

یک ساختار سگمندی دوگانه جدید برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس با قابلیت افزایش گشتاور

سیدرضا موسوی اقدم^۱ نیما الهی^۲ مجید حسین پور^۳

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران

r.mousaviaghdam@uma.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران

nima.elahi@student.uma.ac.ir

۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران

hoseinpour.majid@uma.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک ساختار جدید مغناطیسی برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس ارائه شده است. در این ساختار، هم استاتور و هم روتور دارای ساختار سگمندی هستند و شار مغناطیسی نمی تواند در دو سگمنت فرضی استاتور و یا روتور و نیز هر ترکیب احتمالی از آن ها جریان داشته باشد. ساختار سگمندی معرفی شده می تواند با تعداد فازهای مختلف و نیز تعداد سگمنت بر فازهای متفاوت در نظر گرفته شود که دارای اصول کاری یکسان هستند. در این مقاله، ساختار سه فاز و با تعداد چهار سگمنت استاتور و روتور بر هر فاز انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی، ساختار مغناطیسی با استفاده از روش المان محدود شبیه سازی و نتایج حاصل از آن استخراج شده است. در ابتدا، تحلیل حساسیت برای بررسی مهم ترین پارامترهای هندسی و اثر آن ها صورت گرفته و سپس مشخصات مختلف موتور سوئیچ رلوکتانس مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه، موارد طراحی موتور پیشنهادی آورده شده است. با توجه به داده های شاخص گشتاور بر وزن فعال بدست آمده از ساختار پیشنهادی در مقایسه با سایر ساختارهای مشابه، ساختارهای سگمندی پیشنهادی دارای بالاترین گشتاور در بین ساختارهای دیگر موتورهای سوئیچ رلوکتانس هستند. به علاوه، نتایج استاتیکی و دینامیکی در شرایط مختلف بار بر عملکرد مناسب موتور سگمندی پیشنهادی صحت می گذارد. همچنین به دلیل ضربه های گشتاور زیاد در واحد دور، ساختار پیشنهادی برای کاربردهای سرعت پایین و گشتاور بالا انتخاب مناسبی است.

واژه های کلیدی: موتور سوئیچ رلوکتانس، ساختار سگمندی، افزایش گشتاور، روش المان محدود

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.163

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶

نام نویسنده ی مسئول: دکتر سیدرضا موسوی اقدم

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - اردبیل - خیابان دانشگاه - دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده ی فنی و مهندسی - دپارتمان مهندسی برق

۱- مقدمه

دارد، سازنده در ساخت این نوع موتور با چالش‌های بیشتری روبرو بوده است.

ذکر این نکته ضروری است که موتورهای سوئیچ رلوکتانس به موتورهایی با گشتاور بالا و هزینه ساخت پایین نسبت به موتورهای القائی مشهور هستند. موتور سوئیچ رلوکتانس متداول نیز خود موتوری با گشتاور بالا به حساب می‌آید. از طرف دیگر، افزایش گشتاور در ساختارهای جدید بیانگر پتانسیل بالای این موتور در تولید گشتاور است. در ساختارهای هیبریدی، از مغناطیس دائم جهت بهبود مسیر شار در دندانه‌های استاتور استفاده می‌شود [۹-۱۰]. لازم به ذکر است که از این نوع ساختارها در محرکه خودروهای برقی/هیبریدی نیز استفاده شده است [۱۱]. علاوه بر ساختار با دو استاتور سگمندی، موتور سوئیچ رلوکتانس با دو روتور سگمندی نیز مطرح شده که از ویژگی‌های آن می‌توان به گشتاور و چگالی توان بالا اشاره کرد [۱۲]. موتورهای سوئیچ رلوکتانس با روتور سگمندی دارای ساختارهای میدان محوری نیز هستند که در آن مسیر شار با هسته E شکل کوتاه شده است [۱۳].

در موتورهای سوئیچ رلوکتانس سگمندی تعداد سگمنت‌های روتور و یا تعداد سگمنت‌های استاتور نیز حائز اهمیت است. به طوری که تعداد سگمنت‌های بیشتر در روتور نسبت به استاتور شامل مزیت‌هایی است [۱۴-۱۵] که از آن جمله می‌توان به چگالی جریان پایین در سرعت‌های پایین اشاره کرد. با این وجود، برای کاربردهای سرعت بالا، تعداد سگمنت‌های روتور بهتر است از استاتور کمتر باشد [۱۶].

به طور کلی موتورهای سوئیچ رلوکتانس با روتور سگمندی، به طور خاص، به دلیل تولید گشتاور بیشتر نسبت به ساختار متداول این موتور بیشتر مورد توجه محققان است. یک دلیل مهم این طور ذکر شده است که در ساختارهای سگمندی، هر سیم‌پیچ به دلیل کوتاهی مسیر شار قادر خواهد بود که شار مغناطیسی بیشتری را تولید نماید [۱۷-۱۸]. یکی از انواع معروف ساختار روتور سگمندی، ساختار ۱۲/۸ با این توضیح است که در آن از ۱۲ دندانه استاتور در مقابل ۸ سگمنت جدا از هم روتور استفاده شده است. این ساختار روتور سگمندی خود دارای انواع مختلفی است که از آن جمله می‌توان به ساختار با یک ردیف از سگمنت‌های جدا از هم در روتور و دو نوع قطب تحریک و کمکی در استاتور اشاره کرد [۱۹-۲۰]. لازم به ذکر است که در این ساختار، قطب کمکی سیم‌پیچی نشده و فقط برای ایجاد مسیر برگشت شار طراحی شده است. از بررسی‌ها چنین برمی‌آید که با افزایش تعداد دندانه‌ها در موتورهای سوئیچ رلوکتانس مرسوم، مقدار نویز نیز کاهش یافته است [۲۱]. این مورد در موتورهای سوئیچ رلوکتانس سگمندی نیز می‌تواند قابل تعمیم باشد. با این حال، با استفاده از برخی روش‌های کنترلی نیز می‌توان نویز را تا حد امکان کاهش داد [۲۲-۲۳].

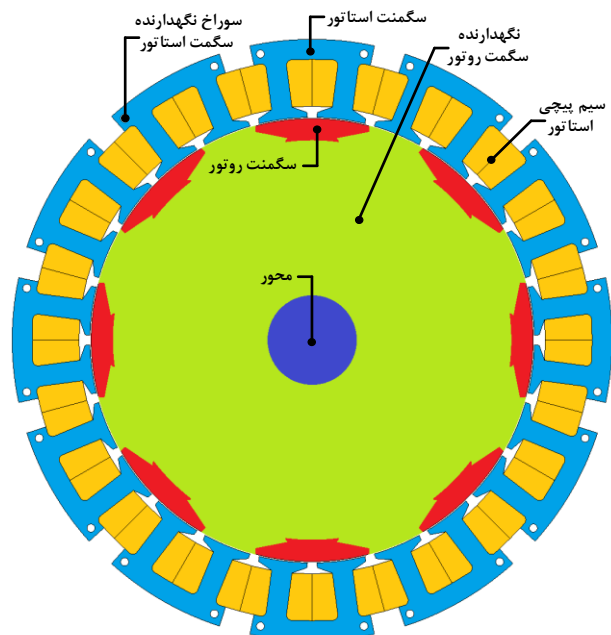
برای ساختارهای سگمندی کاربردهای متنوع نیز مطرح است. برای مثال، موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور سگمندی جهت استفاده در خنک‌کاری رادیاتور در موتور سوختی نیز طراحی و ساخته شده است.

امروزه با گسترش نیاز صنعت به ماشین‌های الکتریکی، انواع ماشین‌های الکتریکی مورد توجه صنعت کاران قرار گرفته اند که از این میان موتورهای سوئیچ رلوکتانس به دلیل هزینه ساخت پایین، قابلیت اطمینان بالا، کارکرد کم سروصدا و همچنین هزینه نگهداری پایین در کاربردهای مقیاس بالا از محبوبیت زیادی برخوردار هستند.

در میان موتورهای سوئیچ رلوکتانس، ساختارهای متداول روتور و استاتور دندانه‌ای از ساده‌ترین نوع این موتورهاست ولی این نوع موتورها در تولید گشتاور مطلوب نتوانستند انتظارات را برآورده کنند. به همین منظور برای بهبود ساختار این موتورها ساختارهای متنوعی مطرح شده است. در این میان، ساختارهای سگمندی نسبت به سایر ساختارها، گشتاور و عملکرد بهتری را از خود نشان داده اند. سگمنت‌های این ساختارها می‌توانند به صورت ردیف‌هایی از سگمنت استاتور و یا سگمنت روتور و یا ترکیبی از هر دو در ساختار مغناطیسی ماشین واقع شوند. از این نظر، موتورهای سوئیچ رلوکتانس سگمندی دارای ساختارهای متفاوت هستند. برای مثال، در موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور سگمندی معرفی شده در [۱] ساختار E شکل هسته باعث صرفه جویی ۴۵ درصدی در مصرف آهن شده و طراحی مسیر عبور شار کوتاه باعث تولید گشتاور بالا شده است. دلیل این موضوع این نکته است که در مسیر شار کوتاه‌تر، نیروی محرکه مغناطیسی کمتر و لذا تلفات پایین‌تر برای برقراری شار مورد نیاز است [۲]. ساختارهای سگمندی می‌توانند به صورت روتور درونی و بیرونی نیز مطرح شوند. در [۳] یکی از ساختارهای روتور بیرونی بهینه شده با استفاده از روش المان محدود با نوع متداول این موتور مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعات پژوهشی نشان می‌دهد که ساختار سگمندی موتور سوئیچ رلوکتانس بر پارامترهای مهمی نظیر راندمان، محدوده سرعت و قابلیت بارگذاری موتور تأثیر عمده و در بسیاری موارد مثبت داشته است [۴]. موتورهای سوئیچ رلوکتانس به طور معمول دارای ریل گشتاور خروجی هستند که در مقایسه با موتورهای مغناطیس دائم یک ضعف به حساب می‌آید ولی برای کاربردهایی که حساسیت زیادی به ریل گشتاور ندارند یک جایگزین مطمئن از نظر کارایی و نیز قیمت تمام شده است [۵]. از ساختارهای دیگر موتورهای با استاتور سگمندی می‌توان ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس با دو استاتور سگمندی [۶-۸] و همچنین ساختار با استاتور سگمندی هیبرید را نام برد. بطور کلی ساخت موتورهای سوئیچ رلوکتانس سگمندی همراه پیچیدگی‌های مکانیکی می‌باشد، چراکه تکه‌های جدا از هم هسته باید به شکل منظمی در کنار هم چیده شوند تا فاصله هوایی در موتور در تمام نقاط به یک اندازه باشد و همچنین در قسمت هسته روتور علاوه بر پایداری ساختمان هسته، تعادل در نیروهای مغناطیسی شعاعی و مهار کردن هسته در برابر این نیروها را نیز در نظر گرفت. به همین دلیل، در مقایسه با ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس متداول که هسته یکپارچه

تلفات هسته و همچنین برای افزایش راندمان ماشین در نظر گرفته می‌شود. تعداد فازها در ماشین سوئیچ رلوکتانس می‌تواند وابسته به تعداد سگمنت‌های آن باشد. از طرفی باید موضوع فرکانس کلیدزنی در درایو موتور را در نظر گرفت. باید توجه داشت که فرکانس کلیدزنی با



شکل (۱): ساختار کلی موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی

افزایش تعداد فازها افزایش می‌یابد. به هر حال، در کاربردهای سرعت پایین این موضوع کمتر حائز اهمیت است و طراح محدودیت‌های کمتری در طراحی دارد. بنابراین، ضریب K برای حداقل تعداد قطب استاتور برابر ۲ می‌باشد. در این ساختار با توجه به سه فاز بودن ماشین K برابر ۴ است.

در موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی سیم‌پیچی‌ها بر روی هر دو بازوی سگمنت‌ها قرار داده شده است. در موتور پیشنهادی، هر چهار سگمنت استاتور با اختلاف زاویه ۹۰ درجه تشکیل یک فاز از موتور را می‌دهند. برای نمایش بهتر ساختار سیم‌پیچی فاز، شکل (۲) به نمایش جزئیات آن می‌پردازد. همانطور که در شکل نشان داده شده، جهت سیم‌پیچی روی هر دو سگمنت استاتور از همدیگر متفاوت است. در غیر اینصورت، ممکن است شار بر حسب موقعیت محور روتور از طریق سگمنت‌های میانی واقع بین دو سگمنت مجاور یک فاز مسیر خود را ببندد. به بیان دیگر، دلیل انتخاب این آرایش جلوگیری از نشت شار سیم‌پیچ‌های واقع بر روی هر سگمنت فرضی استاتور ماشین است که تا حد زیادی شار پراکندگی سیم‌پیچ سگمنت‌های استاتور را کاهش می‌دهد.

سگمنت‌های روتور در ساختار پیشنهادی روی یک نگه‌دارنده غیرمغناطیسی کار گذاشته می‌شوند، چرا که باید از نشت شار عبوری بین سگمنت‌های استاتور مجاور هم جلوگیری شود. همچنین هیچ مسیر شاری بین سگمنت‌های روتور نیز وجود ندارد. این سگمنت‌ها بر

[۲۴]. به طور کلی، اصول عملکردی و ویژگی‌های ساختاری موتورهای سگمندی با یک موتور سوئیچ رلوکتانس متداول قابل مقایسه است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که ساختارهای سگمندی می‌تواند گشتاور خروجی بالاتری را نسبت به ساختارهای مرسوم تولید کند. علاوه بر آن، در ساختارهای سگمندی با در نظر گرفتن نیرو محرکه مغناطیسی یکسان، تعداد دورهای سیم‌پیچی در هر فاز حدود ۲۰٪ کاهش پیدا کرده است. همچنین، راندمان این موتورهای سگمندی بیشتر از موتور سوئیچ رلوکتانس متداول است. اگرچه ساخت موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور سگمندی اندکی در مقایسه با موتور سوئیچ رلوکتانس متداول دشوارتر می‌نماید اما با مزیت‌های مختلفی که این ساختارها دارند قابل اغماض است.

در این مقاله، یک ساختار جدید برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس سگمندی با قابلیت تولید گشتاور بالا معرفی شده است. در این موتور پیشنهادی، هم استاتور و هم روتور دارای ساختار سگمندی هستند. در این ساختار، با توجه به توپولوژی معرفی شده و با طراحی دقیق ابعاد هسته نسبت به ساختارهای مشابه و تحلیل حساسیت پارامترهای مهم هندسی که در گشتاور تولیدی موتور تاثیرگذار هستند، شاخص مهم گشتاور بر وزن در مقایسه با ساختارهای دیگر تا حد زیادی بهبود یافته است.

بخش دوم به معرفی کامل ساختار پیشنهادی و درایو آن می‌پردازد. طراحی اولیه موتور و بررسی آن به روش المان محدود در بخش سوم مقاله آورده شده است. تحلیل حساسیت نیز در این بخش گنجانده شده است. بخش چهارم به موارد طراحی مغناطیسی موتور با ساختار پیشنهادی پرداخته و بخش پنجم به تحلیل نتایج و بحث می‌پردازد. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ششم پایان‌بخش این مقاله است.

۲- معرفی موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی

در این قسمت ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی تشریح می‌شود. این ساختار پیشنهادی می‌تواند با تعداد فازهای مختلف طراحی گردد که همگی دارای اصول کاری یکسان هستند و در این مقاله نوع سه فاز آن که معمول‌تر هست، معرفی می‌گردد. برخلاف سایر ساختارهای سگمندی این موتور، در ساختار پیشنهادی هم استاتور و هم روتور سگمندی هستند. شکل (۱) ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی را نمایش می‌دهد. در نوع سه فاز از این ساختار، موتور دارای ۱۲ سگمنت در استاتور و ۸ سگمنت در روتور است. به طور کلی برای تعداد قطب‌های استاتور و سگمنت‌های روتور داریم:

$$M = KQ \quad (1)$$

$$N = M - K \quad (2)$$

که در آن M تعداد قطب‌های استاتور، N تعداد سگمنت‌های روتور، Q تعداد فاز و K ضریب ثابت و عدد زوجی است. این ضریب برای کاهش

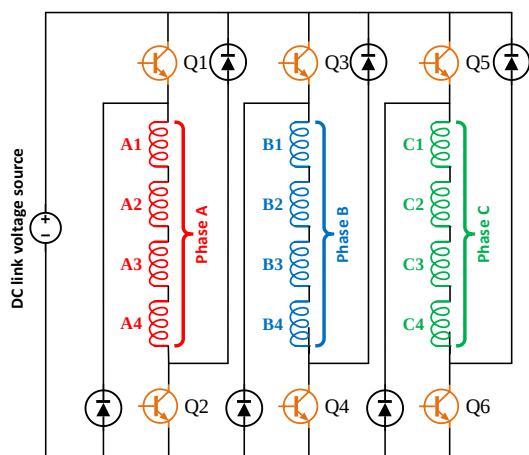
که در آن R و L مقاومت و اندوکتانس سیم پیچی فاز و ω سرعت محور موتور است. اگر فرض کنیم که موتور وارد ناحیه اشباع نمی شود و در نتیجه اندوکتانس تنها تابع موقعیت محور است، در آن صورت گشتاور تولیدی هر فاز با مجذور جریان و تغییرات اندوکتانس رابطه مستقیم دارد که از رابطه (۴) بدست می آید.

$$T_{ph}(\theta, i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (4)$$

معادله (۴) بیانگر آن است که بهبود تغییرات اندوکتانس در موتور سوئیچ رلوکتانس تأثیر مستقیمی بر روی گشتاور خواهد داشت. به علاوه، توان دوم جریان در معادله نشانگر آن است که گشتاور فاز بستگی به جهت جریان ندارد و این به نوبه خود می تواند امتیاز مهم محسوب شده و باعث ساده تر شدن مدار درایو گردد. گشتاور کلی موتور از مجموع گشتاور تولیدی هر فاز محاسبه خواهد شد که در معادله (۵) آورده شده است.

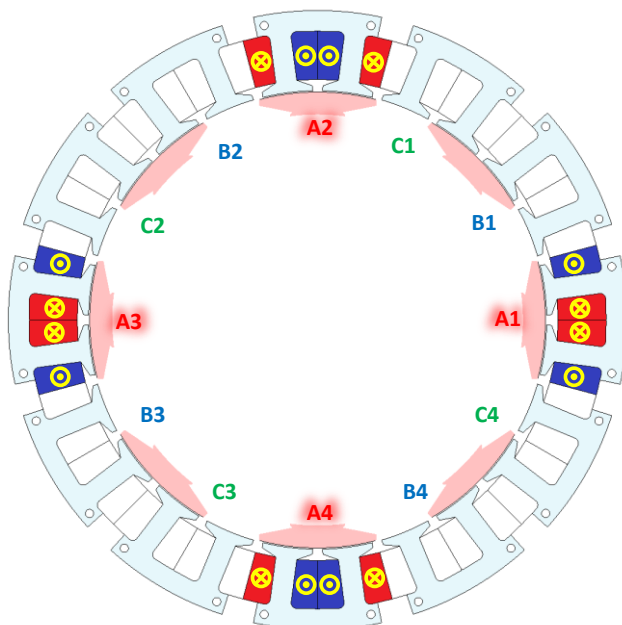
$$T_{Total} = \sum_Q T_{ph}(\theta, i) \quad (5)$$

موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی می تواند توسط هر کدام از مدل های مختلف مورد استفاده در این نوع از موتورها به کار گرفته شود. در این مقاله که جنبه طراحی موتور پیشنهادی مورد تأکید است، مدل مرسوم پل نامتقارن^۱ برای درایو موتور انتخاب شده است. شکل (۳) نحوه قرارگیری سیم پیچی فازهای مختلف موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی را در مدار درایو نشان می دهد. هر چهار سیم پیچ سگمنت های مربوط به یک فاز با هم به طور سری قرار می گیرند. باتوجه به ولتاژ و جریان نامی، می توان سیم پیچ ها را به صورت ترکیب سری و یا موازی قرار داد. در شکل (۳)، کلیدهای Q_1 و Q_2 ، به عنوان مثال، برای کنترل فاز A عمل می کنند که باتوجه به راه کار تعریف شده حالت کلیدزنی نرم و یا سخت^۲ برای موتور پیشنهادی قابل اجرا است. باتوجه به ساختار موتور پیشنهادی، عملکرد این مدل به گونه ای است که در هر ۱۵ درجه چرخش روتور یک فاز از موتور را به منبع ولتاژ متصل می کند و این عمل برای هر دو فاز دیگر به ترتیب اتفاق می افتد تا یک دوره تناوب ۴۵ درجه ای طی شود.



شکل (۳): مدار درایو برای موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی

خلاف دیگر ساختارها نیازی به داشتن عمق زیاد ندارند و جهت بستن مسیر شار هر سگمنت فعال طراحی می شوند. این موضوع در کاهش مواد مغناطیسی هسته به طور کلی مؤثر است.



شکل (۲): نمایش جزئیات سیم پیچی یک فاز از موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی

نوع هسته در ساختار ماشین با توجه به ارتباط چگالی شار مغناطیسی با توان الکترومکانیکی تبدیل شده در ماشین انتخاب می شود. در هسته مورد نظر باید ماکزیمم چگالی شار اشباع از مقدار اشباع قابل تحمل ماده مغناطیسی کمتر باشد تا تلفات آهن و جریان مغناطیس کنندگی کاهش یابد. البته باید توجه داشت که در موتور های سوئیچ رلوکتانس این موضوع باید قدری بازبینی شود چرا که در این نوع از موتورها به طور معمول هسته تاحدی وارد ناحیه اشباع می شود.

۳- معادلات ولتاژ و گشتاور

معادله ولتاژ هر فاز از موتور را می توان به صورت معادله (۳) مشخص کرد. طبق این معادله، ولتاژ هر فاز از موتور وابسته به تغییرات شار پیوندی است که خود تابعی از موقعیت روتور و جریان سیم پیچی است. این موضوع باعث غیرخطی شدن معادله می شود. در معادله (۳) عبارت سوم بیانگر نیروی ضدمحرکه است که ضریب آن علاوه بر مقدار شار سیم پیچی یا جریان، همانند سایر موتورها، به تغییرات اندوکتانس نسبت به موقعیت بستگی دارد.

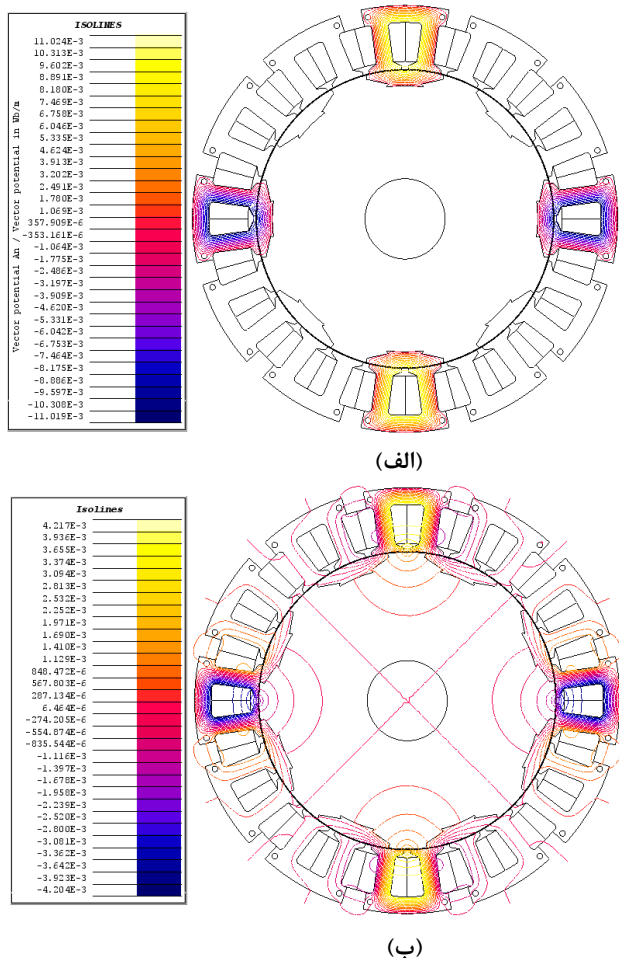
$$V_{ph} = iR + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (3)$$

$$= iR + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} = iR + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL}{d\theta}$$

۴- تحلیل اولیه با استفاده از روش المان محدود

در این بخش، ساختار پیشنهادی موتور سوئیچ رلوکتانس با استفاده از روش المان محدود^۲ از نظر مغناطیسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای ساختار اولیه موتور پیشنهادی در جدول (۱) آورده شده است. در ابتدا، با استفاده از تحلیل استاتیکی بر روی یک فاز از موتور، خطوط شار میدان مغناطیسی در حالت هم‌خط و غیرهم‌خط استخراج شده و در شکل (۴) نمایش داده شده است. همانگونه که در شکل (۴) مشخص است، جهت سیم‌پیچی در هر دو سگمنت متوالی، متفاوت است. این موضوع روی خطوط شار مغناطیسی در وضعیت هم‌خط تقریباً بی تأثیر است اما اگر جهت سیم‌پیچی سگمنت‌های استاتور تغییر یابد روی خطوط شار مغناطیسی در وضعیت غیرهم‌خط اثرگذار خواهد شد. تغییرات خطوط شار و در نتیجه شار فاز موتور در دو وضعیت هم‌خط و غیرهم‌خط به طور مستقیم روی ظرفیت تبدیل انرژی و در نهایت گشتاور موتور اثر می‌گذارد که در بخش‌های بعدی بیشتر به آن اشاره خواهد شد.

در ادامه، چگالی شار مغناطیسی سگمنت‌های موتور پیشنهادی در دو وضعیت هم‌خط و غیرهم‌خط در شکل (۵) به نمایش گذاشته شده است. چگالی شار بیشینه در دندان سگمنت برابر ۱/۹ تسلا است و هسته اندکی وارد ناحیه اشباع شده است. باید توجه داشت که در موتورهای سوئیچ رلوکتانس جریان نامی بعد از طراحی مناسب موتور، هسته را در وضعیت هم‌خط به نقطه بالای اشباع می‌رساند. هرچند فاز موتور معمولاً در وضعیت نزدیک به حالت غیرهم‌خط روشن نمی‌شود



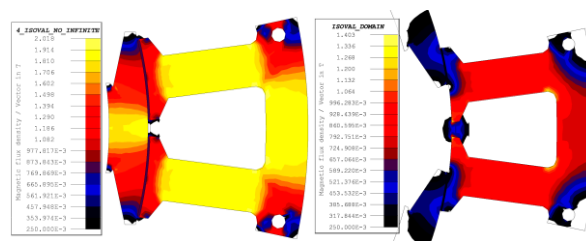
شکل (۴): خطوط شار میدان مغناطیسی فاز موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی در وضعیت‌های (الف) هم‌خط و (ب) غیرهم‌خط

جدول (۱): پارامترهای موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی

پارامتر	مقدار
طول موتور	۱۵۰ میلی‌متر
قطر خارجی موتور	۱۵۰ میلی‌متر
طول فاصله هوایی	۰/۳ میلی‌متر
قطر فاصله هوایی	۱۱۰/۸ میلی‌متر
قطر داخلی سگمنت استاتور	۱۱۱/۱ میلی‌متر
قطر خارجی سگمنت استاتور	۱۵۰ میلی‌متر
قطر داخلی سگمنت روتور	۹۹/۴ میلی‌متر
قطر خارجی سگمنت روتور	۱۱۰/۵ میلی‌متر
قطر سوراخ سگمنت استاتور	۲ میلی‌متر
تعداد سگمنت‌های استاتور	۱۲
تعداد سگمنت‌های روتور	۸
تعداد دور فاز	۴۰۰
توان و سرعت نامی اولیه	۰/۹ کیلووات، ۲۰ دور بر ثانیه
جنس هسته	M250-35a

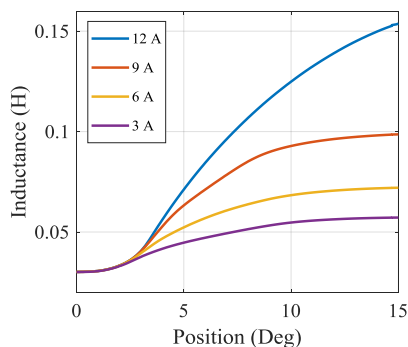
مقدار چگالی شار و در نتیجه شار کلی، همانگونه که اشاره شد، روی تولید گشتاور اثرگذار است. یکی از نمودارهای مهم در بررسی موتورهای سوئیچ رلوکتانس نمودار گشتاور فاز به ازای جریان‌های مختلف است. این نمودار در شکل (۶) نشان داده شده است. باتوجه به معادله (۴) و نیز فرض تغییرات ثابت اندوکتانس، جریان فاز مناسب براساس شکل (۶) قابل استخراج است با این توضیح که تغییرات گشتاور در ناحیه غیراشباع با توان دوم جریان متناسب است. مقایسه توانایی تولید گشتاور در ازای جریان‌های یکسان کافی نیست. دلیل این موضوع عدم توجه به تلفات مسی و در نتیجه بازده موتور در این تحلیل است. بنابراین، برای مقایسه بهتر، تولید گشتاور در ازای توان تلفاتی مسی نیز باید مورد توجه واقع شود. شکل (۷) نمودار گشتاور فاز را به ازای توان تلفاتی مس مختلف نشان می‌دهد. تغییرات اندوکتانس رکن بعدی در تولید گشتاور موتورهای سوئیچ رلوکتانس محسوب می‌شود. این تغییرات علاوه بر وابستگی مستقیم با توپولوژی موتور به نقطه کار فاز موتور نیز شدیداً وابسته است. شکل (۸) تغییرات اندوکتانس فاز را برای موتور با ساختار پیشنهادی نشان می‌دهد.

و یا شعاع فاصله هوایی پارامترهای هندسی اصلی هستند که با توان خروجی در ارتباط نزدیک هستند. علاوه بر این پارامترها، پارامترهای هندسی دیگری نیز هستند که می‌توانند بر روی عملکرد خاص موتور تأثیرگذار باشند. در ساختار پیشنهادی، این پارامترهای فرعی بررسی شده و مهم‌ترین آن‌ها که بر قدرت تولید گشتاور تأثیر دارند، انتخاب شده‌اند. با تحلیل حساسیت پارامترهای یادشده، اثر آن‌ها بیشتر مورد

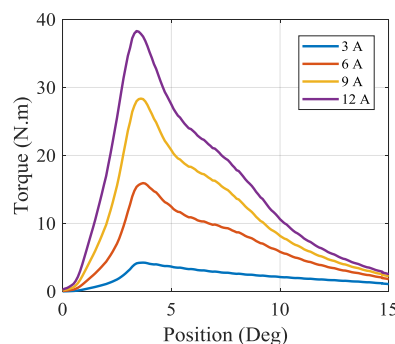


(الف) (ب)

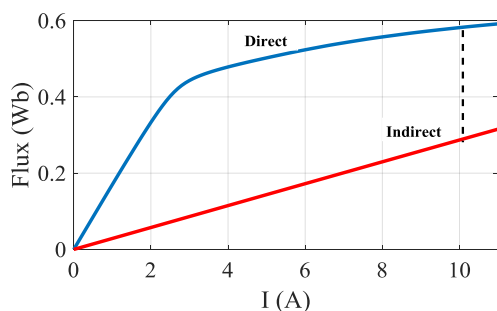
شکل (۵): چگالی شار مغناطیسی سگمنت‌های استاتور و روتور در موتور پیشنهادی در وضعیت‌های (الف) هم‌خط و (ب) غیرهم‌خط



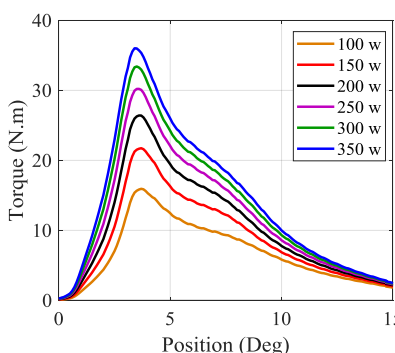
شکل (۸): تغییرات اندوکتانس فاز موتور پیشنهادی



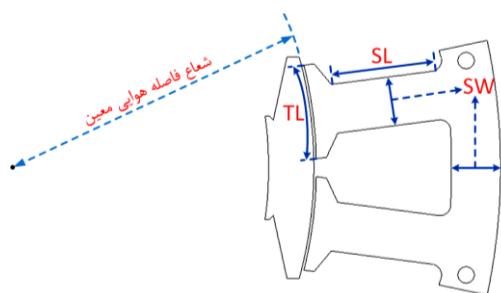
شکل (۶): گشتاور فاز موتور پیشنهادی در جریان‌های مختلف



شکل (۹): مشخصه شار-جریان موتور با ساختار پیشنهادی



شکل (۷): گشتاور فاز موتور پیشنهادی در تلفات مسی مختلف



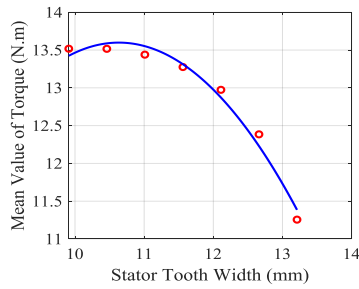
شکل (۱۰): نمایش پارامترهای هندسی مهم ساختار پیشنهادی در شعاع فاصله هوایی معین

بررسی قرار می‌گیرد. در ساختار پیشنهادی، این پارامترهای فرعی طول سگمنت استاتور، عرض سگمنت استاتور و عرض دندانه استاتور هستند. همچنین در سگمنت روتور می‌توان عرض این سگمنت را به جای عرض دهانه استاتور در نظر گرفت که به تغییرات مشابه منجر می‌شود. بنابراین، در این بررسی، عرض سگمنت روتور ثابت فرض شده تا همه تغییرات روی سگمنت استاتور اعمال شود. شکل (۱۰) پارامترهای هندسی یادشده را نشان می‌دهد.

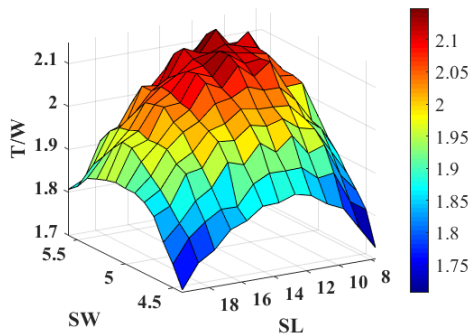
به عنوان گام پایانی این بخش، مشخصه شار-جریان فاز موتور پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق معمول در موتورهای سوئیچ رلوکتانس، مشخصه شار-جریان در دو وضعیت هم‌خط و غیر هم‌خط به دست آمده و ظرفیت تولید انرژی و در نتیجه گشتاور موتور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مساحت بین دو منحنی در مقدار جریان معین این ظرفیت را نشان می‌دهد. نمودار اولیه شار-جریان موتور با ساختار پیشنهادی در شکل (۹) آورده شده است.

۵- تحلیل حساسیت و موارد طراحی

در این بخش، ابتدا تحلیل حساسیت پارامترهای هندسی فرعی و در ادامه، چارچوب کلی طراحی موتور با ساختار پیشنهادی ارائه می‌شود. در طراحی هندسی ماشین‌های الکتریکی طول موتور و نیز قطر بیرونی



شکل (۱۲): حساسیت گشتاور به تغییرات زاویه دندانه استاتور



شکل (۱۳): تحلیل حساسیت تغییرات طول و عرض سگمنت استاتور

برای محاسبه توان خروجی موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی برحسب پارامترهای طراحی، یک فاز از آن در نظر گرفته شده و فرض می‌شود که در فاز آن جریان نامی برقرار است. به این طریق، حاصل ضرب ولتاژ اعمالی به فاز در جریان نامی توان را به دست خواهد داد. معادله ولتاژ برحسب شار پیوندی هر سگمنت استاتور، ψ_s ، به صورت زیر است:

$$V_{ph} = R_{ph} i_{ph} + 4 \frac{d\psi_s(i_{ph}, \theta)}{dt} \quad (6)$$

تغییرات شار پیوندی سگمنت در بین موقعیت هم‌خط و غیرهم‌خط مدنظر است که در موتور پیشنهادی ۱۵ درجه بوده و در این جا، برای سادگی معادلات این تغییرات خطی فرض شده و از افت ولتاژ مقاومت فاز صرف‌نظر می‌شود:

$$V_{ph} = \frac{4\omega}{TL} [\psi_{s(aligned)} - \psi_{s(unaligned)}] \\ = \frac{4\omega}{TL} i_{ph} [L_{s(aligned)} - L_{s(unaligned)}] \quad (7)$$

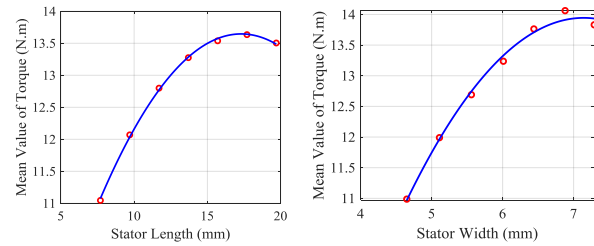
اندوکتانس سیم‌پیچ سگمنت در حالت غیرهم‌خط تقریباً ثابت است اما در حالت هم‌خط به شکل منحنی اشباع ماده سگمنت وابسته است که با تعریف ضریب جنس هسته، ξ_a ، به صورت زیر در جریان نامی نوشته می‌شود:

$$\xi_a = \frac{L_{s(aligned)}}{L_{s(unaligned)}} \Big|_{i_{ph} = \text{nominal}} \quad (8)$$

با جاگذاری در معادله (۷) و در نظر داشتن فلوی سگمنت، ϕ_s ، داریم:

$$V_{ph} = \frac{4\omega}{TL} (1 - 1/\xi_a) i_{ph} L_{s(aligned)} = \frac{\omega}{TL} (1 - 1/\xi_a) \phi_s N_{ph} \quad (9) \\ = \frac{1}{2} \omega (1 - 1/\xi_a) B D_m L_m N_{ph}$$

باتوجه به شکل (۱۰)، عرض سگمنت استاتور با عرض آهن پشت استاتور و به طور کلی عرض مسیر شار سگمنت‌ها برابر در نظر گرفته می‌شود تا چگالی شار مغناطیسی یکنواخت و از اشباع جلوگیری گردد. در ادامه تحلیل حساسیت پارامترهای یادشده صورت می‌گیرد. نکته حائز اهمیت این است که تغییرات هر پارامتر در مقادیر ثابت سایر پارامترها اتفاق افتاده است. در شکل (۱۱) اثرات تغییرات طول و عرض سگمنت استاتور، SL و SW، بر گشتاور متوسط موتور نمایش داده



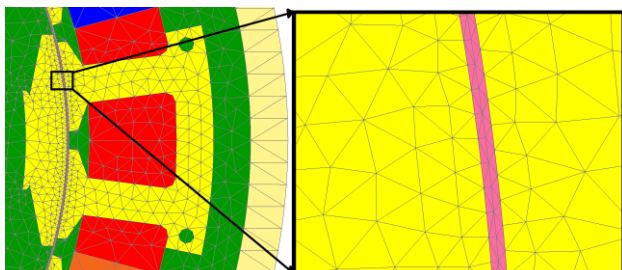
شکل (۱۱): حساسیت گشتاور به (الف) طول (SL) و (ب) عرض (SW) سگمنت استاتور با فرض ثابت بودن پارامترهای اصلی و تغذیه

شده‌است. باتوجه به شکل، طول سگمنت استاتور، SL، تا یک اندازه مشخص در افزایش متوسط گشتاور نقش دارد و اگر از آن حد بیشتر افزایش یابد، متوسط گشتاور کاهش خواهد یافت. عرض سگمنت استاتور، SW، نیز عملکرد مشابه داشته ضمن آن که محدودیت‌هایی را در سیم‌پیچی به دنبال خواهد داشت. در شکل (۱۲) نمودار حساسیت گشتاور متوسط به عرض دندانه استاتور موتور پیشنهادی نمایش داده شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که با عریض‌تر شدن زاویه دندانه استاتور، TL، گشتاور متوسط خروجی ماشین رو به کاهش می‌گذارد و همچنین یک مقدار مناسب برای این پارامتر در حالت کمینه وجود دارد.

در شکل (۱۳) نمودار حساسیت شاخص گشتاور بر واحد وزن مواد فعال ماشین به طول و عرض سگمنت استاتور نشان داده شده است. این شاخص در عملکرد نسبی ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس مختلف اعم از سگمنتی یا غیرسگمنتی و یا حتی با تعداد دندانه و شیارهای مختلف مهم بوده و مقایسه مطلوب‌تری بین ماشین‌ها را به دست می‌دهد. دلیل این امر، آن است که نوع آرایش سگمنت‌ها در ساختارهای مختلف می‌تواند متفاوت باشد ولی وزن مواد فعال مورد استفاده و متوسط گشتاور تولیدی، پارامترهایی هستند که بین ساختارها تمایز ایجاد می‌کنند. این نمودار به ازای مقادیر مشخص برای SW و SL در بالاترین حالت، شاخص ۲/۱۵ را نشان می‌دهد که در بخش بعد، با شاخص موتورهای سوئیچ رلوکتانس مشابه مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

در ادامه، موارد طراحی ساختار پیشنهادی بعد از بررسی‌های اولیه تحلیل حساسیت ارائه می‌شود.

متغیر و حداکثر برابر $10^{-6} \times 25$ ثانیه در نظر گرفته شده است. گفتنی است در مدار درایو، کلیدها با در نظر گرفتن مقاومت داخلی و ولتاژ هدایت 0.6 ولت در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۴): چگالی مش در موتور پیشنهادی با نمایش بزرگنمایی آن در فاصله هوایی

شکل (۱۵) عملکرد صحیح موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی را در حالت بی‌باری نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۱۵-الف) نشان داده شده، برای محدود کردن جریان، از روش هیستریزس جریان به صورت حلقه باز استفاده شده است. گشتاور ایجاد شده در این حالت آزمایشی در شکل (۱۵-ب) آورده شده است. توجه شود که در این مقاله، کنترل سرعت موتور پیشنهادی مدنظر نیست؛ لذا در این‌جا حلقه کنترل بیرونی سرعت بر روی کنترل هیستریزس جریان در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین، همان‌طور که از شکل (۱۵-ج) برمی‌آید، سرعت در ابتدا رو به افزایش خواهد بود و بعد از افزایش تلفات و نیز محدودیت جریان تعریف شده در سرعت بالا به پایداری می‌رسد. در این بررسی، تحلیل به صورت حلقه باز و برای نمایش دینامیک بی‌باری از سرعت صفر انجام شده است. همچنین، همانند سایر ساختارهای موتور سوئیچ رلوکتانس با اعمال روش‌های کنترل مختلف، می‌توان رپل گشتاور ایجاد شده را تا حد مطلوبی کاهش داد.

جهت بررسی حالت گذرای تحت بار، تحلیل دینامیکی موتور پیشنهادی با افزایش بار اعمالی در شرایط پایدار موتور انجام می‌شود. شکل (۱۶) نمودار جریان فازها، گشتاور تولیدی و تغییرات سرعت در این بررسی را نشان می‌دهد. این تحلیل هم، به صورت حلقه باز انجام شده و در اثر تغییرات بار، سرعت کاهش خواهد یافت. تحلیل در شرایط بار نیز صحت عملکرد موتور پیشنهادی می‌گذارد.

در ادامه، موتور پیشنهادی در شرایط مختلف بررسی شده و نمودار سرعت-گشتاور موتور استخراج می‌شود. این تحلیل، در شکل (۱۷) نمایش داده شده است. در ساختار سگمندی دوگانه پیشنهادی، به دلیل تعداد سگمنت‌های زیاد، موتور در سرعت‌های پایین طراحی می‌شود تا از افزایش تلفات کلیدزنی جلوگیری به عمل آید.

گفتنی است که موتور پیشنهادی در سرعت‌های پایین به دلیل تعداد سگمنت‌های مناسب، دارای عملکرد بهتری نسبت سایر موتورهای موتورهای سوئیچ رلوکتانس است. در تحلیل یاد شده، سرعت مبنای موتور در حدود 1000 دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. این

که در آن، D_m و L_m قطر و طول موتور پیشنهادی و N_{ph} تعداد دور یک فاز است. از طرف دیگر، جریان فاز را می‌توان برحسب بارگذاری الکتریکی ویژه، $(a.c.)$ ، به صورت زیر نوشت:

$$i_{ph} = \frac{\pi D_m (a.c.)}{2 N_{ph}} \quad (10)$$

با در نظر گرفتن مقادیر ولتاژ و جریان فاز ارائه شده و ذکر این نکته که در موتور پیشنهادی در هر لحظه تنها یک فاز هدایت می‌کند، برای توان داریم:

$$P = V_{ph} i_{ph} C_d \eta \quad (10)$$

که در آن η بازدهی و C_d ضریب زاویه هدایت فاز است $(C_d = 12 C_d / \pi)$. با جاگذاری جریان و ولتاژ فاز در معادله (۱۰) داریم:

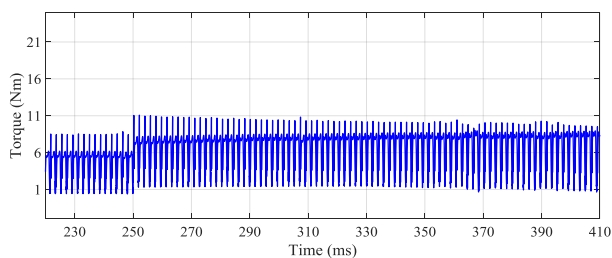
$$P = \frac{\pi^2}{120} (1 - 1/\xi_d) C_d \eta (a.c.) B D_m^2 L_m n_m \\ = \frac{\pi^2}{120} k_1 k_2 k_3 (a.c.) B D_m^2 L_m n_m \quad (11)$$

در معادله خروجی، k_1 وابسته به جنس هسته و شکل منحنی اشباع است و k_2 به زاویه هدایت بستگی دارد که در مقدار بیشینه آن یک بوده و جهت اهداف کنترلی ممکن است کاهش یابد. ضریب k_3 هم نمایانگر تلفات ماشین است. این معادله هرچند گام اولیه را برای محاسبات پارامترهای اصلی موتور پیشنهادی در اختیار قرار می‌دهد اما به جهت دقت کار و آگاهی از این‌که موتورهای سوئیچ رلوکتانس اغلب در شرایط اشباع و غیرخطی کار می‌کنند، بهتر است محاسبات اولیه با نتایج نرم افزار المان محدود، همانند موتورهای دارای مغناطیس دائم، نیز مطابقت داده شود [۲۵-۲۶].

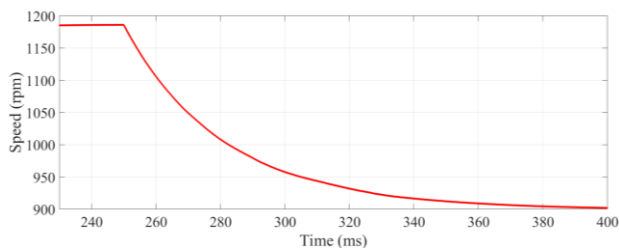
۶- بحث و نتایج

در این بخش، باتوجه به تحلیل حساسیت و موارد طراحی گفته شده در قسمت قبل، پارامترهای موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی نهایی شده و نتایج بررسی عملکرد موتور ارائه می‌شود. برای مشاهده رفتار دقیق موتور پیشنهادی و در نظر داشتن عملکرد غیرخطی، مدل المان محدود این موتور استخراج شده و به صورت کوپل با مدار درایو الکتریکی در نرم افزار دیگر شبیه‌سازی می‌شود. به دلیل توپولوژی شار شعاعی موتور پیشنهادی و نیز تقارن آن در جهت محوری که عبور شار محوری در فاصله هوایی رخ نمی‌دهد، تحلیل دو بعدی با در نظر گرفتن مقاومت و اندوکتانس نشستی در انتهای سیم‌پیچ کافی بوده و نتایج دقیق را به دست می‌دهد. یک پارامتر خروجی برای موقعیت در نظر گرفته شده که به عنوان حسگر، اطلاعات لازم را در اختیار مدار کلیدزنی قرار می‌دهد. در مدل المان محدود، محاسبات با تعداد نود-های در حال افزایش تکرار شد. با داشتن تعداد نودهای در حدود 3000 ، دقت موردنظر در این تحلیل عددی به دست آمد. شکل (۱۴) مش‌بندی موتور پیشنهادی را در تحلیل المان محدود نمایش می‌دهد. همچنین گام زاویه‌ای برابر 0.1 درجه و گام زمانی در تحلیل گذرا

(الف)



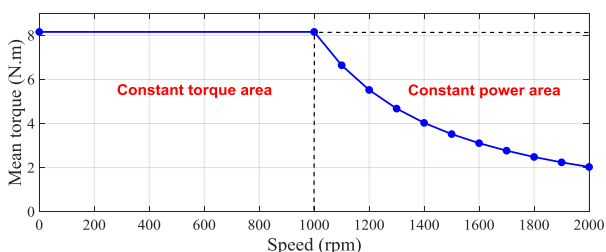
(ب)



(ج)

شکل (۱۶): تحلیل دینامیکی (الف) جریان فازها، (ب) گشتاور و (ج) سرعت موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی در شرایط بار

همچنین ابعاد اصلی موتورها، که در جدول (۱) به حالت رنگی نمایش داده شده، برای تمام این موتورهای مورد مقایسه، ثابت فرض شده است. از طرف دیگر، چون در ساختارهای مختلف موتورهای مورد

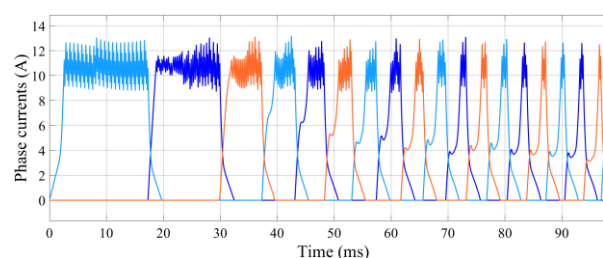


شکل (۱۷): نمودار گشتاور - سرعت موتور سوئیچ رلوکتانس با ساختار سگمندی دوگانه پیشنهادی

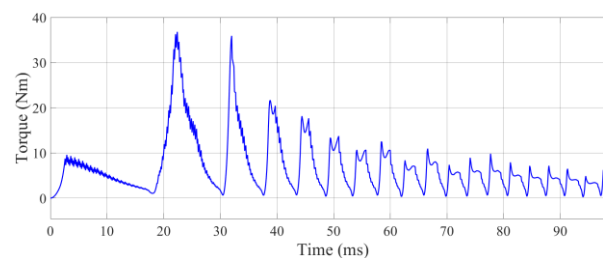
مقایسه، ممکن است از مقدار مواد فعال متفاوتی استفاده شود، بجای گشتاور تولیدی، چگالی گشتاور بر وزن مواد فعال مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، برای کامل‌تر شدن این مقایسه، چگالی گشتاورهای یاد شده در ازای توان تلفاتی مس ثابت سیم‌پیچی‌ها محاسبه می‌شود. شکل (۱۸) قابلیت تولید گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس با ساختار سگمندی دو گانه پیشنهادی را در مقایسه با سایر ساختارها نشان می‌دهد. در این تحلیل، از نتایج مربوط به سایر ساختارهای با تعداد سگمنت‌های مشابه و نیز با پارامترهای هندسی اصلی یکسان، همانند مقادیر جدول ۱، استفاده شده است [۱۴]. با توجه به شکل (۱۸)، موتور پیشنهادی از مواد فعال بیشترین و بهترین بهره را برای تولید گشتاور برده است. موتور با ساختار پیشنهادی، دارای ۷۶ درصد گشتاور تولیدی بیشتر نسبت به موتور سوئیچ رلوکتانس با ساختار

سرعت، به ازای ولتاژ نامی ماشین در حدود ۲۳۰ ولت به دست آمده است. همان‌گونه که در شکل (۱۷) مشخص شده، این مقدار ناحیه عملکردی موتور را به نواحی گشتاور ثابت و توان ثابت تقسیم کرده است. از این رو، این ساختار برای کاربردهای با گشتاور بالا و سرعت پایین نظیر خردکن‌های صنعتی مناسب است.

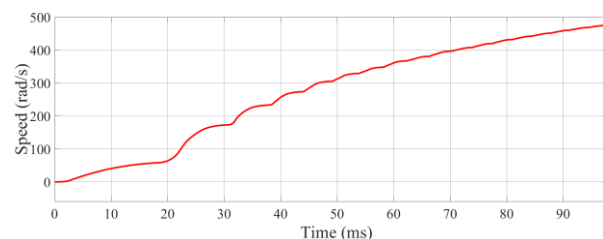
موتور سوئیچ رلوکتانس با ساختار سگمندی دوگانه پیشنهادی، دارای گشتاور تولیدی بیشتر نسبت به سایر موتورهای سوئیچ رلوکتانس مشابه است. در ادامه، برای بررسی این موضوع، موتور پیشنهادی از نظر گشتاور با سایر ساختاری مشابه مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در این مقایسه، موتورهای با تعداد برجستگی و سگمنت‌های مشابه در موتور (۸) و استاتور (۱۲) به همراه یک موتور مرسوم ۱۲/۸ و نیز یک موتور سگمندی با تعداد سگمنت متفاوت (۸/۶) مورد بررسی قرار گرفته‌اند.



(الف)

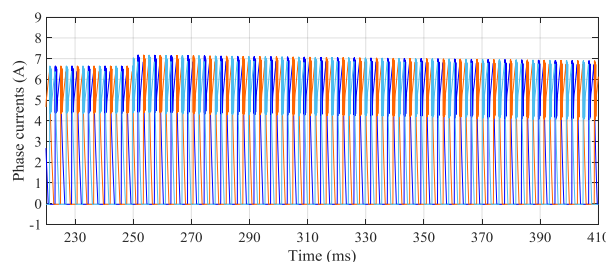


(ب)



(ج)

شکل (۱۵): تحلیل دینامیکی (الف) جریان فازها، (ب) گشتاور و (ج) سرعت موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی در حالت بی‌باری

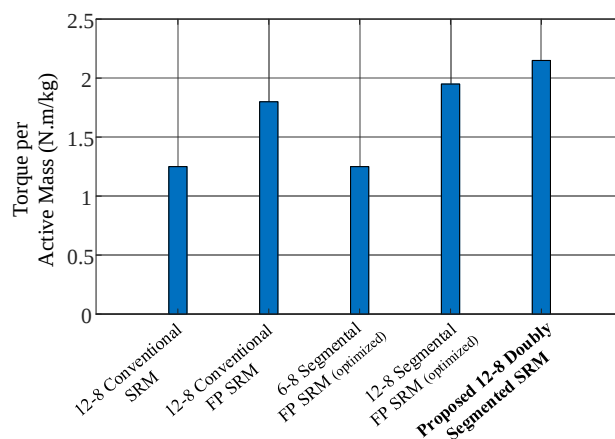


گشتاور در درصد تغییرات قابل قبولی از ریل گشتاور اتفاق افتاده است. گفتنی است موتور پیشنهادی می‌تواند کاندید مناسب برای کاربردهای سرعت پایین و گشتاور بالا باشد.

مراجع

- [1] Eskandari, H. and Mirsalim, M. "An Improved 9/12 Two-Phase E-core Switched Reluctance Machine." IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 28, NO. 4, pp. 951-958, 2013.
- [2] Davarpanah, Gh. R., Mohammadi S., and Kirtley, J. L. "A Novel 8/10 Two-Phase Switched Reluctance Motor with Enhanced Performance: Analysis and Experimental Study." IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, No. 4, pp. 3402-3410, 2019.
- [3] Mousavi Aghdam, S. R., et al. "Design and analysis of a Novel High-torque Stator-segmented SRM." IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, NO. 3, pp. 1458-1466, 2015.
- [4] Vandana, R., and B. G. Fernandes. "Design Methodology for High-performance Segmented Rotor Switched Reluctance Motors." IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 30, No. 1, pp. 11-21, 2014.
- [5] Mecrow, B. C., et al. "Preliminary Evaluation of Switched Reluctance Motors with Segmental Rotors." IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, pp. 679-686, 2004.
- [6] Abbasian, M. A., Moallem, M. and Fahimi, B. "Double-stator Switched Reluctance Machines (DSSRM): Fundamentals and Magnetic Force Analysis." IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 25, No. 3, pp. 589-597, 2010.
- [7] W. Yan, H. Chen, S. Liao, Y. Liu and H. Cheng, "Design of a Low-Ripple Double-Modular-Stator Switched Reluctance Machine for Electric Vehicle Applications," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 7, no. 3, pp. 1349-1358, Sept. 2021.
- [8] Sun, Chuanyu, et al. "Design and analysis of a 16/6 bearingless switched reluctance motor with segment hybrid rotor teeth." IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering Vol. 15, No. 6, pp.939-946, 2020.
- [9] Wen, D., Yang, SH., and Hu, Y., "Development and Investigation on Segmented-stator Hybrid-excitation Switched Reluctance Machines with Different Rotor Pole Numbers." IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 5, pp. 3784-3794, 2017.
- [10] Kondelaji, Jalali, M. A., Farmahini, E. and Mirsalim, M., "Performance Analysis of a New Switched Reluctance Motor with Two Sets of Embedded Permanent Magnets." IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 35, No. 2, pp. 818-827, 2020.
- [11] Wen, D., Hu, Y. and Wu, L., "Analysis and Development of Novel Three-phase Hybrid Magnetic Paths Switched Reluctance Motors Using Modular and Segmental Structures for EV Applications." IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 20, No. 5, pp. 2437-2451, 2015.
- [12] Teng, G., Schofield, N., and Emadi, A., "Double Segmented Rotor Switched Reluctance Machine with Shared Stator Back-iron for Magnetic Flux Passage." IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 31, No. 4, pp.1278-1286, 2016.
- [13] Wei, S., et al. "Design and Analysis of A Novel Rotor-segmented Axial-field Switched Reluctance Machine." CES Transactions on Electrical Machines and Systems, Vol. 1, No. 3, pp. 238-245, 2017.

مرسوم بوده و ۱۴/۵ درصد گشتاور بیشتر نسبت به موتور با ساختار سگمتمی بهینه شده و با تعداد سگمتم‌های مشابه تولید می‌کند. این افزایش گشتاور در حالی است که درصد تغییرات ریل گشتاور کمتر از دو درصد است. باید توجه داشت که این افزایش گشتاور در موتور پیشنهادی بدون اعمال هرگونه بهینه‌سازی دیده شده است.



شکل (۱۸): مقایسه شاخص گشتاور بر وزن مواد فعال موتورهای

سوئیچ رلوکتانس

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک ساختار مغناطیسی جدید با سیم‌بندی متفاوت از موتورهای سوئیچ رلوکتانس ارائه شده است. با توجه به مطالعات جدید در موتورهای سوئیچ رلوکتانس، انواع ساختارهای سگمتمی این موتورها دارای بیشترین گشتاور تولیدی است. موتور پیشنهادی معرفی شده نیز دارای ساختار سگمتمی بوده اما برخلاف سایر ساختارهای سگمتمی، به حالت دوگانه در روتور و استاتور خود قرار دارد. در ابتدا اصول عملکرد موتور پیشنهادی تشریح شده و به کمک شبیه‌سازی استاتیکی در نرم‌افزار المان محدود، مشخصات اولیه موتور مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر روی گشتاور موتور با تحلیل حساسیت مورد بررسی قرار گرفته‌است. به دلیل ساختار مغناطیسی متفاوت موتور پیشنهادی، موارد لازم در طراحی موتور پیشنهادی هم اشاره شده است. جهت استخراج نتایج دینامیکی، موتور پیشنهادی در نرم‌افزار المان محدود با سیستم درایو در نرم‌افزار جداگانه کوپل شده است. این نتایج، بر عملکرد صحیح موتور صحت می‌گذارند که در دو حالت دینامیکی بی‌باری و شرایط تحت بار صورت گرفته است. نتایج بیشتر در نمودار گشتاور-سرعت آورده شده که نشان از عملکرد بهتر موتور در سرعت‌های پایین به دلیل وجود تعداد ضربه‌های گشتاور بالا در موتور پیشنهادی است. در ادامه، موتور پیشنهادی با ساختارهای مشابه سگمتمی و نیز ساختار مرسوم به طور کامل مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهادی بیش از ۴۰ درصد افزایش گشتاور در مقایسه با میانگین گشتاور سایر ساختارهای یادشده را داراست. این افزایش

- [14] Widmer, J. D., and Mecrow, B. C., "Optimized Segmental Rotor Switched Reluctance Machines with a Greater Number of Rotor Segments than Stator Slots." IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, No. 4, pp. 1491-1498, 2013.
- [15] Mecrow, B. C., et al. "Switched Reluctance Motors with Segmental Rotors." IEE Proceedings-Electric Power Applications, Vol. 149, No. 4, pp. 245-254, 2002.
- [16] Cheng, G., "Design and Control of Ultra-High Speed Switched Reluctance Machines over 1 Million rpm." Ph. D. dissertation, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2019.
- [17] Xu, D. and Mecrow, B., "A Comparison of Conventional and Segmental Rotor 12/10 Switched Reluctance Motors." IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). IEEE, 2019.
- [18] Mousavi-Aghdam, S. R., Feyzi, M. R., Bianchi, N., "Analysis and Comparison Study of Novel Stator-Segmented Switched Reluctance Motor ", Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, Vol. 13, No. 1, pp.68-76, 2017.
- [19] Hongtao, ZH. , Lee, D. H. and Ahn, J. W., "A Segmental Rotor Type 12/8 Switched Reluctance Motor: Concept, Design and Analysis." IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, 2014.
- [20] Hongtao, ZH. , et al. "Design and Performance Analysis of Segmental Rotor Type 12/8 Switched Reluctance Motor." IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). IEEE, 2014.
- [21] Jian, L., Song, X. and Cho, Y., "Comparison of 12/8 and 6/4 Switched Reluctance Motor: Noise and Vibration Aspects." IEEE transactions on magnetics, Vol. 44, No. 11, pp. 4131-4134, 2008.
- [22] Mousavi-Aghdam S. R., Sharifian M. B. B., Banaei M. R., "A New Method to Reduce Torque Ripple in Switched Reluctance Motor Using Fuzzy Sliding Mode" Iranian Journal of Fuzzy Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 97-108, 2012.
- [23] Mousavi-Aghdam, S. R., Feyzi, M. R., Ebrahimi Y., "A New Switched Reluctance Motor Design to Reduce Torque Ripple using Finite Element Fuzzy Optimization", Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, Vol. 8, No. 1, pp.91-96, 2012
- [24] Xu, Zhenyao, et al. "Characteristics Analysis and Comparison of Conventional and Segmental Rotor Type 12/8 Switched Reluctance Motors." IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, No. 3, pp. 3129-3137, 2018.
- [25] Harir, A., M., Damaki, Aliabad, A., A., "Comprehensive Design and Fabrication of Permanent Magnet Synchronous Motor to Reach Minimum Cogging Torque" Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 1, No. 15, pp. 113-121, 2018.
- [26] Mohammad, Hossein, H., Nezami, Vatandoost, M., Radmanesh, H., "Design of Axial Flux Permanent Magnet Machine Using Improved Particle Swarm Optimization Algorithm," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 1, No. 15, pp. 123-131, 2018.

زیر نویس ها

¹ Asymmetric bridge

² Soft/hard chopping switching technique

³ Finite element method