

بررسی تأثیر شار نشتی ترانسفورماتور گردان روی موقعیت خروجی ریزالورهای بدون جاروبک شار محوری

زهرا نصیری قیداری^۱، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شریف - تهران - ایران - znasiri@sharif.edu

چکیده: ریزالور، حسگر موقعیتی است که به صورت الکترومغناطیسی، موقعیت زاویه‌ای محور گردان را تعیین می‌کند. در این مقاله تأثیر شار نشتی ترانسفورماتور گردان روی ولتاژهای القایی در سیم‌پیچی‌های سیگنال و دقت موقعیت محاسبه‌شده توسط ریزالور مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس، روش‌هایی برای کاهش اثرپذیری موقعیت آشکارشده، از شار نشتی ریزالور، پیشنهاد می‌شود. در ادامه با استفاده از روش اجزای محدود سه‌بعدی در حالت گذرا، راهکارهای پیشنهادی برای دو نوع ریزالور بدون جاروبک شار محوری شبیه‌سازی می‌شوند. در پایان بهترین روش‌ها برای هر دو ریزالور، به صورت عملی پیاده می‌شود. مقایسه نتایج آزمایش عملی و شبیه‌سازی، موفقیت روش‌های حفاظت پیشنهادی را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: حسگر موقعیت، ریزالور شار محوری، ترانسفورماتور گردان، شار نشتی، حفاظ.

Investigating the Effect of the Rotary Transformer Leakage Flux on the Detected Position of Axial Flux Brushless Resolvers

Z. Nasiri-Gheidari¹, Assistant Professor

1- School of Electrical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, Email: znasiri@sharif.edu

Abstract: Resolver is an electromagnetic position sensors that are used for determining the position of rotating shaft. In this paper, effect of the leakage flux of the rotary transformer on the induced voltage in signal windings and detected position is discussed. Then, different electromagnetic shields are proposed to decrease the influence of detected position form leakage flux. The proposed methods are examined using 3-D time stepping finite element method for two axial flux brushless resolvers. Finally, prototypes of both resolvers based on the optimized proposed topologies are constructed and tested. Good agreement is obtained between the simulation and experimental results, validating the success of the proposed shielding.

Keywords: Position sensor, axial flux resolver, rotary transformer, leakage flux, electromagnetic shielding.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۹

نام نویسنده مسئول: زهرا نصیری قیداری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان آزادی - دانشگاه صنعتی شریف - دانشکده مهندسی برق - طبقه هفتم - اتاق ۷۱۲.

۱- مقدمه

تانژانت معکوس نسبت ولتاژهای القایی در سیم‌پیچی‌های سیگنال، طبق رابطه زیر، موقعیت زاویه‌ای خروجی را نشان می‌دهد:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_{SIN}}{V_{COS}} \quad (۴)$$

در عمل برای یافتن موقعیت زاویه‌ای روتور از انواع مبدل‌های ریزالور به دیجیتال در خروجی ریزالور استفاده می‌شود. نوع مرسوم این مبدل، نوع ترکیب است که با تولید ولتاژ تحریک ریزالور و استفاده از فیدبک، میزان خطا را به حداقل می‌رساند.

با توجه به اینکه سیم‌پیچی تحریک روی روتور قرار گرفته است؛ ساده‌ترین راه برای انتقال ولتاژ به آن استفاده از حلقه‌های لغزان و جاروبک است. این نوع ریزالورها، قدیمی‌ترین نوع ریزالورها هستند. مهم‌ترین مشکل ریزالورهای جاروبک‌دار، مربوط به افت ولتاژ روی جاروبک‌ها، وجود نویز و نیاز به تعمیر و نگهداری است [۹]. برای رفع این مشکلات، از روش‌های بدون جاروبک استفاده می‌شود.

ریزالورهای بدون جاروبک به چند دسته تقسیم می‌شوند: از نظر قدمت، اولین ریزالورهای بدون جاروبک، ریزالورهای دارای ترانسفورماتور گردان هستند [۱۲]. در این ریزالورها، برای تغذیه سیم‌پیچی تحریک، از ولتاژ القاشده در ثانویه یک ترانسفورماتور گردان استفاده می‌شود. اولیه ترانسفورماتور گردان روی استاتور ریزالور و ثانویه آن روی روتور ریزالور قرار دارد. بنابراین ولتاژ تحریک مورد نیاز به صورت ترانسفورمیری و بدون جاروبک به روتور منتقل می‌شود. شکل ۱، این نوع ریزالور را در دو حالت شار شعاعی و شار محوری نشان می‌دهد.

دسته دوم ریزالورهای بدون جاروبک، ریزالورهای رلوکتانس متغیر هستند. در این ریزالورها روتور بدون سیم‌پیچی ساخته می‌شود و همه سیم‌پیچی‌های سیگنال و تحریک روی استاتور قرار می‌گیرد. اساس کار این ریزالورها بر پایه تغییر سینوسی رلوکتانس مسیر عبور شار بین استاتور و روتور است [۱۳-۱۶]. این تغییر سینوسی رلوکتانس می‌تواند بر اساس تغییر سینوسی طول فاصله هوایی یا تغییر سینوسی سطح مقطع عبور شار تأمین شود. بنابراین دو نوع ریزالور رلوکتانس متغیر به وجود می‌آید. شکل ۲، این دو نوع ریزالور را نشان می‌دهد. ریزالورهای رلوکتانس متغیر، علی‌رغم سادگی ساختار، با چالش‌هایی روبرو هستند. دقت موقعیت خروجی این ریزالورها به شدت متأثر از دقت فرایند نصب آن‌ها روی موتور است [۱۵]. وقوع خطای ناهم‌محوری یا جابه‌جایی در راستای محور (Run out Error) که خطاهای اجتناب‌ناپذیری هستند، موقعیت خروجی آن‌ها را بسیار مخدوش می‌کند. از سوی دیگر فرایند سیم‌پیچی آن‌ها نیز با مشکلاتی روبرو است. بیشترین دقت در این نوع ریزالورها وقتی حاصل می‌شود که هر سه سیم‌پیچی‌های سینوسی، کسینوسی و تحریک روی هر دندان استاتور پیچیده شوند. اما نحوه قرار گرفتن این سیم‌پیچی‌ها نسبت به هم و حتی ترتیب پیچیده شدنشان روی دندان استاتور، کیفیت سیگنال خروجی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی برای رفع مشکلات یادشده در این ریزالورها انجام شده است [۳، ۱۴-۱۳]؛ ولی

امروزه ماشین‌هایی که با استفاده از اینورتر درایو می‌شوند (نظیر ماشین‌های IPM و BLDC)، در بسیاری از کاربردهای صنعتی، مورد استفاده و توجه قرار گرفته‌اند [۲-۱]. برای دستیابی به عملکرد بهتر در این ماشین‌ها و انجام کموتاسیون الکترونیکی، لازم است موقعیت محور گردان به صورت دقیق تعیین شود [۸-۳]. با توجه به معایب روش‌های بدون حسگر، اینورترهای صنعتی از حسگرهای موقعیت زاویه‌ای بهره می‌گیرند. حسگرهای به‌کاررفته برای این منظور، معمولاً از روش‌های لیزری، خازنی، پیزوالکتریک، مقاومتی، الکترواستاتیکی، نوری، مغناطیسی و سونار استفاده می‌کنند [۹]. از این میان روش‌های نوری و مغناطیسی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان اهمیت ویژه می‌یابند. مرسوم‌ترین حسگرهایی که از روش‌های نوری و مغناطیسی استفاده می‌کنند؛ انکدرهای نوری و ریزالورها هستند. هرچند در بسیاری کاربردها، انکدرهای نوری به ریزالورها ترجیح داده می‌شوند. در شرایطی که محیط آلوده، با تغییرات وسیع دمایی و همراه با لرزش است؛ انکدرها قابل استفاده نیستند و ریزالورها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳، ۱۱-۱۰].

در این مقاله روشی برای کاهش تأثیر شار نشستی ترانسفورماتور گردان روی ولتاژهای خروجی ریزالور مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، ابتدا انواع ریزالورها معرفی می‌شود و مزایا و چالش‌های آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از مرور پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص ریزالورها در بخش دوم، لزوم تحقیق در خصوص تأثیر شارهای نشستی ترانسفورماتور گردان تبیین می‌شود. سپس مشخصات فنی ریزالورهای مورد بررسی در بخش سوم بیان می‌شود. در بخش چهارم شبیه‌سازی اجزای محدود سه‌بعدی برای ریزالورهای مورد بررسی انجام می‌شود و در بخش پنجم نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌شوند. بخش ششم نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲- انواع ریزالورها

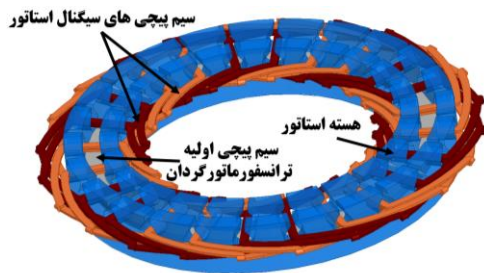
ریزالور ژنراتور سنکرون دوفازی است که سیم‌پیچی تحریک آن با استفاده از ولتاژ متناوب، مطابق رابطه زیر تغذیه می‌شود:

$$V_{exc} = v_m \cos \omega_f t \quad (۱)$$

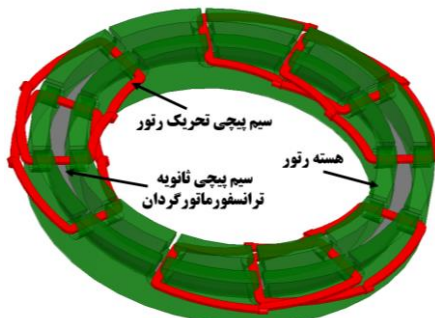
طبق این تعریف، ریزالورهای مرسوم عموداً از سیم‌پیچ تحریک روی روتور و دو سیم‌پیچی عمود برهم، روی استاتور که سیم‌پیچی‌های سیگنال نامیده می‌شوند؛ تشکیل شده‌اند. در حالت ایده‌آل اگر سیم‌پیچی روتور با ولتاژ سینوسی مطابق رابطه (۱) تغذیه شود و روتور با سرعت زاویه‌ای ثابت چرخانده شود؛ ولتاژهای القایی در سیم‌پیچی‌های سیگنال مطابق رابطه‌های زیر خواهند بود:

$$V_{SIN} = v_m \sin \theta \cos \omega_f t \quad (۲)$$

$$V_{COS} = v_m \cos \theta \cos \omega_f t \quad (۳)$$



الف



ب

شکل ۳: ریزالور بدون جاروبک شار محوری دارای ترانسفورماتور گردان [۱۷]: الف) استاتور و ب) روتور

در ریزالور شکل ۳، شیاری به صورت محیطی در هسته دیسکی استاتور و روتور، ایجاد شده و سیم پیچی اولیه و ثانویه ترانسفورماتور گردان در آن قرار گرفته است. به این ترتیب فضای موجود در قطر داخلی حسگر خالی شده و ریزالور می تواند با قطر کوچک تر ساخته شود [۱۷]. اما یک مسئله مهم دیگر در خصوص استفاده از ترانسفورماتور گردان، تأثیر شار نشتی سیم پیچی های ترانسفورماتور گردان، روی ولتاژ القاشده در سیم پیچی های سیگنال است که دقت موقعیت تعیین شده توسط ریزالور را تحت تأثیر قرار می دهد.

در این مقاله تأثیر شار نشتی ترانسفورماتور گردان روی ولتاژهای خروجی ریزالور مورد بررسی قرار می گیرد. سپس روش هایی برای کاهش این تأثیر پیشنهاد می شود و کارایی آنها با استفاده از روش اجزای محدود سه بعدی تأیید می گردد. در پایان، مؤثرترین روش برای کاهش تأثیر شارهای نشتی به صورت عملی آزمایش می شود. تطابق خوب نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی، کارایی روش را تأیید می کند.

۳- مشخصات فنی ریزالورهای مورد بررسی

ریزالورهای مورد بررسی، ریزالورهای شار محوری یکبر، با روتور سیم پیچی شده هستند. در ریزالور اول، مطابق شکل ۱-ب، ترانسفورماتور گردان در قطر داخلی هسته قرار گرفته است؛ در حالی که در ریزالور دوم، مطابق شکل ۳، ترانسفورماتور گردان در شیاری در وسط هسته استاتور و روتور قرار گرفته است. ابعاد اصلی این ریزالورها در جدول ۱، آمده است. سیم پیچی اولیه ترانسفورماتور گردان در هر دو ریزالور با ولتاژ سینوسی ۵ ولتی با فرکانس ۴ کیلوهرتز تغذیه می شود.

همچنان دقیق ترین ریزالورها، ریزالورهای دارای ترانسفورماتور گردان هستند. البته وجود ترانسفورماتور گردان در این ریزالورها مسائلی را ایجاد می کند. از جمله آنها می توان به خطای شیفت فاز در اثر ایده آل نبودن سیم پیچی های ترانسفورماتور گردان اشاره کرد [۱۰]. این خطا تا حدود زیادی توسط مبدل ریزالور به دیجیتال قابل رفع است. مسئله دیگری که وجود ترانسفورماتور گردان ایجاد می کند؛ افزایش طول حسگر در ریزالورهای شار شعاعی (شکل ۱-الف) و افزایش قطر حسگر در ریزالورهای شار محوری (شکل ۱-ب) است. این مشکل، با حذف هسته ترانسفورماتور گردان در ریزالور شکل ۳، برطرف شده است [۱۷].

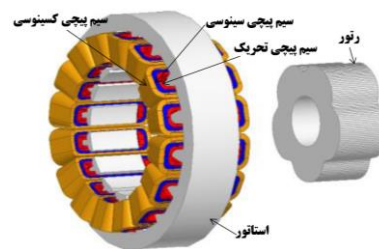


الف

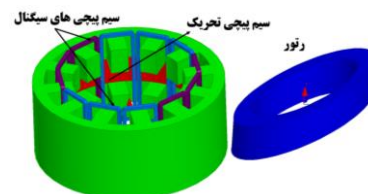


ب

شکل ۱: ریزالور بدون جاروبک دارای ترانسفورماتور گردان؛ الف) ریزالور شار شعاعی و ب) ریزالور شار محوری



الف

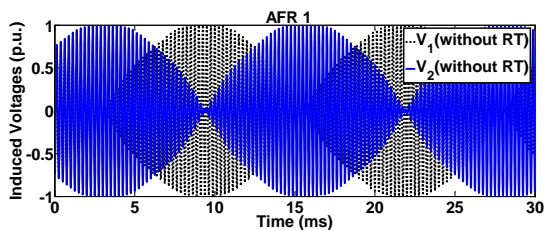


ب

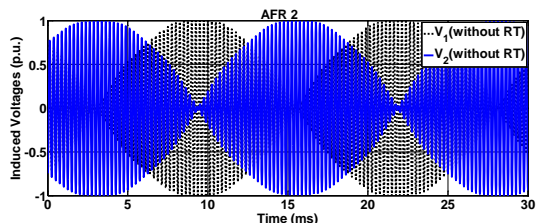
شکل ۲: انواع ریزالور رلوکتانس متغیر؛ الف) با تغییر طول فاصله هوایی [۱۳] و ب) با تغییر سطح مقطع عبور شار [۱۶]

جدول ۱: ابعاد هندسی ریزالورهای مورد بررسی

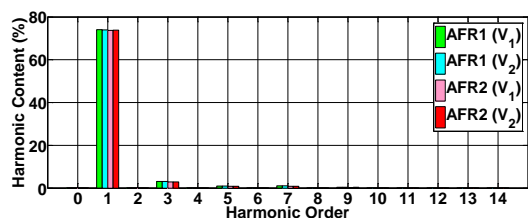
مقدار	واحد	کمیت
۷۲	mm	قطر خارجی استاتور / روتور ریزالور
۵۲	mm	قطر داخلی استاتور / روتور ریزالور
۱۵	mm	ارتفاع هسته استاتور/روتور
۶	-	تعداد قطب
دو طبقه توزیع شده	-	نوع سیم پیچی های سیگنال
۱۰۰	-	تعداد دور هر فاز (سیگنال)
۵۰	-	تعداد دور سیم پیچی تحریک
۰/۵	mm	طول فاصله هوایی
یک طبقه توزیع شده	-	نوع سیم پیچی روتور
۱۲/۲۴	-	تعداد شیار استاتور / روتور
۰/۱۰	mm	قطر سیم سیگنال



الف



ب



ج

شکل ۴: خروجی ریزالورها در حالت ایده آل؛ الف) ولتاژهای خروجی ریزالور اول، ب) ولتاژهای خروجی ریزالور دوم، ج) محتوای هارمونیک پوش ولتاژهای دو ریزالور

در ریزالور دوم با در نظر گرفتن اثر سیم پیچی ترانسفورماتور گردان، حداکثر THD پوش ولتاژهای خروجی به ۴/۹۸ درصد می رسد که در مقایسه با حالت ایده آل ۱۸/۸۵ درصد افزایش یافته است. با توجه به اینکه هسته ترانسفورماتور گردان و سیم پیچی های سیگنال در ریزالور دوم مشترک هستند؛ تأثیر شار نشستی ترانسفورماتور گردان نیز، در آن بیشتر است. لازم به ذکر است که افزایش THD پوش ولتاژهای خروجی ریزالور، به معنی افزایش خطای موقعیت است و به دلیل تأثیر شار نشستی ترانسفورماتور گردان به وجود آمده است. وجود ترانسفورماتور گردان باعث خطای شیفت فاز نیز می شود که این خطا با استفاده از مبدل ریزالور به دیجیتال، به ویژه مبدل نوع ترکیب، قابل برطرف شدن است.

شکل ۵-الف، پوش سیگنال سینوسی ریزالورها را بر حسب پوش سیگنال کسینوسی، در حالت ایده آل و با در نظر گرفتن سیم پیچی ترانسفورماتور گردان، نشان می دهد. شکل های ۵-ب و ۵-ج، خطای موقعیت خروجی را نسبت به موقعیت واقعی، با و بدون در نظر گرفتن اثر ترانسفورماتور گردان برای دو ریزالور نشان می دهد. برای محاسبه خطای موقعیت، موقعیت خروجی حاصل از محاسبه تابع تانژانت معکوس پوش ولتاژهای خروجی، با موقعیت واقعی مقایسه شده است.

۴- شبیه سازی به روش اجزای محدود

با توجه به ساختار شار محوری ریزالورهای مورد بررسی، امکان شبیه سازی دوبعدی برای آن ها وجود ندارد. از سوی دیگر برای اعمال حرکت و در نظر گرفتن پدیده های وابسته به زمان، لازم است؛ تحلیل در حالت گذرا انجام شود. شبیه سازی اجزای محدود سه بعدی در حالت گذرا، دقیق ترین، ولی زمان برترین، روش تحلیل الکترومغناطیسی ماشین های الکتریکی است. به دلیل زمان طولانی حل، تعیین دقیق گام های حل مسئله و ابعاد مش، اهمیت زیادی دارد. البته هرچه قدر ابعاد مش و گام حل مسئله کوچک تر باشد؛ مسئله دقیق تر حل می شود ولی زمان حل افزایش می یابد. در شبیه سازی های این مقاله برای تحلیل از نسخه هفدهم نرم افزار ماکسول استفاده شده است. گام حل مسئله ۱۰ میکروثانیه و تعداد کل مش ها برای ریزالور اول، ۱۲۱۸۷۴۸ و برای ریزالور دوم ۱۹۷۵۸۰۱ المان است. زمان هر شبیه سازی روی کامپیوتر با مشخصات Core™ i7-4790k CPU@4 GHz با 32 GB RAM حدود ۳۶ ساعت می باشد.

۴-۱- شبیه سازی در حالت ایده آل

برای استخراج ولتاژها در حالت ایده آل، ولتاژ تحریک به صورت مستقیم به سیم پیچی روتور اعمال می شود. ولتاژهای خروجی دو ریزالور در این شرایط در شکل های ۴-الف و ۴-ب، نشان داده شده است. محاسبه محتوای هارمونیک پوش این سیگنال ها، مطابق شکل ۴-ج، نشان می دهد که حداکثر THD پوش ولتاژهای خروجی برای ریزالور اول، ۴/۲۱ درصد و برای ریزالور دوم ۴/۱۹ درصد است.

۴-۲- شبیه سازی با در نظر گرفتن اثر ترانسفورماتور گردان

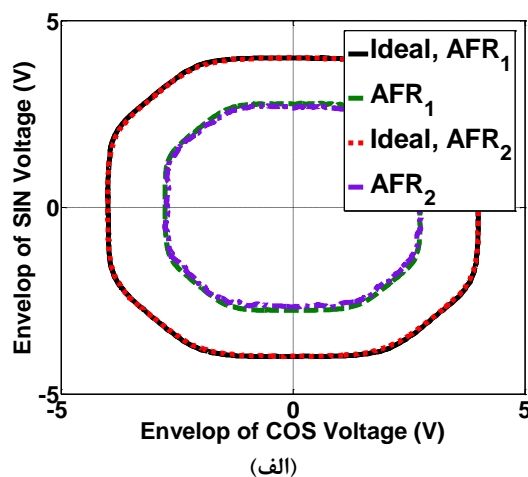
در ریزالور اول، با فرض هسته پلی آمیدی برای ترانسفورماتور گردان و با در نظر گرفتن اثر سیم پیچی ترانسفورماتور گردان، حداکثر THD پوش ولتاژهای خروجی به ۴/۸۲ درصد می رسد که در مقایسه با حالت ایده آل ۱۴/۴۹ درصد افزایش یافته است. این افزایش برای ریزالور که یک حسگر موقعیت است؛ عدد بزرگی است.

۴-۳- استفاده از حفاظ برای کاهش اثر شارهای نشستی ترانسفورماتور گردان

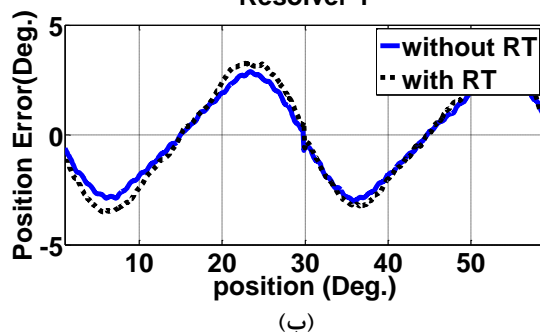
برای کاهش اثر شار نشستی ترانسفورماتور گردان از حفاظ‌های الکتریکی یا مغناطیسی استفاده می‌شود. برای این منظور در ریزالور اول هسته ترانسفورماتور گردان از جنس ماده فرومغناطیس ساخته می‌شود. این امر باعث می‌شود که شار نشستی ترانسفورماتور گردان که کله‌گی سیم‌پیچی‌های سیگنال را در بر می‌گیرد؛ مسیری با رلوکتانس ناچیز (در مقایسه با رلوکتانس سیم‌پیچی سیگنال) در مقابل خود ببیند. به این ترتیب، تأثیر این شار نشستی روی ولتاژ سیم‌پیچی خروجی کاهش می‌یابد. همچنین، به دلیل جهت دادن به شار سیم‌پیچی ترانسفورماتور گردان اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچی اولیه و ثانویه ترانسفورماتور گردان افزایش می‌یابد. با استفاده از هسته فرومغناطیس، بیش‌تر شار نشستی ترانسفورماتور گردان مسیر خود را از هسته فرومغناطیس مورد نظر می‌بندد؛ اما همچنان به دلیل وجود فاصله هوایی، شارهای نشستی کمی، کله‌گی سیم‌پیچ‌های سیگنال را در بر می‌گیرد. در مرحله بعد علاوه بر حفاظ مغناطیسی (هسته فرومغناطیس) از حفاظ فلزی (آلمینیومی) نیز استفاده می‌شود. میدان‌های نشستی متغیر با زمان در این صفحه آلمینیومی ولتاژ القا می‌کند. طبق قانون لنز، جریان‌های القایی ایجاد شده در هادی آلمینیومی در جهتی خواهند بود که شار تولیدی آن‌ها با عامل به وجود آورنده خود که تغییر شار نشستی است؛ مقابله کنند. به این ترتیب تأثیر شار نشستی سیم‌پیچی ترانسفورماتور گردان روی دقت موقعیت زاویه‌ای آشکار شده، به حداقل مقدار ممکن می‌رسد. شکل ۶-الف هسته فرومغناطیسی ترانسفورماتور گردان و شکل ۶-ب، این هسته را به همراه حفاظ فلزی نشان می‌دهد. خطای موقعیت ریزالور اول، با وجود هسته فرومغناطیسی و با فرض وجود هسته فرومغناطیسی همراه با حفاظ الکتریکی در شکل ۶-ج نشان داده شده است. مقدار قله تا قله خطای موقعیت با استفاده از هسته فرومغناطیسی $6/002$ درجه و با فرض حفاظ شکل ۶-ب، $5/89$ درجه است. این مقادیر به ترتیب $2/07$ درصد و $0/32$ درصد بیش‌تر از حالت ایده‌آل هستند و به عبارت دیگر با خطای حالت ایده‌آل قابل مقایسه‌اند. از سوی دیگر، حداکثر THD پوش ولتاژهای خروجی که از $4/21$ درصد در حالت ایده‌آل به $4/82$ درصد با اعمال اثر ترانسفورماتور گردان رسیده بود؛ با فرض هسته فرومغناطیسی به $4/58$ درصد و با اعمال اثر حفاظ فلزی همراه با هسته فرومغناطیسی به $4/23$ درصد رسید. به عبارت دیگر تأثیر شار نشستی ترانسفورماتور گردان با استفاده همزمان از هر دو حفاظ فلزی و مغناطیسی، تقریباً خنثی گردید.

در مورد ریزالور دوم، هسته ترانسفورماتور گردان با هسته اصلی ریزالور که سیم‌پیچی‌های سیگنال را در بر گرفته مشترک است. بنابراین شار نشستی ترانسفورماتور گردان که مسیر خود را از هسته فرومغناطیسی می‌بندد؛ سیم‌پیچ‌های سیگنال را هم در بر می‌گیرد و تأثیر این شار پراکندگی روی کاهش دقت خروجی بیشتر از ریزالور اول است. در این ریزالور، سیم‌پیچی‌های سیگنال به صورت شعاعی و

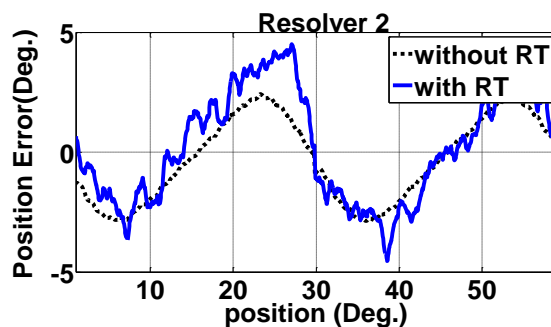
اندازه قله تا قله خطای موقعیت برای ریزالور ۱، با در نظر گرفتن اثر ترانسفورماتور گردان $6/77$ درجه است که نسبت به حالتی که اثر ترانسفورماتور گردان نادیده گرفته شده (خطای $5/88$ درجه)، $15/13$ درصد افزایش یافته است. این خطا برای ریزالور دوم، با و بدون در نظر گرفتن اثر ترانسفورماتور گردان به ترتیب $8/997$ و $5/249$ درجه است که افزایش $71/4$ درصد را نشان می‌دهد.



Resolver 1



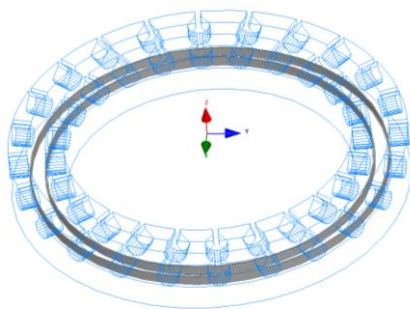
(ب)



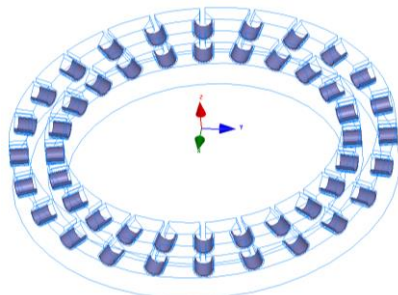
(ج)

شکل ۵: خروجی ریزالورها با در نظر گرفتن اثر ترانسفورماتور گردان؛ الف) پوش سیگنال سینوسی ریزالورها بر حسب پوش سیگنال کسینوسی با و بدون ترانسفورماتور گردان، ب) خطای موقعیت خروجی ریزالور اول نسبت به موقعیت واقعی، با و بدون در نظر گرفتن اثر ترانسفورماتور گردان ج) خطای موقعیت خروجی ریزالور دوم نسبت به موقعیت واقعی، با و بدون در نظر گرفتن اثر ترانسفورماتور گردان

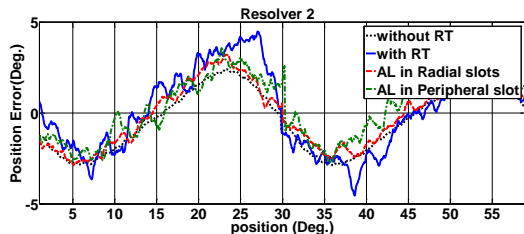
برای شبیه‌سازی این نوع عایق یک لایه آلومینیومی داخل شیار محیطی استاتور و روتور قرار گرفته است. شکل ۷-الف، ریزالور دوم را با در نظر گرفتن حفاظ فلزی در شیار محیطی نشان می‌دهد. در شکل ۷-ب، این حفاظ فلزی در شیارهای شعاعی در نظر گرفته شده است. خطای موقعیت ریزالور با در نظر گرفتن هر یک از حفاظ‌های یادشده در شکل ۷-ج، نشان داده شده است. قله تا قله خطای موقعیت با استفاده از حفاظ در شیار محیطی، $6/355$ درجه است که نسبت به حالت ایده‌آل $21/07$ درصد افزایش را نشان می‌دهد و با استفاده از حفاظ در شیارهای شعاعی این مقدار به $5/613$ درجه می‌رسد که فقط $6/93$ درصد بیشتر از خطای حالت ایده‌آل است. مقایسه حداکثر THD پوش سیگنال‌های خروجی، نشان می‌دهد که مقدار THD که از $4/19$ درصد در حالت ایده‌آل به $4/98$ درصد در حالت بدون حفاظ رسیده بود؛ با در نظر گرفتن حفاظ در شیار محیطی به $4/77$ درصد و با استفاده از حفاظ در شیارهای شعاعی به $4/37$ درصد افزایش می‌یابد که به ترتیب معادل $13/84$ درصد و $4/3$ درصد افزایش نسبت به حالت ایده‌آل هستند.



(الف)



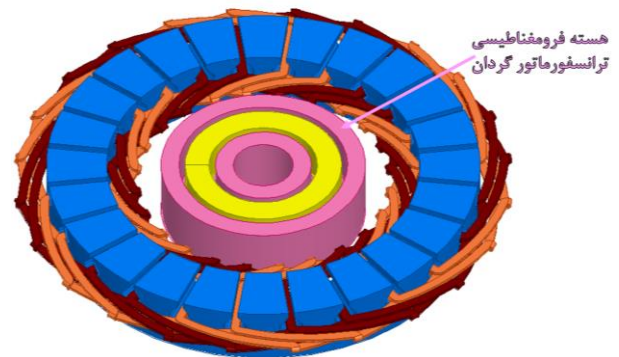
(ب)



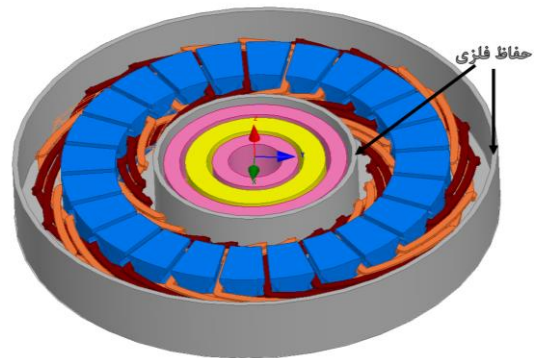
(ج)

شکل ۷: استفاده از انواع حفاظ برای کاهش اثر شار ناشی ترانسفورماتور گردان در ریزالور دوم؛ الف) استفاده از حفاظ فلزی در شیار محیطی، ب) استفاده از حفاظ فلزی در شیارهای شعاعی و ج) خطای موقعیت ریزالور دوم با استفاده از هر دو حفاظ فلزی

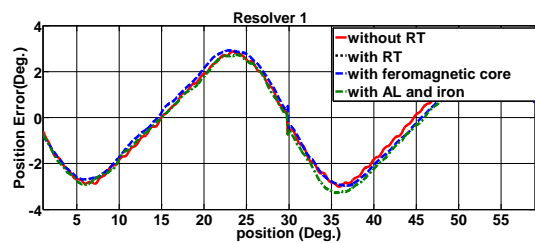
سیم‌پیچی تحریک به صورت محیطی قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر دو دسته سیم‌پیچی به صورت عمود برهم هستند و ظاهراً انتظار می‌رود تأثیر شار ناشی ترانسفورماتور گردان در این ساختار کم‌تر باشد؛ ولی در عمل چون هادی‌های ترانسفورماتور گردان و سیم‌پیچی‌های سیگنال، خطوط عمود برهم نبوده بلکه حجم‌های با محور تقارن عمود برهم هستند؛ شار ناشی سیم‌پیچی ترانسفورماتور گردان روی سیم‌پیچی‌های سیگنال مؤثر است. در این ریزالور برای کم کردن اثر شار ناشی، از حفاظ فلزی داخل شیار محیطی و داخل شیارهای شعاعی استفاده می‌شود. در واقع این حفاظ می‌تواند با عایق شیار ترکیب شود و در عمل از نوع خاصی عایق که ورق آلومینیومی با پوشش پلاستیک است؛ استفاده می‌شود.



(الف)



(ب)



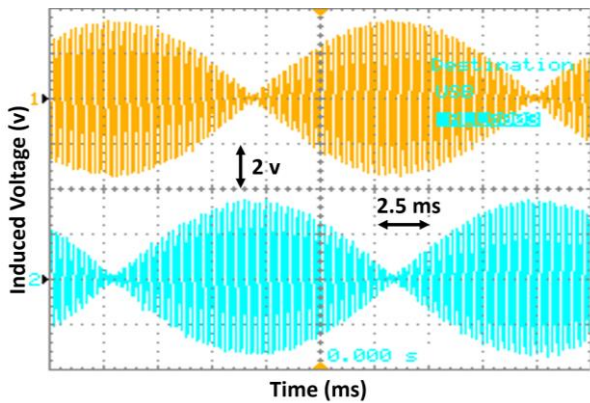
(ج)

شکل ۶: استفاده از انواع حفاظ برای کاهش اثر شار ناشی ترانسفورماتور گردان در ریزالور اول؛ الف) استفاده از حفاظ مغناطیسی (هسته فرومغناطیسی)، ب) استفاده از حفاظ فلزی و ج) خطای موقعیت ریزالور اول با استفاده از حفاظ‌های مختلف

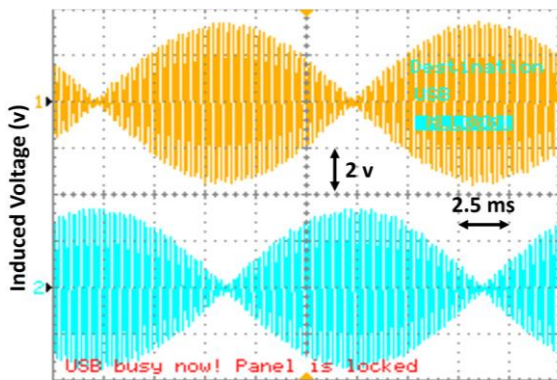
۵- نتایج آزمایشگاهی

شکل‌های ۸-الف و ۸-ب، استاتور و روتور هر دو ریزالور مورد بررسی را نشان می‌دهند. برای آزمایش عملی ریزالورها مدار شکل ۸-ج مورد استفاده قرار گرفته است. در این سیستم تست همه تجهیزات روی یک صفحه گونیا به موازات سطح افق قرار گرفته‌اند. از یک تایکوپ گردان با حداکثر قابلیت تفکیک‌پذیری یک دقیقه به‌عنوان حسگر مرجع استفاده شده است که می‌تواند موقعیت زاویه‌ای را هم در حالت ساکن و هم در حالت متحرک تولید و اندازه‌گیری نماید.

ولتاژهای خروجی دو ریزالور در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب، نشان داده شده‌اند. این سیگنال‌ها با استفاده از یک اسیلوسکوپ دیجیتال با قدرت نمونه‌برداری 10^9 نمونه در ثانیه ذخیره می‌شوند. سپس، پوش آن‌ها محاسبه می‌شود و در ادامه، از محاسبه تانژانت معکوس نسبت پوش‌ها موقعیت زاویه‌ای روتور محاسبه می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۹: ولتاژهای خروجی ریزالورهای مورد بررسی؛ (الف) و (ب) خروجی ریزالور اول و (ب) ولتاژ خروجی ریزالور دوم

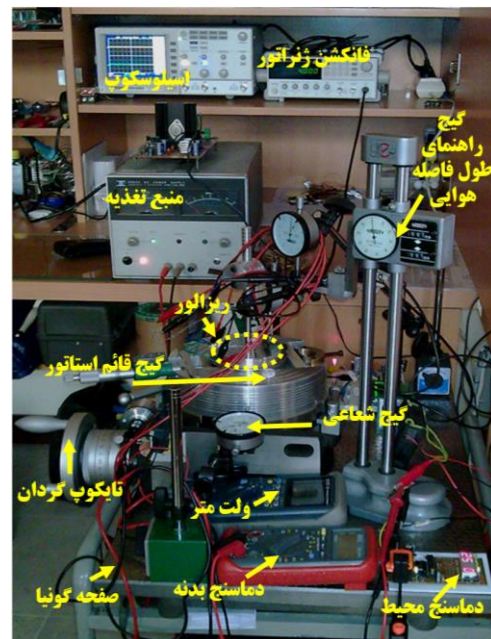
مقدار قله تا قله خطای موقعیت نسبت به موقعیت مرجع، برای دو ریزالور با در نظر گرفتن حفاظ‌های مورد نظر، در شکل ۱۰-الف، نشان داده شده است. حداکثر خطای موقعیت اندازه‌گیری شده نسبت به موقعیت شبیه‌سازی نیز در شکل ۱۰-ب، آمده است. همان‌طور که از این دو شکل مشخص است؛ علی‌رغم تطابق خوب نتایج شبیه‌سازی با آزمایش عملی که صحت فرایند شبیه‌سازی را تأیید می‌کند؛ هر دو نتایج شبیه‌سازی و آزمایش عملی در مقایسه با موقعیت مرجع خطای قابل ملاحظه‌ای دارند. علت این امر، به نحوه محاسبه موقعیت با استفاده از ولتاژ خروجی ریزالور برمی‌گردد. در عمل ولتاژهای خروجی ریزالور به یک مبدل ریزالور به دیجیتال اعمال می‌شوند. بسیاری از خطاهای ریزالور با استفاده از الگوریتم‌های مختلف در مبدل مذکور، کاهش می‌یابند و یا حذف می‌شوند. در این مقاله برای اینکه هیچ اثر جبرانی روی سیگنال‌های خروجی اعمال نشده باشد؛ برای در نظر



(الف)



(ب)



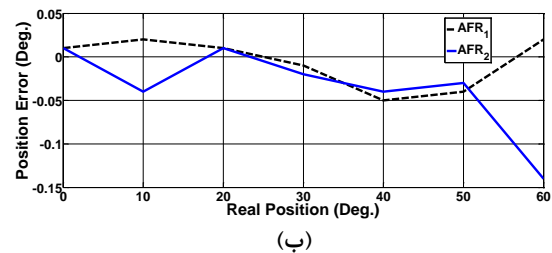
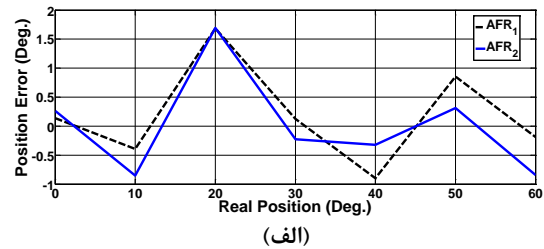
(ج)

شکل ۸: نمونه عملی ریزالورهای ساخته شده؛ (الف) استاتور و روتور ریزالور ۱، (ب) استاتور و روتور ریزالور ۲ و (ج) مدار آزمایش عملی

مراجع

- [۱] مهرداد جعفربلند، مرتضی میخک بیرانوند و محمدهادی ریسمانی، «ارائه روشی جهت انتخاب گام آهن‌ریا برای موتور BLDC نوع IPM برای دستیابی به مشخصات مطلوب موتور»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۳، صص ۲۷-۳۴، پاییز ۹۴.
- [۲] حجت حاتمی، محمدباقر بناه‌شریفیان، محمدرضا فیضی، «ارائه روش جدید طراحی بهبودیافته ماشین‌های مغناطیس دائم شار محوری سرعت پایین مورد استفاده در خودروهای هیبریدی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۲، صص ۵۱-۶۴، تابستان ۹۴.
- [3] X. Ge and Z. Q. Ahu, "A novel design of rotor contour for variable reluctance resolver by injecting auxiliary air-gap permeance harmonics", *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 31, no. 1, pp. 345-353, March 2016
- [4] P. B. Reddy, A. M. EL-Refaie, K. K. Huh, J. K. Tangudu and T. M. Jahns, "Comparison of interior and surface PM machines equipped with fractional-slot concentrated windings for hybrid traction applications," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 27, no. 3, pp. 593-602, Sep. 2012.
- [5] K. T. Chau, C. C. Chan and C. H. Liu, "Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2246-2257, Jun. 2008.
- [6] K. I. Laskaris and A. G. Kladas, "Optimal power utilization by adjusting torque boost and field weakening operation in permanent magnet traction motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 3, pp. 615-623, Jul. 2012.
- [7] E. Mese, Y. Yasa, H. Akca, M. G. Aydeniz and M. Garip, "Investigating operating modes and converter options of dual winding permanent magnet synchronous machines for hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 1, pp. 285-295, Feb. 2015.
- [8] W. Q. Huang, Y. T. Zhang, X. C. Zhang and G. Sun, "Accurate torque control of interior permanent magnet synchronous machine," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 1, pp. 29-37, Feb. 2014.
- [۹] فرید توتونچیان، حسگر الکترومغناطیسی موقعیت زاویه‌ای با استفاده از سلسین‌های ۹۰ درجه (رزولور) با هدف کاهش اثرپذیری خطای موقعیت، رساله برای دریافت درجه دکتری مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، ۱۳۹۱.
- [10] Z. Nasiri-Gheidari and F. Tootoonchian, "Axial flux resolver design techniques for minimizing position error due to static eccentricities", *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 7, pp. 4027-4034, July 2015.
- [11] J. Figueiredo, "Resolver models for manufacturing," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 8, pp. 3693-3700, Aug. 2011.
- [12] D. Arab-Khaburi, F. Tootoonchian and Z. Nasiri-Gheidari, "Parameter Identification of a brushless resolver using charge response of stator current", *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 42-52, Jan. 2007.

گرفتن بدترین حالت، خود سیگنال‌های خروجی با استفاده از اسیلوسکوپ دیجیتال ذخیره شده‌اند و سپس پوش آن‌ها محاسبه شده و با محاسبه تنازات معکوس نسبت پوش‌ها، موقعیت خروجی تعیین گردیده است.



شکل ۱۰: خطای موقعیت دو ریزالور: الف) قله تا قله خطای موقعیت نسبت به موقعیت مرجع و ب) حداکثر خطای موقعیت محاسبه‌شده بر اساس ولتاژهای شبیه‌سازی شده نسبت به موقعیت محاسبه‌شده با استفاده از ولتاژهای اندازه‌گیری شده

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر شار نشستی ترانسفورماتور گردان روی دقت دو نوع ریزالور شار محوری، با استفاده از تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی در حالت غیرخطی و گذرا، مورد بررسی قرار گرفت. در ریزالور اول سیم‌پیچی‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور گردان در قطر داخلی هسته ریزالور جای گرفته بودند و در ریزالور دوم این سیم‌پیچی‌ها در شیارهایی بودند که داخل هسته استاتور و روتور ریزالور به صورت محیطی (عمود بر شیارهای شعاعی شامل سیم‌پیچی‌های سیگنال و تحریک) قرار داشتند. ملاحظه گردید که شار نشستی ترانسفورماتور گردان، دقت موقعیت ریزالور را در هر دو ریزالور تحت تأثیر قرار می‌دهد ولی این تأثیر در ریزالور دوم به دلیل وجود هسته فرومغناطیسی مشترک بین سیم‌پیچی تحریک/سیگنال و سیم‌پیچی ترانسفورماتور گردان بیش‌تر است. سپس اثر انواع حفاظ‌های مغناطیسی و فلزی در دو نوع ریزالور، مورد مطالعه قرار گرفت و بهترین حفاظ برای حذف اثر شار نشستی ترانسفورماتور گردان، تعیین شد. در پایان نمونه عملی دو حسگر ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. تطابق موقعیت خروجی اندازه‌گیری شده و مقدار حاصل از شبیه‌سازی، صحت فرایند شبیه‌سازی را تأیید می‌نماید.

- [16] J. Shang, H. Wang, M. Chen, N. Cong, Y. Li and C. Liu, "The Effects of Stator and Rotor Eccentricities on Measurement Accuracy of Axial Flux Variable-reluctance Resolver with Sinusoidal Rotor", in Proc. ICEMS, Hangzhou, China, pp. 1206-1209, 2014.
- [17] Z. Nasiri-Gheidari, "Design, Analysis, and Prototyping of a New Wound-Rotor Axial Flux Brushless Resolver", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, published online 01 Sept. 2016.
- [13] X. Ge, Z. Q. Zhu, R. Ren and J. T. Chen, "Analysis of windings in VR resolver", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 51, no. 5, May 2015.
- [14] X. Ge, Z. Q. Zhu, R. Ren and J. T. Chen "A Novel variable reluctance resolver for HEV/EV applications", *IEEE Trans. Industry applications*, published online 23 Feb. 2016
- [15] S. Jing, W. Hao and W. Weiqiang, "The Analysis of Multi pole Axial Flux Reluctance Resolver with Sinusoidal Rotor", in Proc. ECCE, Harbin, China, 2012, pp. 1206-1209.