

An Improved Non-Overlapping Reluctance Resolver Under Eccentricity Faults

Davood Karamalian^{1,2}, *PhD Student*, Behrooz Majidi^{1,2}, *Assistant Professor*, Mohammad Reza Moradian^{1,2}, *Assistant Professor*, Khoshnam Shojaee^{1,3}, *Associate Professor*, S. M.Mehdi Mirtalaei^{1,2}, *Assistant Professor*

¹ Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

² Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

³ Digital Processing and Machine Vision Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract:

In this article, an improved model of reluctance resolvers for accurate angular position detection in the presence of static, dynamic and mixed eccentricity faults is presented. In order to improve the accuracy of the resolver, first, a reference non-overlapping reluctance resolver is introduced and simulated. Various types of eccentricity faults are then implemented mathematically in the Maxwell software. The resolver's performance under different eccentricity faults is simulated, and the fault with the greatest impact on the accuracy is selected. Next, proposed resolver's tooth dimensions are parametrically defined using parameters α and β , and sensitivity analysis is performed using FEM. The optimal values of these two parameters are obtained by comparing the simulations' results. Subsequently, the resolver with optimized dimensions is presented, and its performance is evaluated in the absence of the faults. The output characteristics of this resolver confirm its performance accuracy under normal conditions. Furthermore, the resolver is simulated under different eccentricity faults, and more precise performance is validated as well. Due to the same size and excitation for both conventional and proposed models, this model can replace the conventional ones in all industries.

Keywords: Reluctance resolvers, Eccentricity faults, Non-overlapping, Finite element method

Received: 14 June 2024

Revised: 14 July 2024

Accepted: 4 September 2024

Corresponding Author: Dr. Behrooz Majidi, bmx@aut.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1126568>



ریزولور بدون همپوشانی رلوکتانسی بهبود یافته در حضور خطاهای نامحوری

داوود کرملیان^۱، دانشجوی دکتری، سید بهروز مجیدی^۲، استادیار، محمدرضا مرادیان^۳، استادیار، خوشنام شجاعی ارانی^۳، دانشیار، محمد مهدی میرطلایی^۳، استادیار

- ۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
- ۲- مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
- ۳- مرکز تحقیقات پردازش دیجیتال و بینایی ماشین، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

چکیده: در این مقاله، مدل بهبود یافته‌ای از ریزولورهای رلوکتانسی تشخیص موقعیت زاویه‌ای با دقت بالا در شرایط نامحوری ارائه شده است. در ریزولور پیشنهادی، ابعاد استاتور به گونه‌ای طراحی و بهینه‌سازی شده است که خطای نامحوری تاثیر کمتری در دقت خروجی داشته باشد. به این منظور، ابتدا یک ریزولور رلوکتانسی متعارف با سیم‌پیچی بدون همپوشانی معرفی و شبیه‌سازی می‌شود. سپس انواع مختلف خطاهای نامحوری به منظور پیاده‌سازی در نرم‌افزار مکسول فرمول‌بندی و معرفی می‌شوند. عملکرد ریزولور تحت خطاهای نامحوری با درجه‌های مختلف، شبیه‌سازی و از بین تمامی آنها، خطایی که بیشترین تاثیر را در دقت ریزولور دارد شناسایی می‌شود. به منظور بهبود عملکرد و دقت حسگر پیشنهادی، اندازه‌ی دندان‌ها با معرفی دو پارامتر α و β و با استفاده از آنالیز حساسیت در نرم‌افزار مکسول شبیه‌سازی می‌گردد. با مقایسه‌ی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده توسط روش اجزای محدود، مقدار بهینه‌ی این دو پارامتر بدست آمده و عملکرد ریزولور با ابعاد بهینه شده در حضور و عدم حضور خطای نامحوری بررسی می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های این ریزولور، صحت عملکرد و دقت بالاتر آن را در شرایط نرمال و خطای نامحوری نسبت به نوع متعارف تایید می‌کند. به دلیل استفاده از ابعاد فیزیکی و تحریک الکتریکی یکسان در ریزولور پیشنهادی و متداول، این ریزولور قابل جایگزین با مدل متداول در صنایع مختلف است.

واژه های کلیدی: ریزولور رلوکتانسی، خطای نامحوری، ساختار بدون همپوشانی، روش اجزای محدود

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۴

نویسنده مسئول: دکتر سید بهروز مجیدی، bmx@aut.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1126568>





در دوران گذار به انرژی سبز و افزایش سهم انرژی‌های سبز در کل مصرف برق کشور، یکی از محورهای مهم برای مطالعه، الکتریکی کردن^۱ و افزایش کارایی تجهیزات و ادوات الکتریکی است [۱]. در این راستا، خودروهای برقی و اتوماسیون‌های صنعتی نقش مهمی را ایفا می‌کنند [۲]. در هر سیستم مکانیزه شده، از جمله خودروهای برقی و اتوماسیون‌های صنعتی، تشخیص و کنترل خروجی زاویه‌ای روتور در موتورهای الکتریکی از مهم‌ترین عوامل است. به منظور تشخیص موقعیت مکانی، می‌توان از انکدرها و ریزولورها^۲ استفاده کرد. انکدرها در صنایع کم تنش عملکرد مناسبی دارند، با این حال دقت این سنسورها در شرایط دمایی بالا/پایین، ارتعاش و اختلالات الکترومغناطیسی بسیار کاهش می‌یابد [۳]. در مقابل، ریزولورها دارای قابلیت اعتماد بالاتر و دقت بالاتر در شرایط پرتنش هستند. ریزولورها در مقایسه با انکدرها از مزایای دیگری نیز بهره می‌برند. نخستین مزیت ریزولورها قابلیت نصب بر روی شفت موتورهای الکتریکی بدون نیاز به فضای اضافه می‌باشد. ریزولورها دارای ضخامت کمتر نسبت به انکدرها می‌باشند و بر روی شفت موتور به راحتی نصب می‌شوند. مزیت دوم ریزولورها، ساختار ساده‌ی آن‌ها است. ریزولورها از سه سیم پیچ و هسته‌ی مغناطیسی تشکیل شده‌اند و اصول عملکرد ساده‌تری دارند. مزیت دیگر ریزولورها که آن‌ها را در صنایع محبوب کرده است، امکان ساخت سنسور مطلق بدون افزایش هزینه‌ی ساخت می‌باشد [۴]. در میان انواع ریزولورهای متداول در صنعت، ریزولورهای رلکتانسی دقت بالاتر، پروسه‌ی ساخت ساده‌تر و قیمت ارزان‌تر دارند. این مزایا به دلیل عدم وجود سیم پیچی تحریک در روتور و در نتیجه عدم نیاز به استفاده از کموتواتور^۳ و ترانسفورمر چرخنده در این ساختار می‌باشد [۵، ۶]. ریزولورهای رلکتانسی به دو دسته‌ی شار فاصله هوایی سینوسی و روتور سینوسی تقسیم‌بندی می‌شوند. در مدل شار فاصله هوایی متغیر، به دلیل الزام استفاده از تعداد دور سیم پیچی متناسب با ضریب سینوسی، دقت خروجی به شدت کاهش می‌یابد. در مقابل، ریزولورهای روتور سینوسی دارای دقت بالاتر می‌باشند. به منظور افزایش دقت، انواع مختلف بهینه‌سازی اندازه و شکل روتور در مقالات مختلف انجام گرفته است [۷، ۸]. یکی از مشکلات و عوامل محدود کننده‌ی این سنسورها فضای ناکافی برای جایگذاری سیم پیچ‌ها در یک شیار استاتور است. این فضای ناکافی و ضریب پرتندی بالای شیارهای استاتور پروسه‌ی سیم پیچی را دشوار کرده و احتمال آسیب دیدگی سیم‌ها را در حین ساخت افزایش می‌دهد. برای حل این مشکل مدل ریزولور بدون همپوشانی ارائه شد [۶]. در این مدل از ریزولورها هر شیار استاتور مختص به یک کویل بوده و مشکل فضای ناکافی حل می‌گردد. مدل تعمیم یافته‌ی این ریزولور در [۹] ارائه شده است.

همانگونه که گفته شد، ریزولورها در شرایط پرتنش و ارتعاش کاربرد صنعتی دارند و در نتیجه دقت این حسگرها در حضور خطاهای مختلف و متداول موضوع بسیاری از مطالعات بوده است [۱۰-۱۲]. انواع مختلف خطا و نحوه‌ی تشخیص آن‌ها در مقالات [۱۳، ۱۴] بررسی شده‌اند. در میان این خطاها، خطاهای نامحوری^۵ از متداول‌ترین و حائز اهمیت‌ترین انواع خطا می‌باشند [۱۵]. به منظور بهبود دقت عملکرد حسگر در حضور این نوع خطا، ساختارهای دیسکی^۶ و شارمحوری^۷ برای تعدیل شرایط معرفی شده‌اند [۱۶-۱۸]. شایان ذکر است که هر دو مدل ارائه شده نیاز به تغییر ساختار کلی و پیچیدگی‌های ساخت دارند. با این حال در پیشینه‌ی این موضوع، تحقیقات چندانی در مورد امکان کاهش تاثیر خطاهای نامحوری در خروجی ریزولورهای بدون همپوشانی با ثابت نگه داشتن اصول عملکرد و ساختار کلی آن انجام نگرفته است.

در این مقاله، جهت بهبود عملکرد ریزولورهای رلکتانسی بدون همپوشانی در حضور خطاهای نامحوری، مدل جدیدی از ابعاد استاتور و شیارهای روتور با حفظ ساختار کلی این ریزولورها معرفی شده است. به این منظور، ابتدا اصول عملکرد ریزولورهای بدون همپوشانی بررسی و مدل مرجع این حسگر شبیه‌سازی و خروجی‌های آن با مرجع [۵] مقایسه می‌گردد. سپس، انواع مختلف خطاهای نامحوری معرفی و نحوه‌ی شبیه‌سازی آن‌ها در نرم افزار مکسول بررسی و فرمول بندی شده است. با استفاده از امکان آنالیز حساسیت^۸ در نرم افزار انسیس مکسول، اندازه‌ی شیارهای استاتور با ابعاد مختلف شبیه‌سازی شده و میزان خطای ریزولور با اندازه‌های جدید در حضور خطاهای نامحوری با شدت‌های مختلف بررسی و بر اساس یافته‌های شبیه‌سازی، مدل جدید و بهینه معرفی می‌گردد. در انتها خروجی‌های ریزولور بهینه‌ی پیشنهادی با ریزولور مرجع مقایسه و میزان بهبود عملکرد آن در هر دو شرایط وجود و عدم وجود خطا ارزیابی می‌گردد.



۲- ریزولور رلوکتانسی بدون همپوشانی متداول

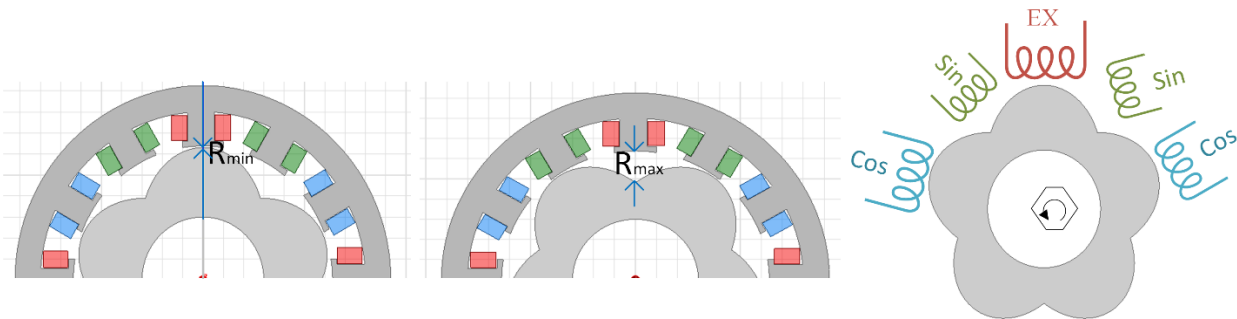
شکل (۱) ریزولور رلوکتانسی بدون همپوشانی متداول را نشان می‌دهد این ریزولور دارای ۱۲ شیار استاتور و ۵ قطب روتور است. این ریزولورها دارای سه سیم پیچ می‌باشند. سیم پیچ تحریک وظیفه‌ی ایجاد شار فاصله هوایی دارد و دو سیم پیچ سیگنال وظیفه‌ی ایجاد سیگنال خروجی جهت تشخیص زاویه‌ی روتور را دارند. شکل سینوسی روتور باعث ایجاد شار فاصله هوایی رلوکتانسی متغیر^۱ می‌شود و در سیم پیچ‌های سیگنال القای ولتاژ صورت می‌پذیرد. با گردش روتور، رلوکتانس‌های R_{min} و R_{max} بوجود می‌آیند. اختلاف فاز مکانی ۹۰ درجه‌ای سیم پیچ‌های سیگنال منجر به القاگیری سینوسی و کسینوسی از شار فاصله هوایی می‌گردد. این دو خروجی سپس بوسیله‌ی مبدل تبدیل سیگنال ریزولور به مقدار دیجیتال^۲ تحلیل و خروجی زاویه‌ای بدست می‌آید. در سیم پیچ تحریک، ولتاژ ورودی به صورت (۱) اعمال شده و در خروجی مقادیر ولتاژ سیگنال مطابق (۲) و (۳) القاء می‌شود.

$$V_{Ex} = V_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

$$V_{cos} = AN_s \omega_m \cos(P\theta) \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

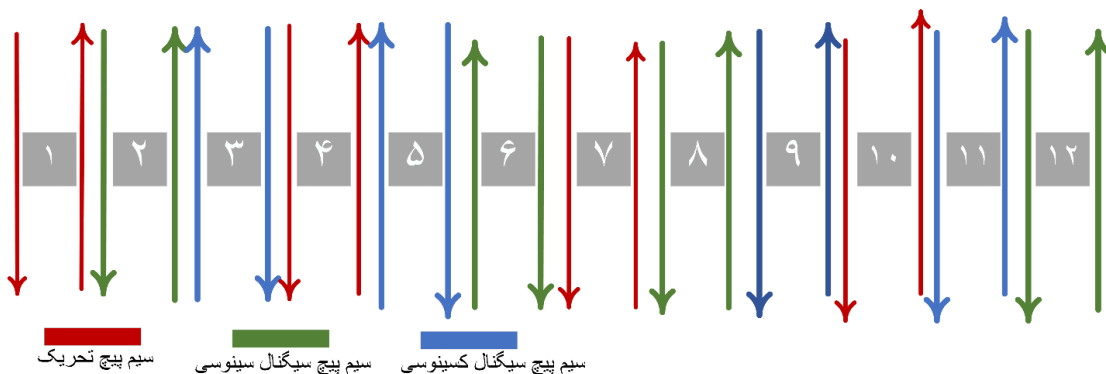
$$V_{sin} = AN_s \omega_m \sin(P\theta) \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

در این روابط، V_m معرف حداکثر ولتاژ سیم پیچ تحریک، A شار فاصله هوایی بوجود آمده توسط سیم پیچ تحریک، N_s تعداد دور سیم پیچ‌های سیگنال و θ زاویه‌ی مکانیکی روتور است.



شکل (۱): عملکرد ریزولور رلوکتانسی بدون همپوشانی در دو وضعیت روتور

در این ریزولورها، فرکانس تحریک بین ۴ تا ۱۰ کیلوهرتز می‌باشد. نحوه‌ی سیم‌بندی این ریزولورها باید به گونه‌ای باشد که شار فاصله هوایی هر چهار شیار تحریک به یک جهت باشد و همچنین سیم پیچ‌های سیگنال دو شکل موج سینوسی و کسینوسی با تعامد در خروجی ایجاد نمایند. شکل (۲) نشان‌دهنده‌ی نحوه و جهت سیم‌پیچی این ریزولور می‌باشد.



شکل (۲): سیم‌بندی قطب‌های تحریک و سیگنال





۲-۱- معرفی و شبیه‌سازی ریزولور مرجع

مراجع [۵,۶] ریزولور پیشنهادی با ابعاد مطابق جدول (۱) را معرفی و شبیه‌سازی کرده‌اند. به منظور امکان مقایسه بین خروجی‌های مدل پیشنهادی و مرجع، این اندازه‌ها در ریزولور پیشنهادی نیز اعمال می‌شود.

جدول (۱): اندازه‌های ریزولور پیشنهادی و مرجع

اندازه	پارامتر روتور	اندازه	پارامتر استاتور
۲۵/۴ میلی‌متر	حداکثر قطر روتور	۳۷ میلی‌متر	قطر خارجی استاتور
۲۴ میلی‌متر	حداقل قطر روتور	۲۶ میلی‌متر	قطر داخلی استاتور
۱۲ میلی‌متر	قطر شفت	۲/۵ میلی‌متر	اندازه ی یوغ هسته
۱۸ میلی‌متر	عمق هسته	۱۲/۵ قطب	تعداد قطب استاتور/استاتور

با توجه به اینکه در نرم‌افزار مکسول از روش اجزای محدود برای حل معادلات ولتاژحاکم بر استاتور و روتور استفاده می‌شود، اندازه‌ی مش‌بندی در نرم‌افزار عامل مهمی در کیفیت خروجی است. هرچند با افزایش دقت مش‌بندی، دقت خروجی نیز افزایش می‌یابد ولی افزایش بیش از حد آن نیز، زمان شبیه‌سازی را به شدت افزایش می‌دهد. پارامترهای اصلی تحریک سیستم و میزان مناسب حداکثر مش در جدول (۲) مشاهده می‌شود. عامل دیگر تاثیرگذار در خروجی نحوه‌ی تحریک سیم‌پیچی، تعداد دور و تحلیل گر زمانی نرم‌افزار می‌باشد. در این شبیه‌سازی از روش تحلیلگر رانگ کوتای مرتبه دوم^۱ استفاده شده‌است که نتایج دقیق‌تری در شبیه‌سازی دو بعدی دارد [۱۹].

جدول (۲): پارامترهای اصلی تحریک سیستم و مش‌بندی

اندازه	پارامتر	اندازه	پارامترهای تحریک
۱.۷۵	اندازه‌ی حداکثر مش	۱۰ کیلو هرتز	فرکانس تحریک
۰/۰۰۱ میلی ثانیه	گام زمانی تحلیل	۵ ولت	ولتاژ سیگنال تحریک
RKM(Transient)	روش تحلیل	۷۵ دور	تعداد دور سیم پیچ تحریک
۲۳ دقیقه	مدت زمان شبیه‌سازی	۱۴۰ دور	تعداد دور سیم پیچ سیگنال

۲-۲- خروجی‌های ریزولور مرجع

به منظور بدست آوردن موقعیت زاویه‌ای روتور در مدل ارایه شده، ابتدا ریزولور با اطلاعات موجود در جدول‌های (۱) و (۲) شبیه‌سازی می‌شود. سپس خروجی‌های سیگنال بر اساس موقعیت زاویه‌ای روتور و یا زمان بدست آمده و این اطلاعات به صورت عددی به نرم‌افزار متلب ارسال می‌شوند. در نرم‌افزار متلب، با استفاده از تابع بسته‌گیری از این مقادیر، تابع سینوسی و کسینوسی متناظر مطابق (۴) و (۵) بدست آمده و با تقسیم این مقادیر و استفاده از تابع معکوس تانژانت می‌توان موقعیت زاویه‌ای روتور را با (۶) تشخیص داد.

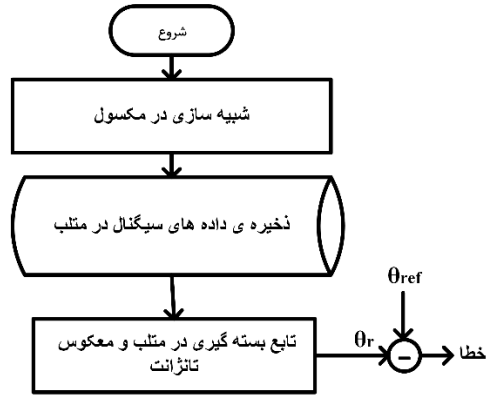
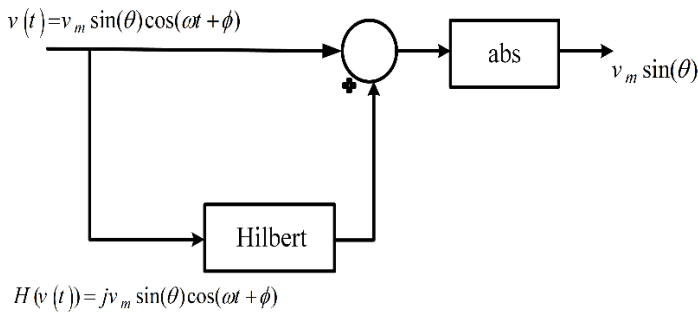
$$V_{cos} = AN_s \omega_m \cos(P\theta) \quad (4)$$

$$V_{sin} = AN_s \omega_m \sin(P\theta) \quad (5)$$

$$\theta = \text{Arctan} \frac{V_{cos}}{V_{sin}} \quad (6)$$

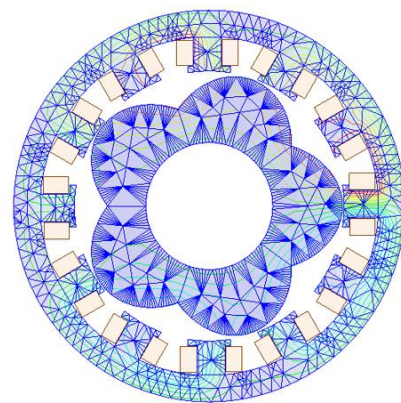
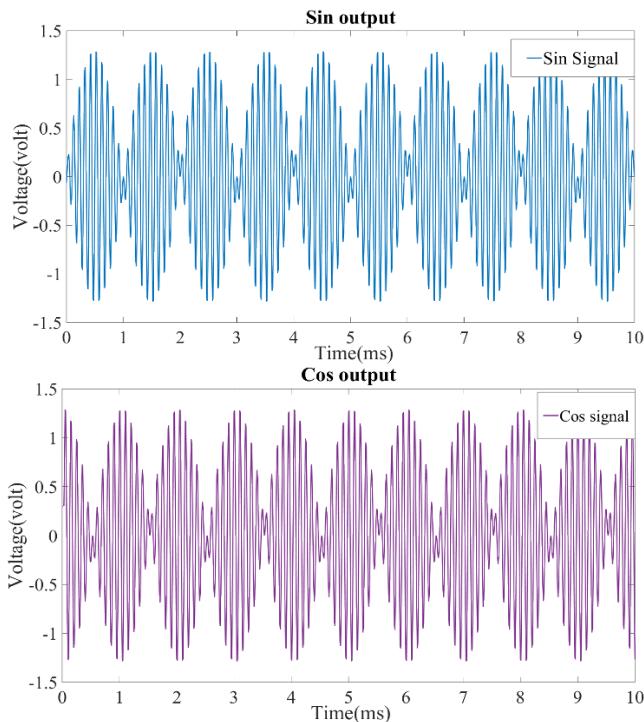
فلوچارت پروسه‌ی دریافت خروجی عددی از شبیه‌سازی در شکل (۳-الف) نمایش داده شده‌است و همچنین تابع هیلبرت^۲ استفاده شده در پروسه در شکل (۳-ب) نمایش داده شده‌است.





شکل (۳): الف) فلوچارت محاسبه ی خروجی زاویه ب) تابع هیلبرت شکل موج سیگنال

ریزولور شبیه سازی شده مرجع با اندازه ها و پارامترهای طراحی مندرج در جدول های (۱) و (۲) را می توان در شکل (۴-الف) مشاهده کرد. مش بندی این ریزولور با در نظر گرفتن اندازه ی ۱/۷۵ توسط پردازنده ی Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz 3.19 در مدت ۲۳ دقیقه انجام گرفته است. پس از شبیه سازی ریزولور، با مشاهده ی خروجی های ولتاژ القا شده در سیم پیچ های سیگنال بر اساس زمان و یا موقعیت روتور می توان مشاهده کرد که دو سیم پیچ سینوسی و کسینوسی شکل موج شکل (۴) را ایجاد می کنند. سپس با استفاده از خروجی های این شبیه سازی و وارد کردن اطلاعات در نرم افزار متلب و تابع بسته گیری از آن می توان خروجی های سینوسی و کسینوسی عمود بر هم را مطابق شکل (۴) مشاهده کرد. با استفاده از این روش حداکثر خطای ریزولور مقدار ۰/۱۵۸ درجه و مقدار متوسط آن ۰/۰۶ درجه می باشد که با مقاله ی [۹] مطابقت دارد.



شکل (۴): الف) مدل مش اعمالی بر ریزولور ب) خروجی های سیم پیچ های سیگنال

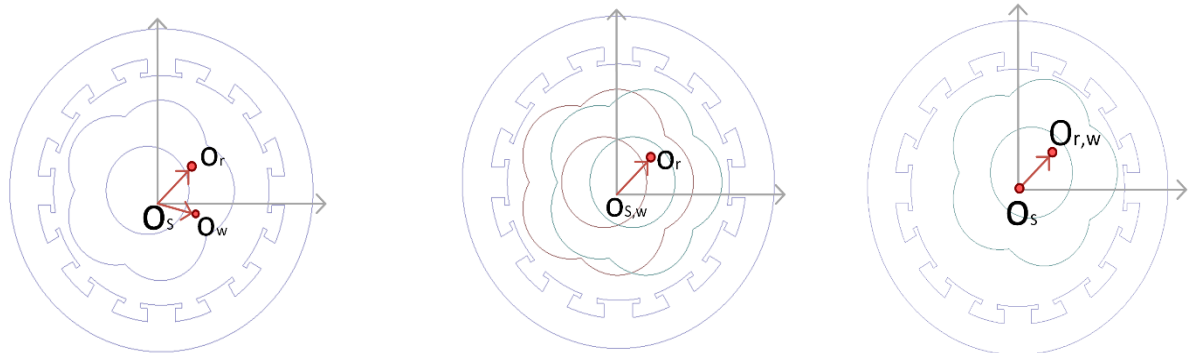


۲-۳- مدل سازی خطاهای مکانیکی در مگسول

خطاهای موجود در ماشین های الکتریکی به ۱۰ مدل مختلف تقسیم بندی می شوند [۱۴]. احتمال وقوع برخی از این خطاها در ریزولورها بسیار نامحتمل می باشد. به طور مثال خطاهای الکتریکی مرتبط با دما مثل اتصال کوتاه به دلیل عدم جریان کشی در سیم پیچ های سیگنال تقریباً امکان پذیر نمی باشد. در بین خطاهای مختلف بررسی شده در [۱۴]، خطای نامحوری بیشترین تاثیر را در خروجی زاویه ای ریزولورها دارد [۲۰]. خطاهای نامحوری را می توان به سه دسته ای استاتیک^{۱۲}، دینامیک^{۱۴} و ترکیبی^{۱۵} تقسیم بندی کرد. به منظور تشخیص هر مدل از این خطاها، محل قرارگیری محور روتور، محور استاتور و همچنین حرکت روتور نسبت به استاتور مطابق شکل (۵) در نظر گرفته می شود. در شرایط حرکت نرمال بدون خطا، هر سه محور بر یکدیگر منطبق هستند. در حالت بروز خطا حداقل یکی از محورهای مذکور بر دو محور دیگر منطبق نمی شود. بر این اساس سه خطای نامحوری مختلف بوجود می آید که در ادامه به بررسی و نحوه شبیه سازی آن در نرم افزار مگسول اشاره می شود. خطای نامحوری معمولاً با درصد مطابق رابطه ی (۷) بیان می شود.

$$\varepsilon = \left(\frac{r}{g}\right) * 100\% \quad (7)$$

که در این معادله ε درجه ای خطا به درصد، r اندازه ی فاصله هوایی بدون خطا و g ، فاصله ی هوایی شعاعی در حضور وجود خطای عدم تقارن می باشد.



ج: نامحوری ترکیبی

ب: نامحوری دینامیک

الف: نامحوری استاتیک

شکل (۵): مدل شبیه سازی خطاهای مختلف نامحوری

در شکل (۵)، O_s و O_r محل قرارگیری محور روتور و استاتور و $O_{r,w}$ مرکز حرکت روتور نسبت به استاتور می باشد. خطای نامحوری استاتیک زمانی اتفاق می افتد که محور استاتور بر محورهای روتور و محور حرکت روتور منطبق نباشد. شکل (۵-الف) نشان دهنده ی این خطای نامحوری است. خطای نامحوری دینامیک زمانی اتفاق می افتد که محور روتور بر دو محور استاتور و محور حرکت منطبق نباشد که در شکل (۵-ب) نشان داده شده است. در خطای نامحوری ترکیبی هیچ یک از محورهای روتور و استاتور و محور حرکت بر یکدیگر منطبق نمی شوند. این خطا ترکیبی از خطاهای استاتیک و دینامیک به صورت همزمان می باشد. شکل (۵-ج) نشان دهنده ی بردار این خطا است. رابطه ی (۸) هر سه مدل خطا را بصورت ریاضی مدل می کند.

$$\begin{cases} r_S = \left| \overrightarrow{O_s O_w} \right| \\ r_D = \left| \overrightarrow{O_r O_w} \right| \\ r_M = \left| \overrightarrow{O_s O_r} \right| \end{cases} \quad (8)$$

در این رابطه بردارهای r_S و r_D و r_M به ترتیب بردارهای نامحوری در حالت حضور خطای استاتیک، دینامیک و ترکیبی می باشد.



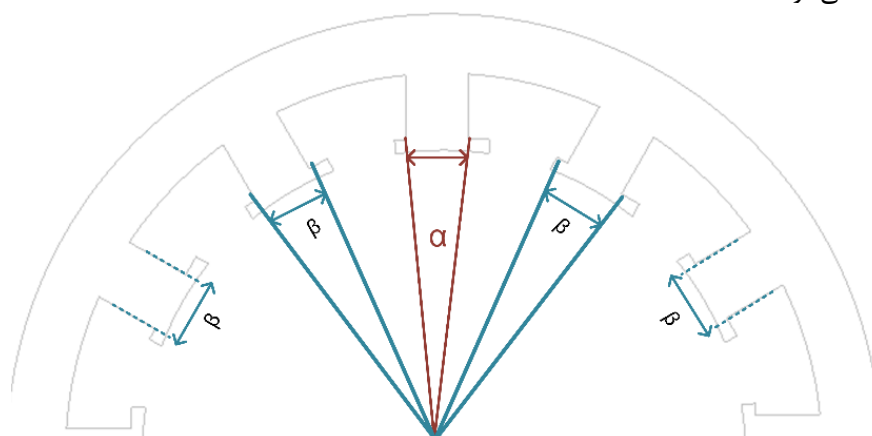
۳- بهینه‌سازی و تحلیل عملکرد ریزولور در حضور خطا

در این بخش ابتدا خطاهای فرمول‌بندی شده در بخش ۲-۳ با درجات مختلف به منظور استفاده در آنالیز حساسیت در نرم‌افزار مکسول ارایه می‌شود. سپس میزان تاثیر هر یک از خطاها در دقت اندازه‌گیری بدست آمده و بر اساس آن، پارامترهای اندازه‌ی استاتور جهت بهینه‌سازی ریزولور پیشنهادی ارایه می‌شود. جهت شناسایی حداکثر خطا در حضور خطاهای مختلف مطابق با رابطه‌ی (۸)، مدل ریزولور تحت درجه‌های مختلف خطا شبیه‌سازی می‌گردد و دقت ریزولور خروجی اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده مطابق با جدول (۳)، ریزولور در حضور خطای نامحوری دینامیکی دقت کمتری ارایه می‌دهد این اطلاعات امکان مقایسه‌ی میزان دقت ریزولور پیشنهادی بهینه‌سازی شده را با حالت متداول فراهم می‌کند.

جدول (۳): دقت ریزولور در حضور شدت مختلف خطاهای نامحوری

نوع خطا	بازه ی تغییرات خطا	کمترین دقت ریزور در حضور خطا
نامحوری استاتیک		۲/۲۸
نامحوری دینامیک	۵۰ تا درصد با گام ۱۰ درصد	۳/۸۴
نامحوری ترکیبی		۳/۵۸

جهت بهینه‌سازی شیارهای استاتور دو ضریب مجزا برای دندانه‌های تحریک و سیگنال در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل (۶)، ضریب α برای قطب‌های تحریک و ضریب β برای قطب‌های سیگنال انتخاب شده‌است. به دلیل الزام متعامد بودن هر دو سیم‌پیچ سیگنال بریکدیگر، هر جفت قطب سیگنال سینوسی و کسینوسی الزاما بایستی هم اندازه باشند و در نتیجه از یک ضریب جهت بهینه‌سازی هر ۸ قطب سیگنال استفاده می‌شود.



شکل (۶): ضریب‌های شبیه‌سازی قطب‌های سیگنال و تحریک

در فرایند بهینه‌سازی به منظور کاهش حجم شبیه‌سازی‌های انجام شده در آنالیز حساسیت، ضریب α را در مقدار اولیه‌ی ۲۰ درجه در قطب تحریک ضرب کرده و اندازه‌ی آن را پس از هر شبیه‌سازی با گام ۱۰ درصد افزایش می‌دهیم. در این حالت برای یافتن خروجی‌های ریزولور در حضور هر خطا، شبیه‌سازی بایستی به تعداد ۵ مرتبه تکرار شود. جدول (۴) خلاصه‌ی شبیه‌سازی‌های انجام شده در حضور هر سه نوع خطا و در بدترین حالت آن را نشان می‌دهد.



جدول (۴): دقت ریزولور در حضور خطای نامحوری دینامیکی، استاتیکی و ترکیبی

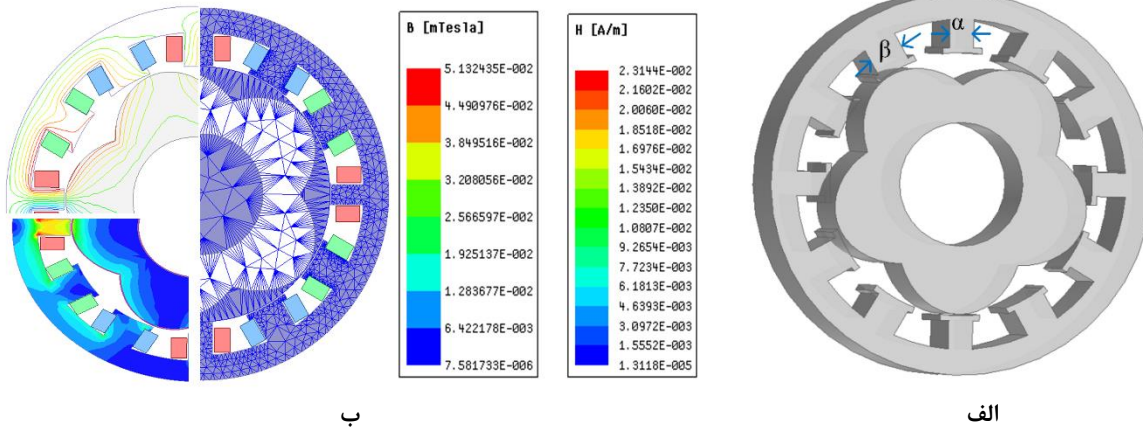
خطای ترکیبی			خطای دینامیک			خطای استاتیک		
α	β	دقت	α	β	دقت	α	β	دقت
		ریزولور			ریزولور			ریزولور
۱/۱	۲۴	۳/۸۷	۱/۱	۲۴	۳/۸۷	۱/۱	۲۴	۳/۸۵۴
	۲۶	۳/۸۴		۲۶	۳/۸۸۴		۲۶	۳/۲۴
	۲۸	۳/۷۲		۲۸	۳/۷۸۲		۲۸	۳/۲۰۲
	۳۰	۳/۶۲		۳۰	۳/۶۲		۳۰	۳/۶۶۲
۱/۲	۲۴	۳/۸۵	۱/۲	۲۴	۳/۶۵	۱/۲	۲۴	۳/۸۵
	۲۶	۳/۷۲		۲۶	۳/۷۲		۲۶	۳/۷۲
	۲۸	۳/۵۲		۲۸	۳/۵۲		۲۸	۳/۵۲
	۳۰	۳/۴۸		۳۰	۳/۴۸۸		۳۰	۳/۴۲
۱/۳	۲۴	۳/۵	۱/۳	۲۴	۳/۲۵	۱/۳	۲۴	۳/۲۵
	۲۶	۳/۲۵		۲۶	۳/۳۵		۲۶	۳/۲۵
	۲۸	۳/۱۶		۲۸	۳/۱۶		۲۸	۳/۲۶
	۳۰	۳/۱۰		۳۰	۳/۲۰		۳۰	۳/۱۲
۱/۴	۲۴	۳/۵۵	۱/۴	۲۴	۳/۵۷	۱/۴	۲۴	۳/۲۵
	۲۶	۳/۶۴		۲۶	۳/۴		۲۶	۳/۳۲۴
	۲۸	۳/۲۹		۲۸	۳/۲۹		۲۸	۳/۲۹
	۳۰	۳/۵۸		۳۰	۳/۵۷		۳۰	۳/۵۸
۱/۵	۲۴	۳/۵۸	۱/۵	۲۴	۳/۲۸	۱/۵	۲۴	۳/۵۸
	۲۶	۳/۹		۲۶	۳/۹۹		۲۶	۳/۹
	۲۸	۴/۸۸		۲۸	۴/۸۱۲		۲۸	۴/۸۸
	۳۰	-		۳۰	-		۳۰	-

با توجه به جدول (۴)، ابعاد ۲۸ درجه برای دندانهای سیگنال و ۲۴ درجه برای تحریک می‌تواند علاوه بر جبران خطای نامحوری دینامیکی به اندازه ۱۲ درصد، خطای نامحوری ترکیبی را نیز به اندازه ۱۰/۷ درصد بهبود بخشد. با اعمال این اندازه در استاتور، همچنین میزان خطای نامحوری استاتیک نیز بهبود ۰/۰۷ درصدی دارد. بر این اساس ریزولور بهینه شناسایی و در بخش بعد مدل آن با ابعاد مذکور در دو حالت وجود و عدم وجود خطا با مدل متداول مقایسه و ارزیابی می‌شود.

۴- ریزولور پیشنهادی، ارزیابی و مقایسه

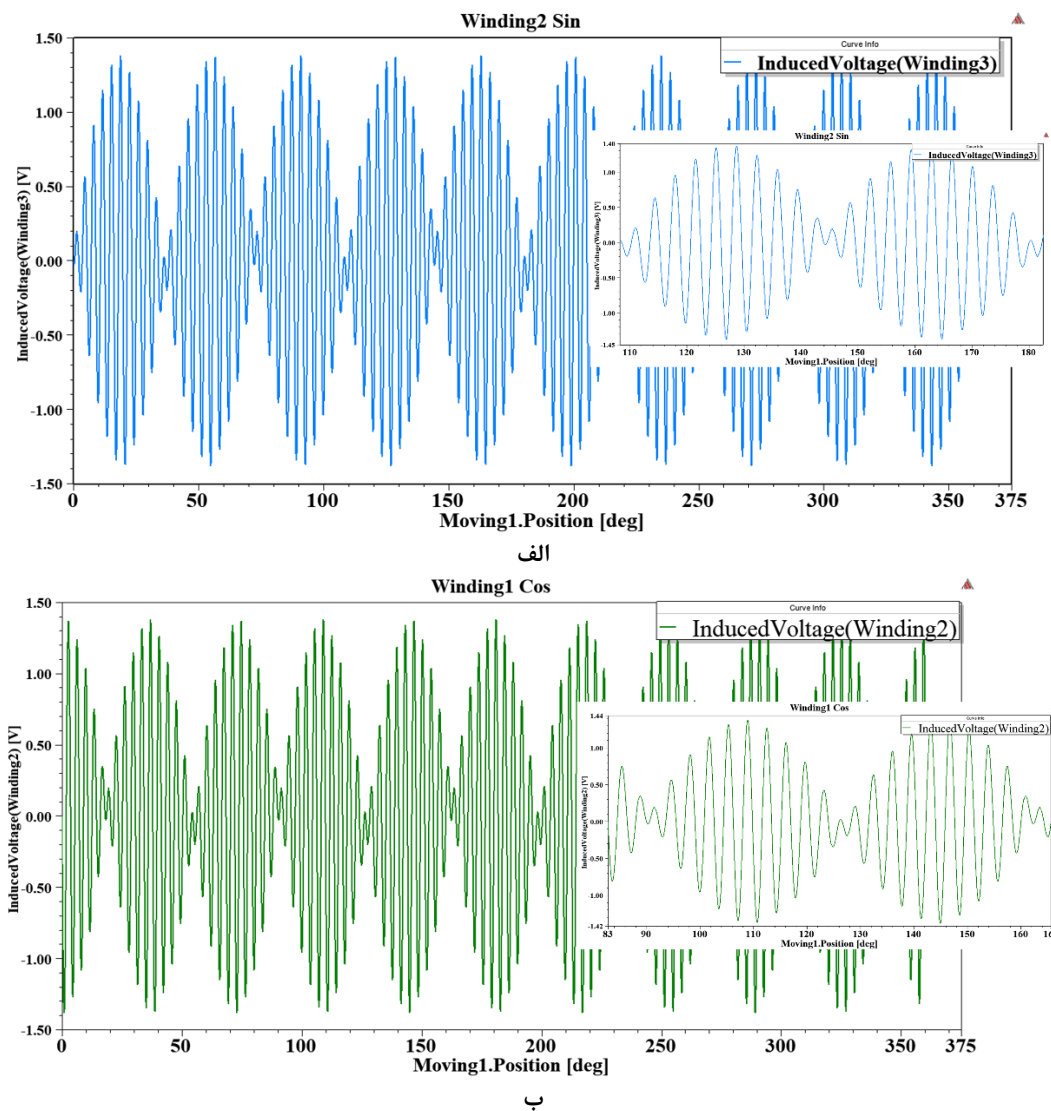
علاوه بر عملکرد مناسب در حضور خطا، ریزولور پیشنهادی بایستی در حالت کار بدون خطا نیز کارایی مناسبی داشته باشد. به این منظور ریزولور با ابعاد بدست آمده در بخش قبل، در شرایط عدم وجود خطا شبیه‌سازی و با مدل مرجع مقایسه می‌شود. شکل (۷-الف) نشان دهنده ساختار شیارهای بهینه شده و شکل (۷-ب) نشان دهنده مدل مش‌بندی شده ریزولور پیشنهادی می‌باشد.





شکل (۷): مدل ریزولور پیشنهادی با ابعاد بهینه الف) مدل سه بعدی ب) مدل مش بندی شده، خطوط شار و میدان

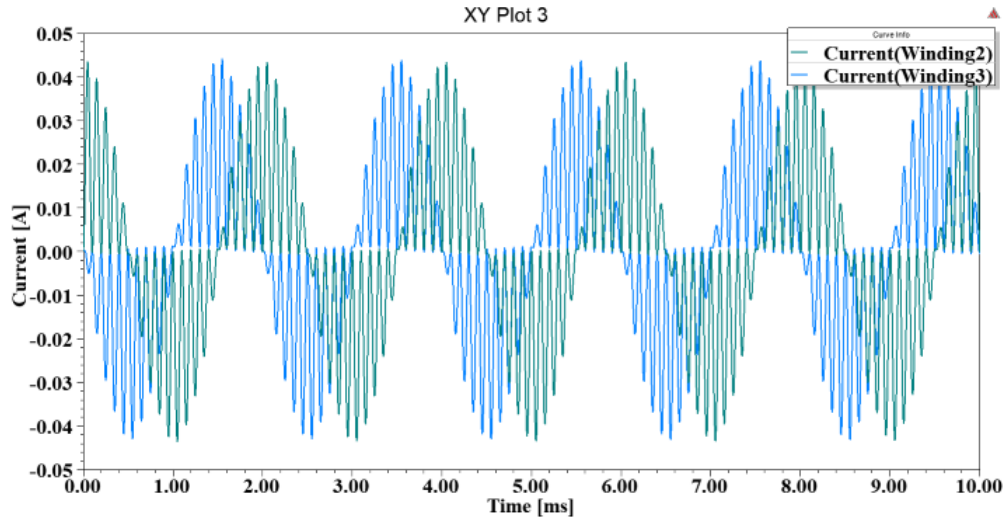
پس از شبیه سازی ریزولور، شکل موج های پارامترهای اصلی خروجی ریزولور در نرم افزار مکسول به صورت شکل های (۸) می باشند. شکل (۸-الف) نشان دهنده ولتاژ القایی در سیم پیچ سیگنال سینوسی در یک دور چرخش کامل روتور و شکل (۸-ب) ولتاژ القایی سیم پیچ کسینوسی می باشد.



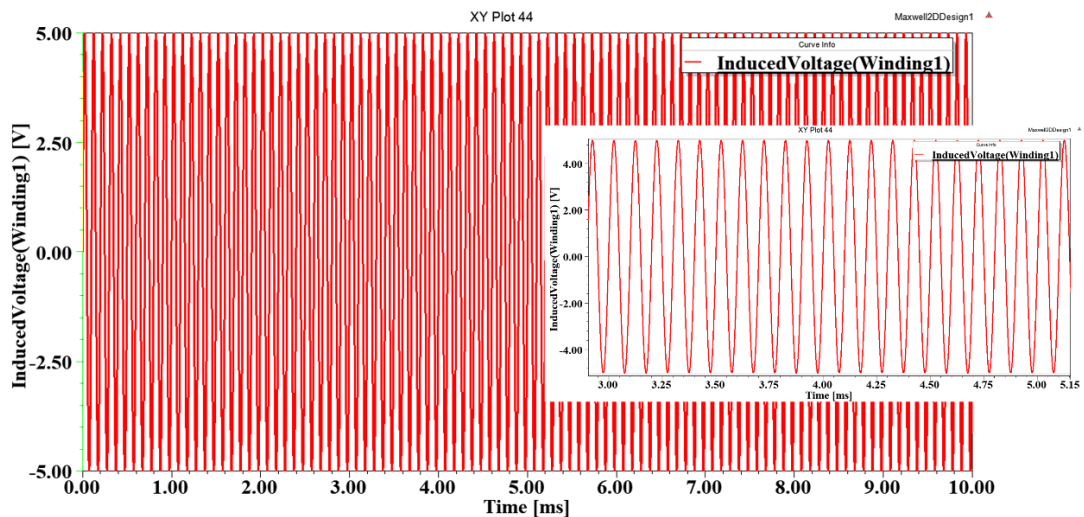
شکل (۸): ولتاژهای خروجی سیم پیچ های سیگنال الف: سیم پیچ سینوسی ب: سیم پیچ کسینوسی



شکل (۹) نشان‌دهنده‌ی جریان القایی در سیم‌پیچ‌های سینوسی و کسینوسی است که وجود ۹۰ درجه اختلاف زاویه‌ی الکتریکی نشان‌دهنده‌ی صحت عملکرد این ریزولور در تمامی موقعیت‌های زاویه‌ای روتور می‌باشد. شکل (۱۰) ولتاژ سیم‌پیچ تحریک شده بر ۴ قطب تحریک را نشان می‌دهد.



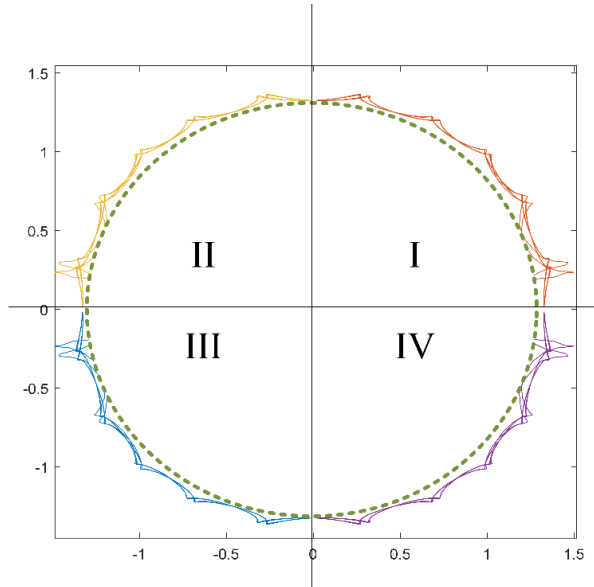
شکل (۹): شکل موج جریان سیم‌پیچ‌های سیگنال ریزولور پیشنهادی



شکل (۱۰): شکل موج ولتاژ سینوسی سیم‌پیچ‌های سیگنال ریزولور پیشنهادی

تابع بسته‌ی سینوسی و کسینوسی بر حسب یکدیگر در نرم‌افزار متلب ترسیم و در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. در این شکل چهار ناحیه‌ی نمایش داده شده به ترتیب از ترسیم تابع بسته‌های سیم‌پیچ‌های سیگنال براساس یکدیگر بدست آمده‌است. شکل دایره‌ای بدون همپوشانی تایید می‌کند که در هر لحظه از گردش روتور، زاویه‌ی بدست آمده منحصر به فرد می‌باشد. به‌منظور تشخیص مقدار حداکثر خطای ساختار پیشنهادی، اندازه‌ی تانژانت معکوس مقادیر تابع بسته‌ی این مدل با مقدار واقعی مقایسه می‌شود. با مقایسه‌ی این مقادیر با مدل متداول، حداکثر خطا در حالت عملکرد بدون خطا برابر با $0/156$ درجه می‌باشد که نسبت به مدل متداول به اندازه‌ی $1/04$ درصد بهبود یافته است. این بهبود عملکرد به دلیل فراهم شدن مسیر شار بزرگ‌تر در قطب‌های سیگنال می‌باشد.





شکل (۱۱): تابع بسته ی سینوسی بر حسب کسینوسی

به دلیل استفاده از ابعاد فیزیکی و تحریک الکتریکی یکسان در ریزولور پیشنهادی و متداول، در عمل می‌توان از مبدل ریزولور به دیجیتال یکسان جهت شناسایی زاویه‌ی خروجی عددی این حسگر استفاده و ارتباط آن را با کنترلرهای مختلف برقرار کرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک ریزولور رلوکتانسی بدون همپوشانی بهینه با اندازه‌ی قطب‌های تحریک و سیگنال نابرابر جهت کاربرد در صنایع بسیار پرتنش معرفی و شبیه‌سازی شده‌است. به‌منظور امکان تغییر اندازه‌ی قطب‌های سیگنال و تحریک، مدل ریزولور بدون همپوشانی مرجع که ویژگی‌های دقت بالا و هزینه‌ی ساخت پایین دارد انتخاب شد. این مدل توسط نرم‌افزار مکسول با استفاده از روش اجزای محدود بررسی و تحلیل شده و خروجی‌های سیگنال و دقت آن در شرایط عادی اندازه‌گیری شده‌است. سپس سه مدل خطای نامحوری با درجه‌های مختلف به شبیه‌سازی اعمال و شرایط عملکردی این ریزولور در شرایط بروز خطا نیز بررسی شد. در بین خطاها، خطای نامحوری دینامیکی بیشترین تاثیر را در دقت ریزولور داشت. به منظور بهینه‌سازی، اندازه‌های دندان‌های سیگنال و تحریک با دو ثابت به صورت پارامتریک وارد نرم‌افزار مکسول شده و با تغییر این پارامترها توسط آنالیز حساسیت در مکسول و شبیه‌سازی ریزولور در حضور بدترین حالت خطا، اندازه‌ی دندان‌های استاتور برای افزایش دقت در حضور خطا بدست آمد. ابعاد بدست آمده در حضور خطاهای دیگر نیز بررسی و بهبود دقت ریزولور در حضور کلیه‌ی خطاها تایید شد. بهبود دقت ریزولور پیشنهادی در حضور خطای دینامیکی و ترکیبی به ترتیب ۱۲٪ و ۱۰٪ درصد و در حضور خطای استاتیک ۰/۰۷ درصد می‌باشد. سپس به منظور تایید عملکرد ریزولور بدون حضور خطا، این ریزولور در شرایط بدون خطا نیز شبیه‌سازی و خروجی‌های آن با مدل مرجع مقایسه و صحت عملکرد آن تایید شد. ریزولور پیشنهادی در حالت بدون خطا نیز ۱/۰۴ درصد بهبود دقت در عملکرد داشته‌است.

مراجع

- [1] L. Karami, A. Ahmarinejad, M. Hosseini Aliabadi, and A. Dana, "A tri-level optimization model for utilizing the potential of IoT-based subscribers and electric vehicles in energy and ancillary services markets," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 4, pp. 82–107, 2024, doi: 10.30486/teeges.2023.1990126.1079.
- [2] H. Ghadiri and H. Khodadadi, "Position Control of an Electrohydraulic Servo System Based on Sliding Mode Adaptive Fuzzy Controller," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 3, pp. 13–35, 2023, doi: 10.30486/teeges.2023.1981036.1066.
- [3] S. Shimahara, "Resolver." Google Patents, Jan. 16, 2024.





- [4] R. Ni, Y. Cai, S. Gu, S. Nie, and X. Wu, "Improved Analytical Analysis of Novel Integrated Variable Reluctance Resolver for Compact Machine Topology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12600–12609, 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3131798.
- [5] L. Xiao, Z. Li, and C. Bi, "An Optimization Approach to Variable Reluctance Resolver," *IEEE Trans Magn*, vol. 56, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.1109/TMAG.2019.2953255.
- [6] X. Ge, Z. Q. Zhu, R. Ren, and J. T. Chen, "A Novel Variable Reluctance Resolver for HEV/EV Applications," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 52, no. 4, pp. 2872–2880, 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2533600.
- [7] X. Ge and Z. Q. Zhu, "A Novel Design of Rotor Contour for Variable Reluctance Resolver by Injecting Auxiliary Air-Gap Permeance Harmonics," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 1, pp. 345–353, 2016, doi: 10.1109/TEC.2015.2470546.
- [8] H. Saneie, Z. Nasiri-Gheidari, and F. Tootoonchian, "The influence of winding's pole pairs on position error of linear resolvers," in *2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2017, pp. 949–954. doi: 10.1109/IranianCEE.2017.7985176.
- [9] H. Saneie and Z. Nasiri-Gheidari, "Generalized Nonoverlapping Tooth Coil Winding Method for Variable Reluctance Resolvers," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 5, pp. 5325–5332, May 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3084157.
- [10] Z. Nasiri-Gheidari, F. Tootoonchian, and F. Zare, "Design oriented technique for mitigating position error due to shaft run-out in sinusoidal-rotor variable reluctance resolvers," *IET Electr Power Appl*, vol. 11, no. 1, pp. 132–141, 2017, doi: 10.1049/iet-epa.2016.0316.
- [11] F. Zare, Z. Nasiri-Gheidari, and F. Tootoonchian, "The effect of winding arrangements on measurement accuracy of sinusoidal rotor resolver under fault conditions," *Measurement*, vol. 131, pp. 162–172, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2018.08.074.
- [12] R. Ghandehari, P. Naderi, and L. Vandeveld, "Performance Analysis of a New Type PM-Resolver in Healthy and Eccentric Cases by an Improved Parametric MEC Method," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 70, pp. 1–10, 2021, doi: 10.1109/TIM.2021.3080388.
- [13] M. S. KhajueeZadeh, M. Emadaleslami, F. Tootoonchian, A. Daniar, M. C. Gardner and B. Akin, "Comprehensive Investigation of the Resolver's Eccentricity Effect on the Field-Oriented Control of PMSM," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 17, pp. 19145–19152, 1 Sept.1, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3292896.
- [14] M. Emadaleslami, M. KhajueeZadeh and F. Tootoonchian, "Static Eccentricity Fault Location Diagnosis in Resolvers Using Siamese-Based Few-Shot Learning," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1–9, 2023, Art no. 9004209, doi: 10.1109/TIM.2023.3298404.
- [15] J. Faiz and M. Ojaghi, "Different indexes for eccentricity faults diagnosis in three-phase squirrel-cage induction motors: A review," *Mechatronics*, vol. 19, no. 1, pp. 2–13, 2009, doi: 10.1016/j.mechatronics.2008.07.004.
- [16] M. KhajueeZadeh and F. Tootoonchian, "Axial Flux Resolver Versus Radial Flux One From Fault Tolerability Point of View," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 17, pp. 19176–19183, 1 Sept.1, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3296746.
- [17] L. Sun, Z. Luo, J. Hang, S. Ding, and W. Wang, "A Slotless PM Variable Reluctance Resolver With Axial Magnetic Field," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 6, pp. 6329–6340, 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3090704.
- [18] A. Moheyseni, Z. Nasiri-Gheidari, and R. Alipour-Sarabi, "Slotless Disk Type Resolver: A Solution to Improve the Accuracy of Multi-Speed Wound Rotor Resolvers," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 1, pp. 1493–1500, 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3111702.
- [19] H. Saneie, R. Alipour-Sarabi, Z. Nasiri-Gheidari, and F. Tootoonchian, "Challenges of Finite Element Analysis of Resolvers," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 2, pp. 973–983, 2019, doi: 10.1109/TEC.2018.2881465.
- [20] Z. Nasiri-Gheidari and F. Tootoonchian, "Influence of mechanical faults on the position error of an axial flux brushless resolver without rotor windings," *IET Electr Power Appl*, vol. 11, no. 4, pp. 613–621, Apr. 2017, doi: 10.1049/iet-epa.2016.0675.



-
- 1 Electrification
 - 2 Resolvers
 - 3 Absolute
 - 4 Commutators
 - 5 Eccentricity Faults
 - 6 Disk type resolvers
 - 7 Axial flux resolvers
 - 8 Sensitivity analysis
 - 9 Variable reluctance flux
 - 10 Resolvers to Digital converters (RTD)
 - 11 Second Order Runge-Kutta
 - 12 Hilbert Function
 - 13 Static Exccentricity (SE)
 - 14 Dynamic Eccentricity (DE)
 - 15 Mixed Eccentricity (ME)