

طراحی بهینه و تحلیل محدودکننده جریان خطای مبتنی بر راکتور سری متغیر با هسته هوایی

مسلم امینی و علی اکبر دامکی علی آباد

مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت، Is-Limiterها و راکتورهای متغیر با هسته اشباع شونده ارائه شده‌اند. در راکتورهای متغیر اشباع شونده با بروز خطای اتصال کوتاه، هسته از حالت اشباع خارج شده و اندوکتانس راکتور به شدت افزایش می‌یابد و جریان اتصال کوتاه را محدود می‌کند [۳] تا [۶]. اجزای تشکیل دهنده این محدودکننده شامل هسته آهنی، سیم‌پیچ، منبع تغذیه DC و کلاف‌های AC هستند و از مزایای آنها می‌توان به ساختار ساده، افت ولتاژ کم در حالت نرمال و عملکرد سریع به هنگام خطای اتصال کوتاه اشاره کرد. با این حال طرح‌هایی که تاکنون در این زمینه ارائه شده‌اند دارای معایبی نیز هستند؛ از جمله اینکه به منظور اشباع هسته به یک منبع تغذیه بزرگ DC با تعداد دور زیاد سیم‌پیچ نیاز است و از این رو ملاحظات زیادی باید به لحاظ عایقی و ایمنی انجام گیرد. همچنین در برخی از موارد به جهت تولید میدان‌های مغناطیسی بسیار قوی برای اشباع هسته از هادی‌های ابررسانا به عنوان سیم‌پیچ DC استفاده می‌شود که نیازمند شرایط خاص نگهداری است؛ از جمله آنکه برای حفظ خاصیت ابررسانایی، هادی‌ها بایستی همواره در دمایی کمتر از دمای بحرانی خود قرار داشته باشند که این مسئله، لزوم استفاده از تجهیزات خنک کننده را ضروری می‌سازد و در نتیجه افزایش هزینه‌های مربوط را در پی خواهد داشت. علاوه بر این، عملکرد محدودکننده به شدت به سیم‌پیچ و جریان DC عبوری از آن بستگی دارد و در صورت بروز هر نوع عیبی در ساختار DC، محدودکننده عملاً کارکرد خود را از دست می‌دهد. از طرف دیگر وجود جریان DC ممکن است که منجر به ایجاد نویز در شبکه شود. محدودیت‌هایی از این قبیل موارد برای سایر محدودکننده‌های جریان خطا نیز وجود دارند که تأثیر منفی بر عملکرد مؤثر این نوع تجهیزات می‌گذارند و به کارگیری آنها را با مشکلاتی همراه می‌سازند.

در زمینه طراحی بهینه محدودکننده‌ها تاکنون تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. در [۷] بر روی یک ساختار بهینه از محدودکننده جریان خطای ابررسانای القایی در شبکه‌های توزیع برق تمرکز شده است. با در نظر گرفتن عملکرد و هزینه محدودکننده، پارامترهای مدل بهینه برای سیستم هدف به دست آمده‌اند. در [۸] تا [۱۰] محدودکننده‌های جریان خطا با هسته اشباع‌پذیر و دارای آهنربای دائم به صورت بهینه معرفی شده‌اند. در ساختار بهینه، قابلیت اشباع‌کنندگی هسته توسط آهنرباهای دائم، بهبود و میزان استفاده از آنها کاهش یافته است. در [۱۱] طراحی بهینه محدودکننده جریان خطای مبتنی بر رزونانس سری ارائه شده است. پارامترهای طراحی با استفاده از الگوریتم PSO بهینه‌سازی گردیده‌اند که در نتیجه موجب افزایش ظرفیت محدودکنندگی جریان اتصال کوتاه شده است. در [۱۲] کلاف‌های ابررسانای مورد استفاده در محدودکننده‌های جریان خطای ابررسانا بهینه‌سازی شده‌اند. این بهینه‌سازی موجب کاهش تلفات، حذف نقاط داغ، بهبود توزیع جریان و یکنواختی افت ولتاژ در طول

چکیده: گستردگی شبکه‌های برق و افزایش سطح اتصال کوتاه باعث شده که به کارگیری تجهیزاتی برای محدود کردن خطاهای اتصال کوتاه اجتناب‌ناپذیر باشد. یکی از این تجهیزات، محدودکننده‌های جریان خطای مبتنی بر راکتور متغیر هستند که در عین سادگی ساختار، عملکرد مؤثری دارند. در این مقاله به طراحی بهینه یک محدودکننده جریان خطای جدید مبتنی بر راکتور سری متغیر پرداخته شده است. با توجه به اهمیت بالای پارامترهایی نظیر زمان عملکرد، اندوکتانس اولیه و اندوکتانس نهایی محدودکننده، به دست آوردن ابعاد بهینه طرح پیشنهادی جهت دستیابی به بهترین عملکرد ممکن بسیار مهم است. به همین منظور پس از معرفی طرح مذکور به طراحی بهینه طرح پیشنهادی پرداخته شده و سپس نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی مورد ارزیابی و مقایسه با نتایج حاصل از طراحی اولیه قرار گرفته است. برای تحلیل و ارزیابی محدودکننده و بررسی میزان تأثیر پارامترها بر نحوه عملکرد آن از مدل تحلیلی مبتنی بر روابط حاکم بر راکتور استفاده شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان می‌دهند که طرح نهایی از عملکرد بسیار بهتری نسبت به طرح اولیه برخوردار است.

کلیدواژه: جریان اتصال کوتاه، راکتور سری متغیر، اندوکتانس اولیه و نهایی، بهینه‌سازی، زمان عملکرد.

۱- مقدمه

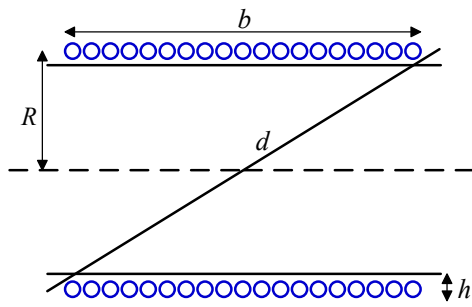
در دنیای مبتنی بر فناوری‌های نوین و دارای تکنولوژی‌های پیشرفته، لزوم پیوستگی و تضمین کیفیت انرژی الکتریکی بسیار حائز اهمیت است و هر اختلالی در این زمینه می‌تواند منجر به آسیب‌های جبران‌ناپذیری گردد. یکی از عوامل بسیار شایع در شبکه‌های برق، خطاهای اتصال کوتاه هستند که علاوه بر ایجاد مشکلاتی در زنجیره انتقال انرژی، خسارت‌های سنگینی را نیز به بار می‌آورند. توسعه شبکه‌ها و به هم پیوستگی آنها باعث افزایش سطح اتصال کوتاه در شبکه شده است. محدودکننده‌های جریان خطا به عنوان راهکاری در جهت کاهش سطح اتصال کوتاه شبکه‌های برق به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی نظیر سرعت عملکرد بالا و امیدانس متغیر در مقایسه با راکتورهای ثابت (CLR) [۱] و [۲] در شرایط نرمال و خطا جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند.

مطابق با منابع علمی و مقالاتی که منتشر گردیده است، تاکنون محدودکننده‌های جریان خطای مختلفی نظیر ابررساناها، محدودکننده‌های

این مقاله در تاریخ ۲۳ فروردین ماه ۱۴۰۲ دریافت و در تاریخ ۲۷ تیر ماه ۱۴۰۲ بازنگری شد.

مسلم امینی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران، (email: moslemamini@stu.yazd.ac.ir).

علی اکبر دامکی علی آباد (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران، (email: alidamaki@yazd.ac.ir).



شکل ۲: شمانیک کلاف.

دیگر سیم‌پیچ‌های راکتورهای بیرونی و درونی در خلاف جهت یکدیگر پیچیده شده‌اند و از این رو اندوکتانس متقابل بین دو راکتور منفی است. در حالت نرمال شبکه، دو راکتور هم‌پوشانی زیادی با یکدیگر دارند و بنابراین اندوکتانس متقابل منفی بزرگی بین آنها وجود داشته و باعث می‌شود که اندوکتانس کلی محدودکننده مقدار بسیار کمی داشته باشد. کوچک بودن اندوکتانس محدودکننده باعث می‌شود محدودکننده در حالت عادی توان راکتور کمی مصرف نماید و افت ولتاژ کمی را نیز در شبکه داشته باشد.

پس از بروز خطا و افزایش شدید جریان عبوری از راکتور با توجه به اینکه جهت جریان دو سیم‌پیچ مخالف یکدیگر است، نیروی تدافعی شدیدی بین آنها به وجود می‌آید و دو راکتور به سرعت از هم دور می‌شوند؛ چرا که در این حالت دو راکتور مشابه دو آهن‌ربای هم‌نام عمل می‌کنند و با توجه به مقدار بالای جریان عبوری از آنها، نیروی بسیار بزرگی بین آنها ایجاد می‌شود و منجر به جابه‌جایی دو راکتور می‌گردد. البته لازمه این امر آن است که دو راکتور دقیقاً هم‌مرکز نبوده و کمی نسبت به هم فاصله داشته باشند. با دور شدن راکتورها از یکدیگر، اندوکتانس متقابل بین آنها کوچک شده و اندوکتانس کل محدودکننده به مقدار بسیار بزرگی افزایش خواهد یافت. لذا امپدانس کل شبکه افزایش می‌یابد و جریان اتصال کوتاه محدود می‌گردد.

ذکر این نکته ضروری است که نیروی تدافعی بین راکتورها در طول کل سیم‌پیچ‌ها توزیع خواهد شد و بنابراین تنش مکانیکی زیادی به راکتورها وارد نخواهد شد. وجود فنرها نیز باعث می‌شود که پس از رفع خطای اتصال کوتاه، راکتورها به سرعت به موقعیت اولیه خود باز گردند.

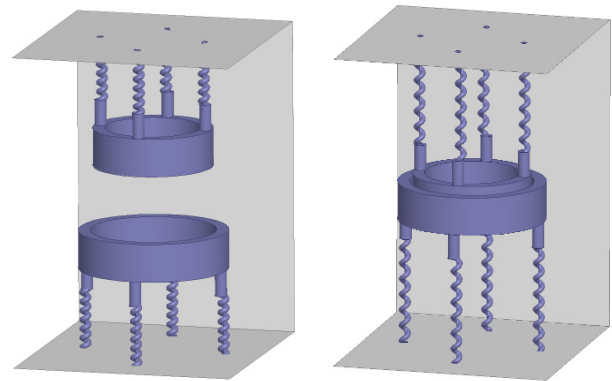
۳- نحوه مدل‌سازی محدودکننده

برای طراحی بهینه لازم است تا ابتدا محدودکننده پیشنهادی به درستی مدل‌سازی شود تا بتوان به کمک آن تأثیر پارامترهای مختلف را بر روی نحوه عملکرد راکتور بررسی نمود و با الگوی مناسبی به حالت بهینه دست یافت. از این رو در این بخش به مدل‌سازی محدودکننده پیشنهادی پرداخته می‌شود.

محدودکننده جریان خطای پیشنهادی شامل دو راکتور هسته هوایی هم‌مرکز است که به صورت مغناطیسی به یکدیگر تزویج شده‌اند. در همین راستا مطابق شکل ۲، اندوکتانس خودی (L) هر سیم‌پیچ بر اساس فرمول استفان محاسبه می‌شود [۲۰]

$$L = \mu R N^2 \left[\left(1 + \frac{3b^2 + h^2}{96R^2}\right) \log \frac{\lambda R}{\sqrt{b^2 + h^2}} - Y_1 + \frac{b^2}{16R^2} Y_2 \right] \quad (1)$$

که R شعاع متوسط کلاف، N تعداد دور کلاف، b ارتفاع کلاف و h ضخامت کلاف است. Y_1 و Y_2 نیز پارامترهای ثابتی هستند و مقادیر آنها در [۲۰] ارائه شده‌اند.



شکل ۱: محدودکننده جریان خطای پیشنهادی، (الف) شرایط نرمال و (ب) شرایط بروز خطای اتصال کوتاه [۱۹].

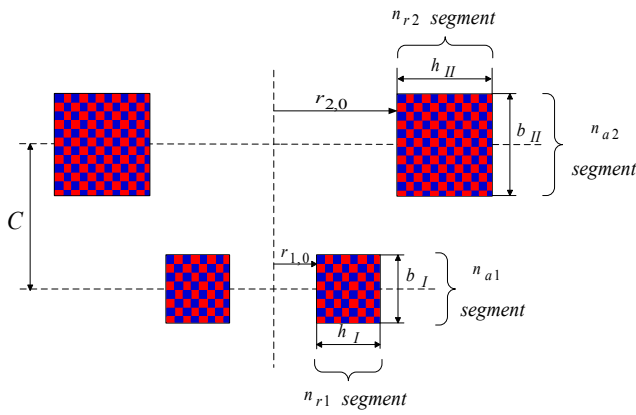
سیم‌پیچ می‌گردد. در [۱۳] به بهینه‌سازی محدودکننده جریان خطای ابررسانا توسط الگوریتم PSO تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای پرداخته شده که از نتایج آن می‌توان به کاهش افت ولتاژ و افزایش میزان محدودکنندگی جریان خطا اشاره کرد. در [۱۴] محدودکننده جریان خطای غیر فوق‌هادی برای مقابله با جریان‌های اتصال کوتاه و هماهنگی با سایر تجهیزات موجود در شبکه بهینه‌سازی شده و نتیجه فرایند بهینه‌سازی، کاهش هزینه‌ها و ابعاد محدودکننده است. در [۱۵] تابع چندهدفه و در [۱۶] مؤلفه جریان خطای متغیر با زمان برای بهینه‌سازی محدودکننده جریان خطای ابررسانای مقاومتی به کار گرفته شده‌اند. در نتیجه این امر، مؤلفه DC جریان اتصال کوتاه و ابعاد تجهیز به میزان قابل توجهی کاهش یافته‌اند. در [۱۷] و [۱۸] جهت دستیابی به عملکرد بهینه محدودکننده جریان خطای مبتنی بر راکتور سری متغیر با هسته اشباع‌شونده به بهینه‌سازی جریان DC و تعداد دور کلاف‌های AC و DC پرداخته شده است.

در فرایند بهینه‌سازی بر روی انواع محدودکننده‌های جریان خطا لازم به یادآوری است که محدودیت‌های ذاتی آنها نظیر نگهداری در دمای پایین برای ابررساناها، هزینه بالای ادوات الکترونیک قدرت و ساختار پیچیده برخی از محدودکننده‌ها همچنان پابرجاست. بر همین اساس در این مقاله به طراحی بهینه طرح جدیدی از محدودکننده‌های جریان خطا مبتنی بر راکتور سری متغیر با هسته هوایی [۱۹] که محدودیت‌های فوق را ندارد پرداخته می‌شود. هدف از طراحی بهینه، دستیابی به کمترین زمان عملکرد محدودکننده ضمن دارابودن اندوکتانس اولیه و نهایی مورد نظر است. برای این کار با استفاده از معادلات حاکم و روش اجزای محدود، تأثیر پارامترهای مختلف محدودکننده در عملکرد آن، بررسی و مقدار مناسبی به هر پارامتر اختصاص داده می‌شود.

در بخش دوم محدودکننده مورد نظر معرفی می‌گردد و در بخش سوم به تحلیل و مدل‌سازی محدودکننده پیشنهادی پرداخته می‌شود. بررسی مسائل مربوط به بهینه‌سازی در بخش چهارم آمده و نهایتاً در بخش پنجم نتایج مربوط به طراحی بهینه، ارائه و با طراحی اولیه مقایسه می‌گردند.

۲- محدودکننده جریان خطای مبتنی بر راکتور سری متغیر پیشنهادی

مطابق شکل ۱، محدودکننده جریان خطای پیشنهادی شامل دو راکتور است که هر دو قابلیت حرکت دارند. راکتورها به وسیله تعدادی فنر به صفحات ثابت نگهدارنده متصل شده‌اند و در حالت کار عادی شبکه تقریباً روبه‌روی هم قرار دارند. همچنین به صورت سری به یکدیگر متصل می‌شوند و جریان عبوری از آنها در خلاف جهت یکدیگر است. به عبارت



شکل ۴: نحوه تقسیم‌بندی کلاف‌ها [۲۳].

پارامترهای T ، K ، n و ν بیانگر تعداد سلول‌های سطح مقطع کلاف‌های داخلی و خارجی هستند؛ به طوری که هر سلول نشانگر یک رشته کلاف است. از این رو با توجه به تعداد رشته‌های کلاف‌ها، سطح مقطع کلاف بیرونی به $(2n+1) \times (2m+1)$ سلول و سطح مقطع کلاف داخلی به $(2T+1) \times (2K+1)$ سلول تقسیم می‌شود.

به منظور تعیین سرعت عملکرد محدودکننده جریان خطای پیشنهادی ضروری است که نیروی بین کلاف‌های داخلی و خارجی محاسبه شوند. در کلاف‌های هم‌محور، نیروی مغناطیسی فقط در راستای محور حرکت کلاف‌ها اعمال می‌شود. با توجه به رابطه اندوکتانس متقابل به دست آمده از روش تقسیم هادی‌ها به اجزای کوچک و استفاده از حلقه‌های محاسباتی، نیروی مغناطیسی بین کلاف‌های رشته‌ای هم‌مرکز (شکل ۴) برابر است با [۲۳] و [۲۴]

$$f(k, j, l, i) = \frac{\mu_i i_r k C_{il}}{4 \sqrt{r_k r_j}} \left[\frac{2-k^\nu}{1-k^\nu} E(k) - 2F(k) \right] \quad (5)$$

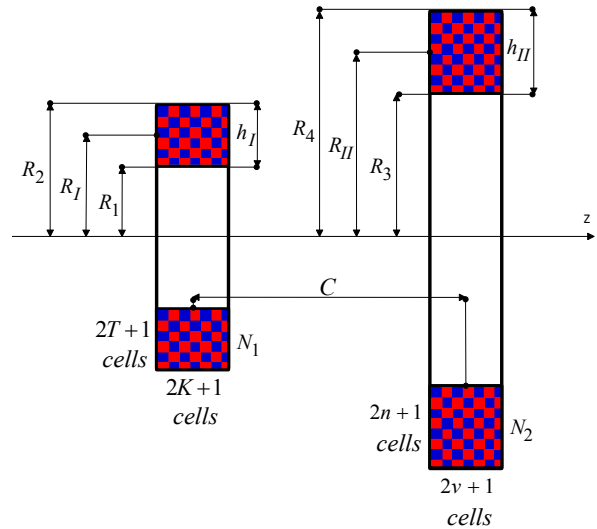
که

$$\begin{aligned} i_r &= \frac{N_r I_r}{n_{r1} \times n_{a1}} \\ i_\nu &= \frac{N_\nu I_\nu}{n_{r\nu} \times n_{a\nu}} \\ k^\nu &= \frac{4 r_k r_j}{(r_k + r_j)^\nu + C_{il}^\nu} \\ r_k &= r_{r\nu} + \left(\frac{1}{\nu} + k\right) \frac{h_{I1}}{n_{r1}} \\ r_j &= r_{r\nu} + \left(\frac{1}{\nu} + j\right) \frac{h_{II}}{n_{r\nu}} \\ C_{il} &= C - \left[\frac{b_{I1}}{\nu} + \frac{b_{I\nu}}{\nu}\right] + \left(\frac{1}{\nu} + l\right) \frac{b_{I1}}{n_{a1}} + \left(\frac{1}{\nu} + i\right) \frac{b_{II}}{n_{a\nu}} \end{aligned} \quad (6)$$

با محاسبه نیروی بین کلاف‌های رشته‌ای، نیروی کل بین دو کلاف اصلی مطابق (۷) تعیین می‌شود

$$F = \sum_{k=-}^{n_{r1}-1} \sum_{j=-}^{n_{r\nu}-1} \sum_{l=-}^{n_{a1}-1} \sum_{i=-}^{n_{a\nu}-1} f(k, j, l, i) \quad (7)$$

که I_r و I_ν به ترتیب جریان عبوری از کلاف داخلی و خارجی و $r_{r\nu}$ به ترتیب شعاع داخلی کلاف داخلی و خارجی هستند. پارامترهای n_{r1} ، n_{a1} ، $n_{r\nu}$ و $n_{a\nu}$ نیز بیانگر تعداد سلول‌های سطح مقطع کلاف‌های داخلی و خارجی هستند.



شکل ۳: ساختار تقسیم‌بندی کلاف‌های با سطح مقطع مستطیل شکل [۲۱].

اندوکتانس متقابل با تقسیم‌بندی کلاف‌ها با تعداد زیادی کلاف رشته‌ای دایره‌وار و هم‌مرکز با سطح مقطع بسیار کوچک محاسبه می‌شود (شکل ۳). بر این اساس برای کلاف‌های دایره‌ای با سطح مقطع مستطیل شکل از (۲) برای تعیین اندوکتانس متقابل استفاده می‌شود [۲۱] و [۲۲]

$$M = \frac{N_1 N_\nu \sum_{g=-K}^{g=K} \sum_{h=-T}^{h=T} \sum_{s=-\nu}^{s=\nu} \sum_{l=-n}^{l=n} M_{\nu r}(g, h, s, l)}{(2K+1)(2T+1)(2\nu+1)(2n+1)} \quad (2)$$

که $M_{\nu r}(g, h, s, l)$ بیانگر اندوکتانس متقابل بین دو کلاف رشته‌ای و برابر است با

$$\begin{aligned} M_{\nu r}(g, h, s, l) &= \frac{\mu \sqrt{R_{\nu 1}(h) R_{r\nu}(l)}}{k(g, h, s, l)} \times [-2E(k(g, h, s, l)) \\ &+ (2-k^\nu(g, h, s, l)) \times F(k(g, h, s, l))] \end{aligned} \quad (3)$$

که

$$\begin{aligned} k^\nu(g, h, s, l) &= \frac{4 R_{\nu 1}(h) R_{r\nu}(l)}{(R_{\nu 1}(h) + R_{r\nu}(l))^\nu + z(g, s)^\nu} \\ R_{\nu 1}(h) &= R_{I1} + \frac{h_{I1}}{2T+1} h, \quad h = -T, \dots, 0, \dots, T \\ R_{r\nu}(l) &= R_{II} + \frac{h_{II}}{2n+1} l, \quad l = -n, \dots, 0, \dots, n \\ R_{I1} &= \frac{R_1 + R_2}{2} \\ R_{II} &= \frac{R_3 + R_4}{2} \\ h_{I1} &= R_2 - R_1 \\ h_{II} &= R_4 - R_3 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} z(g, s) &= C + \frac{b_{I1}}{(2K+1)} g + \frac{b_{II}}{(2\nu+1)} s \\ &, \quad g = -K, \dots, 0, \dots, K, \quad s = -\nu, \dots, 0, \dots, \nu \end{aligned}$$

که N_1 و N_ν به ترتیب تعداد دور کلاف داخلی و خارجی، $F(k)$ به ترتیب انتگرال کامل مرتبه اول و دوم بیضوی، R_{II} و R_{I1} به ترتیب شعاع متوسط کلاف داخلی و خارجی، h_{II} و h_{I1} به ترتیب ضخامت کلاف داخلی و خارجی، b_{II} و b_{I1} به ترتیب ارتفاع کلاف داخلی و خارجی و C فاصله بین مراکز دو کلاف داخلی و خارجی است.

جدول ۲: اطلاعات شبکه مورد مطالعه [۱۹].

پارامتر	مقدار	واحد
ولتاژ خط	۲۰	kV
فرکانس	۵۰	Hz
اندوکتانس خط	۲٫۵	mH
مقاومت خط	۰٫۰۳	Ω
ماکسیم توان بار	۱۲٫۵	MVA
جریان نامی فاز (مقدار rms)	۳۶۰	A

جدول ۱: مشخصات طرح اولیه از محدودکننده پیشنهادی [۱۹].

پارامتر	مقدار	واحد
قطر خارجی	۱۲۰۰	mm
قطر داخلی	۱۱۴۰	mm
ارتفاع	۴۰۰	mm
تعداد دور	۲۴	
وزن	۱۸۰	kg
قطر خارجی	۱۱۲۰	mm
قطر داخلی	۱۰۶۰	mm
ارتفاع	۴۰۰	mm
تعداد دور	۲۴	
وزن	۱۷۰	kg
فاصله اولیه بین راکتورها	۱۰۰	mm
اندوکتانس اولیه	۰٫۲۵۸	mH
اندوکتانس نهایی	۱٫۴۲۱۸	mH
زمان عملکرد	۱۶	ms
مقاومت	۰٫۰۳۶	Ω
پیک جریان اتصال کوتاه	۲۹٫۵	kA

نیز ۱۶ ms است. با به کارگیری این محدودکننده، پیک جریان اتصال کوتاه از مقدار ۳۹ kA به مقدار ۲۹٫۵ kA کاهش می‌یابد.

هرچه زمان عملکرد محدودکننده، کمتر و به ۱۰ میلی‌ثانیه نزدیک‌تر گردد میزان محدودکنندگی جریان خط بیشتر خواهد شد. از این رو یکی از اهداف مهم در طراحی بهینه محدودکننده، دستیابی به بالاترین سرعت عملکرد محدودکننده است. همچنین هرچه اندوکتانس نهایی محدودکننده بیشتر باشد میزان محدودکنندگی جریان بیشتر می‌شود. از آنجا که هم سرعت عملکرد و هم اندوکتانس نهایی محدودکننده بر دامنه جریان خط تأثیرگذارند، در این مقاله این دو پارامتر مورد بررسی قرار می‌گیرند و مقدار پیک جریان خط به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی انتخاب می‌گردد.

پارامتر دیگری که در فرایند بهینه‌سازی اهمیت زیادی دارد اندوکتانس اولیه محدودکننده است. هرچه مقدار اندوکتانس اولیه کمتر باشد بهتر است و افت ولتاژ کمتری را در شرایط عادی شبکه ایجاد می‌کند. از این رو در فرایند بهینه‌سازی، اندوکتانس اولیه به عنوان یک قید در نظر گرفته شده و ماکسیم مقدار ۰٫۴ mH برای آن انتخاب می‌گردد.

استفاده از الگوریتم‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک جهت انتخاب مقدار بهینه برای پارامترهای مختلف محدودکننده با توجه به اینکه حجم محاسبات مربوط به مدل‌سازی تحلیلی بسیار بالاست به زمان زیادی نیاز دارد و این در حالی است که برای اطمینان از به دست آوردن بهینه‌ترین پاسخ ممکن باید الگوریتم به دفعات اجرا شود. از این رو تأثیر پارامترهای مختلف بر نحوه عملکرد محدودکننده به صورت جداگانه، بررسی و مقدار بهینه پارامتر انتخاب می‌شود. در انتخاب مقدار بهینه، علاوه بر معیارهای عملکردی محدودکننده مانند سرعت عملکرد و دامنه جریان خط، محدودیت‌ها و ملاحظات مکانیکی و الکتریکی نیز در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه به بررسی پارامترهای مختلف پرداخته می‌شود. بدین منظور در هر مرحله با تغییر پارامتر مورد نظر، دامنه جریان خط و مدت زمان عملکرد محدودکننده جهت دستیابی به اندوکتانس نهایی، محاسبه و نمودار آن ارائه می‌گردد و بر اساس آن به انتخاب مقدار بهینه پرداخته می‌شود.

۴-۱ فاصله هوایی بین راکتورها

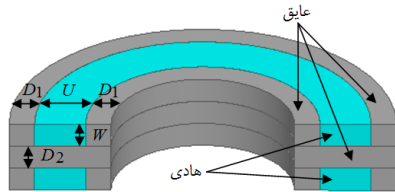
با توجه به اینکه هر دو راکتور داخلی و خارجی متحرک هستند باید بین آنها فاصله هوایی مناسب در نظر گرفته شود. اندازه فاصله هوایی بر روی میزان اندوکتانس متقابل و نیروی وارد به راکتورها تأثیر دارد. به طوری که با افزایش فاصله هوایی، اندوکتانس متقابل کاهش می‌یابد؛ لذا اندوکتانس اولیه محدودکننده بیشتر می‌شود و تأثیر نامطلوبی بر شبکه برق خواهد داشت. علاوه بر این، هرچه فاصله هوایی بیشتر شود، نیروی تدافعی بین راکتورها نیز کاهش می‌یابد و بر نحوه عملکرد محدودکننده اثر خواهد داشت. نمودار تأثیر فاصله هوایی بر روی اندوکتانس اولیه، سرعت عملکرد و میزان محدودکنندگی جریان خط در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده‌اند.

همان طور که مشخص است روابط مربوط به محاسبه پارامترهایی مثل اندوکتانس متقابل و نیروی بین راکتورها چندین حلقه محاسباتی دارند که تعداد حلقه‌ها به تعداد کلاف‌های رشته‌ای بستگی دارد. در همین راستا زمان مورد نیاز برای محاسبه این پارامترها نیز وابسته به تعداد اجزای در نظر گرفته شده است؛ بنابراین هر چه تعداد این اجزا بیشتر باشند، زمان محاسبات نیز افزایش می‌یابد. از طرفی تعداد اجزای کم نیز منجر به ایجاد خطای قابل توجه در محاسبات می‌گردد. از این رو محاسبات مربوط به طراحی، زمان بسیار زیادی را به خود اختصاص می‌دهند و بنابراین استفاده از الگوریتم‌های متداول بهینه‌سازی نظیر الگوریتم ژنتیک که برای یافتن نقطه بهینه، پارامترها را به صورت هم‌زمان تغییر داده و با تعداد دفعات زیاد این حلقه‌ها را تکرار کند بسیار زمان‌بر است و به سخت‌افزارهای قدرتمندی در این زمینه نیاز دارد که مقرون به صرفه نیست.

ذکر این نکته ضروری است که در مدل‌سازی محدودکننده جریان خطای پیشنهادی و محاسبه پارامترهای عملکردی از تأثیر جریان‌های گردابی و مجاورتی کلاف‌ها صرف نظر شده است. دلیل این امر آن است که با لحاظ کردن این دو پارامتر، لازم است هر هادی به تعداد زیادی مش (رشته) تقسیم گردد و برای هر رشته، روابط مخصوص به آن در نظر گرفته شود که در این صورت یک ماتریس بسیار بزرگ محاسباتی تشکیل می‌گردد که بر اساس آن، اندوکتانس خودی و متقابل هر یک از رشته‌ها با رشته‌های دیگر همان هادی و اندوکتانس متقابل بین هر رشته با رشته‌های هادی‌های دیگر سیم‌پیچ داخلی و سیم‌پیچ بیرونی باید محاسبه شود. از این رو محاسبات به قدری پیچیده و طولانی می‌گردد که برای انجام آن به سیستم‌های کامپیوتری با مشخصات سخت‌افزاری قوی و صرف زمان بسیار زیاد در هر پله زمانی نیاز است.

۴-۲ طراحی بهینه محدودکننده پیشنهادی

در [۱۹] یک طراحی اولیه از محدودکننده پیشنهادی ارائه شده است. مشخصات این محدودکننده به همراه مشخصات شبکه مورد مطالعه در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌گردد اندوکتانس راکتور با بروز اتصال کوتاه از مقدار ۰٫۲۵۸ mH شروع به افزایش کرده و به مقدار نهایی ۱٫۴۲۱۸ mH می‌رسد. مدت زمان عملکرد محدودکننده

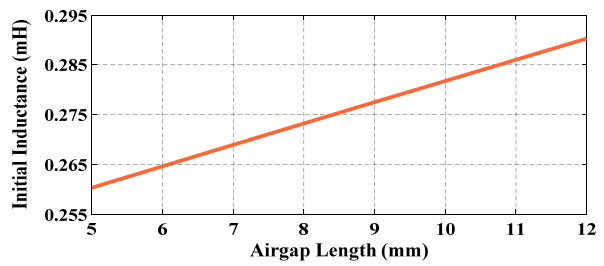


شکل ۸: شماتیک کلاف‌های یکی از راکتورها.

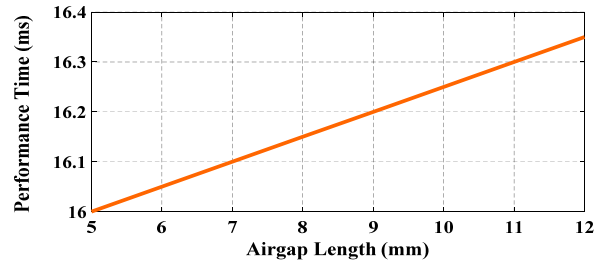
یکی از راهکارهای کاهش وزن محدودکننده، انتخاب آلومینیوم به جای مس برای هادی‌هاست. در طراحی اولیه، هادی‌ها از جنس مس هستند که به دلیل چگالی جرمی بالا، وزن زیادی را به محدودکننده تحمیل می‌کنند و منجر به کاهش سرعت جابه‌جایی راکتورها می‌گردند. لذا به منظور افزایش سرعت عملکرد محدودکننده پیشنهادی، جنس هادی‌ها آلومینیوم در نظر گرفته می‌شود که چگالی جرمی آن تقریباً یک‌سوم مس است. البته ذکر این نکته ضروریست که با به‌کارگیری هادی از جنس آلومینیوم، مقاومت راکتورها افزایش می‌یابد که برای جبران آن، سطح مقطع هادی‌ها ۶۰٪ (برابر ۱/۶) افزایش داده می‌شود. این مسئله با در نظر گرفتن تلفات محدودکننده جریان خطای پیشنهادی بسیار حائز اهمیت است و باید به گونه‌ای رقم بخورد که مقدار تلفات در طراحی بهینه با هادی آلومینیوم نسبت به طراحی اولیه با هادی مس افزایش چشم‌گیری نداشته باشد و در محدوده مورد نظر باقی بماند. بنابراین با در نظر گرفتن تمام مسائل دخیل در این امر می‌توان نتیجه گرفت که در مجموع، وزن هادی‌ها تقریباً نصف خواهد شد.

وزن سازه محدودکننده و نگهدارنده هادی‌ها نیز اهمیت زیادی دارد. در طراحی اولیه با در نظر گرفتن سازه فلزی، وزن آن برای هر راکتور برابر با ۱۰۰ کیلوگرم تخمین زده شده است؛ اما در صورت استفاده از مواد کامپوزیتی مانند BMC در بین هادی‌ها که استحکام مکانیکی بسیار بالایی دارد می‌توان وزن نگهدارنده‌ها را کاهش داد. مواد کامپوزیتی، این مزیت را دارند که از استحکام عایقی بالایی برخوردارند و نیازی به عایق کردن هادی‌ها یا استفاده از هادی‌های روکش‌دار نیست. از این رو با توجه به چگالی جرمی مواد کامپوزیتی می‌توان گفت با استفاده از این مواد، وزن سازه محدودکننده تقریباً به نصف کاهش می‌یابد.

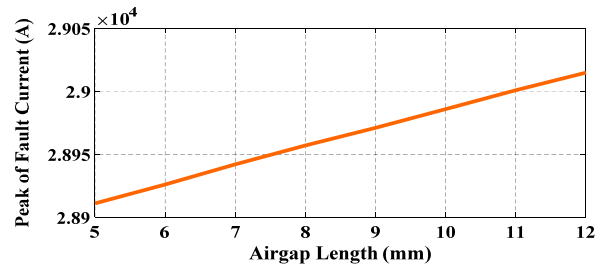
مطابق شکل ۸، ضخامت طولی هادی (پارامتر U) برابر ۱۸ mm و ضخامت عرضی هادی (پارامتر W) برابر ۵ mm است. همچنین ضخامت عایقی در نظر گرفته شده برای هادی‌ها (پارامتر D_1) با در نظر گرفتن محدودیت‌های مکانیکی و الکتریکی مانند استحکام عایقی، جریان ناشی و قابلیت تحمل تنش‌های ناشی از نیروهای تدافعی بین هادی‌ها و جنس کامپوزیتی مواد عایقی برابر با ۷ mm انتخاب شده است. بر همین اساس فاصله بین هادی‌ها تا هادی‌های راکتور مجاور با احتساب فاصله هادی ۷ mm از ۲۴ mm در طراحی اولیه به ۲۱ mm در طراحی بهینه کاهش می‌یابد. این در حالی است که ضخامت عایقی بین هادی‌های هر کلاف (پارامتر D_2) در طراحی اولیه برابر ۱۲ mm در نظر گرفته شده که به دلیل اختلاف پتانسیل بسیار ناچیز بین هادی‌ها و خاصیت بالای عایقی مواد انتخاب شده می‌تواند کاهش یابد و ضخامت عایقی آن نیز ۷ mm انتخاب شود که از این رو ارتفاع راکتورها از ۴۰۰ mm به ۲۸۸ mm تغییر می‌یابد. در نتیجه با تغییر جنس هادی و مواد مورد استفاده در ساخت نگهدارنده‌ها، سرعت جابه‌جایی راکتورها تا میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت و زمان عملکرد محدودکننده بهبود می‌یابد. برخی از معادلات طراحی با در نظر گرفتن موارد مطرح در این بخش، دستخوش تغییراتی می‌شوند که در (۸) تا (۱۱) به آنها پرداخته شده است



شکل ۵: نمودار اندوکتانس اولیه بر حسب فاصله هوایی بین راکتورها.



شکل ۶: نمودار زمان عملکرد محدودکننده بر حسب فاصله هوایی بین راکتورها.



شکل ۷: نمودار مقدار پیک جریان خطا بر حسب فاصله هوایی بین راکتورها.

مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله هوایی بین راکتورها، پیک جریان اتصال کوتاه، افزایش و توان تجهیز در محدود کردن جریان خطای اتصال کوتاه کاهش می‌یابد. به علاوه افزایش فاصله هوایی منجر به افزایش اندوکتانس اولیه می‌گردد و بر عملکرد نرمال شبکه تأثیر منفی می‌گذارد. لذا هرچه فاصله هوایی کمتر باشد محدودکننده عملکرد بهتری دارد؛ اما با توجه به متحرک بودن هر دو راکتور و نیز وجود محدودیت‌هایی در مونتاژ و ساخت تجهیز و تیرانس‌های مکانیکی، طول فاصله هوایی نمی‌تواند خیلی کم باشد. بر این اساس با در نظر گرفتن همه موارد، فاصله هوایی بین راکتورها ۷ mm در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که مقدار فاصله هوایی در طرح اولیه ۱۰ mm بوده و با این تغییر، پیک جریان خطا نسبت به حالت قبل از ۲۹۰۰۰ A به ۲۸۹۴۰ A کاهش می‌یابد.

لازم به ذکر است که فاصله هوایی محدودکننده، تأثیر چندانی بر روی اندوکتانس نهایی ندارد؛ چرا که اندوکتانس نهایی محدودکننده مربوط به حالتی است که راکتورها به اندازه کافی از یکدیگر دور شده‌اند و بین آنها فاصله هوایی وجود ندارد. از این رو زمان عملکرد محدودکننده برای رسیدن به اندوکتانس نهایی در فاصله‌های هوایی مختلف تغییر محسوسی نخواهد داشت.

۲-۴ وزن راکتور

به‌وضوح می‌توان گفت که وزن، یکی از تأثیرگذارترین پارامترها بر نحوه عملکرد محدودکننده است. به منظور دستیابی به بیشترین سرعت عملکرد محدودکننده، وزن کلیه تجهیزات باید تا حد ممکن کاهش یابد. در عین حال به لحاظ مکانیکی نیز تجهیز مورد نظر باید استقامت کافی در برابر تنش‌های احتمالی وارد شده را داشته باشد.

جدول ۳: مقادیر بهینه وزن محدودکننده جریان خطای پیشنهادی.

پارامتر	طراحی اولیه (kg)	طراحی بهینه (kg)
وزن راکتور خارجی	۱۸۰	۹۵
وزن راکتور داخلی	۱۷۰	۹۰
وزن کل	۳۵۰	۱۸۵

جدول ۴: پیک جریان خطا بر حسب ترکیب‌های مختلف قطر و ارتفاع راکتورها.

قطر خارجی راکتور بیرونی (mm)	ارتفاع (mm)	تعداد دور	پیک جریان خطا (kA)
۴۰۵۰	۱۲۰	۱۰	۲۲,۱۸
۳۰۴۵	۱۴۴	۱۲	۲۲,۳۱
۲۱۹۰	۱۸۰	۱۵	۲۲,۶۳
۱۶۹۰	۲۱۶	۱۸	۲۳
۱۴۰۰	۲۵۲	۲۱	۲۳,۲۵
۱۲۰۰	۲۸۸	۲۴	۲۳,۵
۱۰۵۵	۳۲۴	۲۷	۲۳,۷۵
۹۵۰	۳۶۰	۳۰	۲۴

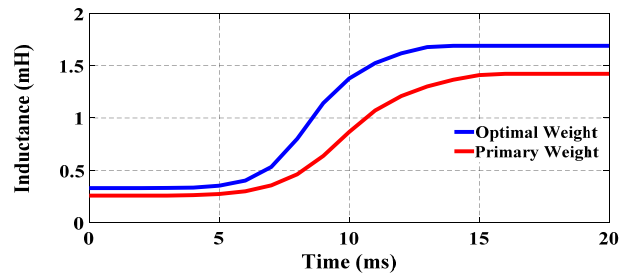
میزان کافی بزرگ باشد تا اندوکتانس لازم جهت کاهش پیک جریان در زمان بروز خطای اتصال کوتاه فراهم آید. اما افزایش قطر باعث افزایش وزن و در نتیجه کاهش سرعت محدودکننده می‌گردد. از طرف دیگر افزایش قطر و بالارفتن اندوکتانس‌های خودی راکتورها باعث افزایش اندوکتانس اولیه (در حالت نرمال) می‌شود که مطلوب نیست. بنابراین لازم است که مقدار بهینه‌ای برای آن انتخاب شود.

ارتفاع راکتور نیز بر میزان محدودکنندگی تجهیز و سرعت عملکرد محدودکننده تأثیر بسزایی دارد. راکتورهای محدودکننده باید به سرعت حرکت کرده و از محدوده هم‌پوشانی یکدیگر دور شوند؛ به گونه‌ای که اندوکتانس متقابل سریعاً کاهش یافته و اندوکتانس کل محدودکننده تا حد مقبولی افزایش یابد. هرچه ارتفاع راکتورها بیشتر باشد دو راکتور در زمانی بیشتر از محدوده هم‌پوشانی یکدیگر خارج می‌شوند. اما از طرف دیگر با افزایش تعداد دور و در نتیجه افزایش ارتفاع، اندوکتانس نهایی راکتور بیشتر شده و قدرت محدودکنندگی آن افزایش خواهد یافت. بنابراین لازم است مقدار بهینه‌ای برای آن انتخاب شود.

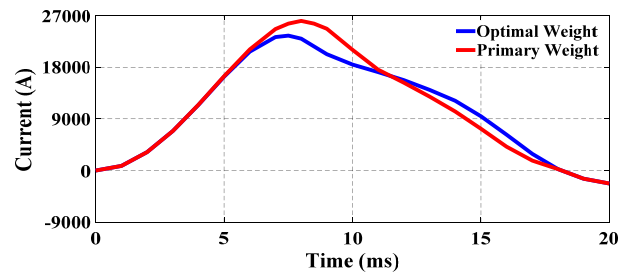
برای تعیین مقدار بهینه برای قطر و ارتفاع راکتورها، سرعت عملکرد محدودکننده به همراه میزان محدودکنندگی آن به ازای مقادیر مختلف قطر و ارتفاع راکتورها محاسبه شده است. ارتفاع راکتور بر اساس تعداد دور و ضخامت کلاف و همچنین ضخامت عایق بین هادی‌ها به دست می‌آید که البته با توجه به مشخص بودن ضخامت هادی‌ها و عایق‌ها، ارتفاع راکتور متناسب با تعداد دور خواهد بود. ترکیب‌های مختلف قطر و ارتفاع با این شرط که اندوکتانس نهایی در تمام ترکیب‌ها یکسان باشد تعیین می‌شوند.

ترکیب‌های به دست آمده بر روی کلیه پارامترهای تجهیز پیشنهادی نظیر جریان خطای محدودشده، اندوکتانس و ... تأثیر می‌گذارند که در جدول ۴ مقدار پیک جریان خطا برای چند نمونه از ترکیب‌های مختلف مشخص شده است.

زمان عملکرد و میزان جریان خطای محدودکننده پیشنهادی برای حالات مختلف به دست آمده‌اند که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به آنها پرداخته و سپس بهترین ترکیب ممکن انتخاب شده است. همان طور که مشخص است تغییرات قطر و ارتفاع بر پارامترهای عملکردی محدودکننده جریان خطای پیشنهادی تأثیر می‌گذارند؛ لذا بر اساس ارزیابی نتایج به دست آمده،



شکل ۹: نحوه تغییرات اندوکتانس کل برای دو وزن اولیه و بهینه.



شکل ۱۰: شکل موج جریان خطا برای دو وزن اولیه و بهینه.

$$b = 1,67 \times 10^{-6} \times \frac{I}{j \times h} \quad (8)$$

$$m = \pi \times (R_o^2 - R_i^2) \times b \times 2700 \times N \quad (9)$$

$$RES = 2,8 \times 10^{-8} \times \frac{I}{A} \quad (10)$$

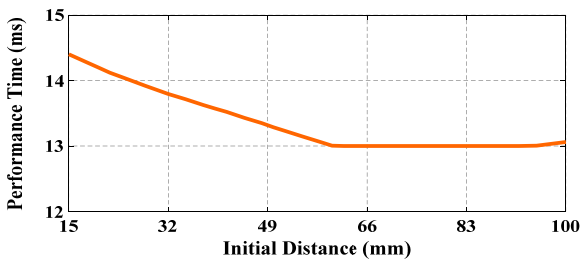
$$l = 2\pi \times R \times N \quad (11)$$

که I جریان عبوری از کلاف، j چگالی جریان، m وزن کلاف، R شعاع خارجی کلاف، R_i شعاع داخلی کلاف، RES مقاومت کلاف، l طول هادی و A سطح مقطع هادی می‌باشد.

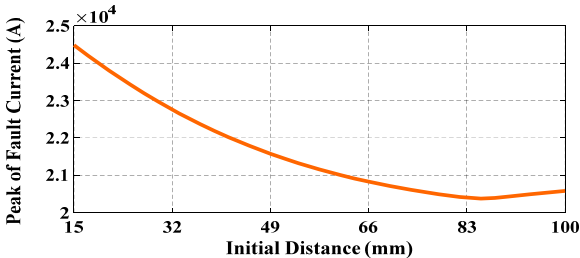
در جدول ۳ اطلاعات مربوط به وزن راکتورها در دو حالت طراحی اولیه و بهینه نشان داده شده‌اند. با توجه به اطلاعات مندرج در جدول مشخص است که با تغییر جنس هادی و همچنین تغییر مواد اولیه مربوط به ساخت نگهدارنده‌ها، وزن محدودکننده جریان خطای پیشنهادی تا حدود ۴۸٪ کاهش می‌یابد که در این صورت سرعت عملکرد محدودکننده حدود ۲۰٪ افزایش می‌یابد و زمان رسیدن به اندوکتانس نهایی از ۱۶/۱ ms به ۱۳ ms کاهش خواهد یافت. میزان محدودکنندگی جریان خطا به اندازه ۱۰٪ افزایش یافته و پیک جریان خطا از ۲۸/۹۴ kA به ۲۶ kA کاهش می‌یابد. با کاهش ارتفاع به دلیل کمتر شدن ضخامت عایق بین هادی‌ها نیز عملکرد محدودکننده باز هم بهبود می‌یابد. نتایج حاصل از مدل‌سازی و شبیه‌سازی نشان می‌دهند با کاهش ارتفاع به همراه کاهش وزن، مقدار پیک جریان خطا از ۲۶ kA به ۲۳/۵ kA، کاهش و اندوکتانس نهایی نیز از ۱/۴۲ mH به ۱/۶۹ mH افزایش می‌یابد. این در حالی است که زمان رسیدن به اندوکتانس نهایی تغییری نخواهد کرد و در زمان ۱۳ ms ثابت می‌ماند. در شکل‌های ۹ و ۱۰ شکل موج‌های اندوکتانس کل و جریان اتصال کوتاه با در نظر گرفتن تغییرات وزن و ارتفاع نشان داده شده‌اند.

۳-۴ قطر و ارتفاع راکتورها

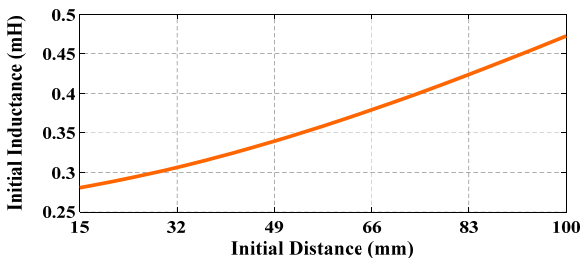
قطر راکتورها به طور مستقیم بر روی مقدار اندوکتانس خودی تأثیر دارد. طبق (۱)، افزایش قطر راکتورها باعث می‌شود که اندوکتانس خودی بیشتر گردد و در نتیجه اندوکتانس نهایی محدودکننده افزایش یابد. لذا با توجه به اهداف در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی، باید قطر راکتور به



شکل ۱۳: نمودار زمان عملکرد بر حسب فاصله اولیه بین راکتورها.



شکل ۱۴: نمودار میزان جریان خطا بر حسب فاصله اولیه بین راکتورها.



شکل ۱۵: نمودار اندوکتانس اولیه بر حسب فاصله اولیه بین راکتورها.

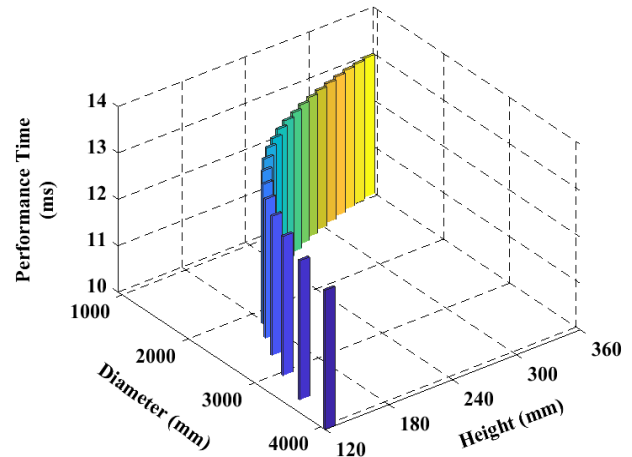
جدول ۵: مقادیر بهینه قطر و ارتفاع راکتورها.

واحد	مقدار	پارامتر
	۱۶	تعداد دور کلاف
mm	۱۹۲	ارتفاع راکتور
mm	۲۰۰۰	قطر خارجی راکتور بیرونی

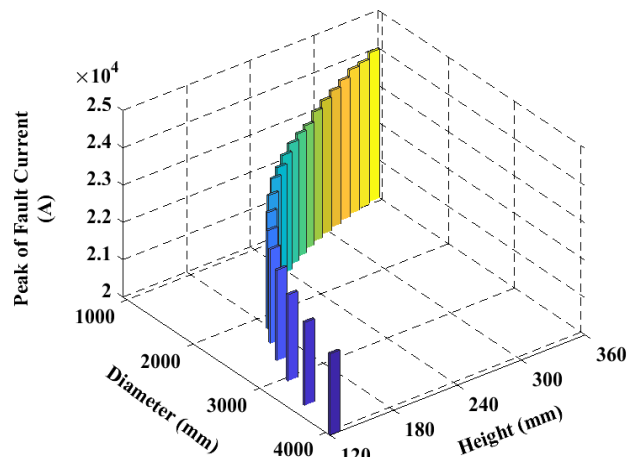
به قیدی که در بهینه‌سازی برای آن تعیین شده (کمتر از ۰/۴ mH) برابر با ۰/۳۹۷۷ mH خواهد بود. البته باید توجه نمود که زمان عملکرد محدودکننده جریان خطای پیشنهادی جهت دستیابی به اندوکتانس نهایی تغییری نخواهد کرد.

با نهایی شدن روند بهینه‌سازی، فرایند طراحی محدودکننده جریان خطای پیشنهادی تکمیل می‌گردد و یک ساختار بهینه با حداکثر سرعت عملکرد ممکن و بیشترین میزان محدودکنندگی جریان خطا به دست می‌آید. در همین رابطه در جدول ۶ مشخصات محدودکننده جریان خطای پیشنهادی بهینه ارائه شده است.

از موارد بسیار مهم در فرایند بهینه‌سازی، در نظر گرفتن تأثیر متقابل پارامترها است که در این مقاله به دلیل حجم بسیار زیاد محاسبات، امکان بهینه‌سازی پارامترها به صورت هم‌زمان با یکدیگر وجود ندارد. البته لازم به ذکر است که در بین پارامترهای بهینه‌سازی شده، برخی پارامترها ماهیت مستقل دارند؛ به این معنا که فارغ از هر شرایطی بایستی حداقل مقدار را داشته باشند. «فاصله هوایی بین راکتورها» و «وزن راکتور» از این دسته‌اند و هر ابعادی برای پارامترهای مختلف راکتور انتخاب شود، این دو پارامتر بایستی حداقل مقدار ممکن را داشته باشند تا محدودکننده بهترین عملکرد را داشته باشد. در این مقاله نیز به همین شکل عمل گردیده و کمترین مقدار ممکن برای این دو پارامتر انتخاب شده است.



شکل ۱۱: نمودار زمان عملکرد محدودکننده بر حسب تغییر قطر و ارتفاع راکتورها.



شکل ۱۲: نمودار مقدار پیک جریان خطا بر حسب تغییر قطر و ارتفاع راکتورها.

مقادیر بهینه مطابق جدول ۵ خواهند بود. مقدار بهینه بر اساس پارامترهای عملکردی همانند زمان عملکرد و میزان جریان خطا و نیز محدودیت‌های مکانیکی و ملاحظات ساختاری انتخاب شده است.

در ساختار بهینه معرفی شده، زمان رسیدن به مقدار نهایی اندوکتانس به‌عنوان سرعت عملکرد محدودکننده برابر ۱۳ ms و پیک جریان اتصال کوتاه نیز برابر ۲۲/۷۵ kA است.

۴-۴ فاصله اولیه بین راکتورها

به منظور ایجاد نیروی تدافعی بین راکتورها و دور شدن راکتورها از یکدیگر باید یک فاصله حداقلی بین راکتورها وجود داشته باشد؛ چرا که در غیر این صورت برآیند نیروهای ایجاد شده توسط راکتورها صفر گردیده و حرکت راکتورها ممکن نخواهد بود. هرچه فاصله اولیه کمتر باشد، نیروی کمتری در لحظه شروع ایجاد شده و سرعت عملکرد محدودکننده کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، فاصله اولیه زیاد نیز باعث افزایش اندوکتانس اولیه و تأثیر نامطلوب بر شبکه در حالت کار عادی خواهد شد.

در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ سرعت عملکرد محدودکننده، میزان جریان خطا و اندوکتانس اولیه بر حسب فاصله اولیه بین راکتورها نشان داده شده‌اند. با توجه به تغییرات نشان داده شده در این شکل‌ها، فاصله اولیه بهینه بین راکتورها باید به‌گونه‌ای انتخاب گردد که در عین داشتن اندوکتانس اولیه قابل قبول، سرعت عملکرد محدودکننده و میزان جریان خطا در محدوده مناسبی قرار گیرد. بر همین اساس، فاصله اولیه بهینه ۷۸ mm در نظر گرفته می‌شود که در این صورت میزان محدودکنندگی جریان خطا به ۲۰/۶ kA کاهش خواهد یافت و اندوکتانس اولیه محدودکننده نیز با توجه

جدول ۶: مشخصات طرح بهینه از محدودکننده پیشنهادی.

پارامتر	مقدار	واحد
قطر خارجی	۲۰۰۰	mm
قطر داخلی	۱۹۳۶	mm
ارتفاع	۱۹۲	mm
تعداد دور	۱۶	
وزن	۹۷	kg
قطر خارجی	۱۹۲۲	mm
قطر داخلی	۱۸۵۸	mm
ارتفاع	۱۹۲	mm
تعداد دور	۱۶	
وزن	۹۵	kg
فاصله اولیه بین راکتورها	۷۸	mm
اندوکتانس اولیه	۰/۳۹۷۷	mH
اندوکتانس نهایی	۱/۶۸۹۸	mH
زمان عملکرد	۱۳	ms
مقاومت	۰/۰۳۶	Ω
پیک جریان اتصال کوتاه	۲۰/۶	kA

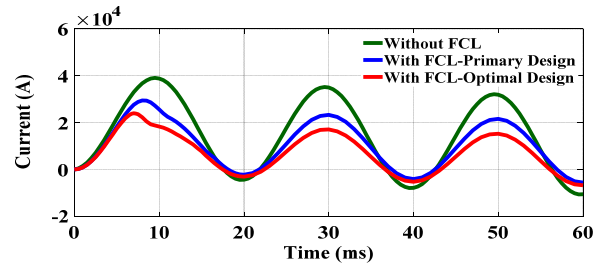
جدول ۸: مقادیر جریان اتصال کوتاه در شرایط مختلف.

پارامتر	بدون محدودکننده		با محدودکننده جریان خطا	
	جریان خطا	طراحی اولیه	طراحی بهینه	واحد
پیک جریان اتصال کوتاه	۳۹	۲۹/۵	۲۰/۶	kA
کاهش خطای اتصال کوتاه	۰	۲۴/۳	۴۷/۲	%

۵- مقایسه و ارزیابی نتایج

۵-۱ ارزیابی و مقایسه نتایج بهینه‌سازی

برای ارزیابی نتایج فرایند بهینه‌سازی و اطمینان از بهبود عملکرد باید پارامترهای مربوط به عملکرد محدودکننده شامل شدت جریان اتصال کوتاه، اندوکتانس خودی و متقابل، نیرو و میزان جابه‌جایی راکتورها با مقادیر حاصل در طراحی اولیه مقایسه شوند. شکل موج‌های جریان اتصال کوتاه در مدت زمان سه سیکل برای حالات مختلف در شکل ۱۶ نشان داده شده‌اند. بیشترین مقدار جریان اتصال کوتاه مربوط به نیم‌سیکل اول است؛ لذا عملکرد محدودکننده پیشنهادی در خصوص کاهش پیک جریان اتصال کوتاه باید در این بازه زمانی ارزیابی شود. بر این اساس در جدول ۸ میزان کاهش پیک جریان اتصال کوتاه در شرایط مختلف آمده است. با حضور محدودکننده پیشنهادی، جریان اتصال کوتاه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. بهینه‌سازی طرح موجود نیز عملکرد محدودکننده را بهبود بخشیده و نسبت به طراحی اولیه، حدود ۲۳٪ بیشتر جریان اتصال کوتاه را کاهش می‌دهد. نحوه تغییرات اندوکتانس محدودکننده به هنگام بروز خطا در طراحی اولیه و طراحی بهینه در شکل ۱۷ و مقادیر اندوکتانس کل در جدول ۹ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در طراحی بهینه، سرعت عملکرد محدودکننده افزایش یافته و در مدت زمان کمتری به اندوکتانس نهایی می‌رسد. اندوکتانس نهایی نیز افزایش یافته و همان‌طور که گفته شد هر دو در کاهش پیک جریان اتصال کوتاه مؤثرند. البته از مزایای مهم محدودکننده جریان خطای پیشنهادی این است که از همان لحظه بروز خطا، محدودکنندگی آن آغاز شده و در فرایند کاهش دامنه جریان خطای اتصال کوتاه شرکت می‌کند.



شکل ۱۶: شکل موج جریان اتصال کوتاه در حالت‌های مختلف در دو حالت طراحی اولیه و طراحی بهینه.

جدول ۷: بررسی ترکیب‌های مختلف ابعادی محدودکننده بر اساس فاصله اولیه بهینه.

قطر خارجی راکتور بیرونی (mm)	ارتفاع (mm)	زمان عملکرد پیک جریان خطا اندوکتانس اولیه (ms)	اندوکتانس اولیه (mH)	پیک جریان اتصال کوتاه (kA)
۲۴۲۰	۱۶۸	۱۳	۰/۴۲۲۸	۲۰/۵
۲۱۹۰	۱۸۰	۱۳	۰/۴۰۹۲	۲۰/۴
۲۰۰۰	۱۹۲	۱۳	۰/۳۹۷۷	۲۰/۶
۱۸۴۰	۲۰۴	۱۳	۰/۳۸۷۴	۲۰/۸۵
۱۷۱۰	۲۱۶	۱۳	۰/۳۷۸۷	۲۱/۱

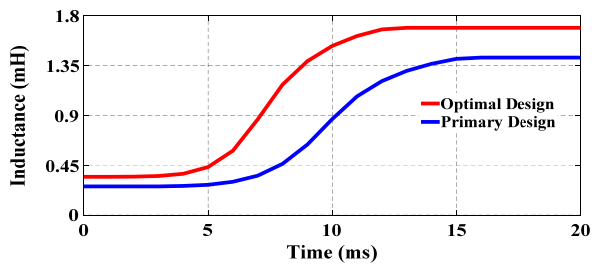
اما پارامترهای دیگر نظیر «قطر»، «ارتفاع» و «فاصله اولیه» بر روی هم اثر متقابل دارند و به دلیل وابستگی به یکدیگر، لازم است هم‌زمان تحت فرایند بهینه‌سازی قرار گیرند. در این میان دو پارامتر قطر و ارتفاع هم‌زمان با هم بهینه‌سازی شده‌اند و بعد از آن فاصله اولیه بین راکتورها به‌صورت جداگانه بهینه‌سازی شده است. در این صورت برای بررسی تأثیر متقابل بین فاصله اولیه با پارامترهای دیگر، تحلیل دیگری به مقاله اضافه شده است. به این صورت که نحوه عملکرد محدودکننده با فاصله اولیه بهینه با قطر و ارتفاع‌هایی به غیر از قطر و ارتفاع بهینه با فاصله دو گام بالاتر و پایین‌تر (بر اساس مقدار اندوکتانس نهایی که باید در همه حالات یکسان باشد) از نقطه بهینه مورد بررسی قرار گرفتند که در جدول ۷ نشان داده شده‌اند. در تحلیل ارائه‌شده، گام زمانی برای محاسبه پارامترهای عملکردی محدودکننده برابر ۱ ms است.

با توجه به اطلاعات مندرج در جدول ۷ می‌توان دریافت با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای عملکردی و قیود بهینه‌سازی شامل سرعت عملکرد، میزان محدودکنندگی جریان خطا و اندوکتانس اولیه و نیز محدودیت‌ها و ملاحظات مکانیکی نظیر وزن، فضای اشغال‌شده توسط تجهیز و میزان مواد مصرفی، ابعاد به‌دست‌آمده در جدول ۶ مقاله به‌عنوان بهینه‌ترین نقطه ممکن است که بهترین عملکرد را در هنگام بروز خطای اتصال کوتاه از خود نشان می‌دهد.

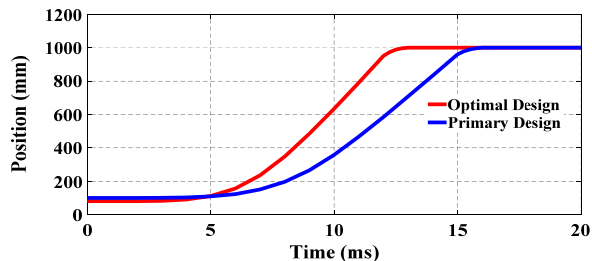
بر اساس ابعاد بهینه به‌دست‌آمده و مقدار مقاومت، تلفات محدودکننده در شرایط عادی طبق (۱۲) حدود ۴/۶ kW در هر فاز خواهد بود که نسبت به توان عبوری از شبکه مقدار بسیار کمی است و حدود ۰/۱٪ از توان عبوری در محدودکننده جریان خطای پیشنهادی تلف می‌شود. بنابراین از آن می‌توان به‌عنوان یکی از مزایای محدودکننده پیشنهادی نام برد

$$P_{\text{loss-phase}} = RES \times I^2 = 0.036 \times 36^2 = 4665.6 \text{ W} \quad (12)$$

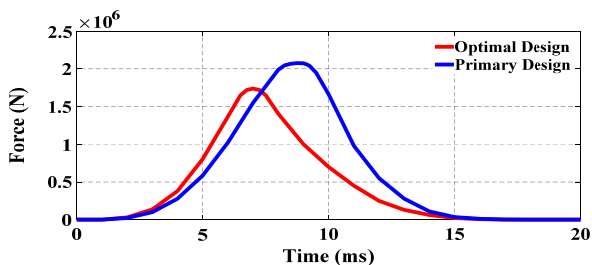
البته در زمان بروز خطای اتصال کوتاه، جریان بسیار زیادی در طول چند سیکل از محدودکننده عبور خواهد کرد. بنابراین استراکچر باید به گونه‌ای طراحی شود که سیم‌پیچ‌ها مستقیماً در معرض هوا قرار داشته باشند و تبادل حرارتی مناسبی در این مورد صورت گیرد. به علاوه اینکه می‌توان به وسیله یک فن و ایجاد گردش هوا در بین راکتورها، انتقال حرارت ناشی از عبور جریان در سیم‌پیچ‌ها را بهبود بخشید.



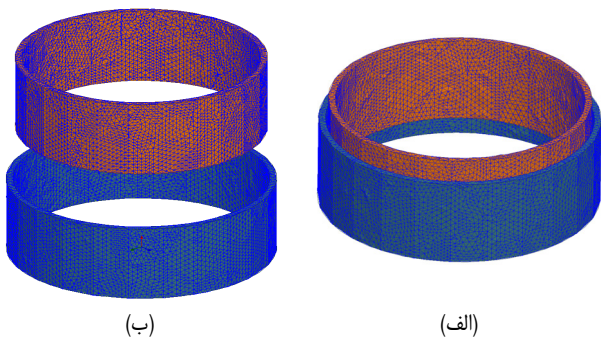
شکل ۱۷: روند تغییرات اندوکتانس کل در فواصل مختلف در دو حالت طراحی اولیه و طراحی بهینه.



شکل ۱۸: نحوه جابه‌جایی راکتورهای محدودکننده جریان خطای پیشنهادی پس از بروز خطا در دو حالت طراحی اولیه و طراحی بهینه.



شکل ۱۹: روند تغییرات نیروی بین راکتورها در دو حالت طراحی اولیه و طراحی بهینه.



شکل ۲۰: مدل شبیه‌سازی سه‌بعدی مربوط به محدودکننده جریان خطای بهینه، (الف) قبل از بروز خطا و (ب) بعد از بروز خطا.

محدودکننده جریان خطای پیشنهادی (فاصله بین کلاف‌ها ۱۰۰ mm) و تعداد مش مورد بررسی قرار گرفته شده است. جدول ۱۰ نتایج حاصل از تست استقلال از مش و همچنین تعداد مش‌ها را ارائه می‌کند. همان‌طور که از نتایج مشخص است برای تعداد مش‌های بزرگ‌تر از ۲۹۷۷۸۷ المان، مقدار اندوکتانس کل محدودکننده تغییر چندانی نمی‌کند؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که نتایج شبیه‌سازی مستقل از تعداد مش است.

زمان اجرای شبیه‌سازی در هر گام زمانی در نرم‌افزار المان محدود ANSYS Maxwell برابر ۲۴۰ ثانیه و در مورد برنامه مربوط به مدل‌سازی محدودکننده جریان خطای بهینه، زمان اجرا در هر گام زمانی برابر ۱۰۰ ثانیه می‌باشد که به میزان ۵۸٪ کمتر از زمان شبیه‌سازی در نرم‌افزار المان محدود است. بنابراین سرعت اجرای محاسبات در مدل‌سازی تا حد قابل قبولی بیشتر از نرم‌افزار المان محدود می‌باشد؛ در

جدول ۹: مقادیر اندوکتانس کل محدودکننده در شرایط مختلف.

واحد	طراحی اولیه	طراحی بهینه	پارامتر
mH	۰٫۲۵۸	۰٫۳۹۷۷	اندوکتانس اولیه
mH	۱٫۴۲۱۸	۱٫۶۸۹۸	اندوکتانس نهایی
ms	۱۶	۱۳	زمان عملکرد

جدول ۱۰: نتایج تست استقلال از مش برای محدودکننده جریان خطا.

پارامتر	مش‌بندی المان محدود		اندوکتانس کل (mH)
	تعداد المان	طول المان (mm)	
حوزه مش‌بندی شده بعد از یک بار اصلاح	۳۲۸۱۱	۱۲۶	۰٫۵۸۲۷
حوزه مش‌بندی شده بعد از دو بار اصلاح	۸۵۶۰۹	۴۰	۰٫۴۳۷۵
حوزه مش‌بندی شده بعد از سه بار اصلاح	۱۳۴۰۴۴	۳۰	۰٫۴۳۱۲۵
حوزه مش‌بندی شده بعد از چهار بار اصلاح	۲۹۷۷۸۷	۲۰	۰٫۴۲۳۵
حوزه مش‌بندی شده بعد از پنج بار اصلاح	۴۲۰۵۳۶	۱۷	۰٫۴۲۵۷

نحوه جابه‌جایی راکتورهای محدودکننده بعد از بروز خطا برای طرح‌های اولیه و بهینه در شکل ۱۸ ارائه شده‌اند. در این شبیه‌سازی فاصله نهایی در نظر گرفته شده برای راکتورها ۱۰۰۰ mm است. مشاهده می‌شود که در طراحی بهینه، راکتورها در مدت زمان کمتری از یکدیگر دور شده و جریان خطا را سریع‌تر محدود می‌کنند.

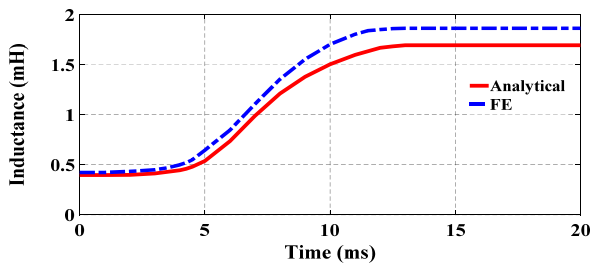
نیروی تدافعی بین راکتورها یک مؤلفه مهم در کاهش زمان عملکرد محدودکننده است. این نیرو در هر لحظه به فاصله بین دو راکتور، اندوکتانس‌های متقابل و جریان محدودکننده وابسته است. در شکل ۱۹ نحوه تغییرات نیروی ایجاد شده بین راکتورهای محدودکننده پیشنهادی پس از بروز خطا بر اساس طراحی‌های اولیه و بهینه آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر چند مقدار پیک نیرو در حالت بهینه کمتر از حالت اولیه است اما از آنجا که در مدت زمان کمتری به وقوع می‌پیوندد باعث عملکرد سریع‌تر محدودکننده شده و جریان خطا را بیشتر کاهش می‌دهد. البته یکی از دلایل کم‌تر بودن مقدار پیک نیرو در حالت بهینه نیز همین کاهش پیک جریان است.

۲-۵ بررسی صحت نتایج

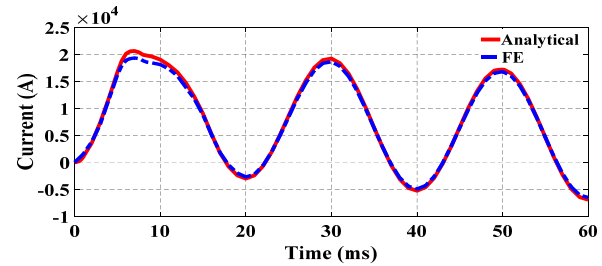
برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی پس از پایان یافتن فرایند بهینه‌سازی، محدودکننده جریان خطای پیشنهادی در محیط سه‌بعدی نرم‌افزار المان محدود ANSYS Maxwell V.۱۶.۰.۰، شبیه‌سازی و سپس نتایج به دست آمده از آن با نتایج مدل‌سازی مقایسه می‌گردد. مدل شبیه‌سازی شده در شکل ۲۰ آمده و شایان ذکر است که مشخصات مربوط به شبکه مورد مطالعه و محدودکننده جریان خطای بهینه، بیشتر در جداول ۲ و ۶ ارائه شده‌اند.

برای تأیید دقت مدل شبیه‌سازی از تست عدم وابستگی حل به مش^۱ استفاده شده که نشان می‌دهد وقتی تعداد مش‌ها به حد مشخصی می‌رسند، نتایج شبیه‌سازی مستقل از تعداد المان‌هاست. به منظور انجام فرایند تست عدم وابستگی حل به مش، رابطه بین اندوکتانس کل

1. Mesh Independence Test



شکل ۲۲: شکل موج اندوکتانس کل محدودکننده جریان خطای بهینه.



شکل ۲۱: شکل موج جریان اتصال کوتاه عبوری از محدودکننده جریان خطای بهینه.

جدول ۱۲: مقادیر اندوکتانس کل حاصل از مدل سازی و شبیه سازی.

درصد خطا	اندوکتانس (mH)		زمان (ms)
	شبیه سازی	مدل سازی	
۶٫۱	۰٫۴۲۳۵	۰٫۳۹۷۷	۰
۶٫۱	۰٫۴۲۳۵	۰٫۳۹۷۷	۱
۵٫۸۲	۰٫۴۲۳۸	۰٫۳۹۹۱	۲
۸٫۲۲	۰٫۴۴۳۸	۰٫۴۰۷۳	۳
۵٫۹	۰٫۴۶۵۶	۰٫۴۳۸۱	۴
۸٫۶۴	۰٫۵۷۶۲	۰٫۵۲۶۴	۵
۷٫۹۸	۰٫۷۸۵۱	۰٫۷۲۲۴	۶
۱۰٫۶۱	۱٫۱۰۵	۰٫۹۸۷۷	۷
۱۰٫۵۷	۱٫۳۵۲۸	۱٫۲۰۹۷	۸
۱۰	۱٫۵۳۰۳	۱٫۳۷۶۶	۹
۱۰٫۱	۱٫۶۷	۱٫۵۰۱۱	۱۰
۸٫۹	۱٫۷۵	۱٫۵۹۴۳	۱۱
۹٫۹	۱٫۸۴۷	۱٫۶۶۴۳	۱۲
۹٫۱۵	۱٫۸۶	۱٫۶۸۹۸	۱۳
۹٫۱۵	۱٫۸۶	۱٫۶۸۹۸	۱۴
۹٫۱۵	۱٫۸۶	۱٫۶۸۹۸	۱۵
۹٫۱۵	۱٫۸۶	۱٫۶۸۹۸	۱۶
۹٫۱۵	۱٫۸۶	۱٫۶۸۹۸	۱۷
۹٫۱۵	۱٫۸۶	۱٫۶۸۹۸	۱۸
۹٫۱۵	۱٫۸۶	۱٫۶۸۹۸	۱۹
۹٫۱۵	۱٫۸۶	۱٫۶۸۹۸	۲۰

جدول ۱۱: مقادیر جریان اتصال کوتاه در فواصل زمانی مختلف.

درصد خطا	جریان (kA)		زمان (ms)
	شبیه سازی	مدل سازی	
۰	۰	۰	۰
۱٫۶	۰٫۸۵۷	۰٫۸۷۱	۱
۱٫۵۴	۳٫۳۲۲	۳٫۳۷۴	۲
۱٫۴۵	۷٫۱۱۲	۷٫۲۱۷	۳
۲٫۳۸	۱۱٫۶۳۸	۱۱٫۹۲۲	۴
۲٫۷۴	۱۶٫۲۱۸	۱۶٫۶۷۶	۵
۵٫۹	۱۸٫۸۹۳	۲۰٫۰۷۹	۶
۵٫۷۸	۱۹٫۴۱۸	۲۰٫۶۰۹	۷
۸٫۱	۱۸٫۲۵۱	۱۹٫۸۶	۸
۶٫۴۳	۱۸٫۸۳۸	۲۰٫۱۳۳	۹
۵٫۳۱	۱۸٫۹۶۵	۲۰٫۰۲۹	۱۰
۶٫۲۸	۱۷٫۸۰۹	۱۹٫۰۰۴	۱۱
۱٫۶۲	۱۶٫۷۷۱	۱۷٫۰۴۸	۱۲
۳	۱۳٫۸۸۶	۱۴٫۲۹۶	۱۳
۴٫۸۳	۱۲٫۷۰۴	۱۲٫۱۱۸	۱۴
۳٫۹۱	۸٫۷۹۳	۹٫۱۵۱	۱۵
۲٫۵	۵٫۰۷۳	۵٫۲۰۳	۱۶
۴	۱٫۷۵۹	۱٫۶۹۱	۱۷
۱۱٫۵	-۰٫۹۳۶	-۱٫۰۵۸	۱۸
۷٫۷	-۲٫۵۷۳	-۲٫۷۸۸	۱۹
۷٫۳	-۳٫۱	-۳٫۳۴۶	۲۰

جدول ۱۱ و شکل ۲۱ می توان نتیجه گرفت که درصد خطای بین نتایج مدل سازی و شبیه سازی در اکثر بازه های زمانی، مقدار کمی است. چنین نتایجی نشان می دهند که مدل سازی با دقت مناسبی انجام گرفته و می تواند به عنوان مرجعی جهت ارزیابی عملکرد محدودکننده جریان خطای پیشنهادی مورد استفاده قرار گیرد.

در ادامه سایر پارامترهای عملکردی نظیر اندوکتانس، میزان جابه جایی و نیرو مورد بررسی قرار می گیرند. در شکل ۲۲ نحوه تغییرات اندوکتانس کل محدودکننده جریان خطای بهینه در دو حالت مدل سازی و شبیه سازی در بازه زمانی اولین سیکل خطا (بازه زمانی ۰ تا ۲۰ میلی ثانیه) ارائه گردیده و سپس مقادیر مربوط در جدول ۱۲ نشان داده شده اند.

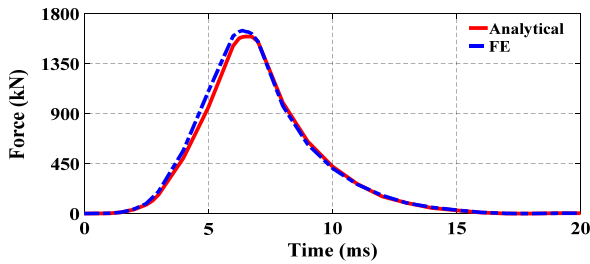
روند تغییرات مربوط به میزان جابه جایی راکتورها بر اساس داده های به دست آمده از مدل سازی و شبیه سازی در شکل ۲۳ مشخص گردیده اند. به علاوه مقادیر جابه جایی در فواصل زمانی مختلف (بازه زمانی ۰ تا ۲۰ میلی ثانیه) نیز در جدول ۱۳ ارائه شده اند.

شکل موج نیروی بین راکتورها از لحظه بروز خطای اتصال کوتاه در دو حالت مدل سازی و شبیه سازی در شکل ۲۴ آورده شده است. مقدار نیرو در لحظات اولیه به دلیل جریان کمی که از کلافها عبور می کند چندان

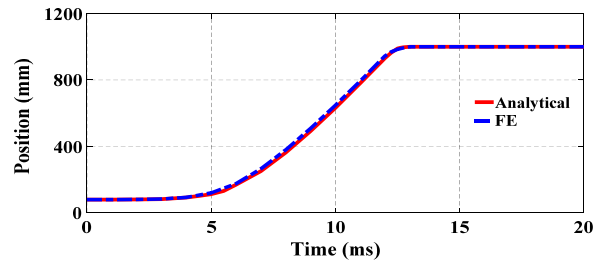
حالی که نتایج حاصل از مدل سازی و شبیه سازی نزدیک به یکدیگر هستند. لازم به ذکر است اگر تعداد رشته های در نظر گرفته شده در مدل سازی کاهش یابد زمان اجرای برنامه نیز کاهش چشم گیری می یابد؛ اما این امر منجر به اندکی کاهش در دقت مدل سازی خواهد شد.

فاصله اولیه بین راکتورها در حالت بهینه ۷۸ mm است که پس از بروز خطای اتصال کوتاه و افزایش جریان عبوری از شبکه، نیروی شدیدی بین راکتورها ایجاد می گردد و منجر به فاصله گرفتن راکتورها از یکدیگر تا فاصله حدود ۱۰۰۰ mm می شود. در این وضعیت اندوکتانس محدودکننده به شدت افزایش می یابد و جریان خطا را به طور مؤثری محدود می نماید. اگرچه محدودکننده در زمان ۱۳ ms به فاصله ۱۰۰۰ mm راکتورها از یکدیگر می رسد، با این حال تجهیز از همان لحظه اول وقوع خطا شروع به محدود کردن جریان خطا می کند و سپس در زمان مذکور به حداکثر قدرت خود می رسد.

شکل موج جریان اتصال کوتاه حاصل از فرایند شبیه سازی و مدل سازی در بازه زمانی سه سیکل (بازه زمانی ۰ تا ۶۰ میلی ثانیه) در شکل ۲۱ آمده است. مقادیر مربوط به نتایج شبیه سازی و مدل سازی نیز در جدول ۱۱ به همراه درصد خطای مربوط ارائه شده اند. با مشاهده مقادیر مندرج در



شکل ۲۴: شکل موج نیروی بین راکتورهای محدودکننده جریان خطای بهینه.



شکل ۲۳: شکل موج میزان جابه‌جایی راکتورهای محدودکننده جریان خطای بهینه.

جدول ۱۴: مقادیر نیروی حاصل از مدل‌سازی و شبیه‌سازی.

درصد خطا	نیرو (kN)		زمان (ms)
	شبیه‌سازی	مدل‌سازی	
۰	۰	۰	۰
۷,۷	۲,۶	۲,۴	۱
۸,۸	۳۹,۶	۳۶,۱	۲
۸,۱	۱۸۰,۴	۱۶۵,۸	۳
۱۰,۵	۵۱۵,۱۵	۴۶۰,۸	۴
۱۳,۲	۱۱۰۰	۹۵۴,۸	۵
۸,۲۵	۱۶۶۰	۱۵۲۳	۶
۳,۳۶	۱۵۵۰	۱۶۰۲,۱	۷
۱۱,۳۴	۸۹۱	۹۹۲,۱	۸
۸,۲	۵۹۱,۵	۶۳۹,۶	۹
۳,۷	۴۰۹	۴۲۴,۱	۱۰
۱,۸	۲۶۲,۴۳	۲۶۷,۲	۱۱
۵,۶	۱۶۴,۲	۱۵۵	۱۲
۲,۸	۷۸,۱	۸۰,۳	۱۳
۹,۷	۵۶,۲۵	۵۰,۸	۱۴
۹,۲۳	۳۱,۹۵	۲۹	۱۵
۱۱,۶۵	۱۰,۶۴	۹,۴	۱۶
۲۱,۸۷	۱,۲۸	۱	۱۷
۲۹,۴	۰,۳۰۹	۰,۴	۱۸
۸	۲,۵	۲,۷	۱۹
۵,۴	۳,۷	۳,۹	۲۰

جدول ۱۳: مقادیر جابه‌جایی راکتورها حاصل از مدل‌سازی و شبیه‌سازی.

درصد خطا	فاصله بین راکتورها (mm)		زمان (ms)
	شبیه‌سازی	مدل‌سازی	
۰	۷۸	۷۸	۰
۰	۷۸	۷۸	۱
۰,۱۲	۷۸,۵	۷۸,۴	۲
۰,۳۷	۸۱,۳	۸۱	۳
۱,۳۱	۹۱,۴	۹۰,۲	۴
۳,۳	۱۱۸,۵	۱۱۴,۶	۵
۵,۱۶	۱۷۴,۴	۱۶۵,۴	۶
۵,۳	۲۶۳,۶	۲۴۹,۶	۷
۴,۳۶	۳۷۸,۱	۳۶۱,۶	۸
۳,۲۷	۵۰۷,۶	۴۹۱	۹
۲,۴۴	۶۴۷,۵	۶۳۱,۷	۱۰
۱,۸۱	۷۹۴,۳	۷۷۹,۹	۱۱
۱,۴	۹۴۵,۸	۹۳۲,۵	۱۲
۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۳
۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۴
۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۵
۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۶
۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۷
۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۸
۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۹
۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۲۰

بایداری تثبیت نمایند.

عملکرد این راکتور را می‌توان تا حد زیادی به پرتابگر مغناطیسی نیز تشبیه کرد. در پرتابگر مغناطیسی یک بانک خازنی بزرگ در یک سیم‌پیچ تخلیه شده و نیروی بسیار شدیدی جهت پرتاب جسم مورد نظر ایجاد می‌کند و جسم در مدت زمان کوتاهی با سرعت بالایی پرتاب می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت این طرح نیز در عمل قابل پیاده‌سازی است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به طراحی بهینه محدودکننده جریان خطای پیشنهادی پرداخته شد. با توجه به اهمیت بسیار زیاد سرعت عملکرد محدودکننده و اندوکتانس نهایی، بهینه‌سازی بر اساس تغییرات این دو پارامتر و تأثیر آن بر جریان پیک اتصال کوتاه انجام گرفت و سپس جهت بررسی طرح بهینه، نتایج آن با نتایج حاصل از طراحی اولیه مقایسه گردید. بهینه‌سازی بر روی پارامترهای مختلفی مانند طول فاصله هوایی، ضخامت عایق، قطر و ارتفاع راکتور، وزن راکتورها و فاصله اولیه بین دو راکتور صورت گرفت. با توجه به اینکه به دلیل زمان‌بر بودن حلقه‌های محاسباتی اندوکتانس‌ها و نیروی بین راکتورها، امکان بررسی تمام پارامترها به صورت هم‌زمان و

زیاد نیست؛ ولی با گذشت زمان و افزایش جریان، مقدار نیروی بین راکتورها نیز به سرعت افزایش پیدا می‌کند. در جدول ۱۴ مقادیر تغییرات نیرو در بازه زمانی یک سیکل (بازه زمانی ۰ تا ۲۰ میلی‌ثانیه) مشخص شده است.

بر اساس داده‌های به دست آمده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی و نیز اختلاف کم بین مقادیر مربوط، دقت مدل‌سازی انجام گرفته بر روی محدودکننده جریان خطای بهینه می‌تواند مورد تأیید قرار گیرد.

با توجه به جریان شدیدی که در زمان اتصال کوتاه ایجاد می‌شود، نیروی بسیار زیادی بین دو سیم‌پیچ ایجاد می‌گردد و دو سیم‌پیچ در مدت کوتاهی از یکدیگر دور می‌شوند. هرچند نیروی به وجود آمده بسیار زیاد است، اما این نیرو به تمام اجزا و لایه‌های سیم‌پیچ‌ها وارد می‌گردد و با توجه به اینکه هر دو سیم‌پیچ قابلیت حرکت دارند، تنش چندانی به آنها وارد نشده و اجرای آن در عمل امکان‌پذیر است. با این حال مسائل مکانیکی در این خصوص اهمیت بسیار بالایی دارند و باید با دقت زیادی طراحی و تحلیل گردند. در این مورد می‌توان به مباحث مربوط به طراحی فنر، دمپر و ساختار مکانیکی اشاره کرد که باید در برابر فشارهای وارد شده و سرعت عمل محدودکننده به خوبی مقاومت کنند و تجهیز را در شرایط

superconducting magnetic energy storage in mesh microgrid networks to improve fault ride through," *J. of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 22-32, Apr. 2023.

- [14] S. Chen, P. Li, R. Ball, J. De Palma, and B. Lehman, "Analysis of a switched impedance transformer-type nonsuperconducting fault current limiter," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 4, pp. 1925-1936, Apr. 2015.
- [15] M. Khatibi, S. Jalilzadeh, A. Hussain, and W. Haider, "A PSO-based approach for optimal allocation and sizing of resistive-type SFCLs to enhance the transient stability of power systems," *Electronics*, vol. 11, no. 23, Article ID: 3980, Nov. 2022.
- [16] M. Song, S. Dai, C. Sheng, L. Zhong, X. Duan, P. Luo, L. Li, and T. Ma, "Time-varying resistance optimization for the resistive type superconducting fault current limiter applied in VSC-HVDC system," *J. of Superconductivity & Novel Magnetism*, vol. 34, no. 4, pp. 1047-1057, Jan. 2021.
- [17] A. Upadhyaya, D. Roy, A. B. Choudhury, and S. Yamada, "Parametric analysis and optimization of an open-core type three-phase SISFCL," *International Trans. on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 10, Article ID: e12534, Oct. 2020.
- [18] G. dos Santos, F. Sass, V. Hugo, G. Sotelo, N. Vilhena, R. Oliveira, A. Pronto, and J. M. Pina, "Optimization design of a saturated iron core fault current limiter using a GA and PSO algorithms coupled with finite element method," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 33, no. 2, pp. 1-11, Mar. 2023.
- [19] M. Amini, A. Damaki Aliabad, and E. Amiri, "Design and analysis of fault current limiter based on air core variable series reactor," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 166129-166136, 2021.
- [20] E. B. Rosa and F. W. Grover, "Formulas and tables for the calculation of mutual and self-inductance," *Bulletin of the Bureau of Standards*, vol. 8, no. 1, 1912.
- [21] S. Babic and C. Akyel, "New analytic-numerical solutions for the mutual inductance of two coaxial circular coils with rectangular cross section in air," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 42, no. 6, pp. 1661-1669, Jun. 2006.
- [22] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 2nd Ed., vol. 2, Oxford: Clarendon Press, pp. 309-311, 1881.
- [23] S. Babic and C. Akyel, "Magnetic force calculation between thin coaxial circular coils in air," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 44, no. 4, pp. 445-452, Apr. 2008.
- [24] A. Shiri and A. Shoulaie, "A new methodology for magnetic force calculations between planar spiral coils," *Prog. in Electromagnetics Research*, vol. 95, pp. 39-57, Jan. 2009.

مسلم امینی در سال ۱۳۹۱ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه کاشان و در سال ۱۳۹۳ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه یزد دریافت نمود. پس از آن به دوره دکترای مهندسی برق در دانشگاه یزد در سال ۱۳۹۶ وارد گردید و در سال ۱۴۰۲ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده شامل موضوعاتی مانند طراحی و ساخت ماشین‌های الکتریکی، محدودکننده‌های جریان خطا، کلیدهای فشارقوی و روش‌های شناسایی خطا در ترانسفورماتورها می‌باشند.

علی اکبر دامکی علی‌آباد تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق قدرت به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۴، ۱۳۸۶ و ۱۳۹۰ از دانشگاه صنعتی امیر کبیر به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشیار و عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه یزد می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان طراحی، تحلیل و ساخت ماشین‌های الکتریکی، محدودکننده‌های جریان خطای اتصال کوتاه در شبکه‌های قدرت، کنترل و درایو موتورهای الکتریکی و همچنین دینامیک سیستم‌های قدرت می‌باشند.

با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند نبود، در این مقاله به بررسی تک‌تک پارامترها به‌صورت جداگانه پرداخته شد و مقادیر بهینه‌ای برای آنها تعیین گردید. هدف از بهینه‌سازی در تمام مراحل، کمینه‌کردن مقدار اندوکتانس اولیه، بیشینه‌کردن اندوکتانس نهایی و کاهش زمان عملکرد محدودکننده در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از تحلیل و شبیه‌سازی نشان داد که با به‌کارگیری بهینه‌سازی، عملکرد محدودکننده پیشنهادی به میزان قابل توجهی بهبود یافته و مقدار پیک جریان اتصال کوتاه نسبت به طرح اولیه از 29.5 kA به 20.6 kA کاهش یافته است.

مراجع

- [1] V. Nougain and S. Mishra, "Current-limiting reactors based time-domain fault location for high-voltage DC systems with hybrid transmission corridors," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, Article ID: 3507010, 10 pp., 2022.
- [2] A. Shah, "Impact of current limiting reactor on bulk power network- a case study," in *Proc. IEEE Texas Power & Energy Conf.*, 6 pp. College Station, TX, USA, 13-14 Feb. 2023.
- [3] J. Yuan, C. Ye, H. Zhou, J. Liu, Y. Zheng, W. Dong, Z. Ni, and L. Wei, "A compact saturated core fault current limiter magnetically integrated with decoupling windings," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 38, no. 4, pp. 2711-2723, Mar. 2023.
- [4] Z. Zhang, J. Yuan, Y. Hong, H. Chen, C. Zou, and H. Zhou, "Hybrid multifunctional saturated-core fault current limiter," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 37, no. 6, pp. 4690-4699, Mar. 2022.
- [5] M. Ahmadvand, S. Khanabdal, and M. Tarafdar Hagh, "A novel three phase saturable core fault current limiter structure," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 34, no. 2, pp. 410-419, Apr. 2019.
- [6] V. Naphade, V. Ghate, and G. Dhole, "Experimental analysis of saturated core fault current limiter performance at different fault inception angles with varying DC bias," *International J. Electrical Power & Energy Systems*, vol. 130, Article ID: 106943, 10 pp., Sept. 2021.
- [7] Y. Chen, Z. Wang, B. Shen, B. Wang, and J. Sheng, "Optimization of inductive superconducting fault current limiter for distribution networks," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 8, pp. 1-5, Nov. 2021.
- [8] L. Wei, B. Chen, J. Yuan, C. Tian, Y. Zhong, X. Li, Y. Gao, and K. Muramatsu, "Performance and optimization study of a novel compact permanent-magnet-biased fault current limiter," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 53, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2017.
- [9] J. Yuan, Z. Zhang, H. Zhou, P. Gan, and H. Chen, "Optimized design method of permanent magnets saturated core fault current limiters for HVDC applications," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 36, no. 2, pp. 721-730, Apr. 2021.
- [10] B. Chen, L. Wei, C. Tian, Y. Gao, K. Muramatsu, and J. Yuan, "Optimization study of a novel small-section permanent-magnet-biased fault current limiter with leakage flux effect," in *Proc. IEEE Conf. Electromagnetic Field Computation*, 1 pp., Miami, FL, USA, 13-16 Nov. 2016.
- [11] A. M. A. Ibrahim, I. Hamdan, S. F. Al-Gahtani, H. S. Hussein, L. S. Nasrat, and M. A. Ismeil, "Optimal shunt-resonance fault current limiter for transient stability enhancement of a grid-connected hybrid PV/wind power system," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 126117-126134, 2021.
- [12] R. A. H. De Oliveira, J. M. Pina, W. T. B. De Sousa, R. Nast, A. G. Pronto, and N. Vilhena, "Optimized shape of short-circuited HTS coils by cutting process for superconducting fault current limiters," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 9, pp. 1-9, Dec. 2021.
- [13] A. Komijani, M. Kheradmandi, and M. Sedighzadeh, "Optimal allocation and control of superconducting fault current limiter and