# بررسی اثر سیمبندی و خطای ناهممحوری در عملکرد ریزالورهای رلوکتانس متغیر

فريد توتونچيان

tootoonchian@iust.ac.ir

ستادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیدہ

امروزه ریزالورهای رلوکتانس متغیر به دلیل ساختار ساده، ابعاد کوچک و پایداری دمایی زیاد برای تشخیص موقعیت زاویه ای محورهای گردان، بهویژه در سیستمهای ناوبری دریایی، کاربرد گسترده ای دارند. علیرغم این ویژگیهای منحصر به فرد، استفاده از آنها با چالش هایی نظیر پیچیدگی سیم بندی و اثر پذیری از خطای ناهم محوری، روبروست. در این مقاله پس از بررسی این چالش ها، یک ساختار جدید، با سیم پیچی ساده برای رفع این چالش ها مورد مطالعه قرار می گیرد. سپس عملکرد ریزالور جدید با ریزالور رلوکتانس متغیر مرسوم، در شرایط سالم و تحت خطای ناهم محوری با استفاده از تحلیل اجزای محدود سه بعدی مورد بررسی و مقایسه قرار می گیرد. این مقایس نشان می دهد؛ که تحت خطای ناهم محوری استانیک مجاز بیرینگهای بکار رفته در ماشینهای الکتریکی (۳۵ میکرومتر، مطابق استاندارد مهان می دهد؛ که تحت خطای ناهم محوری استانیک مجاز بیرینگهای بکار رفته در ماشینهای الکتریکی (۳۵ میکرومتر، مطابق استاندارد مهان می دهد؛ که تحت خطای ناهم محوری استانیک مجاز بیرینگهای بکار رفته در ماشینهای الکتریکی (۳۵ میکرومتر، مطابق استاندارد مهان می دهد؛ که تحت خطای ناهم محوری استانیک مجاز بیرینگهای بکار رفته در ماشینهای الکتریکی (۳۵ میکرومتر، مطابق استاندارد مواجع شرای می دو آزمایش می مود. نتایج آزمایش عملی نتایج شبیه ای و کارایی ریزالور جدید را تایید می کند.

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

۹۵/• ۹/۳•	تاريخ دريافت مقاله :
٩۶/•۴/•٨	تاريخ پذيرش مقاله :

#### ۱– مقدمه

حسـگرهای موقعیت جزء جدانشدنی سیستمهای درایو 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 نياز است؛ ريزالورها ترجيح داده مي شوند [۴–۵]. بنابراين مزایا، در اکثر حسیگرهای بکار رفته در سیرومکانیزمهای دریایی، نظیر: حسکر موقعیت زاویه ای بردار نرمال صفحه عمود بر محور دوران پروانه سیستمهای ناوبری دریایی یا حسگر موقعیت زاویه ای 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، قدیمی ترین 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 [۴و۸].

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 می شود؛ و ولتاژ تحریک از طریق انتقال ترانسفورماتوری به سیمپیچی تحریک ریزالور منتقل می شود (شکل (۱)). گرچه این روش سالها به عنوان روش مرسوم در صنایع ریزالورسازی مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۱) ریزالور بدون جاروبک دارای ترانسفورماتور گردان.

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.

رلوكتانس فاصلهى هوايي تابع دو متغير طول و سطح مقطع مؤثر مىباشد. بنابراين براى تغيير رلوكتانس مىتوان هريك از این دو نوع متغیر را تغییر داد. بنابراین این دسته از ریزالورها خود به دو گروه تقسیم میشوند: ۱-رلوكتانس متغير با طول فاصله هوايي ۲-رلوكتانس متغير با تغيير سطح فاصله هوايي 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 حسـگر در شـرایط خطای ناهم محوری: 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 می کند [۱]. (ب) مشکل سیم پیچی حسگر: دقت این ریزالور متأثر از موقعیت نسبی سیمپیچیهای روی هر دندانه است و در

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.

یژوهشهای زیادی برای برطرف کردن مشکلات فوق انجام شـده اسـت [1]، [۳–۴] و [۸–۱۶]. در [۱۲] دور هر دندانه استاتور هر سه سیم پیچهای سینوسی، کسینوسی و تحریک پیچیده شدهاند (شکل (۲)). ولی تعداد دندانههای استاتور و تعداد قطبها به نحوی تعیین شـده اسـت؛ که تعداد دور سیم پیچی تحریک، سینوسی و کسینوسی روی همه دندانهها یکسان باشد؛ ولی جهت پیچیده شدن آنها روی دو دندانه مجاور متفاوت باشد. اما همچنان مشكل متأثر بودن دقت موقعیت خروجی از ترتیب پیچیده شدن سیم پیچیها وجود دارد؛ و دقت موقعیت خروجی نیز مورد تردید است. در [۱۰] آرایش دیگری برای سیم پیچی ارائه شده است که در آن سیم پیچی تحریک روی همه دندانه ها پیچیده میشود و سیمپیچیهای سینوسی و کسینوسی به صورت یک در میان روی دندانهها قرار می گیرند. ولی مطابق شکل (۳)، در این شـرایط نیز روی هر دندانه دو سـیم ییچی قرار می گیرد که جابجایی سیم پیچی های 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 و۱۱]. در این روش مطابق شکل (۴)، نه تنها سیمپیچیها روی هم نیستند؛ بلکه، تعداد برجستگیهای رتور طوری تعیین می شود؛ که تعداد دور هر سیمپیچی روی همه دندانهها یکسان باشد.



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



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

ولی در این روش نیز، توالی قرار گرفتن سیم پیچیها یکسان نیست. به عنوان نمونه، روی دندانه ۱، سیم پیچی سینوسی، روی دندانه ۲، سیم پیچی تحریک و روی دندانه ۳، باز هم سیم پیچی سینوسی قرار گرفته است. در [۱] نشان داده شـده اسـت؛ که به ازای ۱۲ دندانه در استاتور رتور می تواند یک، پنج یا هفت برجستگی داشته باشد. با افزایش تعداد برجستگی دقت موقعیت خروجی افزایش می یابد. اما از سوی دیگر بهترین عملکرد در شرایط خطای ناهممحوری وقتی حاصل می شود 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؛ شــکل 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 ناهم محوری انتخاب می شود. در این مقاله، ابتدا، ریزالور رلوکتانس متغیری با دو برجستگی روی رتور و دوازده شیار در استاتور معرفی می شود [ای] که ضمن داشتن مزایای ریزالور [۱]، سیم پیچی ساده تر و هزینه کم تری دارد. سپس، عملکرد دو ریزالورمذکور، در شرایط خطای ناهممحوری مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور از شبیه سازی اجزای محدود سه بعدی، در حالت گذرا استفاده می شود. در پایان نمونه آزمایشگاهی ریزالور دقیقتر ساخته می شود. مقایسه نتایج شبیهسازی و آزمایش عملی، نتایج شبیهسازی را تایید مىكند.

۲- معرفی ریزالورهای مورد بررسی ریزالور اول، دارای ۲۴ شـیار در اسـتاتور اسـت. هر یک از

سیمپیچیهای تحریک و سیگنال به صورت مستقل روی یک دندانه پیچیده شدهاند. رتور دارای دو برجستگی است و شـکل آن طوری بهینه شـده اسـت که خطای موقعیت خروجی آن حداقل مقدار ممکن باشـد [۱]. شـکل (۴-الف) استاتور و رتور این ریزالور و شکل (۴-ب) تعداد دور و نحوه سیمپیچی آن را نشان میدهد[۱].

ریزالور دوم، دارای ۱۲ شیار در استاتور است. این شیارها به صورت محوری بوده و سیمپیچیهای سیگنال را دربرگرفتهاند. یک شیار جانبی هم به صورت عمود بر شیارهای اصلی، در وسط ارتفاع استاتور وجود دارد که تنها سیمپیچی 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 سیمبندی آن را نشان میدهد.

## ۳- تحلیل اجزای محدود

برای بررســی عملکرد ریزالور ۱، میتوان از تحلیل دو بعدی اســـتفاده کرد ولی در مورد ریزالور ۲، لازم اســت تحلیل به صورت سه بعدی انجام شود.









برای مقایسه بهتر، هر دو ریزالور با استفاده از نرمافزار اجزای محدود سـه بعدی (Maxwell 16) مدل می شـوند. مسـلماً دقت نتایج شـبیهسـازی به کیفیت مش و گام حل مسـأله بسـتگی دارد. هر قـدر مش ها ظریف تر و گام حل مسـأله کوچک تر باشـد نتایج دقیق تر خواهند بود. ولی در مقابل زمان حل مسأله طولانی تر می شود. شکل (۶) شماتیک مش را روی هر دو ریزالور نشـان می دهد. برای اطمینان از اشباع نشـدن مـدار مغناطیسـی ریزالورها، توزیع چگالی شـار مغناطیسی روی هر دو حسـگر در شـکل (۷)، آمده است. شـار ۵۷/۳ میلی تسلا است و با توجه به حداکثر چگالی شار مجاز ماده فرومغناطیس هسـته (MILSTD267) که ۰/۱۵ تسـلا 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

شکلهای (۸-الف) و (۸-ب) ولتاژهای خروجی دو ریزالور را در حالت سالم نشان میدهد. توزیع هارمونیکی پوش این سیگنالها در شکل (۸-ج) آمده است.

همانطور که ملاحظه می شود 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 یوشها نسبت به موقعیت ایدهال، در دو ریزالور، در شکل (۸-د) آمده است. خطای ریزالور اول بین ۱/۲۰۸ و ۲/۴۹۹ درجه و خطای ریزالور دوم بین 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 كمتر 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 می شود و این مبدل بر اساس نوع خود می تواند با استفاده از الگوریتم های 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 معكوس نسبت ولتاژها) گزارش شده است. ملاحظه می شود که با وجود سیم پیچی ساده تر 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 می شود.

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 می رود. 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 می شود و یک طرف طول فاصله هوایی زیاد می شود ولی محل فاصله هوایی کوچک شده و محل فاصله هوایی بزرگ شده ثابت است.









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

در ناهم محوری دینامیک محل فاصله هوایی کوچک شده با چرخش رتور تغییر می کند. از آنجا که مطابق استاندارد ABEC492، حداکثر لقی شعاعی مجاز یاتاقانهای به کار رفته در ماشینهای الکتریکی، ۳۵ میکرومتر است؛ ولتاژهای خروجی دو ریزالور با در نظر گرفتن این مقدار خطای ناهم محوری استاتیک، در شکلهای (۹–الف) و (۹–ب) آمده است. همانطور که در این شکلها نشان داده شده است؛ ناهم محوری استاتیک ایجاد شده است. محتوای هارمونیکی پوش این ولتاژها در شکل (۹–ج) نشان میدهد که پوش مقایسه شکل (۹–ج) با شکل (۸–ج) نشان میدهد که پوش

سینوسی خارج شدهاند. THD پوش سیگنالهای خروجی برای ریزالور اول به ترتیب ۳/۹۳ ٪ و ۳/۹۵ ٪ برای سیگنال سینوسی و کسینوسی است. در حالی که این مقادیر برای ریزالور دوم ۳/۷۵ ٪ و ۳/۸ ٪ میباشد. به عبارت دیگر، حداقل افزایش THD پوش ولتاژهای خروجی در اثر وقوع خطای ناهممحوری استاتیک در ریزالور اول ۱۰۳/۶۳ ٪ و در ریزالور دوم ۹۱/۹۲ ٪ 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 ۶۱٪ و برای ریزالور دوم حدود ۵۷٪ افزایش یافته است. مقایسه خطای دو ریزالور نشان میدهد که ریزالور پیشنهادی با وجود ساختار سادهتر و ارزان تر، نتایج قابل مقایسه با ریزالور اول دارد. بنابراین در قسمت بعد این نوع ریزالور به صورت عملی ساخته می شود تا نتایج شبیه سازی 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 اندازه گیری موقعیت زاویهای مورد استفاده قرار می گیرد. برای تعیین موقعیت عملی، ولتاژهای خروجی ریزالور در حالت سالم و تحت خطای ناهممحوری با استفاده از اسيلوسكوپ ديجيتال ذخيره مىشوند. پوش اين سيگنالها مشابه سیگنالهای خروجی نرمافزار اجزای محدود با استفاده از نرمافزار متلب استخراج می شود و سپس محتوای هارمونيكي آنها تعيين مي گردد. تانژانت معكوس 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 ناهم محوری استاتیک ۳۵ میکرومتری، در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

همانطور که ملاحظه می شود حداکثر مقدار خطا در مقایسه با موقعیت مرجع (تایکوپ گردان) (خطا در حالت سالم ۲/۱۷۴ درجه و در حالت ناهم محور ۳/۱۳۶ درجه) است ولی حداکثر خطای بین موقعیت تخمین زده شده توسط

روش اجزای محدود و مقدار اندازه گیری شده توسط آزمایش عملی بسیار ناچیز (در ریزالور سالم، ۰/۰۶۸ درجه و در ریزالور ناهممحور، ۰/۱۳ درجه) است. در عمل خروجی ریزالور به مبدل ریزالور به دیجیتال متصل می شود و این مبدل تا حدود زیادی خطا نسبت به موقعیت مرجع را کم می کند [۱۷].

### ۷- نتیجهگیری

در این مقاله عملکرد دو ریزالور رلوکتانس متغیر با دو برجساتگی روی رتور در شارایط سالم و با در نظر گرفتن خطای ناهم محوری مورد بررسی قرار گرفت.



شکل (۹) نتایح 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 هارمونیکی پوش ولتاژهای خروجی برای هر دو ریزالور و (د) خطای موقعیت هر دو ریزالور نسبت به موقعیت ایدهآل.



(الف)











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 Resolver Design Techniques Flux 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 Applications", Transactions HEV/EV on Industry Applications, pp.1-6, 2016.
- [15] Ge1, 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.



ریزالور اول دارای ۲۴ شــیار در اســتاتور بود؛ که روی هر دندانه 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 دندانههای محوري با تعداد دور مساوى قرار گرفته بودند؛ و سیم پیچی تحریک در شیار محیطی وسط استاتور داخل یک قرقره یلیآمیـدی قرار گرفتـه بود. مقـایســه 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 ناهم محوری 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 ٫۱ 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

سال چهارم – تابستان ۹۶