

بهبود ساختار قطب روتور برای کاهش گشتاور دندانه ای موتور شارمحور شارسوئیچینگ مغناطیس

دائم

حمید ابراهیمی، حسین ترکمن، حمید جواد

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله به بهبود ساختار قطب روتور به منظور کاهش گشتاور دندانه ای موتور شارمحور شار سوئیچینگ مغناطیس دائم پرداخته می شود. روش ارائه شده در این مقاله مشتمل بر دو تکنیک آنالیز ضریب کمان قطب روتور و تکنیک زاویه شکل دهی قطب روتور می باشد. غالب روش های ارائه شده برای کاهش گشتاور دندانه ای موتور شارمحور شارسوئیچینگ مغناطیس دائم، موجب کاهش گشتاور الکترومغناطیسی موتور نیز می شوند که این نتیجه مطلوبی نیست. در حالی که روش ارائه شده در این مقاله علاوه بر کاهش گشتاور دندانه ای قادر است گشتاور الکترومغناطیسی موتور مذکور را نیز بهبود ببخشد. شبیه سازی ها با روش المان محدود سه بعدی برای افزایش دقت مدل سازی انجام شده و برای محاسبه پارامترهای بهینه موتور از آنالیز تاگوچی استفاده می شود. در نهایت مقایسه نتایج شبیه سازی ساختار پیشنهادی با ساختارهای سنتی نشان از کارآمدی ساختار پیشنهادی در کاهش گشتاور دندانه ای موتور شارمحور شار سوئیچینگ مغناطیس دائم دارد.

واژه های کلیدی

موتورهای شار سوئیچینگ-موتور شارمحور-گشتاور دندانه ای-آنالیز تاگوچی- بهبود ساختار قطب روتور

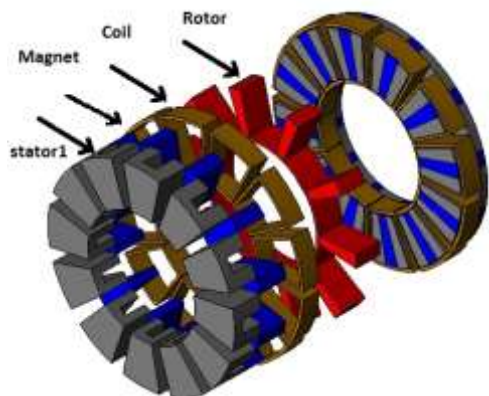
۱-مقدمه

موتورهای شارمحور شارسوئیچینگ مغناطیس دائم دارای ویژگی هایی مانند قابلیت تمرکز شار بالاتر، راندمان بهتر، انتقال حرارت مناسب تر، طول محوری کوتاه تر، ساختار فشرده تر و وزن سبک تر نسبت به ساختار شار شعاعی هستند. [1] از طرفی دیگر، این موتورها به دلیل داشتن برجستگی مضاعف در ساختار استاتور و روتور خود، دارای گشتاور دندانه ای بالاتری نسبت به موتورهای مغناطیس دائم سنتی هستند. گشتاور دندانه ای به دلیل تعامل بین تغییرات پرمانس فاصله هوایی و نیروی محرکه مغناطیسی ایجاد شده به وسیله آهنربای موتور بوجود می آید. [2] گشتاور دندانه ای عامل اصلی بروز ریبیل گشتاور و به تبع آن نویز صوتی در موتورهای مغناطیس دائم می باشد. [3] تاکنون روش های مختلفی برای کاهش گشتاور دندانه ای موتور شارمحور شار سوئیچینگ در [2] و [4]-[12] ارائه شده است. در مرجع [2]، ایده کاهش اندازه آهنربا برای کاهش گشتاور دندانه ای

موتور شارمحور شار سوئیچینگ مغناطیس دائم تک فاز ارائه شده است. این روش قادر است گشتاور دندانه ای را کاهش دهد ولی با توجه به نتایج ارائه شده، این روش موجب کاهش گشتاور متوسط الکترومغناطیسی و کاهش دامنه ولتاژ ضد محرکه موتور نیز خواهد شد. مرجع [4] ایده استفاده از فاصله هوایی نامتقارن را برای کاهش گشتاور دندانه ای این موتور ارائه داده است اما ذکر این نکته ضروری است که ایجاد فاصله هوایی نامتقارن، موتور را مستعد بروز خطای ناهم محوری روتور می کند. مرجع [5] از یک پل مغناطیسی بین دندانه های مجاور استاتور برای کاهش گشتاور دندانه ای این موتور استفاده می کند. مرجع [6] جابجایی نسبی استاتور و روتور نسبت به هم و مرجع [7] استفاده از روتور قطعه ای را برای کاهش گشتاور دندانه ای موتور شارمحور شار سوئیچینگ پیشنهاد می دهد. ذکر این نکته ضروری است که روش های ارائه شده در مراجع [5]-[7] علاوه بر کاهش گشتاور دندانه ای موجب کاهش گشتاور الکترومغناطیسی متوسط نیز می شود که این نتیجه مطلوبی نیست. مرجع [8] استفاده از روش قطب نامتقارن روتور، مرجع [9] روش روتور بخش بندی شده و مرجع [10] روش ایجاد شکاف در قطب روتور را برای کاهش گشتاور دندانه ای موتور شارمحور شار سوئیچینگ مغناطیس دائم پیشنهاد نموده است که هر سه روش مذکور موجب کاهش گشتاور متوسط الکترومغناطیسی موتور خواهند شد. مرجع [11] از روش آهنربای سری و مرجع [12] از روش استفاده سه جنس مختلف آهنربا برای کاهش گشتاور دندانه ای موتور شارسوئیچینگ مغناطیس دائم استفاده می کند. ضعف اصلی همه این روش ها در کاهش گشتاور دندانه ای، در کاهش همزمان گشتاور الکترومغناطیسی می باشد.

در این مقاله، با استفاده از آنالیز ساختار هندسی قطب روتور به کاهش گشتاور دندانه ای موتور شارمحور شار سوئیچینگ مغناطیس دائم AFFSPM پرداخته می شود. روش پیشنهادی که متشکل از دو روش ضریب کمان بهینه قطب روتور و روش زاویه شکل دهی بهینه قطب روتور می باشد بر عکس روش های قبلی علاوه بر کاهش گشتاور دندانه ای قادر است گشتاور الکترومغناطیسی و ریبیل گشتاور موتور مورد نظر را بهبود ببخشد. در بخش ۲ معادلات طراحی موتور شامل معادلات ابعادی و معادلات حاکم بر گشتاور دندانه ای موتور ارائه می شود. در بخش ۳ ساختار پیشنهادی موتور و بهینه سازی های انجام

موتور پیشنهادی از بهینه سازی ضریب کمان قطب روتور و بهینه سازی زاویه شکل دهی قطب روتور استفاده می شود. شکل (۱) نقشه انفجاری ساختار پیشنهادی موتور شار محور شار سوئیچینگ مغناطیس دائم را نشان می دهد.



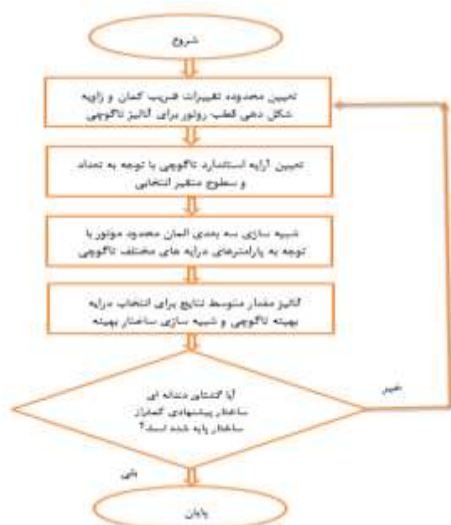
شکل (۱)-نقشه انفجاری ساختار موتور شار محور شار سوئیچینگ مغناطیس دائم پیشنهادی

مشخصات فنی ساختار پایه موتور شار محور شار سوئیچینگ مغناطیس دائم در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱)-مشخصات فنی ساختار پایه موتور AFFSPMM

نام پارامتر	مقدار پارامتر
قطر بیرونی استاتور	۱۴۰ میلی متر
قطر داخلی استاتور	۸۰ میلی متر
چگالی شار آهنربا	۱,۲ تسلا
طول محوری روتور	۱۷,۵ میلی متر
طول فاصله هوایی	۱ میلی متر
ضخامت آهنربا	۷,۵ درجه
عرض کمان روتور	۷,۵ درجه

فلوچارت روش بهینه سازی ساختار پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است:



شکل (۲)-فلوچارت حل مسئله بهینه سازی

شده تشریح می شود. همچنین در این بخش فلوچارت مسئله بهینه سازی ارائه می شود. در بخش ۴ آنالیز تاگوچی برای محاسبه پارامترهای بهینه سازی ساختار پیشنهادی ارائه شده و در بخش ۵ به ارائه نتایج شبیه سازی المان محدود ساختار پیشنهادی و مقایسه نتایج با ساختار سنتی پرداخته می شود.

۲-معادلات حاکم بر گشتاور دندانه ای موتور:

گشتاور دندانه ای به علت تعامل بین تغییرات پرمانس فاصله هوایی استاتور و نیروی محرکه مغناطیسی ایجاد شده به وسیله آهنربا به وجود می آید. با فرض اینکه تغییرات انرژی در هسته آهنی در مقایسه با تغییرات انرژی در آهنربا و فاصله هوایی صرف نظر شود در نتیجه انرژی مغناطیسی ماشین به صورت رابطه (۱) به دست می آید:

$$W \sim W_{airgap+pm} = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 dv \quad (1)$$

در معادله (۱)، B چگالی شار فاصله هوایی و v حجم فاصله هوایی است. گشتاور دندانه ای ماشین طبق رابطه (۲) محاسبه می شود:

$$T_{cog} = -\frac{\partial W}{\partial \alpha} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، α زاویه حرکت روتور می باشد. چگالی شار در فاصله هوایی به صورت رابطه (۳) محاسبه می شود:

$$B(\theta, \alpha) = B_r(\theta) \frac{h_m}{h_m + g(\theta, \alpha)} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، h_m طول آهنربا در جهت فاصله هوایی و g طول فاصله هوایی است. همچنین B_r چگالی شار پسماند و θ زاویه قاب مرجع استاتور است. با ترکیب معادله (۱) و (۳)، انرژی مغناطیسی ماشین طبق معادله (۴) به دست می آید:

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int B_r^2(\theta) \left(\frac{h_m}{h_m + g(\theta, \alpha)} \right)^2 dv \quad (4)$$

با استفاده از تبدیل فوریه، معادله (۵) به دست می آید:

$$\left(\frac{h_m}{h_m + g(\theta, \alpha)} \right)^2 = G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \cos n(\theta + \alpha) \quad (5)$$

در نهایت گشتاور دندانه ای طبق رابطه (۶) محاسبه می شود:

$$T_{cog}(\alpha) = \frac{\pi Z L_{Fe}}{4\mu_0} (R_{m2}^2 - R_{m1}^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_r \sin n\alpha \quad (6)$$

در معادله (۶)، L_{Fe} طول محوری آرمیچر، R_{m1} شعاع داخلی آهنربا، R_{m2} شعاع بیرونی آهنربا و Z تعداد شیارها می باشد. این معادله نشان می دهد که پارامترهایی مانند چگالی شار پسماند، تعداد شیارها، طول محوری آرمیچر، شعاع داخلی و بیرونی آهنربا نقش اساسی در تولید گشتاور دندانه ای دارند. گشتاور دندانه ای علت اصلی بروز ریزل گشتاور در ماشین های مغناطیس دائم می باشد. در این مقاله از روش بهینه سازی قطب روتور که متشکل از دو تکنیک بهینه سازی ضریب کمان قطب روتور و بهینه سازی زاویه شکل دهی روتور است برای کاهش گشتاور دندانه ای موتور شار محور شار سوئیچینگ مغناطیس دائم استفاده می شود.

۳-ساختار موتور پیشنهادی:

موتور شار محور شار سوئیچینگ مغناطیس دائم استفاده شده در این مقاله دارای دو استاتور و یک روتور بوده که تعداد قطب های استاتور برابر ۱۲ عدد و تعداد قطب های روتور برابر ۱۰ می باشد. در ساختار

۴-آنالیز تاگوچی:

در این بخش برای محاسبه ضریب کمان بهینه قطب روتور و زاویه شکل دهی بهینه قطب روتور موتور AFFSPM به منظور کاهش گشتاور دندانه ای از آنالیز تاگوچی استفاده می شود. برای آنالیز تاگوچی دو متغیر ضریب کمان قطب روتور و زاویه شکل دهی روتور در نظر گرفته می شود. طبق فلوچارت شکل (۲) در گام اول باید محدوده تغییرات این دو متغیر تعیین گردد. محدوده تغییرات برای ضریب کمان قطب روتور به عنوان متغیر اول بین ۰٫۲ تا ۰٫۳ در نظر گرفته شده و برای زاویه شکل دهی روتور بین ۶ تا ۱۲ درجه لحاظ می گردد. هم چنین برای هر متغیر سه سطح تعریف می شود. جدول (۲) تعریف متغیرها و سطوح هر متغیر در آنالیز تاگوچی این مسئله را نشان می دهد.

جدول (۲)-تعریف متغیرها و سطوح هر متغیر در آنالیز تاگوچی

نام متغیر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
متغیر (A)-ضریب کمان قطب روتور	۰٫۲	۰٫۲۵	۰٫۳
متغیر (B)-زاویه شکل دهی قطب روتور	۶درجه	۹درجه	۱۲درجه

طبق فلوچارت شکل (۲)، مرحله دوم در آنالیز تاگوچی تعیین آرایه استاندارد تاگوچی با توجه به تعداد و سطوح متغیر انتخابی می باشد. با توجه به تعداد متغیرها (P=2) و تعداد سطوح هر متغیر (L=3)، آرایه L-9 به عنوان آرایه استاندارد تاگوچی برای آنالیز این مسئله در نظر گرفته می شود. جدول (۳) آرایه استاندارد L-9 تاگوچی را نشان می دهد.

جدول (۳)-آرایه استاندارد L-9 تاگوچی

شماره تست	متغیر A	متغیر B
تست اول	۱	۱
تست دوم	۱	۲
تست سوم	۱	۳
تست چهارم	۲	۱
تست پنجم	۲	۲
تست ششم	۲	۳
تست هفتم	۳	۱
تست هشتم	۳	۲
تست نهم	۳	۳

طبق گام سوم فلوچارت ارائه شده در شکل (۲)، در این مرحله باید شبیه سازی المان محدود با توجه به درایه های مختلف آرایه تاگوچی طبق جدول (۳) انجام پذیرد. جدول (۴) نتایج شبیه سازی گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور دندانه ای را برای حالت های مختلف آنالیز تاگوچی برای موتور AFFSPM نشان می دهد.

مطابق نتایج شبیه سازی ارائه شده در جدول (۴) بهترین حالت ممکن یعنی کمترین گشتاور دندانه ای و بیشترین گشتاور الکترومغناطیسی در تست شماره ۵ رخ می دهد به طوریکه گشتاور دندانه ای موتور

برابر با ۱٫۲ نیوتن متر و گشتاور الکترومغناطیسی موتور برابر با ۷٫۸۱ نیوتن متر به دست آمده است.

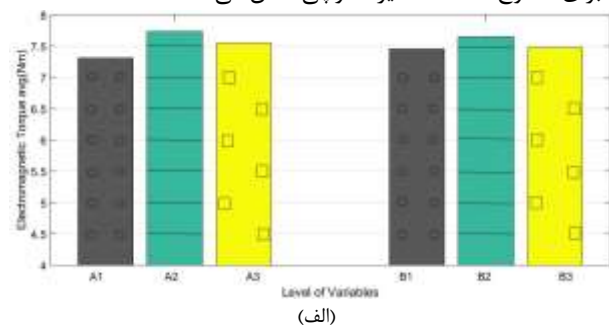
جدول (۴)-نتایج شبیه سازی موتور AFFSPM طبق آرایه استاندارد تاگوچی

شماره تست	Tc(Nm)	Te(Nm)
تست اول	۲٫۰۵	۶٫۸۹
تست دوم	۱٫۷۳	۷٫۶۴
تست سوم	۱٫۲۴	۷٫۳۹
تست چهارم	۱٫۸۴	۷٫۷۷
تست پنجم	۱٫۲	۷٫۸۱
تست ششم	۱٫۳۲	۷٫۶۲
تست هفتم	۳٫۰۲	۷٫۷
تست هشتم	۲٫۲۶	۷٫۵
تست نهم	۲٫۷۴	۷٫۴۴

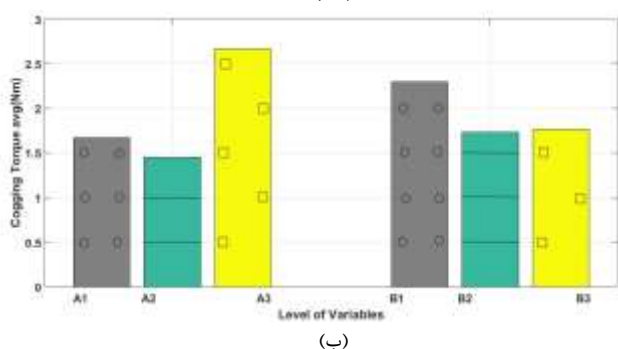
در ادامه این آنالیز، باید مقدار متوسط برای همه سطوح ضرایب محاسبه شود. در این راستا باید مقدار متوسط گشتاور دندانه ای و مقدار متوسط گشتاور الکترومغناطیسی برای همه سطوح ضرایب محاسبه شود. به طور مثال محاسبه گشتاور الکترومغناطیسی متوسط برای سطح دوم متغیر A به صورت معادله (۱) محاسبه می شود:

$$mA_2(T_e) = \frac{1}{3} (T_e(4) + T_e(5) + T_e(6)) \quad (12)$$

به همین روش، آنالیز مقدار متوسط گشتاور الکترومغناطیسی و آنالیز مقدار متوسط گشتاور دندانه ای برای همه سطوح انجام می شود. شکل (۱) مقادیر متوسط گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور دندانه ای را برای سطوح مختلف آنالیز تاگوچی نشان می دهد.



(الف)

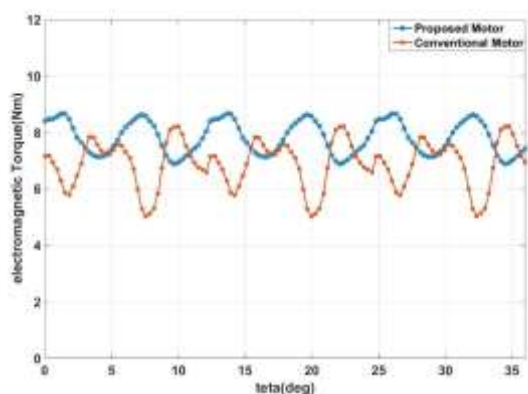


(ب)

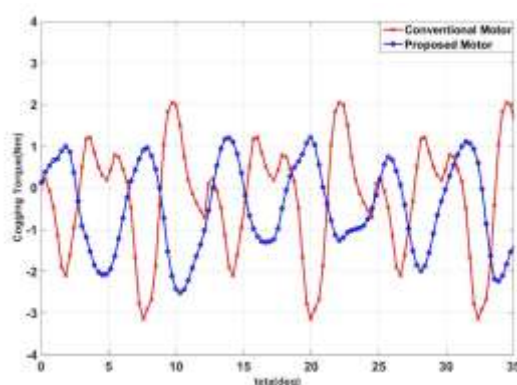
شکل (۲)-آنالیز مقدار متوسط

(الف)-برای گشتاور الکترومغناطیسی (ب)-گشتاور دندانه ای

توانسته نسبت به ساختار سنتی ۱۳,۳۵ درصد گشتاور الکترومغناطیسی متوسط را بهبود ببخشد. هم چنین رپیل گشتاور الکترومغناطیسی در ساختار پیشنهادی برابر با ۱,۷۹ نیوتن متر و رپیل گشتاور در ساختار سنتی برابر با ۳,۱۶ نیوتن متر می باشد. این بدان معنی است که ساختار پیشنهادی توانسته به میزان ۴۳ درصد رپیل گشتاور الکترومغناطیسی موتور را کاهش دهد.



شکل (۴)-گشتاور الکترومغناطیسی ساختار پیشنهادی در مقایسه با ساختار سنتی موتور



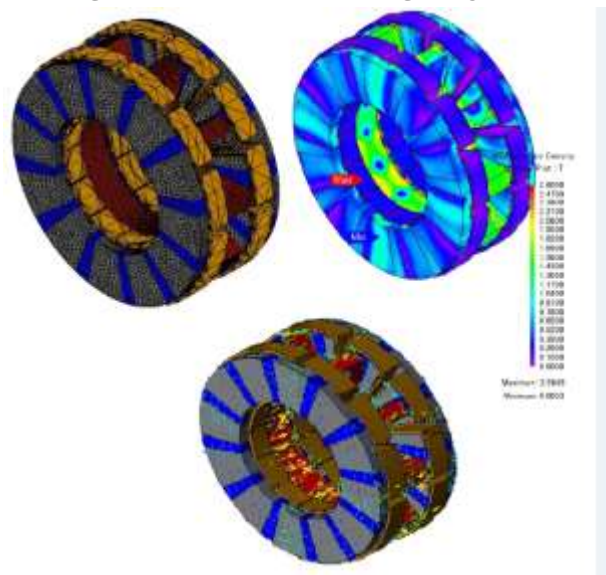
شکل (۵)-گشتاور دندانه ای ساختار پیشنهادی در مقایسه با ساختار سنتی موتور

در نهایت طبق نتایج شبیه سازی شکل (۴) ، پیک گشتاور الکترومغناطیسی ساختار پیشنهادی برابر با ۸,۶۷ نیوتن متر و گشتاور پیک الکترومغناطیسی ساختار سنتی برابر با ۸,۲۲ نیوتن متر است. یعنی ساختار پیشنهادی توانسته به میزان ۵,۵ درصد پیک گشتاور الکترومغناطیسی را بهبود ببخشد. مطابق با نتایج شبیه سازی شکل (۵) گشتاور دندانه ای ساختار پیشنهادی برابر با ۱,۲ نیوتن متر و گشتاور دندانه ای ساختار سنتی برابر با ۲,۰۵ نیوتن متر می باشد. این بدان معنی است که ساختار پیشنهادی توانسته به میزان ۴۱ درصد گشتاور دندانه ای موتور AFFSPM را کاهش دهد. شکل (۶) تغییرات چگالی الکترومغناطیسی ساختار پیشنهادی موتور را به ازای تغییرات چگالی جریان استاتور نشان می دهد.

مطابق با شکل (۲)، بر طبق نتایج آنالیز مقدار متوسط تاگوچی، بیشترین گشتاور الکترومغناطیسی برای حالت A2B2 و همچنین کمترین گشتاور دندانه ای نیز برای حالت A2B2 به دست می آید. بنابراین طبق آنالیز تاگوچی انجام شده سطح بهینه برابر با A2B2 خواهد بود که این سطح طبق جدول (۲) متناظر با ضریب کمان قطب روتور برابر با ۰,۲۵ و زاویه شکل دهی قطب روتور برابر با ۹ درجه خواهد بود. بنابراین طبق بهینه سازی انجام شده برای داشتن کمترین گشتاور دندانه ای و بیشترین گشتاور الکترومغناطیسی متوسط، باید ضریب کمان قطب روتور برابر با ۰,۲۵ و زاویه شکل دهی روتور برابر با ۹ درجه باشد. در بخش بعدی نتایج شبیه سازی ساختار بهینه را با توجه به بهینه سازی انجام شده نشان داده می شود.

۵-نتایج شبیه سازی ساختار بهینه پی شنهادی،مقایسه و تحلیل نتایج :

طبق آنالیز و بهینه سازی انجام شده در ساختار پیشنهادی باید ضریب کمان قطب روتور برابر با ۰,۲۵ و زاویه شکل دهی روتور برابر با ۹ درجه در نظر گرفته شود. شکل (۳)، مش بندی ساختار موتور پیشنهادی، توزیع چگالی شار ساختار پیشنهادی را نشان می دهد.

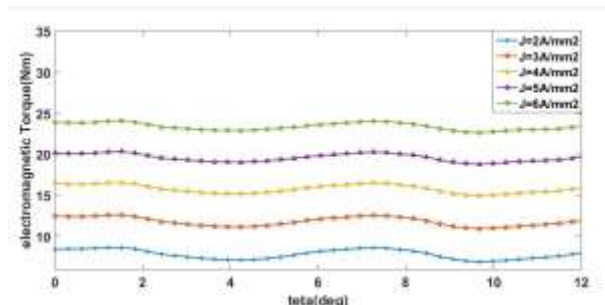


شکل (۳)-ساختار پیشنهادی (بالا-چپ)-مش بندی موتور (بالا-راست)توزیع چگالی شار موتور،(پایین) خطوط شار موتور
برای افزایش دقت مدلسازی طبق شکل (۳) از مش بندی ریزتری داخل فاصله هوایی استفاده شده است. مطابق با شکل (۳) بیشترین چگالی شار در نقاط نوک قطب روتور رخ داده و هم چنین شکل (۳) نشان می دهد که خطوط شار دو آهنربای مجاور هم به سمت یکدیگر بوده که این موضوع عملکرد موتور در حالت شار سوئیچینگ را تایید می کند. شکل (۴) گشتاور الکترومغناطیسی ساختار پیشنهادی در مقایسه با ساختار سنتی را نشان می دهد. شکل (۵) گشتاور دندانه ای ساختار پیشنهادی موتور را در مقایسه با ساختار سنتی نشان می دهد. مطابق با نتایج شبیه سازی شکل (۴)، گشتاور الکترومغناطیسی متوسط ساختار پیشنهادی برابر با ۷,۸۱ نیوتن متر و گشتاور الکترومغناطیسی سنتی برابر با ۶,۸۹ نیوتن متر می باشد. بنابراین ساختار پیشنهادی

الکترومغناطیسی را کاهش داده و به میزان ۵,۵ در صد پیک گشتاور الکترومغناطیسی را افزایش دهد. این نتایج شبیه سازی به دست آمده در مقایسه با ساختار سنتی، کارآمدی ساختار پیشنهادی را در کاهش گشتاور دندانه ای و بهبود مشخصات عملکردی موتور نشان می دهد.

مراجع

- [1] R.Cao, C.Mi, M.Cheng, 2012 "Quantitative Comparison of Flux-Switching Permanent-Magnet Motors with Interior Permanent Magnet Motor for EV, HEV, and PHEV Applications" IEEE Transactions on Magnetics, Vol.48, No.8, pp 2374-2384
- [2] Syed, H. Kurtović, 2017 "New Single-Phase Flux Switching Axial Flux Permanent Magnet Motor" IEEE Transactions on Magnetics, Vol.53, Issue.11,
- [3] X.Wang, Y.Yang, D.Wang T.Ding 2008 "Study of techniques for reducing the cogging torque in permanent magnet motors" International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, China, 17-20 Oct. 2008
- [4] J.rahmani fard, M.Ardebili, 2016 "Dynamic performance of the novel axial flux-switching permanent magnet motor" COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 36 No. 4, pp. 1270-1286,
- [5] Li Hao, M.Lin, D.Xu, W.Zhang 2014 "Cogging Torque Reduction of Axial Field Flux-Switching Permanent Magnet Machine by Adding Magnetic Bridge in Stator Tooth" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 24, No. 3, pp 407-412
- [6] J.Kim, Y.Li 2017 "Novel Six-Slot Four-Pole Axial Flux-Switching Permanent Magnet Machine for Electric Vehicle" IEEE Transactions on Transportation Electrification Vol.3, Issue.1, pp 108-117
- [7] M. F. Omar, E. Sulaiman 2017 "Magnetic Flux Analysis of a New Field-Excitation Flux Switching Motor using Segmental Rotor" IEEE Transactions on Magnetics, Vol.53, Issue.11, pp 1-4
- [8] D.Xu, M.Lin, X.Fu, L.Hao, W.Zhang N.Li 2016 "Cogging Torque Reduction of a Hybrid Axial Field Flux-Switching Permanent Magnet Machine with Three Methods" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.26, Issue.4
- [9] Zixuan Xiang, Li Quan, and Xiaoyong Z "A New Partitioned-Rotor Flux-Switching Permanent Magnet Motor With High Torque Density and Improved Magnet Utilization" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.26, No.4, 2016
- [10] L. Hao, M. Lin, D. Xu, N. Li, W. Zhang, 2015 "Cogging Torque Reduction of Axial-Field Flux-Switching Permanent Magnet Machine by Rotor Tooth Notching" IEEE Transactions on Magnetics, Vol.51, Issue.11
- [11] N.Li, J.Zhu, M.Lin, L.Hao 2019 "Hybrid-Excited Series Permanent Magnet Axial Field Flux Switching Memory Machine" IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol.29, Issue.2
- [12] H.Yang, Z. Q. Zhu, Fellow, H.Lin 2016 "Performance Improvement of Partitioned Stator Switched Flux Memory Machines with Triple-Magnet Configuration" IEEE Transactions on Magnetics Vol.52, Issue.7,



شکل (۶) تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی ساختار پیشنهادی موتور را به ازای تغییرات چگالی جریان استاتور

جدول (۵) به مقایسه پارامترهای ابعادی و مشخصات عملکردی ساختار پیشنهادی و ساختار سنتی می پردازد.

جدول (۵) - مقایسه پارامترهای ابعادی و مشخصات عملکردی ساختار پیشنهادی و ساختار سنتی

نام پارامتر	ساختار سنتی	ساختار پیشنهادی
قطر بیرونی استاتور	۱۴۰ میلی متر	
قطر داخلی استاتور	۸۰ میلی متر	
طول محوری روتور	۱۷,۵ میلی متر	
چگالی شار آهنربا	۱,۲ تسلا	
طول فاصله هوایی	۱ میلی متر	
ضخامت آهنربا	۷,۵ درجه	
عرض کمان روتور	۷,۵ درجه	۹ درجه
زاویه شکل دهی روتور	۶ درجه	۹ درجه
زاویه انتهای قطب روتور	۱۳,۵ درجه	۱۸ درجه
گشتاور الکترومغناطیسی متوسط	۶,۸۹ نیوتن متر	۷,۸۱ نیوتن متر
ریپل گشتاور	۳,۱۶ نیوتن متر	۱,۷۹ نیوتن متر
پیک گشتاور الکترومغناطیسی	۸,۲۲ نیوتن متر	۸,۶۷ نیوتن متر
گشتاور دندانه ای	۲,۰۵ نیوتن متر	۱,۲ نیوتن متر

۶- نتیجه گیری و جمع بندی:

در این مقاله به بهینه سازی قطب روتور برای کاهش گشتاور الکترومغناطیسی موتور شارمحور شار سونیچینگ مغناطیس دائم پرداخته شده است. در این راستا علاوه بر کاهش گشتاور دندانه ای، گشتاور الکترومغناطیسی نیز با روش پیشنهادی بهبود یافته است. روش بهینه سازی قطب روتور در این مقاله متشکل از دو تکنیک روش ضریب کمان قطب بهینه روتور و روش زاویه شکل دهی بهینه قطب روتور می باشد. آنالیز پارامترهای بهینه به کمک روش تاگوچی انجام شده و شبیه سازی ها با روش المان محدود سه بعدی صورت پذیرفته است. در نهایت با آنالیز تاگوچی انجام شده مقدار ضریب کمان قطب بهینه روتور برابر با ۰,۲۵ و زاویه شکل دهی بهینه قطب روتور برابر ۹ درجه به دست آمده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که ساختار پیشنهادی توانسته به میزان ۴۱ درصد گشتاور دندانه ای موتور را نسبت به ساختار سنتی کاهش داده و هم چنین توانسته میزان گشتاور الکترومغناطیسی متوسط را به میزان ۱۳,۳۵ درصد بهبود ببخشد. هم چنین ساختار پیشنهادی توانسته ۴۳ درصد ریپل گشتاور