

## Optimal design and analysis of an electromagnetic fault current limiter based on rotating variable reactor

S. A. Fazljoo, A. A. Damaki Aliabadi\*

\* Associate Professor, Yazd University, Yazd, Iran

(Received: 16/10/2022; Accepted: 07/01/2023)

### Abstract

*In this paper, optimal design of a new electromagnetic fault current limiter with rotary motion is presented. The features of this limiter are its simple structure, low construction and maintenance cost, optimal performance speed, and easy and quick return to initial conditions after the error is corrected. This limiter consists of two spherical air core coils with the ability to rotate freely around the radial axis. In normal conditions, due to the presence of negative mutual inductance between two coils, the total inductance of the limiter has the lowest value. When a fault occurs due to the forces created between two coils, these coils are automatically rotated relative to each other, and the limiting inductance increases rapidly, and the fault current is limited. In this article, for the optimal design of the limiter, the effect of all the limiting parameters such as radius, height, thickness, number of turns and the initial angle of the coils has been investigated and in order to achieve the highest final inductance and the highest operating speed, a suitable value is determined. The results of the simulation show that the designed limiter has a better performance than the initial design and has a good performance speed and final inductance.*

**Keywords:** Fabry-Perot interferometer, Fiber sensor, Fabry-Perot sensor, Layer thickness , Cavity length. Length.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

© Authors



\* Corresponding author E-mail: Alidamaki@yazd.ac.ir

## طراحی بهینه و تحلیل یک محدودکننده جریان خطای الکترومغناطیسی مبتنی بر رآکتور متغیر

### دورانی

سید امین فضل‌جو<sup>۱</sup>، علی اکبر دامکی علی‌آباد<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکترا، ۲- دانشیار، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷)

### چکیده

در این مقاله طراحی بهینه و تحلیل یک محدودکننده جریان خطای الکترومغناطیسی جدید با حرکت دورانی ارائه شده است. از ویژگی‌های این محدودکننده ساختار ساده، هزینه ساخت و نگهداری کم، سرعت عملکرد مطلوب و بازگشت آسان و سریع به شرایط اولیه بعد از رفع خطا است. این محدودکننده از دو سیم‌پیچ هسته هوایی کروی شکل با قابلیت چرخش آزادانه حول محور شعاعی تشکیل شده است. در شرایط عادی به دلیل وجود اندوکتانس متقابل منفی بین دو سیم‌پیچ اندوکتانس کل محدودکننده دارای کمترین مقدار است. با رخ دادن خطا بر اثر نیروهایی که بین دو سیم‌پیچ ایجاد می‌شود این سیم‌پیچ‌ها به صورت خودکار نسبت به هم چرخیده و اندوکتانس کلی محدودکننده به سرعت افزایش می‌یابد و جریان خطا محدود می‌گردد. در این مقاله جهت طراحی بهینه محدودکننده، تأثیر تمامی پارامترهای محدودکننده مانند شعاع، ارتفاع، ضخامت، تعداد دور و زاویه اولیه سیم‌پیچ‌ها مورد بررسی قرار گرفته و به منظور دستیابی به بیشترین اندوکتانس نهایی و بیشترین سرعت عملکرد مقدار مناسبی برای آنها تعیین شده است. جهت تحلیل محدودکننده طراحی شده از دو روش المان محدود و روابط تحلیلی استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد محدودکننده طراحی شده عملکرد بهتری نسبت به طرح اولیه داشته و از سرعت عملکرد و اندوکتانس نهایی خوبی برخوردار است.

**کلیدواژه‌ها:** محدودکننده جریان خطای الکترومغناطیسی، اندوکتانس محدودکننده، حرکت دورانی، سرعت عملکرد.

### بهینه‌سازی

#### ۱- مقدمه

محدودکننده‌های ترکیبی، محدودکننده‌های الکترومغناطیسی و سایر محدودکننده‌ها مانند هسته اشباع شونده پرداخته است. هر یک از این محدودکننده‌ها دارای معایب و مزایایی است. محدودکننده‌های جریان خطای ابررسانایی بسیار سریع تنها در چند میلی‌ثانیه عمل نموده و بدون تلفات و بدون نیاز به سیستم کنترلی و تشخیص خطا است. اما این محدودکننده‌ها به دلیل هزینه‌های بالای ساخت و نگهداری هنوز تجاری‌سازی نشده است [۱]-[۸]. محدودکننده جریان خطا بر پایه الکترونیک قدرت، به دلیل استفاده از ادوات الکترونیک قدرت و کلیدزنی دارای تلفات است. از طرفی ساخت ادوات نیمه‌هادی در ولتاژ و جریان بالا با محدودیت روبرو بوده، بنابراین، استفاده از این محدودکننده‌ها به سطح ولتاژهای پائین محدود شده است [۹-۱۵]. ساختار محدودکننده‌های ترکیبی پیچیده بوده و متشکل از تجهیزات مختلف همانند هسته آهنی، سیم‌پیچ‌های اضافی، منبع تغذیه اضافی، حسگر، مدارات تشخیص خطا است [۱۲]-[۱۵]. محدودکننده‌های دارای هسته اشباع شونده در حالت عادی به دلیل اشباع هسته دارای اندوکتانس کمی هستند و با بروز خطا، از حالت اشباع خارج شده و باعث می‌شوند اندوکتانس محدودکننده افزایش یابد. اما این محدودکننده‌ها نیز معمولاً دارای سیم‌پیچ ابررسانا بوده و شرایط نگهداری خاصی لازم دارند [۱۶]-

افزایش سطح انرژی تولیدی با نصب نیروگاه‌های جدید از یک طرف و کاهش امپدانس شبکه به دلیل گسترش تعداد خطوط و ترانسفورماتورها از طرف دیگر باعث افزایش سطح اتصال کوتاه شده است. این افزایش سطح اتصال کوتاه منجر به بروز حوادث نامطلوب در شبکه همانند اضافه ولتاژهای گذرا، ایجاد استرس‌های مکانیکی و حرارتی بر روی تجهیزات، افزایش نرخ خطا در ترانسفورماتورها، عملکرد اشتباه تجهیزات حفاظتی و ... می‌گردد. در همین راستا، بیشترین سطح اتصال کوتاه، یک عامل مهم در تعیین ابعاد و هزینه‌های تجهیزات سیستم قدرت همانند کلیدی‌های قدرت، باس‌بارها، خطوط انتقال و ترانسفورماتورها است. از این رو استفاده از محدودکننده‌های جریان خطا امری ضروری است.

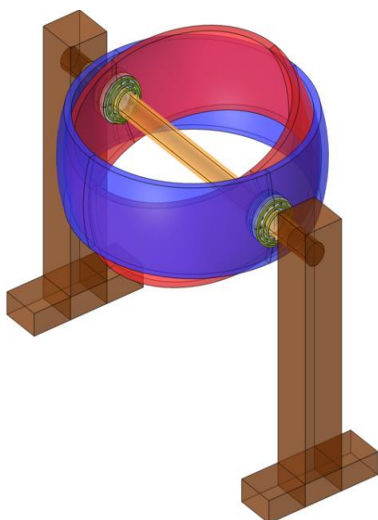
مقالات علمی متعددی به معرفی انواع محدودکننده‌های جریان خطا همانند محدودکننده‌های جریان خطای ابررسانایی، محدودکننده‌های جریان خطا بر پایه الکترونیک قدرت،

\* رایانامه نویسنده مسئول: Alidamaki@yazd.ac.ir

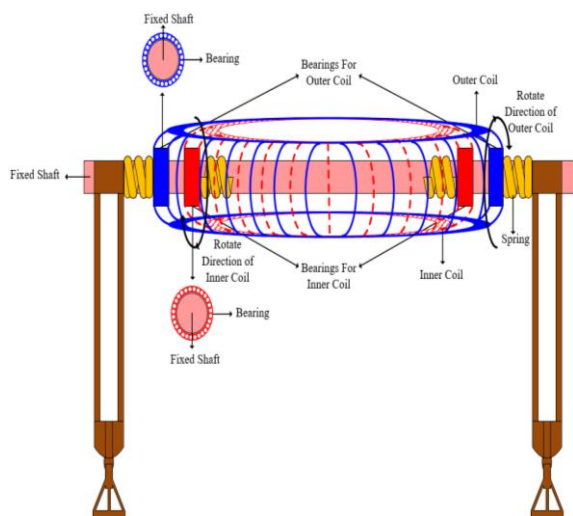
دیگر به کوئل متصل شده است. دو سیم پیچ به صورت سری به یکدیگر متصل شده است. به دلیل تغییر اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ ها در زوایای مختلف، این تجهیز همانند یک اندوکتانس متغیر رفتار می کند. جهت پیچش سیم پیچ ها در خلاف جهت یکدیگر بوده و در شرایط عادی دو سیم پیچ تقریباً باهم هم راستا هستند. در نتیجه اندوکتانس متقابل بین آنها منفی بوده و دارای بیشترین مقدار است. بنابراین مطابق با رابطه (۱) در این حالت اندوکتانس کلی محدودکننده کمترین مقدار را دارد.

$$L_{FCL} = L_{in} + L_{out} + 2M_{io} \quad (1)$$

در این رابطه  $L_{in}$ ،  $L_{out}$  و  $M_{io}$  به ترتیب اندوکتانس خودی سیم پیچ داخلی، اندوکتانس خودی سیم پیچ بیرونی و اندوکتانس متقابل بین دو سیم پیچ است.



شکل (۱). ساختار کلی محدودکننده جریان خطای پیشنهادی



شکل (۲). نمای دوبعدی محدودکننده پیشنهادی

[۲۴]. محدودکننده های الکترومغناطیسی متداول دارای هسته های آهنی بوده و پس از بروز خطا با کاهش فاصله هوایی در آنها اندوکتانس محدودکننده افزایش می یابد و جریان خطا محدود می گردد. اما این محدودکننده ها با مشکل اشباع هسته روبرو بوده و به حجم زیادی از هسته احتیاج دارند [۲۵]-[۲۶]. برای رفع این مشکل در این مقاله یک محدودکننده الکترومغناطیسی بدون هسته هوایی ارائه شده است. این محدودکننده از دو هسته هوایی داخلی و بیرونی تشکیل شده است. مهم ترین ویژگی این محدودکننده نسبت به ساختار متداول، عدم نیاز به هسته آهنی و وجود حرکت دورانی به جای حرکت خطی است. در شرایط عادی به دلیل اندوکتانس متقابل منفی بین دو سیم پیچ، محدودکننده دارای اندوکتانس مینیمم است. با بروز خطا گشتاور الکترومغناطیسی زیادی بین دو سیم پیچ ایجاد شده، زاویه بین دو سیم پیچ افزایش یافته و باعث افزایش اندوکتانس محدودکننده و کاهش جریان خطا می گردد. به طور کلی ساختار پیشنهادی دارای مزیت های مهم زیر است:

- اندازه کوچک، وزن کم، ساختار ساده
- توانایی محدودسازی جریان خطای بالا
- عملکرد خودکار و بدون نیاز به سنسور
- سرعت پاسخ قابل قبول
- بازگشت سریع، خودکار و بدون هزینه به موقعیت اولیه بعد از رفع خطا

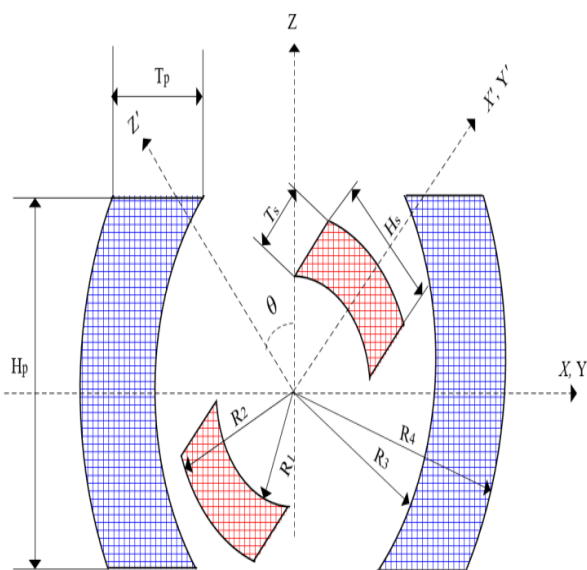
در این مقاله ابتدا به معرفی ساختار محدودکننده الکترومغناطیسی پیشنهادی و تئوری عملکرد آن پرداخته می شود، و سپس به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد محدودکننده و طراحی آن به منظور دستیابی به بهترین عملکرد پرداخته می شود. محدودکننده طراحی شده با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود شبیه سازی شده و عملکرد آن مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۲- معرفی محدودکننده پیشنهادی

طرح سه بعدی محدودکننده پیشنهادی در شکل (۱) و طرح دوبعدی آن با جزئیات بیشتر در شکل (۲) ارائه شده است. محدودکننده پیشنهادی از دو هسته هوایی هم مرکز کروی شکل که درون یکدیگر قرار گرفته است، تشکیل شده است. سیم پیچ بیرونی و درونی قابلیت چرخش داشته و می توانند نسبت به یکدیگر حرکت دورانی داشته باشند. سیم پیچ ها هر کدام توسط یک جفت بلبرینگ بر روی شفت قرار گرفته و به هر کوئل نیز یک جفت فنر جهت بازگرداندن آن به حالت اولیه متصل شده است. مطابق شکل (۲) فنرها از یک طرف به شفت و از طرف

### ۳- طراحی اولیه و روابط حاکم بر محدودکننده پیشنهادی

مشخصات هندسی محدودکننده پیشنهادی بر اساس شکل (۳) در جدول (۱) آورده شده است. پارامترهای اولیه این محدودکننده بر اساس یک رآکتور ثابت مورد استفاده در شبکه قدرت در نظر گرفته شده است. شبکه مورد مطالعه یک شبکه ۲۰ کیلوولت است که مشخصات آن در جدول (۲) ارائه شده است. محدودکننده پیشنهادی در ابتدای خط انتقال نزدیک به منبع انرژی الکتریکی همانند شکل (۴) قرار گرفته است.



شکل (۳). نمایش پارامترهای محدودکننده

دقت گردد در محدودکننده موردنظر ارتفاع و ضخامت دو سیم‌پیچ یکسان در نظر گرفته شده و پارامترهای،  $H=H_p=H_s$  و  $T=T_p=T_s$  است.

جدول (۱). مشخصات پارامترهای اولیه محدودکننده جریان خطای پیشنهادی

سیم‌پیچ بیرونی		سیم‌پیچ درونی	
قطر داخلی	۱۱۴۰ میلی‌متر	قطر داخلی	۱۰۶۰ میلی‌متر
قطر خارجی	۱۲۰۰ میلی‌متر	قطر خارجی	۱۱۲۰ میلی‌متر
ارتفاع	۴۰۰ میلی‌متر	ارتفاع	۴۰۰ میلی‌متر
تعداد دور	۲۴ دور	تعداد دور	۲۴ دور
ضخامت	۳۰ میلی‌متر	ضخامت	۳۰ میلی‌متر

با بروز اتصال کوتاه و افزایش جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها گشتاور الکترومغناطیسی زیادی بین دو سیم‌پیچ ایجاد شده و باعث می‌شود سیم‌پیچ‌ها به سرعت شروع به چرخش کرده و زاویه بین آنها افزایش یابد. علت این امر آن است که شار تولیدی دو سیم‌پیچ در خلاف جهت یکدیگر بوده و نیروی دافعه زیادی بین آنها ایجاد می‌شود (لازمه چرخش آن است که دو سیم‌پیچ در حالت اولیه مقدار کمی نسبت به هم زاویه داشته باشند). با افزایش زاویه بین دو سیم‌پیچ، اندوکتانس متقابل بین آنها کاهش یافته و به دلیل منفی بودن آن مطابق با رابطه (۱) اندوکتانس کل محدودکننده افزایش می‌یابد. در زاویه ۹۰ درجه اندوکتانس متقابل بین دو سیم‌پیچ برابر صفر گشته و بعد از عبور از زاویه ۹۰ درجه، دوباره شروع به افزایش می‌کند. اما نکته قابل توجه در زوایای بزرگ‌تر از ۹۰ درجه، مثبت‌شدن اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ به دلیل هم‌جهت شدن جهت جریان سیم‌پیچ‌ها است. بنابراین اندوکتانس کل محدودکننده همچنان در بازه ۹۰ تا ۱۸۰ درجه نیز افزایش می‌یابد و جریان خطا را محدود می‌کند. همچنین در این بازه به دلیل هم‌جهت شدن جریان سیم‌پیچ‌ها نیروی جاذبه بین دو سیم‌پیچ ایجاد می‌گردد که سعی در هم‌راستا کردن دو سیم‌پیچ داشته و باعث ادامه چرخش دو سیم‌پیچ تا زاویه ۱۸۰ درجه می‌گردد. این گشتاور هم‌راستا کننده پس از زاویه ۱۸۰ درجه به صورت گشتاور منفی ظاهر می‌شود و سعی در بازگرداندن سیم‌پیچ‌ها به زاویه ۱۸۰ درجه و متوقف کردن آنها دارد. علاوه بر این در طراحی مکانیکی، می‌توان یک دمپر به منظور متوقف کردن سریع آن در زاویه ۱۸۰ درجه در نظر گرفت.

بدین ترتیب پس از بروز خطا اندوکتانس محدودکننده به سرعت افزایش یافته و جریان خطا توسط آن محدود می‌گردد. بعد از رفع خطا، گشتاور الکترومغناطیسی دافعه و یا جاذبه از بین رفته و سیم‌پیچ‌ها توسط نیروی خارجی فنر به موقعیت اولیه خود باز می‌گردد. لازم به ذکر است برای ایجاد گشتاور دورانی در هنگام وقوع خطا لازم است دو سیم‌پیچ در شرایط عادی، اختلاف زاویه کمی نسبت به یکدیگر داشته باشند تا تقارن گشتاور از بین رفته و گشتاور منتهجه مقدار مخالف صفر پیدا نماید. در شرایط عادی، به دلیل کوچک بودن جریان عبوری از رآکتور، گشتاور تولیدی قادر به غلبه کردن بر گشتاور فنر نبوده و لذا تا لحظه وقوع خطا در موقعیت خود ثابت باقی خواهد ماند. در ادامه به منظور حصول اطمینان از عملکرد صحیح محدودکننده مورد نظر، یک طرح اولیه مطرح و با انجام آنالیز توسط روش المان محدود و روابط تحلیلی، کارکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول (۲). مشخصات شبکه مورد مطالعه

پارامتر	مقدار
منبع ولتاژ (فاز به فاز)	۲۰ کیلوولت
فرکانس	۵۰ هرتز
اندوکتانس منبع	۲/۵ میلی‌هانری
مقاومت منبع	۰/۰۳ اهم
حداکثر توان	۱۲/۵ مگاوات‌آمپر

جدول (۳). مقادیر اندوکتانس خودی و متقابل سیم‌پیچ‌ها و اندوکتانس کل محدودکننده پیشنهادی

پارامتر	مقدار (میلی هانری)
اندوکتانس خودی سیم‌پیچ درونی	۰/۷۰۲۳
اندوکتانس خودی سیم‌پیچ بیرونی	۰/۷۸۵۷
اندوکتانس متقابل در زاویه ۱۵ درجه	۰/۶۱۰۴
اندوکتانس متقابل در زاویه ۱۸۰ درجه	۰/۶۶۴۸
اندوکتانس کل در زاویه ۱۵ درجه	۰/۲۶۷
اندوکتانس کل در زاویه ۱۸۰ درجه	۲/۸

پس از بروز خطا، جریان به طور ناگهانی افزایش می‌یابد و گشتاور الکترومغناطیسی دافعه بین دو سیم‌پیچ افزایش یافته و با غلبه بر نیروی خارجی فنر، باعث افزایش زاویه بین دو سیم‌پیچ و افزایش اندوکتانس محدودکننده می‌گردد. با وقوع خطا تنها امیدانس منبع ولتاژ و محدودکننده در سیستم باقی می‌ماند. روابط مداری زیر بیانگر رفتار سیستم در شرایط خطا است.

$$V_s = R_s i + L_s \frac{di}{dt} + R_{FCL} i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (2)$$

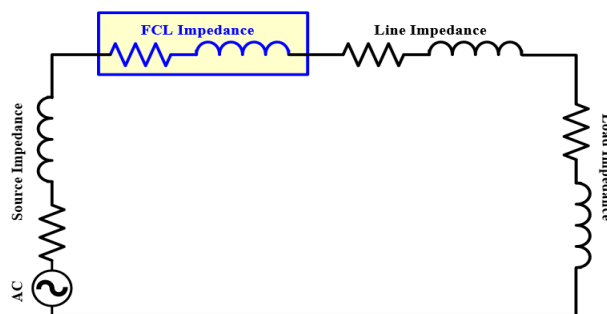
$$\lambda = L_{FCL}(\theta) \cdot i(t) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} &= L_{FCL}(\theta) \frac{di}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \frac{dL_{FCL}(\theta)}{d\theta} i \\ &= L_{FCL}(\theta) \frac{di}{dt} \\ &\quad + \Omega \frac{dL_{FCL}(\theta)}{d\theta} i \end{aligned} \quad (4)$$

$$v(\theta, i) = \Omega \frac{dL_{FCL}(\theta)}{d\theta} i = R(\theta) i \quad (5)$$

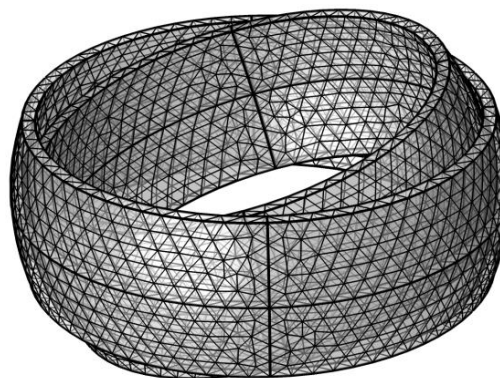
در این روابط  $V_s, L_s, R_s, \lambda, L_{FCL}, R_{FCL}, \theta, \Omega, R(\theta)$  و  $v$  به ترتیب ولتاژ منبع تغذیه (شبکه)، اندوکتانس منبع، مقاومت منبع، شار پیوندی محدودکننده، اندوکتانس محدودکننده، مقاومت محدودکننده، زاویه بین دو سیم‌پیچ، سرعت زاویه‌ای سیم‌پیچ‌های متحرک، مقاومت چرخشی و ولتاژ چرخشی القایی (منبع ولتاژ وابسته) است. مدار معادل شبکه در شرایط خطا با حضور محدودکننده پیشنهادی در شکل (۱۱) آورده شده است.

روابط بیان شده نشان می‌دهد که در محدودکننده پیشنهادی



شکل (۴). دیاگرام تک‌خطی شبکه قدرت با محدودکننده پیشنهادی

محدودکننده ارائه شده در جدول (۱) به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود شبیه‌سازی گردید. زاویه اولیه در نظر گرفته شده برای محدودکننده ۱۵ درجه در نظر گرفته شده است. در شکل (۵) نحوه مش‌بندی محدودکننده ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی اندوکتانس محدودکننده در زاویه ۱۵ درجه ۰/۲۶۷ میلی‌هانری بوده و در زاویه ۱۸۰ درجه به مقدار ۲/۸ میلی‌هانری خواهد رسید. در جدول (۳) مقادیر اندوکتانس هر کدام از سیم‌پیچ‌ها و اندوکتانس متقابل آنها ارائه شده است. به‌منظور مطالعه دقیق‌تر محدودکننده پیشنهادی، در ادامه نحوه عملکرد آن در شرایط عادی و خطا مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۵). نحوه مش‌بندی محدودکننده در نرم‌افزار اجزاء محدود

که در آن  $\Omega_o$ ,  $k$ ,  $\alpha$ ,  $I$ ,  $T_{spring}$ ,  $T_{mag}$  به ترتیب گشتاور الکترومغناطیسی، گشتاور فنر، لختی اینرسی، شتاب زاویه‌ای، ثابت فنر، سرعت زاویه‌ای اولیه و زاویه اولیه بین دو سیم‌پیچ است. قابلیت چرخش هر دو سیم‌پیچ در خلاف جهت یکدیگر، علاوه بر افزایش سرعت پاسخ محدودکننده باعث کاهش تنش‌های مکانیکی بر روی سیم‌پیچ‌ها نیز می‌گردد. بنابراین با توجه به چرخش هر دو سیم‌پیچ روابط (۱۰) تا (۱۳) به طور جداگانه برای هر دو سیم‌پیچ داخلی و خارجی در نظر گرفته می‌شود و میزان جابه‌جایی و سرعت نهایی از مجموع جابه‌جایی سیم‌پیچ داخلی و بیرونی به دست می‌آید. برای این کار بازه‌های زمانی ۱ میلی‌ثانیه برای محاسبات در نظر گرفته شده و هر بازه زمانی دارای چهار مرحله اصلی است. ابتدا اندوکتانس محدودکننده از طریق نرم‌افزار المان محدود محاسبه می‌گردد. سپس بر اساس آن جریان شبکه از رابطه (۷) به دست می‌آید. در مرحله سوم، گشتاور الکترومغناطیسی با استفاده از روش المان محدود محاسبه می‌گردد. در آخر بر اساس این گشتاور، سرعت چرخش و موقعیت جدید سیم‌پیچ‌های محدودکننده با استفاده از رابطه (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌گردد. این چهار مرحله در هر بازه زمانی تا رسیدن زاویه بین دو سیم‌پیچ به ۱۸۰ تکرار می‌گردد.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی برای شبکه تحت مطالعه و محدودکننده پیشنهادی برای خطایی در ابتدای خط انتقال، با استفاده از روش محاسباتی ذکر شده در بالا به‌ازای بازه‌های زمانی ۱ میلی‌ثانیه در جدول (۴) آورده شده است. در این جدول در هر بازه زاویه بین دو سیم‌پیچ، اندوکتانس متقابل، اندوکتانس کل، جریان عبوری از سیستم و گشتاور الکترومغناطیسی وارد بر سیم‌پیچ‌ها ارائه شده است.

جدول (۴). داده‌های عملکرد محدودکننده پیشنهادی

Time (ms)	Angle (total)	Mutual Inductance ( $\mu$ H)	Inductance (mH)	Current (kA)	Torque (kN*m)
۰	۱۵/۰۰	۶۱۰/۳۶۹	۰/۲۶۷۱۵	۰	۰
۱	۱۵/۰۰	۶۱۰/۳۶۹	۰/۲۶۷۱۵	۰/۹۱۵	۰/۳۱۳
۲	۱۵/۰۰	۶۱۰/۳۶۹	۰/۲۶۷۱۵	۳/۵۵۶	۴/۷۲۰
۳	۱۵/۰۳	۶۱۰/۱۷۹	۰/۲۶۷۵۳	۷/۶۴۱	۲۱/۳۵۶
۴	۱۵/۱۸	۶۰۹/۲۰۰	۰/۲۶۹۴۹	۱۲/۷۴۴	۵۱/۱۴۸
۵	۱۵/۶۵	۶۰۶/۰۹۳	۰/۲۷۵۷۰	۱۸/۳۳۴	۱۲۹/۲۴۴
۶	۱۶/۷۶	۵۹۸/۵۱۵	۰/۲۹۰۸۶	۲۳/۸۱۰	۲۲۷/۴۲۳
۷	۱۸/۹۷	۵۸۲/۴۶۸	۰/۳۲۲۹۵	۲۸/۵۵۰	۳۵۲/۷۶۸
۸	۲۲/۸۲	۵۵۱/۸۷۹	۰/۳۸۴۱۳	۳۱/۹۵۴	۴۸۸/۸۵۰
۹	۲۸/۸۸	۴۹۸/۵۷۸	۰/۴۹۰۷۳	۳۳/۵۱۸	۵۹۳/۰۳۳
۱۰	۳۷/۵۰	۴۱۶/۹۰۰	۰/۶۵۴۰۹	۳۲/۹۳۹	۵۹۷/۲۳۰

علاوه بر اینکه جریان خطا به دلیل افزایش اندوکتانس محدودکننده کاهش می‌یابد، عامل دیگری نیز به نام ولتاژ چرخشی در کاهش جریان مؤثر است. این ولتاژ چرخشی که در رابطه (۵) با  $v(\theta)$  نشان داده شده وابسته به سرعت چرخش است و در اثر حرکت چرخشی سیم‌پیچ‌ها القا می‌گردد.

$$|V_m| \sin(\omega t + \delta) = R_s i + L_s \frac{di}{dt} + R_{FCL} i + L_{FCL}(\theta) \frac{di}{dt} + \Omega \frac{dL_{FCL}(\theta)}{d\theta} i + \left( R_s + R_{FCL} + \Omega \frac{dL_{FCL}(\theta)}{d\theta} \right) i + (L_s + L_{FCL}(\theta)) \frac{di}{dt} = (R_s + R_{FCL} + R(\theta)) i + (L_s + L_{FCL}(\theta)) \frac{di}{dt} \quad (6)$$

$$I_{sc} = \frac{|V_m|}{|Z_{tn}|} \left[ \sin(\omega t + \delta - \varphi) - e^{-\frac{R_s + R_{FCL} + v(\theta)}{L_s + L_{FCL}(\theta)} t} \cdot \sin(\delta - \varphi) \right] \quad (7)$$

$$|Z_{tn}| = \sqrt{(R_s + R_{FCL} + R(\theta))^2 + \omega^2 (L_s + L_{FCL}(\theta))^2} \quad (8)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega(L_s + L_{FCL}(\theta))}{(R_s + R_{FCL} + R(\theta))} \quad (9)$$

با جایگذاری رابطه (۳) در (۲) رابطه (۶) حاصل می‌گردد و در نهایت جریان خطا توسط رابطه (۷) بیان می‌گردد. در این روابط  $\delta$ ,  $\varphi$ ,  $\omega$  و  $Z_{tn}$ ,  $V_m$  به ترتیب مقدار ماکزیمم ولتاژ فاز شبکه، امپدانس معادل شبکه در شرایط خطا، زاویه فاز ولتاژ شبکه، زاویه فاز امپدانس شبکه و فرکانس شبکه است. گشتاور الکترومغناطیسی ایجاد شده توسط جریان خطا قابل توجه و باعث ایجاد چرخش سیم‌پیچ‌های محدودکننده (از زاویه ۱۵ درجه تا ۱۸۰ درجه) می‌گردد. این افزایش زاویه باعث افزایش اندوکتانس کل محدودکننده و محدودسازی جریان خطا می‌گردد. به‌منظور بررسی صحیح عملکرد این محدودکننده نیاز به تحلیل الکتریکی، مغناطیسی و مکانیکی آن به‌صورت هم‌زمان است. نحوه تغییر زاویه و سرعت سیم‌پیچ‌ها در اثر گشتاور الکترومغناطیسی را می‌توان توسط روابط زیر نشان داد.

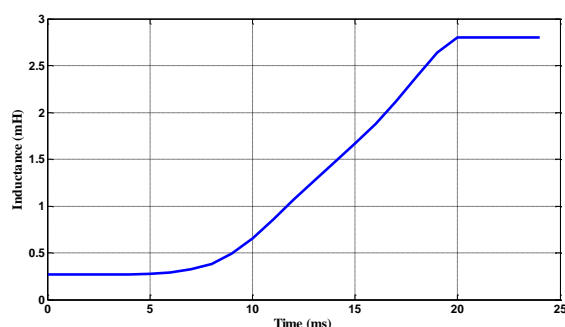
$$T_{mag} - T_{spring} = I\alpha \quad (10)$$

$$T_{spring} = k \cdot \Delta\theta \quad (11)$$

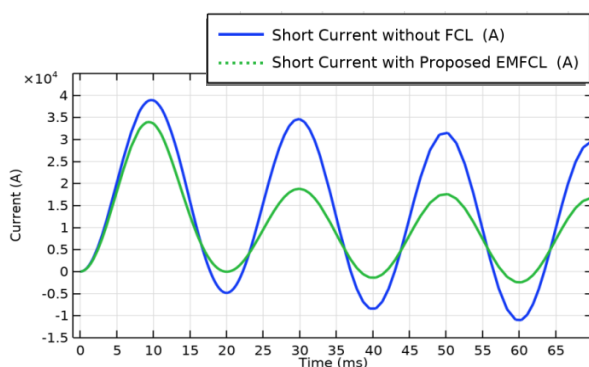
$$\Omega = \alpha t + \Omega_o \quad (12)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \alpha t^2 + \Omega t + \theta_o \quad (13)$$





شکل (۷). نمودار تغییرات اندوکتانس محدودکننده پیشنهادی در هنگام خطا



شکل (۸). نمودار جریان خطا در شبکه با و بدون محدودکننده پیشنهادی

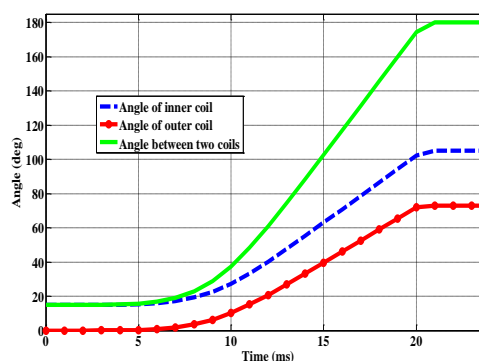
از نمودار شکل (۸) واضح است که اولین پیک جریان خطا در شبکه مورد مطالعه، با وجود محدودکننده پیشنهادی در سیستم در حدود ۱۲/۸٪ نسبت به حالت بدون محدودکننده کاهش یافته و به مقدار ۳۴ کیلوآمپر رسیده است. پیک دوم و سوم جریان نیز به ترتیب به مقدار ۴۵/۷٪ و ۴۶/۹٪ کاهش یافته و به مقادیر ۱۹ و ۱۷ کیلوآمپر رسیده است.

## ۵- بررسی تأثیر پارامترها و طراحی بهینه محدودکننده

ساختار و اصول و روابط حاکم بر عملکرد محدودکننده در بخش-های قبل توضیح داده شد. پارامترهای متعددی همانند شعاع سیم پیچ، تعداد دور سیم پیچ، ارتفاع سیم پیچ، فاصله بین هادی‌ها، فاصله بین سیم پیچ‌ها و زاویه اولیه بین دو سیم پیچ بر روی عامل اصلی محدودسازی جریان خطا، که همان اندوکتانس نهایی محدودکننده است، و سرعت عملکرد آن، تأثیرگذار است. واضح است که بعضی پارامترهای ذکر شده به یکدیگر وابسته است. به طور نمونه فاصله بین هادی‌ها بر روی شعاع سیم پیچ‌ها و ارتفاع آنها تأثیر مستقیم دارد. به منظور درک بهتر، پارامترهای مذکور بر روی محدودکننده پیشنهادی در شکل (۳) نشان داده شده است. در قسمت قبل با استفاده از روش المان محدود و روابط تحلیلی به بررسی نحوه عملکرد محدودکننده پیشنهادی با پارامترهای

Time (ms)	Angle (total)	Mutual Inductance (μH)	Inductance (mH)	Current (kA)	Torque (kN*m)
۱۱	۴۸/۴۸	۳۱۵/۱۶۹	۰/۸۵۷۵۵	۳۰/۳۰۳	۴۶۰/۲۹۶
۱۲	۶۱/۰۲	۲۱۱/۳۷۹	۱/۰۶۵۱۳	۲۶/۲۰۸	۳۰۵/۰۶۹
۱۳	۷۴/۴۶	۱۱۰/۴۵	۱/۲۶۶۹۶	۲۱/۴۱۴	۱۸۸/۶۲۱
۱۴	۸۸/۴۲	۱۱/۱۱۹	۱/۴۶۵۶۵	۱۶/۳۹۹	۱۰۷/۱۳۶
۱۵	۱۰۲/۶۳	۸۹/۵۰۱	۱/۶۶۶۹	۱۱/۵۳۳	۵۴/۰۸۵
۱۶	۱۱۶/۹۶	۱۹۵/۶۹۱	۱/۸۷۹۲	۷/۱۵۲	۲۲/۳۹۹
۱۷	۱۳۱/۳۱	۳۱۳/۳۷۱	۲/۱۱۴۶۳	۳/۵۴۴	۶/۲۸۴
۱۸	۱۴۵/۶۶	۴۴۷/۲۲۳	۲/۳۸۲۳۳۵	۰/۹۲۵	۰/۴۷۰
۱۹	۱۶۰/۰۰	۵۷۴/۵۹۱	۲/۶۳۷۰۷۱	-۰/۵۹۲	۰/۱۵۶
۲۰	۱۷۴/۳۳	۶۵۵/۹۳۹	۲/۷۹۹۸	-۱/۰۳۷	۰/۱۸۶
۲۱	۱۸۸/۶۷	۶۴۴/۹۱۲	۲/۷۷۷۷	-۰/۵۲۵	-۰/۰۶۸

از نتایج جدول (۴) مشاهده می‌گردد که محدودکننده پیشنهادی تقریباً در زمان ۲۰ میلی‌ثانیه به موقعیت نهایی خود یعنی زاویه ۱۸۰ درجه رسیده است. این زمان در حدود یک سیکل بوده و قابل قبول است. در طول این زمان اندوکتانس محدودکننده به مقدار نهایی خود یعنی ۲/۸ میلی‌هنری رسیده است. با توجه به زمان عملکرد یک کلید قدرت (بریکر) که در حدود ۳ تا ۵ سیکل است، محدودکننده جریان خطا پیشنهادی سریع‌تر از تجهیزات حفاظتی عمل می‌نماید و این خود باعث حفاظت این تجهیزات در مقابل جریان اتصال کوتاه بالا می‌گردد. علاوه بر این محدودکننده پیشنهادی از همان لحظه شروع خطا، با افزایش پیوسته اندوکتانس خود، شروع به محدودسازی جریان خطا می‌نماید به طوری که مقدار اندوکتانس محدودکننده قبل از اولین پیک جریان (۱۰ میلی‌ثانیه) حدود ۲/۵ برابر اندوکتانس اولیه می‌گردد. نمودار شکل (۶) زاویه هر سیم پیچ را پس از بروز خطا نشان داده است. زاویه اولیه سیم پیچ داخلی در ۱۵ درجه و زاویه اولیه سیم پیچ بیرونی در زاویه صفر درجه تنظیم شده است. نمودار سبزرنگ زاویه نهایی دو سیم پیچ نسبت به یکدیگر را نشان می‌دهد. نمودار شکل (۷) و (۸) به ترتیب نحوه تغییر اندوکتانس محدودکننده و جریان خطا با و بدون وجود محدودکننده در هنگام خطا را نشان می‌دهد.

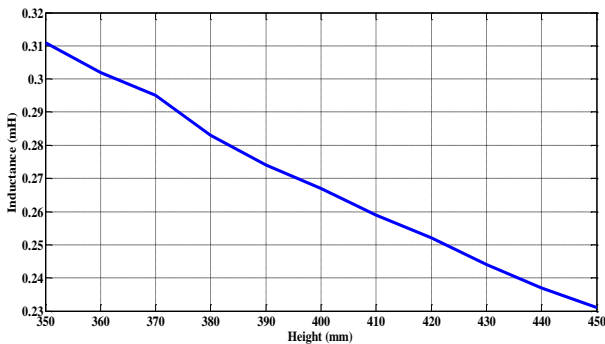


شکل (۶). نمودار تغییرات موقعیت سیم پیچ‌ها در هنگام خطا

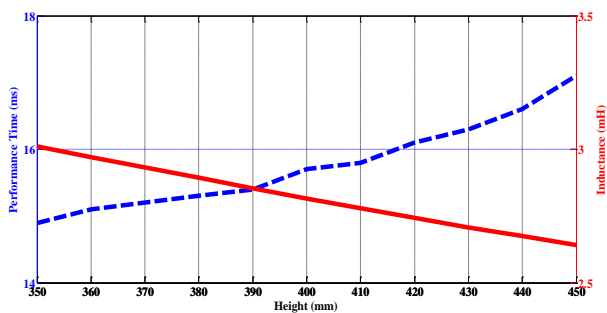
با توجه به نمودار شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌گردد، با افزایش شعاع اندوکتانس اولیه، نهایی و زمان عملکرد محدودکننده افزایش یافته است. به عبارتی دیگر با افزایش شعاع اندوکتانس محدودکننده افزایش و سرعت عملکرد آن کاهش یافته است.

### ۵-۲- تأثیر ارتفاع سیم‌پیچ‌ها

واضح است که با افزایش ارتفاع سیم‌پیچ با شعاع و تعداد دور ثابت، فاصله بین هادی‌های در راستای عمودی افزایش می‌یابد و باعث کاهش اندوکتانس سیم‌پیچ می‌گردد. از طرفی افزایش ارتفاع خود باعث کاهش گشتاور الکترومغناطیسی بین سیم‌پیچ‌های درونی و بیرونی و افزایش ممان اینرسی نیز می‌گردد. به عبارتی افزایش ارتفاع سیم‌پیچ‌ها باعث کاهش اندوکتانس محدودکننده و کاهش سرعت عملکرد محدودکننده می‌گردد. بدین منظور با تغییر ارتفاع اولیه و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها به بررسی مقادیر اندوکتانس اولیه، نهایی و سرعت پاسخ محدودکننده پرداخته شده است. این مقادیر همانند مقادیر طراحی اولیه ارائه شده در جدول (۱) است و تنها ارتفاع سیم‌پیچ‌ها در یک بازه  $\pm 50$  میلی‌متر با پله‌های ۱۰ میلی‌متری تغییر نموده است. نمودار تغییرات اندوکتانس اولیه در شکل (۱۱)، اندوکتانس نهایی و زمان عملکرد محدودکننده به طور هم‌زمان ازای تغییر ارتفاع سیم‌پیچ‌ها در شکل (۱۲) رسم شده است.



شکل (۱۱). نمودار تغییرات اندوکتانس اولیه بر حسب ارتفاع سیم‌پیچ‌ها

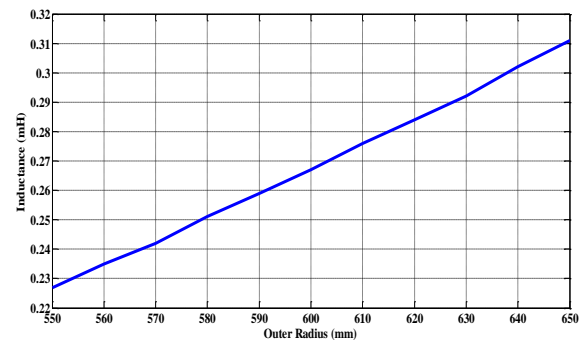


شکل (۱۲). نمودار تغییرات زمان عملکرد و اندوکتانس نهایی بر حسب ارتفاع سیم‌پیچ‌ها

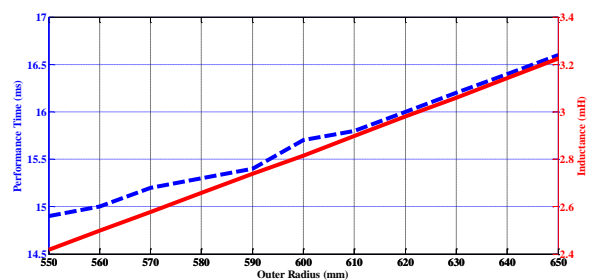
اولیه پرداخته شد. در این قسمت برای بررسی تأثیر پارامترها به طور جداگانه و هم‌زمان بر روی محدودکننده و بهبود عملکرد آن، کلیه محاسبات و شبیه‌سازی‌ها مجدداً انجام شده و نمودارها و نتایج آن ارائه گردیده است. در این نمونه مطالعاتی حداقل مقدار اندوکتانس نهایی مورد نیاز محدودکننده ۲۸ میلی‌هنری در نظر گرفته شده است.

### ۵-۱- تأثیر شعاع سیم‌پیچ‌ها

با تغییر شعاع سیم‌پیچ‌ها و ثابت نگه‌داشتن تعداد دور، اندوکتانس محدودکننده تغییر می‌کند. واضح است که با افزایش شعاع به دلیل افزایش طول هادی، مقدار اندوکتانس افزایش می‌یابد. اما از طرفی با توجه به تأثیر شعاع در مقدار اینرسی، این پارامتر بر روی سرعت عملکرد محدودکننده نیز تأثیرگذار است. بدین منظور با تغییر شعاع اولیه و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها (ارتفاع، تعداد دور، فاصله بین سیم‌پیچ‌ها، زاویه اولیه) مقادیر اندوکتانس اولیه، نهایی و سرعت پاسخ محدودکننده به دست آمده است. این مقادیر همانند مقادیر طراحی اولیه ارائه شده در جدول (۱) است و تنها شعاع سیم‌پیچ‌ها در یک بازه  $\pm 50$  میلی‌متر با پله‌های ۱۰ میلی‌متری تغییر نموده است. نمودار تغییرات اندوکتانس اولیه در شکل (۹)، اندوکتانس نهایی و زمان عملکرد محدودکننده به طور هم‌زمان در شکل (۱۰) رسم شده است. محور افقی بر حسب شعاع خارجی سیم‌پیچ بیرونی (بزرگ‌ترین شعاع) رسم شده است.

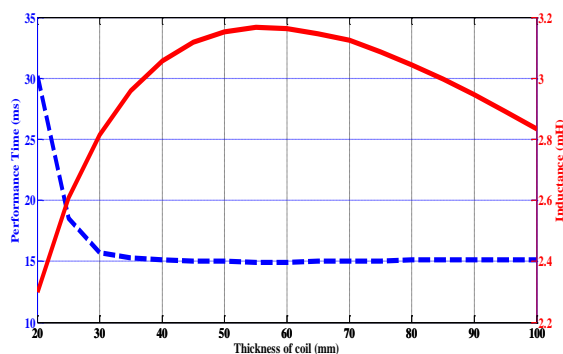


شکل (۹). نمودار تغییرات اندوکتانس اولیه بر حسب شعاع خارجی سیم‌پیچ بیرونی



شکل (۱۰). نمودار تغییرات زمان عملکرد و اندوکتانس نهایی بر حسب شعاع خارجی سیم‌پیچ بیرونی





شکل (۱۴). نمودار تغییرات زمان عملکرد و اندوکتانس نهایی با تغییر هم‌زمان ارتفاع و ضخامت سیم‌پیچ

همان‌طور که از نمودارهای ارائه شده مشاهده می‌گردد، با افزایش ارتفاع از ارتفاع اولیه سیم‌پیچ‌ها و کاهش ضخامت سیم‌پیچ‌ها، اندوکتانس محدودکننده کاهش و سرعت عملکرد آن نیز بسیار کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش ارتفاع سیم‌پیچ‌ها تأثیر منفی بر روی عملکرد محدودکننده دارد. با کاهش ارتفاع سیم‌پیچ‌ها و افزایش ضخامت آنها، اندوکتانس محدودکننده و سرعت عملکرد آن شروع به افزایش نموده و باعث بهبود عملکرد محدودکننده می‌گردد. این تأثیر مثبت تغییرات تا ارتفاع ۲۱۸ میلی‌متر در ضخامت ۵۵ ادامه داشته اما پس از آن منفی می‌گردد و علاوه بر کاهش اندوکتانس سیم‌پیچ، باعث کاهش سرعت عملکرد آن نیز می‌شود. بنابراین نقطه طراحی ارتفاع ۲۱۸ میلی‌متر در ضخامت ۵۵ میلی‌متر به‌عنوان نقطه بهینه در نظر گرفته می‌شود.

#### ۴-۵- تعیین ساختار سیم‌بندی

نشان داده شد عملکرد محدودکننده با ارتفاع و ضخامت سیم‌پیچ به ترتیب ۲۱۸ و ۵۵ میلی‌متر و شعاع خارجی سیم‌پیچ بیرونی ۶۰۰ میلی‌متر نسبت به ساختار اولیه بهبود یافته است. مشخصات این محدودکننده در جدول ۵ آورده شده است. در این قسمت به انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها در سیم‌پیچ‌های محدودکننده پرداخته شده است.

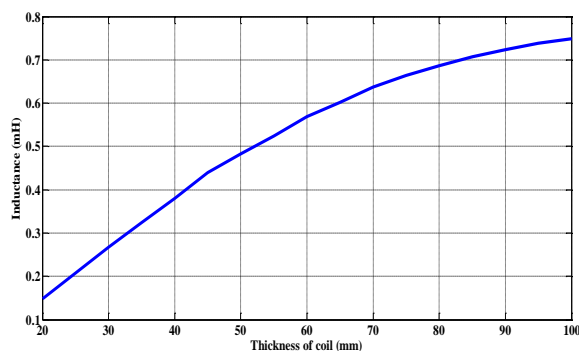
جدول (۵). مشخصات محدودکننده بهبودیافته در قسمت ۳-۵

H (mm)	T (mm)	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)
۲۱۸	۵۵	۴۸۰	۵۳۵	۵۴۵
R4 (mm)	N (turn)	Lin (uH)	Lf (mH)	t (ms)
۶۰۰	۲۴	۵۲۵	۳/۱۶۷	۱۴/۹

همان‌طور انتظار می‌رود و از نمودار شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌گردد، با کاهش ارتفاع سیم‌پیچ‌ها یا به عبارتی کاهش فاصله بین هادی‌ها، اندوکتانس اولیه، نهایی و سرعت عملکرد محدودکننده افزایش یافته است و عملکرد محدودکننده بهبود می‌یابد.

#### ۳-۵- تغییر هم‌زمان ارتفاع و ضخامت سیم‌پیچ‌ها

در این قسمت برای بهبود ساختار سیم‌پیچی، هر دو پارامتر ارتفاع و ضخامت سیم‌پیچی به طور هم‌زمان تغییر یافته و تأثیر آنها بر روی پارامترها و عملکرد محدودکننده بررسی شده است. تغییر ارتفاع و ضخامت سیم‌پیچی به عبارتی تغییر فاصله بین هادی‌ها در هر دو راستا است. با توجه به اینکه سیم‌پیچ اولیه دارای یک سطح مقطع معین است یا به عبارتی دارای حجم معین است، در این تغییرات سطح مقطع ثابت در نظر گرفته شده است. به بیان دیگر ارتفاع و ضخامت سیم‌پیچ‌ها به‌گونه‌ای تغییر داده شده است که حاصل ضرب آن دو در یکدیگر ثابت باقی‌مانده است. مقدار اولیه ارتفاع و ضخامت سیم‌پیچ به ترتیب برابر ۴۰۰ و ۳۰ میلی‌متر است که حاصل ضرب آنها برابر ۱۲۰۰ میلی‌متر می‌گردد. تغییرات ضخامت سیم‌پیچ‌ها از ۲۰ میلی‌متر شروع و با پله‌های ۵ میلی‌متری به ۱۰۰ خاتمه یافته است. با این تغییرات ارتفاع سیم‌پیچ‌ها از ۶۰۰ میلی‌متر در ضخامت ۲۰ میلی‌متری شروع و به ۱۲۰ میلی‌متر در ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر رسیده است. با توجه به افزایش زمان عملکرد محدودکننده با افزایش شعاع سیم‌پیچ‌ها و تأثیر منفی این افزایش بر روی سرعت عملکرد آن، بزرگ‌ترین شعاع خارجی سیم‌پیچ‌ها ثابت نگه داشته شده و بر اساس مقدار ضخامت سیم‌پیچ‌ها، شعاع داخلی سیم‌پیچ بیرونی و شعاع‌های سیم‌پیچ درونی تعیین شده است. نمودار تغییرات اندوکتانس اولیه در شکل (۱۳)، اندوکتانس نهایی و زمان عملکرد محدودکننده به طور هم‌زمان به‌ازای تغییر هم‌زمان ارتفاع و ضخامت سیم‌پیچ‌ها در شکل (۱۴) آورده شده است.



شکل (۱۳). نمودار تغییرات اندوکتانس اولیه با تغییر هم‌زمان ارتفاع و ضخامت سیم‌پیچ

عدد است. در این صورت مطابق با جدول (۶) با توجه به اینکه ضخامت کلی سیم‌پیچ ۵۵ میلی‌متر و ضخامت عایق آن برابر با ۱۰ میلی‌متر است، ضخامت هادی برابر با ۳۵ میلی‌متر خواهد شد. در این صورت با توجه به اینکه سطح مقطع هادی برابر با ۹۰ میلی‌متر است ارتفاع هادی‌ها برابر با ۲,۵۷ میلی‌متر خواهد شد. ارتفاع کلی سیم‌پیچ نیز با احتساب ۲۴ لایه برای آن برابر با ۳۱۲ میلی‌متر خواهد شد.

ارتفاع سیم‌پیچ‌های به دست آمده (۳۱۲ میلی‌متر) با فرض یک هادی در هر لایه و ۲۴ لایه بزرگ‌تر از ارتفاع در نظر گرفته شده برای سیم‌پیچ طبق جدول ۶ (۲۱۸ میلی‌متر) است. بنابراین این ساختار را نمی‌توان مورد استفاده قرار داد. با افزایش تعداد هادی در هر لایه به ۲ و ۳ ارتفاع سیم‌بندی‌ها مجدداً محاسبه می‌گردد. ارتفاع به دست آمده در ساختار با ۲ هادی در هر لایه برابر با ۲۱۶,۴ میلی‌متر می‌گردد که در محدوده مجاز ارتفاع داده شده در جدول ۶ (۲۱۸ میلی‌متر) است. بنابراین این ساختار را می‌توان جزء ساختارهای مجاز در نظر گرفت. ارتفاع سیم‌پیچ‌ها با ۳ هادی در هر لایه نیز به دلیل نازک شدن هادی‌ها مجدداً زیاد شده (۲۳۴ میلی‌متر) و در محدوده مجاز نیست. بنابراین تنها ساختار مجاز سیم‌بندی، سیم‌بندی با ۱۲ لایه و ۲ هادی در هر لایه است. نتایج به طور خلاصه در جدول (۷) آورده شده است.

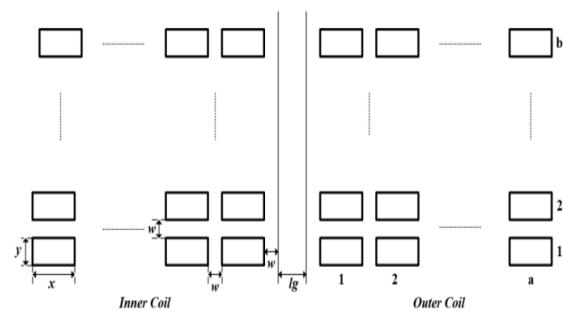
جدول (۷). مشخصات سیم‌پیچ‌های محدودکننده با تعداد لایه‌های مختلف

a	B	W (mm)	X (mm)	Y (mm)	H (mm)	Allow
۱	۲۴	۱۰	۳۵	۲/۵۷	۳۱۲	×
۲	۱۲	۱۰	۱۲/۵	۷/۲	۲۱۶	✓
۳	۸	۱۰	۵	۱۸	۲۳۴	×

#### ۵-۵- تغییر هم‌زمان شعاع، ارتفاع و تعداد دور

در قسمت‌های قبل نشان داده شد که ساختار ارائه شده در جدول (۵) با سیم‌پیچ با ۱۲ لایه و در هر لایه ۲ دور دارای عملکردی بهتر نسبت به محدودکننده طرح اولیه است. در این قسمت تأثیر مجدد پارامترهایی همچون شعاع، ارتفاع و تعداد دور سیم‌پیچ‌ها بر روی محدودکننده با مشخصات ارائه شده در جدول ۵ بررسی شده است تا بتوان به ساختار مناسب با عملکرد مطلوب دست یافت. اندوکتانس محدودکننده با مشخصات جدول ۵، برابر ۳/۱۶۷ میلی‌هنری است در صورتی که اندوکتانس مورد نیاز محدودکننده در شبکه ۲/۸ میلی‌هنری است و می‌توان مقدار کمتری برای آن در نظر گرفت. از این‌رو جهت بهبود سرعت عملکرد محدودکننده، شعاع سیم‌پیچ به‌گونه‌ای کاهش داده

شکل (۱۵) یک ساختار ساده از آرایش هادی‌ها در سیم‌پیچ‌های محدودکننده را نشان می‌دهد. در این شکل برای سهولت سطح مقطع هادی‌ها به صورت مستطیلی فرض شده است. طول و عرض هر هادی به ترتیب برابر  $x$  و  $y$  در نظر گرفته شده است. عایق الکتریکی در اطراف هر هادی از تمام جهت به ضخامت  $w$  پوشیده شده است. بین دو سیم‌پیچ درونی و بیرونی فاصله هوایی  $lg$  مفروض است. تعداد هادی‌های الکتریکی در هر لایه برابر  $a$  و تعداد لایه‌ها برابر  $b$  در نظر گرفته شده است. این هادی‌ها توسط رزین محکمی احاطه شده و استحکام مکانیکی لازم را به دست خواهند آورد.



شکل (۱۵). برش عرضی از سیم‌پیچ‌های محدودکننده پیشنهادی با فرض سطح مقطع مستطیلی

نتایج حاصله در قسمت‌های قبل نشان داد فاصله بین هادی‌ها نقش موثری در عملکرد محدودکننده پیشنهادی داشته بطوریکه افزایش آن تأثیر نامطلوب بر روی محدودکننده دارد. از این‌رو حتی‌الامکان باید این فاصله کاهش یابد. با توجه به بحث استحکام عایقی و استحکام مکانیکی حداقل ضخامت عایق اطراف هادی از تمامی وجوه ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. اشاره گردید که جریان عبوری در شرایط عادی شبکه مورد مطالعه حدود ۳۶۰ آمپر است. با فرض چگالی جریان ۴ آمپر بر مترمربع، سطح مقطع هر هادی برابر ۹۰ میلی‌مترمربع به دست می‌آید. فرضیات مذکور در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول (۶). فرضیات در نظر گرفته شده در تعیین آرایش هادی‌ها

$x \times y$	90 mm <sup>2</sup>
$a \times b = N$	24
$w$	10 mm
$T = a \times x + (a + 1) \times w$	55 mm
$H = b \times y + (b + 1) \times w$	$\leq 218$ mm

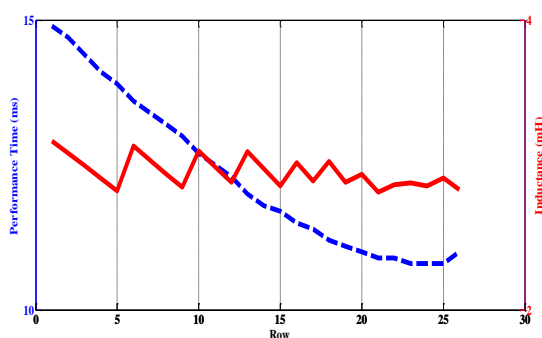
با فرضیات مطرح شده، و پارامترهای داده شده در جدول (۶)، در ادامه برای به دست آوردن نحوه سیم‌بندی، ابتدا فرض می‌گردد تعداد هادی‌ها در هر لایه برابر ۱ و تعداد لایه‌ها برابر ۲۴

حدود یک سیکل) کاهش می‌یابد. در میان ردیف‌های ۲۳، ۲۴ و ۲۵ ردیف ۲۳ به دلیل دارا بودن اندوکتانس اولیه کمتر بهترین گزینه بوده و به‌عنوان ساختار بهینه انتخاب می‌شود.

**جدول (۸).** نتایج مطلوب تغییر هم‌زمان شعاع، ارتفاع و تعداد دور محدودکننده پیشنهادی ( $T=55 \text{ mm}$  و  $lg=10 \text{ mm}$ ) بر اساس شکل

(۳)

Row	RI (mm)	N (turn)	H (mm)	Li (uH)	Lf (mH)	t (ms)
۱	۴۸۰	۲۴	۲۱۸	۵۲۵	۳/۱۶۷	۱۴/۹
۲	۴۷۰	۲۴	۲۱۸	۵۱۴	۳/۰۸۰	۱۴/۷
۳	۴۶۰	۲۴	۲۱۸	۴۹۸	۲/۹۹۴	۱۴/۴
۴	۴۵۰	۲۴	۲۱۸	۴۸۳	۲/۹۰۷	۱۴/۱
۵	۴۴۰	۲۴	۲۱۸	۴۶۸	۲/۸۲۰	۱۳/۹
۶	۴۳۰	۲۶	۲۳۴	۵۱۹	۳/۱۳۱	۱۳/۶
۷	۴۲۰	۲۶	۲۳۴	۴۸۶	۳/۰۳۴	۱۳/۴
۸	۴۱۰	۲۶	۲۳۴	۴۷۰	۲/۹۳۶	۱۳/۲
۹	۴۰۰	۲۶	۲۳۴	۴۵۵	۲/۸۴۶	۱۳/۰
۱۰	۳۹۰	۲۸	۲۵۱	۴۸۱	۳/۰۹۷	۱۲/۷
۱۱	۳۸۰	۲۸	۲۵۱	۴۶۵	۲/۹۸۹	۱۲/۵
۱۲	۳۷۰	۲۸	۲۵۱	۴۴۸	۲/۸۸۰	۱۲/۳
۱۳	۳۶۰	۳۰	۲۶۸	۴۶۸	۳/۰۹۴	۱۲/۰
۱۴	۳۵۰	۳۰	۲۶۸	۴۵۴	۲/۹۷۴	۱۱/۸
۱۵	۳۴۰	۳۰	۲۶۸	۴۳۸	۲/۸۵۶	۱۱/۷
۱۶	۳۳۰	۳۲	۲۸۶	۴۵۲	۳/۰۱۹	۱۱/۵
۱۷	۳۲۰	۳۲	۲۸۶	۴۳۶	۲/۸۸۸	۱۱/۴
۱۸	۳۱۰	۳۴	۳۰۲	۴۴۹	۳/۰۲۵	۱۱/۲
۱۹	۳۰۰	۳۴	۳۰۲	۴۳۳	۲/۸۸۳	۱۱/۱
۲۰	۲۹۰	۳۶	۳۲۰	۴۱۲	۲/۹۳۸	۱۱/۰
۲۱	۲۸۰	۳۶	۳۲۰	۴۲۵	۲/۸۱۵	۱۱/۹
۲۲	۲۷۰	۳۸	۳۳۷	۴۳۰	۲/۸۶۲	۱۰/۹
۲۳	۲۶۰	۴۰	۳۵۴	۴۳۶	۲/۸۷۸	۱۰/۸
۲۴	۲۵۰	۴۲	۳۷۱	۴۳۸	۲/۸۵۶	۱۰/۸
۲۵	۲۴۰	۴۶	۴۰۶	۴۵۲	۲/۹۰۹	۱۰/۸
۲۶	۲۳۰	۵۰	۴۴۰	۴۶۳	۲/۸۲۹	۱۱/۰



**شکل (۱۶).** نمودار تغییرات زمان عملکرد و اندوکتانس نهایی با تغییر هم‌زمان شعاع، ارتفاع و تعداد دور

می‌شود که مقدار اندوکتانس نهایی آن برابر ۲/۸ میلی‌هنری گردد. به طور مثال با کاهش شعاع خارجی سیم‌پیچ درونی به ۵۶۰ میلی‌متر و بالطبع آن سایر شعاع‌ها و ثابت ماندن سایر پارامترها، اندوکتانس محدودکننده به ۲/۸۲۰ میلی‌هنری کاهش یافته و زمان عملکرد آن نیز به دلیل کاهش ممان اینرسی به ۱۳/۹ میلی‌ثانیه کاهش می‌یابد. با کاهش بیشتر شعاع سیم‌پیچ‌ها مقدار اندوکتانس محدودکننده از مقدار مطلوب کمتر می‌شود که برای جبران آن، یک لایه سیم‌بندی به سیم‌پیچ‌های محدودکننده اضافه می‌گردد. اضافه کردن یک لایه هادی، باعث افزایش ارتفاع سیم‌پیچ به اندازه مجموع عرض هادی (V) و فاصله بین هادی‌ها (W) می‌گردد. دقت گردد هر لایه سیم‌بندی از ۲ دور هادی تشکیل شده است، که به تعداد دور سیم‌پیچ‌ها باید اضافه گردد. برای بررسی بیشتر روند تأثیر این تغییرات، شعاع سیم‌پیچ‌ها با پله‌های ۱۰ میلی‌متری کاهش و تعداد لایه‌ها افزایش داده شده است. به بیانی دیگر، مقدار کاهش شعاع و افزایش تعداد لایه‌ها به گونه‌ای است که اندوکتانس مجاز از مقدار مطلوب ۲/۸ میلی‌هنری کمتر نگردد. با توجه به نتایج حاصل از بخش ۳-۵ و ۴-۵ ضخامت بهینه سیم‌پیچ‌ها برابر ۵۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در تمامی موارد زاویه اولیه برابر ۱۵ درجه در نظر گرفته شده است و اندوکتانس اولیه، نهایی و زمان عملکرد محاسبه شده است. این روش به‌ازای تغییر شعاع با پله‌های ۱۰ میلی‌متری تا شعاع ۳۵۰ میلی‌متری انجام شده است. در این حالت تعداد دور و ارتفاع نیز برای جبران اندوکتانس به ترتیب به ۵۰ دور و ۴۴۰ میلی‌متر افزایش داده شده است. زمان عملکرد و اندوکتانس محدودکننده نیز به ترتیب به مقدار ۱۱ میلی‌ثانیه و ۲/۸۲۹ میلی‌هنری رسیده است. امکان افزایش بیش از یک لایه سیم‌بندی نیز وجود دارد. درست است که افزایش بیش از یک لایه در سیم‌پیچ‌های محدودکننده باعث افزایش اندوکتانس آن می‌گردد و مقدار اندوکتانس به بیش از مقدار مطلوب نیز افزایش می‌یابد اما در بسیاری موارد نه تنها تأثیر مثبت در سرعت عملکرد محدودکننده ندارد بلکه باعث کاهش سرعت نیز می‌شود. علاوه بر این، این کار باعث افزایش اندوکتانس اولیه نیز می‌گردد که مطلوب نیست.

نتایج این شبیه‌سازی‌ها در جدول (۸) ارائه شده است. نمودار تغییرات زمان عملکرد و اندوکتانس نهایی نیز به طور هم‌زمان در نمودار شکل (۱۶) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش شعاع و افزایش مطلوب تعداد لایه‌ها، زمان عملکرد محدودکننده شروع به کاهش تا مقدار ۱۰/۸ میلی‌ثانیه در ردیف‌های ۲۳، ۲۴ و ۲۵ نموده است. اما با کاهش بیشتر شعاع در ردیف ۲۶ سرعت عملکرد کاهش یافته است. به طور خلاصه می‌توان گفت با کاهش مطلوب شعاع و افزایش مطلوب تعداد لایه‌ها، زمان عملکرد محدودکننده تا مقدار ۱۰/۸ میلی‌ثانیه (در

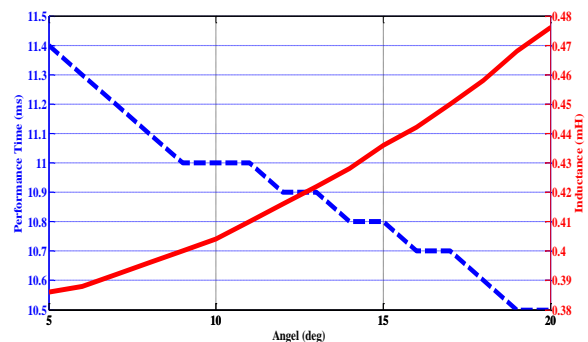
## ۵-۶- تأثیر زاویه اولیه

قابلیت بازگشت سریع و آسان به حالت اولیه پس از رفع خطا از مزیت‌های این محدودکننده است. نشان داده شد، در شرایط عادی اندوکتانس محدودکننده کم و با رخ دادن خطا، اندوکتانس محدودکننده خیلی سریع تا مقدار مطلوب افزایش یافته و باعث محدود کردن جریان خطا می‌گردد. زمان عملکرد طرح اولیه در حدود یک سیکل (۲۰ میلی‌ثانیه) بود. جهت بهبود عملکرد محدودکننده و طراحی بهینه آن تأثیر پارامترهای مختلف بر روی محدودکننده بررسی و نشان داده شد که کاهش شعاع و ارتفاع سیم‌پیچ‌ها باعث افزایش سرعت عملکرد آن می‌گردد. با تغییر هم‌زمان ارتفاع و ضخامت سیم‌پیچ‌ها، عملکرد محدودکننده بررسی و ضخامت و ارتفاع مناسبی برای محدودکننده انتخاب شد. همچنین با انتخاب تعداد لایه مناسب در هر سیم‌پیچ، مجدداً شعاع، ارتفاع و تعداد دور به طور هم‌زمان تغییر داده شد و با انتخاب مقادیر مناسب برای این پارامترها بهترین عملکرد محدودکننده حاصل گردید. در طراحی انجام شده ضمن دستیابی به اندوکتانس نهایی مورد انتظار، زمان عملکرد آن به حدود نیم سیکل (۱۰ میلی‌ثانیه) رسید. در انتها نیز تأثیر زاویه اولیه محدودکننده در مقدار اندوکتانس اولیه و سرعت عملکرد بررسی گردید و مقدار مناسبی برای آن انتخاب شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود و تحلیلی نشان داد محدودکننده طراحی شده عملکرد بسیار مناسبی داشته و قادر است در مدت‌زمان کوتاهی جریان خطا را محدود نماید.

## ۷- مراجع

- [1] D. Sharma, K. B. Sahay, "Basic Concepts of Superconducting Fault Current Limiter," in IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), India, July, 2016.
- [2] B. V. Vaishnavi, R. S. A. Sujji, D. P. Trivenishree, N. Nidha, G. J. Sowmya, "Superconducting Fault Current Limiter & Its Application," International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 7, no. 5, May, 2016.
- [3] V. V. Rao, and S. Kar, "Superconducting Fault Current Limiters-A Review," Indian Journal of Cryogenics, vol. 36, No. 1, pp. 14-25, Jan. 2011.
- [4] M. Young, W. Hassenzahl, "Superconducting Fault Current Limiters: Technology Watch 2009," Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, 2009.
- [5] L. Ye, and A. Campbell, "Behavior Investigation of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol. 16, no. 2, pp. 662-665, 2006.
- [6] S. S. Kalsi, and A. Malozemoff, "HTS Fault Current Limiter Concept," in IEEE Power Engineering Society General Meeting, USA, June 2004.
- [7] H. P. Kraemer, A. Bauer, M. Frank, P. V. Hasselt, P. Kummeth, M. Wohlfart, Ch. Schacherer, T. Arndt, Th. Janetschek, "ASSiST-a Superconducting Fault Current Limiter in a Public Electric Power Grid,"

یکی دیگر از پارامترهای مهم در طراحی محدودکننده، زاویه اولیه بین دو سیم‌پیچ است. زاویه اولیه علاوه بر تأثیر بر اندوکتانس اولیه محدودکننده بر سرعت عملکرد آن نیز تأثیرگذار است. با افزایش زاویه اولیه اندوکتانس متقابل بین دو سیم‌پیچ کاهش یافته و با توجه به علامت منفی آن در زوایای بین ۰ تا ۹۰ درجه، باعث افزایش اندوکتانس اولیه می‌گردد. برای بررسی زاویه اولیه بر روی سرعت عملکرد، زاویه اولیه محدودکننده ردیف ۲۳ جدول (۸) که به عنوان محدودکننده بهینه در نظر گرفته شده است تغییر داده شده و اندوکتانس اولیه و سرعت عملکرد محدودکننده محاسبه شده است. نمودارهای شکل (۱۷) تغییرات اندوکتانس اولیه و زمان عملکرد محدودکننده را به طور هم‌زمان بر حسب زاویه اولیه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۷). نمایش تغییرات اندوکتانس اولیه و زمان عملکرد

محدودکننده به طور هم‌زمان بر حسب زاویه اولیه

با توجه به نتایج حاصله واضح است که با افزایش زاویه اولیه، اندوکتانس اولیه باعث افزایش افت ولتاژ در شرایط عادی بر روی محدودکننده می‌گردد و از طرفی کاهش زاویه اولیه باعث افزایش زمان عملکرد محدودکننده در شرایط خطا می‌گردد. بنابراین بسته به میزان اهمیت هر کدام از این پارامترها از نظر بهره‌بردار شبکه می‌توان زاویه اولیه محدودکننده را انتخاب نمود. به طور مثال چنانچه زمان ۱۱ میلی‌ثانیه زمان مطلوب عملکرد محدودکننده در نظر گرفته شود، می‌توان زاویه اولیه را بر روی ۹ درجه تنظیم نمود. در این صورت اندوکتانس اولیه برابر ۰/۴ میلی‌هنری می‌گردد که مقدار قابل قبولی است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک محدودکننده جریان خطای الکترومغناطیسی نوین با هسته هوایی معرفی گردید. ساختار ساده، هزینه ساخت و نگهداری کم، عدم نیاز به هسته فرومغناطیسی و سیستم تشخیص خطا، عملکرد اتوماتیک، عدم تولید هارمونیک و نویز و

- [18] Hoshino T, Muta I, Nakamura T, Salim KM, Yamada M. "Non-inductive variable reactor design and computer simulation of rectifier type superconducting fault current limiter," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol.15 no.2, pp. 2063–2066, June. 2005.
- [19] S. H. Lim, H. G. Kang, H. S. Choi, S. R. Lee, and B. S. Han, "Current Limiting Characteristics of Flux-Lock Type High-TC Superconducting Fault Current Limiter with Control Circuit for Magnetic Field," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp. 2056-2059, June 2003.
- [20] M. Eladawy, I. A. Metwally, "A novel five-leg design for performance improvement of three-phase presaturated core fault-current limiter," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 7, pp. 1-10, July 2018.
- [21] H. He, Y. Wu, Z. Yang, P. Zhao, X. Zhu, C. Niu, and M. Rong, "Study of liquid metal fault current limiter for medium-voltage DC power systems," IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 8, no. 8, pp.1391–400, Aug. 2018.
- [22] A. Pellicchia, D. Klaus, G. Masullo, R. Marabotto, A. Morandi, M. Fabbri, C. Goodhand, and J. Helm, "Development of a saturated core fault current limiter with open magnetic cores and magnesium diboride saturating coils," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 27, no. 4, pp.1–7. June 2017.
- [23] J. Yuan, H. Zhou, Y. Zhong, P. Gan, Y. Gao, K. Muramatsu, Z. Du, and B. Chen, "Performance investigation on DCSFCL considering different magnetic materials," AIP Advances, vol. 8, no.5, December 2017.
- [24] P. A. Commins, J. W. Moscrop, "Analytical nonlinear reluctance model of a single phase saturated core fault current limiter," IEEE Transactions Power Delivery, vol. 28, no. 1, pp. 450-457, January 2013.
- [25] A. Damaki Aliabad, and S. Hajhoseini Zarchi, "Optimal design and analysis of a variable reactor fault current limiter," IET Electric Power Applications, vol. 11, pp. 1-8, July 2017.
- [26] E. S. Ibrahim, "Electromagnetic Fault Current Limiter," Electric Power System Research, pp. 189-194, 1997.
- Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 1, pp. 612-618, February 2022.
- [8] W. Song, X. Pei, J. Xi, and X. Zeng, "A novel helical superconducting fault current limiter for electric propulsion aircraft," Transactions on Transportation Electrification, vol. 7, no. 1, pp.276-286, March 2021.
- [9] C. A. Ordóñez, A. G. Expósito, J. M. M. Ortega, "Series Compensation of Transmission Systems: A Literature Survey," MDPI Energies Journal, vol. 14, no. 6, March. 2021.
- [10] D. Philpott, L. Qi, "Solid-State Fault Current Limiters for Residential Houses and Commercial Buildings," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 4, pp. 3431-3436, Jul-Aug. 2019.
- [11] A. Abramovitz, and K. M. Smedley, "Survey of Solid-State Fault Current Limiters," IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 27, no. 6, pp. 2770-2782, June 2012.
- [12] M. M. R. Ahmed, G. A. Putrus, L. Ran, and L. Xiao, "Harmonic analysis and improvement of a new solid-state fault current limiter," IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 40, no. 4, July-August 2004.
- [13] T. Ueda, M. Morita, H. Arita, J. Kida, Y. Kurosawa, T. Yamagiwa, "Solid State Current Limiter for Power Distribution System," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 4, pp. 1796-1801, October 1993.
- [14] A. M. A. Ibrahim, I. Hamdan, S. F. Al-Ghatani, H. S. Hussein, L. S. Nasrat, and M. A. Ismaeil, "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, September 2021.
- [15] R. Wang, Y. Chen, J. Chen, L. Liang, L. Peng, "Plug-in Gate-loop Compensators for Series-connected IGBT Drivers in a Solid-state Fault Current Limiter," CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 8, no. 1, January 2022.
- [16] Y. Zhong, Y. Xie, Y. Liu, H. Ye, J. Yuan, H. Zhou, and L. Wei, "A Novel Multi-Function Saturated-Core Fault Current Limiter," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55, no. 6, June 2019.
- [17] L. Jiang, JX. Jin, XY. Chen, "Fully Controlled Hybrid Bridge Type Superconducting Fault Current Limiter," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol. 24, no. 5, Oct. 2014.