

## ارائه طرحی یکپارچه و جدید برای محدودکننده ابررسانایی جریان خطای سه فاز

رضا مرادپور<sup>۱</sup>، بهنام غلامحسینزاده<sup>۲</sup>، عبدالرضا توکلی<sup>۳</sup>، علی اسدی صوفی<sup>۴</sup>

Bghosseinzadeh@gmail.com

- ۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)
- ۲- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی
- ۳- استادیار دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الهیجان
- ۴- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

### چکیده

محدودسازهای جریان خطا تجهیزاتی هستند که در شرایط عادی تأثیری در عملکرد مدار ندارند اما با وقوع خطا امپدانس نسبتاً بزرگی در مسیر جریان ایجاد کرده و جریان را در سطح مشخصی محدود می‌کنند. خطا در شناورها عموماً به دلیل آتش‌سوزی، نفوذ آب به داخل شناور و عوامل انسانی رخ می‌دهد. بروز خطا در سیستم الکتریکی و افزایش ناگهانی جریان، اصلی‌ترین دلیل خرابی تجهیزات الکترونیکی موجود در شناورها است و با توجه به نوع تجهیزات بکار رفته در شناور، قیمت و دشواری تعویض یا تعمیر آن‌ها بحث حفاظت در شناور اهمیت ویژه‌ای دارد. SFCL نوع شیلد مغناطیسی یکی از مطمئن‌ترین دسته‌های محدودکننده‌های ابررسانایی جریان خطا است. در این مقاله با تمرکز بر این نوع محدودسازها شبیه‌سازی‌های لازم جهت بررسی ویژگی‌های رفتاری و میزان محدودکنندگی جریان خطا صورت می‌گیرد و اثبات می‌شود که محدودساز پیشنهادی در کاهش سطح جریان اتصال کوتاه عملکرد مناسبی دارد. همچنین با بررسی میزان مواد مورد استفاده در ساختار هسته و سیم‌پیچ‌های محدودساز نشان داده می‌شود که این محدودساز نسبت به موارد مشابه از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه‌تر است.

واژگان کلیدی: جریان خطا، سه فاز، محدودساز جریان خطا، ابررسانا، SFCL.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۷/۰۱/۲۲  
تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۴/۰۹

## ۱- مقدمه

با توسعه پیوسته صنایع ظرفیت تولید توان نیز افزایش یافته است. گسترش استفاده از انرژی تجدید پذیر در میکروگریدها موجب افزایش تعداد و ظرفیت منابع تولید توان در شبکه شده که این امر در نهایت منجر به انعطاف پذیری بیشتر منابع تولید توان نسبت به سیستم تولید توان می گردد [۱ و ۲]. با این حال زمانی که خطایی نظیر اتصال کوتاه یا اتصال به زمین در سیستم رخ می دهد، جریان خطا از ظرفیت دستگاه های حفاظتی مرسوم و مدارشکن ها بیشتر می شود. این مطلب می تواند به تجهیزات شبکه آسیب برساند و سیستم را در معرض خطراتی نظیر خاموشی های گسترده قرار دهد [۳-۵].

تعویض مدارشکن های ظرفیت بالا یکی از راه های مقابله با مشکل افزایش سطح جریان خطا است اما به دلیل محدودیت های اقتصادی و فنی بسیار مشکل است. دیگر روش های حل این مشکل نظیر تقسیم باس بار، به کارگیری راکتورهای سری و استفاده از تجهیزات امپدانس بالا نیز موجب کاهش قابلیت اطمینان منبع، کاهش پایداری سیستم و کاهش ولتاژ می گردند. یکی دیگر از راه های مقابله با مشکل جریان خطا به کارگیری محدودکننده ابرسانیی جریان خطا (SFCL<sup>۱</sup>) است که از مشخصه های منحصر به فرد ابرسانا استفاده می کند. محدودکننده های ابرسانیی جریان خطا انواع مختلفی دارند که به دلیل تحقق مشخصه های یک محدودکننده ایده آل در کشورهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفته اند [۶-۸].

این مقاله به SFCL نوع شیلد مغناطیسی می پردازد که یکی از مهم ترین انواع محدودکننده های ابرسانیی جریان خطا می باشد. این نوع SFCL دارای مزایای بسیاری از قبیل قابلیت اطمینان بالا، تلفات کم و ایزوله بودن ماده ابرسانا از شبکه الکتریکی است [۹].

در حالت عادی کارکرد SFCL، جریان های عبوری در سیلندرهای ابرسانا القا می شوند و در نتیجه هیچ شاری وارد هسته نمی شود. در حالی که هنگام بروز خطا تعادل آمپر دور بین سیلندر ابرسانا و سیم پیچ های مسی به هم می خورد و شار مغناطیسی وارد هسته آهنی می گردد. در نتیجه امپدانس دیده شده از سمت سیم پیچ های اولیه افزایش می یابد و جریان خطا محدود می گردد.

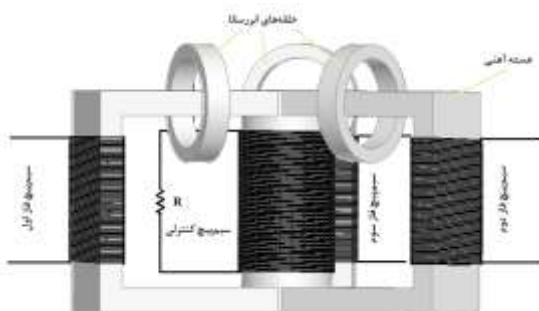
محدودکننده پیشنهادی از سه سیم پیچ اولیه برای سه فاز خط و یک سیم پیچ ثانویه برای محدود نمودن جریان خط تشکیل شده است که همگی به دور یک هسته آهنی پیچیده شده اند. با استفاده از شبیه سازی های صورت گرفته عملکرد صحیح محدودکننده در هر یک از خطاهای تک فاز، دو فاز و سه فاز نشان داده می شود. همچنین با مقایسه محدودکننده سه فاز پیشنهادی با سه محدودکننده تک فاز [۱۱] اثبات می شود که محدودکننده پیشنهادی از نظر اقتصادی و موارد بکار رفته در آن مقرون به صرفه تر است.

## ۲- قوانین حاکم بر SFCL پیشنهادی

محدودکننده ابرسانیی جریان خطای نوع شیلد مغناطیسی پیشنهادی (مطابق شکل (۱)) دارای ساختاری یکپارچه برای محدودسازی جریان سه فاز است که از سه سیم پیچ اولیه مسی برای سه فاز، سه حلقه ابرسانا، یک محفظه خنک سازی نیتروژن، یک هسته آهنی یکپارچه و یک سیم پیچ مسی در سمت ثانویه تشکیل شده است. سیم پیچ ثانویه که به عنوان سیم پیچ کنترلی مورد استفاده قرار می گیرد، به صورت سری به یک مقاومت متغیر متصل می شود؛ بنابراین با تغییر اندازه مقاومت می توان جریان محدودکننده را کنترل کرد. این محدودکننده در دو حالت کارکرد عادی و کارکرد تحت شرایط خطا مورد بررسی قرار می گیرد. به دلیل حجم بالای معادلات، در حالت سه فاز تنها یک فاز برای تحلیل در نظر گرفته می شود اما نتایج به صورت سه فاز نشان داده می شوند.

## ۲-۱- شرایط عادی

در این حالت هیچ شاری وارد ساق وسط هسته نمی شود؛



شکل (۱) نمای روبه روی SFCL نوع شیلد مغناطیسی سه فاز پیشنهادی.

<sup>1</sup> Superconducting Fault Current Limiter

که  $B$  چگالی شار مغناطیسی داخل هسته،  $\ell_c$  و  $\mu$  به ترتیب طول متوسط و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هسته می‌باشند.

طبق قانون فارادی [۱۲]، معادله (۵) بیانگر رابطه میان بیشینه ولتاژ اعمالی بر پایانه محدودکننده، برای مثال  $V_{i \max}$  و بیشینه چگالی شار مغناطیسی داخل هسته، برای مثال  $B_{\max}$ ، است. از مقاومت اهمی و راکتانس ناشی از سیم‌پیچ‌ها نیز صرف‌نظر شده است.

$$V_i = V_{i \max} \cos \omega t = (\omega N_1 B_{\max} A) \cos \omega t \quad (5)$$

که  $A$  سطح مقطع هسته است یکپارچه فرض می‌شود. چگالی شار مغناطیسی داخل هسته برابر است با:

$$B = B_{\max} \sin \omega t = \frac{V_{i \max}}{\omega N_1 A} \sin \omega t \quad (6)$$

به همین صورت برای ولتاژ القایی در سیم‌پیچ کنترلی، برای مثال  $V_2$ ، داریم:

$$\begin{aligned} V_2 &= V_{2 \max} \cos \omega t = (\omega N_2 B_{\max} A) \cos \omega t \\ &= \left( \frac{N_2}{N_1} V_{i \max} \right) \cos \omega t \end{aligned} \quad (7)$$

بنابراین جریان در سیم‌پیچ کنترلی برابر است با:

$$i_c = \frac{V_{2 \max} \cos \omega t}{R} \quad (8)$$

انرژی القا شده در ماده ابررسانا با توجه به سیم‌ها و نوارهای ابررسانا در حجم بزرگی توزیع می‌شود، بنابراین اتلاف هرگونه انرژی اضافی نسبتاً سریع رخ می‌دهد و در نتیجه فرونشانی نخواهیم داشت. علاوه بر این، حلقه ابررسانا مستقیماً در مسیر میدان مغناطیسی خارجی (شار مغناطیسی عبوری از هسته) قرار ندارد و همچنین ماده ابررسانا با توجه به فرآیند تولید بخصوص [۱۳] ثبات شار مغناطیسی قدرتمندی دارد [۱۴]. در نتیجه می‌توان چگالی جریان آن را به صورت ثابت  $J_c$  فرض نمود. بعلاوه، زمانی که جهت جریان در سیم‌پیچ اولیه عوض شود، جهت جریان در ماده ابررسانا نیز مطابق با آن بایستی تغییر یابد. این امر به این علت رخ می‌دهد که شار تولیدی همواره با جریان عبوری هم‌فاز است و شار تولیدی توسط سیم‌پیچ اولیه و حجم ابررسانا خلاف جهت یکدیگر می‌باشند. بر همین اساس طبق رابطه (۴) داریم:

$$N_1 i_1 = -N_c i_c + \frac{B}{\mu} \ell + (J(r_o - r_i)h) \operatorname{sgn}(i_1) \quad (9)$$

بنابراین با توجه به قانون معروف آمپر در معادله (۱)، برای هر مسیر بسته داخل هسته داریم:

$$\oint_c \vec{H} d\vec{l} = \sum i \quad (1)$$

$$N_1 i_1 + N_c i_c = J(r_o - r_i)h \quad (2)$$

که  $N_1$ ،  $N_c$ ،  $i_1$  و  $i_c$  به ترتیب تعداد دورهای سیم‌پیچ اول، سیم‌پیچ کنترلی و جریان‌های فاز اول و فاز کنترلی می‌باشند. همچنین  $r_o$  و  $h$  به ترتیب شعاع خارجی و ارتفاع حلقه‌های ابررسانا می‌باشند.  $J$  و  $r$  چگالی جریان داخل حلقه ابررسانا و شعاعی است که شار مغناطیسی به داخل حلقه ابررسانا نفوذ می‌کند.

در شرایط عادی کارکرد SFCL جریان عبوری از آن، برای مثال  $i_1$ ، توسط سیستم مشخص می‌شود و دارای فرم سینوسی به صورت  $I_{1m} \cos(\omega t)$  است. به دلیل اینکه شاری وارد ساق وسط هسته نمی‌شود می‌توان نتیجه گرفت که ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ کنترلی صفر خواهد بود و متعاقباً جریانی نیز در این سیم‌پیچ نخواهیم داشت.

بر اساس مدل حالت بحرانی بین [۱۰]، در معادله (۲) همان  $J_c$  یا  $J_c - J$  است که چگالی جریان بحرانی حلقه ابررسانا را نشان می‌دهد. عمل محدودسازی جریان زمانی صورت می‌گیرد که حلقه ابررسانا خاصیت ابررسانایی خود را از دست می‌دهد و شار وارد ساق وسط هسته می‌شود؛ بنابراین بر اساس معادله (۲)، برای اینکه SFCL بتواند در حالت کاری عادی خود قرار داشته باشد باید شرط زیر برای هر یک از فازها برقرار [۱۱]:

$$N_k I_{km} \leq J_c (r_o - r_i)h, k = 1, 2, 3 \quad (3)$$

که  $r_i$  شعاع داخلی حلقه ابررسانا،  $N_k$  تعداد دور و  $I_{km}$  جریان یکی از سیم‌پیچ‌های سه‌گانه هستند.

## ۲-۲- شرایط خطا

در این حالت بدترین خطای ممکن یعنی خطا در پایانه محدودکننده را در نظر می‌گیریم. در این حالت میدان مغناطیسی تمام سطح مقطع ابررسانا را در برمی‌گیرد؛ بنابراین با توجه به قانون آمپر در معادله (۱) برای یکی از فازها داریم:

$$N_1 i_1 + N_c i_c - J(r_o - r_i)h = \frac{B}{\mu} \ell_c \quad (4)$$

کنترلی نصب می‌شوند، بنابراین برای هر فاز به یک حلقه ابرسانا از جنس YBCO نیاز داریم. مشخصات یکی از این حلقه‌ها را در جدول (۳) مشاهده می‌کنیم. برای طراحی شبکه میکرو گرید از منبع ولتاژ متغیر استفاده می‌کنیم و با کلید زنی خطاهای تک فاز، دو فاز و سه فاز را شبیه‌سازی می‌کنیم. شمای تک‌خطی مدار مربوط به میکرو گرید در شکل (۲) مشخص شده است. پارامترهای مختلف این مدار در جدول (۴) آمده است.

جدول (۱) مشخصات هسته SFCL سه فاز نوع شیلد.

پارامتر	مقدار
<b>مشخصات ساق کناری</b>	
سطح مقطع	3.2 cm <sup>2</sup>
ضریب گذردهی مغناطیسی، $\mu_r$	900
عمق	3.2 cm
ارتفاع	9 cm
طول	9 cm
طول متوسط	32 cm
<b>مشخصات ساق وسط</b>	
شعاع	1.3 cm
ارتفاع	7 cm

جدول (۲) مشخصات سیم‌پیچ‌های SFCL سه فاز نوع شیلد.

پارامتر	مقدار
<b>سیم‌پیچ فازی</b>	
تعداد لایه	2
تعداد دور	100
قطر سیم	0.8 mm
ارتفاع	5 cm
<b>سیم‌پیچ کنترلی</b>	
تعداد لایه	2
تعداد دور	200
قطر سیم	0.8 mm
ارتفاع	5 cm

جدول (۳) مشخصات حلقه ابرسانای SFCL سه فاز نوع شیلد.

پارامتر	مقدار
شعاع داخلی	13 mm
شعاع خارجی	17 mm
ارتفاع	10 mm
چگالی جریان بحرانی حلقه ابرسانای YBCO	10 A / mm <sup>2</sup>

که همان تابع علامت است که برای مقادیر مثبت تابع درونش ۱ و برای مقادیر منفی درونش -۱ است. از آنجاکه  $i_1$  متقارن است، با فرض  $i_1 > 0$  جریان عبوری از SFCL برابر خواهد بود با:

$$i_1 = \frac{1}{N_1} \left[ \frac{(J_c(r_o - r_i)h - \frac{N_c V_{2\max}}{R})^2}{+(\frac{B_m}{\mu} \ell)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cos(\omega t + \gamma) \quad (10)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left[ \frac{\frac{B_m}{\mu} \ell}{J_c(r_o - r_i)h - \frac{N_c V_{2\max}}{R}} \right]$$

برای  $i_1 < 0$  همین عبارت با علامت منفی به دست می‌آید. بنابراین با توجه به رابطه (۱۰) بیشترین جریان عبوری از محدودکننده ابرسانایی جریان خطا به صورت رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$i_{1\max} = \frac{1}{N_1} \left[ \frac{(J_c(r_o - r_i)h - \frac{N_c V_{2\max}}{R})^2}{+(\frac{B_m}{\mu} \ell)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)،  $i_{1\max}$  اندازه جریان خطای محدودشده است و مشخصه اصلی در طراحی SFCL به حساب می‌آید.

### ۳- ویژگی‌های SFCL

هسته محدودکننده ابرسانای جریان خطای سه فاز طبق شکل (۱) دارای چهار ساق است. جنس هسته از آهن است و مشخصات آن در جدول (۱) آمده است.

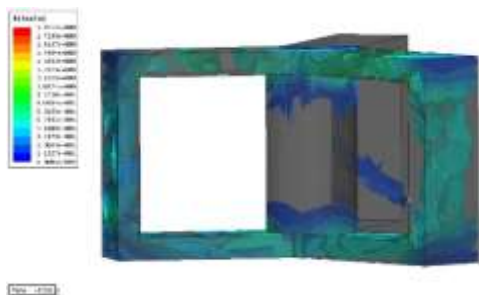
محدودکننده ابرسانایی جریان خطای سه فاز دارای چهار عدد سیم‌پیچ مسی است. سیم‌پیچ‌های مربوط به سه فاز شبکه دارای ابعاد و تعداد دور برابری هستند اما سیم‌پیچ مربوط به قسمت کنترلی دارای تعداد دور و ابعاد متفاوتی است. این امر به این دلیل است که هنگام خطای دو فاز و سه فاز، شار القایی در هسته نسبت به خطای تک فاز بیشتر است و در نتیجه ولتاژ القایی و جریان عبوری از سیم‌پیچ ساق وسط افزایش می‌یابد. مشخصات مربوط به سیم‌پیچ‌های مختلف SFCL در جدول (۲) آمده است.

نوارهای ابرسانای مورد استفاده طبق روش ذکرشده در [۱۹] ساخته و در حفاصل بین سیم‌پیچ فاز و سیم‌پیچ

توزیع شار در هسته آهنی محدودکننده باید به گونه‌ای باشد که بعد از حلقه ابررسانا چگالی میدان مغناطیسی (B) به صفر میل کند. چگونگی توزیع شار مغناطیسی در هسته محدودکننده در شکل (۳) نشان داده شده است. این ویژگی محدودکننده که در حالت عادی هیچ‌گونه امپدانسی از خود نشان نمی‌دهد یکی از مهم‌ترین مزیت‌های آن است، چراکه موجب تغییر مشخصات خط و کاهش ولتاژ در انتهای خط نمی‌شود.

زمانی که در میکرو گرید خطا رخ می‌دهد، جریان عبوری از خطوط ۸ تا ۱۰ برابر افزایش می‌یابد و محدودکننده وظیفه کاهش این جریان به مقادیر قابل قبول را بر عهده دارد. از آنجایی که محدودکننده ابررسانایی جریان خطای پیشنهادی به صورت یکپارچه برای هر سه فاز ارائه شده است در نتیجه برای خطاهای تک فاز، دو فاز و سه فاز قابلیت استفاده دارد.

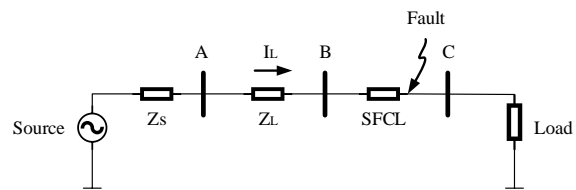
هنگام وقوع خطای فاز به زمین در یکی از فازها، جریان آن فاز به سرعت چند برابر می‌شود و شار تولیدی متناظر آن در هسته محدودکننده افزایش می‌یابد و موجب شکست ابررسانا و نفوذ کامل شار به آن می‌گردد؛ در نتیجه باز دست دادن خاصیت ابررسانایی، حلقه ابررسانا دیگر قادر به سد نمودن مسیر شار در هسته نخواهد بود. با جریان یافتن شار در هسته محدودکننده، در سمت ثانویه ولتاژ القا می‌شود و مقاومت آن بر جریان سمت اولیه تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین محدودکننده از دید خط به صورت یک امپدانس سری موجب کاهش جریان خطا می‌گردد. در شکل‌های (۴)، (۶) و (۸) نمودارهای جریان خطا برای حالت بدون حضور SFCL و با حضور SFCL برای خطاهای سه‌گانه نشان داده شده است. همچنین شکل‌های (۵)، (۷) و (۹) نحوه توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته آهنی SFCL را حین خطاهای سه‌گانه نشان می‌دهند.



شکل (۳) نحوه توزیع شار مغناطیسی در هسته آهنی محدودکننده در شرایط عادی.

جدول (۴) مشخصات شبکه متصل به SFCL.

پارامتر	مقدار
ولتاژ فاز	33 V
فرکانس	50 Hz
مقاومت خط	10 Ω
مقاومت خطا	0.1 Ω
مقاومت منبع	0.5 + j1.5
جریان نامی شبکه	2.8 A
بیشینه جریان مجاز SFCL	35 A



شکل (۲) شمای تک‌خطی شبکه، نحوه وقوع خطا و مکان SFCL در مدار.

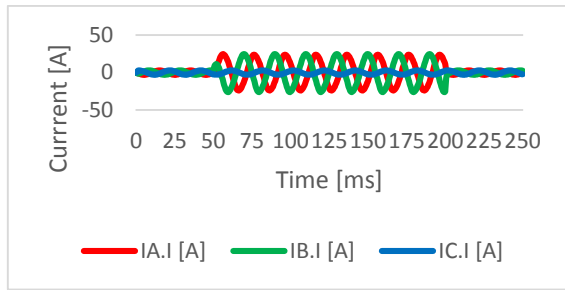
پس از طراحی سیستم قدرت که در سمت اولیه محدودکننده قرار دارد حال بایستی مدار مربوط به سمت ثانویه یا همان سیم‌پیچ کنترلی را طراحی کنیم. برای این کار دو سر سیم‌پیچ کنترلی را به یک مقاومت متصل می‌کنیم تا مدار ما برای شبیه‌سازی تکمیل گردد.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

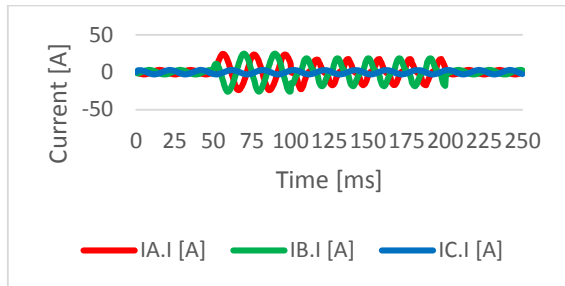
به منظور شبیه‌سازی عملکرد محدودکننده در شرایط عادی و خطا با استفاده از نرم‌افزارهای Ansys Maxwell و Ansys Simplorer، تنظیمات مش بندی طبق اطلاعات جدول (۵) انجام گرفته است. همچنین سیستمی که محدودکننده در آن قرار می‌گیرد متعادل فرض می‌شود. در شرایط عادی شار تولیدی توسط جریان خطا نمی‌تواند به صورت کامل به حلقه ابررسانا نفوذ کند و در نتیجه به دلیل اتصال کوتاه بودن حلقه ابررسانا، مدار مغناطیسی ثانویه از سمت اولیه دیده نمی‌شود.

جدول (۵) مشخصات مش بندی.

تنظیمات اولیه	
0.01 mm	حداکثر انحراف سطح (طول)
15°	حداکثر انحراف سطح (زاویه)
10	حداکثر نسبت ابعاد
بهینه‌سازی بر اساس طول المان	
3.43 cm	حداکثر طول المان‌ها
100	حداکثر تعداد المان‌ها

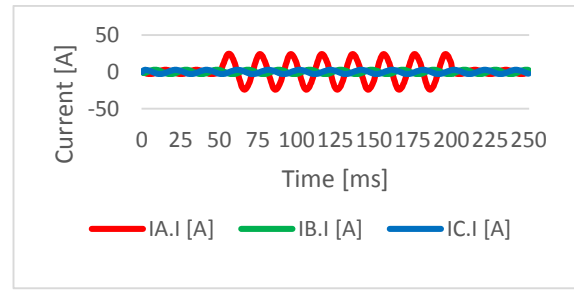


(الف)

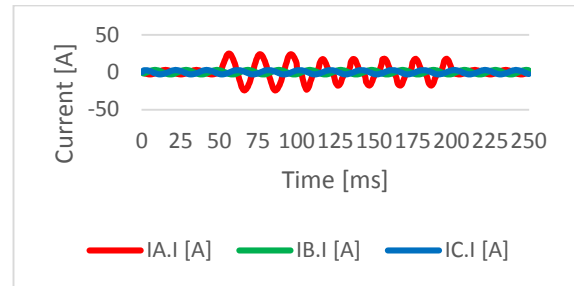


(ب)

شکل (۶) (الف) جریان خطای دو فاز بدون محدودکننده ابرسانایی جریان خطای سه فاز (ب) جریان خطای دو فاز با محدودکننده ابرسانایی جریان خطای سه فاز.

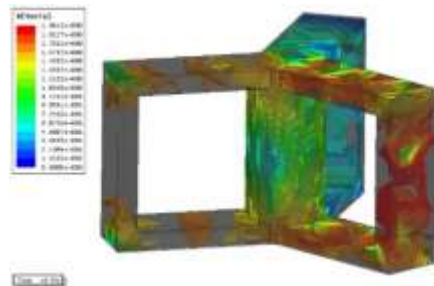


(الف)

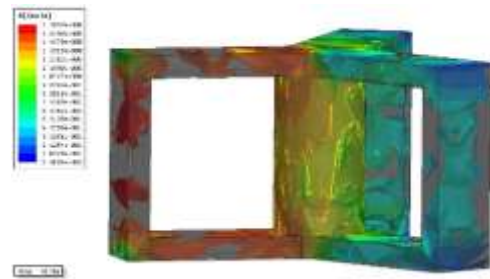


(ب)

شکل (۴) (الف) جریان خطای تک فاز بدون محدودکننده ابرسانایی جریان خطای سه فاز (ب) جریان خطای تک فاز با محدودکننده ابرسانایی جریان خطای سه فاز.



شکل (۷) نحوه توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته محدودکننده حین خطای دو فاز.



شکل (۵) نحوه توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته محدودکننده حین خطای تک فاز.

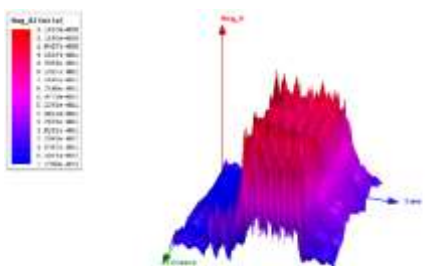
و بحث محدودسازی جریان خطا پیش آید باید به عدم تأثیر محدودکننده در ولتاژ و جریان خطا اشاره کنیم. در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود قبل از رخ دادن خطا جریان عبوری از سیم‌پیچ کنترلی صفر است؛ این مطلب به این معناست که در سیم‌پیچ کنترلی هیچ‌گونه ولتاژی القا نمی‌شود و شاری از ساق وسط محدودکننده عبور نمی‌کند؛ اما زمانی که خطا در سیستم رخ دهد جریان عبوری از سیم‌پیچ کنترلی به تدریج افزایش می‌یابد تا جایی که ابرسانا دچار شکست می‌شود و تمام شار از ساق وسط می‌گذرد و موجب القای ولتاژ و جریان می‌گردد. همچنین پس از رفع خطا جریان سیم‌پیچ کنترلی دوباره صفر می‌شود که این امر برای خارج شدن محدودکننده از خط و عدم تأثیرگذاری روی سیستم الزامی است.

نمودارهای جریان و چگالی شار مغناطیسی به ترتیب مربوط به نرم‌افزارهای Ansys Maxwell و Ansys Simplorer هستند. همان‌گونه که در شکل‌های (۴) تا (۹) مشخص است حضور SFCL پیشنهادی در خط موجب کاهش جریان خطا می‌شود و چگالی شار مغناطیسی نیز در ساقی که در آن خطا رخ داده است افزایش می‌یابد که اثباتی بر درستی عملکرد محدودکننده هستند.

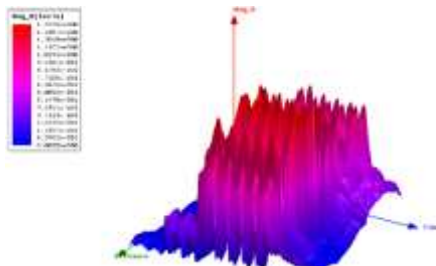
##### ۵- بررسی دیگر متغیرهای SFCL پیشنهادی

یکی از ویژگی‌های محدودکننده ایده‌آل امپدانس صفر در شرایط عادی کارکرد شبکه است. از آنجایی که SFCL سه فاز پیشنهادی به صورت سری با تجهیزات خط قرار می‌گیرد، قبل از اینکه خطایی در سیستم قدرت رخ دهد

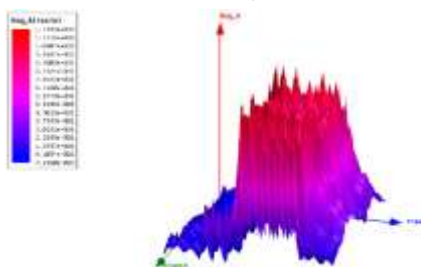
این شار در هسته SFCL را نمی‌دهند. زمانی که خطا رخ می‌دهد با افزایش جریان و متعاقباً افزایش شار تولیدی، ابررسانا دچار شکست می‌شود و شار در تمام قسمت‌های مربوط به فازی که دچار خطا شده جریان می‌یابد. پس از رفع خطا جریان به حالت عادی بازمی‌گردد و شار تولیدی نیز به سرعت کاهش می‌یابد. با کاهش شار، ابررسانا نیز به تدریج به حالت عادی خود بازمی‌گردد و دوباره مسیر شار را مسدود می‌کند. برای تحلیل مقدار شار در ساق وسط هسته محدودکننده تغییرات چگالی شار را نسبت به زمان و مکان به صورت سه‌بعدی مورد بررسی قرار می‌دهیم تا دید بهتری نسبت به نحوه توزیع شار داشته باشیم. این کار را برای هر یک خطاهای تک فاز، دو فاز و سه فاز تکرار می‌کنیم. با توجه به شکل (۱۱) برای خطاهای تک فاز، دو فاز و سه فاز بیشترین میزان تقریبی چگالی شار مغناطیسی موجود در ساق وسط محدودکننده به ترتیب  $1/1$ ،  $1/3$  و  $1$  تسلا است.



(الف)

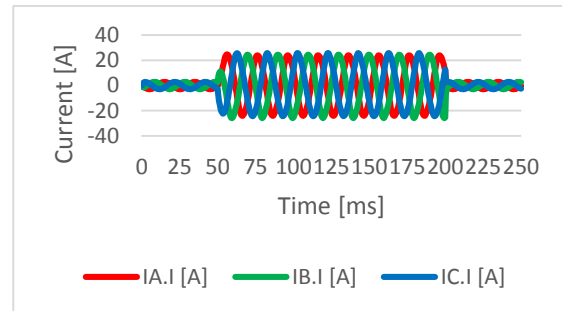


(ب)

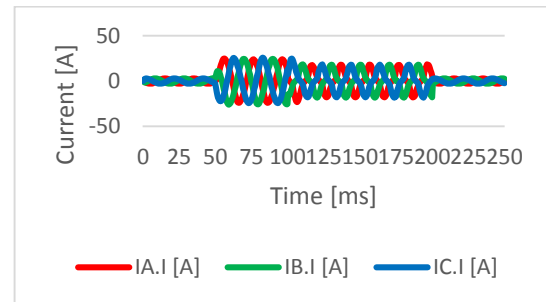


(ج)

شکل (۱۱) تغییرات چگالی شار مغناطیسی نسبت به زمان و مکان در خطای (الف) تک فاز (ب) دو فاز (ج) سه فاز.

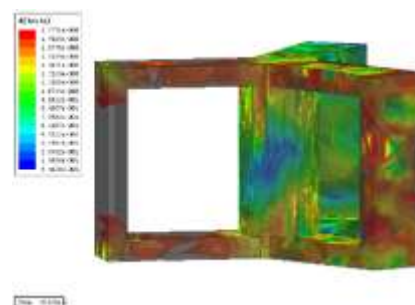


(الف)

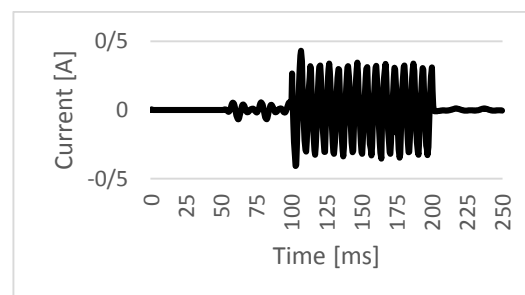


(ب)

شکل (۸) (الف) جریان خطای سه فاز بدون محدودکننده ابررسانایی جریان خطای سه فاز (ب) جریان خطای سه فاز با محدودکننده ابررسانایی جریان خطای سه فاز.



شکل (۹) نحوه توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته محدودکننده حین خطای سه فاز.



شکل (۱۰) جریان سیم‌پیچ وسط SFCL هنگام خطای سه فاز.

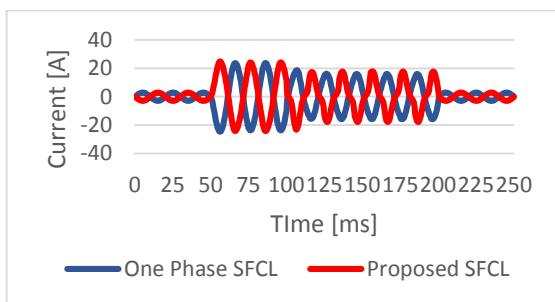
با عبور جریان‌های خط از سیم‌پیچ‌های اولیه شار در آن‌ها به صورت پیوسته تولید می‌شود اما حلقه‌های ابررسانا تا زمانی که خطایی در سیستم رخ ندهد اجازه جاری شدن

شکل (۱۳) نشان‌دهنده تغییرات جریان محدودکنندگی در دو حالت شبیه‌سازی و تئوری نسبت به تعداد دور سیم‌پیچ سمت ثانویه محدودکننده پیشنهادی است. با کاهش تعداد دور سیم‌پیچ سمت ثانویه جریان محدودکنندگی محدودکننده ابرسانایی جریان خطای سه فاز پیشنهادی کاهش می‌یابد که مطلوب ما است؛ اما این کاهش تعداد دور تا مقدار مشخصی بر میزان محدودکنندگی مؤثر است که در این مقیاس قابل مشاهده نیست.

در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) می‌توان مشاهده نمود که تفاوت جریان شبیه‌سازی و تئوری بسیار اندک است که می‌توان از آن صرف‌نظر نمود. اختلاف اندک موجود بین جریان شبیه‌سازی و جریان تئوری نیز به دلیل صرف‌نظر کردن از شار نشتی و مقاومت سیم‌پیچ است.

#### ۷- مقایسه SFCL سه فاز پیشنهادی با سه SFCL تک فاز مشابه

مهم‌ترین عامل برای مقایسه دو محدودکننده ابرسانایی جریان خطای سه فاز پیشنهادی و SFCL تک فاز را به صورت هم‌زمان برای SFCL سه فاز پیشنهادی جریان خطای ۲۵ آمپر را به ۱۷/۱ آمپر و SFCL تک فاز [۱۱] ۲۳/۱۵ آمپر را به ۱۵/۲ آمپر کاهش می‌دهد. میزان محدودکنندگی SFCL سه فاز پیشنهادی ۳۱/۶٪ و میزان محدودکنندگی SFCL تک فاز [۱۱] ۳۴٪ است که تقریباً باهم برابر هستند. بنابراین از حیث میزان محدودکنندگی جریان خطای این دو محدودکننده نسبت به یکدیگر برتری چندانی ندارند. پس از عامل مهم میزان محدودکنندگی جریان خطا، دیگر عامل مهم برای مقایسه دو محدودکننده ابرسانایی جریان خطا میزان ماده ابرسانای به‌کاررفته در ساختار آن‌ها است.

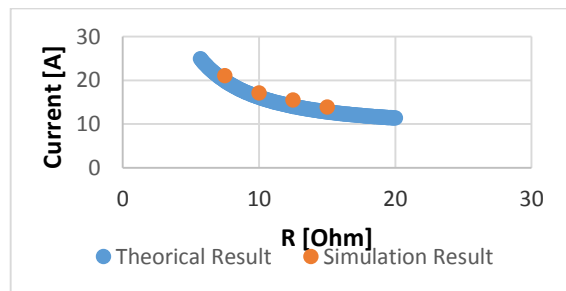


شکل (۱۴) جریان خطای تک فاز با حضور محدودکننده پیشنهادی و محدودکننده تک فاز [۱۱].

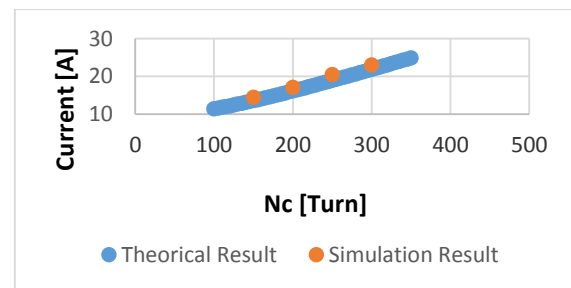
درواقع هنگام خطای تک فاز شار تولیدی از یک فاز، هنگام خطای دو فاز شار تولیدی توسط دو فاز و هنگام خطای سه فاز شار تولیدی توسط سه فاز از ساق وسط محدودکننده عبور می‌کند. در خطای سه فاز به دلیل عبور شار تولیدی توسط سه فاز با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه، قسمت اعظم شار تولیدی خنثی می‌شود و به همین دلیل هنگام رخ دادن این خطا چگالی شار در هسته کمتر از دیگر خطاها است.

#### ۶- پارامترهای مؤثر بر جریان محدودکنندگی SFCL پیشنهادی

در این قسمت به عواملی که بر مقدار جریان محدودکنندگی SFCL پیشنهادی تأثیر دارند می‌پردازیم. طبق رابطه (۱۰)، مقاومت و تعداد دور سیم‌پیچ ساق وسط بر میزان محدودکنندگی جریان خطا اثر می‌گذارند. در شکل (۱۲) تغییرات جریان حین خطای تک فاز را برای حالت شبیه‌سازی و حالت تئوری مشاهده می‌کنیم. با افزایش مقاومت جریان کاهش می‌یابد، امری که از نظر تئوری مسلم است؛ اما افزایش بیش‌ازاندازه مقاومت روی جریان محدودکنندگی محدودکننده ابرسانایی جریان خطای سه فاز پیشنهادی بی‌اثر است و نمی‌توان بیشتر از مقدار مشخصی جریان را کاهش داد.



شکل (۱۲) تغییرات جریان محدودکننده نسبت به مقاومت سمت ثانویه.



شکل (۱۳) تغییرات جریان محدودکننده نسبت به تعداد دور سیم‌پیچ سمت ثانویه.



جدول (۷) مقایسه آهن و مس به کاررفته در دو نوع SFCL.

پارامتر مورد نظر	محدودکننده پیشنهادی	محدودکننده تک فاز [۱۱]	درصد صرفه جویی
حجم هسته ( $cm^3$ )	266.44	307.2	13
طول سیم مس ( $cm$ )	1633.62	2520	35



شکل (۱۵) SFCL سه فاز پیشنهادی در کنار سه تک فاز [۱۱].

### ۸- نتیجه گیری

میکروگریدهای شناور به دلیل بهره بردن از منابع و بارهای الکترونیکی توجهات بسیاری را به سوی خود جذب نموده‌اند. مشخصات این میکروگریدها بجز بارهای دینامیکی بسیار بزرگ نظیر بارهای رانشی، مشابه میکروگریدهای جزیره‌ای روی خشکی می‌باشند. حضور چنین بارهایی به همراه منابع و مبدل‌های الکترونیک قدرت منجر به اهمیت موضوع کنترل خطاهای موجود در میکروگرید شناورها می‌گردد. در این راستا نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی محدودکننده ابررسانایی جریان خطای سه‌فاز در نرم افزارهای Ansys Maxwell و Ansys Simplerer مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که محدودکننده پیشنهادی با محدود نمودن اندازه جریان خطا تا میزان ۳۱ درصد برای کار در سیستم توزیع شناورها و محدودسازی جریان خطا کارایی لازم را دارد.

همچنین نشان داده شد که SFCL سه‌فاز نسبت به سه محدودکننده ابررسانایی جریان خطای تک‌فاز ۱۳ درصد آهن و ۳۴ درصد مس کمتری مصرف می‌کند که از لحاظ اقتصادی و هزینه تمام شده بصره‌تر است.

### ۹- مراجع

- [1] Hara, T., Okuma, T., Yamamoto, T., Ito, D. Tasaki, K., and Tsurunaga, K., "Development of a New 6.6kV/1500A Class Superconducting Fault Current Limiter for Electric Power System", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.8, No.1, pp.182-192, 1993.
- [2] Lee K.W., "Power System Fault Current Problems and Superconducting Fault Current Limiter", Superconductivity and Cryogenics, pp.8-12, 2001
- [3] Lee, H, Kang, H., "Conceptual Design of a Resistive 154-kV/2-kA Superconducting Fault Current Limiter". IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.26, No.4, pp.1-5, 2016.

همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌کنیم، در هر دو نوع ساختار مورد بررسی از سه حلقه ابررسانا استفاده شده است، در نتیجه از این حیث نیز دو محدودکننده یکسان می‌باشند. مشخصات SFCL تک فاز [۱۱] به منظور انجام محاسبات مقایسه‌ای در جدول (۶) آورده شده است. همان‌طور که در جدول (۷) مشاهده می‌کنیم محدودکننده ابررسانایی جریان خطای سه فاز نسبت به سه محدودکننده ابررسانایی تک فاز [۱۱] از نظر حجم آهن به کاررفته در هسته ۱۳٪ و از نظر میزان مس موردنیاز برای سیم‌پیچی ۳۵٪ مصرف کمتری دارد که موجب مقرون به صرفه بودن آن می‌گردد. همانند ترانسفورماتور سه فاز یکپارچه، SFCL سه فاز نیز در صورت بروز اشکال در یکی از فازها به منظور تعمیر و عیب‌یابی بایستی به کلی از شبکه جدا شود؛ این مورد نقطه ضعف محدودکننده پیشنهادی است.

جدول (۶) مشخصات ساختاری محدودکننده ابررسانایی جریان خطای تک فاز.

پارامتر	مقدار
هسته	
ارتفاع هسته	9 cm
طول هسته	9 cm
عرض هسته	1 cm
عمق هسته	3.2 cm
طول متوسط هسته	32 cm
سیم‌پیچی	
تعداد دور سیم‌پیچ اولیه	100
تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه	100
قطر سیم	0.8 cm
تعداد لایه سیم‌پیچی	2
حلقه ابررسانا	
شعاع داخلی	13 mm
شعاع خارجی	17 mm
ارتفاع	10 mm

- [4] Jung, B.I., Choi, H.W., Choi, H.S., "Reduction of the Power Burden of a Transformer-type SFCL using a Vacuum Interrupter". IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.25, No.3, pp.1-4, 2015.
- [5] Ko, S.C., Lim, S.H. "Analysis on Magnetizing Characteristics Due to Peak Fault Current Limiting Operation of a Modified Flux-Lock-Type SFCL With Two Magnetic Paths", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.26, No.4, pp.1-5. 2016.
- [6] Lee, S.R., Lee, J.J., Yoon, J., Kang, Y.W., Hur, J. Protection Scheme of a 154-kV SFCL Test Transmission Line at the KEPCO Power Testing Center". IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.27, No.4, pp.1-5, 2017.
- [7] Pei, X., Smith, A.C. "Experimental Testing and Development of Improved Modelling for Multistrand Resistive SFCL". IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, No.4, pp. 1-5, 2016.
- [8] Yamabe, K., Yonemura, N., Shirai, Y., and Baba, J., "Current Limiting and Recovery Tests under Load of Three-Phase Transformer Type Coaxial SFCL in a Model Power System". IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.24, No.3, pp.1-5, 2014.
- [9] Baltzer, E., Schmitt, H., and Schultz, W., "Operation of Superconducting Fault Current Limiters in Electrical Networks," in Proc. 14th Int. Conf. Exhib. Elect. Distrib. CIRED, Vol.4, pp.1-5, 1997.
- [10] Carty G.J. and Hampshire D.P., "The Critical Current Density of an SNS Josephson-Junction in High Magnetic Fields," Supercond. Sci. Technol, Vol.26, No.6, p.65007, 2013.
- [11] Hekmati, A., "Proposed Design for a Tunable Inductive Shield-Type SFCL," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.24, No.4, pp.1-7, 2014.
- [12] Chapman S.J., Electric Machinery Fundamentals, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2005.
- [13] Hekmati, A., Hosseini, M., Vakilian, M., and Fardmanesh, M., "A Novel Method of Flat YBCO Rings Development for Shield-type Superconducting Fault Current Limiters Fabrication," Phys. C Supercond., Vol.472, No.1, pp.39-43, 2012.
- [14] Hekmati, A., "Modeling of Shield-Type Superconducting Fault-Current-Limiter Operation Considering Flux Pinning Effect on Flux and Supercurrent Density in High-Temperature Superconductor Cylinders," J. Supercond. Nov. Magn., Vol.27, No.3, pp.701-709, 2014.