

## بررسی تاثیر تعداد قطب و نوع سیم پیچی بر عملکرد ریزالور رلوکتانس متغیر رتور سینوسی

فاطمه زارع<sup>۱</sup>، زهرا نصیری قیداری<sup>۲</sup>، فرید توتونچیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، f.zare.1373@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار ، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، znasiri@sharif.edu

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، Tootoonchian@iust.ac.ir

### چکیده

ریزالور نوعی حسگر موقعیت است که در کاربردهای صنعتی بسیار مورد توجه است. از میان انواع ریزالورها، ریزالورهای رلوکتانس متغیر به دلیل ساختار ساده (عدم وجود سیم پیچی روی رتور) و قابلیت اطمینان زیاد مورد استقبال بیشتری قرار گرفته اند. این ریزالورها، در دو نوع رتور با سطح مقطع سینوسی (رتور سینوسی) و رتور با فاصله هوایی سینوسی، ساخته می شوند. در این مقاله تاثیر تغییر در تعداد قطب های استاتور و رتور و همچنین تاثیر نحوه سیم پیچی استاتور (متمرکز و گسترده) در ریزالور رتور سینوسی مورد بررسی قرار می گیرد. ملاحظه می شود که افزایش تعداد قطب های استاتور و رتور به افزایش دقت ریزالور منجر می شود. همچنین بررسی عملکرد ریزالور با سیم بندی گسترده نشان می دهد که ریزالور دارای سیم پیچی سیگنال گسترده خطای کمتری نسبت به همان ریزالور با سیم پیچی متمرکز دارد. تحلیل های انجام شده با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود سه بعدی در حالت گذرا ارائه می شوند و سپس با استفاده از آزمون عملی روی نمونه ساخته شده این ریزالور، تایید می شوند.

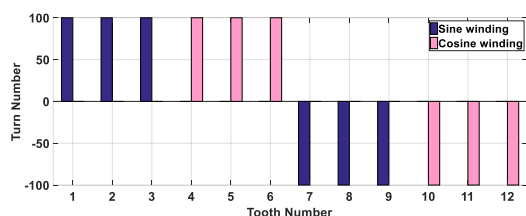
### واژه های کلیدی

ریزالور رلوکتانس متغیر، ریزالور رتور سینوسی، ریزالور رلوکتانس متغیر با فاصله هوایی سینوسی، سیم پیچی متمرکز، سیم پیچی گسترده

### مقدمه

حسگرهای موقعیت به منظور اندازه گیری موقعیت زاویه ای رتور، در ماشین های الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرند [۱]. پرکاربردترین حسگرهای موقعیت، انکدرهای نوری و ریزالورها هستند. هرچند انکدرهای نوری بسیار دقیق و ارزان هستند؛ عملکرد آنها در محیط های آلوده صنعتی، یا محیط های با تغییرات دمایی وسیع و یا محیط های مرتعش، به دلیل ساختار فیزیکی آنها، مطلوب نیست [۲] - [۴]. در چنین کاربردهایی ریزالورها، به دلیل ساختار ماشینی مستحکمی که دارند؛ تنها انتخاب ممکن هستند. در واقع ریزالور یک

ژنراتور سنکرون دو فاز است که سیم پیچی تحریک آن، به جای DC با یک ولتاژ فرکانس زیاد AC تغذیه می شود. اولین ریزالورها، مثل ماشین های سنکرون کوچک، برای انتقال سیگنال تحریک به رتور از حلقه لغزان و جاروبک استفاده می کردند. این ریزالورها، تحت عنوان ریزالورهای جاروبک دار شناخته می شوند. اما مسائل مربوط به وجود جاروبک و نوع تحریک ریزالور که ولتاژ AC است؛ منجر به ساختار جدیدی از ریزالور شد که ریزالور بدون جاروبک با رتور سیم پیچی شده بود. در این ساختار از یک ترانسفورماتور گردان برای انتقال سیگنال به رتور استفاده می شود [۵]. این نوع ریزالور پرکاربردترین نوع ریزالورها محسوب می شود. اما وجود ترانسفورماتور گردان، خود سبب بروز مسائلی از قبیل خطای شیف فاز، کاهش دقت ریزالور در اثر شارهای ناشی ترانسفورماتور گردان و افزایش هزینه (قیمت تمام شده) حسگر می شود [۶-۷]. در راستای رفع این مشکلات ریزالورهای رلوکتانس متغیر معرفی شدند. این ریزالورها بر اساس تغییر رلوکتانس فاصله هوایی کار می کنند و به دو نوع رلوکتانس متغیر با تغییر فاصله هوایی و رلوکتانس متغیر با تغییر سطح مقطع تقسیم می شوند. سیم پیچی تحریک این ریزالورها مانند سیم پیچی های دو فاز سیگنال، روی استاتور قرار می گیرد و رتور آنها هیچ سیم پیچی ای ندارد و لذا این ریزالورهای بدون جاروبک به ترانسفورماتور گردان احتیاج ندارند. هرچند ریزالورهای با فاصله هوایی سینوسی، تجاری شده اند و در کاربردهایی مثل خودرو برقی، مورد استفاده قرار می گیرند؛ استفاده از آنها با چالش هایی همراه است. مهمترین این چالش ها، پیچیدگی سیم پیچی، تاثیر پذیری زیاد دقت ریزالور از خطاهای مکانیکی و دقت کم در ریزالورها با تعداد قطب کم است [۷]. برای رفع این مشکلات ریزالورهای با سطح مقطع متغیر (رتور سینوسی) در [۸-۹] معرفی شدند. در ریزالورهای رتور سینوسی هر دندان فقط یکی از سیم پیچی های سینوسی یا کسینوسی سیگنال را با تعداد دور مساوی روی همه دندان ها، دارد و سیم پیچی تحریک فقط یک پیچک است که در شیارهای که در وسط هسته استاتور به صورت عمود بر شیارهای دربرگیرنده سیم پیچی های سیگنال، ایجاد شده، قرار گرفته است. رتور نیز شامل یک بخش یکپارچه، بدون شیار و سیم پیچی است و به گونه ای شکل داده شده که با چرخش رتور، سطح مقطع مشترک بین



شکل ۲: نمودار سیم‌بندی سیم‌پیچی‌های استاتور ریزالور رتور سینوسی

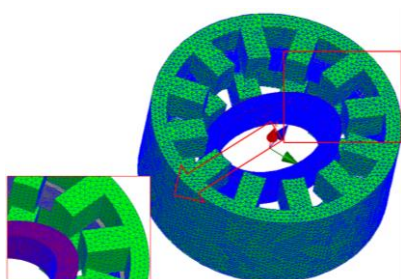
جدول ۱ مشخصات فیزیکی و تحریک این حسگر را نمایش می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی استاتور و رتور

| پارامتر                    | واحد     | مقدار |
|----------------------------|----------|-------|
| ولتاژ تحریک                | ولت      | ۵     |
| فرکانس                     | هرتز     | ۴۰۰   |
| تعداد قطب                  | -        | ۲     |
| شعاع بیرونی/ درونی استاتور | میلی‌متر | ۷۲/۴۲ |
| شعاع بیرونی/ درونی رتور    | میلی‌متر | ۴۱/۳۱ |
| تعداد شیار استاتور         | -        | ۱۲    |
| پهنای دندانه استاتور       | میلی‌متر | ۵     |
| ارتفاع شیار                | میلی‌متر | ۱۰/۵  |
| تعداد دور پیچک تحریک       | -        | ۵۰    |

### تحلیل اجزای محدود

برای شبیه‌سازی اجزای محدود، از نرم‌افزار تجاری Ansys Electronics Desktop Maxwell Design استفاده می‌شود. لازم به توضیح است که ملاحظات شبیه‌سازی اجزای محدود ریزالورها، مطابق آنچه در [۱۳] بیان شده، رعایت شده است. شکل ۳، شماتیک مش استفاده شده را نشان می‌دهد. توزیع شدت میدان مغناطیسی روی حسگر مورد مطالعه در شکل ۴، ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که حداکثر چگالی شار حدود ۷۳ میلی‌تسلا است و نگرانی در خصوص اشباع وجود ندارد.



شکل ۳: شماتیک مش مورد استفاده در شبیه‌سازی اجزای محدود ریزالور مورد بررسی

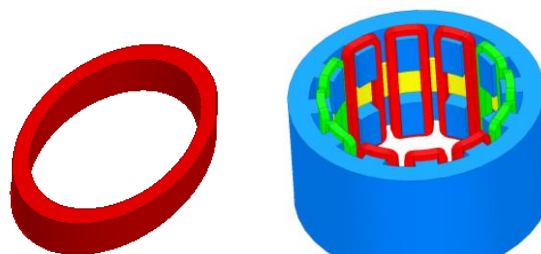
دندانه استاتور و هسته رتور به صورت سینوسی تغییر کند. شکل ۱، این نوع ریزالور را نشان می‌دهد.

پژوهش‌های انجام شده روی این نوع ریزالور شامل [۸]-[۱۲] است که در [۸]-[۹] ساختار این نوع ریزالور معرفی شده است و اساس کار آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. در [۱۰] خطای رانش محوری به عنوان یک خطای غیرقابل اجتناب در ریزالورهای رتور سینوسی معرفی شده است و عملکرد حسگر تحت این خطا بررسی شده است و ساختار جدیدی به صورت دیسکی برای غلبه بر افزایش خطای موقعیت ریزالور تحت خطای رانش محوری پیشنهاد شده است. در [۱۱] یک روش بهینه‌سازی برای افزایش دقت ریزالور دیسکی رتور سینوسی ارائه شده و نمونه‌های عملی ریزالورهای بهینه ساخته شده است. در [۱۲] رفتار ریزالور رتور سینوسی تحت انواع خطاهای ناهم-محوری استاتیک و دینامیک و خطای اتصال کوتاه مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پژوهش تاثیر افزایش تعداد قطب بر عملکرد ریزالور مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس تاثیر انواع مختلف سیم‌پیچی شامل سیم-پیچی دور دندانه و سیم‌پیچی گسترده روی دقت این ریزالور ارزیابی می‌شود. همه تحلیل‌ها با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود سه بعدی در حالت گذرا انجام می‌شود. در پایان نمونه عملی حسگر دو قطب ساخته می‌شود و مورد آزمایش قرار می‌گیرد. هم‌خوانی نتایج عملی و شبیه‌سازی، صحت تحلیل‌های ارائه شده را نشان می‌دهد.

### مشخصات ریزالور مورد بررسی

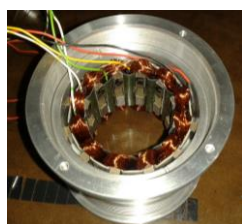
شکل ۱، استاتور و رتور دو قطب ریزالور مورد بررسی را نشان می‌دهد. همانطور قبلاً هم اشاره شد؛ استاتور شامل سیم‌پیچی‌های سیگنال و پیچک تحریک است و رتور بدون سیم‌پیچی است. شکل ۲، نحوه سیم‌بندی استاتور را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود دور هر دندانه فقط یک پیچک وجود دارد و تعداد دور همه پیچک‌ها یکسان است.



شکل ۱: ساختار ریزالور رتور سینوسی: (الف) استاتور و (ب) رتور

اجرا شده، به همین دلیل ابعاد حسگر بزرگتر از نمونه‌های تجاری ریزالور است. هسته استاتور قبل از سیم‌بندی و پس از آن و هسته رتور در شکل‌های ۷ (الف) تا ۷ (ج) نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که بخش فرومغناطیسی رتور روی یک نگهدارنده غیرفرومغناطیس قرار گرفته تا امکان چرخاندن آن در آزمون عملی، وجود داشته باشد.

مدار تست ریزالور در شکل ۷-د نشان داده شده است. در تست عملی از یک تایکوپ گردان برای چرخاندن رتور ریزالور و اندازه‌گیری موقعیت واقعی استفاده شده است.



ب



الف



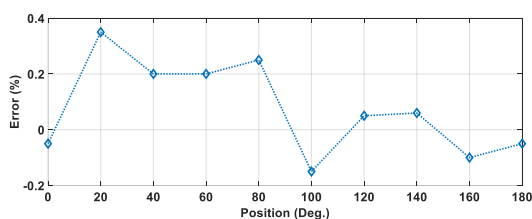
د



ج

شکل ۷: نمونه ساخته شده ریزالور رتور سینوسی: (الف) هسته استاتور قبل از سیم‌پیچی، (ب) هسته استاتور بعد از سیم‌پیچی، (ج) رتور و (د) مدار آزمایش

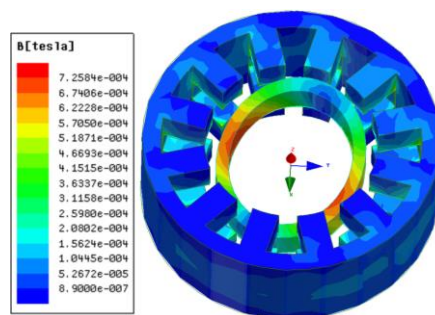
خطای نتایج شبیه‌سازی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل ۸ ارائه شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، بیش‌ترین مقدار خطا کمتر از ۰/۴ درجه است که صحت فرایند شبیه‌سازی این حسگر را نشان می‌دهد. به این ترتیب می‌توان از شبیه‌سازی اجزای محدود با ملاحظات اخذ شده برای بررسی عملکرد حسگر در تعداد قطب زیاد و انواع مختلف سیم‌پیچی استفاده کرد.



شکل ۸: مقایسه نتایج آزمون عملی و شبیه‌سازی اجزای محدود

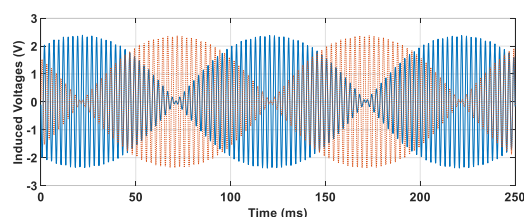
### تاثیر تعداد قطب‌های رتور و استاتور بر عملکرد ریزالور

با توجه به ساختار حسگر که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت، انتظار می‌رود با افزایش تعداد قطب‌های ریزالور، عملکرد آن

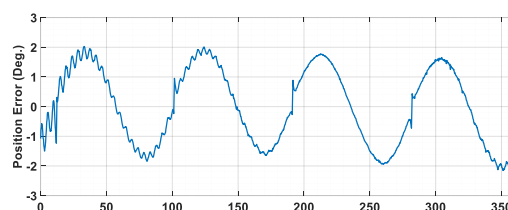


شکل ۴: توزیع چگالی میدان مغناطیسی در ریزالور دو قطب مورد بررسی

با اعمال ولتاژ تغذیه سینوسی، ولتاژهای القایی در سیم‌پیچی‌های سیگنال دارای مدولاسیون دامنه خواهند بود. این سیگنال‌ها در شکل ۵، نشان داده شده‌اند. با فراخوانی این سیگنال‌ها در نرم‌افزار متلب، با استفاده از تابع هیلبرت پوش سیگنال‌های خروجی محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از تانژانت نگکوس نسبت پوش ولتاژها، موقعیت بخش گردان قابل محاسبه است. مقایسه این موقعیت محاسبه شده با موقعیت مرجع، خطای موقعیت ریزالور مورد بررسی را مطابق شکل ۶، نتیجه می‌دهد.



شکل ۵: خروجی سیم‌پیچ‌های سیگنال



شکل ۶: خطای موقعیت ریزالور دو قطب

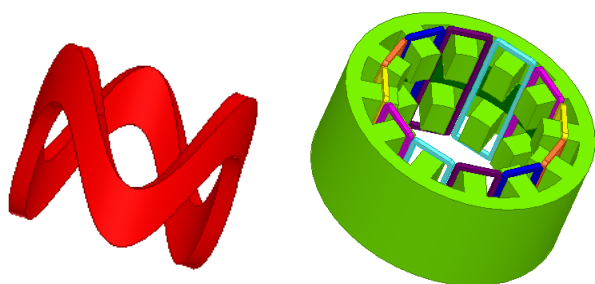
محاسبه حداکثر خطای موقعیت (MPE) و مقدار متوسط قدر مطلق خطا (AAPE) نشان می‌دهد که این مقادیر برای ریزالور مورد مطالعه به ترتیب ۲/۶۸ و ۱/۱۶ درجه هستند.

### آزمایش نمونه عملی

برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی اجزای محدود، نمونه عملی حسگر ساخته شد. لازم به توضیح است که حسگر می‌توانست بسیار کوچک‌تر از نمونه ساخته شده، باشد ولی برای کاهش هزینه‌های ساخت از ورق آماده استاتور موتور سویچ رلوکتانس برای هسته این ریزالور استفاده شده است و رتور متناسب با ابعاد استاتور زراحی و

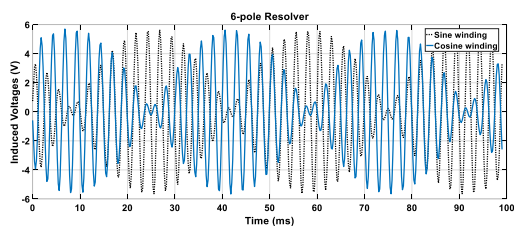
## ریزالور شش قطب

برای شبیه‌سازی ریزالور شش قطب، تعداد شیار استاتور ثابت فرض می‌شود (برابر ۱۲ شیار مثل ریزالور دو قطب). در این شرایط شیار بر قطب بر فاز سیم‌پیچی یک خواهد بود. شکل ۱۱، استاتور و رتور ریزالور شش قطب و دیاگرام سیم‌بندی آن را نشان می‌دهد. با توجه به افزایش تعداد قطب انتظار می‌رود خطای ریزالور نسبت به ریزالورهای دو و چهار قطب کمتر باشد ولی کاهش شیار بر قطب بر فاز سیم‌پیچی، می‌تواند نتیجه معکوس روی خطای ریزالور داشته باشد.

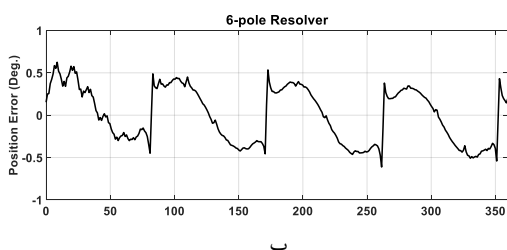


شکل ۱۱: ساختار رتور سینوسی شش قطب (الف) استاتور (ب) رتور

شکل ۱۲-الف، ولتاژهای خروجی ریزالور را به ازای یک دوره تناوب مکانیکی (یک دور چرخش رتور) نشان می‌دهد. منحنی خطای ریزالور شش قطب در شکل ۱۲-ب نشان داده شده است. مقدار حداکثر خطا  $0.6624^\circ$  درجه و متوسط قدرمطلق خطا  $0.2998^\circ$  درجه است که نشان می‌دهد هر دومقدار نسبت به ریزالورهای دو و چهار قطب، کمتر است. به عبارت دیگر، تاثیر کاهش شیار بر قطب بر فاز سیم‌پیچی کمتر از تاثیر افزایش تعداد قطب ریزالور است.



الف



ب

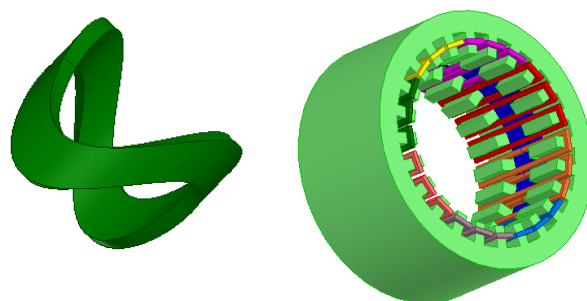
شکل ۱۲: نتایج ریزالور شش قطب: (الف) ولتاژهای خروجی و (ب) خطای موقعیت

در پایان مقایسه خطای ریزالور رتور سینوسی با تعداد قطب مختلف در شکل ۱۳ ارائه شده است که نشان دهنده کاهش هر دو

بهبود یافته و در نتیجه میزان خطای سیگنال‌های خروجی کاهش یابد. در این بخش با معرفی ریزالورهای چهار قطب و شش قطب مقادیر خطا در آن‌ها بررسی می‌شود.

## ریزالور چهار قطب

به منظور بررسی تاثیر تعداد قطب‌ها بر عملکرد ریزالور، در ابتدا با ثابت گرفتن کلیه پارامترها نظیر قطر داخلی و خارجی استاتور، قطر داخلی و خارجی رتور، ارتفاع حسگر، تعداد دور سیم‌پیچ‌ها و...، تعداد قطب رتور و استاتور به صورت همزمان به ۴ افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است به منظور ثابت نگه داشتن تعداد شیار بر فاز بر قطب، تعداد شیارهای استاتور به ۲۴ شیار افزایش یافته است. شکل ۹ رتور و استاتور این ریزالور را نمایش می‌دهد.

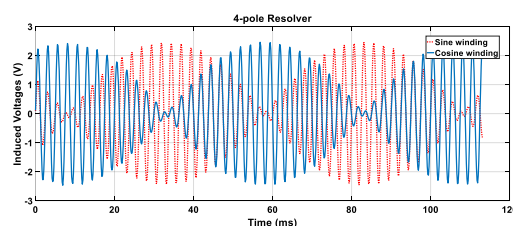


ب

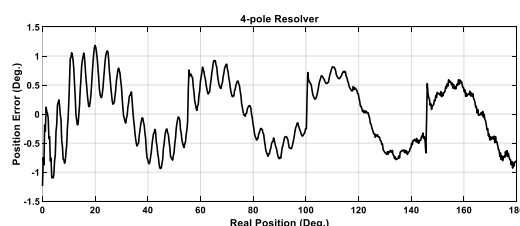
الف

شکل ۹: ساختار رتور سینوسی چهار قطب: (الف) استاتور (ب) رتور

ولتاژهای القایی ریزالور چهار قطب، در شکل ۱۰-الف ارائه شده‌اند. محاسبه پوش این ولتاژها و خطای موقعیت حسگر (مطابق شکل ۱۰-ب) نشان می‌دهد که حداکثر خطای موقعیت به  $1/28^\circ$  درجه و متوسط قدرمطلق خطا به  $0.48^\circ$  درجه کاهش یافته است.



الف

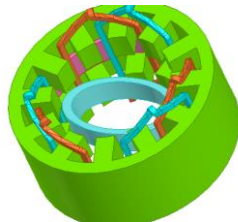


ب

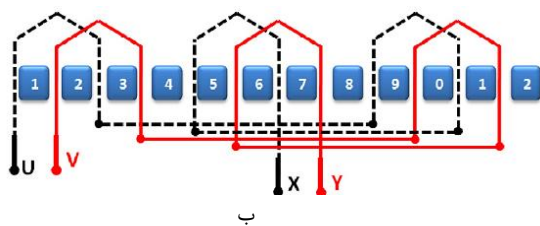
شکل ۱۰: نتایج ریزالور چهار قطب: (الف) ولتاژهای خروجی و (ب) خطای موقعیت

### ریزالور شش قطب با سیم پیچ گسترده

ریزالور شش قطب با سیم بندی گسترده در شکل ۱۵-الف و دیاگرام گسترده سیم بندی آن در شکل ۱۵-ب، نشان داده شده است. شبیه سازی این حسگر نشان می دهد که MPE برابر ۰/۵۹۹۶ درجه و AAPE برابر ۰/۲۴۴۲ درجه است.



الف

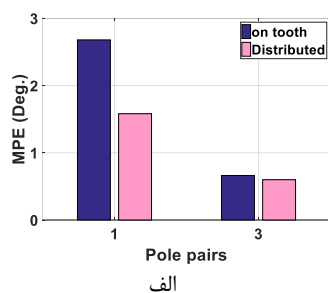


ب

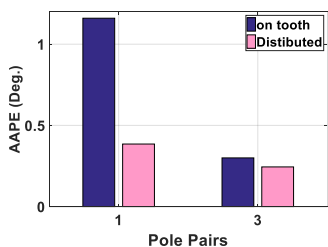
شکل ۱۵: ریزالور شش قطب با سیم پیچی گسترده: (الف) شماتیک حسگر و (ب) دیاگرام سیم بندی

مقایسه خطای حسگر شش قطب با سیم بندی گسترده با همین حسگر که سیم بندی متمرکز دارد نشان می دهد خطای ریزالور اول کمتر است. این کاهش خطا به قیمت افزایش مقدار مصرف مس در حسگر حاصل شده است.

شکل ۱۶ خطای ریزالور رتور سینوسی با سیم بندی های مختلف را نشان می دهد. ملاحظه می شود که استفاده از سیم بندی گسترده منجر به خطای کمتری می شود.



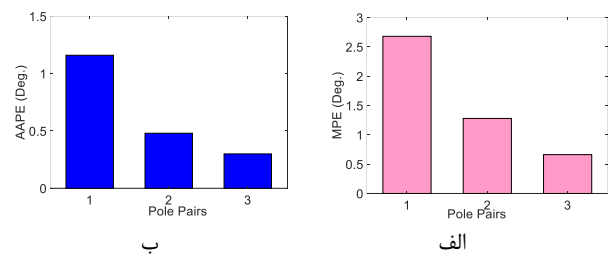
الف



ب

شکل ۱۶ مقایسه خطا در سیم پیچی متمرکز و گسترده: (الف) حداکثر خطا و (ب) میانگین متوسط خطا

پارامتر MPE و AAPE در ریزالورهای با سرعت زیاد (تعداد جفت قطب زیاد) است.



ب

الف

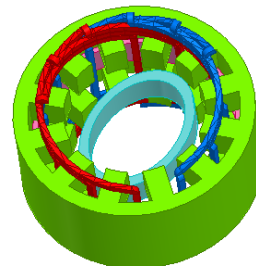
شکل ۱۳: مقایسه خطا در ریزالور با تعداد قطب های مختلف: (الف) حداکثر خطا و (ب) متوسط قدرمطلق خطا

### سیم پیچی گسترده

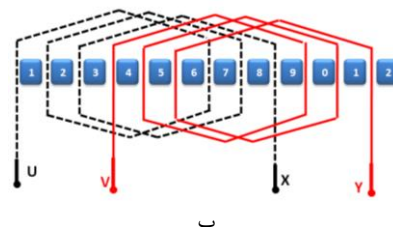
در این بخش، به منظور بررسی تاثیر نوع سیم پیچی بر عملکرد حسگر، عملکرد ریزالورهای دو قطب (به عنوان حسگر پایه) و ریزالور شش قطب (به عنوان دقیق ترین ریزالور مورد بررسی) با سیم پیچی گسترده بررسی می شود.

### ریزالور دو قطب با سیم پیچی گسترده

ریزالور دو قطب با سیم پیچی گسترده و دیاگرام این سیم پیچی برای در شکل های ۱۴-الف و ۱۴-ب، نشان داده شده اند. شبیه سازی ریزالور دو قطب با استفاده از این سیم پیچی، نشان می دهد که خطای حداکثر حسگر ۱/۵۸۱۸ درجه و AAPE برابر ۰/۳۸۵۱ درجه است. به عبارت دیگر تغییر نوع سیم پیچی از حالت متمرکز به گسترده، در ریزالور دو قطب، منجر به کاهش خطای حسگر شده است.



الف



ب

شکل ۱۴: ریزالور دو قطب با سیم بندی گسترده: (الف) شماتیک ریزالور و (ب) دیاگرام سیم بندی

ریزآلور رلوکتانس متغیر از نوع رتور سینوسی به دلیل نداشتن سیم‌بندی روی رتور و ساختار بسیار ساده سیم‌پیچی‌های سیگنال و تحریک در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش عملکرد این ریزآلور با تعداد قطب مختلف و نوع سیم‌بندی متفاوت (متمرکز و گسترده) مورد ارزیابی قرار گرفت. ملاحظه گردید که افزایش تعداد قطب‌های استاتور و رتور به افزایش دقت عملکرد ریزآلور منجر می‌شود. حتی در شرایطی که افزایش قطب، در تعداد شیار ثابت اجرا می‌شود و تعداد شیار بر قطب بر فاز به عدد یک می‌رسد؛ باز هم خطای ریزآلور رتور سینوسی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر بررسی عملکرد ریزآلور با سیم‌بندی گسترده نشان داد که ریزآلور دارای سیم-پیچی سیگنال گسترده خطای کمتری نسبت به همان ریزآلور با سیم-پیچی متمرکز دارد. البته این افزایش دقت در ازای افزایش مقدار مس مصرفی حاصل می‌شود. تمام تحلیل‌های این مقاله بر اساس شبیه-سازی‌های اجزای محدود سه بعدی در حالت گذرا انجام شده است و نتایج این شبیه‌سازی‌ها برای ریزآلور دو قطب با ساخت نمونه عملی و آزمایش آن تایید شده است.

## مراجع و منابع

- Brushless Resolver", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 32, no. 1, pp. 276 - 283, 2017
- [6] F. Abolqasemi-Kharanaq, R. Alipour-sarabi, Z. Nasiri-Gheidari and F. Tootoonchian, "Magnetic Equivalent Circuit Model for Wound Rotor Resolver Without Rotary Transformer's Core," *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 21, pp. 8693-8700, 1 Nov.1, 2018.
- [7] K.C. Kim, "Analysis on the Characteristics of Variable Reluctance Resolver Considering Uneven Magnetic Fields", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 51, no. 5, pp. 3858 - 3861, May 2015
- [8] S. Jing, Z. Meng, J. Shanlin, "The Principle of Reluctance Resolver and EMF Waveform Optimization Based on FEM", proceeding of 2011 International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, pp. 615-618
- [9] S. Jing, W. Hao, W. Weiqiang, "The Analysis of Multipole Axial Flux Reluctance Resolver with Sinusoidal Rotor", 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, June 2-5, 2012, Harbin, China.
- [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 Electric Power Appl.*, vol. 11, no. 1, pp. 132 - 141, 2017.
- [11] Z. Nasiri-Gheidari, R. Alipour-Sarabi, F. Tootoonchian and F. Zare, "Performance Evaluation of Disk Type Variable Reluctance Resolvers," *IEEE Sensors J.*, vol. 17, no. 13, pp. 4037-4045, July, 2017
- [12] 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
- [13] H. Saneie, R. Alipour-Sarabi, Z. Nasiri-Gheidari, and F. Tootoonchian, "Challenges of Finite Element Analysis of Resolvers", *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 34, no. 2, pp. 973-983, 2018
- [1] X. Ge, Z. Q. Zhu, R. Ren, J. T. Chen "A Novel variable reluctance resolver for HEV/EV applications", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 52, no. 4, pp. 2872 -2880, July-Aug. 2016
- [2] H. Saneie, Z. Nasiri-Gheidari, and F. Tootoonchian, "Accuracy Improvement in Variable Reluctance Resolvers", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, early access
- [3] R. Alipour-Sarabi, Z. Nasiri-Gheidari, F. Tootoonchian and H. Oraee, "Improved Winding Proposal for Wound Rotor Resolver Using Genetic Algorithm and Winding Function Approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 2, pp. 1325-1334, Feb. 2019
- [4] Z. Nasiri-Gheidari, and F. Tootoonchian, "Axial flux resolver design techniques for minimizing position error due to static eccentricities", *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, Issue 7, pp. 4027-4034, July 2015
- [5] Z. Nasiri-Gheidari, "Design, Analysis, and Prototyping of a New Wound-Rotor Axial Flux