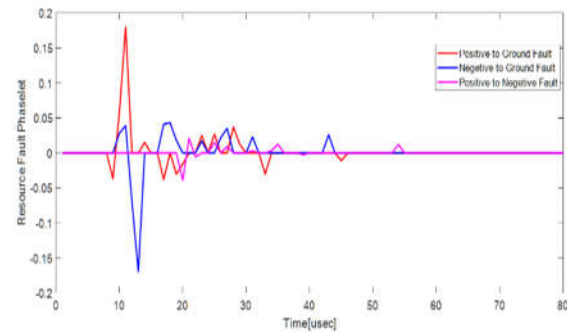
با افزودن شاخه Cq و اعمال سایر تغییرات در کیت تزریق جریان ارائه‌شده در مرجع [۴۱] و نصب کیت‌های ارائه‌شده و استفاده از روش پیشنهادی خطای تعیین محل خطا کاهش یافت. همچنین نسبت به روش ارائه‌شده در مرجع [۴۱] برای خطاهای نزدیک به ابتدای خط که دارای مقاومت خطای بالایی هستند، خطای تعیین محل خطا بسیار کاهش یافت. خطای روش ارائه‌شده در مرجع [۴۱] در شکل (۹) نشان داده شده است. با اعمال خطاهای مختلف در طول خط و با مقادیر متغیر مقاومت خطا از صفر تا ۱۰۰ اهم با استفاده از روش ارائه‌شده، محل رخداد انواع خطا محاسبه و در شکل (۹) میانگین خطای روش پیشنهادی تعیین محل خطا نشان داده شده است.

۷. بررسی تأثیر خطای امپدانس بالا

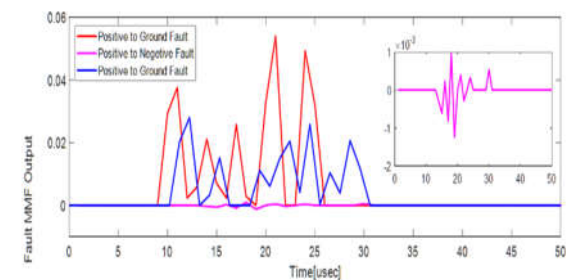
با توجه به شکل (۹) و نتایج جدول (۲)، روش ارائه‌شده در برابر خطای امپدانس بالا نیز دارای پاسخ مناسبی است. خطا با مقاومت ۱۰۰ اهم در نقاط مختلف طول خط اعمال شده و تعیین محل خطا با استفاده از روش پیشنهادی با خطای میانگین کمتر از ۲/۵٪ انجام شده است. همچنین خطا با مقاومت ۵۰۰ و ۱۰۰۰ اهمی در نقاط متعددی از شبکه با شرایط مختلف اعمال شد و در بدترین شرایط تعیین محل خطا با استفاده از روش پیشنهادی، دارای خطای ۷ درصدی است.



الف



ب



ج

شکل (۷): الف. جریان خطا سه حالت؛ ب. خروجی فیزیت آنلاین سه خطا؛ ج. خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی سه خطا

۵. انتخاب معیار دسته‌بندی خطا

خطاهای مختلفی در شبکه با شرایط رخداد متفاوت از نظر مقاومت خطا، فرکانس نمونه‌برداری، محل و نوع خطا بررسی شد که نتایج برخی از آن‌ها در جدول (۲) و شکل (۸) آمده است. مقدار انرژی سیگنال خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی برای تمام حالات با استفاده از رابطه (۲۲) محاسبه شد و نتایج در شکل (۸) آمده است. انتخاب معیار دسته‌بندی خطا با توجه به شبیه‌سازی حالت‌های مختلف صورت گرفت.

در شکل (۸) خطاهای شماره یک تا ۶۰۰ از نوع PN و خطاهای دارای شماره ۶۰۱ تا ۱۳۰۰ از نوع PN است و ۷۰۰ خطای آخر با شماره‌های ۱۳۰۱ تا ۲۰۰۰ از نوع خطای NG هستند. در شبیه‌سازی خطاهای مختلف مقدار انرژی سیگنال خروجی MMF برای خطای PN بین صفر و ۰/۰۰۵، برای خطای PG بین

جدول (۳) بیان می‌کند که روش پیشنهادی نسبت به حضور نویز در سیگنال‌های اندازه‌گیری شده مقاوم است.

جدول (۳): تأثیر نویز بر دقت محل یابی خطا

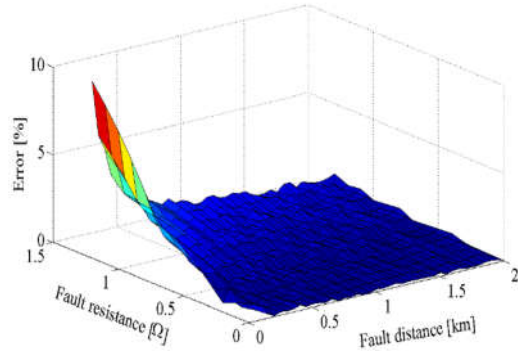
SNR(%)		۱۰	۳۰	۴۰	۵۵	۶۵	۷۰
مقاومت خطا(Ω)	محل خطا(%)						
۶۰	۹۵	۹۴/۱	۹۳/۶	۹۱/۷	۹۴/۵	۹۳/۶	۹۲/۷
۳۰	۸۵	۹۵/۱	۹۵/۹	۹۳/۵	۹۴/۸	۹۱/۱	۹۴/۴
۳۰	۶۰	۹۴/۶	۹۳/۴	۹۵/۳	۹۲/۴	۸۹/۳	۹۰/۹
۲۰	۴۰	۹۷/۵	۹۳/۶	۹۴/۷	۹۴/۴	۹۳/۷	۹۲/۳
۶۰	۲۵	۹۴/۶	۹۴/۹	۹۳/۷	۹۳/۸	۹۳/۳	۹۴/۹
۱۰	۱۰	۹۶/۲	۹۳/۹	۹۴/۳	۹۳/۴	۹۴/۷	۹۰/۸

۹. تأثیر فرکانس نمونه برداری

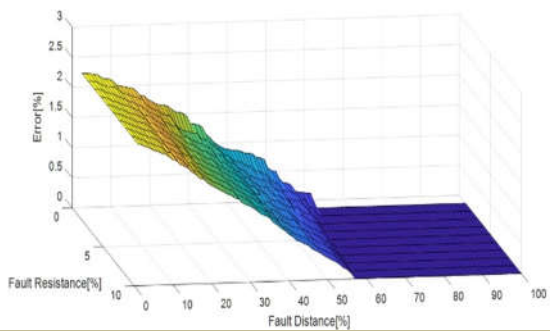
با تغییر فرکانس نمونه برداری از مقدار ۵۰۰ Hz تا ۵۰ KHz روش پیشنهادی برای خطاهای مختلف استفاده شد و نتایج برای سه فرکانس‌های نمونه برداری ۰/۵، ۱، ۵، ۱۲، ۲۰، ۳۲ و ۵۰ KHz در جدول (۴) آمده است. نتایج جدول (۴) به وضوح نشان می‌دهد که تغییر فرکانس نمونه برداری در محدوده وسیع ۱۰۰ برابری تغییری در کارایی و دقت روش پیشنهادی در تعیین محل خطا ایجاد نمی‌کند و انواع خطا با استفاده از روش پیشنهادی محل خطا با خطای بسیار پایین محاسبه شد.

جدول (۴): تأثیر فرکانس نمونه برداری بر دقت محل یابی خطا

فرکانس نمونه برداری	فاصله واقعی محل خطا (درصد)	۵	۱۰	۲۰	۳۰	۴۵	۶۰	۸۰	۹۵
		مقاومت خطا (اهم)	۰/۱	۱۰۰	۰/۱	۵۰	۱۰	۱۰۰	۰/۱
۵۰۰ Hz	فاصله محاسبه شده (درصد)	۵/۰۰۶	۴/۹۹۹۱	۲۰/۰۰۹	۲۹/۹۸۹	۴۵	۶۰/۰۸	۸۰/۰۹	۹۴/۶۲
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰/۱۲	۰/۰۱۸	۰/۰۴۵	۰/۰۳۶۶۷	۰	۰/۱۳۳۴	۰/۱۱۲۵	۰/۳۹۴۸
۱ kHz	فاصله محاسبه شده (درصد)	۵	۵/۰۰۵	۱۹/۹۹۴	۲۹/۹۹	۴۵	۵۹/۸	۷۹/۹۶	۹۵/۱۹
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰	۰/۰۱	۰/۰۳۰	۰/۰۳۳۳۴	۰	۰/۳۳۳۴	۰/۰۵	۰/۲
۵ kHz	فاصله محاسبه شده (درصد)	۴/۹۹۹۶	۴/۹۹۹	۲۰/۰۲	۳۰/۰۰۱۹	۴۴/۹۷	۶۰/۱	۷۹/۹۴	۹۵/۵۴
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰/۰۰۸	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۰۰۶۳۴	۰/۰۶۶۶۷	۰/۱۶۶۷	۰/۰۷۵	۰/۴۶۳۲
۱۲ kHz	فاصله محاسبه شده (درصد)	۴/۹۹۹۵	۵/۰۰۰۸	۲۰/۰۶	۳۰/۱	۴۵/۱	۵۹/۶۹	۸۰/۲	۹۵
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰/۰۱	۰/۰۱۶	۰/۰۳	۰/۳۳۳۴	۰/۲۲۲۲۳	۰/۵۱۶۷	۰/۲۵	۰
۲۰ kHz	فاصله محاسبه شده (درصد)	۴/۹۹۹	۵/۰۰۹	۲۰/۰۱۹	۳۰/۰۱۵	۴۵	۶۰/۰۷	۷۹/۹۶	۹۵/۰۸
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰/۰۲	۰/۰۱۸	۰/۰۰۹۵	۰/۰۵	۰	۰/۱۱۶۷	۰/۰۵	۰/۰۸۴۲
۳۲ kHz	فاصله محاسبه شده (درصد)	۴/۹۹۹	۴/۹۹۹۴	۲۰/۱۲۳۶	۳۰/۰۰۳	۴۴/۹۸۶	۶۰	۸۰/۰۵۸	۹۴/۷۱
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰/۰۲	۰/۰۱۲	۰/۶۱۸	۰/۰۱	۰/۰۳۱۱	۰	۰/۰۷۲۵	۰/۳۰۵۳
۵۰ kHz	فاصله محاسبه شده (درصد)	۵	۵/۰۰۱	۱۹/۹۹	۳۰/۰۰۵۷	۴۵/۰۴	۶۰/۰۳	۸۰/۱۸	۹۴/۹۳
	خطای تعیین فاصله (درصد)	۰	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۱۸۹۹	۰/۰۸۸۸۹	۰/۰۵	۰/۲۲۵	۰/۰۷۳۷



شکل (۹): خطای تعیین محل خطا با استفاده از روش ارائه شده در مرجع [۴۱]



شکل (۱۰): خطای تعیین محل خطا با استفاده از روش پیشنهادی

۸. تأثیر نویز

با اعمال نویز گاوسی به سیگنال‌های اندازه‌گیری شده با نسبت‌های متفاوت به بررسی اثر نویز به روش پیشنهادی پرداخته شد و نتایج

۱.۰ نتیجه‌گیری

می‌دهد. تعیین نوع خطا با توجه به خروجی فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی و محاسبه انرژی سیگنال خروجی MMF انجام شد و تعیین محل خطا با استفاده از معادلات مداری و محاسبات جریانی صورت گرفت. صحت روش ارائه شده در یک ریزشبه چندترمیناله DC با خطاهای مختلفی از نظر نوع، محل و مقاومت آزموده شد. کارایی روش ارائه شده فارغ از توپولوژی ریزشبه سولار است و تغییرات مقاومت خطا، حضور نویز و تغییرات فرکانس نمونه برداری تأثیر چندانی در کارایی روش ارائه شده ندارد. همچنین در شرایط خطاهای با امپدانس بالا عملکرد بسیار خوبی دارد.

در این مقاله روشی جدید برای تشخیص خطا و تعیین نوع و محل خطا در میکروگرید DC سولار ارائه شد. روش پیشنهادی در تشخیص و دسته‌بندی انواع خطای در ریزشبه‌های سولار به صورت سریع، دقیق و با کارایی بالا عمل می‌کند. تعیین دقیق محل خطا با اتصال یک کیت مداری به شبکه انجام شد. در صورت رخداد خطا با اندازه‌گیری امواج سیار مشتق جریان خطا و اعمال آن به یک فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی، تشخیص خطا صورت می‌گیرد. استفاده از کیت مداری پیشنهادی سبب کاهش خطای تعیین محل خطا شد؛ به ویژه خطاهایی که در ابتدای خط و نزدیک کیت رخ

ضمائم

ضمیمه ۱:

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		
۳/۳ kV	۳۵ kW		نیروگاه بادی
۷۶۰ V	۸ kW		نیروگاه خورشیدی
۰/۶۶ kV	۵ kVA		دیزل ژنراتور
۰/۷ kV	۲/۵ kW		باتری
۱۱ kV	۷۰ kVA		شبکه AC
اطلاعات ترانسفورماتورها			
ولتاژ LV	ولتاژ HV	توان نامی	
۴۰۰ V	۳/۳ kV	۳۶ kVA	بین نیروگاه بادی و مبدل ریزشبه
۴۰۰ V	۷۶۰ V	۹ kVA	بین نیروگاه خورشیدی و مبدل ریزشبه
۴۰۰ V	۱۱ kV	۸۰ kVA	بین شبکه AC و مبدل ریزشبه

ضمیمه ۲: 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

$$\text{minimize} \left(\sum_m C_{qm} + C_{bm} \right) \quad \& \quad \text{minimize} \left(\sum_m L_{qm} \right)$$

انتخاب بهینه عناصر کیت تزریق جریان

روش بهینه‌سازی	$C_q[\mu F]$	$C_b[\mu F]$	$L_q[\mu H]$	OF
GA	۳۰	۱۹۷	۷۱۶	۰/۰۲۶۴۹
GA PSO	۳۳	۱۸۹	۶۷۰	۰/۰۳۵۲۳
PSO	۲۷	۱۶۹	۶۳۱	۰/۰۰۱۹۲۶

ضمیمه سه:

فهرست علائم و اختصارات

i_p	جریان عبوری از شبکه در حالت خطا	NG	خطای قطب منفی به زمین
\square_n	فرکانس طبیعی	PG	خطای قطب مثبت به زمین
α	ضریب میرایی	PN	خطای قطب مثبت منفی به قطب منفی
d	فاصله از محل خطا	C_p, C_q	خازن‌های کیت
R	مقاومت معادل کیت و شبکه	S_b, S_p	سوئیچ‌های کیت
L	اندوکتانس معادل کیت و شبکه	L_p	اندوکتانس کیت
C	خازن معادل کیت و شبکه	V_b, R_b	باتری و مقاومت کیت
f_d	سیگنال گشایش	f_c	تابع بسته بودن
f_e	سیگنال کاهش	f_o	تابع باز بودن
MTDC grid	شبکه جریان مستقیم چندپایانه‌ای	SSTDTR	Spread Spectrum Time-Domain Reflectometry[45]

ضمیمه ۴:

تفاوت‌های کلی مقاله حاضر با مرجع [۲۸] برای مقایسه بهتر

مرجع [۲۸]	مقاله حاضر	عنوان	ردیف
فقط یک المان بهینه‌سازی شد.	تمام المان‌ها	بهینه‌سازی کیت نوسان‌ساز	۱
با یک روش	با چند روش	بهینه‌سازی کیت نوسان‌ساز	۲
با فیلتر ریخت‌شناسی $MMF(k) = \begin{cases} MF_d(k) - MF_e(k) \Leftrightarrow MF_d(k-1) < MF_d(k) \\ MF_e(k) - MF_d(k) \Leftrightarrow MF_e(k-1) < MF_e(k) \end{cases}$	با فیلتر ریخت‌شناسی $MMF(n) = (MF \oplus g)(n) - (MF \ominus g)(n)$	تشخیص رخداد خطا	۳
خیر	بلی	استفاده از تحلیل انرژی سیگنال در دسته‌بندی خطا	۴
از فیزلت آنالین با بدون شیفت فازی (ویولت آنالین) برای حفاظت خطوط استفاده می‌شود.	بلی (با شیفت فازی ۶۰ درجه)	استفاده از فیزلت آنالین در حفاظت خطوط	۵
db4	db3	تابع موجک مادر	۶
بلی	خیر	استفاده از خروجی‌های فیزلت در دسته‌بندی خطا	۷
خیر	بلی	بررسی اثرات نوبز	۸
خیر	بلی تا ۱۰۰۰ اهم	بررسی اثرات خطای امپدانس بالا	۹

مراجع

- [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] Liang, Y., 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, 2022.
- [9] Ananthan, S.N., Padmanabhan, R., Meyur, R., 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] 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.
- [11] 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.
- [12] Johnson, J.M., 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.
- [13] 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.
- [14] Abdollahi, A. and Seyedtabaai, 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Christopher, E., Sumner, M., Thomas, D., 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Park, J.D., Candelaria, J., Ma, L., 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.
- [23] Park, J. "Ground fault detection and location for ungrounded DC traction power systems", IEEE Trans. Veh. Technol, Vol. 64, No. 12, pp. 5667-5676, 2015.
- [24] Jia, K., Bi, T., Liu, B., 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.
- [25] Zadsar, M., Haghifam, M.R., Larimi, S.M.M., "Approach for self-healing resilient operation of active distribution network with microgrid", Vol. 11, No. 18, pp. 4633-4643, 2017.
- [26] Kheirollahi, R., et al., "Coordination of ultrafast solid-state circuit breakers in radial dc microgrids", in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3109483.
- [27] 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, Vol. 5, No. 6, pp. 6362-6374, 2021.
- [28] Dodangeh, M. and Ghaffarzadeh, N., "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.
- [29] Kumar, B.P., et al., "Online fault detection and diagnosis in photovoltaic systems using wavelet packets", IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 8, No. 1, pp. 257-265, 2017.
- [30] Kim, I.-S., "On-line fault detection algorithm of a photovoltaic system using wavelet transform", Solar Energy, Vol. 126, pp. 137-145, 2016.
- [31] Roy, S., et al., "An irradiance-independent, robust ground-fault detection scheme for PV arrays based on spread spectrum time-domain reflectometry (SSTDR)", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 8, pp. 7046-7057, 2017.
- [32] Silvestre, S., et al., "Automatic fault detection in grid connected PV systems", Solar energy, Vol. 94, pp. 119-127, 2013.
- [33] Silvestre, S., et al., "Remote supervision and fault detection on OPC monitored PV systems", Solar Energy, Vol. 137, pp. 424-433, 2016.
- [34] Liu, G. and W. Yu., "A fault detection and diagnosis technique for solar system based on Elman neural network", IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). 2017.
- [35] Garoudja, E., et al., "An enhanced machine learning based approach for failures detection and diagnosis of PV systems", Energy conversion and management, Vol. 151, pp. 496-513, 2017.
- [36] Lin, P., et al., "A density peak-based clustering approach for fault diagnosis of photovoltaic arrays", International Journal of Photo energy, 2017.
- [37] Wu, Y., et al., "An intelligent fault diagnosis approach for PV array based on SA-RBF kernel extreme learning machine", Energy Procedia, Vol. 105, pp. 1070-1076, 2017.
- [38] Garoudja, E., et al., "Statistical fault detection in photovoltaic systems", Solar Energy, Vol. 150, pp. 485-499, 2017.
- [39] Harrou, F., et al., "Reliable fault detection and diagnosis of photovoltaic systems based on statistical monitoring approaches", Renewable energy, Vol. 116, pp. 22-37, 2018.
- [40] Wang, Z., Balog R.S., "Arc fault and flash detection in DC photovoltaic arrays using wavelets", IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2013.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Dodangeh M, Ghaffarzadeh N., "An Intelligent Protection Method for Multi-terminal DC Microgrids Using On-line Phaselet, Mathematical Morphology, and Fuzzy Inference Systems",

- Journal of Energy Management, Vol. 12, No. 2, pp. 12-25, 2022.
- [45] Namdari, F., 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.
- [46] Xu, Q., 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. 1375–1385, 2021.
- [47] Veerasamy, V., et al., "*Recurrent network based power flow solution for voltage stability assessment and improvement with distributed energy sources*", Applied Energy, Vol. 302, 2021.
- [48] Saber, A., Zeineldin, H.H., EL-Fouly, Tarek H.M., 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.