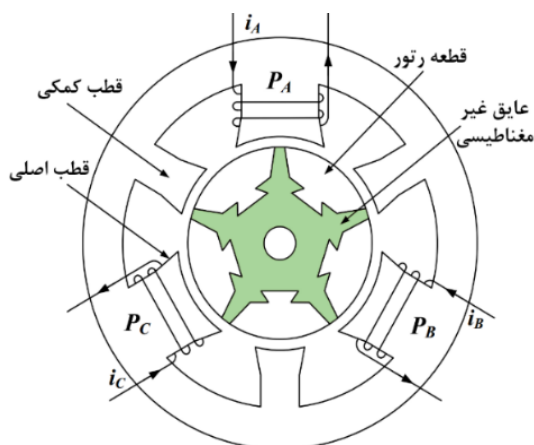


بهبود عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانسی با تغییر ساختار رتور قطعه‌ای

بابک الهوردی‌نژاد، حسین ترکمن و آرش اللهیاری



شکل ۱: موتور سوئیچ رلوکتانسی ۶/۵ پیشنهادی.

چکیده: این مقاله به معرفی یک موتور سوئیچ رلوکتانسی ۶/۵ با رتور قطعه‌ای و بهبود عملکرد آن از طریق ایجاد تغییرات در ساختار رتور می‌پردازد. با تغییر ساختار رتور، علاوه بر کاهش ریپل گشتاور، بازده موتور نیز افزایش می‌یابد. موتور ارائه‌شده شامل دو نوع قطب بر روی استاتور است: قطب‌های اصلی و قطب‌های کمکی. قطب‌های استاتور شرایط را فراهم می‌آورد تا مسیر شار عبوری از مواد فعال کوتاه‌تر شده و نواحی‌ای از سطح رتور که در آنها مسیر شار معکوس می‌شود، در راستای ایجاد تلفات آهنی نقشی نداشته باشند. در این راستا در این مقاله توپولوژی‌ها مختلف انواع شیار بر روی رتور بررسی شده و با ارزیابی کارایی موتور بهترین مدل انتخاب شده است. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل با استفاده از روش المان محدود و مقایسه، کارایی تئوری مطرح‌شده را اثبات می‌نماید.

کلیدواژه: موتور سوئیچ رلوکتانسی، رتور چندبخشی، بهبود عملکرد، Torque Notching, Cogging.

۱- مقدمه

موتور سوئیچ رلوکتانسی در چند دهه گذشته به عنوان یک درایو سرعت متغیر مورد توجه قرار گرفته است. دلایل اصلی این توجه سادگی ساختار، هزینه ساخت کم، کنترل‌پذیری مطمئن، قابلیت اطمینان بالا و عمر طولانی می‌باشد [۱] و [۲].

موتور سوئیچ رلوکتانسی از دسته موتورهای قطب برجسته و تک‌تحریکه است که سیم‌پیچی‌ها فقط بر روی استاتور قرار دارند و رتور فاقد هر گونه سیم‌پیچی است [۳]. امروزه طرح‌های مختلفی برای ساخت این نوع موتور ارائه می‌شود که بخشی از آنها پایبند به شکل معمول و رایج که در آن هم رتور و هم استاتور به صورت قطب برجسته بوده، هستند. هر چند در سال‌های اخیر با ارائه رتورهای چندقطعه‌ای عملکرد موتورهای سوئیچ رلوکتانسی بهبود یافته است [۴].

در [۵] موتور ۶/۴ با رتور چندبخشی ارائه شده که یک بخش آلومینیومی به رتور آن اضافه شده است. بدین ترتیب مقاومت مکانیکی افزایش یافته و همچنین عملکرد گشتاور موتور در مقایسه با موتورهای سوئیچ رلوکتانسی معمولی بهتر می‌شود. برای بهبود هرچه بهتر گشتاور، موتور سوئیچ رلوکتانسی چندبخشی با تعداد فاز افزایش‌یابنده و رتور ۲ پله‌ای به ترتیب در [۶] و [۷] بررسی شده‌اند. به علاوه در [۸] موتور سوئیچ رلوکتانسی با رتور چندبخشی با شکاف دایره‌ای ارائه شده که مسیر شار در رتور و استاتور وادار به حرکت در یک مسیر دایره‌ای می‌شود. بدین ترتیب مسیر شار کوتاه‌تر شده و گشتاور میانگین افزایش می‌یابد.

این مقاله در تاریخ ۲۱ تیر ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۱۶ آذر ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد.

بابک الهوردی‌نژاد، (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، (email: babak.allahverdinjad@gmail.com).

حسین ترکمن، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، (email: h_torkaman@sbu.ac.ir).

آرش اللهیاری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، (email: arashallahyari@gmail.com).

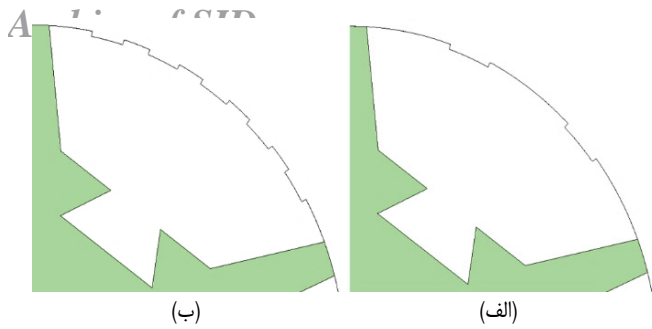
در [۹] از روش ایجاد شیار بر روی رتور قطعه‌ای برای کاهش ریپل و نویز موتورهای شار سوئیچینگ استفاده شده است. این شیارها در اندازه‌ها و موقعیت‌های مکانی مختلف بر روی رتور قرار گرفته و تأثیر آنها بررسی شده است. در [۱۰] برای کاهش ریپل موتورهای شار سوئیچینگ آهن‌ربای دائم، الگوهای مختلف ایجاد شیار هم بر روی رتور و هم استاتور بررسی شده است.

در این مقاله به بررسی موتور سوئیچ رلوکتانسی ۶/۵ با مسیر شار کوتاه‌شده پرداخته می‌شود. برای این موتور دو نوع رتور با ساختار متفاوت شبیه‌سازی شده که طرح اول مربوط به ساختار ارائه‌شده در [۱] است و طرح دوم به گونه‌ای طراحی شده که ریپل گشتاور و بازده موتور نسبت به طرح اول بهبود یافته است.

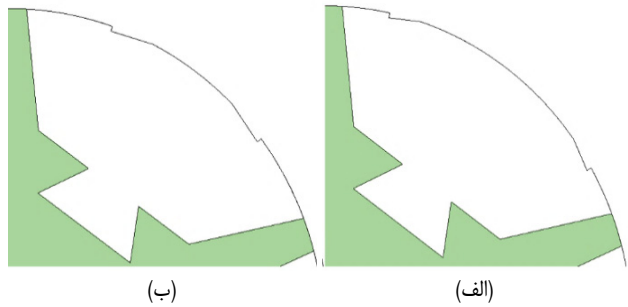
بخش ۲ و ۳ این مقاله به اصول و پارامترهای طراحی موتور پیشنهادی می‌پردازند. در بخش ۴ به طراحی ساختار جدید رتور برای موتور پیشنهادی اختصاص دارد. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی‌ها برای موتور پیشنهادی با رتورهای طراحی‌شده مقایسه شده‌اند و در بخش ۶ نتیجه‌گیری نهایی صورت گرفته است.

۲- اصول طراحی موتور سوئیچ رلوکتانسی

مدل جدید موتور سوئیچ رلوکتانسی ۶/۵ در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که اشاره شد، این موتور دارای ۶ قطب بر روی استاتور و ۵ بخش روی رتور است که این ۵ قسمت با یک ماده غیر مغناطیسی از هم جدا شده‌اند. قطب‌های استاتور شامل دو دسته اصلی و کمکی هستند که سیم‌پیچی‌ها فقط بر دور قطب‌های اصلی پیچیده شده‌اند. قطب‌های کمکی فقط در ایجاد مسیر شار برگشتی نقش دارند. اگر سیم‌پیچی‌ها به همان ترتیبی که در شکل ۱ نشان داده شده است، بسته شوند و به ترتیب ABC تغذیه شوند، موتور در جهت پادساعت‌گرد خواهد چرخید و اگر به ترتیب ACB تغذیه شوند، در جهت ساعت‌گرد موتور شروع به چرخش می‌کند. در این موتور زاویه صفر رتور هم‌راستا با فاز A در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: شیارهای مستطیلی ۲ و ۴ تایی.



شکل ۴: شیارهای نمایی ۲ تایی با فواصل متفاوت.

در این حالت فاز از طریق دو دیود هرزگرد شروع به مغناطیس‌زدایی کرده و انرژی از فاز موتور به منبع dc منتقل می‌گردد. زمانی که یک فاز مغناطیس‌زدایی می‌گردد، فاز دیگر می‌تواند مغناطیس شود. این موضوع به کاهش ریپل گشتاور در طول ارتباط کمک می‌کند.

۴- بهبود ساختار رتور برای کاهش ریپل

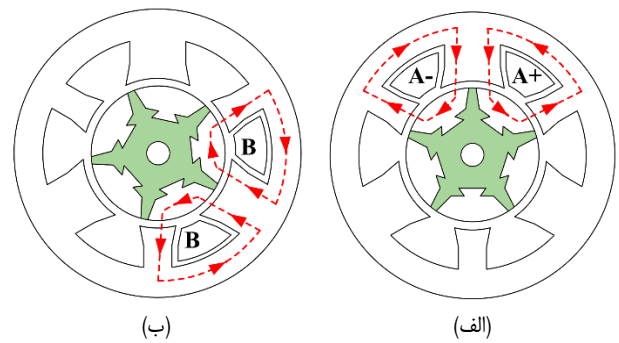
از جمله معایب موتورهای سوئیچ رلوکتانسی، غیر خطی بودن رفتار ماشین به دلیل برجسته‌بودن ساختار استاتور و رتور است که باعث ایجاد ریپل در گشتاور در موتور می‌شود. این ریپل گشتاور در سرعت پایین می‌تواند باعث ایجاد نوسانات سرعت و لرزش نویز صوتی شود و فرکانس رزونانس را در قطعات مکانیکی تحریک کند که این امر باعث ایجاد مشکلاتی در این نوع ماشین‌ها می‌شود [۱۱].

برای کاهش ریپل گشتاور موتورهای از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود؛ از جمله، روش‌هایی که ساختار استاتور و رتور موتور را تغییر می‌دهند. در این مقاله از روش Notch استفاده شده است [۱۲].

۴-۱ ایجاد شکاف در رتور (Rotor Tooth-Notching)

ایجاد یک سری شکاف در ساختار رتور می‌تواند باعث کاهش ریپل گشتاور شود. این نوع شکاف‌ها بر روی سطح رتور قرار می‌گیرند. تعداد دندانها و ساختار هندسی این شکاف‌ها باید به دقت انتخاب شود زیرا ممکن است با وجود کاهش ریپل، گشتاور خروجی بیش از اندازه افت کند که این امر مطلوب نیست [۱۲].

ساختارهای هندسی متفاوتی برای این شیارها موجود است از جمله: مستطیلی، نمایی^۲ و دایره‌ای [۹] و [۱۲]. برای موتور سوئیچ رلوکتانسی ۶/۵ مورد بررسی هر سه این ساختارهای هندسی مورد بررسی قرار گرفت که ساختار دایره‌ای به مراتب پاسخ بهتری به دست داد. شکل‌های ۳ تا ۵ مدل رتورهای طراحی شده برای ساختارهای مستطیلی، نمایی و دایره‌ای را نشان می‌دهند.



شکل ۵: مسیر شار مغناطیسی در موتور پیشنهادی، (الف) تغذیه فاز A و (ب) تغذیه فاز B.

جدول ۱: پارامترهای طراحی موتور سوئیچ رلوکتانسی ۶/۵

اندازه	پارامتر
۳	تعداد فاز
۵۲٫۵	شعاع خارجی استاتور (mm)
۱۰	ضخامت یوغ استاتور (mm)
۲۶	شعاع خارجی رتور (mm)
۰٫۲۵	فاصله هوایی (mm)
۴	شعاع شفت (mm)
۳۵	طول موتور (mm)
۳۰ و ۵۴	زاویه کمان استاتور (°)
۶۶	زاویه کمان رتور (°)
۱۲	تعداد دور هر فاز
۵٫۹	مقاومت هر فاز (mΩ)

شکل ۲ مسیر شار مغناطیسی را زمانی که رتور در جهت پادساعت‌گرد می‌چرخد نشان می‌دهد. زمانی که تغذیه از فازی به فاز دیگر انتقال می‌یابد، پدیده معکوس‌شدن شار در استاتور رخ نمی‌دهد و بدین ترتیب تلفات هسته در این موتور کاهش می‌یابد.

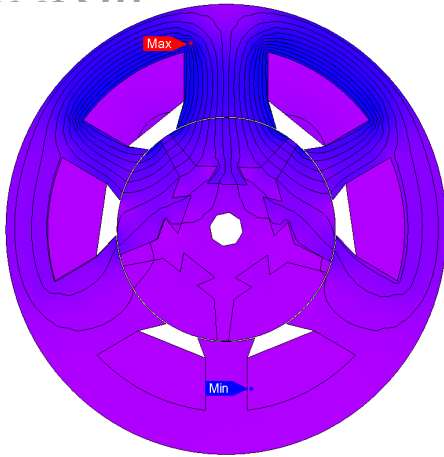
۳- پارامترهای طراحی موتور

موتور سوئیچ رلوکتانسی پیشنهادی، یک موتور ۱۲ ولت با توان ۵۰۰ وات می‌باشد و سرعت موتور برابر با ۲۸۰۰ دور بر دقیقه است. مشخصات موتور سوئیچ رلوکتانسی ۶/۵ در جدول ۱ آمده است. نکات زیر نیز در طراحی مد نظر قرار گرفته‌اند:

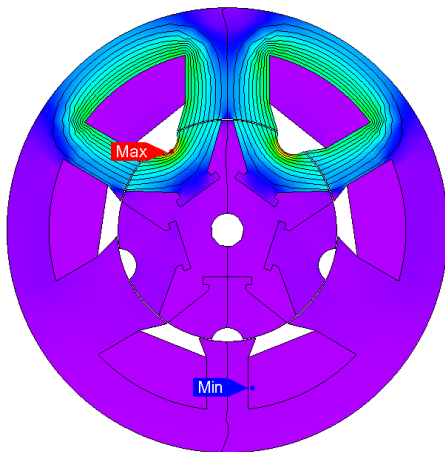
- شار مغناطیسی همواره زیر ۱/۸ تسلا نگه داشته می‌شود.

- عرض قطب‌های کمکی نصف عرض قطب‌های اصلی است.

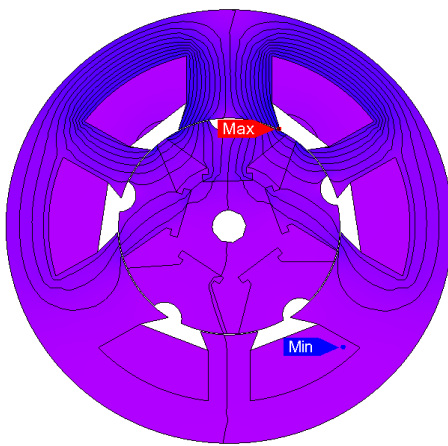
به منظور درایو موتور از مبدل پل نامتقارن^۱ رایج به ازای دو سوئیچ در هر فاز با زاویه هم‌پوشانی ۲۴ درجه استفاده شده است. در طول مد هدایت فاز فعال، هر دو سوئیچ فاز در حالت روشن هستند. منبع dc ورودی، فاز را مغناطیس می‌کند. این مد قبل از شروع هم‌پوشانی فاز رتور و استاتور یعنی در زمانی که جریان فاز به مقدار مرجع، درست قبل از افزایش اندوکتانس فاز می‌رسد، عمل می‌نماید. این حالت به کاهش ریپل گشتاور کمک می‌کند. هنگامی که جریان به مقدار مرجع می‌رسد، مبدل وارد مرحله مد تعادل‌سازی جریان می‌گردد. در این مد جریان در مقدار مرجع به وسیله روشن‌نگهداشتن سوئیچ‌های فاز تا زمان باقیمانده که انرژی به فاز دیگر در زمان ارتباط برسد، هر دو سوئیچ فاز، خاموش می‌گردند.



شکل ۸: توزیع شار مغناطیسی در موتور، رتور غیر همراستا با فاز A.



شکل ۹: توزیع شار مغناطیسی در موتور رتور جدید، رتور همراستا با فاز A.

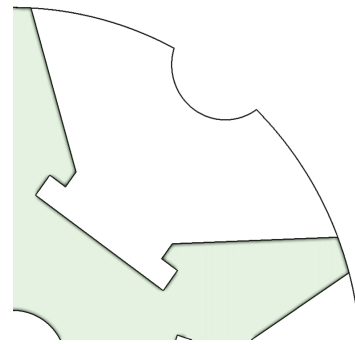


شکل ۱۰: توزیع شار مغناطیسی در موتور با رتور جدید، رتور غیر همراستا با فاز A.

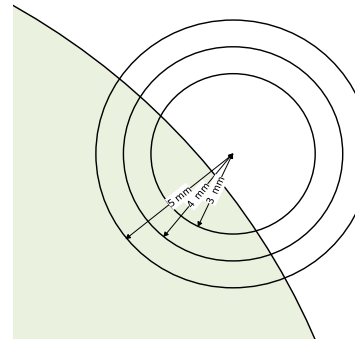
تغذیه شده و غیر همراستا با آن نشان می‌دهند. شعاع شیار دایره‌ای در این دو شکل برابر ۴ میلی‌متر است.

برای مقایسه عددی در گام اول، رتور ارائه شده در [۱] و رتور طراحی شده بدون شیار (شکل ۱۱) با هم مقایسه می‌شوند. با توجه به شکل ۱۲ می‌توان دریافت که نسبت ریپل موتور با رتور جدید بدون شیار از رتور ارائه شده در [۱] در سرعت‌های پایین کمتر است. همچنین مقدار گشتاور تولیدی رتور جدید برای تمامی جریان‌ها از رتور [۱] اندکی بیشتر است (شکل ۱۳).

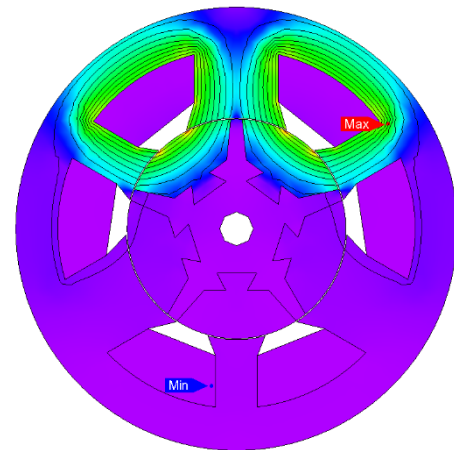
با افزایش جریان هسته‌ها به سمت اشباع می‌روند و از این رو بررسی‌ها اکثراً برای جریان پایین صورت می‌پذیرند. برای این موتور دامنه جریان



شکل ۵: شیار دایره‌ای.



شکل ۶: تغییر شعاع شیار دایره‌ای از ۱ تا ۵ میلی‌متر.



شکل ۷: توزیع شار مغناطیسی در موتور، رتور همراستا با فاز A.

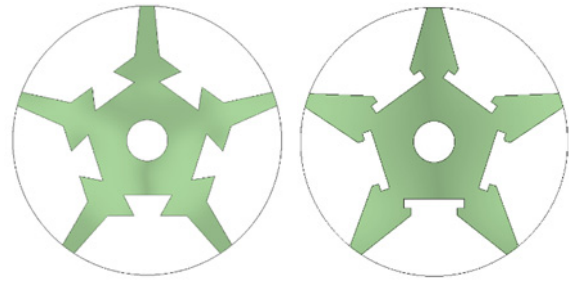
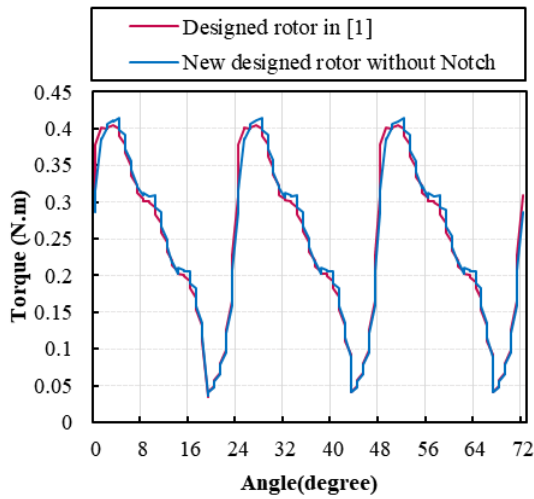
موقعیت قرارگیری شکاف دایره‌ای در وسط سطح خارجی رتور قرار دارد. مرکز دایره شکاف به فاصله ۱ میلی‌متر از رتور قرار گرفته است. برای اندازه شعاع، از مقدار ۱ میلی‌متر شروع کرده و تا ۵ میلی‌متر ادامه می‌دهیم (شکل ۶) تا بهترین اندازه‌ای که به ازای آن ریپل کاهش بیابد و افت گشتاور کم باشد، به دست بیاید.

۵- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانسی و مقایسه ریپل با ساختارهای متفاوت از روش اجزای محدود^۱ استفاده شده است.

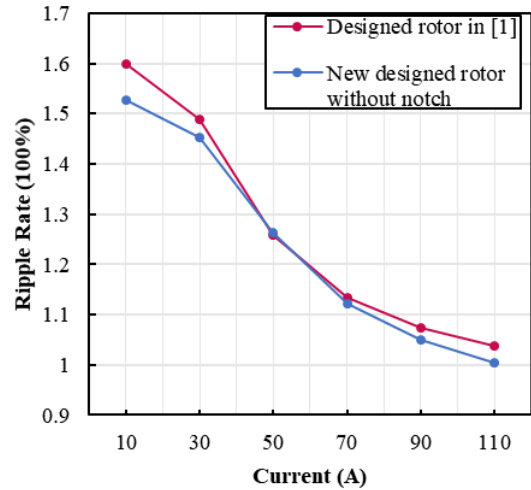
شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب توزیع شار مغناطیسی در موتور را برای دو حالت همراستا با فاز A تغذیه شده و غیر همراستا با آن نشان می‌دهند. شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز به ترتیب توزیع شار مغناطیسی در موتور سوئیچ رلوکتانسی با رتور شیاردار دایره‌ای را برای دو حالت همراستا با فاز A

Arc

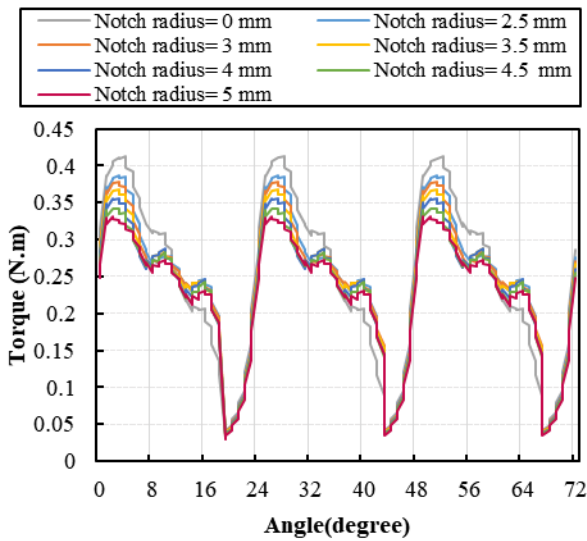


شکل ۱۱: (الف) رتور طراحی شده بدون شیار و (ب) رتور ارائه شده در [۱].

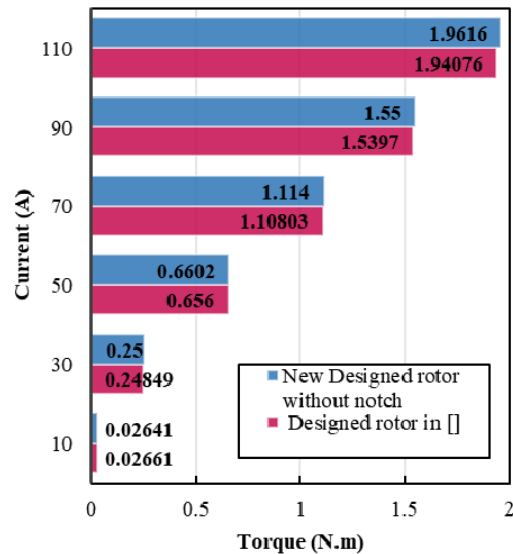
شکل ۱۴: منحنی گشتاور رتور ارائه شده در [۱] و رتور طراحی شده جدید بدون شیار به ازای جریان ۳۰ آمپر.



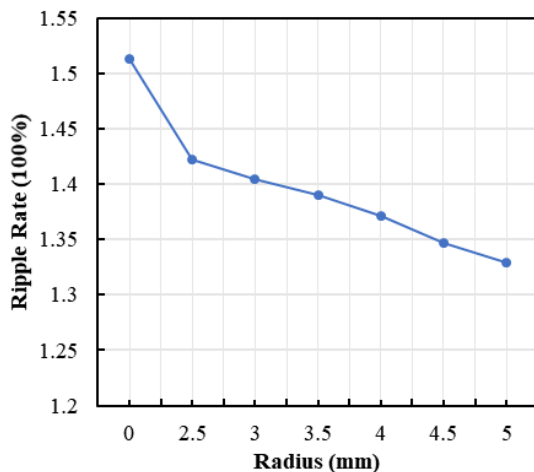
شکل ۱۲: مقایسه میزان ریبیل رتور ارائه شده در [۱] و رتور طراحی شده جدید بدون شیار به ازای جریان های مختلف.



شکل ۱۵: منحنی گشتاور رتور طراحی شده با اندازه شیارهای متفاوت به ازای جریان ۳۰ آمپر.



شکل ۱۳: مقایسه میزان گشتاور میانگین رتور ارائه شده در [۱] و رتور طراحی شده جدید بدون شیار به ازای جریان های مختلف.



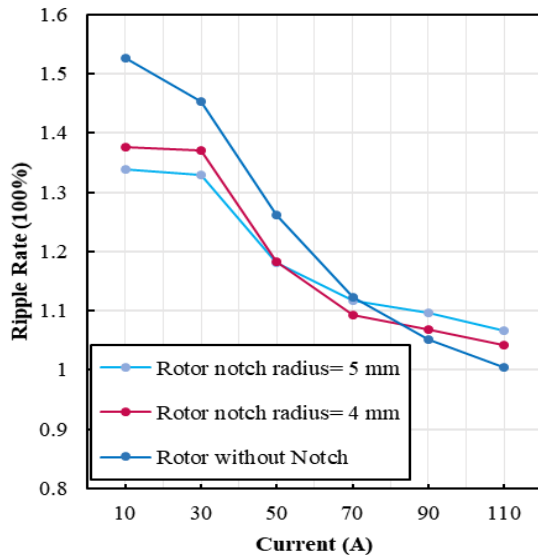
شکل ۱۶: میزان ریبیل موتور با اندازه شیارهای متفاوت به ازای جریان ۳۰ آمپر.

۳۰ آمپر مطلوب است. شکل ۱۴ منحنی گشتاور رتور ارائه شده در [۱] و رتور طراحی شده جدید بدون شیار به ازای جریان ۳۰ آمپر را نشان می دهد. با بررسی نتایج شکل های ۱۲ تا ۱۴ می توان دریافت که رتور طراحی شده جدید بدون شیار نسبت به رتور [۱] رفتار بهتری دارد.

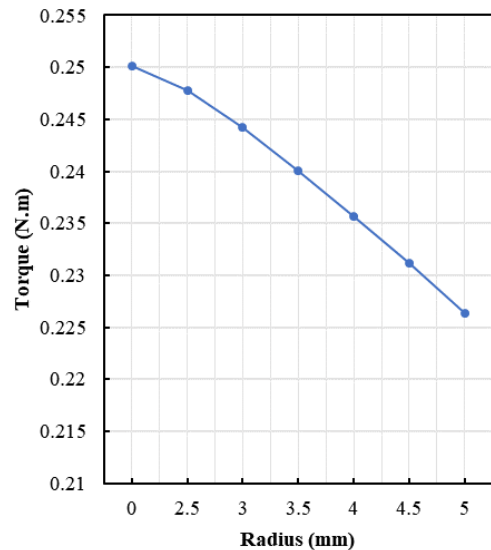
شکل های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب نمایانگر تأثیر تغییر اندازه شیار بر ریبیل و گشتاور در جریان ۳۰ آمپر هستند. همان طور که مشاهده می شود با افزایش شعاع شیار، ریبیل کاهش یافته است. این شیارها باعث کاهش گشتاور نیز می شوند که امری طبیعی است. با افزایش ۲ برابری شعاع شیار

همان طور که اشاره شد برای بررسی تأثیر ایجاد شیار بر کاهش ریبیل، شعاع دایره شیار را تغییر می دهیم. شکل ۱۵ منحنی گشتاور موتور را با رتور طراحی شده جدید با اندازه شیارهای مختلف در جریان ۳۰ آمپر نشان می دهد.

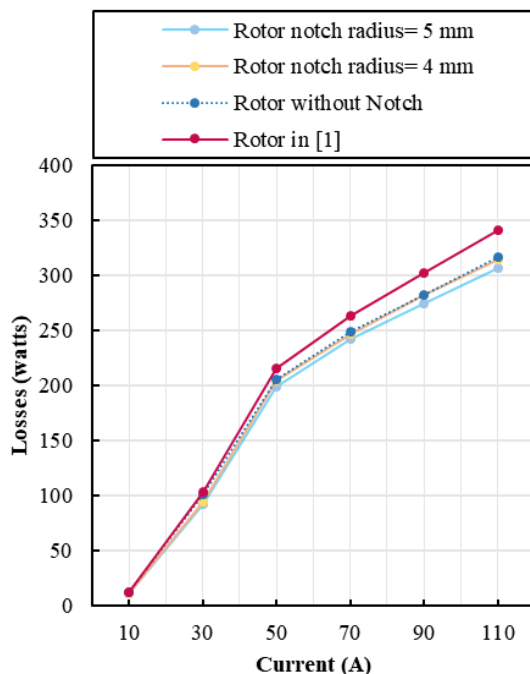
Arc Length



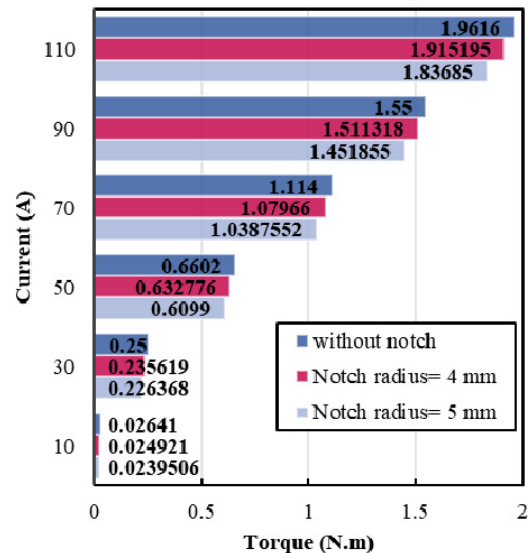
شکل ۱۷: میزان گشتاور میانگین موتور با رتور طراحی شده با اندازه شیارهای متفاوت به ازای جریان ۳۰ آمپر.



شکل ۱۸: مقایسه گشتاور میانگین موتور با رتور طراحی شده با اندازه شیارهای متفاوت.



شکل ۱۹: میزان ریبیل موتور با رتور طراحی شده با اندازه شیارهای متفاوت به ازای جریان ۳۰ آمپر.



شکل ۲۰: مقایسه تلفات موتور با رتور طراحی شده با اندازه شیارهای متفاوت.

از ۲/۵ به ۵ میلی‌متر) میزان ریبیل ۷٪ کاهش داشته که این میزان در مقایسه بدون شیار به میزان ۱۱/۵٪ بوده است.

شکل ۱۸ نیز میزان گشتاور میانگین تولیدی رتور طراحی شده را به ازای شعاع شیارهای صفر، ۴ و ۵ میلی‌متر برای جریان‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۹، در جریان‌های پایین افزایش شعاع شیار روی رتور باعث کاهش ریبیل گشتاور شده است. در جریان‌های بالا که هسته به اشباع می‌رود، رتور بدون شیار ریبیل کمتری دارد اما بایستی این را در نظر داشت که کاهش ریبیل گشتاور باعث افزایش طول عمر موتور و قطعات مکانیکی (همانند بلبرینگ) می‌شود. قابل ذکر است که تقریباً در اکثر روش‌های کاهش ریبیل گشتاور معمولاً کاهش دامنه متوسط گشتاور هم به همراه بوده است، مگر این که با استفاده از یک مبدل جدید و روش کنترلی دیگری بتوان میزان کاهش یافته را جبران‌سازی نمود.

با توجه به شکل ۲۰ ملاحظه می‌شود که طبیعتاً با افزایش جریان تلفات افزایش می‌یابد و همچنین موتور با رتور طراحی شده نسبت به رتور موتور رایج [۱] به ازای تمامی جریان‌ها تلفات کمتری دارد که این اختلاف با افزایش جریان بیشتر می‌شود. بدین صورت که مدل‌های پیشنهادی تلفات کمتری دارند و بنابراین می‌توانند به بازده بالاتری برسند.

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی یک موتور سوئیچ رلوکتانسی ۶/۵ با رتور چندبخشی می‌پردازد که تغییراتی در ساختار رتور آن در راستای بهبود عملکرد آن صورت می‌پذیرد. ساختارهای متفاوتی برای رتور این موتور بررسی شد که در نهایت مدلی که دارای کمترین ریبیل گشتاور بود انتخاب گردید. در واقع مدل پیشنهادی با شعاع ناچ ۵ میلی‌متر به عنوان مدل بهینه انتخاب شده که نسبت به مدل [۱]، ۹٪ وات تلفات کمتری در

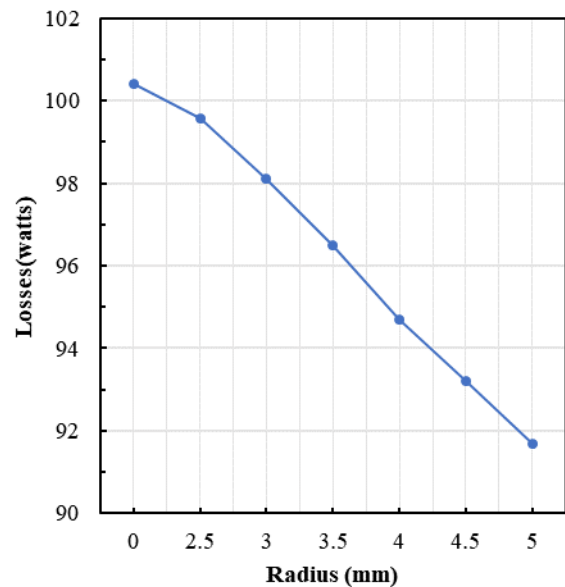
Archiving of SID

- [6] T. Higuchi, K. Suenaga, and T. Abe, "Torque ripple reduction of novel segment type switched reluctance motor by increasing phase number," in *Proc. Int. Conf. on Electrical Machine and Systems*, 4 pp., Tokyo, Japan, 15-18 Nov. 2009.
- [7] T. Higuchi, Y. Nakao, and T. Abe, "Characteristics of a novel segment type SRM with 2-step slide rotor," in *Proc. Int. Conf. on Electrical Machine and Systems*, 4 pp., Tokyo, Japan, 15-18 Nov. 2009.
- [8] N. Vattikuti, V. Rallabandi, and B. G. Fernandes, "A novel high torque and low weight segmented switched reluctance motor," in *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, pp. 1223-1228, Rhodes, Greece, 15-19 Jun. 2008.
- [9] S. E. Abdollahi and S. Vaez-Zadeh, "Reducing cogging torque in flux switching motors with segmented rotor," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 49, no. 10, pp. 5304-5309, Oct. 2013.
- [10] D. Wang, X. Wang, and S. Y. Jung, "Reduction on cogging torque in flux-switching permanent magnet machine by teeth notching schemes," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 48, no. 11, pp. 4228-4231, Nov. 2012.
- [11] R. B. Inderka and R. W. A. A. De Doncker, "DITC-direct instantaneous torque control of switched reluctance drives," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 39, no. 4, pp. 1046-1051, Jul.-Aug. 2003.
- [12] M. J. Jin, Y. Wang, J. X. Shen, P. C. K. Luk, W. Z. Fei, and C. F. Wang, "Cogging torque suppression in a permanent magnet flux-switching integrated-starter-generator," *IET Electric Power Applications*, vol. 4, no. 8, pp. 647-656, Sep. 2010.

باپک الوردی نژاد در سال ۱۳۹۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق- قدرت خود را از دانشگاه ارومیه و مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق، گرایش الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی خود را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه شهید بهشتی دریافت نموده است. وی هم اکنون در حال تحصیل در مقطع دکتری مهندسی برق- قدرت در دانشگاه شهید مدنی آذربایجان است. زمینه‌های تحقیقاتی وی شامل: مبدل‌های الکترونیک قدرت، انرژی‌های تجدیدپذیر و ریزشبکه‌ها است.

حسین ترکمن به عنوان عضو هیأت علمی گروه مهندسی برق قدرت دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید بهشتی در مرتبه دانشیاری می‌باشند. از ایشان بیش از ۱۳۰ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های بین‌المللی و ملی و همچنین ۵ کتاب چاپ شده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان ماشین‌های الکتریکی، الکترونیک قدرت و انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد.

آرش الیهیاری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۳ از دانشگاه ارومیه به ترتیب در رشته‌های مهندسی برق الکترونیک و مهندسی برق قدرت کسب نموده است. زمینه‌های تحقیقاتی وی شامل طراحی ماشین‌های الکتریکی جدید از جمله ورنیر مغناطیس دائم، گیر مغناطیسی، شار محور مغناطیس دائم چندطبقه و ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس می‌باشد.



شکل ۲۱: میزان تلفات موتور با رتور طراحی شده با اندازه شیارهای متفاوت به ازای جریان ۳۰ آمپر.

جریان ۳۰ آمپر دارد. همچنین ریبیل گشتاور مدل پیشنهادی ۱۲٪ در جریان ۳۰ آمپر کمتر از مدل [۱] می‌باشد. بنابراین مشاهدات و مقایسه‌ها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی برای رتور نه تنها ریبیل کمتری دارد بلکه با کاهش تلفات بازده را نیز افزایش می‌دهد.

مراجع

- [1] Z. Xu, D. H. Lee, and J. W. Ahn, "Design and operation characteristics of a novel switched reluctance motor with a segmental rotor," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 52, no. 3, pp. 2564-2572, May/June 2016.
- [2] A. Siadatan, H. Torkaman, and E. Afjei, "Septi-segment switched reluctance machine: design, modeling, and manufacturing," *International Trans. on Electrical Energy Systems*, vol. 26, no. 8, pp. 1673-1684, Aug. 2016.
- [3] M. M. Nezamabadi, E. Afjei, and H. Torkaman, "Design and electromagnetic analysis of a new rotary-linear switched reluctance motor in static mode," *Applied Computational Electromagnetics Society J.*, vol. 31, no. 2, pp. 171-179, Feb. 2016.
- [4] M. Asgar, E. Afjei, and H. Torkaman, "A new strategy for design and analysis of a double-stator switched reluctance motor: electromagnetics, FEM, and experiment," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 51, no. 12, 8 pp., Article ID: 8208808, Dec. 2015.
- [5] J. Oyama, T. Higuchi, T. Abe, and K. Tanaka, "The fundamental characteristics of novel switched reluctance motor with segment core embedded in aluminum rotor block," in *Proc. Int. Conf. on Electrical Machines and Systems*, vol. 1, pp. 515-519, Nanjing, China, 2005.