

کاهش رپل گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانسی شار محوری با روتور قطعه ای

رضا نقاش¹، سامان رضازاده²، عقیل قاهری³، حسین ترکمن⁴

¹دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، r.naghash@mail.sbu.ac.ir

²دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، sam.rezazade@gmail.com

³دانشجوی دکتری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، a_ghaheri@sbu.ac.ir

⁴دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، H_torkaman@sbu.ac.ir

چکیده

موتورهای سوئیچ رلوکتانسی را می توان از نظر مسیر شار به دو دسته ی موتورهای سوئیچ رلوکتانسی شار محور و موتورهای سوئیچ رلوکتانسی شار شعاعی طبقه بندی کرد. این دسته از موتورها به دلیل ویژگی های خاصی که دارند ممکن است دارای رپل گشتاور قابل توجهی باشند. راه های مختلفی برای کاهش رپل گشتاور وجود دارد. این راه ها باعث بهبود عملکرد و افزایش بازده نیز خواهند شد.

واژه های کلیدی

موتور سوئیچ رلوکتانسی شار محوری، رپل گشتاور، notch, Pairing

مقدمه

موتورهای سوئیچ رلوکتانسی را می توان از نظر مسیر شار به دو دسته ی موتورهای سوئیچ رلوکتانسی شار محور و موتورهای سوئیچ رلوکتانسی شار شعاعی طبقه بندی کرد. Mecrow دو ساختار مختلف از موتورهای سوئیچ رلوکتانسی شار شعاعی روتور قطعه ای را معرفی می کند [1]. این دو ساختار به صورت موتور سوئیچ رلوکتانسی روتور قطعه ای Single-tooth winding و Multi-tooth winding نام گذاری شده اند. با وجود تفاوت هایی که این دو نوع ماشین با یکدیگر دارند ولی به صورت کلی دارای عملکرد مشابهی هستند. موتور MTW به نسبت موتور STW به سیم پیچ انتهایی بلندتری نیاز دارد. از سوی دیگر با بررسی موتور سوئیچ رلوکتانسی شار محوری می توان دریافت که این موتور به نسبت موتور شار شعاعی به سیم پیچ انتهایی بلندتری نیاز دارد. با توجه به این موضوع برای بررسی موتور شار محوری از ساختار STW بهره گرفته می شود. از این موتورها در کاربردهای ترکشن مانند hub موتور که دارای محدودیت فضایی هستند، استفاده می شود [2]. از سوی دیگر اخیراً نیز از این نوع موتور در خودروهای الکتریکی و هیبرید نیز به دلیل حجم کمی که دارد استفاده می شود. یکی از مزیت های موتورهای سوئیچ رلوکتانسی در مقایسه با موتورهای القایی و موتورهای آهنربای

دائم خاک کمیاب بدون جاروبک هزینه ی پایین این موتورها می باشد [3,4]. این دسته از موتورها به دلیل ویژگی های خاصی که دارند ممکن است دارای رپل گشتاور قابل توجهی باشند که گاهی اوقات از این رپل در برابر گشتاور مورد نیاز چشم پوشی می شود. راه های مختلفی برای کاهش رپل گشتاور وجود دارد که بعضی از این راه ها با بهبود ساختار هندسی روتور یا استاتور باعث کاهش چشم گیر رپل گشتاور می شوند [5,6]. یکی از روش های کاهش رپل گشتاور استفاده از یک سری شکاف (notch) در سطح روتور می باشد [7]. در این روش که در بررسی شده است با ایجاد یک سری شکاف در روتور رپل گشتاور را کاهش می دهد. برای انتخاب تعداد شکاف و محل قرارگیری آن ها باید محاسبات گشتاور صورت بگیرد و همچنین از روش المان محدود (FEM) بهره گرفته شود تا از به اشباع رفتن هسته روتور جلوگیری شود. در برخی موتورها از جمله موتورهای سوئیچ رلوکتانسی شار محور با جفت کردن دندانه های روتور (Pairing) باعث کاهش رپل گشتاور خواهند شد [8,9]. در این روش باید تعداد قطعات روتور زوج باشد تا بتوان با جفت کردن آن ها به گونه ای که یکی از آن ها دارای پهنای بیشتر و دیگری دارای پهنای کمتری، رپل گشتاور را کاهش داد. از آن جایی که شکل موج گشتاور دندانه با عرض روتور تغییر می کند به همین علت می توان با تغییر ساختار روتور گشتاور دندانه را کاهش داد. با استفاده از این روش می توان گشتاور دندانه را کاهش داد ولی باید به تعادل مکانیکی ماشین توجه کرد زیرا ممکن است با استفاده از این روش تعادل مکانیکی از بین برود. اندازه و زاویه فاز گشتاور راه اندازی با تغییر پهنای روتور تغییر می کند. در این روش تقارن نمودار گشتاور دندانه نیز از بین نخواهد رفت [10]. در این مقاله به بررسی یک موتور سوئیچ رلوکتانسی شار محوری 10/12 پرداخته می شود. در بخش اول موتور مورد نظر را از لحاظ ساختاری مورد بررسی قرار داده و ساختار هندسی آن ارائه می گردد. در بخش دوم اصول عملکردی و طراحی موتور شرح داده می شود و در بخش سوم، دو روش کاهش رپل گشتاور که بر روی موتور پیاده سازی شده است ارائه می گردد. در بخش چهارم شبیه

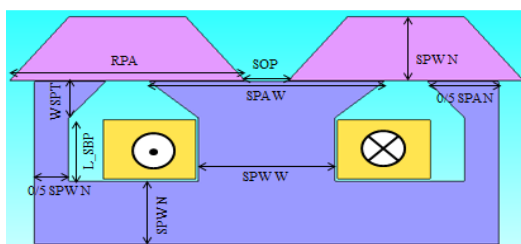
سازی‌های مورد نظر برای هر یک از روش‌های کاهش ریل ارئه خواهد شد و در بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری آورده شده است.

ساختار هندسی موتور

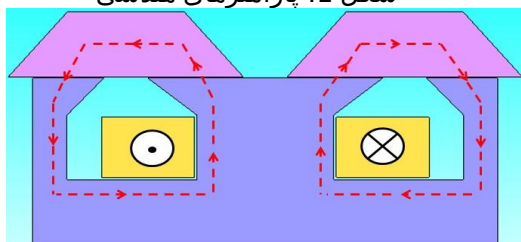
موتور مورد نظر که یک موتور سوئیچ رلوکتانس شار محور و به صورت STW می باشد که در شکل 1 نشان داده شده است. در این شکل همان طور که مشخص است روتور و استاتور و سیم پیچ های آن ها نشان داده شده اند. قسمت متحرک آن روتور و قسمت های استاتور و سیم پیچ ها ثابت فرض شده اند. در طراحی این موتور سعی شده است تا حد ممکن مسیر عبور شار کوتاه باشد. با توجه به شکل 1 می توان دریافت که فاصله میان بخش های روتور و استاتور ناچیز است و برابر 0.3 میلی متر می باشد. برای تجزیه و تحلیل ساده تر موتور به صورت خطی شبیه سازی شده و فازهای آن به ترتیب یکی پس از دیگری قرار خواهند گرفت. در شکل 1 که نشانگر فاز A است، فاز B و C به ترتیب پس از آن قرار خواهند گرفت و یکی پس از دیگری روشن می شوند. شکل 2 مسیر عبور شار در استاتور و روتور را نشان می دهد. این مسیر برای فاز A نشان داده شده و برای فازهای B و C نیز به همین صورت می باشد. موتور شبیه سازی شده که به صورت 10/12 است دارای سرعت 586 دور بر دقیقه است. سایر مشخصات این موتور در جدول 1 و 2 آورده شده است. پارامترهای مربوط به شکل 1 نیز در جدول 2 آورده شده است. توزیع شار مغناطیسی در موتور سوئیچ رلوکتانسی شار محور در دو حالت هم راستا و غیر هم راستا با یک فاز در شکل 3 نشان داده شده است.

تکنیک های کاهش ریل گشتاور

روش های مختلفی برای کاهش ریل گشتاور در موتورهای سوئیچ رلوکتانسی وجود دارد که از میان آن ها دو روش ایجاد شیار (Notch) و Pairing بر روی موتور شبیه سازی شده پیاده سازی شده است.



شکل 1: پارامترهای هندسی



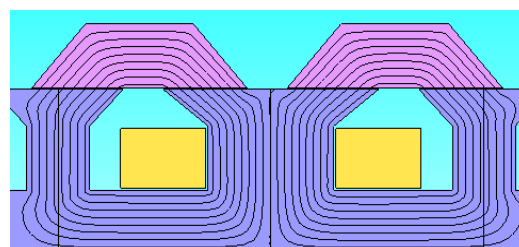
شکل 2: مسیر عبور شار مغناطیسی

ردیف	پارامتر	مقدار
1	No. of Phases	3
2	No. of Stator Poles/Modules	12
3	No. of Rotor Segments	10
4	Lamination Outer Diameter, D_o (mm)	2/216
5	Active Material Axial Length, L (mm)	8/63
6	Air-gap Length (mm)	3/0
7	Bore/Average Air-gap Diameter (mm)	6/170
8	Stator Wide Module Arc Pitch (deg)	5/30
9	Stator Narrow Module Arc Pitch (deg)	5/18
10	Rotor Segment Pitch (deg)	5/30
11	No. of Turns per Phase	548
12	Phase Resistance	57/2
13	Slot Fill Factor (%)	41
14	Estimated Turn Length (mm)	214
15	End Winding Length per Turn (mm)	123
16	Effective Wire Diameter (mm)	1

جدول 1: پارامترهای هندسی شکل 1

ردیف	پارامتر	مقدار
1	Stator Pole Pitch	mm 5/47
2	Rotor Pole Pitch	mm 5/54
3	Rotor Pole Arc	mm 48
4	Stator Wide Pole Arc	mm 48
5	Stator Narrow Pole Arc	mm 28
6	Slot Opening	mm 9
7	Stator Wide Pole Width	mm 28
8	Stator Narrow Pole Width	mm 14
9	Width of Stator Pole Tip	mm 18
10	Length of Stator Pole Base Part	mm 14

با توجه به این که روش های کاهش ریل بر روی مقدار گشتاور میانگین نیز تاثیر می گذارند و در اکثر این روش ها کاهش گشتاور به وجود می آید به همین دلیل باید یک مصالحه میان این دو صورت پذیرد.



شکل 3: توزیع شار مغناطیسی موتور در حالت هم راستا

ریل گشتاور در سرعت های پایین باعث ایجاد نوسانات سرعت خواهد شد. اصلاح ساختار روتور باید به گونه ای صورت گیرد که در نقاط اصلاح شده اشباع شار مغناطیسی صورت نگیرد زیرا هر چه مسیر شار باریک تر شود نه تنها رلوکتانس مغناطیسی افزایش می یابد بلکه احتمال اشباع شدن نیز افزایش خواهد یافت [6,8].

ایجاد شیار در روتور

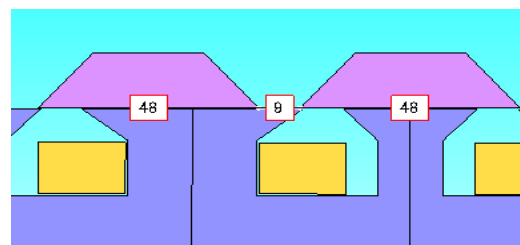
جدول 1: پارامترهای طراحی موتور 10/12

ردیف	پارامتر	مقدار
------	---------	-------

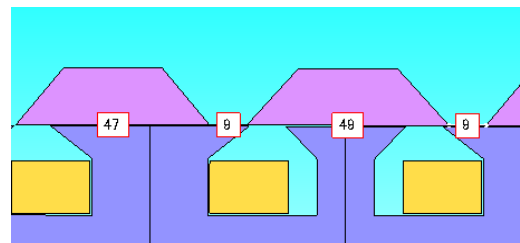
زیرا ممکن است با تغییر عرض روتور، تعادل مکانیکی ماشین از بین برود. یکی دیگر از شرایطی که برای استفاده از این روش نیاز است زوج بودن تعداد قطعات روتور است زیرا برای Pairing نمی‌توان از تعداد قطعات فرد استفاده کرد و باید تقارن در موتور رعایت گردد. در روش Pairing نیازی به تغییر ساختار در سایر بخش‌ها نیست و مقدار فاصله میان قطعات روتور (Slot Opening) ثابت خواهد ماند و تغییر نخواهد کرد. در شکل 5 می‌توان ساختار اصلی روتور بدون اعمال تغییر مشاهده کرد. در شکل 6 نیز ساختار روتور با روش Pairing و تغییر عرض روتور قابل مشاهده است. برای اعمال این روش بر روی موتور، تغییر ریل و مقدار میانگین گشتاور برای 5/0، 1 و 5/1 میلیمتر بررسی خواهد شد.

نتایج شبیه سازی

برای بررسی عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانسی و همچنین مقایسه نتایج حاصل از اعمال روش‌های کاهش ریل گشتاور با موتور در حالت اصلی، از نرم افزار شبیه ساز JMAG Designer استفاده شده است. برای استفاده از روش Notch نیاز است که ابتدا طول شیار و سپس عمق شیار انتخاب گردد. برای اینکار میزان ریل گشتاور و گشتاور میانگین برای 4 طول مختلف در جریان 20 آمپر با یک دیگر مقایسه می‌شود. نتایج این مقایسه در جدول 3 و شکل 8 نشان داده شده است. مقدار ریل گشتاور موتور در حالت اصلی برابر 223/1 و گشتاور میانگین آن برابر 487/79 نیوتن متر است.



شکل 5 : ساختار اصلی روتور بدون اعمال روش Pairing



شکل 6 : ساختار روتور با تغییر عرض روتور در روش Pairing

جدول 3: مقایسه ریل و میانگین گشتاور برای طول های مختلف

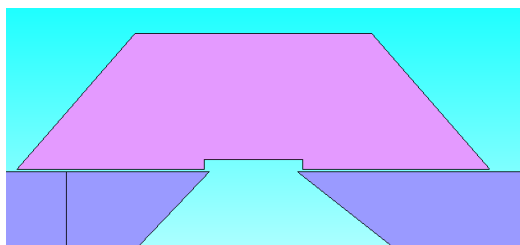
ردیف	طول (میلیمتر)	عمق (میلیمتر)	ریل گشتاور	متوسط گشتاور (نیوتن متر)
1	8	1	06498	36/77
			/1	

برای کاهش ریل گشتاور در موتور مورد نظر می‌توان با ایجاد یک سری شکاف بر روی روتور این امر را میسر ساخت. برای ایجاد شکاف بر روی سطح روتور می‌توان از شکاف های مستطیلی، دایره ای و ... بهره گرفت. با توجه به شبیه سازی های صورت گرفته بر روی موتور، شیارهای مستطیلی به عنوان راه کار برای کاهش ریل گشتاور انتخاب شده است. در شکل 4 می‌توان روتور طراحی شده با یک شیار در مرکز آن را مشاهده کرد. با توجه به این که ایجاد چند شیار مستطیلی بر روی روتور باعث ایجاد نقاط باریک بر روی روتور می‌شود و هنگام عبور شار مغناطیسی از این نواحی اشباع رخ خواهد داد، ترجیح داده شده که از یک شیار مستطیلی متقارن در مرکز سطح پایینی روتور استفاده شود. برای انتخاب بهینه طول و عمق شیار مستطیلی با استفاده از شبیه سازی و بررسی ریل و گشتاور این کار صورت خواهد گرفت. برای این کار ابتدا به بررسی طول شیار پرداخته می‌شود. پس از آن که طول مناسب برای شیار انتخاب شد، عمق بهینه ی شکاف با بررسی ریل گشتاور و مقدار گشتاور میانگین به دست خواهد آمد.

شبیه سازی های صورت گرفته برای 4 طول مختلف به اندازه های 8، 9، 10 و 11 میلیمتر در جریان 20 آمپر صورت گرفته و مناسب ترین طول انتخاب گردیده است. پس از آن که طول شیار انتخاب شد نیاز است عمق آن نیز به دست آید به همین علت شبیه سازی برای چند عمق مختلف از جمله 1 میلیمتر، 8/0 میلیمتر و ... صورت گرفته است. پس از انتخاب طول و عمق بهینه شیار می‌توان نتایج شبیه سازی بین موتور مورد نظر و حالت اصلاح شده آن را مقایسه کرد.

روش Pairing بر روی قطعات روتور

روش دومی که برای کاهش ریل گشتاور موتور مورد استفاده قرار گرفته، روش Pairing است. در این روش طول یک قطعه روتور افزایش یافته و به همان مقدار نیز طول قطعات کناری آن کاهش خواهد یافت.

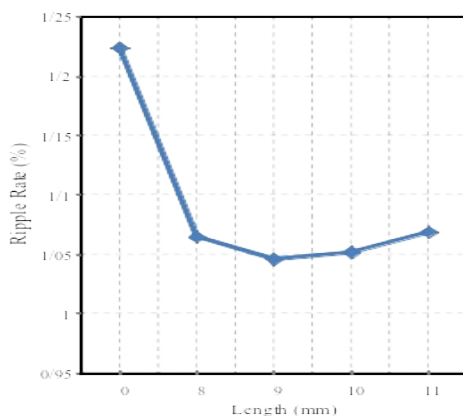


شکل 4: شیار مستطیلی بر روی سطح روتور

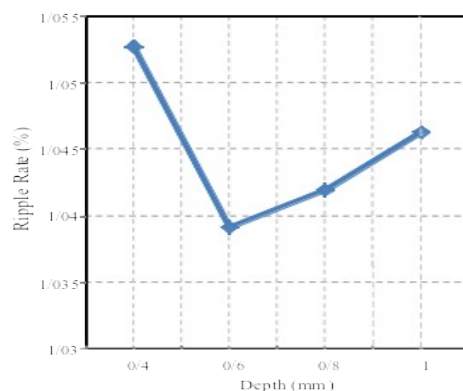
از آن جا که شکل موج گشتاور دندانه با عرض روتور، تغییر می‌کند به همین علت می‌توان با اصلاح ساختار روتور گشتاور را بهبود بخشید و ریل آن را کاهش داد. این روش به نسبت روش‌های دیگری که بر روی روتور اجرا می‌گردد کاربردی تر می‌باشد. از این روش برای کاهش ریل گشتاور می‌توان بهره گرفت ولی باید به تعادل مکانیکی ماشین توجه نمود

295/77	0463/ 1	1	9	2
067/77	05181 /1	1	10	3
819/76	06857 /1	1	11	4

با توجه به جدول 3 و شکل 7 می توان دریافت که کمترین میزان رپل گشتاور مربوط به طول 9 میلیمتر و بیشترین مقدار گشتاور میانگین مربوط به طول 8 میلیمتر است. با بررسی مقدار رپل گشتاور این دو، رپل گشتاور طول 9 میلیمتر، 1.75% از رپل گشتاور طول 8 میلیمتر کمتر است. مقدار گشتاور میانگین، طول 8 میلیمتر از طول 9 میلیمتر، 0.8% بیشتر است. با توجه به این مقایسه می توان دریافت که با طول 9 میلیمتر می توان رپل گشتاور را کاهش داد که این مقدار کاهش در برابر افت میانگین گشتاور آن ناچیز می باشد. به همین دلیل طول 9 میلیمتر برای شیار انتخاب شده است. برای انتخاب عمق شیار نیز می توان به بررسی رپل و میانگین گشتاور پرداخت تا بهینه ترین عمق انتخاب گردد. در شکل 8 می توان رپل گشتاور را به ازای عمق های مختلف مشاهده کرد.



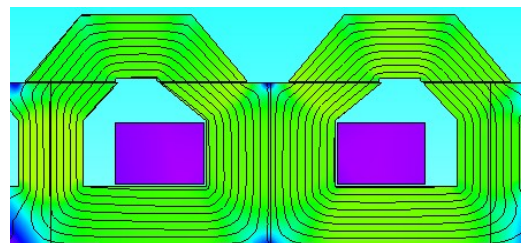
شکل 7: رپل گشتاور برای طول های مختلف به ازای جریان 20 آمپر



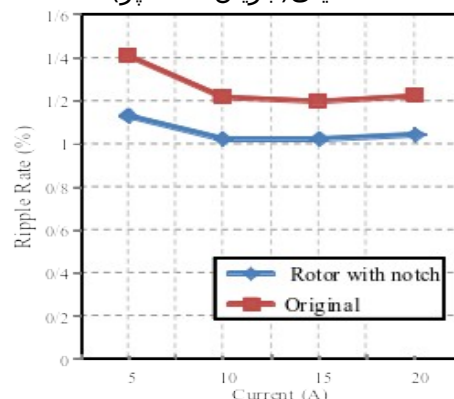
شکل 8: رپل گشتاور برای عمق های مختلف به ازای جریان 20 آمپر

با توجه به نتایج حاصل از بررسی طول و عمق شیار موجود در سطح قطعات روتور می توان بهینه

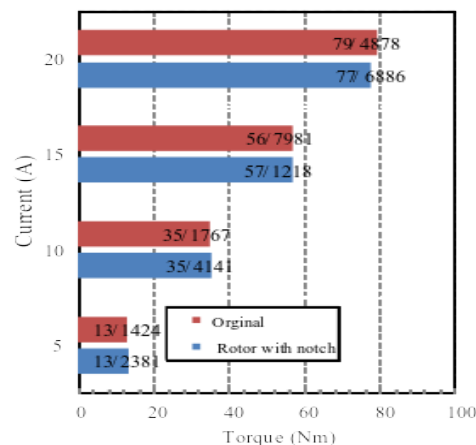
ترین ابعاد برای شیار را به دست آورد که عبارت است از طول 9 میلیمتر و عمق 0.6 میلیمتر. نحوه عبور شار مغناطیسی در قطعات روتور با وجود شیار در جریان 20 آمپر در شکل 9 نشان داده شده است. با توجه به انتخاب شیار مناسب برای روتور می توان رپل گشتاور و مقدار گشتاور موتور در حالت بدون شیار و با شیار را بررسی کرد. نتایج این بررسی در شکل های 10 و 11 نشان داده است. با توجه به شکل 11 می توان دریافت که گشتاور موتور که دارای شیار است در جریان های بیشتر با اندکی افت همراه است ولی در جریان های کمتر گشتاور بیشتری به نسبت حالت اولیه تولید خواهد نمود. در این روش برای قطعات روتور 3 اندازه انتخاب شده است که تاثیر آن ها بر روی عملکرد موتور مورد بررسی قرار می گیرد. تاثیر این روش بر روی میزان رپل گشتاور برای سه مقدار ذکر شده در شکل 12 آورده شده است.



شکل 9: مسیر عبور شار مغناطیسی با شیار مستطیلی (جریان 20 آمپر)

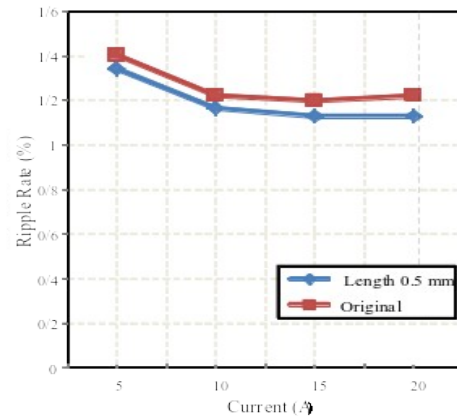


شکل 10: مقایسه رپل گشتاور روتور بدون شیار و شیاردار

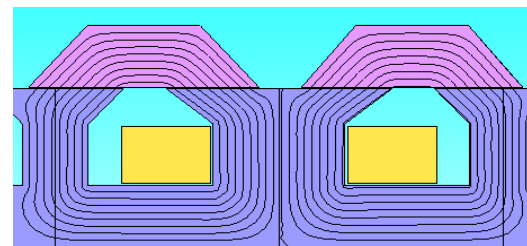


شکل 11: مقایسه گشتاور موتور بدون شیار و با شیار

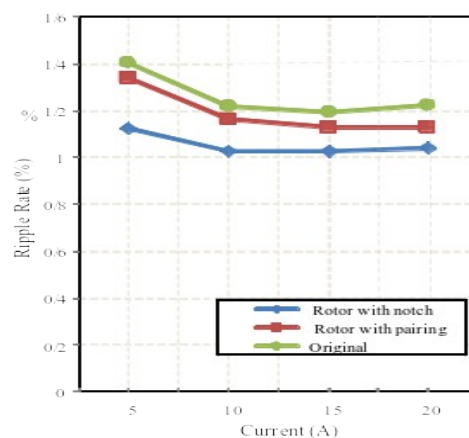
شکل 13: مقایسه گشتاور موتور در روش Pairing با گشتاور اصلی



شکل 14: مقایسه رپل گشتاور موتور در حالت اصلی و Pairing



شکل 15: عبور شار مغناطیسی در موتور اصلاح شده به روش Pairing

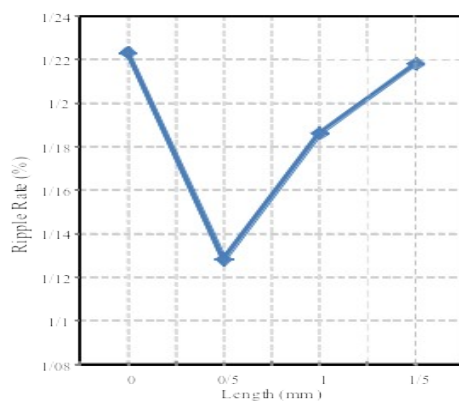


شکل 16: مقایسه رپل گشتاور موتور اصلاح شده به دو روش notch و pairing با حالت اصلی موتور

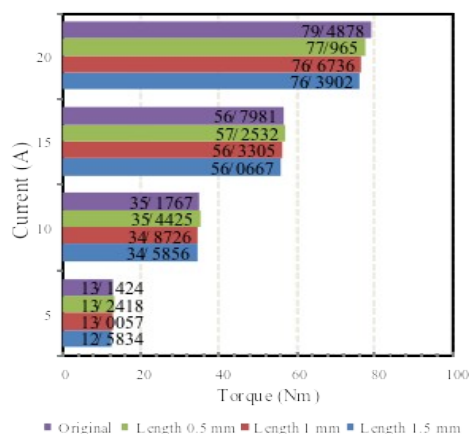
با توجه به شکل 12 می توان دریافت که بهترین طول برای تغییر روتور 5/0 میلیمتر است. زیرا با افزایش طول میزان رپل گشتاور نیز افزایش می یابد. تغییرات گشتاور بر حسب طول های مختلف در شکل 15 نشان داده شده است.

همان طور که در شکل 13 مشخص است گشتاور موتور در روش Pairing به ازای 5/0 میلیمتر در جریان های کمتر از 20 آمپر از گشتاور اصلی تا حدودی بیشتر است.

از سوی دیگر کاهش رپل گشتاور نیز به ازای 5/0 میلیمتر به نسبت رپل گشتاور اصلی برابر با 75/7 % است که نشان می دهد این روش برای موتور مورد نظر مناسب است و می تواند علاوه بر کاهش رپل گشتاور، گشتاور موتور را در همان مقدار اولیه حفظ کند. در شکل 14 مقایسه بین رپل گشتاور موتور در حالت اصلی و روش Pairing به ازای 5/0 میلیمتر نشان داده است. از شکل 14 می توان دریافت که هرچه جریان افزایش می یابد اختلاف رپل گشتاور به تدریج بیشتر می شود. لذا می توان از این روش برای جریان های بیشتر بهره برد. توزیع شار مغناطیسی درون موتور اصلاح شده با روش Pairing در شکل 15 نشان داده است. با توجه به این که در هر یک از روش های کاهش رپل گشتاور مقادیر بهینه به دست آمده، می توان رپل گشتاور را مقایسه کرد. مقایسه رپل گشتاور این دو مشخص می کند کدام یک تأثیر بیشتری بر روی کاهش رپل گشتاور و بهبود عملکرد موتور داشته است. در شکل 16 این مقایسه صورت گرفته است.



شکل 12: تغییرات رپل گشتاور بر اساس طول تغییر یافته روتور



نتیجه گیری

برای اصلاح ساختار موتور سوئیچ رلوکتانسی شار محور 10/12 که کاهش رپل گشتاور آن را به دنبال دارد از 2 روش notch و Pairing بهره گرفته شد. هر یک از این روش ها بر اساس رپل گشتاور و مقدار گشتاور مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با استفاده از این دو روش مسیر عبور شار مغناطیسی کاهش یافت. موتور اصلاح شده توسط این دو روش در جریان های مختلف شبیه سازی شده و نتایج آن ها به دست آورده شد. نتایج نشان داد که هر دوی این روش ها باعث کاهش رپل گشتاور شده اند و کاهش

مراجع و منابع

- [1] B. C. Mecrow, E. A. El-Kharashi, J. W. Finch and A. G. Jack, "Segmental rotor switched reluctance motors with single-tooth windings", IEE Proc-B, Vol. 150, No. 5, pp. 591–599, 2003.
- [2] B. C. Mecrow, E. A. El-Kharashi, J. W. Finch and A. G. Jack, "Preliminary Performance Evaluation of Switched Reluctance Motors with Segmental Rotors", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, pp. 679–686, 2004.
- [3] R. Madhavan and B. G. Fernandes, "A novel axial flux segmented SRM for electric vehicle application", in proc. International Conference on Electrical Machines, pp. 1–6, Rome, Italy, 6-8 September 2010.
- [4] A. Chiba, Y. Takano, M. Takeno, T. Imakawa, N. Hoshi M. Takemoto, and S. Ogasawara, "Torque density and efficiency improvements of a switched reluctance motor without rare-earth material for hybrid vehicles," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, no. 3, pp. 1240–1246, May/Jun. 2011.
- [5] M. Aydin, Z.Q. Zhu, and T.A. Lipo, "Minimization of Cogging Torque in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines: Design Concepts," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, no. 9, pp. 3614-3622, 2007.
- [6] L. Dosiek and P. Pillay, "Cogging torque reduction in permanent magnet machines," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 43, no. 6, pp. 1565–1571, 2007.
- [7] B.C. Mecrow, J.W. Finch, E.A. El-Kharashi, and A.G. Jack, "Switched reluctance motors with segmental rotors, ", IEE Proc. on Power Applications, vol. 149, issue:4, pp. 245-254, 2002.
- [8] BIANCHI N., BOLOGNANI S.: 'Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors', IEEE Trans. Ind. Appl., 2002, 38, (5), pp. 1259–1265.
- [9] KIM T.H., WON S.H., JU K.B., LEE J.: 'Reduction of cogging torque in flux-reversal machine by rotor teeth pairing', IEEE Trans. Magn., 2005, 41, (10), pp. 3964–3966.
- [10] FEI W., LUK P.C.K.: 'A new technique of cogging torque suppression in direct-drive permanent magnet brushless machines'. Proc. IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf., May 2009, pp. 9–16