

بررسی اثر سیم‌بندی و خطای ناهم‌محوری در عملکرد ریزالورهای رلوکتانس متغیر

فرید توتونچیان

tootoonchian@iust.ac.ir

استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

امروزه ریزالورهای رلوکتانس متغیر به دلیل ساختار ساده، ابعاد کوچک و پایداری دمایی زیاد برای تشخیص موقعیت زاویه‌ای محورهای گردان، به‌ویژه در سیستم‌های ناوبری دریایی، کاربرد گسترده‌ای دارند. علیرغم این ویژگی‌های منحصر به فرد، استفاده از آنها با چالش‌هایی نظیر پیچیدگی سیم‌بندی و اثرپذیری از خطای ناهم‌محوری، روبروست. در این مقاله پس از بررسی این چالش‌ها، یک ساختار جدید، با سیم‌پیچی ساده برای رفع این چالش‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سپس عملکرد ریزالور جدید با ریزالور رلوکتانس متغیر مرسوم، در شرایط سالم و تحت خطای ناهم‌محوری با استفاده از تحلیل اجزای محدود سه بعدی مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. این مقایسه نشان می‌دهد؛ که تحت خطای ناهم‌محوری استاتیک مجاز بیرینگ‌های بکار رفته در ماشین‌های الکتریکی (۳۵ میکرومتر، مطابق استاندارد ABEC 492)، خطای موقعیت زاویه‌ای ریزالور جدید بیش از ۱۳ آرک-دقیقه بهبود یافته است. در پایان، نمونه آزمایشگاهی ریزالور جدید، ساخته شده و آزمایش می‌شود. نتایج آزمایش عملی نتایج شبیه‌سازی‌ها و کارایی ریزالور جدید را تایید می‌کنند.

واژگان کلیدی: ریزالور رلوکتانس متغیر، حسگر موقعیت، خطای ناهم‌محوری و تحلیل اجزای محدود سه بعدی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۰۴/۰۸

۱- مقدمه



شکل (۱) ریزالور بدون جاروبک دارای ترانسفورماتور گردان.

حسگرهای موقعیت جزء جدانشدنی سیستم‌های دریای ماشین‌های الکتریکی هستند [۱]. روش‌های مختلفی برای تعیین موقعیت، وجود دارد. مرسوم‌ترین این روش‌ها، استفاده از ریزالورها یا انکدرهای نوری است [۱-۳]. با وجود کاربرد گسترده‌تر انکدرها، در سرومکانیزم‌های نظامی به‌ویژه در مواردی که محیط آلوده، مرطوب و همراه با لرزش است؛ یا حسگری برای کارکرد در بازه وسیع تغییرات دمایی مورد نیاز است؛ ریزالورها ترجیح داده می‌شوند [۴-۵]. بنابراین مزایا، در اکثر حسگرهای بکار رفته در سرومکانیزم‌های دریایی، نظیر: حسگر موقعیت زاویه‌ای بردار نرمال صفحه عمود بر محور دوران پروانه سیستم‌های نوابری دریایی یا حسگر موقعیت زاویه‌ای سکان انتخاب اول ریزالورها هستند. به طور مثال در یک رزم ناو یا ناوشکن در ردیف ناوهای "فلاخن"، "خنجر" و یا "پلنگ" ارتش جمهوری اسلامی ایران در حدود ۴۸ عدد سینکرو - ریزالور در سیستم کنترل بخش‌های مختلف از جمله موقعیت موشک انداز، رادار و پرتاب توپ و ... وجود دارد.

ریزالور، برای اولین بار، در صنایع مرتبط با نیروی دریایی آمریکا (در سامانه‌های باز و بست پل‌های دو بخشی متحرک) مطرح و استفاده شد [۶]. ریزالور ژنراتور سنکرون دو فازی است؛ که سیم‌پیچی تحریک آن به جای جریان DC با جریان AC تغذیه می‌شود [۷]. با توجه به این که سیم‌پیچی تحریک روی رتور قرار گرفته است؛ ساده‌ترین راه برای انتقال ولتاژ به آن، استفاده از حلقه‌های لغزان و جاروبک است. این نوع ریزالورهای جاروبک‌دار، قدیمی‌ترین نوع ریزالورها هستند. مهم‌ترین مشکل این ریزالورها، مربوط به افت ولتاژ روی جاروبک‌ها، ایجاد نویز، نیاز به تعمیر و نگهداری و ... است که سازندگان ریزالور را به استفاده از روش‌های بدون جاروبک سوق داده است [۴ و ۸].

اولین ایده در استفاده از ریزالورهای بدون جاروبک، استفاده از ترانسفورماتور گردان، همراه با ریزالور بود. استاتور این ترانسفورماتور روی استاتور ریزالور و رتور آن روی رتور ریزالور نصب می‌شود؛ و ولتاژ تحریک از طریق انتقال ترانسفورماتوری به سیم‌پیچی تحریک ریزالور منتقل می‌شود (شکل (۱)). گرچه این روش سال‌ها به عنوان روش مرسوم در صنایع ریزالورسازی مورد استفاده قرار گرفته است.

به دلیل افزودن دو سیم‌پیچ (سیم‌پیچی‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور گردان) به مجموعه سیم‌پیچی‌های ریزالور، پایداری دمایی ریزالور را با مشکل مواجه می‌کند. ضمناً، خطای شیفت فاز به دلیل ایده‌آل نبودن سیم‌پیچی‌های ترانسفورمر گردان به وجود می‌آید. دسته دوم ریزالورهای بدون جاروبک، ریزالورهای رلوکتانس متغیر هستند. در این دسته از ریزالورها منشاء ایجاد ولتاژ متغیر، تغییر رلوکتانس فاصله هوایی همراه با گردش رتور است.

رلوکتانس فاصله‌ی هوایی تابع دو متغیر طول و سطح مقطع مؤثر می‌باشد. بنابراین برای تغییر رلوکتانس می‌توان هر یک از این دو نوع متغیر را تغییر داد. بنابراین این دسته از ریزالورها خود به دو گروه تقسیم می‌شوند:

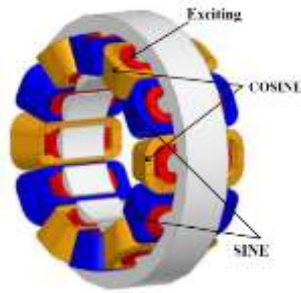
۱- رلوکتانس متغیر با طول فاصله هوایی

۲- رلوکتانس متغیر با تغییر سطح فاصله هوایی

دسته اول، به دلیل سهولت ساخت، ابعاد کوچک و مزایای حذف ترانسفورماتور گردان مورد توجه شرکت‌های بزرگ تولید کننده ریزالور قرار گرفته است. اساس کار این ریزالورها بر مبنای تغییر سینوسی طول فاصله هوایی است. رتور آنها بدون سیم‌پیچی است و سیم‌پیچی‌های تحریک و سیگنال همگی به صورت متمرکز روی دندانه‌های استاتور قرار گرفته‌اند. مشکلات این نوع ریزالورها عبارتند از:

(الف) عملکرد نامطلوب حسگر در شرایط خطای ناهم‌محوری: در این نوع ریزالور، دقت موقعیت آشکار شده، به شدت متأثر از نحوه نصب ریزالور است. به طوری که کوچک‌ترین ناهم‌محوری در فرایند نصب یا مونتاژ، خطای موقعیت بزرگی را ایجاد می‌کند [۱].

(ب) مشکل سیم‌پیچی حسگر: دقت این ریزالور متأثر از موقعیت نسبی سیم‌پیچی‌های روی هر دندانه است و در



شکل (۳) استاتور ریزالور رلوکتانس متغیر پیشنهادی [۱۰].

ولی در این روش نیز، توالی قرار گرفتن سیم‌پیچی‌ها یکسان نیست. به عنوان نمونه، روی دندانه ۱، سیم‌پیچی سینوسی، روی دندانه ۲، سیم‌پیچی تحریک و روی دندانه ۳، باز هم سیم‌پیچی سینوسی قرار گرفته است. در [۱] نشان داده شده است؛ که به ازای ۱۲ دندانه در استاتور رتور می‌تواند یک، پنج یا هفت برجستگی داشته باشد. با افزایش تعداد برجستگی دقت موقعیت خروجی افزایش می‌یابد. اما از سوی دیگر بهترین عملکرد در شرایط خطای ناهم‌محوری وقتی حاصل می‌شود که رتور دارای دو برجستگی باشد [۱]. از این رو در [۱] یک ریزالور رلوکتانس متغیر با ۲۴ شیار در استاتور و رتور دارای دو برجستگی طراحی شده است. با توجه به اینکه در ریزالورهای رلوکتانس متغیر با تغییر طول فاصله هوایی، با کاهش تعداد برجستگی‌های رتور، دقت موقعیت خروجی کاهش می‌یابد؛ شکل رتور طوری بهینه شده است که خطای ریزالور حداقل مقدار ممکن باشد. لذا، این ساختار به عنوان دقیق‌ترین ریزالور مرسوم دارای دو برجستگی و مقاوم در برابر خطای ناهم‌محوری انتخاب می‌شود. در این مقاله، ابتدا، ریزالور رلوکتانس متغیری با دو برجستگی روی رتور و دوازده شیار در استاتور معرفی می‌شود [۱] که ضمن داشتن مزایای ریزالور [۱]، سیم‌پیچی ساده‌تر و هزینه کم‌تری دارد. سپس، عملکرد دو ریزالور مذکور، در شرایط خطای ناهم‌محوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از شبیه‌سازی اجزای محدود سه بعدی، در حالت گذرا استفاده می‌شود. در پایان نمونه آزمایشگاهی ریزالور دقیق‌تر ساخته می‌شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایش عملی، نتایج شبیه‌سازی را تایید می‌کند.

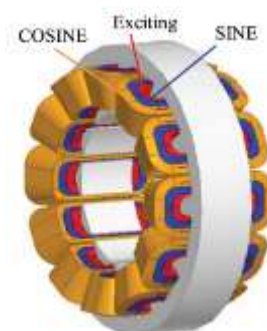
۲- معرفی ریزالورهای مورد بررسی

ریزالور اول، دارای ۲۴ شیار در استاتور است. هر یک از

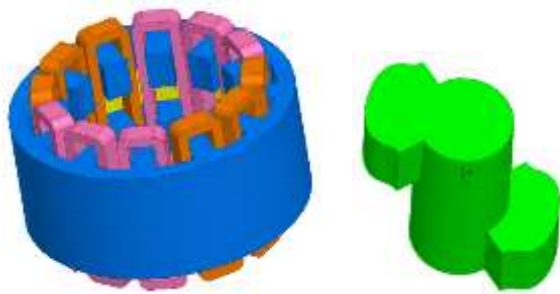
ضمن تعداد دور سیم‌پیچی‌های سینوسی و کسینوسی دور هر دندانه با دندانه دیگر متفاوت است. این امر فرایند تولید انبوه را با مشکل روبرو می‌کند. در ضمن، ترتیب پیچیده شدن سیم‌پیچی‌ها دور دندانه و یا جابجا شدن سیم‌پیچی‌ها نسبت به هم، دقت موقعیت خروجی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

پژوهش‌های زیادی برای برطرف کردن مشکلات فوق انجام شده است [۱]، [۳-۴] و [۸-۱۶]. در [۱۲] دور هر دندانه استاتور هر سه سیم‌پیچ‌های سینوسی، کسینوسی و تحریک پیچیده شده‌اند (شکل (۲)). ولی تعداد دندانه‌های استاتور و تعداد قطب‌ها به نحوی تعیین شده است؛ که تعداد دور سیم‌پیچی تحریک، سینوسی و کسینوسی روی همه دندانه‌ها یکسان باشد؛ ولی جهت پیچیده شدن آنها روی دو دندانه مجاور متفاوت باشد. اما همچنان مشکل متأثر بودن دقت موقعیت خروجی از ترتیب پیچیده شدن سیم‌پیچی‌ها وجود دارد؛ و دقت موقعیت خروجی نیز مورد تردید است. در [۱۰] آرایش دیگری برای سیم‌پیچی ارائه شده است که در آن سیم‌پیچی تحریک روی همه دندانه‌ها پیچیده می‌شود و سیم‌پیچی‌های سینوسی و کسینوسی به صورت یک در میان روی دندانه‌ها قرار می‌گیرند. ولی مطابق شکل (۳)، در این شرایط نیز روی هر دندانه دو سیم‌پیچی قرار می‌گیرد که جابجایی سیم‌پیچی‌های دور هر دندانه نسبت به یکدیگر، می‌تواند دقت موقعیت خروجی را تحت تأثیر قرار دهد.

اخیراً روش دیگری برای سیم‌بندی استاتور ارائه شده است که روی هر دندانه فقط یک سیم‌پیچی قرار می‌گیرد [۱] و [۱۱]. در این روش مطابق شکل (۴)، نه تنها سیم‌پیچی‌ها روی هم نیستند؛ بلکه، تعداد برجستگی‌های رتور طوری تعیین می‌شود؛ که تعداد دور هر سیم‌پیچی روی همه دندانه‌ها یکسان باشد.



شکل (۲) استاتور ریزالور رلوکتانس متغیر پیشنهادی [۱۲].



(الف)



(ب)

شکل (۵) ریزالور دوم (الف) استاتور و رتور و (ب) نمودار سیم-پیچی.

برای مقایسه بهتر، هر دو ریزالور با استفاده از نرم افزار اجزای محدود سه بعدی (Maxwell 16) مدل می شوند. مسلماً دقت نتایج شبیه سازی به کیفیت مش و گام حل مسأله بستگی دارد. هر قدر مش ها ظریف تر و گام حل مسأله کوچک تر باشد نتایج دقیق تر خواهند بود. ولی در مقابل زمان حل مسأله طولانی تر می شود. شکل (۶) شماتیک مش را روی هر دو ریزالور نشان می دهد. برای اطمینان از اشباع نشدن مدار مغناطیسی ریزالورها، توزیع چگالی شار مغناطیسی روی هر دو حسگر در شکل (۷)، آمده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده، حداکثر چگالی شار ۵۷/۳ میلی تسلا است و با توجه به حداکثر چگالی شار مجاز ماده فرومغناطیس هسته (MILSTD267) که ۰/۲۵ تسلا است؛ نگرانی ای در خصوص اشباع هسته وجود ندارد. در ادامه نتایج تحلیل حالت گذرای ریزالورها در حالت سالم و تحت خطای ناهم محوری مورد بررسی قرار می گیرد.

۴- مقایسه ریزالورها در حالت سالم

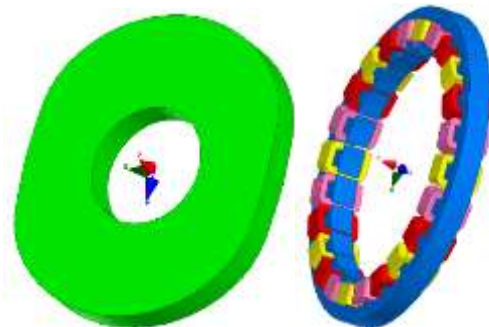
شکل های (۸-الف) و (۸-ب) ولتاژهای خروجی دو ریزالور را در حالت سالم نشان می دهد. توزیع هارمونیک پوش این سیگنال ها در شکل (۸-ج) آمده است.

سیم پیچی های تحریک و سیگنال به صورت مستقل روی یک دندانه پیچیده شده اند. رتور دارای دو برجستگی است و شکل آن طوری بهینه شده است که خطای موقعیت خروجی آن حداقل مقدار ممکن باشد [۱]. شکل (۴-الف) استاتور و رتور این ریزالور و شکل (۴-ب) تعداد دور و نحوه سیم پیچی آن را نشان می دهد [۱].

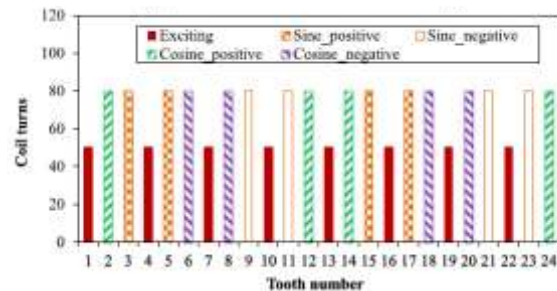
ریزالور دوم، دارای ۱۲ شیار در استاتور است. این شیارها به صورت محوری بوده و سیم پیچی های سیگنال را دربر گرفته اند. یک شیار جانبی هم به صورت عمود بر شیارهای اصلی، در وسط ارتفاع استاتور وجود دارد که تنها سیم پیچی تحریک این ریزالور را در خود جای داده است. رتور این ریزالور دارای برجستگی دوگانه است و طوری طراحی شده است که طول فاصله هوایی بین استاتور و رتور به صورت سینوسی تغییر کند. شکل (۵-الف) استاتور و رتور این ریزالور و شکل (۵-ب) نمودار سیم بندی آن را نشان می دهد.

۳- تحلیل اجزای محدود

برای بررسی عملکرد ریزالور ۱، می توان از تحلیل دو بعدی استفاده کرد ولی در مورد ریزالور ۲، لازم است تحلیل به صورت سه بعدی انجام شود.



(الف)



(ب)

شکل (۴) ریزالور رلوکنانس متغیر موجود (الف) استاتور و رتور ریزالور و (ب) نمودار سیم پیچی ریزالور [۱].

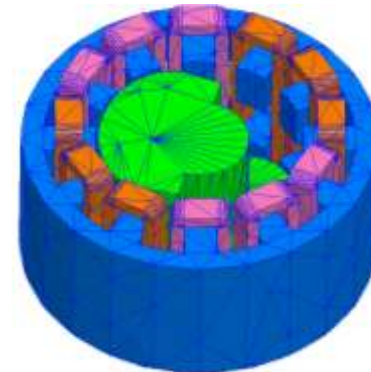
همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار THD پوش سیگنال‌های سینوسی و کسینوسی ریزالور ۱ به ترتیب ۱/۹۳٪ و ۱/۹۷٪ و این مقادیر برای ریزالور دوم ۱/۹۳٪ و ۱/۹۸٪ هستند. خطای موقعیت محاسبه شده از تانژانت معکوس نسبت پوش‌ها نسبت به موقعیت ایده‌ال، در دو ریزالور، در شکل (۸-د) آمده است. خطای ریزالور اول بین ۰/۸۲۰۸- و ۲/۴۹۹ درجه و خطای ریزالور دوم بین ۰/۸۱۸۲- و ۲/۶۰۹ درجه تغییر می‌کند. به عبارت دیگر مقدار قله تا قله خطای ریزالور اول ۳/۷۰۷ درجه و این مقدار برای ریزالور پیشنهادی ۳/۴۲۷ درجه است که ۷/۵۵٪ نسبت به خطای ریزالور اول کمتر است. این مقدار خطا برای ریزالورهای سالم عدد قابل ملاحظه‌ای است. ولی نکته قابل توجه این است که در عمل از ریزالور همراه با مبدل ریزالور به دیجیتال استفاده می‌شود و این مبدل بر اساس نوع خود می‌تواند با استفاده از الگوریتم‌های کاهش خطا، تا حد زیادی خطای موقعیت ریزالور را کاهش دهد [۱۷]. در این مقاله برای اینکه مقایسه مستقل از نوع مبدل مورد استفاده باشد؛ بدترین حالت (تانژانت معکوس نسبت ولتاژها) گزارش شده است. ملاحظه می‌شود که با وجود سیم‌پیچی ساده‌تر برای ریزالور دوم و تعداد شیار کمتر در استاتور آن که به معنی هزینه کمتر ساخت آن است؛ دقت موقعیت خروجی آن ۷/۵۵٪ کمتر از ریزالور اول است. در قسمت بعد عملکرد دو ریزالور در شرایط خطای ناهم‌محوری نیز مقایسه می‌شود.

۵- مقایسه ریزالورها تحت خطای ناهم‌محوری

در ریزالور سالم محور تقارن رتور، محور تقارن استاتور و محور چرخش، هر سه بر هم منطبق هستند. وقتی خطای ناهم‌محوری رخ می‌دهد تطابق این محورها از بین می‌رود. اگر محور تقارن رتور و محور چرخش بر هم منطبق باشند و محور تقارن استاتور به صورت موازی با این محورها فاصله بگیرد؛ خطای ناهم‌محوری استاتیک اتفاق افتاده است. اگر محور چرخش منطبق بر محور استاتور باشد و محور رتور از آنها فاصله بگیرد خطای ناهم‌محوری دینامیک اتفاق افتاده است. در ناهم‌محوری استاتیک طول فاصله هوایی در پیرامون رتور یکنواخت نخواهد بود. یک طرف طول فاصله هوایی کم می‌شود و یک طرف طول فاصله هوایی زیاد می‌شود ولی محل فاصله هوایی کوچک شده و محل فاصله هوایی بزرگ شده ثابت است.

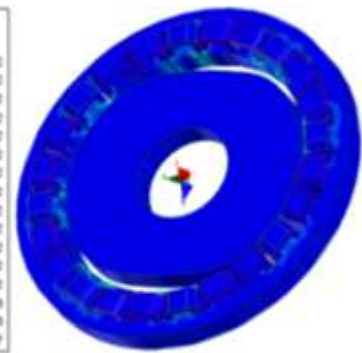


(الف)

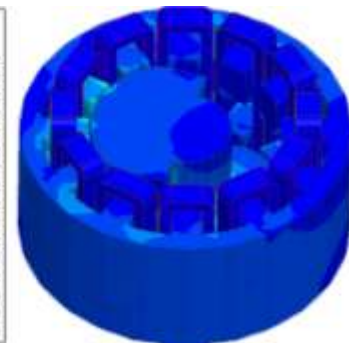


(ب)

شکل (۶) شماتیک مش را روی هر دو ریزالور (الف) ریزالور ۱ و (ب) ریزالور ۲.



(الف)



(ب)

شکل (۷) توزیع چگالی شار مغناطیسی روی هر دو حسگر (الف) ریزالور ۱ و (ب) ریزالور ۲.

سینوسی خارج شده‌اند. THD پوش سیگنال‌های خروجی برای ریزالور اول به ترتیب $3/93\%$ و $3/95\%$ برای سیگنال سینوسی و کسینوسی است. در حالی که این مقادیر برای ریزالور دوم $3/75\%$ و $3/8\%$ می‌باشد. به عبارت دیگر، حداقل افزایش THD پوش ولتاژهای خروجی در اثر وقوع خطای ناهم‌محوری استاتیک در ریزالور اول $103/63\%$ و در ریزالور دوم $91/92\%$ است.

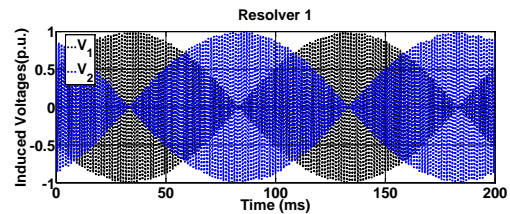
خطای موقعیت دو ریزالور در شرایط ناهم‌محوری در شکل (۹-د) نشان داده شده است. قله تا قله خطای موقعیت نسبت به موقعیت مرجع در مقایسه با ریزالور سالم برای ریزالور اول حدود 61% و برای ریزالور دوم حدود 57% افزایش یافته است. مقایسه خطای دو ریزالور نشان می‌دهد که ریزالور پیشنهادی با وجود ساختار ساده‌تر و ارزان‌تر، نتایج قابل مقایسه با ریزالور اول دارد. بنابراین در قسمت بعد این نوع ریزالور به صورت عملی ساخته می‌شود تا نتایج شبیه‌سازی تایید گردند.

۶- نتایج آزمایشگاهی

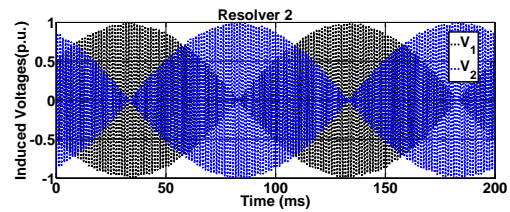
استاتور و رتور ریزالور ساخته شده در شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۰-ب) نشان داده شده است. شکل (۱۰-ج) مدار آزمایش این ریزالور را نشان می‌دهد. حسگر مرجع یک دستگاه تایکوپ با قدرت تفکیک یک دقیقه است که برای تولید و اندازه‌گیری موقعیت زاویه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای تعیین موقعیت عملی، ولتاژهای خروجی ریزالور در حالت سالم و تحت خطای ناهم‌محوری با استفاده از اسیلوسکوپ دیجیتال ذخیره می‌شوند. پوش این سیگنال‌ها مشابه سیگنال‌های خروجی نرم‌افزار اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار متلب استخراج می‌شود و سپس محتوای هارمونیک آنها تعیین می‌گردد. تانژانت معکوس نسبت پوش سیگنال سینوسی به کسینوسی، موقعیت خروجی را نشان می‌دهد. شکل (۱۰-د) سیگنال‌های خروجی ریزالور را در حالت سالم نشان می‌دهد. خطای موقعیت ریزالور در حالت سالم و تحت خطای ناهم‌محوری استاتیک 35 میکرومتری، در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود حداکثر مقدار خطا در مقایسه با موقعیت مرجع (تایکوپ گردان) (خطا در حالت سالم $2/174$ درجه و در حالت ناهم‌محور $3/136$ درجه) است ولی حداکثر خطای بین موقعیت تخمین زده شده توسط



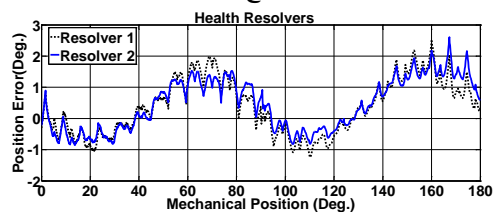
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی حالت گذرای دو ریزالور سالم (الف) ولتاژهای القایی در ریزالور ۱، (ب) ولتاژهای خروجی در ریزالور ۲، (ج) محتوای هارمونیک پوش ولتاژهای خروجی برای هر دو ریزالور و (د) خطای موقعیت هر دو ریزالور نسبت به موقعیت ایده‌آل.

در ناهم‌محوری دینامیک محل فاصله هوایی کوچک شده با چرخش رتور تغییر می‌کند. از آنجا که مطابق استاندارد ABEC492، حداکثر لقی شعاعی مجاز یاتاقان‌های به کار رفته در ماشین‌های الکتریکی، 35 میکرومتر است؛ ولتاژهای خروجی دو ریزالور با در نظر گرفتن این مقدار خطای ناهم‌محوری استاتیک، در شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب) آمده است. همانطور که در این شکل‌ها نشان داده شده است؛ علاوه بر خطای دامنه، خطای شیفت فاز هم در اثر ناهم‌محوری استاتیک ایجاد شده است. محتوای هارمونیک پوش این ولتاژها در شکل (۹-ج) نشان داده شده است. مقایسه شکل (۹-ج) با شکل (۸-ج) نشان می‌دهد که پوش ولتاژهای خروجی در اثر خطای ناهم‌محوری از حالت



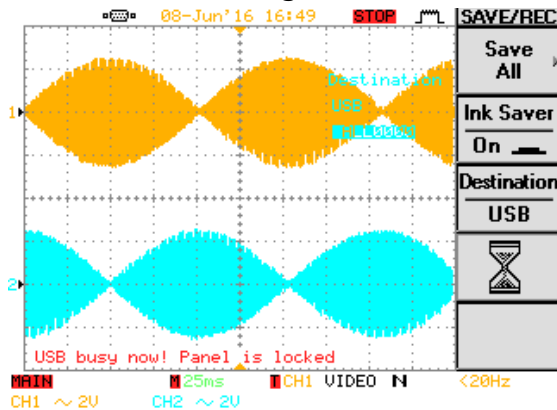
(الف)



(ب)



(ج)



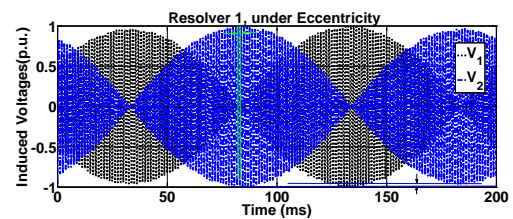
(د)

شکل (۱۰) نمونه آزمایشگاهی ریزالور ۲ (الف) استاتور، (ب) رتور، (ج) مدار آزمایش و (د) سیگنال‌های خروجی.

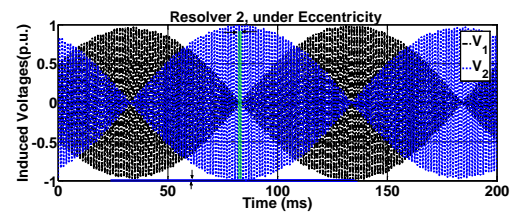
روش اجزای محدود و مقدار اندازه‌گیری شده توسط آزمایش عملی بسیار ناچیز (در ریزالور سالم، $0/068$ درجه و در ریزالور ناهم‌محور، $0/13$ درجه) است. در عمل خروجی ریزالور به مبدل ریزالور به دیجیتال متصل می‌شود و این مبدل تا حدود زیادی خطا نسبت به موقعیت مرجع را کم می‌کند [۱۷].

۷- نتیجه‌گیری

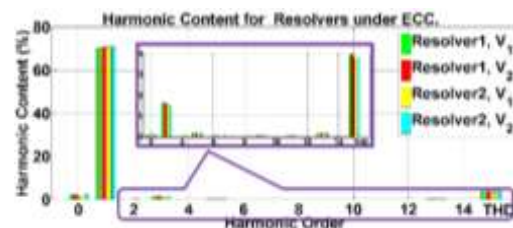
در این مقاله عملکرد دو ریزالور رلوکتانس متغیر با دو برجستگی روی رتور در شرایط سالم و با در نظر گرفتن خطای ناهم‌محوری مورد بررسی قرار گرفت.



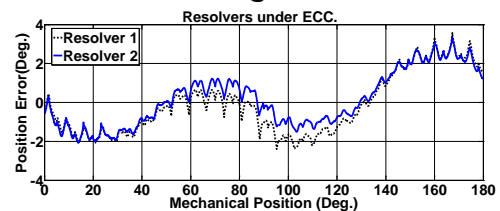
(الف)



(ب)



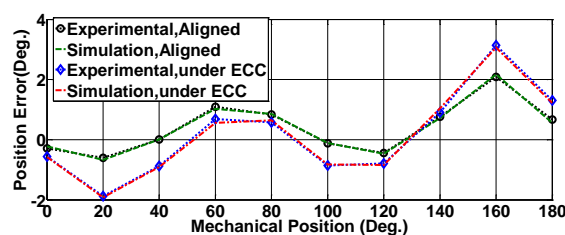
(ج)



(د)

شکل (۹) نتایج شبیه‌سازی حالت گذرای دو ریزالور با در نظر گرفتن خطای ناهم‌محوری استاتیک (الف) ولتاژهای القایی در ریزالور ۱ (ب) ولتاژهای خروجی در ریزالور ۲، (ج) محتوای هارمونیک پوش ولتاژهای خروجی برای هر دو ریزالور و (د) خطای موقعیت هر دو ریزالور نسبت به موقعیت ایده‌آل.

- Hybrid Electric Vehicle,” IEEE Trans. Magn., Vol.45, No.6, pp.2835–2838, 2009.
- [5] Park, S. I. and Kim, K. C., “Study on the Optimal Design of a Novel Slotless Resolver by FEM” IEEE Trans. on Magnetics, Vol.50, No.11, 2014.
- [6] Axsys Components Grope, “Resolver Engineering Handbook”, pp.1-35, 2004.
- [7] Tootoonchian, F., Nasiri-Gheidari, Z., “A Novel 12-Slot Two-Saliency Variable Reluctance Resolver with Nonoverlapping Signal Windings and Axial Flux Excitation”, IET Electric Power Applications, 2016,
- [8] Nasiri-Gheidari, Z. and Tootoonchian, F., Zare, F. “Design Oriented Technique for Mitigating Position Error Due to Shaft Run-out in Sinusoidal - Rotor Variable Reluctance Resolvers”, IET Electric Power Application, pp.132–141, 2016,
- [9] Shui-mei, C. , Hao, G. , “Stator Structure Design and Analysis of Variable Reluctance Resolver for Hybrid-Vehicle Motor Drive”, 7th Intern. IPEMC, Harbin, China, pp.2587-2592, 2012.
- [10] Zhang, Z., Ni, F., Dong, Y., Guo, C., Jin, M., and Liu, H., “A Novel Absolute Magnetic Rotary Sensor”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.62, No.7, pp.4408-4419, 2015.
- [11] Nasiri-Gheidari, Z. and Tootoonchian, F., “Axial Flux Resolver Design Techniques for Minimizing Position Error due to Static Eccentricities”, IEEE Sensors Journal, Vol.15, No.7, pp.4027-4034, 2015.
- [12] Sun, L., “Analysis and Improvement on the Structure of a Variable Reluctance Resolvers,” IEEE Trans. Magn., Vol.44, No.8, pp.2002–2008, 2008.
- [13] Ge, X., Zhu, Z. Q., Ren, R. and Chen, J. T., “A Novel Variable Reluctance Resolver with Nonoverlapping Tooth-Coil Windings”, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.30, No.2, pp.784-794, 2015.
- [14] Ge, X., Zhu, Z. Q., Ren, R. and Chen, J. T., “A Novel Variable Reluctance Resolver for HEV/EV Applications”, Transactions on Industry Applications, pp.1-6, 2016.
- [15] Ge, X., Zhu, Z. Q., Ren, R. and Chen, J. T., “Analysis of Windings in VR Resolver”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.51, No.5, 2015.
- [16] Kim, K.C., “Analysis on the Characteristics of Variable Reluctance Resolver Considering Uneven Magnetic Fields” IEEE Transaction on Magnetics, Vol.49, No.7, 2013.
- [17] Benammar, M., Ben-Brahim, L., and Alhamadi, M. A., “A High Precision Resolver-to-DC Converter”, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol.54, No.6, pp.2289 – 2296, 2005.



شکل (۱۱) نتایج آزمایش عملی: خطای موقعیت ریزالور پیشنهادی.

ریزالور اول دارای ۲۴ شیار در استاتور بود؛ که روی هر دندان استاتور یکی از سیم‌پیچی‌های تحریک، سینوسی یا کسینوسی، با توالی خاصی پیچیده شده بودند. تعداد شیار زیاد، پیچیدگی سیم‌بندی و اثرپذیری قابل توجه از خطای ناهم‌محوری، از جمله معایب این ریزالور بود. ریزالور دوم دارای ۱۲ شیار محوری و یک شیار محیطی روی استاتور بود. سیم‌پیچی‌های سینوسی و کسینوسی روی دندان‌های محوری با تعداد دور مساوی قرار گرفته بودند؛ و سیم‌پیچی تحریک در شیار محیطی وسط استاتور داخل یک قرقه پلی‌آمیدی قرار گرفته بود. مقایسه خطای ریزالورها در حالت سالم نشان داد؛ که ریزالور دوم علیرغم ساختار ساده (تعداد شیار کمتر و سیم‌بندی ساده‌تر) از دقت قابل مقایسه با ساختار اول برخوردار است. در عین حال، هنگام بروز خطای ناهم‌محوری ریزالور دوم در مقایسه با ریزالور ۱، کمتر متاثر شد.

در پایان، نمونه آزمایشگاهی ریزالور دوم ساخته شد؛ و تطابق خوب نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود سه بعدی با نتایج آزمایش عملی، صحت تحلیل را نشان داد.

۸- مراجع

- [1] Ge, X. and Zhu, Z. Q., “A Novel Design of Rotor Contour for Variable Reluctance Resolver by Injecting Auxiliary Air-Gap Permeance Harmonics”, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.31, No.1, pp. 345–353, 2016.
- [2] Jianhui, J., Jibin, Z., Fei, X., Yong, L., and Yanchao, F., “An Improved PMSM Rotor Position Sensor Base on Linear Hall Sensor,” IEEE Trans. Magn., Vol.48, No.11, pp.3591–3594, 2012.
- [3] Jin C. S., Jang, I. S., Bae, J. N., Lee, J., and Kim, W. H., “Proposal of Improved Winding Method for VR Resolver”, IEEE Transaction on Magnetics, Vol.51, No.3, pp.1-4, 2015.
- [4] Kim, K. C., Jin, C. S. and Lee, J., “Magnetic Shield Design Between Interior Permanent Magnet Synchronous Motor and Sensor for