

# طراحی یک ساختار حفاظت دیفرانسیل جدید برای ریز شبکه‌های DC مبتنی بر مولفه‌های جریان خطا

سعید جوادی<sup>۱</sup>      نوید رضائی<sup>۲</sup>      علی حسامی نقشبندی<sup>۳</sup>  
۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه کردستان- کردستان- ایران  
[s.javadi19@gmail.com](mailto:s.javadi19@gmail.com)  
۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه کردستان- کردستان- ایران  
[n.rezaei@uok.ac.ir](mailto:n.rezaei@uok.ac.ir)  
۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه کردستان- کردستان- ایران  
[hesami@uok.ac.ir](mailto:hesami@uok.ac.ir)

**چکیده:** در سال‌های اخیر، انگیزش‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و قابلیت اطمینان، حرکت بسوی بهره‌برداری سلولی از سیستم‌های قدرت هوشمند را در قالب مفهوم ریز شبکه‌ها، تسریع بخشیده است. بدیهی است با توجه به سطح پایین اینرسی، تنوع منابع تولید توان با مشخصات فنی مختلف و مدهای مختلف بهره‌برداری جزیره‌ای و متصل به شبکه، حفاظت و کنترل ریز شبکه‌ها به چالشی نوین بر سر راه مدیران این سلول‌های هوشمند تبدیل شده است. از سویی دیگر، با یکپارچه‌سازی بستر اندازه‌گیری و مخابراتی پیشرفته در ریز شبکه‌ها، حفاظت‌های دیفرانسیل، بعنوان مطمئن‌ترین منطق حفاظتی، می‌تواند نقش حیاتی را در ساختار حفاظتی ریز شبکه‌ها ایفا نماید. با توجه به ماهیت رخداد خطاها در ریز شبکه، خطاهای مقاومت بالا یک مشکل اساسی در بکارگیری حفاظت دیفرانسیل و جهت‌یابی خطا به وجود آورده است. در این مقاله از یک روش جدید برای تشخیص سریع و دقیق خطا در ریز شبکه DC استفاده شده است، بطوریکه به درستی خطاهای داخلی را از خطاهای خارجی تشخیص داده است، همچنین عملکرد این الگوریتم جدید به ازای افزایش مقاومت خطا نیز مشاهده گردیده و با عملکرد حفاظت دیفرانسیل رایج مقایسه شده است. اساس روش جدید استفاده از مولفه جریان‌های خطا دو طرف خط مورد مطالعه و رسم آنها در صفحه  $\Delta i$  برای تشخیص نوع خطا می‌باشد. در این مقاله شبیه‌سازی خطای داخلی و خارجی در EMTP-ATP به ازای مقادیر مختلف مقاومت خطا انجام شده و پیاده‌سازی الگوریتم جدید و حفاظت دیفرانسیل مرسوم نیز در MATLAB انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی بیانگر دقت و سرعت عمل بالای روش جدید بیان شده، می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** ریز شبکه DC، حفاظت دیفرانسیل، آنالیز خطا، حفاظت واحد و مولفه خطای جریان

**نوع مقاله:** پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.139

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر نوید رضائی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - کردستان - سنندج - بلوار پاسداران، دانشگاه کردستان، دانشکده مهندسی، دپارتمان شماره یک، گروه

مهندسی برق

## ۱- مقدمه

یک ریزشبه معمولاً شامل یک مجموعه محلی از منابع تولید پراکنده، سیستم ذخیره انرژی و بارها می‌باشد که می‌تواند به صورت اتصال به شبکه و یا مد جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار گیرد [۱]. ریزشبهکها منافع زیادی هم برای مصرف کننده و هم برای شرکت‌های تولید برق دارد، از دید مصرف کننده ریزشبهک قابلیت فراهم ساختن همزمان برق و حرارت، افزایش قابلیت اطمینان، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بهبود کیفیت را دارد و از دید شرکت‌های برق بکارگیری ریزشبهکها سبب کاهش دیماند مصرفی و بنابراین کاهش تسهیلات توسعه خطوط انتقال و علاوه بر آن عامل حذف نقاط اوج مصرف خواهد بود که در نتیجه از تلفات شبکه نیز کاسته می‌شود، ریزشبهکها به دو نوع AC و DC تقسیم می‌شوند [۲].

ریزشبهک DC برای دستیابی به برق‌رسانی روستاها به ویژه در کشورهای در حال توسعه مد نظر قرار گرفته شده است. سیستم‌های متصل به شبکه به طور عمده در شهرها تاسیس شده‌اند و به طور پراکنده به روستاها و مناطق ایزوله شده رسیده‌اند.

امروزه ریزشبهک‌های DC یک رویکرد واقع بینانه از بارهای الکتریکی با مصرف توان DC با وجود منابع تولید توان DC نظیر آرایه‌های فتوولتائیک، سلول‌های سوختی و منابع ذخیره‌سازی می‌باشد [۳].

از مسائل بسیار مهم در ریزشبهکها بحث پایداری ولتاژ و کنترل آن است که در [۴] یک روش جدید برای بهبود پایداری ولتاژ ارائه شده است، همچنین راهکارهایی برای مدیریت مطلوب توان از نظر اقتصادی و فنی در ریزشبهک با در نظر گرفتن پایداری سیگنال کوچک بیان شده است [۵].

در [۶] عدم قطعیت منابع تولید پراکنده ریزشبهک در نظر گرفته شده است و با استفاده از الگوریتم هیورستیک با در نظر گرفتن تاثیر رفتارهای احتمالی و نوسانی منابع انرژی تجدیدپذیر و بار به صورت الگوریتم پخش بار احتمالی مدل می‌شود.

در یک ریزشبهک DC یکی از چالش‌های مهم عدم حل مشکل حفاظت آن می‌باشد، تشخیص سریع و دقیق خطا روی خط در یک ریزشبهک و فرمان سریع به کلیدهای دوطرف خط از مسائل مهم است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۷]. در ادامه برخی از انواع حفاظت‌های ریزشبهک و ویژگی‌های آنها بیان خواهد شد [۸].

همانطوریکه می‌دانیم ریزشبهکها در دو حالت متصل به شبکه و جدا از شبکه عمل می‌کنند و هر کدام از حالت‌های فوق دارای یک الگوریتم حفاظتی برای ریزشبهک هستند [۹]، در [۱۰] هماهنگی بهینه برای یک ریزشبهک در هر دو حالت جدا از شبکه و متصل به شبکه انجام شده است اما مشکل کار پیچیدگی و محاسبات زیاد برای هر دو حالت است.

به طور معمول برای حفاظت خطوط در ریزشبهکها از حفاظت اضافه جریان که یک حفاظت غیر واحد با دقت نه چندان بالا می‌باشد، استفاده می‌شود در [۱۱] مروری بر انواع حفاظت‌های جریانی خطوط در ریزشبهکها و معایب، مزایا و چالش‌هایی که سر راه این نوع حفاظت‌ها قرار دارد، شده است، مشاهده گردید که به دلیل مسائل مربوط به حفاظت اضافه جریان (به عنوان مثال غیر واحد بودن، تاخیر زمانی و ...) نمی‌توان آنها را برای ریزشبهکها به تنهایی بکار برد بلکه بایستی این نوع حفاظت‌ها را به عنوان پشتیبان بکار برد.

در ادامه یک نوع حفاظت با استفاده از امواج سیار برای حفاظت خطوط ریزشبهک استفاده شده است استفاده از امواج سیار با مسائل مخابراتی در ارتباط و نیازمند یک فیلتر پایین‌گذر می‌باشد، همچنین نیاز به کانال ارتباطی بسیار دقیق می‌باشد. این الگوریتم به نوبت بسیار حساس است تا آنجایی که نویز دستگاه‌های مخابراتی می‌تواند باعث عملکرد اشتباه الگوریتم گردد [۱۲]. در [۱۳ و ۱۴] با استفاده از یک روش که هیچ وابستگی به مقاومت خطا و نوع خطا ندارد می‌توان فاصله خطا را تشخیص داد در این کارها به دلیل بهره‌گیری از نمونه‌های ثبت شده در پایانه‌ها، هامونیک‌های موجود در شکل موج پایانه‌ها بر عملکرد آن تاثیری ندارد.

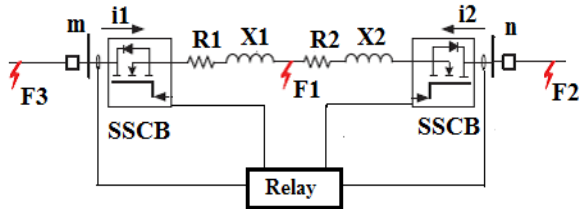
در [۱۵] الگوریتم‌های حفاظتی و معایب و مزایای آنها را در تمام حالت‌هایی که ریزشبهک می‌تواند کار کند به طور کامل تشریح کرده است.

حفاظت ریزشبهک DC و AC با هوشمندسازی ریزشبهک می‌تواند به صورت بسیار کارآمدتر و با دقت بیشتری پیاده‌سازی گردد از کاربردهای این هوشمندسازی به عنوان مثال حفاظت تطبیقی می‌باشد که خود ریزشبهک نوع حفاظت را بسته به شرایط انتخاب می‌کند [۱۶]. در [۱۷] سیر تکامل ریزشبهک‌های DC و بعضی الگوریتم‌های حفاظتی بیان شده است در بعضی موارد خطا مشاهده گردید که این الگوریتم‌ها دارای تاخیری در عملکرد هستند.

همچنین یک نوع حفاظت کاهش ولتاژی برای ریزشبهک‌های DC با استفاده از نمونه‌برداری از سیگنال‌های ولتاژ در ریزشبهک به صورت دیجیتال تشریح شده است [۱۸].

سنسورهای کافی و زیرساخت‌های مخابراتی در یک ریزشبهک DC یک فرصت مناسب را برای بکارگیری حفاظت واحد فراهم کرده است. حفاظت دیفرانسیل واحد براساس تفاضل دامنه جریان در [۱۹] به طور کامل بیان گردیده است، در این روش خطاهای با مقاومت بالا باعث کاهش دامنه جریان گردیده است و همین امر موجب عدم عملکرد صحیح این الگوریتم شده است یعنی رله حفاظتی بکار رفته با این الگوریتم خطای با مقاومت بالا در خط را ندیده است. در [۲۰] یک روش حفاظتی بر اساس جهت جریان خطای دو طرف خط بیان گردیده است، در این روش تردید است که بتواند به درستی داخلی یا خارجی بودن خطا را تشخیص دهد.

که در اینجا  $i_i$  مقدار نمونه جریان می باشد و برای فرکانس نمونه برداری ۴ کیلوهرتز  $N = 5$  می باشد و  $\dot{g} = 4000A/s$  آستانه اغتشاش است. همچنین در اینجا  $\Delta t = \frac{1}{f_s}$  و  $f_s$  فرکانس نمونه برداری می باشد. وقتی که  $g$  بالاتر از  $\dot{g}$  می شود الگوریتم اصلی حفاظتی در ریزشبه فعال می گردد [۲۰].



شکل (۲): خط موجود در یک شبکه هوشمند به همراه رله آن [۲۰]

در شکل (۲) خطاهای داخلی و خارجی نشان داده شده است، که در آن  $F1$  خطای داخلی و  $F2$  و  $F3$  خطای خارجی را نشان می دهد. توجه گردد که SSCB نشان دهنده کلیدهایی دوطرف خط و RELAY، رله الکترونیکی هوشمند است که وقتی فعال گردد و خطایی در خط باشد با تولید یک پالس و فرستادن آن برای کلیدهایی دوطرف خط آن را بی برق می کند.

### ۳- نحوه تشخیص خطای داخلی و خارجی

در این قسمت با استفاده از یک سری روابط ابتدا مولفه خطای جریان استخراج می گردد و سپس برای خطای داخلی و خارجی به نتایجی رسیده می شود، که در قسمت بعد توضیح داده شده اند.

#### ۳-۱- خطای داخلی

ابتدا فرض می شود که خطای داخلی  $F1$  روی خط شکل (۲) اتفاق می افتد. با وجود این خطا یک حلقه تشکیل می گردد که در آن جریان باس  $m$  طبق رابطه (۲) محاسبه می گردد.

$$i_1^{F1} = \frac{V_{dc0}}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{R_1 t}{L_1}}\right) + \frac{V_{dc0}}{Z_{01}} e^{-\alpha_1 t} \sin(\omega_1 t + \phi)$$

$V_{dc0}$  ولتاژ تغذیه است و در آن رابطه (۳) برقرار است:

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{2L_1}$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_d} - \left(\frac{R_1}{2L_1}\right)^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\alpha_1^2 + \omega_1^2}$$

(۳)

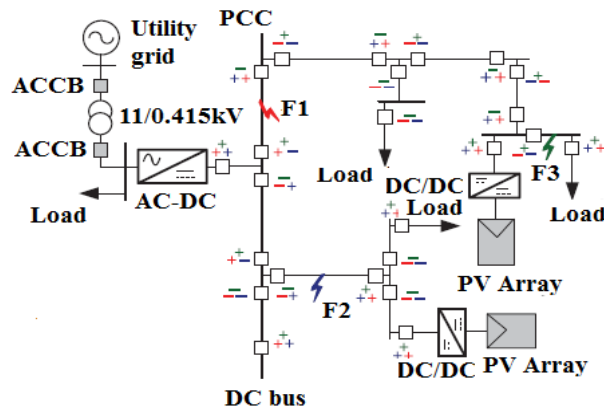
با مطالعه کارهای گذشته مشاهده می گردد که در این الگوریتم های حفاظتی مشکلاتی وجود دارد پس بایستی روشی بکار برده شود که بتواند تا حدودی بر این مشکلات غلبه کند.

پس در این مقاله یک روش جدید بر اساس مولفه جریان های خطای دو طرف خط در یک ریزشبه DC ارائه گردیده است. آنالیزهای موجود در این مقاله تشخیص سریع و دقیق این روش جدید را برای خطاهای داخلی و خارجی و با مقاومت خطای بالا نشان می دهد و با روش حفاظت دیفرانسیل مرسوم نیز مقایسه می گردد. همانطوریکه از قبل نیز بیان گردید شبیه سازی خطای داخلی و خارجی در EMTP-ATP انجام شده و پیاده سازی روش جدید بیان شده نیز در MATLAB انجام می شود.

ساختار مقاله حاضر مطابق زیر می باشد. در زیربخش های ۲ و ۳، اصول روش حفاظتی پیشنهادی و حفاظت دیفرانسیل مرسوم مورد بحث واقع می شود. در زیربخش ۴ نتایج شبیه سازی های انجام شده بر روی ریزشبه نمونه و تحت سناریوهای مختلف، مورد بررسی و مقایسه واقع می شوند. نتایج شبیه سازی ها بخوبی موید کارایی روش پیشنهادی هستند. در قسمت آخر هم جمع بندی و نتیجه گیری از کار ارائه شده است..

### ۲- روش حفاظتی پیشنهادی

در این مقاله ریزشبه موجود در شکل (۱) در نظر گرفته شده است. همانند شکل (۲) یک رله هوشمند در هر خط برای تصمیم گیری حفاظتی بر اساس جریان های دوطرف آن خط نصب گردیده است. در یک شبکه DC هر اغتشاشی نظیر خطا، تغییرات بار و یا پدیده کلیدزنی سبب بالا رفتن نرخ تغییر جریان می شود [۲۰].



شکل (۱): دیاگرام تک خطی ریزشبه DC [۲۰]

برای شناسایی این اغتشاشات و آغاز بکارگیری الگوریتم حفاظتی، تغییرات جریان یک دوره از زمان بکار گرفته می شود. شاخص اغتشاش  $g$  با استفاده از رابطه (۱) استخراج می گردد.

$$g = \frac{1}{N\Delta t} \left( \sum_{j=1}^N |i_{j+1} - i_j| \right) \quad (1)$$

$$i_1^{F_2} = \frac{V_{dc0}}{R_1} (1 - e^{-\frac{R_{eq}t}{L_{eq}}}) + \frac{V_{dc0}}{Z_{eq}} e^{-\alpha_1 t} \sin(\omega_1 t + \phi)$$

که در آن (۹) برقرار است:

$$\alpha_1 = \frac{R_{eq}}{2L_{eq}}$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C_{eq}} - \left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}}\right)^2} \quad (9)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\alpha_1^2 + \omega_1^2}$$

مقاومت و کاپاسیتانس امپدانس مشخصه تا نقطه  $F_2$  می‌باشند،  $Z_{eq} = \sqrt{\frac{R_{eq}}{C_{eq}}}$  و  $C_{eq}, R_{eq}, L_{eq}$  به ترتیب اندوکتانس،

مقاومت و کاپاسیتانس امپدانس مشخصه تا نقطه  $F_2$  می‌باشند.

$$i_2^{F_2} = -i_1^{F_2}$$

در این نوع خطا همواره داریم

ترمینال از (۱۰) به دست می‌آید:

$$\Delta i_1(t) = i_1^{F_2}(t) - i_1^{pre} \quad (10)$$

$$\Delta i_2(t) = i_2^{F_2}(t) - i_2^{pre}$$

با جایگذاری روابط فوق در (۱۰) رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$\Delta i_1(t) = i_1^{F_2}(t) - i_1^{pre} \quad (11)$$

$$\Delta i_2(t) = -i_1^{F_2}(t) - (-i_1^{pre})$$

پس این دو مولفه دارای علامت مخالف هم هستند و یا عبارتی

رابطه (۱۲) همواره برقرار است:

$$\Delta i_1(t) = -\Delta i_2(t) \quad (12)$$

مفهوم عبارت فوق این است که برای خطای خارجی این مولفه‌ها

در ربع‌های دو و چهار محورهای مختصات قرار می‌گیرند.

توجه گردد که در یک شبکه شعاعی (که فقط از یک طرف تغذیه

می‌گردد در اینجا ترمینال  $m$ )  $i_2^{F_1}$  برابر صفر می‌باشد. از رابطه ۷ برای

خطاهای داخلی باز هم  $\Delta i_2(t)$  مثبت می‌باشد و برابر مقدار قبل از

خطا می‌باشد، از آنجایی که برای یک شبکه شعاعی مقدار قبل از خطا

برای ترمینال دو صفر می‌باشد پس برای خطای داخلی در یک شبکه

شعاعی مولفه خطا برای ترمینال  $m$  همواره مثبت و مولفه خطا برای

ترمینال  $n$  همواره صفر می‌گردد. شکل (۳) محورهای مختصات را نشان

می‌دهد که بجای محور عمودی مولفه خطای ترمینال  $m$  ( $\Delta i_1(t)$ ) و

بجای محور افقی مولفه خطای ترمینال  $n$  ( $\Delta i_2(t)$ ) قرار می‌گیرد.

$Z_{01}$  امپدانس مشخصه قسمت اول خط (قسمت اول خط تا

خطا که تشکیل یک حلقه می‌دهد)،  $C_1, R_1, L_1$  به ترتیب

اندوکتانس، مقاومت و کاپاسیتانس، از باس  $m$  تا نقطه  $F_1$  می‌باشند.

مولفه جریان خطا در باس  $m$  از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$\Delta i_1(t) = i_1^{F_1}(t) - i_1^{pre} \quad (4)$$

که در آن  $i_1^{pre} = \frac{V_{dc0}}{R_{eq}}$  جریان قبل از خطا در باس  $m$

می‌باشد.

کاملاً مشخص است که در اینجا  $\Delta i_1$  برای خطای داخلی مثبت

است.

به طور مشابه برای جریان در باس  $n$  رابطه (۵) برقرار است:

$$i_2^{F_1} = \frac{V_{dc0}}{R_2} (1 - e^{-\frac{R_2 t}{L_2}}) + \frac{V_{dc0}}{Z_{02}} e^{-\alpha_2 t} \sin(\omega_2 t + \phi)$$

که در آن رابطه (۶) برقرار است:

$$\alpha_2 = \frac{R_2}{2L_2}$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_d} - \left(\frac{R_2}{2L_2}\right)^2} \quad (6)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\alpha_2^2 + \omega_2^2}$$

$Z_{02}$  امپدانس مشخصه قسمت دوم خط (قسمت دوم خط تا

خطا که تشکیل یک حلقه می‌دهد) می‌باشد،  $C_2, R_2, L_2$  به

ترتیب اندوکتانس، مقاومت و کاپاسیتانس، از باس  $n$  تا نقطه  $F_1$

می‌باشند.

در نهایت همانند باس  $m$  برای باس  $n$  رابطه (۷) وجود دارد:

$$\Delta i_2(t) = i_2^{F_1}(t) - i_2^{pre} \quad (7)$$

جریان قبل از خطا در باس  $n$  می‌باشد.

در اینجا هم مشخص است که  $\Delta i_2$  برای خطای داخلی مثبت

است.

پس نتیجه‌ای که می‌توان گرفت این است برای یک خطای داخلی

مولفه جریان خطا برای هر دو ترمینال مثبت است یا عبارتی اگر این

دو مولفه در ربع اول محور مختصات باشند نشان‌دهنده یک خطای

داخلی می‌باشد.

### ۲-۲- خطای خارجی

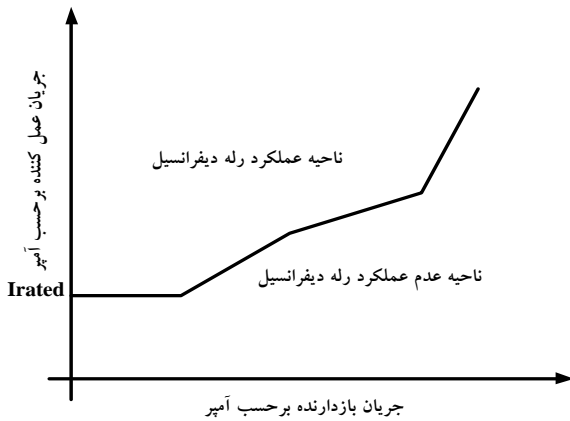
این بار فرض می‌شود که خطای خارجی  $F_2$  یا  $F_3$  خارج خط

اتفاق می‌افتد. در اینجا ما خطای  $F_2$  را تحلیل خواهیم کرد، جریان در

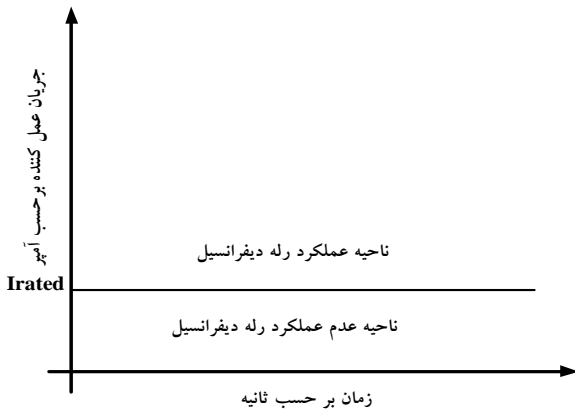
باس  $m$  طبق رابطه (۸) محاسبه می‌گردد.

### ۳-۴- حفاظت دیفرانسیل رایج

مشخصه حفاظت دیفرانسیل رایج به صورت شکل (۵) می باشد که در آن جریان عمل کننده ابتدا ثابت و برابر جریان نامی می باشد و سپس دارای چند شیب مختلف می شود هر کدام از این شیبها برای پایدارسازی این حفاظت در برابر جریان بی باری ترانسفورماتور، اشباع ترانس جریان، خطای تپ چنجر و ... می باشند. از آنجایی که در ریزشکبه DC هیچ کدام از این مشکلات وجود ندارد پس در مشخصه رله همانند شکل (۶) جریان عمل کننده به صورت ثابت و برابر جریان نامی باقی می ماند [۲۰].



شکل (۵): مشخصه حفاظت دیفرانسیل مرسوم



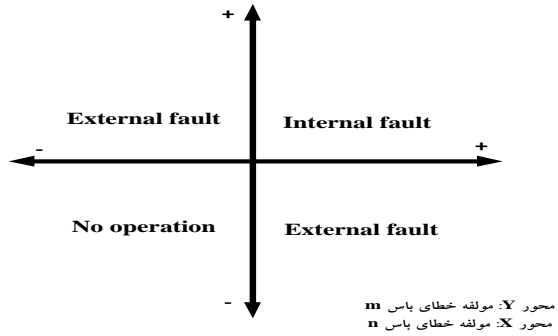
شکل (۶): مشخصه حفاظت دیفرانسیل استفاده شده برای ریزشکبه

در اینجا جریانهای دو طرف خط استخراج می گردد و طبق رابطه (۱۳) از یکدیگر کم می شوند:

$$i_{diff}(t) = i_1(t) - i_2(t) \quad (13)$$

سپس در رابطه (۱۴) اگر جریان تفاضلی از مقدار تنظیمی رله بیشتر باشد رله دیفرانسیل این حالت را به عنوان یک خطای داخلی تشخیص می دهد و بالعکس.

$$i_{diff}(t) > I_{set} \quad (14)$$

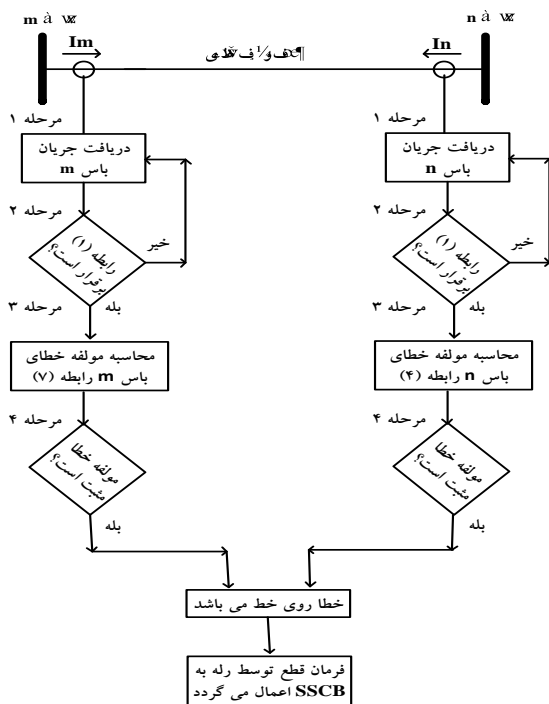


شکل (۳): مولفه های خطای هر دو ترمینال در محورهای مختصات

به عبارتی می توان تا به حال این نتیجه را گرفت که مولفه های خطای هر دو ترمینال برای خطای داخلی در ربع اول و برای خطای خارجی در ربع های دوم و چهارم می افتد.

### ۳-۳- روندنمای روش جدید

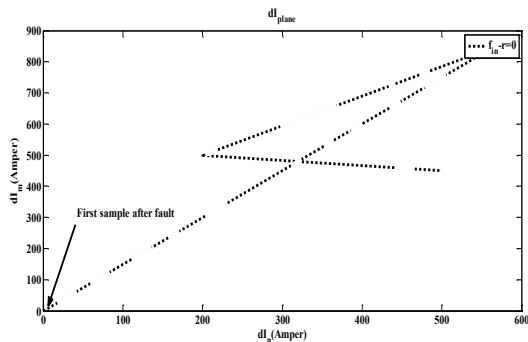
روندنمای روش مورد نظر به صورت شکل (۴) می باشد. توضیح شکل فوق به اینصورت است که ابتدا جریان های DC دوطرف خط دریافت می گردد سپس شرط رابطه یک چک می شود که آیا اغتشاشی رخ داده است یا خیر، بعد از آن مولفه خطا برای هر دو باس ساخته می شود اگر این مولفه خطا برای هر دو باس مثبت باشد آنگاه یک خطای داخلی رخ داده است. به عبارتی می توان گفت که اگر مولفه خطا هر دو باس بر حسب هم در دستگاه محورهای مختصات رسم گردد اگر این مشخصه در ربع اول باشد آنگاه خطای داخلی و برای ربع های دوم و چهارم خطای خارجی می باشد.



شکل (۴): روندنمای روش جدید مقاله

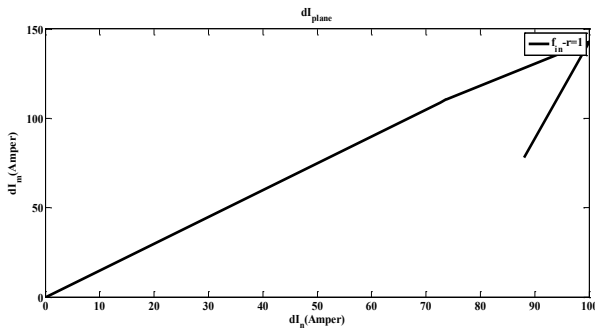
#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

ربع اول می‌گردد پس می‌توان گفت که الگوریتم مورد نظر هیچ تاخیری ندارد.

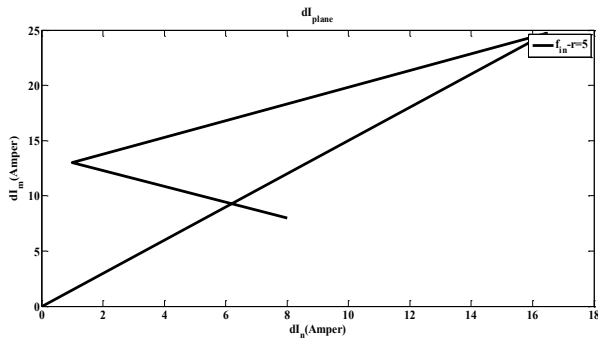


شکل (۹): مشخصه الگوریتم جدید، با وجود خطای داخلی F1 (r=۰)

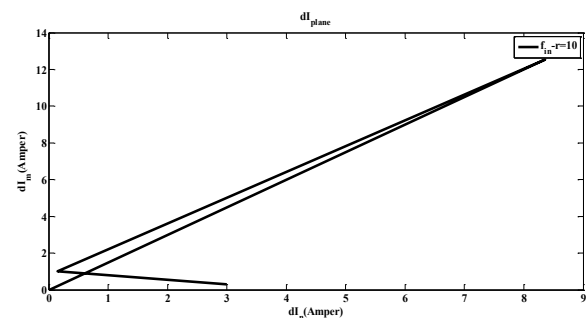
شکل‌های (۱۰ تا ۱۲) مشخصه الگوریتم جدید را به ازای خطای روی خط مورد مطالعه به ترتیب با مقادیر مقاومت خطای ۱، ۵ و ۱۰ اهم نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): مشخصه الگوریتم جدید، وجود خطای داخلی F1 (r=۱)



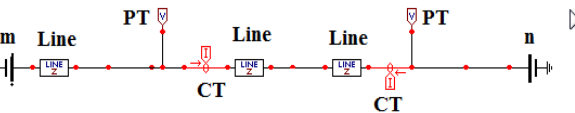
شکل (۱۱): مشخصه الگوریتم جدید، وجود خطای داخلی F1 (r=۵)



شکل (۱۲): مشخصه الگوریتم جدید، وجود خطای داخلی F1 (r=۱۰)

شکل (۲) در نرم‌افزار EMT-P-ATP شبیه‌سازی گردیده است که شکل (۷) آن را نشان می‌دهد. مشخصات منابع و خط مورد مطالعه در زیر آورده شده است [۲۰].

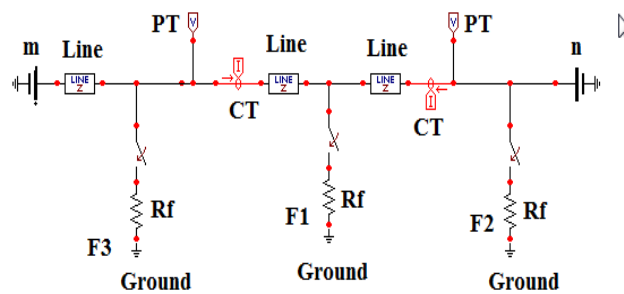
ولتاژ نامی منابع DC، 350 V، مقاومت خط 0.125Ω/km، خازن خط 0.67 μF/km، اندوکتانس خط 0.232 μH/km، طول خط دو کیلومتر



شکل (۷): شبیه‌سازی خط مورد مطالعه در EMT-P-ATP

شکل (۸) خط برای حالتی که انواع خطای روی (خطای داخلی و

خارجی) آن می‌باشد را نشان می‌دهد.



شکل (۸): شبیه‌سازی خط مورد مطالعه در حالت خطای داخلی

در این شکل F1 خطای داخلی و F2 و F3 خطای خارجی را نشان می‌دهد. در اینجا که انواع خطا در زمان ۴۰۰ میلی‌ثانیه رخ می‌دهد.

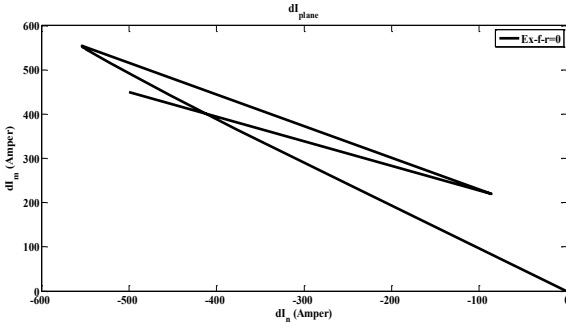
#### ۴-۱- خطای داخل خط

پس از استخراج سیگنال‌های دو طرف خط فوق، آنها به فرمت نرم‌افزار Matlab در آورده و سپس به صورت بسته داده‌هایی به نرم‌افزار Matlab آورده شده و در Matlab مولفه فقط خطا طبق روابط بالا برای هر دو ترمینال ساخته می‌شود و هر دو الگوریتم روی این داده‌ها پیاده‌سازی می‌گردد.

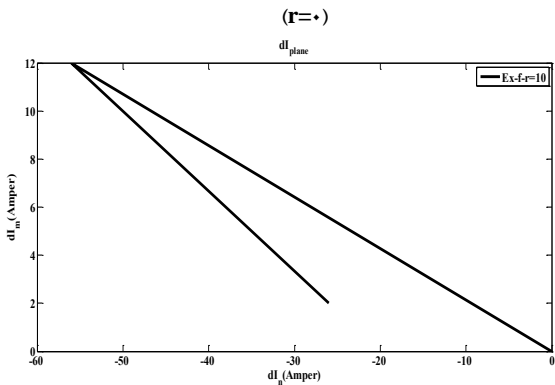
در شکل (۹) یک خطای داخلی با مقاومت خطای صفر اهم رخ داده است روی محور عمودی مولفه خطای جریان باس m و روی محور افقی مولفه خطای جریان باس n مشخص گردیده است. مشخصه خطا بصورت سمپلی رسم گردیده است قبل از خطا مشخصه به طور تقریبی حول مبدا مختصات و سایر ربع‌های مختصات می‌باشد به محض رخداد خطا بلافاصله اولین سمپل وارد ربع اول می‌گردد و رله فرمان قطع را صادر می‌کند همانطوریکه از سایر شکل‌های به دست آمده از شبیه‌سازی مشخص است بلافاصله پس از خطا مشخصه وارد

#### ۴-۲- خطای خارج خط نقطه F3

شکل‌های (۱۵ و ۱۶) مشخصه الگوریتم جدید را برای خطاهای خارجی نقطه F3 به ترتیب با مقادیر مقاومت خطای صفر و ۱۰ اهم نشان می‌دهد.

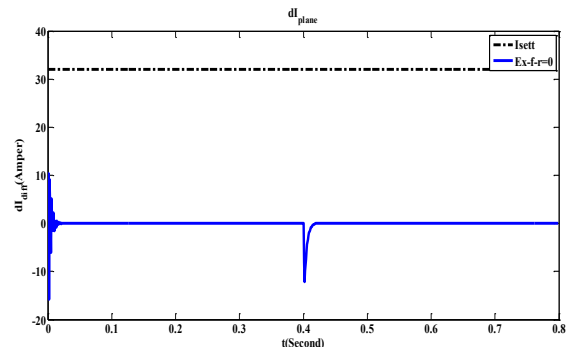


شکل (۱۵): مشخصه الگوریتم جدید، وجود خطای خارجی F3



شکل (۱۶): مشخصه الگوریتم جدید، وجود خطای خارجی F3

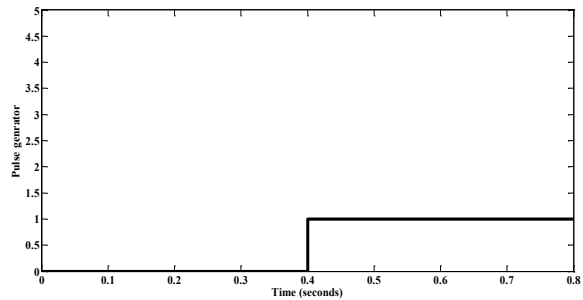
همانطوریکه که مشخص است مشخصه مولفه خطا در ربع دوم قرار می‌گیرد یا به عبارتی خطای خارجی هیچ تاثیری روی الگوریتم مورد نظر ندارد و رله دیفرانسیل هیچ پالسی تولید نمی‌کند. شکل‌های (۱۷ و ۱۸) عملکرد حفاظت دیفرانسیل برای خطای خارجی F3 و به ترتیب با مقادیر مقاومت خطای صفر و ۱۰ اهم نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): مشخصه الگوریتم رایج، وجود خطای خارجی F3

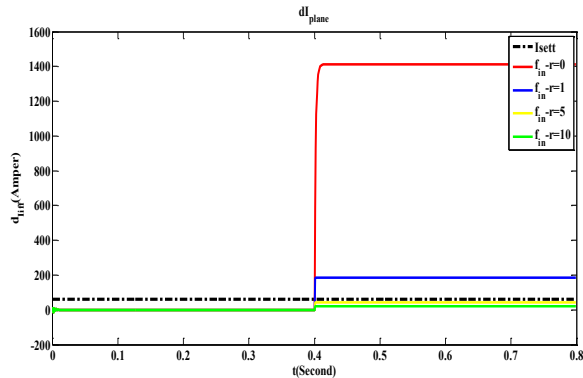
$$(r=0)$$

همانطوریکه که مشخص است برای خطاهای داخلی با مقادیر مختلف مقاومت خطا مشخصه مولفه خطا بلافاصله در ربع اول قرار می‌گیرد و هر چه مقاومت خطا افزایش یابد میزان جریان خطا کاهش می‌یابد اما همچنان در ربع اول باقی خواهند ماند، پس می‌توان گفت میزان مقاومت خطا تاثیری بر عملکرد این الگوریتم ندارد. با قرار گرفتن مشخصه رله دیفرانسیل در ربع اول، رله با تولید پالسی همانند شکل (۱۳) درست در زمان رخداد خطا (۴۰۰ میلی‌ثانیه) و ارسال آن به کلیدهای دوطرف خط، آنها را باز می‌کند و خط از شبکه جدا می‌گردد.



شکل (۱۳): تولید پالس نشانگر خطا توسط رله دیفرانسیل

شکل (۱۴) عملکرد حفاظت دیفرانسیل رایج برای خطای داخلی و با تغییرات مقاومت خطا از ۰ تا ۱۰ اهم نشان می‌دهد.

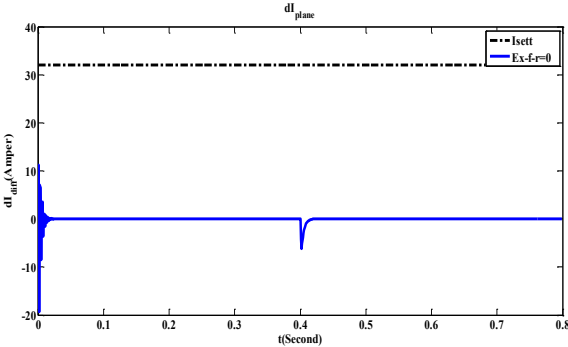


شکل (۱۴): مشخصه الگوریتم رایج با وجود خطای داخلی F1

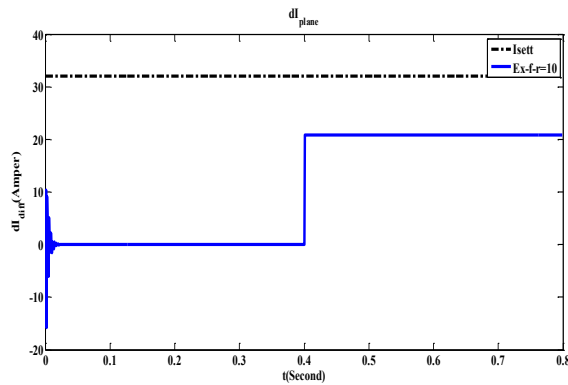
روی محور عمودی جریان تفاضلی و روی محور افقی زمان می‌باشد، توجه گردد مشخصه خطچین سیاه رنگ مشخصه تنظیمی رله دیفرانسیل می‌باشد. همانطوریکه مشخص است حفاظت دیفرانسیل مرسوم خطاهای با مقاومت قوس ۰ و ۱ اهم را به درستی و بدون تاخیر تشخیص داده است اما وقتی مقاومت خطا از این مقدار بالاتر می‌رود مشخصه اندازه‌گیری شده توسط رله پایین‌تر از مقدار تنظیمی قرار می‌گیرد و یا عبارتی خطای داخلی را تشخیص نمی‌دهد و این یکی از مشکلات بزرگ حفاظت دیفرانسیل رایج و همچنین سایر الگوریتم‌های حفاظتی می‌باشد.

مورد نظر ندارد و رله دیفرانسیل هیچ پالسی تولید نمی‌کند، به عبارتی رله دیفرانسیل با الگوریتم جدید پایدار است.

شکل‌های (۲۱) و (۲۲) عملکرد حفاظت دیفرانسیل برای خطای خارجی F2 و به ترتیب با مقادیر مقاومت خطای صفر و ۱۰ اهم نشان می‌دهد.



شکل (۲۱): مشخصه الگوریتم رایج، وجود خطای خارجی F2 ( $r=0$ )

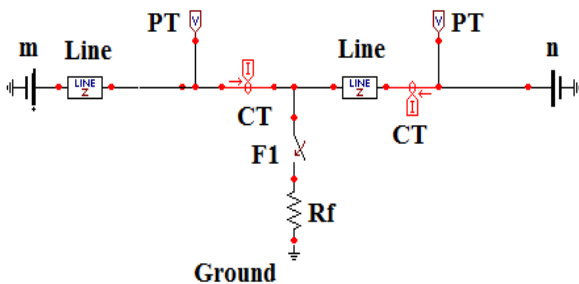


شکل (۲۲): مشخصه الگوریتم رایج، وجود خطای خارجی F2 ( $r=10$ )

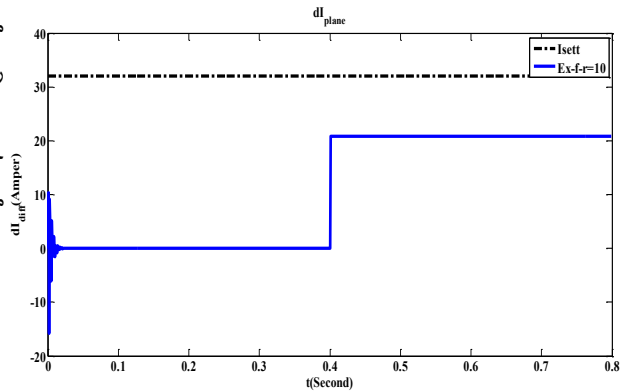
همانطوریکه مشخص است حفاظت دیفرانسیل مرسوم خطای خارجی را به درستی تشخیص داده است و نسبت به آن هیچ عکس‌عملی نشان نمی‌دهد.

#### ۴-۴- خطای داخل خط و نزدیک ترمینال m

شکل (۲۳) خطای داخل خط و نزدیک ترمینال m را نشان می‌دهد.



شکل (۲۳): خطای داخل خط و نزدیک ترمینال m

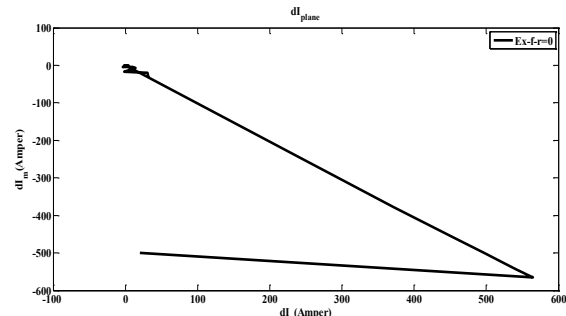


شکل (۱۸): مشخصه الگوریتم رایج، وجود خطای خارجی F3 ( $r=10$ )

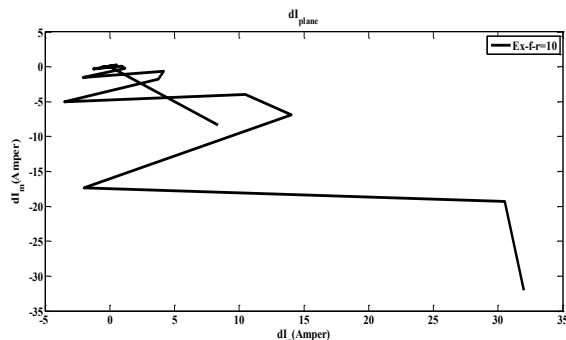
توجه گردد که مشخصه خط‌چین سیاه رنگ مشخصه تنظیمی رله دیفرانسیل می‌باشد. همانطوریکه مشخص است حفاظت دیفرانسیل مرسوم خطای خارجی را به درستی تشخیص داده است و نسبت به آن هیچ عکس‌عملی نشان نمی‌دهد.

#### ۴-۳- خطای خارج خط، نقطه F2

شکل‌های (۱۹) و (۲۰) مشخصه الگوریتم جدید را برای خطاهای خارجی نقطه F2 به ترتیب با مقادیر مقاومت خطای صفر و ۱۰ اهم نشان می‌دهد.



شکل (۱۹): مشخصه الگوریتم جدید، وجود خطای خارجی F2 ( $r=0$ )



شکل (۲۰): مشخصه الگوریتم جدید، وجود خطای خارجی F2 ( $r=10$ )

همانطوریکه مشخص است مشخصه مولفه خطا در ربع چهارم قرار می‌گیرد یا به عبارتی خطای خارجی هیچ تاثیری روی الگوریتم



[۶] نیک مهر، نیما، نجفی روادانق، سجاد، "ارائه روشی مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند برای حل پخش بار احتمالی جهت برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از ریزشبه‌ها"، نشریه انجمن مهندسين برق و الکترونیک ایران - سال سیزدهم - شماره سوم - پاییز ۱۳۹۵

[7] A. A. S. Emhemed, K. Fong, S. Fletcher, and G. M. Burt, "Validation of fast and selective protection scheme for an LVDC distribution network", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, No. 3, pp. 1432-1440, 2017

[8] Emhemed, A., Burt, G., "Protection analysis for plant rating and power quality issues in LVDC distribution power systems", IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-5, 2015

[9] Xue, S., Chen, C., Jin, Y., et al., "Protection for DC distribution system with distributed generator", Journal of Applied Mathematics, Vol. 24, 2014.

[10] Najy W.K.A., Zeineldin H.H., Woon W.L., "Optimal protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capability", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 4, pp. 1668-1677, 2013

[11] D. Salomonsson, L. Soder, and A. Sannino, "Protection of low-voltage DC microgrids", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, pp. 1045-1053, 2009.

[12] Li X., Dysko A., Burt G.M., "Traveling wave-based protection scheme for inverter-dominated microgrid using mathematical morphology", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 5, pp. 2211-2218, 2014.

[۱۳] کامیاب، عباداله، جاویدی، محمد حسین، ساده، جواد، "فاصله‌یابی خطا در خطوط انتقال نیرو با سه پایانه در حوزه زمان با استفاده از اندازه‌گیری‌های همزمان و مدل گسترده خط انتقال"، نشریه انجمن مهندسين برق و الکترونیک ایران - سال پنجم - شماره اول - بهار و تابستان ۱۳۸۷

[۱۴] احسانی، مهدی قاضی‌زاده، "روشی دقیق برای تعیین فاصله خطا در خطوط انتقال چند پایانه‌ای مبتنی بر امواج سیار و الگوریتم ژنتیک"، نشریه انجمن مهندسين برق و الکترونیک ایران - سال چهاردهم - شماره سوم - پاییز ۱۳۹۶

[15] Mirsaedi S., Said D.M., Mustafa M.W., ET AL., "Review and analysis of existing protection strategies for microgrids", J. Electric System., Vol. 10, pp. 1-10, 2014.

[16] R. Mohanty and A. K. Pradhan, "Protection of smart DC microgrid with ring configuration using parameter estimation approach", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 6, pp. 6328-6337, 2018

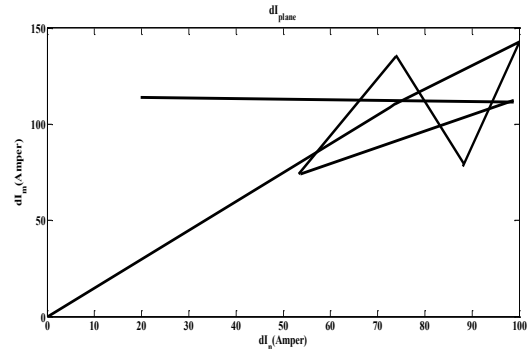
[17] Dragicević, T., Vasquez, J.C., Guerrero, J.M., et al., "Advanced LVDC Electrical Power Architectures and Microgrids: A step toward a new generation of power distribution networks", IEEE Electrification Magazine, Vol. 2, No. 1, pp. 54-65, 2014.

[18] Salomonsson, D., Soder, L., Sannino, A., "Protection of low voltage DC microgrids", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, pp. 1045-1053, 2009.

[19] S. D. A. Fletcher, P. J. Norman, K. Fong, S. J. Galloway, and G. M. Burt, "High-speed differential protection for smart DC distribution systems", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 5, pp. 2610-2617, 2014.

[20] A. Meghwani, S. C. Srivastava, and S. Chakrabarti, "A non-unit protection scheme for DC microgrid based on local measurements", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, No. 1, pp. 172-181, 2017.

شکل (۲۴) مشخصه به دست آمده با استفاده از الگوریتم جدید را نشان می‌دهد، ه محض رخداد خطا بلافاصله مشخصه رله وارد ربع اول می‌گردد و رله فرمان قطع را صادر می‌کند. پس در اینجا نیز بلافاصله پس از رخداد خطا مشخصه وارد ربع اول می‌گردد پس می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم مورد نظر هیچ تاخیری این نوع خطا را نیز تشخیص می‌دهد.



شکل (۲۴): مشخصه برای خطای داخل خط و نزدیک ترمینال m

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش حفاظت دیفرانسیلی براساس جریان ناشی از خطای هر دو ترمینال یک خط در ریزشبه DC بیان گردیده است. این الگوریتم به طور دقیق خطای داخلی را از خطای خارجی تشخیص داده است و مقاومت خطا هیچ تاثیری بر عملکرد آن ندارد و همچنین کارایی این مدل با حفاظت دیفرانسیل رایج نیز مقایسه گردیده است. بنابر نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد که روش بکار رفته یک روش جامع، دقیق و پایدار برای حفاظت خطوط موجود در ریزشبه‌ها با قابلیت اطمینان و دقت عمل می‌باشد.

## مراجع

- [1] J.-D. Park, J. Candelaria, L. Ma, and K. Dunn, "DC ring-bus microgrid fault protection and identification of fault location", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, No. 4, pp. 2574-2584, 2013.
- [2] M. Saedifard, M. Graovac, R. Dias, and R. Iravani, "DC power system Challenges and opportunities", IEEE PES General Meeting, pp. 1-7, 2010.
- [3]. Salam A.A., Mohamed A., Hannan M.A., "Technical challenges on microgrids", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 3, No. 6, 2008

[۴] حسامی نقشبندی، علی، حبیبی، فرشید، بیورانی، حسن، "طراحی یک کنترل‌کننده مقاوم برای پایداری ولتاژ یک ریزشبه در حالات مختلف کاری"، نشریه انجمن مهندسين برق و الکترونیک ایران - سال دهم - شماره اول - بهار و تابستان ۱۳۹۲

[۵] ستاره، محمد، قاسمی، حسن، "مدیریت توان در ریزشبه متعادل جزیره‌ای با در نظر گرفتن پایداری سیگنال کوچک و پاسخ دینامیکی"، نشریه انجمن مهندسين برق و الکترونیک ایران - سال دوازدهم - شماره اول - بهار و تابستان ۱۳۹۴