

بررسی تأثیر ایجاد شیار در دندانه موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک

بر گشتاور اثر دندانه، تلفات و چگالی شار هسته

چکیده: موتورهای مغناطیس دائم بدون جاروبک دارای مزیت‌های چشم‌گیری هستند و امروزه کاربردهای بسیاری یافته‌اند. با وجود بازدهی قابل قبول و چگالی انرژی بالا، وجود اعوجاج در گشتاور خروجی آن‌ها از مهمترین اشکالاتی است که در عملکرد موتور وجود دارد. در این مقاله با در نظر گرفتن گشتاور اثر دندانه به عنوان عامل اصلی ایجاد اعوجاج در ساختار موتور، به بررسی ایجاد شیار در کف دندانه‌های استاتور به عنوان یکی از راهکارهای کاهش دامنه‌ی تغییرات گشتاور اثر دندانه پرداخته شده است. برای این کار با استفاده از تحلیل اجزا محدود نحوه‌ی تغییرات گشتاور اثر دندانه به ازای تغییرات ابعاد شیارهای ایجاد شده در دندانه‌ی استاتور بررسی شده و با هدف نزدیک کردن تغییرات شار در شیار درون دندانه‌ها به تغییرات شار در شیار اصلی بین دندانه‌ها، ساختار مناسب برای ایجاد شیار درون دندانه‌ها پیشنهاد شده است. در ادامه تأثیر ایجاد دندانه در شیارهای استاتور بر تلفات هسته موتور و نیز چگالی شار هسته بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: موتور مغناطیس دائم، ایجاد شیار در دندانه، گشتاور اثر دندانه، تلفات هسته

Investigation Of Making Slot Effects On Cogging Torque, Core Losses And Core Flux Density In Brushless PM Motor

ABSTRACT: Brushless permanent magnet motors have considerable advantages and have found many applications. Despite the acceptable efficiency, output torque ripple is the main drawbacks of motor performance. In this article effect of air gap flux variation on cogging torque is investigated. Various dimensions of the slots in permanent magnet's stator tooth is created and cogging torque variation is investigated using finite element method. Proper slot shaping is suggested and core loss variation is investigated.

Keywords: PM motor, slot creation in tooth, cogging torque, core losses

۱- مقدمه

سرعت حین عملکرد در حالت تضعیف میدان از دیگر ویژگی‌های موتورهای مغناطیس دائم هستند [۴]. با وجود مزایای بسیار این موتور، اشکالات تأثیرگذاری نیز در عملکرد آن وجود دارد که وجود گشتاور اثر دندانه یکی از مهمترین معایب این موتور است. گشتاور اثر دندانه معلول تفاوت طول فاصله‌ی هوایی مکانیکی و مغناطیسی است و عامل اصلی تولید اعوجاج در گشتاور خروجی است. این گشتاور یک گشتاور نوسانی است و بخاطر پرمانس متغیر بین استاتور و روتور به وجود می‌آید [۵]. استفاده از نسبت متفاوت گام ماده‌ی مغناطیس دائم به گام قطب در [۶] و [۷]، استفاده از قطب‌های مغناطیس دائم با چگالی شار مانده‌ی متفاوت در [۸] و استفاده از روش‌های بهینه‌سازی شکل قطب مغناطیس دائم در [۹] از جمله راهکارهایی هستند که برای کاهش

موتورهای مغناطیس دائم امروزه کاربردهای بسیاری دارند. از مزایای تأثیر گذار این موتور می‌توان به توانایی دست یابی به ناحیه‌ی گسترده‌ای از گشتاور ثابت به ازای سرعت‌های متوسط و بالا، بازدهی قابل قبول در سرعت‌های بالا و نیز توانایی کنترل با کموتاسیون الکتریکی اشاره کرد [۱] و [۲]. چگالی انرژی بالا، چگالی گشتاور مناسب و بالا بودن نسبت گشتاور به اینرسی از دیگر ویژگی‌های مهم این موتور هستند [۳]. موتورهای مغناطیس دائم بدون جاروبک در محدوده‌ی وسیعی از کاربردهای صنعتی استفاده می‌شوند. توانایی ایجاد گشتاور اضافی و توانایی دستیابی به گشتاور ثابت در محدوده‌ی وسیعی از

گشتاور اثر دندانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در ادامه روش ایجاد شیار در دندانه به عنوان یکی از راهکارهای کاهش گشتاور اثر دندانه معرفی شده است.

۲- راهکارهای کاهش گشتاور اثر دندانه

از آنجا که نفوذپذیری مغناطیسی هسته در موتورهای الکتریکی بسیار بیشتر از فاصله‌ی هوایی است، به طور متداول از رلوکتانس مسیر مغناطیسی عبوری از هسته در مقابل رلوکتانس فاصله‌ی هوایی صرف نظر می‌شود و منظور از رلوکتانس مسیر مغناطیسی، رلوکتانس شار فاصله هوایی است. کاهش تغییرات رلوکتانس شار در فاصله‌ی هوایی هنگام چرخش روتور به طور مستقیم در کاهش گشتاور اثر دندانه تاثیرگذار است. **عامل اصلی ایجاد رلوکتانس مغناطیسی متغیر در ساختار موتورهای مغناطیس دائم تفاوت طول مسیر فاصله‌ی هوایی بین شارهای عبوری از دهانه‌ی شیار استاتور و شارهای عبوری از کف دندانه‌ی استاتور است.** هرچه پهنای دهانه‌ی شیار کمتر باشد تعداد شارهای وارد شده به شیار کمتر می‌شود، بنابراین کاهش پهنای دهانه‌ی شیار به طور چشم‌گیری باعث کاهش تغییرات شار در فاصله‌ی هوایی می‌شود. از طرف دیگر قیمت جای‌دهی سیم پیچی و کلاف‌ها درون شیارها مستقیماً وابسته به پهنای دهانه‌ی شیار است و نیز کاهش بیش از حد پهنای دهانه‌ی شیار مولفه‌ی اندوکتانس نشستی در سیم پیچی را افزایش می‌دهد. بنابراین مقدار حداقل پهنای دهانه‌ی شیار با توجه به محدوده‌ی مجاز افزایش اندوکتانس نشستی شیار و افزایش قیمت سیم‌پیچی موتور تعیین می‌شود.

مورب کردن قطب‌های مغناطیس دائم و دندانه‌های استاتور در راستای محور موتور، تفاوت طول فاصله‌ی هوایی موجود از دید روتور بین شیار و کف دندانه‌ی استاتور را بر روی محور موتور تقسیم کرده و باعث کاهش چشم‌گیر تغییرات شار فاصله‌ی هوایی هنگام چرخش روتور می‌شود. اما انجام این کار علاوه بر اینکه دشواری ساخت موتور را افزایش می‌دهد، باعث تغییر ولتاژ القایی از شکل دوزنقه‌ای به سینوسی شده و تا حدودی دامنه گشتاور خروجی را کاهش می‌دهد. ایجاد شیار در دندانه‌ی استاتور بدون کاهش پهنای دهانه‌ی شیار و یا استفاده از روش مورب کردن، می‌تواند باعث کاهش تغییرات شار در فاصله‌ی هوایی و به دنبال آن تغییرات گشتاور اثر دندانه شود. برای استفاده از این راهکار باید نکاتی را در نظر گرفت و شیاردار کردن دندانه‌های استاتور بدون توجه به چگونگی تاثیرگذاری آن بر تغییرات شار فاصله‌ی هوایی می‌تواند دامنه‌ی گشتاور اثر دندانه را افزایش دهد.

۳- بررسی راهکار ایجاد شیار در دندانه‌ی استاتور

برای کاهش تغییرات رلوکتانس هنگام چرخش روتور می‌توان شیارهایی در کف دندانه‌های موتور به وجود آورد تا تفاوت مسیر طی شده توسط شارهای مغناطیسی فاصله‌ی هوایی هنگام ورود به شیار اصلی و هنگام ورود به دندانه‌های استاتور کاهش یابد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده

می‌شود شیارهایی که از مسیر شیار وارد دندانه‌ی استاتور می‌شوند، طول بیشتری را نسبت به شیارهایی که مستقیماً وارد دندانه می‌شوند در فاصله‌ی هوایی طی می‌کنند و نیز تعداد شیارهایی که مستقیماً وارد دندانه می‌شوند از شارهای عبوری از مسیر شیار بسیار بیشترند. اما با ایجاد شیار در درون دندانه‌های استاتور، بخشی از شارهای ورودی به این ناحیه نیز باید مسیری به اندازه‌ی شارهای ورودی به دهانه‌ی شیار اصلی را طی کنند و با کم شدن اختلاف بین تعداد شارهای عبوری از دندانه و تعداد شارهای عبوری از دهانه شیار، متوسط تغییرات رلوکتانس به ازای چرخش روتور کاهش می‌یابد. شکل ۲ نمودار تغییرات گشتاور اثر دندانه در یک موتور مغناطیس دائم درونی، ۴ قطب و ۱۸ شیار با آرایش آهنربای سطحی را در دو ساختار پایه و ایجاد یک شیار در هر دندانه با استفاده از تحلیل اجزا محدود در محیط دو بعدی نرم افزار ماکسول نشان می‌دهد. همانطور که در شکل می‌توان دید مقدار حداکثر دامنه‌ی گشتاور اثر دندانه در ساختار پایه (m (N.M) 87 است. مشخصات نامی موتور طراحی شده نیز در جدول ۱ نشان داده شده است.

هنگام شیاردار کردن دندانه‌های استاتور باید توجه داشت که این کار باعث افزایش تقارن ساختار موتور نشود. تقارن ساختار موتور تاثیر بسزایی در تغییرات مسیر شار مغناطیسی به ازای تغییر موقعیت روتور دارد. ساختار متقارن ساختاری است که تعداد دندانه‌های استاتور در آن ضریبی از تعداد قطب‌های روتور باشد در این ساختار تغییرات مسیر شار تولیدی هر یک از قطب‌ها منطبق بر تغییرات مسیر شار تولیدی قطب‌های دیگر است و به عبارتی تغییرات مسیر شار قطب‌ها نسبت به هم همفاز است. بنابراین دامنه‌ی تغییرات رلوکتانس شار فاصله‌ی هوایی در این ساختار بیش از ساختارهای دیگر است. ساختار ۴ قطب و ۱۸ شیار یک ساختار کاملاً متقارن نیست چرا که تعداد شیارهای استاتور در این ساختار ضریبی از تعداد قطب‌های مغناطیس دائم روتور نیست. اما با ایجاد یک شیار درون هر دندانه‌ی استاتور، این موتور به ساختار ۴ قطب و ۳۶ شیار که یک ساختار کاملاً متقارن است بسیار نزدیک می‌شود و دامنه‌ی گشتاور اثر دندانه با ایجاد یک شیار در هر دندانه‌ی موتور ۴ قطب و ۱۸ شیار افزایش چشم‌گیری خواهد داشت. همانطور که در شکل ۲ مشخص است ایجاد یک شیار در دندانه، حداکثر دامنه‌ی تغییرات گشتاور اثر دندانه را به 209 (mN.M) افزایش داده است. ایجاد دو شیار در هر دندانه‌ی استاتور، موتور را به ساختار ۴ قطب و ۵۴ شیار شبیه می‌کند که با تقارن ساختار ۴ قطب و ۱۸ شیار یکسان است. بنابراین استفاده از این ساختار بدون افزایش تقارن موتور می‌تواند با تعدیل تغییرات رلوکتانس فاصله‌ی هوایی هنگام چرخش روتور موجب کاهش دامنه‌ی تغییرات گشتاور اثر دندانه شود.

جدول ۱: مشخصات نامی موتور در ساختار پایه

توان ورودی	گشتاور نامی	سرعت نامی	ولتاژ نامی
220 (W)	1.26 (N.M)	1500 (RPM)	24 (V)

نیز تغییرات گشتاور اثر دندانه بررسی شده است. با در نظر گرفتن پهنای دهانه‌ی شیار ۱۰۱ میلی‌متر و عمق ناحیه‌ی کفش ۱۰۳ میلی‌متر به عنوان ابعاد شیارهای اصلی موتور، شکل ۳ مسیر عبور شار در شیارهای ایجاد شده و در کنار آن تغییرات گشتاور اثر دندانه را در محیط دو بعدی نرم افزار ماکسول نشان می‌دهد. **جدول ۲ ابعاد شیارهای ایجاد شده در هر ساختار و حداکثر دامنه‌ی گشتاور اثر دندانه را نشان می‌دهد.** همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، استفاده از دو شیار با ابعاد شیارهای اصلی استاتور بیشترین تاثیر را در کاهش گشتاور اثر دندانه داشته است و **حداکثر دامنه‌ی آن با استفاده از این ساختار به 3.6 (m N.M) کاهش یافته است.**

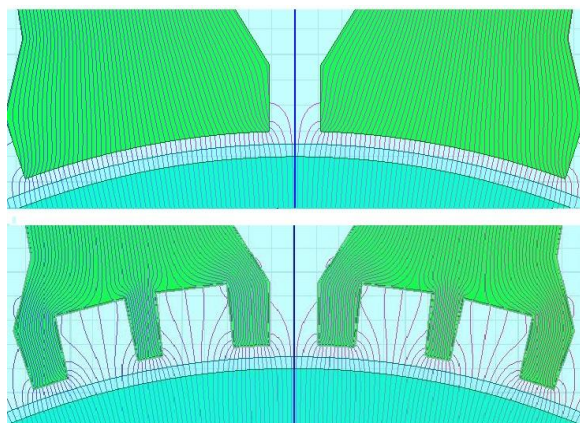
با بیشتر شدن عمق شیار ایجاد شده نسبت به عمق شیار اصلی، بخشی از شارایی که از کف دندانه وارد هسته‌ی استاتور شده است از گوشه‌ی بالایی شیارهای ایجاد شده عبور می‌کند و باعث افزایش بی‌نظمی در مسیر عبور شار می‌شود. **بنابراین افزایش عمق شیار به اندازه‌ی استفاده از ابعاد شیار اصلی در کاهش گشتاور اثر دندانه موثر نیست.** ایجاد شیار با عمق کمتر نسبت به شیار اصلی، مساحت مقطع بالایی شیار نسبت به کناره‌های شیار را افزایش داده و با اینکار تعداد شارهای عبوری از مقطع بالایی شیار بیشتر می‌شوند. **بنابراین اختلاف مسیر شارها در شیار اصلی موتور و شیار ایجاد شده با عمق کمتر، نسبت به استفاده از ابعاد شیارهای اصلی در کف دندانه استاتور بیشتر است.** کاهش و افزایش پهنای شیار ایجاد شده نیز باعث کاهش و افزایش تعداد شارهای عبوری از دهانه‌ی شیارهای ایجاد شده نسبت به شارهای عبوری از دهانه‌ی شیارهای اصلی می‌شود. بنابراین تفاوت مسیر عبور شار از شیار اصلی و شیارهای ایجاد شده با تغییر پهنای دهانه‌ی شیار بیشتر می‌شود.

باتوجه به توضیحات فوق استفاده از ابعاد شیارهای اصلی موتور در ایجاد شیارهای درون دندانه، مسیر عبور شار را در دندانه‌ها بیشتر از ابعاد دیگر به شیارهای اصلی موتور نزدیک می‌کند و در کاهش دامنه‌ی تغییرات گشتاور اثر دندانه موثرتر است.

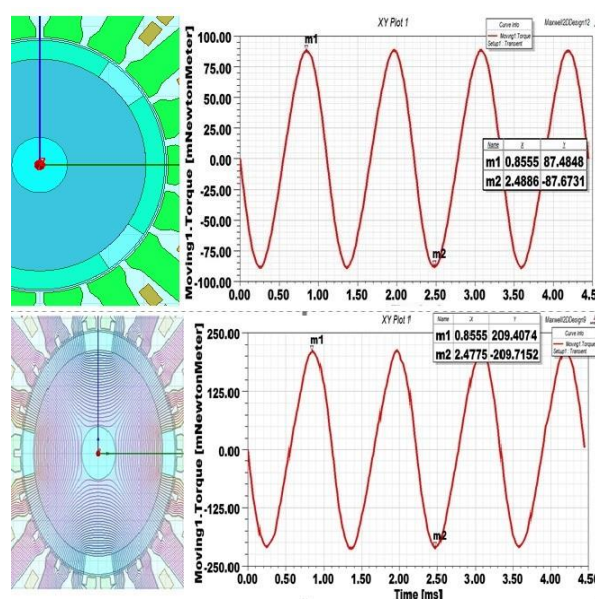
برای بررسی بیشتر شرایط فوق با توجه به [۱۰] می‌توان مسیر عبور شار از شیار اصلی را با آرک مدور مدل کرد.

جدول ۲: بیشترین دامنه‌ی گشتاور اثر دندانه به ازای تغییر ابعاد شیارهای ایجاد شده در دندانه

W(mm) پهنای شیار b(mm) عمق شیار	W=1.1 b=1.6	W=1.1 b=0.9	W=1.1 b=1.3	W=1.6 b=1.3	W=0.7 b=1.3
بیشترین دامنه‌ی گشتاور اثر دندانه (mN.M)	6.8	3.89	3.66	70.9	38



شکل ۱: تغییرات شار فاصله هوایی در ساختار دندانه‌ی پایه و دندانه‌ی شیاردار



شکل ۲: تغییرات گشتاور اثر دندانه در ساختار ۱۸ شیار پایه و ساختار ایجاد یک دندانه در هر شیار

استفاده از ۳ شیار در هر دندانه اثری مشابه ایجاد تک شیار دارد. همچنین ایجاد تعداد شیارهای بیشتر با کاهش بیش از حد ناحیه‌ی عبور شار از کف دندانه موجب به اشباع رفتن هسته در این ناحیه خواهد شد. بنابراین باتوجه به پهنای دندانه و شیار اولیه در ساختار در نظر گرفته شده، مناسب‌ترین راهکار ایجاد دو شیار در هر دندانه است.

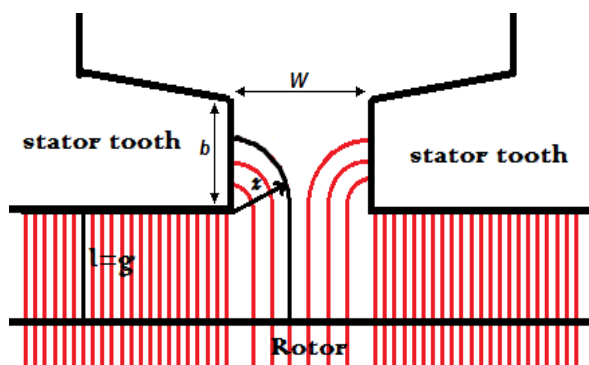
۳-۱- تعیین ابعاد شیارهای ایجاد شده در هر دندانه

برای تعیین ابعاد مناسب ایجاد دو شیار در هر دندانه، عمق و پهنای شیارها نسبت به ابعاد شیار در ساختار اولیه تغییر داده شده است. برای اینکار ابتدا از پهنای شیارهایی معادل شیار اصلی استفاده شده و عمق شیارهای ایجاد شده نسبت به ناحیه‌ی کفش دندانه افزایش و کاهش یافته است. در ادامه با استفاده از عمق ناحیه‌ی کفش دندانه و افزایش و کاهش پهنای شیار نسبت به پهنای دهانه‌ی شیارهای اصلی استاتور

شکل ۴ مسیر عبور شارها از شیارهای بین دندانه‌های استاتور را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل می‌توان دید شارها به صورت موازی با طی کردن طولی به اندازه‌ی فاصله‌ی هوایی به دهانه‌ی شیار می‌رسند و از آنجا هرکدام متناسب با فاصله‌ی خود با کناره‌ی شیار مسیر ربع دایره را تا رسیدن به دندانه در فاصله‌ی هوایی درون شیار طی می‌کنند. طول طی شده در فاصله‌ی هوایی توسط شارهایی که مستقیماً به دندانه وارد می‌شوند برابر طول فاصله هوایی، g است. با استفاده از تقریب آرک مدور برای شارهای عبوری از شیار، طول طی شده توسط این شارها در فاصله‌ی هوایی در (۱) محاسبه شده است که x مطابق شکل ۴ فاصله‌ی شار تا لبه‌ی دندانه است. اگر پهنای دهانه‌ی شیار W در نظر گرفته شود، بیشترین طول شار در فاصله‌ی هوایی درون شیار توسط شارهای عبوری از وسط دهانه‌ی شیار ایجاد می‌شود که مقدار آن در (۲) محاسبه شده است.

شکل ۵ مسیر عبور شار از شیارهای ایجاد شده در دندانه را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود تفاوت اساسی مسیر جاری شدن شار در شیارهای بین دندانه‌ها و شیارهای ایجاد شده، در مقطع بالایی یا سقف شیارها است. بر خلاف شیارهای اصلی استاتور، جنس سقف شیارهای ایجاد شده در دندانه‌ها همانند مقاطع کناری آن از ماده‌ی فرومغناطیس هسته است. این ویژگی باعث می‌شود که شارهای عبوری از میانه‌ی این شیارها به جای منحرف شدن به سمت کناره‌های شیار هنگام ورود به هسته به طور یکنواخت در سقف شیار توزیع شوند. بنابراین روند تغییرات طول طی شده توسط شارهای مغناطیسی در این دو شیار متفاوت خواهد بود.

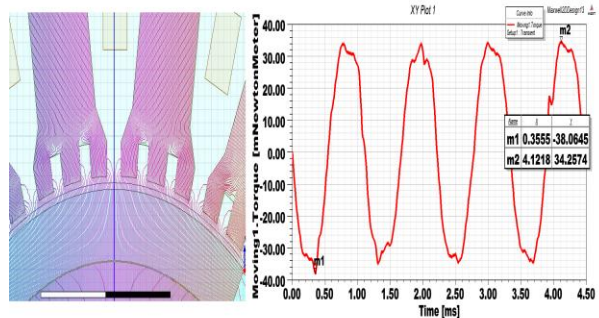
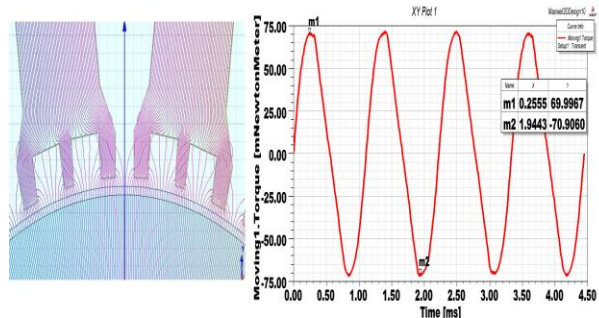
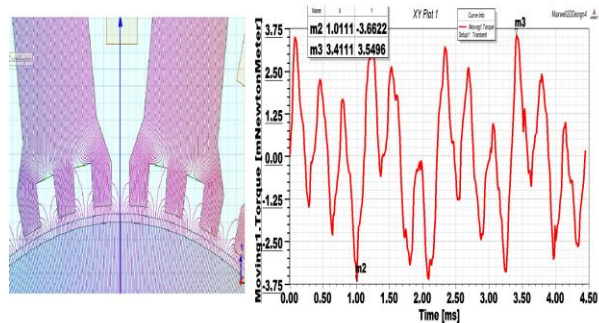
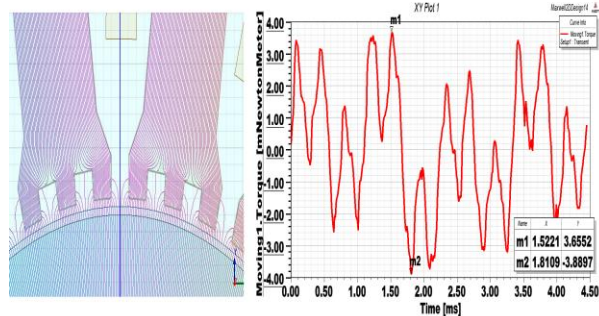
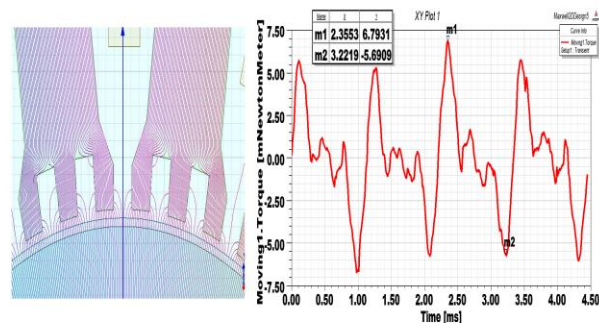
شکل ۶ طول طی شده توسط شارهای عبوری از شیارهای بین دندانه‌ها و شیارهای ایجاد شده در دندانه را به ازای پهنای شیار W و عمق



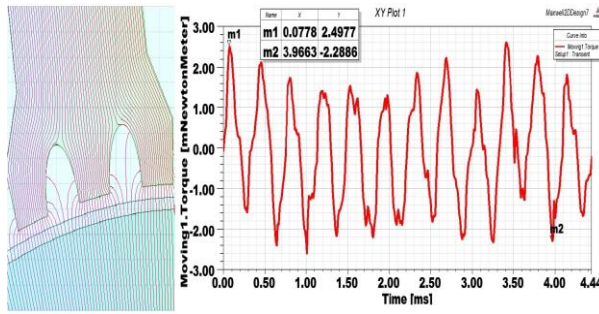
شکل ۴: مسیر عبور شار در فاصله هوایی

$$L_g = g + \left(\frac{\pi}{2} * x\right) \quad (1)$$

$$L_{g-max} = g + \left(\frac{\pi}{2} * \frac{W}{2}\right) \quad (2)$$



شکل ۳: تغییرات گشتاور اثر دندانه با استفاده از ابعاد گوناگون دو شیار ایجاد شده برای هر دندانه



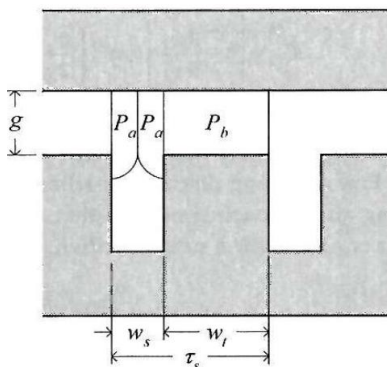
شکل ۷: تغییرات گشتاور اثر دندانه با ایجاد دو شیار بیضی شکل در هر دندانه

دامنه‌ی گشتاور اثر دندانه تا 2.49 (m N.M) کاهش یافته است. مقایسه‌ی حداکثر دامنه‌ی گشتاور اثر دندانه در این ساختار با مقادیر جدول ۲ نشان می‌دهد که استفاده از ساختار ایجاد دو شیار بیضی شکل درون هر دندانه‌ی موتور ۴ قطب و ۱۸ شیار بیشترین تاثیر را در کاهش گشتاور اثر دندانه دارد.

۴- تلفات و چگالی شار هسته

۴-۱- تلفات هسته

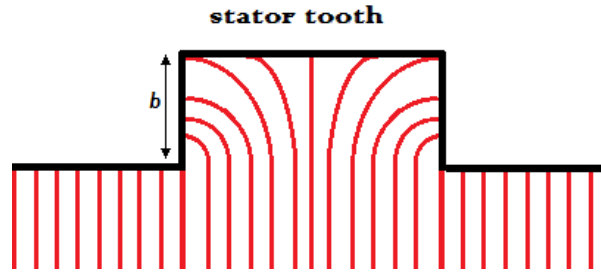
ایجاد شیار در دندانه‌های استاتور اثرات دیگری نیز به دنبال دارد که بر چگالی شار فاصله هوایی و در نتیجه چگالی شار هسته تاثیرگذار است. با توجه به [۱۰]، با شیار دار کردن استاتور فاصله‌ی هوایی موتور دچار تغییر می‌شود که مقدار موثر آن را می‌توان با استفاده از ضریب اصلاح K_C بدست آورد. شکل ۸ و روابط (۳) و (۴) چگونگی محاسبه فاصله هوایی موثر را نشان می‌دهند. τ_s گام شیار، w_s پهنای شیار، w_t پهنای دندانه و g_e مقدار موثر فاصله هوایی است. نمودار تغییرات K_C در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به این نمودار به ازای تغییر نسبت پارامترهای فوق، ضریب اصلاح مقادیری بین ۱ تا ۱.۱ اختیار می‌کند.



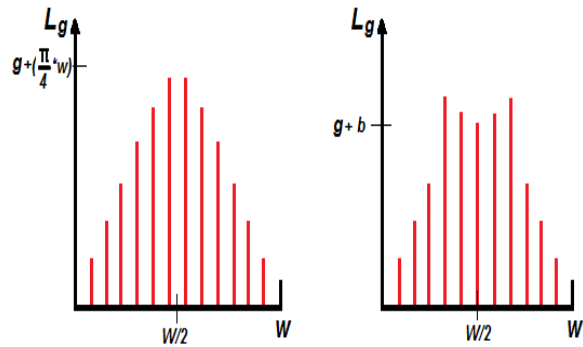
شکل ۸: پارامترهای محاسبه ضریب اصلاح فاصله هوایی

$$K_C = \left[1 - \frac{w_s}{\tau_s} + \left(\frac{4g}{\pi * \tau_s} \ln \left(1 + \frac{\pi * w_s}{4g} \right) \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

$$g_e = K_C * g \quad (4)$$



شکل ۵: مسیر عبور شار در شطار ایجاد شده بر روی دندانه



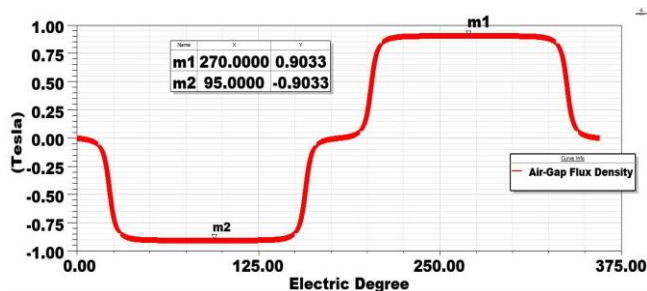
شکل ۶: طول مسیر شار در فاصله‌ی هوایی برای شارهای عبوری از دو

شیار سمت چپ: شیار بین دندانه‌ها سمت راست: شیار ایجاد شده در دندانه

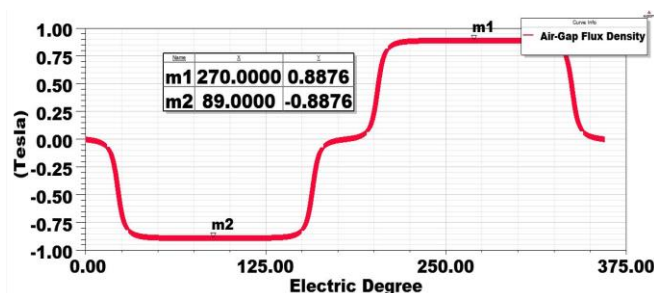
شیار ناحیه‌ی کفش دندانه b نشان می‌دهد. شارهای عبوری از شیارهای اصلی موتور متناسب با افزایش فاصله‌ی خود تا کناره‌های شیار، طول بیشتری را در فاصله‌ی هوایی طی می‌کنند که بیشترین طول برای شارهای عبوری از وسط شیار است. اما طول مسیر فاصله‌ی هوایی برای شارهای عبوری از شیارهای ایجاد شده در دندانه هنگام ورود به شیار از گوشه‌ی پایین آن تا گوشه‌ی بالای آن در حال افزایش و از گوشه‌ی بالای شیار تا وسط سقف شیار در حال کاهش خواهد بود. تفاوت تغییرات طول مسیر فاصله‌ی هوایی بین دو شیار مورد نظر را شارهای عبوری از دو گوشه‌ی بالای شیارهای ایجاد شده در دندانه به وجود آورده‌اند. کاهش این تفاوت با نزدیک کردن روند تغییرات طول شار در این دو نوع شیار باعث کاهش بیشتر تغییرات شارهای مغناطیسی در فاصله‌ی هوایی و به دنبال آن تغییرات رلوکتانس فاصله‌ی هوایی و گشتاور اثر دندانه خواهد شد.

برای اینکار باید طول شارهای عبوری از گوشه‌های شیار ایجاد شده در دندانه کاهش یابد. نیم بیضی یک شکل هندسی هموار است که بدون کاهش قابل توجه حجم شیار می‌تواند با پر کردن گوشه‌های شیار و کاهش طول فاصله‌ی هوایی برای شارهای عبوری از این ناحیه به کمتر شدن دامنه‌ی تغییرات گشتاور اثر دندانه کمک کند.

شکل ۷ ساختار دو شیار ایجاد شده در دندانه با شکل نیم بیضی و در کنار آن نمودار تغییرات گشتاور اثر دندانه در این ساختار را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با ایجاد دو شیار بیضی شکل در هر دندانه با قطر کوچک نیم بیضی معادل پهنای شیار اصلی و عمق قطر بزرگ نیم بیضی معادل عمق شیار اصلی،



شکل ۱۰: تغییرات چگالی شار فاصله هوایی در ساختار پایه



شکل ۱۱: تغییرات چگالی شار فاصله هوایی با استفاده از فاصله هوایی موثر

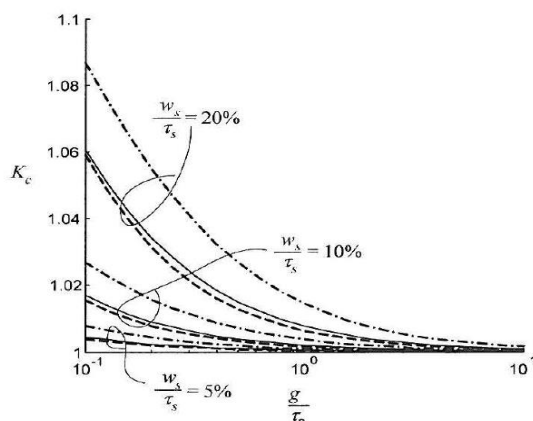
جدول ۳: میزان تلفات هسته‌ای محاسبه شده در نرم افزار ماکسول

تلفات هسته به ازای فاصله هوایی g :	10.854 (w)
تلفات هسته به ازای فاصله هوایی g_e :	8.039 (w)

۲-۴- چگالی شار هسته

شیاردار کردن دندانه های استاتور سطح مقطع عبور شارهای فاصله هوایی را هنگام ورود به دندانه محدود می‌کند و این موضوع باعث افزایش چگالی شار در کف دندانه‌های استاتور می‌شود. از آنجا که جهت استفاده بهینه از حجم هسته، نقطه‌ی کار موتور را محدوددهی زانوی منحنی B-H در نظر می‌گیرند، افزایش بیش از حد پهنا و یا عمق شیارهای ایجاد شده در کف دندانه باعث به اشباع رفتن هسته در ناحیه‌ی فوق می‌شود. شکل ۱۲ منحنی B-H هسته‌ی موتور طراحی شده را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود نقطه‌ی زانوی منحنی فوق در محدوده‌ی $B=1.4$ (T) قرار دارد.

برای بررسی این موضوع از ابعاد شیارهای ایجاد شده در جدول ۲ پهنای شیار ۱،۶ میلی‌متر را در یک ساختار و عمق شیار ۱،۶ میلی‌متر را در ساختار دیگر در نظر گرفته و این دو ساختار را با ساختار بیضی شکل پیشنهاد شده از نظر چگالی شار هسته مقایسه کرده‌ایم. شکل ۱۳ چگالی شار دندانه در سه ساختار فوق را با استفاده از تحلیل اجزا محدود در محیط دو بعدی نرم افزار ماکسول نشان می‌دهد. محدوده‌ی تغییر رنگ چگالی شار تا حداکثر 1.64 (T) در نظر گرفته شده است.



شکل ۹: تغییرات ضریب اصلاح فاصله هوایی

افزایش مقدار موثر فاصله هوایی، چگالی شار فاصله هوایی و در نتیجه چگالی شار هسته را هرچند به میزان ناچیز دچار تغییر خواهد کرد. ضریب پرمانس آهنربا P_c از (۵) و چگالی شار فاصله هوایی B_g از (۶) بدست می‌آید. در این روابط l_m ضخامت آهنربا، C_ϕ ضریب تمرکز شار، k_f ضریب ناشی، k_r ضریب مقاومت هسته، B_r چگالی پسماند آهنربا و μ_r نفوذ پذیری نسبی آهنربا می‌باشند که مقدار آن‌ها بستگی به نوع آهنربای بکار رفته در طراحی دارد. با توجه به این روابط افزایش g موجب کاهش P_c و کاهش P_c در نهایت B_g را کاهش می‌دهد.

$$P_c = \frac{l_m}{gC_\phi} \quad (5)$$

$$B_g = \frac{k_f C_\phi}{1 + k_r \frac{\mu_r}{P_c}} B_r \quad (6)$$

نتیجه‌ی کاهش چگالی شار فاصله هوایی، کاهش چگالی شار هسته B_m خواهد بود. رابطه (۷) از [۱۱] و [۱۲] چگونگی تاثیر چگالی شار هسته بر تلفات هسته را نشان می‌دهد. در این رابطه K_h ضریب تلفات هیستریزس، K_c ضریب تلفات جریان‌های گردابی و K_e ضریب تلفات اضافی جریان‌های گردابی است. با توجه به رابطه‌ی فوق کاهش چگالی شار هسته، تلفات هسته را کاهش می‌دهد.

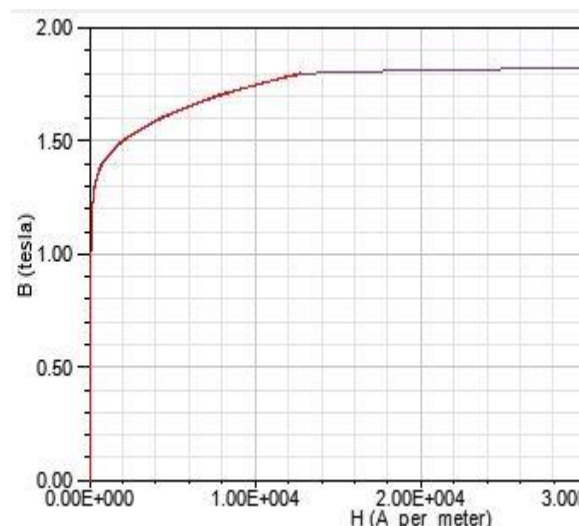
شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات چگالی شار فاصله هوایی را با استفاده از فاصله هوایی اولیه و فاصله هوایی موثر در محیط RMXprt نرم افزار ماکسول نشان می‌دهند. تلفات هسته بدست آمده به ازای دو ساختار فوق در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، کاهش چگالی شار فاصله هوایی از 0.9033 (T) در ساختار پایه به 0.8876 (T) با در نظر گرفتن فاصله هوایی موثر، تلفات هسته را 2.8 (W) کاهش داده است.

$$P_{core} = K_h f (B_m)^2 + K_c (f B_m)^2 + K_e (f B_m)^{1.5} \quad (7)$$

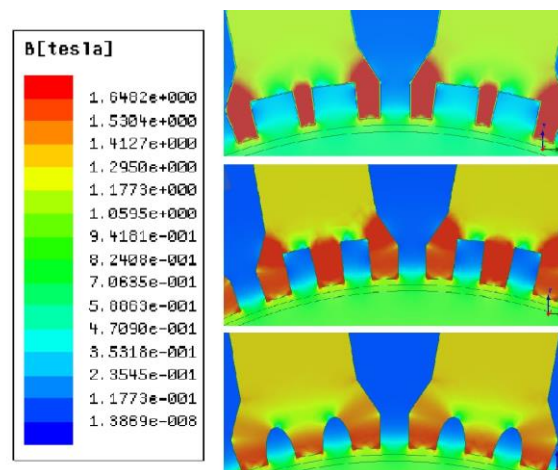
شیارهای ایجاد شده در هر دندانه تعیین شد. با هدف نزدیک کردن تغییرات طول شارهای عبوری از شیار ایجاد شده در دندانه به تغییرات طول شارهای عبوری از شیار بین دندانه‌های استاتور، شکل شیارهای ایجاد شده اصلاح شد و با استفاده از دو شیار بیضی شکل در هر دندانه-ی استاتور، بیشترین دامنه‌ی گشتاور اثر دندانه از مقدار 87.6 (mN.M) در ساختار اولیه به مقدار 2.4 (m N.M) کاهش یافت. ایجاد شیار در کف دندانه‌های استاتور، فاصله‌هویی موثر را افزایش داده و با کاهش چگالی شار هسته، تلفات هسته را کاهش می‌دهد. شیارهای ایجاد شده ناحیه ورود شار به کف دندانه را محدود می‌کنند و افزایش بیش از حد ابعاد شیار، هسته‌ی استاتور را در ناحیه‌ی مذکور به اشباع می‌برد.

مراجع

- [1] Zhe Ren, Xu Fang, Shuhong Wang, Jie Qiu, Jian Guo Zhu, "Design Optimization of an Interior-type Permanent Magnet BLDC Motor using PSO and Improved MEC," Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems,, Seoul, Korea, Oct 2007.
- [2] Li Zhu, S. Z. Jiang, Z. Q. Zhu, "Analytical Modeling of Open-Circuit Air-Gap Field Distributions in ultisegment and Multilayer Interior Permanent-Magnet Machines," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 45, NO. 8, AUGUST 2009.
- [3] Jin Hur, Byeong-Woo Kim, "Rotor Shape Design of an Interior PM Type BLDC Motor for Improving Mechanical Vibration and EMI Characteristics," 462 Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 5, No. 3, pp. 462~467, 2010.
- [4] Gyu-Hong Kang, Jin Hur, Woo-Byoung Kim, Byoung-Kuk Lee, "The Shape Design of Interior Type Permanent Magnet BLDC Motor for Minimization of Mechanical Vibration," Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2009. IEEE, San Jose, CA, 2009.
- [5] Y. Dönmezer, L.T. Ergene, "Cogging Torque Analysis of Interior-Type Permanent-Magnet Brushless DC Motor Used in Washers," ELECTROMOTION 2009 – EPE Chapter 'Electric Drives' Joint Symposium, Lille, France. 1-3 July 2009.
- [6] Z.Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, N. Schofield, D. Howe, "Reduction of Cogging Torque in Interior-Magnet Brushless Machines", IEEE Trans. Mag., vol. 39, no. 5, pp. 3238 – 3240, Sept. 2003.
- [7] K. Wang, J.X. Shen, F.Z. Zhou, R.H Qiu, R.G. Lin, "Optimal Design of Magnet Pole Arc Considering Utility of Third Harmonic Back EMF in High Speed Sensorless Brushless DC Motors", Proc. Int. Conf. on Elec. Machines and Systems, vol. 1, no. 8-11, pp. 680 – 684, Oct. 2007.
- [8] C. Studer, A. Keyhani, T. Sebastian, S. K. Murthy, "Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines", in Conf. Rec. IEEE 32nd IAS Annu. Meeting, New Orleans vol. 1, pp. 42-49, 5-9 Oct 1997.
- [9] S. Ruangsinchaiwanich, Z.Q. Zhu, D. Howe, "Influence of Magnet Shape on Cogging Torque and Back-emf Waveform in Permanent Magnet Machines", Proc. of the 8th Int. Conference on Elec. Machines and Systems, vol. 1, no. 27-29, pp. 284 - 289, Sept. 2005.
- [10] D. C. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design. Lebanon, OH: Magna Physics, 2006.
- [11] A. Rahideh, T. Korakianitis, P. Ruiz, T. Keeble, and M. Rothman, "Optimal brushless DC motor design using genetic algorithms," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 322, pp. 3680-3687, 2010.
- [12] B. Boukais, H. Zeroug, "Efficiency Determination of a Brushless DC Motor Under Field Weakening Operation", Progress in Electromagnetic Research Symposium, Pisa, Italy, March 28 – 31, 2004.



شکل ۱۲: منحنی تغییرات B-H هسته‌ی موتور



شکل ۱۳: چگالی شار هسته در کف دندانه‌های شیار دار

همانطور که می‌توان دید با کاهش بیش از حد ناحیه‌ی کف دندانه، چگالی شار هسته وارد محدوده‌ی اشباع می‌شود.

۵- جمع‌بندی

از ایجاد شیار در دندانه‌ی استاتور می‌توان به عنوان یکی از راهکارهای کاهش گشتاور اثر دندانه استفاده کرد. در شرایطی که ایجاد شیار در دندانه منجر به افزایش تقارن ساختار موتور شود، استفاده از این راهکار باعث افزایش دامنه‌ی تغییرات گشتاور اثر دندانه می‌شود. تعیین تعداد شیارهای ایجاد شده در هر دندانه بستگی به ابعاد شیارهای اصلی نسبت به دندانه‌های استاتور دارد. استفاده از ابعاد شیارهای اصلی برای شیاردار کردن دندانه‌های استاتور نتیجه‌ی بهتری در کاهش گشتاور اثر دندانه دارد.

در این مقاله با بررسی مرحله به مرحله چگونگی ایجاد شیار در دندانه-های استاتور یک موتور ۴ قطب و ۱۸ شیار، تعداد و ابعاد مناسب