

تحلیل عملکرد ریزالورهای بدون جاروبک رتور سیم‌پیچی شده، تحت خطای رانش محوری

فرید توتونچیان، استادیار

دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - tootoonchian@iust.ac.ir

چکیده: ریزالور، یک حسگر تعیین موقعیت زاویه‌ای است. ریزالور معمولاً به صورت پنکیک، روی محور موتور، نصب می‌شود تا دقت آن در اثر خطاهای ناهم‌محوری کاهش نیابد. این نوع نصب، سبب بروز خطای رانش محوری می‌شود. در این مقاله، تاثیر وقوع خطای رانش محوری، با استفاده از تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس، سهم جابه‌جایی رتور ریزالور و ثانویه ترانسفورماتور گردان، در خطای موقعیت مطالعه می‌شود. بر این اساس، راه‌کاری برای کاهش تاثیرپذیری دقت ریزالور، از خطای رانش محوری، ارائه می‌شود. در پایان، تاثیر بهینه‌سازی صورت گرفته با استفاده از آزمایش عملی روی نمونه آزمایشگاهی ریزالور تایید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: حسگر موقعیت، ریزالور بدون جاروبک رتور سیم‌پیچی شده، ترانسفورماتور گردان، خطای رانش محوری

Performance Analysis of Wound Rotor Brushless Resolvers under Run out Fault

Farid Tootoonchian, Assistant professor

Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: tootoonchian@iust.ac.ir

Abstract: Resolver is an electromagnetic position sensors. To ensure the performance of the resolver is not deteriorated by the eccentricities, pancake resolvers are employed in industrial applications. The accuracy of pancake resolvers is suspected to be influenced by run-out fault. In this paper, the effect of run-out fault on the accuracy of the wound rotor resolver is studied by 3-D time stepping finite element method (TSFEM). Then, the contribution of the resolver's rotor and the secondary of rotary transformer (RT) in the detected error is determined. Based on the analysis, an optimized structure is proposed to decrease the effect of run out fault. Finally, the success of the optimization is validated using experimental tests on the prototype of the sensor.

Keywords: Position sensor, wound-rotor brushless resolver, rotary transformer, run-out fault.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۹

نام نویسنده مسئول: فرید توتونچیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - نارمک - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق - طبقه پنجم - اتاق ۵۳۴

۱- مقدمه

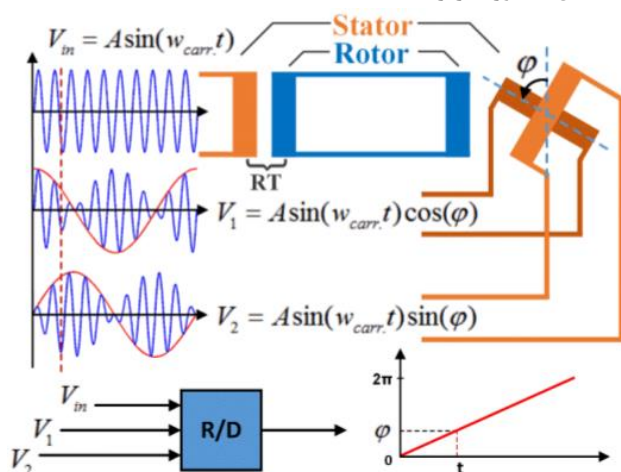
می‌شوند که با حرکت رتور اندوکتانس متقابل آن‌ها با سیم‌پیچ تحریک به صورت سینوسی تغییر کند و با هم اختلاف فاز ۹۰ درجه داشته باشند. به عبارت دیگر، در حالت ایده‌آل [۱۲]:

$$L_{se} = M \sin \theta \quad (1)$$

$$L_{ce} = M \cos \theta \quad (2)$$

که L_{se} و L_{ce} به ترتیب اندوکتانس متقابل سیم‌پیچی سینوسی و کسینوسی با سیم‌پیچی تحریک، M بیشینه اندوکتانس متقابل سیم‌پیچی‌های سیگنال با تحریک و θ موقعیت رتور است.

در ریزالورها، اندوکتانس خودی سیم‌پیچی تحریک تقریباً ثابت است. بنابراین با وصل کردن منبع ولتاژ ac با فرکانس زیاد، به سیم‌پیچی تحریک، جریان این سیم‌پیچ در حالت ماندگار نیز ac با همان فرکانس و دامنه ثابت خواهد بود. شار پیوندی در سیم‌پیچ‌های سیگنال به صورت زیر است:



شکل ۱: شماتیک سیم‌پیچی‌های ریزالور و ترانسفورماتور گردان [۱۳]

$$\lambda_s = (M \sin \theta) \times (I_m \sin \omega_{carr} t) \quad (3)$$

$$\lambda_c = (M \cos \theta) \times (I_m \sin \omega_{carr} t) \quad (4)$$

که I_m بیشینه جریان تحریک و ω_{carr} فرکانس زاویه‌ای ولتاژ تحریک است. در این صورت ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌های سیگنال برابر است با:

$$V_s = \omega M I_m \left(\frac{\omega}{\omega_{carr}} \cos \theta \sin \omega t + \sin \theta \cos \omega t \right) \quad (5)$$

$$V_c = \omega M I_m \left(-\frac{\omega}{\omega_{carr}} \sin \theta \sin \omega t + \cos \theta \cos \omega t \right) \quad (6)$$

در رابطه قبل منظور از ω سرعت رتور است. در شکل ۱، ولتاژهای خروجی ریزالور، نیز، نشان داده شده‌اند. با توجه به اینکه همواره

$\omega_{carr} \gg \omega$ ، می‌توان از عبارت ولتاژ حرکتی، صرف‌نظر کرد؛ بنابراین:

$$V_s = \omega M I_m \sin \theta \cos \omega t \quad (7)$$

$$V_c = \omega M I_m \cos \theta \cos \omega t \quad (8)$$

بنابراین، ولتاژهای خروجی دارای مدلاسیون دامنه با موج حامل (سیگنال تحریک) هستند [۱۲]. بنابراین پوش سیگنال‌ها عبارتند از:

$$E_s = \omega M I_m \sin \theta \quad (9)$$

$$E_c = \omega M I_m \cos \theta \quad (10)$$

امروزه استفاده از ماشین‌های سنکرون آهنربای دائم در بسیاری کاربردهای صنعتی، نظیر خودرو برقی، کاربردهای فضایی و حتی خانگی، به دلیل گشتاور حجمی زیاد آن‌ها، توصیه می‌شود [۱-۲]. عملکرد مطلوب این ماشین‌ها، مستلزم استفاده از مدار کنترل حرکت است که در آن، لازم است؛ موقعیت محور گردان به صورت دقیق تعیین شود [۳-۸]. برای این منظور، از حسگرهای موقعیت زاویه‌ای استفاده می‌شود. حسگرهای تعیین موقعیت و سرعت براساس اصول عملکردشان انواع مختلفی دارند. از این میان می‌توان به حسگرهای خازنی یا مقاومتی اشاره کرد که برای تعیین موقعیت از تغییرات میدان الکتریکی استفاده می‌کنند. در دسته‌ی دیگری از حسگرها مانند حسگر اثر هال، ترانسفورماتور تفاضلی خطی/گردان، سنکرو و ریزالور، میدان مغناطیسی برای رسیدن به این هدف به کار گرفته شده‌است. از دیگر حسگرهای پرکاربرد انکدرهای نوری هستند که از دیود نوری و گیرنده نیمه‌هادی برای تعیین موقعیت استفاده می‌کنند. گذشته از اصول عملکرد این حسگرها، همه‌ی آن‌ها می‌توانند برای تعیین موقعیت خطی یا دورانی مورد استفاده قرار گیرند [۹].

هرچند در بسیاری کاربردها، انکدرهای نوری، به دلیل قیمت کم و دقت زیاد، به ریزالورها ترجیح داده می‌شوند؛ در شرایطی که محیط آلوده، با تغییرات وسیع دما و همراه با لرزش است؛ انکدرها قابل استفاده نیستند و ریزالورها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳، ۱۰-۱۱].

در این مقاله، ابتدا اصول کار ریزالورها و انواع آنها، تشریح می‌شود. سپس لزوم بررسی خطای رانش محوری در ریزالوره‌های رتور سیم‌پیچی‌شده، تبیین می‌شود. در ادامه، با استفاده از روش اجزای محدود سه‌بعدی، تاثیر خطای رانش محوری روی دقت ریزالور، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس سهم جابه‌جایی ثانویه ترانسفورماتور گردان و رتور ریزالور، در خطای ایجاد شده تفکیک می‌شود و بر این اساس، ساختار ریزالور به گونه‌ای اصلاح می‌شود که تاثیر خطای رانش محوری در آن حداقل شود. در پایان، نمونه عملی ریزالور به همراه سیستم تست آن ساخته می‌شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمون عملی، صحت تحلیل‌های انجام‌شده و کارایی بهینه‌سازی انجام‌شده، را نشان می‌دهد.

۲- اصول کار ریزالور و انواع آن

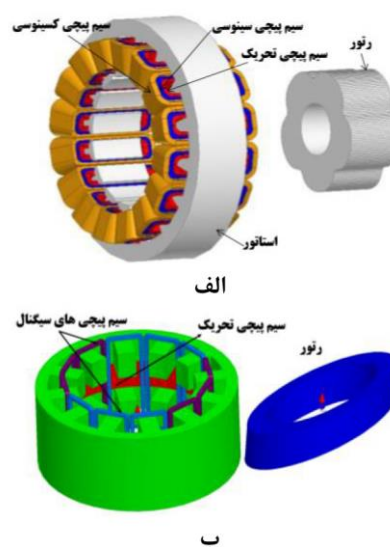
ریزالور ژنراتور سنکرون دوفازی است که سیم‌پیچی تحریک آن با استفاده از ولتاژ متناوب، تغذیه می‌شود. در ساختار همه‌ی ریزالورها از سه دسته سیم‌پیچ استفاده شده‌است. یکی از سیم‌پیچ‌ها که سیم‌پیچ تحریک نامیده می‌شود؛ توسط ولتاژ ac با فرکانس زیاد (در محدوده ۱ تا ۱۰ کیلوهرتز) تغذیه می‌شود و دو سیم‌پیچ دیگر که سیم‌پیچ‌های سیگنال نام دارند (یکی از آنها سیم‌پیچ سینوسی و دیگری را سیم‌پیچ کسینوسی می‌نامند)؛ برای تعیین موقعیت به مبدل ریزالور به دیجیتال متصل می‌شوند (شکل ۱). سیم‌پیچ‌های سیگنال به نحوی پیچیده

با تانژانت معکوس گرفتن از نسبت ولتاژهای بالا، موقعیت، به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{E_s}{E_c} \quad (11)$$

بر اساس چگونگی ایجاد اندوکتانس متقابل سینوسی بین سیم پیچ تحریک و سیم پیچ های سیگنال دو دسته ریزالور وجود دارد. در دسته اول تغییر اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ تحریک و سیم پیچ های سیگنال در نتیجه تغییر موقعیت سیم پیچ تحریک نسبت به سیم پیچ سیگنال است. در این نوع از ریزالورها، معمولاً یک سیم پیچ بر روی رتور و دو سیم پیچ دیگر بر روی استاتور قرار می گیرند. به همین خاطر معمولاً به این ریزالورها، رتور سیم پیچ شده گفته می شود. در این ریزالورها، برای تغذیه سیم پیچی رتور از یک ترانسفورماتور گردان (RT)، استفاده می شود. سیم پیچی اولیه ترانسفورماتور گردان، روی استاتور ریزالور و سیم پیچی ثانویه آن، روی رتور ریزالور نصب می شود. به این ترتیب، با تغذیه سیم پیچی اولیه، ولتاژ در سیم پیچی ثانویه ترانسفورماتور گردان القا می شود. از این ولتاژ برای تغذیه سیم پیچی تحریک رتور، استفاده می شود.

در نوع دیگر ریزالورها، برای تغییر اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ ها از تغییر رلوکتانس فاصله های هوایی استفاده می شود و تمام سیم پیچ ها بر روی استاتور قرار می گیرند. این ریزالورها به ریزالورهای رلوکتانس متغیر مشهور هستند. هر چند این ریزالورها، به ترانسفورماتور گردان احتیاجی ندارند و ظاهراً ساده تر از ریزالورهای رتور سیم پیچ شده، هستند؛ ولی مشکلات خاص خودشان را دارند. تغییر سینوسی رلوکتانس فاصله هوایی، بر اساس تغییر سینوسی طول فاصله هوایی یا تغییر سینوسی سطح مقطع عبور شار، ممکن می شود. نوع اول ریزالور رلوکتانس متغیر با طول فاصله هوایی متغیر و نوع دوم ریزالور رتور سینوسی، نامیده می شود. شکل ۲، این دو نوع ریزالور را نشان می دهد.



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

مشکلات ریزالور نوع اول عبارتند از:

(الف) عملکرد نامطلوب حسگر در شرایط خطای ناهم محوری: در این نوع ریزالور، دقت موقعیت آشکار شده، به شدت متأثر از نحوه نصب ریزالور است. به طوری که کوچک ترین ناهم محوری 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 سیم پیچی های روی هر دندانه است و در ضمن تعداد دور سیم پیچی های سینوسی و کسینوسی دور هر دندانه با دندانه دیگر متفاوت است. این امر فرایند تولید انبوه را با مشکل روبرو می کند. در ضمن، ترتیب پیچیده شدن سیم پیچی ها دور دندانه و یا جابه جاشدن سیم پیچی ها نسبت به هم، دقت موقعیت خروجی را تحت تأثیر قرار می دهد.

پژوهش های زیادی برای برطرف کردن مشکلات فوق انجام شده است [۳] و [۱۴]-[۱۸]. در [۱۷] دور هر دندانه استاتور هر سه سیم پیچ های سینوسی، کسینوسی و تحریک پیچیده شده اند. ولی تعداد دندانه های استاتور و تعداد قطب ها به نحوی تعیین شده است که تعداد دور سیم پیچی تحریک، سینوسی و کسینوسی روی همه دندانه ها 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 سیم پیچی ها وجود دارد و دقت موقعیت خروجی نیز مورد تردید است. در [۱۶] آرایش دیگری برای سیم پیچی ارائه شده است که در آن سیم پیچی تحریک روی همه دندانه ها پیچیده می شود و سیم پیچی های سینوسی و کسینوسی به صورت یک در میان روی دندانه ها قرار می گیرند. ولی در این شرایط نیز روی هر دندانه دو سیم پیچی قرار می گیرد که جابه جایی سیم پیچی های دور هر دندانه نسبت به یکدیگر، می تواند دقت موقعیت خروجی را تحت تأثیر قرار دهد. اخیراً روش دیگری برای سیم بندی استاتور ارائه شده است که روی هر دندانه فقط یک سیم پیچی قرار می گیرد [۳]. در این روش مطابق شکل ۴، نه تنها سیم پیچی ها روی هم نیستند؛ بلکه، تعداد برجستگی های رتور طوری تعیین می شود که تعداد دور هر سیم پیچی روی همه دندانه ها یکسان باشد. ولی در این روش نیز، توالی قرار گرفتن سیم پیچی ها 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 [۳] نشان داده شده است؛ 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 و این ریزالورها در حالت دو قطب، یک برجستگی، از دقت کافی برخوردار نیستند.

برای تامین دقت کافی در حالت دو قطب، ریزالورهای رلوکتانس رتور سینوسی، پیشنهاد شده اند. اما در [۱۵]، نشان داده شده است که دقت این ریزالورها، در حالت وقوع خطای رانش محوری، به شدت کاهش می یابد. زیرا اساس عملکرد این ریزالورها، تغییر سینوسی مقطع

لازم به توضیح است که اگر ریزالور با استفاده از یک کوپلینگ صلیبی، اگرزوی یا پروانه‌ای به رتور متصل شود؛ تاثیرپذیری دقت آن، از خطای رانش محوری موتور، حداقل می‌شود. اما، استفاده از این نوع کوپلینگ‌ها، باعث بروز ناهم‌محوری‌های استاتیک، دینامیک یا مرکب، می‌شود و تاثیر انواع خطاهای ناهم‌محوری روی دقت ریزالور بسیار بیشتر از خطای رانش محوری است. به‌همین دلیل، معمولاً از ریزالورهای پنکیک، برای اندازه‌گیری موقعیت استفاده می‌شود و ریزالور با استفاده از یک شیلد الکترومغناطیسی، دقیقاً روی محور موتور متصل می‌شود.

۴- ریزالور مورد مطالعه

ریزالور مورد بررسی، از نوع رتورسیم‌پیچی شده استوانه‌ای است که از ترانسفورماتور گردان برای تغذیه سیم‌پیچی تحریک رتور، استفاده می‌کند. استاتور و رتور ریزالور به‌همراه اولیه و ثانویه ترانسفورماتور گردان مورد استفاده در شکل ۳، نشان داده شده‌است. هسته‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور گردان در امتداد استاتور و رتور ریزالور قرار گرفته‌اند. استاتور دارای سیم‌پیچی دور دندانه است و سیم‌پیچی رتور به‌صورت توزیع شده، انجام شده‌است. رتور دارای سیم‌پیچی دمپر است که با اختلاف فاز ۹۰ درجه نسبت به سیم‌پیچی تحریک، قرار گرفته‌است. ابعاد اصلی ریزالور مورد بررسی، به‌همراه مشخصات تحریک آن، در جدول ۱، آمده‌است. دیاگرام سیم‌بندی استاتور و رتور نیز، در شکل ۴، ارائه شده‌است.

۵- شبیه‌سازی اجزای محدود

با توجه به ساختار استوانه‌ای ریزالور مورد مطالعه، امکان شبیه‌سازی به صورت دوبعدی وجود دارد. ولی در صورت استفاده از شبیه‌سازی دو-بعدی، امکان مدل کردن ترانسفورماتور گردان که در امتداد محوری ریزالور قرار می‌گیرد وجود ندارد. در ضمن، امکان شبیه‌سازی ریزالور تحت خطای رانش محوری نیز وجود ندارد. بنابراین با توجه به اینکه هدف از این شبیه‌سازی بررسی تاثیر خطای رانش محوری روی ریزالور و ارائه راه‌کار برای کاهش تاثیرپذیری دقت ریزالور از خطای رانش محوری است؛ لازم است همه شبیه‌سازی‌ها، به‌صورت سه‌بعدی انجام شوند. از سوی دیگر برای اعمال حرکت و در نظر گرفتن پدیده‌های وابسته به زمان، لازم است؛ تحلیل در حالت گذرا انجام می‌شود. مسلماً دقت نتایج شبیه‌سازی به کیفیت مش و گام حل مسأله بستگی دارد. هر قدر مش‌ها ظریف‌تر و گام حل مسأله کوچک‌تر باشد؛ نتایج دقیق‌تر خواهند بود. ولی در مقابل زمان حل مسأله طولانی‌تر می‌شود. لذا، باید مصالحه‌ای بین زمان حل مسأله و دقت نتایج خروجی، انجام شود. معمولاً در ریزالورهای رتورسیم‌پیچی شده، بهترین انتخاب استفاده از مش مگنتواستاتیک و فراخوانی آن در تحلیل گذرا است. برای اطمینان از اینکه نقطه کار ریزالور در ناحیه خطی مشخصه مغناطیس‌شوندگی، هسته آن قرار دارد؛ توزیع چگالی شار مغناطیسی روی حسگر، در شکل ۵، ارائه شده‌است.

عبور شار است و در خطای رانش محوری این سطح مقطع تغییر می‌کند. لذا در [۱۵]، ساختار دیسکی برای این ریزالور پیشنهاد شده‌است. ابعاد هندسی بهینه ریزالور دیسکی رتور سینوسی، با هدف کاهش خطای موقعیت، در [۱۹]، با استفاده از روش تابع سیم‌پیچی اصلاح-شده، تعیین شده‌است. آزمون عملی روی نمونه‌های ۲، ۴ و ۸ قطب ساخته‌شده در [۱۹]، نشان می‌دهد که هر چند دقت ریزالور رتور سینوسی دوقطب، بیشتر از ریزالور رلوکتانس متغیر با تغییر طول فاصله هوایی دوقطب است؛ ولی این دقت برای کاربردهای دقیق، کافی نیست. بنابراین، در کاربردهای دقیق و بسیار دقیق، همچنان از ریزالورهای رتورسیم‌پیچی شده، استفاده می‌شود.

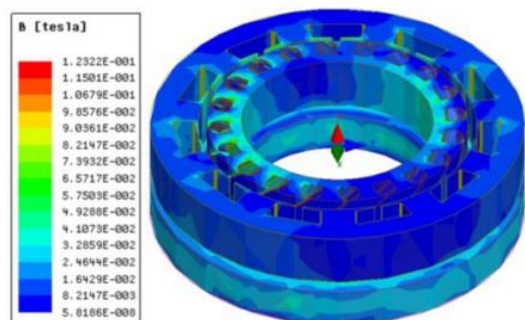
لازم به ذکر است که در ریزالورهای رتورسیم‌پیچی شده، به‌منظور افزایش دقت تشخیص موقعیت، از یک سیم‌پیچی اتصال کوتاه، علاوه بر سیم‌پیچی تحریک، روی رتور استفاده می‌شود. این سیم‌پیچی اصطلاحاً سیم‌پیچی دمپر، نامیده می‌شود و به افزایش دقت ریزالور کمک می‌کند [۱۰].

۳- اهمیت خطای رانش محوری

معمولاً رتور ماشین‌های الکتریکی، قابلیت جابه‌جایی محوری به اندازه $\pm g$ ؛ در لحظه برقراری جریان استاتور، دارند. این قابلیت جابه‌جایی، کمک می‌کند تا هنگام عبور شار تولیدی میدان دوار از رتور، رتور دقیقاً در موقعیت حداقل رلوکتانس (از دید محوری) قرار گیرد. این جابجایی توسط واشرهای سینوسی که معمولاً پشت یا جلوی کنس ثابت بلبرینگ قرار می‌گیرد؛ مهار می‌شود. ثابت فنرهای سینوسی، متناسب با قدرت موتور و میزان جابه‌جایی در نظر گرفته شده، مشخص می‌شود. اگر این لقی در طراحی رتور، در نظر گرفته نشود؛ سرعت آسیب دیدن بلبرینگ (کچل شدن ساچمه‌های بال‌بیرینگ یا رل‌های Tapered roll-bearing)، افزایش می‌یابد. این امکان جابه‌جایی محوری، دلیل وجود رانش محوری ذاتی در ماشین‌های الکتریکی است. لازم به ذکر است که خطای رانش محوری، برای ماشین‌های کوچک، با دست و برای ماشین‌های بزرگ با اعمال نیرو به فلایی که وسط شفت قرار دارد؛ قابل مشاهده و اندازه‌گیری است.

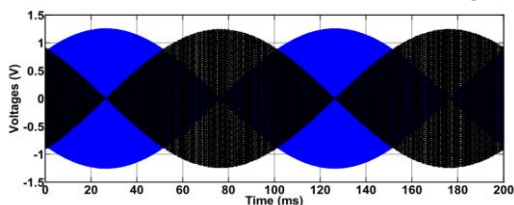
در ماشین‌های مجهز به آهنربای دائم که معمولاً مجهز به حسگر موقعیت رتور هستند؛ لقی محوری مستقیماً به حسگر منتقل می‌شود و به‌خصوص وقتی که موتور با پروفیل‌های پرشیب گشتاوری، مواجه می‌شود؛ لقی، اثر خود را بروز می‌دهد. همچنین در راه‌اندازی موتورهای مدرن، به‌ویژه، حالتی که موتور، زیر بار راه‌اندازی می‌شود؛ خطای رانش محوری موتور که به ریزالور منتقل می‌شود؛ سبب می‌شود؛ موقعیت اولیه (Home set)، از دست برود و دمای موتور به دلیل از دست دادن موقعیت صحیح رتور، افزایش می‌یابد. لذا، در این مقاله، ریزالور تحت خطای رانش محوری، مورد مطالعه قرار می‌گیرد و تلاش می‌شود؛ تاثیرپذیری دقت ریزالور از این خطا، کاهش یابد.

مشها در ریزالور سالم، ۱۰۱۹۳۵۲ المان است. زمان هر شبیه‌سازی روی کامپیوتر با مشخصات Core™ i7-4790k CPU@4 GHz با ۳۲ GB RAM حدود ۳۸ ساعت می‌باشد.

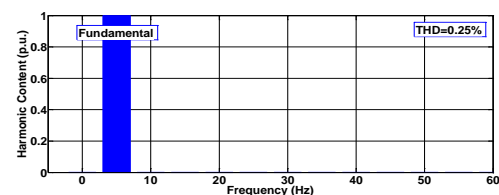


شکل ۵: توزیع چگالی شار مغناطیسی روی حسگر

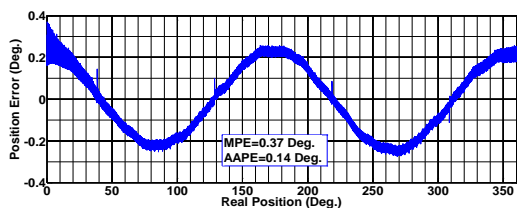
شکل ۶-الف، ولتاژهای القایی در ریزالور سالم را نشان می‌دهد. با استفاده از تابع هیلبرت، پوش این ولتاژها، محاسبه می‌شود. طیف هارمونیک پوش در شکل ۶-ب و خطای موقعیت در شکل ۶-ج، نشان داده شده‌اند. مقدار THD پوش ولتاژهای خروجی، ۰/۲۵ درصد است و بیشینه خطا (MPE) و متوسط قدرمطلق خطای موقعیت (AAPE) به ترتیب ۰/۳۷ و ۰/۱۴ درجه است. در ادامه شبیه‌سازی، با در نظر گرفتن خطای رانش محوری تکرار می‌شود. شکل ۷، ریزالور مورد مطالعه را تحت خطای رانش محوری به اندازه ۷ نشان می‌دهد. مقایسه THD پوش ولتاژهای القایی، بیشینه خطا و متوسط قدرمطلق خطای موقعیت، به ازای مقادیر مختلف خطای رانش محوری در شکل‌های ۸-الف، تا ۸-ج، نشان داده شده‌است.



الف



ب

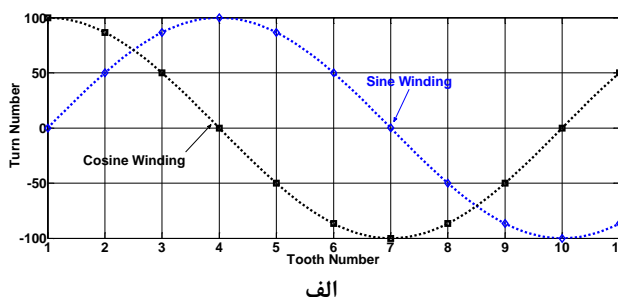


ج

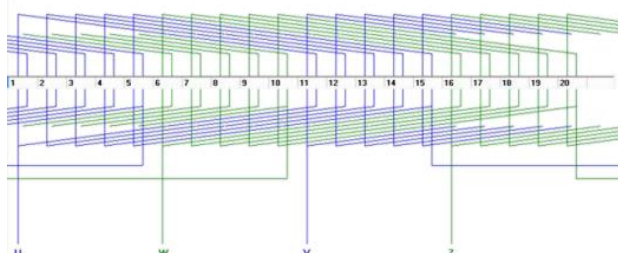
شکل ۶: ریزالور سالم؛ الف) ولتاژهای القایی، ب) طیف هارمونیک پوش ولتاژهای القایی و ج) خطای موقعیت



شکل ۳: استاتور و رتور ریزالور مورد مطالعه به همراه اولیه و ثانویه ترانسفورماتور گردان (نمونه عملی ساخته شده)



الف



ب

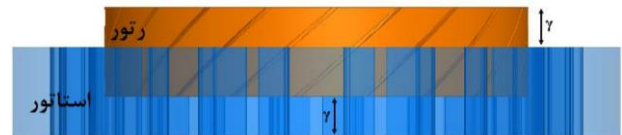
شکل ۴: دیاگرام سیم‌بندی (الف) استاتور و (ب) رتور

جدول ۱: ابعاد هندسی ریزالور مورد بررسی

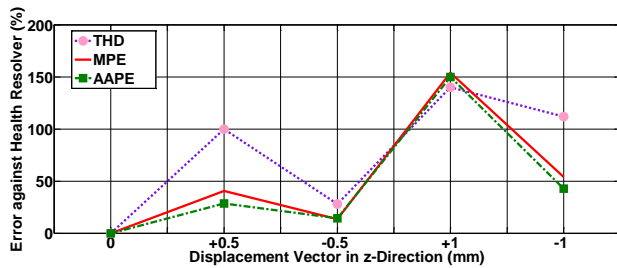
مقدار	واحد	کمیت
۳۴ و ۴۶	mm	قطر خارجی و داخلی استاتور
۲۳/۵ و ۳۲	mm	قطر خارجی و داخلی رتور
۶/۷	mm	ارتفاع هسته استاتور و رتور
۲	-	تعداد قطب
۲۸	درجه	زاویه کج‌شدگی رتور
۱۰۰	-	حداکثر تعداد دور هر فاز (سیگنال)
۵۰	-	تعداد دور سیم‌پیچی تحریک/دمپر
۱	mm	طول فاصله هوایی
۲۰/۱۱	-	تعدادشیر استاتور/ رتور
۰/۱۰	mm	قطر سیم سیگنال
۵	V	دامنه ولتاژ تحریک
۴۰۰۰	Hz	فرکانس ولتاژ تحریک

در شبیه‌سازی‌های این مقاله برای تحلیل از نسخه هفدهم نرم‌افزار ماکسول استفاده شده‌است. گام حل مسئله ۲۵ میکروثانیه و تعداد کل

حداقل به اندازه حدود ۵۰٪ شاخص، نسبت به ریزالور سالم بدتر شده است. این امر لزوم توجه به خطای رانش محوری را نشان می‌دهد.

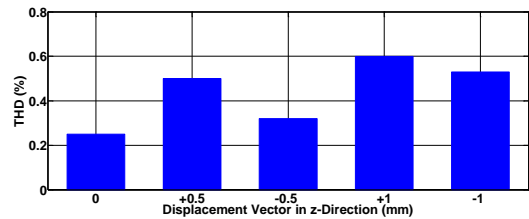


شکل ۷: ریزالور مورد مطالعه تحت خطای رانش محوری به اندازه γ

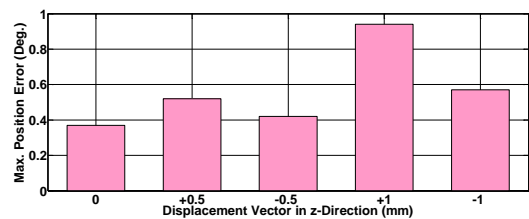


شکل ۹: درصد تغییرات THD پوش ولتاژهای القایی، بیشینه خطای موقعیت و متوسط قدرمطلق خطای موقعیت در ریزالور دارای خطای رانش محوری نسبت به حالت سالم

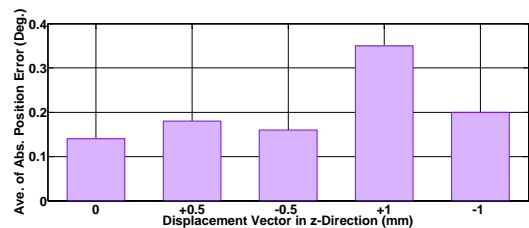
اکنون پیش از تلاش برای کاهش تاثیرپذیری دقت ریزالور از خطای رانش محوری، لازم است مشخص شود چقدر از این افزایش خطا مربوط به جابه‌جا شدن اولیه و ثانویه ترانسفورماتور گردان از روبروی هم است و چقدر مربوط به جابه‌جایی استاتور و رتور. برای این منظور، شبیه‌سازی‌های جدیدی انجام شده‌اند. ابتدا اثر ترانسفورماتور گردان، کاملاً حذف می‌شود. برای این منظور، در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، ولتاژ تغذیه به صورت مستقیم به سیم‌پیچی تحریک رتور وصل می‌شود. این حالت، معادل این است که ترانسفورماتور گردان با نسبت تبدیل یک و کاملاً ایده‌آل باشد. شکل ۱۰، بیشینه خطا و متوسط قدرمطلق خطای موقعیت، را به‌ازای خطای رانش محوری به اندازه ± 1 میلی‌متر، نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با حذف اثر ترانسفورماتور گردان، جابجایی مثبت و منفی تفاوت چندانی ایجاد نمی‌کند.



الف

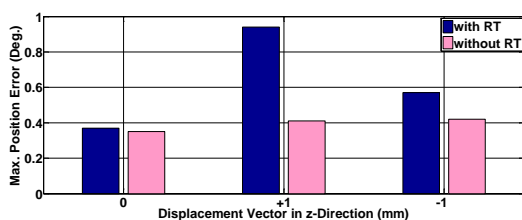


ب

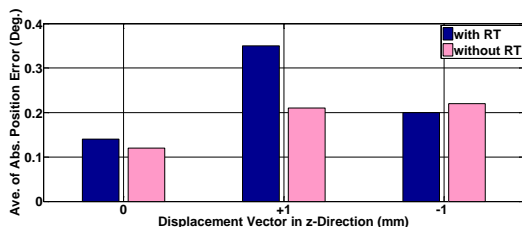


ج

شکل ۸: ریزالور تحت خطای رانش محوری؛ الف) THD پوش ولتاژهای القایی، ب) بیشینه خطای موقعیت و ج) متوسط قدرمطلق خطای موقعیت



الف



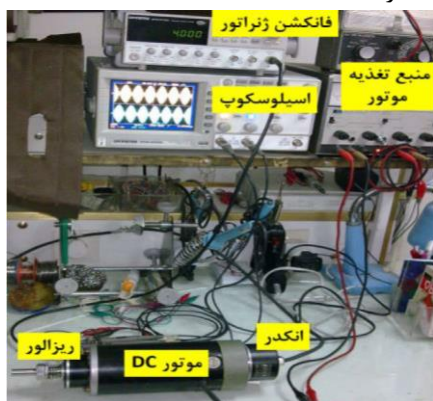
ب

شکل ۱۰: ریزالور با و بدون ترانسفورماتور گردان تحت خطای رانش محوری؛ الف) بیشینه خطای موقعیت و ب) متوسط قدرمطلق خطای موقعیت

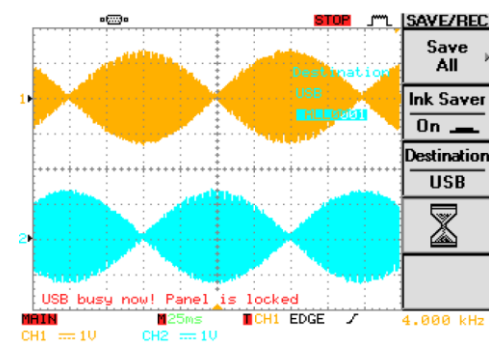
درصد تغییر مقدار THD، بیشینه خطای موقعیت و متوسط قدرمطلق خطای موقعیت نسبت به حالت سالم، در حالت وقوع خطای رانش محوری در شکل ۹، نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود که وقوع خطای رانش محوری به اندازه $+0.5$ میلی‌متر، بیشترین تاثیر را روی THD ولتاژهای خروجی داشته و کمترین تاثیر را روی متوسط قدرمطلق خطا داشته‌است. این وضعیت به‌ازای رانش به اندازه -1 میلی‌متر هم تکرار شده‌است. برای رانش محوری به اندازه -0.5 و $+1$ میلی‌متر، تفاوت خطای هر سه شاخص تعریف‌شده نسبت به حالت سالم تقریباً یکسان است. بنابراین نمی‌توان گفت کدام شاخص کمترین و کدام بیشترین تاثیرپذیری را از خطای رانش محوری دارند. به‌علاوه، مشاهده می‌شود که وقوع خطا به صورت مثبت، تاثیر بیشتری در کاهش دقت ریزالور دارد. در توضیح علت، باید به این نکته توجه نمود که با دور شدن ثانویه ترانسفورماتور گردان و رتور از اولیه ترانسفورماتور گردان، مسیر شار، بین اولیه و ثانویه ترانسفورماتور گردان، از طریق هسته استاتور بسته می‌شود. اما، در تمام شاخص‌های تعریف‌شده،

۶- نتایج آزمایشگاهی

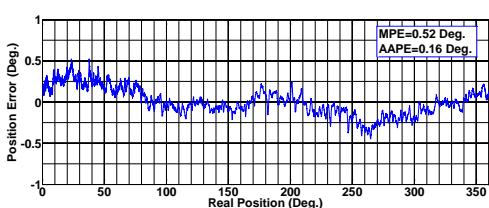
شکل ۳، ریزالور بهینه ساخته شده را نشان می دهد. برای آزمایش عملی این ریزالور، مدار شکل ۱۲-الف مورد استفاده قرار گرفته است. در این سیستم تست، از یک موتور DC برای چرخاندن ریزالور استفاده شده است. این موتور به یک انکدر نوری ۱۸ بیت، به عنوان حسگر مرجع، متصل شده است. تغذیه سیم پیچ تحریک از طریق یک فانکشن ژنراتور با تفکیک پذیری ۰.۱ هرتز انجام می شود و دامنه ولتاژ تحریک توسط یک مدار کنترل کننده خودکار بهره تنظیم می شود. برای مشاهده و ذخیره ولتاژ القا شده در سیم پیچ های سیگنال، اسیلوسکوپ دیجیتال با قدرت نمونه برداری 10^9 نمونه در ثانیه مورد استفاده قرار گرفته است. ولتاژهای خروجی ریزالور ساخته شده در شکل ۱۲-ب، نشان داده شده اند. خطای موقعیت ریزالور ساخته شده، در شکل ۱۲-ج، نشان داده شده است. بیشینه خطای موقعیت و متوسط قدر مطلق این خطا، به ترتیب برابر ۰/۵۲ و ۰/۱۶ درجه، اندازه گیری شده اند. مقایسه نتایج شبیه سازی و تست عملی، نشان می دهد که تفاوت این نتایج کمتر از هفت درصد است.



(الف)



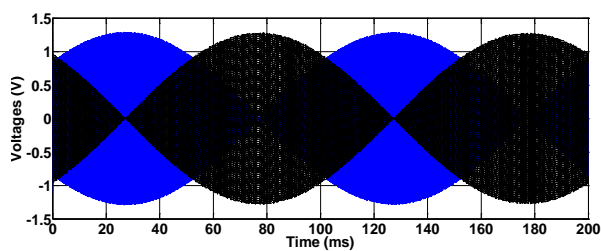
(ب)



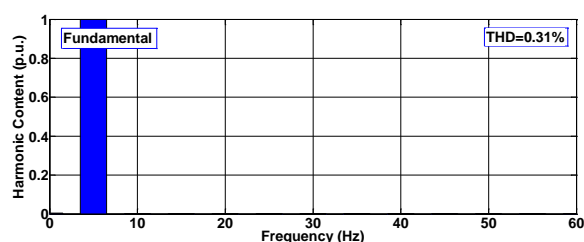
(ج)

شکل ۱۲: نتایج آزمایشگاهی؛ الف) مدار آزمایش عملی، ب) ولتاژهای خروجی و ج) خطای موقعیت اندازه گیری شده

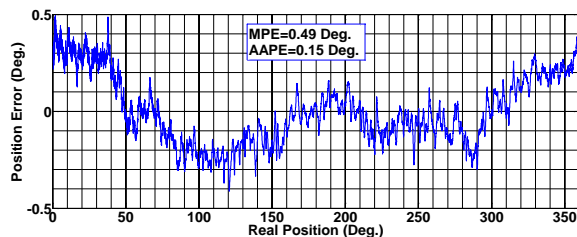
برای کاهش تاثیرپذیری دقت ریزالور از خطای رانش محوری، باید تغییری در ساختار ریزالور ایجاد شود که با جابه جایی محوری رتور و ثانویه ترانسفورماتور گردان، رتور، روبروی استاتور و ثانویه ترانسفورماتور گردان، روبه روی اولیه آن بماند. برای این منظور، طول هسته اولیه ترانسفورماتور گردان و طول استاتور ریزالور به اندازه دو برابر حداکثر رانش محوری ممکن (± 1 میلی متر)، بزرگتر از طول ثانویه و رتور در نظر گرفته می شود. به این ترتیب با بروز خطای رانش محوری، بخش های گردان و ساکن روبروی هم می مانند و تاثیرپذیری ریزالور از خطای رانش محوری کاهش می یابد. اما این کاهش به قیمت افزایش طول محوری حسگر، افزایش حجم آهن و مس و به عبارت دیگر افزایش هزینه حسگر، تحقق می یابد. بنابراین فقط در کاربردهای دقیق که اهمیت اطلاع از موقعیت صحیح بیشتر از قیمت باشد؛ قابل استفاده است. شکل ۱۱-الف، ولتاژهای القایی در ریزالور بهینه را، در شرایط وقوع خطای رانش محوری به اندازه $+1$ میلی متر، نشان می دهد. طیف هارمونیکی پوش این ولتاژها در شکل ۱۱-ب و خطای موقعیت مربوط به آن، در شکل ۱۱-ج، نشان داده شده اند. مقدار THD پوش ولتاژهای خروجی، 0.31% درصد است و بیشینه خطا (MPE) و متوسط قدر مطلق خطای موقعیت (AAPE) به ترتیب 0.49 و 0.15 درجه است.



الف



ب



ج

شکل ۱۱: ریزالور بهینه تحت رانش محوری $+1$ میلی متر؛ الف) ولتاژهای القایی، ب) طیف هارمونیکی پوش ولتاژهای القایی و ج) خطای موقعیت

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد ریزالور تورسیم‌پیچی شده شار شعاعی تحت خطای رانش محوری مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از شبیه‌سازی اجزای محدود سه‌بعدی در حوزه زمان، استفاده شد. اثر ترانسفورماتور گردان نیز در شبیه‌سازی مورد توجه قرار گرفت. ملاحظه گردید که خطای رانش محوری هر سه شاخص، THD ولتاژهای خروجی، بیشینه خطا و متوسط قدر مطلق خطای موقعیت را تحت-تاثیر قرار می‌دهد. سپس تاثیر جابه‌جایی ثانویه ترانسفورماتور گردان از مقابل اولیه آن و جابه‌جایی رتور از مقابل استاتور تفکیک گردید و نهایتاً یک طرح بهینه برای کاهش تاثیرپذیری دقت ریزالور از خطای رانش محوری ارائه گردید. در پایان نمونه عملی ریزالور بهینه ساخته و آزمایش شد. خطای کمتر از ۰.۷٪ بین نتایج شبیه‌سازی و تست عملی، فرایند بهینه‌سازی و تحلیل را تایید کرد.

مراجع

- [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 سلسله‌های 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.
- [۱۲] ح. صانعی، طراحی، تحلیل و ساخت ریزالور رلوکتانس متغیر شار محوری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، ۱۳۹۶.
- [13] R. Alipour-Sarabi, Z. Nasiri-Gheidari, F. Tootoonchian, and H. Oraee, "Effects of Physical Parameters on the Accuracy of Axial Flux Resolvers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 4, pp. 1–11, April 2017.
- [14] C.S. Jin, I.S. Jang, J.N. Bae, J. Lee, and W.H. Kim, "Proposal of Improved Winding Method for VR Resolver," *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 51, no. 3, pp. , March 2015.
- [15] Z. Nasiri-Gheidari and F. Tootoonchian, F. Zare "Design Oriented Technique for Mitigating Position Error Due To Shaft Run-out in Sinusoidal-Rotor Variable Reluctance Resolvers," *iET Electric Power Application*, vol. 11, no. 1, pp. 132 – 141, 2017.
- [16] Z. Zhang, F. Ni, Y. Dong, C. Guo, M. Jin, and H. Liu, "A Novel Absolute Magnetic Rotary Sensor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 7, pp. 4408–4419, July 2015.
- [17] L. Sun, "Analysis and improvement on the structure of a variable reluctance resolvers," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 8, pp. 2002–2008, Aug. 2008.
- [18] X. Ge, Z. Q. Zhu, R. Ren, and J. T. Chen, "A Novel Variable Reluctance Resolver with Nonoverlapping Tooth-Coil Windings", ", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 30, no. 2, pp. 784–794, June 2015.
- [19] Z. Nasiri-Gheidari, R. Alipour-Sarabi, F. Tootoonchian, and F. Zare, "Performance Evaluation of Disk Type Variable Reluctance Resolvers", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 17, no. 13, pp. 4037–4045, July 2017.
- [۱] زهرا نصیری قیداری، «بررسی تأثیر شار نشتی ترانسفورماتور گردان روی موقعیت خروجی ریزالوره‌های بدون جاروبک شار محوری»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۲، صص ۷۴۱–۷۴۹، تابستان ۹۶
- [۲] حجت حاتمى، محمدباقر بناءشرفیانی، 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.