

طراحی بهینه قطب موتور سنکرون آهنربای دائم مجهز به چرخ‌دنده مغناطیسی، به منظور بهبود توزیع میدان مغناطیسی و کاهش نوسانات گشتاور

سید احمد رضا افسری کاشانی*

استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

(دریافت: ۹۸/۰۸/۲۵، پذیرش: ۹۸/۱۲/۱۹)

چکیده

در این مقاله ساختار شار محوری ترکیبی موتور سنکرون آهنربای دائم به همراه چرخ‌دنده مغناطیسی به منظور افزایش چگالی گشتاور مورد بررسی قرار می‌گیرد. موتور دارای دو روتور با آهنرباهای میله‌ای با قطبیدگی مماسی و فاقد هسته بوده و مدولاتورها در فواصل هوایی نقش مدولاسیون میدان مغناطیسی را برای استاتور و روتور ایفا می‌کنند. شکل در نظر گرفته شده برای آهنرباهای دائم امکان ایجاد راندمان زیادت‌تر و در عین حال طول محوری کم‌تر را فراهم می‌آورد. قطب‌های نرم مغناطیسی قرار گرفته در بین آهنرباها، نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع میدان مغناطیسی و نیز پروفیل گشتاور حاصل از ماشین را بر عهده دارند. در این مقاله رخ قطب نرم مغناطیس به‌گونه‌ای اصلاح و بهینه می‌گردد تا با استفاده از فاصله هوایی متغیر بتوان توزیع میدان سینوسی‌تر و گشتاور خروجی زیادت‌تر و نیز نوسانات گشتاور کم‌تر را نسبت به حالت اولیه به‌دست آورد.

کلیدواژه‌ها: موتور شار محور آهنربای دائم، چرخ‌دنده مغناطیسی، موتور سنکرون شار محور، گشتاور، چگالی شار مغناطیسی، تحلیل المان محدود

۱. مقدمه

آهنربا، حذف تلفات هسته و ماده مورد نیاز هسته روتور را نیز فراهم می‌آورد.

در کنار ساختارهای مختلف ماشین‌های الکتریکی، نیاز به تغییر سرعت یا گشتاور، استفاده از چرخ‌دنده‌های مکانیکی را الزامی می‌سازد. معایب فراوان چرخ‌دنده‌های مکانیکی، تمایلات را به سوی نوع جدیدی از چرخ‌دنده‌ها با نام چرخ‌دنده مغناطیسی سوق داده است. این چرخ‌دنده‌ها از مزایایی همچون عدم تماس فیزیکی بین محورها، عدم لرزش و سر و صدا، عدم نیاز به روانکاری و تعمیر و نگهداری و حفاظت در مقابل اضافه بار و عدم شکستگی و خردشدگی بهره‌مند می‌باشند [۱۱-۱۲]. این نوع چرخ‌دنده‌ها در انواع ساختار شار شعاعی [۱۳]، شار محوری [۱۴]، خطی [۱۵] و نیز ساختارهای جدیدی [۱۶] معرفی و تحلیل گردیده‌اند. ترکیب این نوع چرخ‌دنده‌ها با ماشین‌های الکتریکی علاوه بر امکان تأمین گشتاورهای زیادت‌تر (و یا سرعت‌های زیادت‌تر)، ضمن صرفه‌جویی در هزینه مواد به‌کار رفته و حجم اشغال شده، معایب انواع مکانیکی را نیز مرتفع می‌سازد.

ماشین‌های الکتریکی شار محور آهنربای دائم به دلیل ویژگی‌های خاص خود کاربردهای فراوانی در سامانه‌های حمل و نقل و نیز انرژی‌های تجدیدپذیر پیدا کرده‌اند. طول محوری مناسب جهت جایگذاری، چگالی گشتاور و توان زیاد و نیز سهولت ساخت و تحمل اغتشاشات مکانیکی از جمله مزیت‌های این نوع ماشین‌های الکتریکی در مقایسه با انواع متداول هم‌محور می‌باشد [۳-۱]. تاکنون ساختارهای متنوعی برای استاتور و نیز روتور آهنربایی این ماشین‌ها ارائه شده است. استاتورهای با هسته و بدون هسته، سیم‌پیچی با دندانه و بدون دندانه، روتورهای تکی یا چندگانه، آهنرباهای سطحی یا دغنی و ... [۱۰-۴]. مزایا و معایب این نوع ماشین‌ها، تمایلات را به سوی نوع خاصی از روتور آهنربای دغنی بدون هسته و نیز استاتور سیم‌پیچی شده با هسته سوق داده است که علاوه بر بهره‌مندی از ویژگی‌های آهنربای دغنی در سرعت زیاد و نیز امکان استفاده بهینه‌تر از سطح مؤثر

هارمونیک برابر با قطب روتور مقابل را ایجاد نماید. این هارمونیک با کوپل شدن به روتور مقابل با سرعتی متفاوت (بسته به سرعت هارمونیک کوپل شده) آن را می چرخاند [۱۷]. به منظور انتقال مؤثر گشتاور انتقالی، تعداد مدولاتورها (n_s)، تعداد جفت قطب روتور (p_l) و تعداد جفت قطب استاتور (p_h) از رابطه زیر تبعیت می نماید [۱۸].

(۱)

$$n_s = p_l + p_h$$

سرعت دورانی روتورها توسط رابطه زیر بیان می گردد:

(۲)

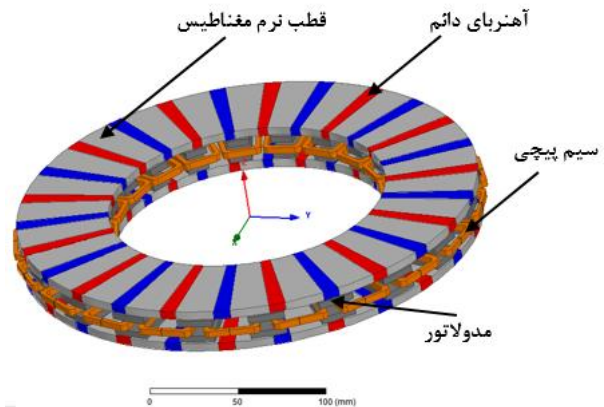
$$\omega_h = \frac{p_l}{p_l - n_s} \omega_l + \frac{n_s}{n_s - p_l} \omega_s$$

در این رابطه، $\omega_l, \omega_h, \omega_s$ به ترتیب برابر با سرعت دورانی مدولاتورها، میدان دوار استاتور و روتور می باشد. در این مقاله روتور میانی (مدولاتورها) ثابت در نظر گرفته می شود.

جدول (۱): ابعاد موتور الکتریکی آهنربای دائم مجهز به گیربکس مغناطیسی.

مقدار	پارامتر
۴/۵Nm	گشتاور نامی
۲۶	تعداد قطب روتور
۱۸	تعداد قطب استاتور
۳	تعداد فاز استاتور
۶	تعداد سیم پیچ در هر فاز
۱ mm	فواصل هوایی
۲۰	تعداد قطعات مدولاتور
۱۳۴ mm	شعاع خارجی
۸۰ mm	شعاع داخلی
۵ mm	ضخامت آهنربا (NdFeB-35)
۴ mm	ضخامت مدولاتورها (M6)
۴ mm	ضخامت محوری سیم پیچ
۱/۲۳ T	پس ماند آهنربا
۹ deg	کمان مدولاتور

در این مقاله یک موتور سنکرون شار محور آهنربای دائم با دو روتور، مجهز به چرخ دنده مغناطیسی، معرفی و به منظور بهبود کیفیت مشخصات خروجی و توزیع مطلوب میدان مغناطیسی در فواصل هوایی، هندسه قطب روتور، مورد بهینه سازی قرار می گیرد. بهبود مشخصه گشتاور و تقویت گشتاور متوسط و نیز کاهش نوسانات گشتاور از اهداف دیگر این طراحی می باشد. طرح کلی موتور مذکور در شکل (۱) ارائه گردیده است.



شکل (۱): اجزای مختلف موتور شار محور با گیربکس مغناطیسی.

۲. ساختار و اصول عملکرد

یک موتور سنکرون شار محور با آهنربای دلفنی و روتور دوگانه مجهز به گیربکس مغناطیسی جهت به کارگیری در خودروی هایبرید مورد بررسی و طراحی قرار می گیرد. جدول (۱) ابعاد اصلی و مشخصات این موتور الکتریکی را نشان می دهد. این ابعاد با الهام از مراجع [۳-۴] تعیین گردیده اند.

سطح مقطع ساختار مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است. در ساختار اول قطعات نرم مغناطیسی در بین آهنرباهای روتور دارای سطح صاف و در نتیجه فاصله هوایی ثابت می باشند در حالی که در ساختار پیشنهادی سطح این قطعه به صورت سینوسی تغییر داده می شود تا توزیع مطلوب میدان مغناطیسی در فاصله هوایی به دست آید. در شکل (۲-الف) ساختار متداول آهنربای سطحی با توالی S,N نشان داده شده است. در شکل (۲-ب) ساختار آهنربای دلفنی با قطبیدگی مماسی و سطح قطب صاف نشان داده شده است. در شکل (۲-ج) ساختار آهنربای دلفنی با قطبیدگی مماسی و سطح قطب سینوسی نشان داده شده است. به منظور مقایسه این ساختارها، حجم ماده آهنربای به کاررفته در سه ساختار مذکور، یکسان در نظر گرفته می شود. میدان مغناطیسی تولیدشده توسط استاتور و روتور آهنربایی، توسط قطعات مدولاتور میانی، مدوله شده تا

وجود شار ناشی، توزیع میدان در فاصله هوایی ($B_g(\phi)$) بر حسب موقعیت روتور (ϕ) را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$B_g(\phi) = \frac{B_r}{1 + \mu_r \frac{ag(\phi)}{ag_0 - ag(\phi)}} \quad (۳)$$

که در آن، B_r چگالی شار پس‌ماند آهنربا و μ_r ضریب نفوذپذیری نسبی آهنربا (که تقریباً برابر با یک است) می‌باشد. با فرض این که کل بیشینه طول فاصله هوایی برابر با ag_0 و تغییرات طول فاصله هوایی در حالت قطب سینوسی بر حسب موقعیت زاویه‌ای برابر با $ag(\phi)$ می‌توان نتیجه گرفت که:

$$B_g(\phi) = \frac{(ag_0 - ag(\phi))B_r}{ag_0} \quad (۴)$$

هدف، رسیدن به یک توزیع سینوسی میدان مغناطیسی در فاصله هوایی می‌باشد. از این رو، می‌توان این هدف را به صورت رابطه زیر بیان نمود:

$$B_g(\phi) = B_{m1} \sin(p\phi) \quad (۵)$$

که در آن، p تعداد جفت قطب روتور و B_{m1} دامنه چگالی شار مطلوب می‌باشد. از رابطه (۴) و (۵) می‌توان نتیجه گرفت که:

$$(ag_0 - ag(\phi)) = \frac{ag_0 B_g(\phi)}{B_r} = \frac{ag_0 B_{m1}}{B_r} \sin(p\phi) \quad (۶)$$

اگر ضخامت قطب روتور به صورت سینوسی فرض شود، آن‌گاه خواهیم داشت:

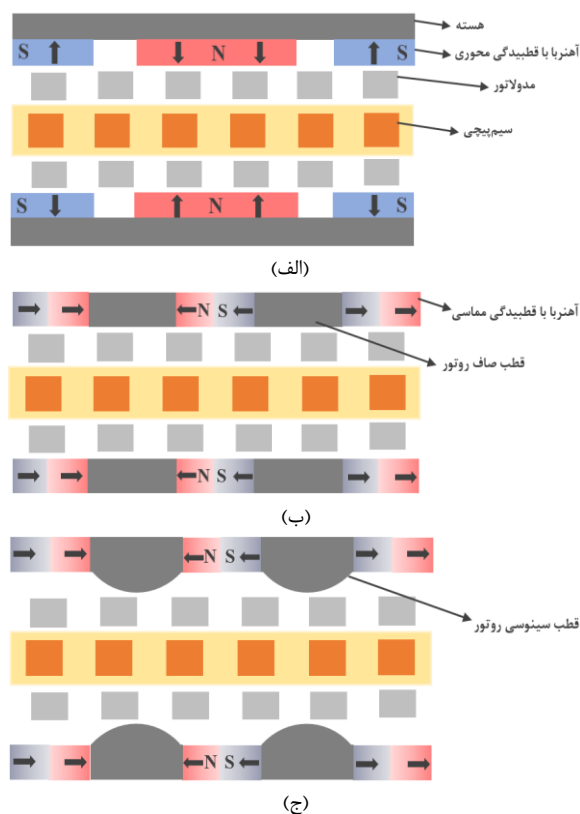
$$(ag_0 - ag(\phi)) = A_g \sin(p\phi) \quad (۷)$$

از روابط (۶) و (۷) می‌توان نتیجه گرفت که:

$$B_{m1} = \frac{(ag_0 - ag(\phi))B_r}{ag_0} \quad (۸)$$

$$B_g(\phi) = \frac{A_g B_r}{ag_0} \sin(p\phi) \quad (۹)$$

رابطه (۹) بیان نحوه تأثیر قطب سینوسی بر توزیع میدان مغناطیسی سینوسی است. با این ایده طراحی و بهینه‌سازی قطب روتور ارائه می‌گردد.



شکل (۲): سطح مقطع موتور سنکرون مغناطیس دائم با روتور دوگانه و چرخ‌دنده مغناطیسی الف: ساختار آهنربا سطحی متداول ب: آهنربای دلفنی میله‌ای با قطعات قطب مسطح ج: آهنربا دلفنی میله‌ای با قطعات قطب سینوسی.

۳. مدل‌سازی المان محدود سه‌بعدی

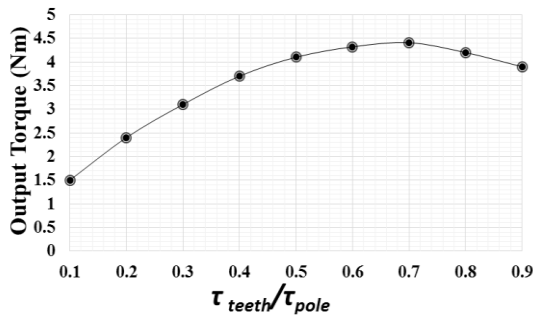
به منظور بررسی ساختار پیشنهادی ابتدا با توجه به ثابت بودن شعاع‌های داخلی و خارجی، نسبت کمان قطب (نرم مغناطیس) (τ_{teeth})، به گام کل قطب (τ_{pole}) به منظور استحصال بیشینه گشتاور انتقالی، بهینه‌سازی می‌گردد (شکل ۳-الف)). در ادامه قوس قطب روتور با تغییر مرکز کمان و در نتیجه تغییر توزیع فاصله هوایی به منظور سینوسی‌تر نمودن توزیع میدان مغناطیسی، بیشینه نمودن گشتاور انتقالی و کمینه نمودن نوسانات گشتاور بهینه‌سازی می‌گردد (شکل ۳-ب)). در این طراحی فاصله هوایی کمینه، ثابت و برابر با ۱ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود ($ag_0=ag_1=ag_2=\dots=1mm$).

اگر فرض شود که فاصله هوایی به صورت تابعی از موقعیت زاویه مماسی (مانند مقطع نشان داده شده در شکل ۳) به صورت $I_g(\phi)$ باشد، آن‌گاه می‌توان با فرض عدم وجود اشباع و نیز عدم

مش بندی اولیه توسط کاربر امکان پذیر است. در بیشتر موارد نرم افزار از قابلیت Ansoft TAU Mesh به منظور مش بندی های با دقت، سرعت، کیفیت و قابلیت اطمینان مناسب در مقایسه با گزینه Ansoft Classic Mesh بهره می برد. در نرم افزار به روش بهبود تکراری در نقاط حساس با چگالی خطای بالا، مش بندی بهبود می یابد.

نسبت کمان قطب به گام قطب از موارد تعیین کننده در گشتاور خروجی سیستم می باشد. نسبت های کم، موجب تضعیف سطح مؤثر شار تولیدی و در نتیجه کاهش قدرت میدان مغناطیسی و نیز چگالی گشتاور خروجی می گردد. از طرفی دیگر افزایش بیش از حد این نسبت موجب نزدیکی قطب های ناهمنام و مجاورت آنها می گردد و این موضوع موجب ایجاد شار نشتی بین قطب ها، بدون عبور از مدولاتورها می گردد و چگالی گشتاور خروجی را کاهش می دهد. بهینه سازی این نسبت تضمین کننده این دو موضوع و بیشینه نمودن گشتاور خروجی می گردد.

شکل (۵) و جدول (۲) نشان دهنده نتایج بهینه سازی نسبت کمان قطب نرم مغناطیس به گام کل قطب را نشان می دهد. همان طور که در جدول (۱) نشان داده شده به ازای مقدار نسبت بهینه ۷۰٪ بیشینه چگالی گشتاور ۴/۴ Nm در دسترس خواهد بود.

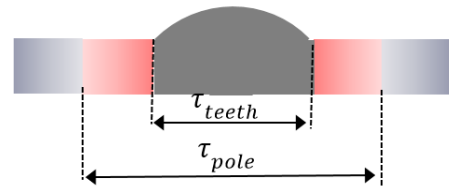


شکل (۵): بهینه سازی نسبت کمان نرم مغناطیس قطب به گام قطب.

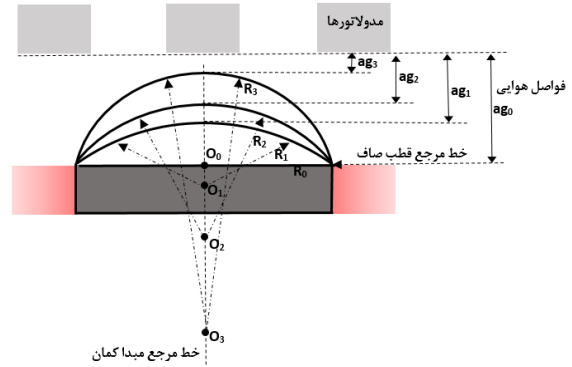
جدول (۲): تعیین مقادیر بهینه نسبت کمان قطب نرم مغناطیس به گام قطب.

پارامتر	محدوده تغییرات (%)	مقدار بهینه	چگالی گشتاور خروجی (Nm)
τ_{teeth}/τ_{pole}	۱۰-۹۰	۷۰	۴,۴

ضخامت مماسی آهنربا به عنوان منشأ نیرو محرکه مغناطیسی در رقابت با رخ قطب به عنوان سطح مؤثر انتقال دهنده شار مغناطیسی در رقابت بوده و مقدار نسبت بهینه ۷۰٪ را ارائه می دهد. در شرایط حاضر، این مدل به عنوان مرجع بهینه سازی در مرحله بعد مورد استفاده قرار می گیرد.



(الف)

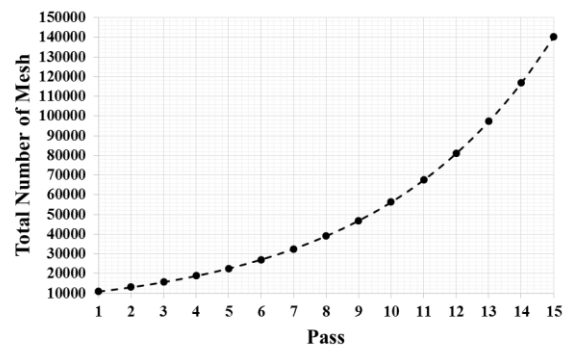


(ب)

شکل (۳): الف: متغیرهای بهینه سازی کمان قطب (نرم مغناطیس) و گام قطب ب: نحوه مدل سازی تغییرات مرکز کمان قطب روتور آهنربایی و فواصل هوایی مرتبط.

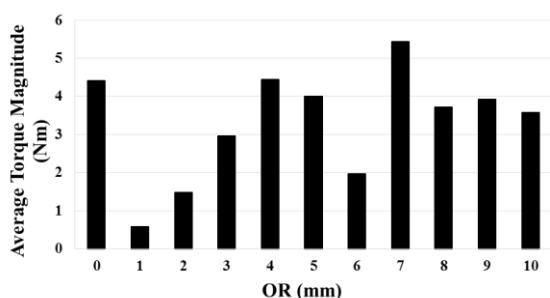
۳-۱. بهینه سازی نسبت کمان قطب به گام قطب

در این مقاله از نرم افزار المان محدود Maxwell v.16 استفاده شده است. در خصوص مش بندی در نرم افزار ماکسول به منظور حل و مدل سازی سیستم، از قابلیت تولید خودکار مش در این نرم افزار که قابلیت بالا و دقت بسیار خوبی را در بردار استفاده گردیده است. منحنی تعداد مش بندی طرح سه بعدی در شکل (۴) نشان داده شده است.

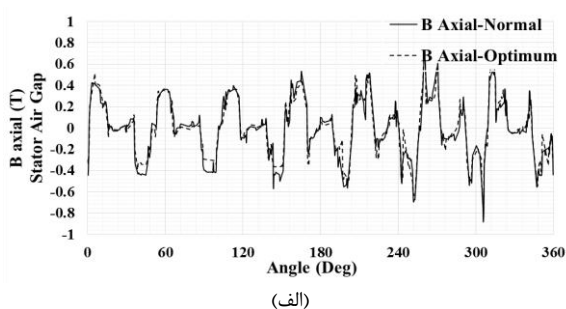


شکل (۴): منحنی تغییرات تعداد مش در تکرارهای مختلف نرم افزار المان محدود.

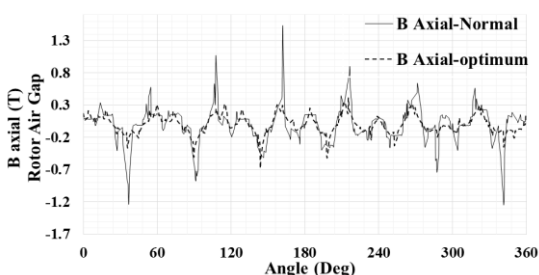
نرم افزار ماکسول در ابتدا به صورت تقریبی یک مش بندی اولیه را بر اساس "surface approximation settings" ارائه می نماید. در صورت نیاز نرم افزار به بهبود وضعیت مش و جزئی تر نمودن آن در نقاط حساس تر می پردازد. در صورت نیاز امکان



شکل (۷): دامنه گشتاور متوسط به ازای مقادیر مختلف بهینه‌سازی OR



(الف)



(ب)

شکل (۸): توزیع مؤلفه محوری میدان مغناطیسی در دو طراحی پایه و بهینه شده سینوسی، الف: فاصله هوایی استاتور و ب: فاصله هوایی روتور

تغییرات گشتاور دینامیکی روتور آهنربای دائم در دو حالت روتور سینوسی بهینه و روتور مسطح در شکل (۹) نشان داده شده است. نوسانات گشتاور برای قطب صاف اولیه و مدل سینوسی بهینه به ترتیب معادل ۰.۷۷٪ و ۰.۳۵٪ می‌باشد. طیف هارمونیک ولتاژ برگشتی در دوساختار بهینه‌سازی شده و اولیه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. THD در دو ساختار پایه و بهینه سینوسی به ترتیب معادل ۱۹٪ و ۱۳٪ می‌باشد.

شکل (۱۱) توزیع دامنه چگالی شار مغناطیسی را در اجزای مختلف مدولاتور و قطب‌های نرم مغناطیسی روتور در دو ساختار پایه و بهینه‌شده سینوسی نشان می‌دهد.

۲-۳. بهینه‌سازی سینوسی رخ قطب

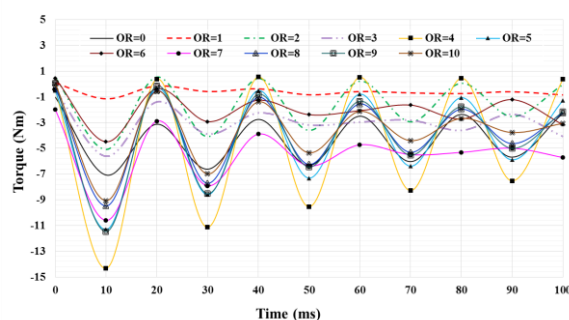
در این بخش شکل‌دهی رخ قطب نرم مغناطیس بر اساس شکل (۳-ب) با تغییر مرکز کمان (محدودشده به قطب بهینه بخش قبل) به دست می‌آید. معادل این تغییر شکل قطب، تغییر توزیع فاصله هوایی در کل سطح روتور و استاتور خواهد بود. متغیر بهینه‌سازی OR به صورت میزان بیرون‌زدگی قطب سینوسی نسبت به حالت اولیه به صورت زیر تعریف می‌گردد.

(۱۰)

$$OR = O_i - O_0 \quad i = 1, 2, \dots$$

بهینه‌سازی به منظور استحصال بیشینه گشتاور خروجی و کمترین درصد نوسانات گشتاور (Cogging Torque) صورت می‌پذیرد.

پروفیل تغییرات گشتاور استاتیکی روتور به ازای مقادیر متفاوت بیرون‌زدگی روتور سینوسی در شکل (۶) نشان داده شده است. درصد نوسانات گشتاور و نیز متوسط گشتاور روتور، ربا ازای مقادیر مختلف OR متفاوت بوده و مقدار بهینه $OR=7$ mm را نشان می‌دهد. شکل (۷) دامنه تغییرات گشتاور متوسط را برای مقادیر مختلف بهینه‌سازی در شکل (۶) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است مقدار بیشینه متوسط گشتاور معادل $4/4$ Nm در مقابل گشتاور قطب صاف معادل $4/4$ Nm قابل استحصال می‌باشد.



شکل (۶): پروفیل تغییرات گشتاور استاتیکی بر حسب زمان برای مقادیر مختلف متغیر بهینه‌سازی OR

توزیع مؤلفه محوری میدان مغناطیسی در این دو ساختار در شکل (۸) نشان داده شده است. تقویت مؤلفه محوری نشان‌دهنده برتری طرح مذکور در مقایسه با ساختار روتور مسطح می‌باشد.

جدول (۳): مقایسه ساختار موتور قطب سینوسی و موتور آهنربای

سطحی.

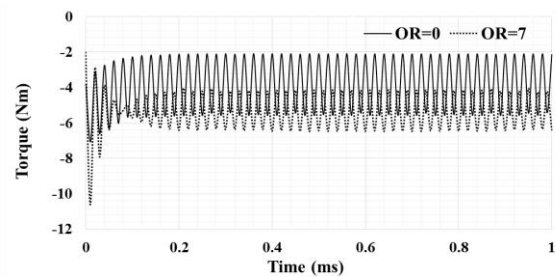
ضریب توان (PF)	نوسانات گشتاور %	گشتاور (Nm)	THD%	دامنه مؤلفه اصلی Back EMF (V)	ساختار
۰/۷۸	٪۷۷	۴/۴	٪۱۹	۲/۹۹	قطب صاف
۰/۹۱	٪۳۵	۵/۴۳	٪۱۳	۳/۱۴	قطب سینوسی

۴. نتیجه گیری

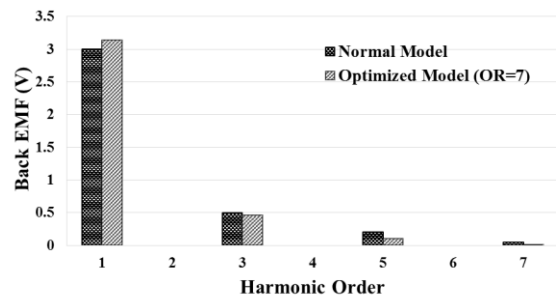
در این مقاله یک موتور شار محور آهنربای دینی میله‌ای بدون هسته مجهز به چرخ‌دنده مغناطیسی معرفی و با استفاده از نرم‌افزار المان محدود و مدل‌سازی سه‌بعدی بهینه‌سازی گردید. ساختار مورد مطالعه با ثابت فرض نمودن حجم آهنربا، جریان استاتور، و شعاع‌های داخلی و خارجی به‌منظور بیشینه نمودن گشتاور، سینوسی نمودن توزیع میدان مغناطیسی، و در نتیجه کاهش نوسانات گشتاور، بهینه‌سازی گردیده و نتایج با مدل اولیه مورد مقایسه قرار گرفت. این اهداف با سینوسی نمودن رخ قطب روتور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بهینه‌سازی در مقایسه با مدل پایه، برتری چگالی گشتاور، ولتاژ برگشتی سینوسی‌تر، درصد نوسانات گشتاور کمتر و توزیع میدان سینوسی‌تر را نتیجه می‌دهد.

۵. مراجع

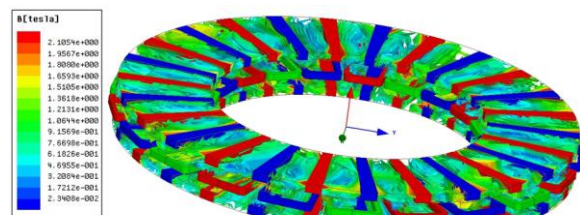
- [1] Z. Zhang, F. Profumo, and A. Tenconi, "Axial flux versus radial flux PM motors," in Proc. SPEEDAM, Capri, Italy, 1996, pp. A4-19–A4-25.
- [2] Z. Zhang, F. Profumo, and A. Tenconi, "Axial flux versus radial flux PM motors," in Proc. SPEEDAM, Capri, Italy, 1996, pp. A4-19–A4-25.
- [3] M. Aydin, S. Huang and T. A. Lipo, "Torque quality and comparison of internal and external rotor axial flux surface-magnet disc machines", IEEE Trans. on Ind. Electron., 822-830 pp., 2006.
- [4] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi, and T. A. Lipo, "A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, no. 1, pp. 92–97, Jan./Feb. 1998.
- [5] F. Zhao, T. A. Lipo, B. Kwon, "A novel dual-stator axial-flux spoke-type permanent magnet vernier machine for direct-drive applications," IEEE Trans. on Mag., vol 50, no. 50, 2014.
- [6] F. Zhao, T. A. Lipo, B. Kwon, "Novel dual-rotor, axial field, fault-tolerant flux switching permanent magnet machine with high torque performance," IEEE Trans. on Mag., to be published, 2015.
- [7] F. Zhao, T. A. Lipo, B. Kwon, "Design and analysis of a novel dual stator axial flux spoke-type ferrite permanent magnet machine," in Proc. IEEE - 39th Annual Conference of Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 2013, pp. 2714-2719.



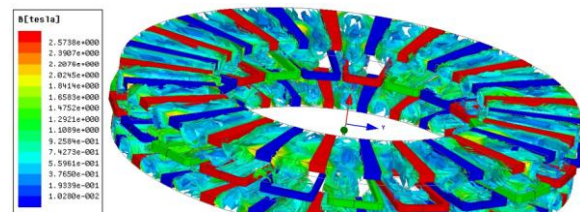
شکل (۹): گشتاور دینامیکی روتور در دو حالت بهینه و پایه



شکل (۱۰): توزیع هارمونیکی ولتاژ Back EMF در دو ساختار اولیه و بهینه‌سازی شده سینوسی.



(الف)



(ب)

شکل (۱۱): توزیع چگالی شار مغناطیسی در اجزای مختلف نرم مغناطیس روتور و مدولاتورها الف: ساختار قطب صاف ب: ساختار بهینه قطب سینوسی.

در جدول (۳) نتایج دو ساختار پیشنهادی سینوسی و ساختار اولیه روتور قطب صاف مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در ساختار روتور سینوسی در مقایسه با ساختار روتور صاف، درصد THD ولتاژ برگشتی به مقدار ٪۶ کاهش یافته و مؤلفه اصلی ولتاژ برگشتی در حدود ٪۴/۶ بهبود پیدا کرده است. متوسط گشتاور خروجی ٪۲۳/۴ و نوسانات گشتاور در حدود ٪۴۲ بهبود پیدا کرده است. ضریب توان نیز به دلیل کنترل شار پیوندی و تقویت آن از مقدار ۰/۷۸ به ۰/۹۱ بهبود یافته است.

- [14] S.A. Afsari, H. Heydari, B. Dianati, "Cogging Torque Mitigation in Axial Flux Magnetic Gear System Based on Skew Effects Using an Improved Quasi 3-D Analytical Method," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 51, pp. 1-11, 2015.
- [15] K. Atallah, J. B. Wang, and D. Howe, "A high-performance linear magnetic gear," *Journal of Applied Physics.*, vol. 97, no. 10, pp. 10N516-1-3, May. 2005.
- [16] S.A. Afsari, H. Heydari, and E. Bashar, "Viable arcuate double-sided magnetic gear for competitive torque density transmission capability," *Journal of Scientia Iranica D*, vol. 23, no. 3, pp. 1251-1260, June 2016.
- [17] S.A. Afsari, "Performance analysis and optimization of a novel arcuate double-sided magnetic gear using quasi 3-D analytical modeling for wind power application," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 6, no. 2, pp. 1-9, 2018.
- [18] X. Ren, D. Li, R. Qu and T. Pei, "Back EMF harmonic analysis of permanent magnet magnetic geared machine," *IEEE Transactions on Industrial Electronics, (Early Access)*.
- [19] K. Wang, Z. Q. Zhu and G. Ombach, "Torque Enhancement of Surface-Mounted Permanent Magnet Machine Using Third-Order Harmonic," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 3, pp. 104-113, March 2014.
- [20] K. Wang, Z. Q. Zhu, G. Ombach and W. Chlebosz, "Average Torque Improvement of Interior Permanent-Magnet Machine Using Third Harmonic in Rotor Shape," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 9, pp. 5047-5057, Sept. 2014.
- [8] R. Benlamine, F. Dubas, S. Randi, D. Lhotellier and C. Espanet, "3-D numerical hybrid method for PM eddy-current losses calculation: Application to axial-flux PMSMs," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 51, no. 7, July 2015.
- [9] R. Bojoi, G. Pellegrino, A. Cavagnino and P. Guglielmi, "Direct flux vector control of axial flux IPM motors for in-wheel traction solutions," in Proc. IEEE Annual Conference of Industrial Electronics Society, Arizona, USA, 2010, pp. 2224-2229.
- [10] R. Benlamine, F. Dubas, C. Espanet, S. A. Randi, D. Lhotellier, "Design of an axial-flux interior permanent-magnet synchronous motor for automotive application: Performance comparison with electric motors used in EVs and HEVs," in Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Coimbra, Portugal, 2014, pp. 1-6.
- [11] K. Li and J. Z. Bird, "A review of the volumetric torque density of rotary magnetic gear designs," *XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM) Alexandroupoli*, pp. 2016-2022, 2018.
- [12] B. Dianati, H. Heydari, S.A. Afsari, "Analytical Computation of Air-Gap Magnetic Field in a Viable Superconductive Magnetic Gear," *IEEE Trans. on Applied Supercon.*, vol. 26, pp. 1-12, 2016.
- [13] S. A. Afsari Kashani, "Rotor Pole Design of Radial Flux Magnetic Gear for Reduction of Flux Density Harmonics and Cogging Torque," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity, (Early Access)*.

Optimal Design of Magnetic Geared PM Synchronous Motor Pole Shape to Improve Magnetic Field Distribution and Reduce Cogging Torque

S. A. R. Afsari Kashani^{1*}

Faculty of Computer and Electrical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

(Received: 16/11/2019; Accepted: 09/03/2020)

Abstract

In this paper, the combined axial flux structure of a permanent magnet synchronous motor with a magnetic gearbox is analyzed with the aim of increasing the torque density. The motor has two rotors with tangential magnetized spoke type PMs and coreless structure. Modulators perform the role of magnetic field modulation for the stator and rotor over the air gaps. The shape of permanent magnets allows higher efficiency and at the same time lower axial length. Soft magnetic poles of the rotor located between the magnets play a decisive role in the magnetic field distribution as well as the torque and magnetic field profile of the machine. In this paper, the shape of the soft magnetic pole is optimized to obtain a higher sine field distribution and higher output torque in addition to a lower cogging torque using the variable airgap.

Keywords: axial flux PM motor, magnetic gear, axial flux synchronous motor, torque, magnetic flux density, finite element method

* Corresponding author E-mail: afsari@kashanu.ac.ir