



Technovations in Electrical Engineering & Green Energy System

Research Article

(2022) 1(3):1-16

Reduction of Torque Ripples and Radial Force in Segmental SRM Using Current Profiling Method

Milad Alaei¹, M.Sc., Milad Dowlatshahi¹, Assistant Professor,
Sayed Morteza Saghaian-Nejad², Professor

¹ Department of Electrical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

² Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract:

The torque of the reluctance switch motors is created from the sum of its discrete values, the purpose of which is to create a continuous torque on the motor shaft, causing a phenomenon called torque ripple in the commutation regions. In this paper, in order to reduce the radial force and stabilize the torque, the design of a reluctance switch motor with a discrete rotor structure is simulated using Magnet software. For this purpose, first by examining the radial force acting on the rotor in different currents and situations from the area unaligned to aligned, a function called radial force function is introduced. Then, using the introduced function and the torque-current relationship, the phase reference torque is introduced so that the sum of the torque moments is equal to the reference torque of the motor. For experimental purposes, using Matlab software, the motor circuit and its drive are simulated, and by applying the torque function introduced as the reference torque, the results are compared with the results of the linear torque common function. And the simultaneous representation of the figure of the two radial forces obtained shows that the motor torque ripple is reduced and is almost the same as the torque in the linear common state. This is in a situation where the radial force decreases relative to the radial force of the linear joint torque.

Keywords: Switched reluctance motor (SRM), Segmental switched reluctance motor, Torque ripple reduction, Linear torque sharing function

Received: 3 April 2022

Revised: 28 June 2022

Accepted: 24 July 2022

Corresponding Author: Dr Milad Dowlatshahi, dolatshahi@iaukhsh.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2022.1959202.1015>





فناوری‌های نوین در مهندسی برق و سیستم انرژی سبز

کاهش ریپل گشتاور و نیروی شعاعی در موتور SR سگمندی با استفاده از پروفایل مناسب جریان

میلاذ اعلائی^۱، کارشناسی ارشد، میلاذ دولتشاهی^۱، استادیار، سید مرتضی سقائیان نژاد^۲، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده: گشتاور موتورهای SRM از جمع مقادیر گسسته آن ایجاد و هدف آن وقوع گشتاور پیوسته بر روی شفت موتور می‌باشد که موجب ظهور پدیده ریپل گشتاور در نواحی کموتاسیونی می‌گردد. در این مقاله، با هدف کاهش نیروی شعاعی و تثبیت گشتاور، ساختار یک موتور سوئیچ رلوکتانس روتور گسسته در نرم افزار Magnet شبیه سازی می‌شود. ابتدا نیروی شعاعی وارد بر روتور در جریان و موقعیت‌های مختلف از ناحیه ناهمپوشانی تا همپوشانی کامل بررسی و سپس خروجی‌های آن در نرم افزار متلب تحلیل و تابعی تحت عنوان تابع نیروی شعاعی معرفی می‌شود. با استفاده از تابع معرفی شده و رابطه گشتاور-جریان، گشتاور مرجع فاز به صورتی که مجموع لحظه‌ای گشتاور برابر با گشتاور مرجع موتور باشد معرفی می‌شود. به منظور راستی‌آزمایی، مدار الکتریکی موتور و درایو آن شبیه سازی و با اعمال تابع گشتاور معرفی شده به عنوان گشتاور مرجع، نتایج با نتایج تابع اشتراکی گشتاور خطی مقایسه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و نمایش همزمان شکل دو نیروی شعاعی بدست آمده کاهش ریپل گشتاور موتور و نزدیک بودن آن به گشتاور در حالت اشتراکی خطی را نشان می‌دهد. این درشرایطی است که نیروی شعاعی آن در مقایسه با نیروی شعاعی گشتاور اشتراکی خطی کاهش قابل ملاحظه ای پیدا می‌کند.

واژه های کلیدی: موتور سوئیچ رلوکتانس، موتور سوئیچ رلوکتانس سگمندی، کاهش ریپل گشتاور، تابع اشتراکی گشتاور خطی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲

نویسنده‌ی مسئول: دکتر میلاذ دولتشاهی، dolatshahi@iaukhsh.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2022.1959202.1015>

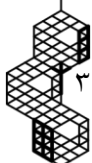
موتور سوئیچ رلوکتانس^۱ (SRM) یکی از قدیمی‌ترین موتورهای الکتریکی می‌باشد که قدمت آن به بیش از ۱۵۰ سال می‌رسد. نام این موتور از قاعده عملکرد آن و بر اساس سوئیچ شدن رلوکتانس‌های متغیر می‌باشد. به واسطه مقاوم بودن و قابلیت اطمینان بالا و ساختار مکانیکی ساده آن مورد استقبال قرار گرفته است [۱]. مبنای تولید گشتاور بر پایه تمایل قطب‌های روتور به هم‌محوری با قطب‌های استاتور زمانی که قطب‌های استاتور تحریک شده‌اند می‌باشد. قاعده عملکرد این موتور بر اساس اختلاف مقاومت مغناطیسی برای خطوط میدان مغناطیسی در فاصله هوایی می‌باشد، در این حالت زمانی که روتور در موقعیتی قرار دارد که خطوط میدان مغناطیسی زیادی را در برابر خود می‌بیند روتور نیرویی را تجربه می‌کند که آن را به سمت جلو و به سمت حالت هم‌محوری با قطب‌های استاتور حرکت می‌دهد تا میدان مقاومت مغناطیسی کمتری در برابر خود ببیند که به علت عدم برابری تعداد قطب‌های استاتور و روتور این عمل دائماً رخ می‌دهد و باعث چرخش روتور می‌شود. در زمان جریان دهی به این موتور نیروهای شعاعی و مماسی در آن ایجاد می‌شود. نیروی مماسی در جهت چرخش روتور تولید و عامل ایجاد حرکت می‌باشد. در مقابل نیروی شعاعی در جهت عمود به موتور و در دو سمت داخل و خارج موتور تولید شده که باعث ایجاد سروصدا و ارتعاشات مکانیکی در موتور می‌شود، به همین علت نیروی مناسبی برای موتور نبوده و ایجاد تلفات می‌کند. موتور سوئیچ رلوکتانس یک جایگزین ساده، قوی و کم هزینه برای موتورهای آهنربای دائم (PM) است و می‌تواند عملکرد رقابتی را از نظر بازده و چگالی توان ارائه دهد. با این حال، ریپل گشتاور^۲ و نویز صوتی به عنوان موانع اصلی در برابر پذیرش فناوری SRM در کاربردهای صنعتی و خانگی هستند. دامنه گشتاور کم لزوماً به این معنی نیست که موتور می‌تواند با صدای صوتی کم کار کند. امواج گشتاور می‌تواند طول عمر اجزای موتور مانند یاتاقان‌ها و کوپلینگ‌ها را کاهش دهد. توابع اشتراکی گشتاور (TSF) می‌توانند با شکل دادن به جریان‌های فاز برای دستیابی به گشتاور کل ثابت، ریپل گشتاور را به خوبی کاهش دهند. با این حال، نویز صوتی در SRM از ارتعاشات استاتور و عمدتاً به دلیل نیروهای شعاعی است [۲].

قابلیت اطمینان و عملکرد مناسب در تغییرات دمایی این موتور را به عنوان گزینه‌ای مناسب برای استارترها، پمپ‌ها، دمنده‌ها، نیروی محرکه ژنراتورها و پمپ‌های سوخت مطرح ساخته است. همچنین گستردگی ناحیه توان ثابت، این موتور را برای استفاده در خودروهای برقی [۳] و هواپیماهای برقی مناسب می‌سازد [۴]. در تحقیقات در زمینه نویز صوتی و کاهش ارتعاش دو دسته زمینه کاری اصلی وجود دارد. دسته اول بهبود ساختار مکانیکی است. از سوی دیگر، دسته دوم استراتژی‌های کنترل ولتاژ و جریان است. نمونه‌های دسته اول عبارتند از حفره‌های روتور، ساختارهای سگمندی و استاتور و روتور مورب. مثال برای دسته دوم لغو ارتعاش فعال (AVC) است که ارتعاش را در فرکانس طبیعی کاهش می‌دهد [۵].

اما به دلیل ساختار قطب برجستگی دوگانه (برجستگی قطب استاتور و روتور) و مشخصه غیرخطی مغناطیسی $(T - I - \theta)$ مشکلات نویز صوتی و ریپل گشتاور در این موتور شدیدتر از موتورهای دیگر می‌باشد. این ریپل گشتاور از طبیعت غیرخطی گشتاور-جریان - زاویه $(T - I - \theta)$ و مکانیزم گسسته تولید گشتاور در موتورهای سوئیچ رلوکتانس حاصل می‌شود، کاهش ریپل گشتاور به خصوص در لحظات کموتاسیون اهمیت بیشتری دارد، در این زمان گشتاور تولیدی از یک فاز فعال به فاز فعال دیگری منتقل می‌شود [۶]. دلایل ریپل گشتاور و ساختار قطب برجستگی دوگانه سیم‌پیچی متمرکز تحریک حول قطب‌های استاتور و ضرورت عملکرد در ناحیه اشباع مغناطیسی به منظور پیشینگی نسبت گشتاور بر حجم و پالس میدان مغناطیسی به دست آمده با تغذیه پیدرپی سیم‌پیچ‌های مختلف تحریک می‌باشد. اما دلیل اصلی و غالب ریپل گشتاور کموتاسیون جریان فاز می‌باشد.

ریپل گشتاور می‌تواند از طریق تکنیک‌های مختلفی از جمله طراحی مناسب و صحیح مدار مغناطیسی موتور در مرحله طراحی و همچنین استفاده از تکنیک‌های کنترل گشتاور به کمترین مقدار می‌تواند کاهش یابد. کاهش ریپل بخصوص در نواحی کموتاسیون فاز از اهمیت بیشتری برخوردار است، در این زمان تولید گشتاور از یک فاز فعال به فاز فعال دیگری در حال انتقال می‌باشد. متمرکز بودن سیم‌بندی استاتور در این ماشین مانع استفاده از تحلیل سینوسی و تکنیک‌های کنترلی مدرن می‌گردد. همچنین برجستگی موجود بر روی روتور و استاتور و سیم‌بندی متمرکز منجر به ضربات شدید گشتاور و نویز صوتی می‌گردد. لذا اغلب تحقیقات جاری بر روی SRM به کاهش ریپل گشتاور و مسائل نویز مربوط می‌شود [۷]. جهت کاهش لرزش این موتور، مطالعه نیروی شعاعی از نقطه نظر طراحی و نمای کنترل مورد نیاز است [۸]. شکل هندسی ماشین‌های سوئیچ رلوکتانسی به شکل مؤثر بیش از بیست سال است که ثابت شده است.

ساختار پایه متشکل از یکسری دندانه‌ها و قطب‌های استاتور که توسط هسته به صورت مغناطیسی به هم متصل شده‌اند و یکسری از دندانه‌های روتور که با مدار مغناطیسی توسط هسته اصلی روتور تکمیل شده است ساخته می‌شود. تأثیر عرض دندانه بر تولید گشتاور،





نویز آکوستیک و تأثیر تعداد قطب بر میانگین گشتاور مورد بررسی، و طرح‌هایی که باعث کاهش موج گشتاور می‌شوند، مشخص شده است [۹]. در سال‌های اخیر موتورهای سوئیچ رلوکتانس با روتور سگمندی (قطعه‌ای) معرفی شده‌اند که به دو دسته با ساختارهای روتور سگمندی و استاتور سگمندی تقسیم می‌شود و نشان می‌دهد که ماشین قادر به استفاده بسیار بهتر از هندسه مغناطیسی است، و در نتیجه تراکم گشتاور بسیار بیشتری را نسبت به SRM معمولی می‌دهد. کوتاه شدن مسیر شار و استفاده از روتور ترکیبی به خوبی باعث کاهش تلفات سیم‌پیچی و تلفات آهنی در سرعت‌های بالا می‌شود و به‌طور کلی ساخت موتور به‌صورت روتور سگمندی یا استاتور سگمندی می‌تواند مسیر شار کوتاه را در موتور ایجاد کند که باعث بهبود چگالی گشتاور در آنها می‌شود. هر یک از این دو ساختار دارای مزایا و معایبی نیز هستند. [۱۰].

SRM روتور خارجی برای کاربردهای دوچرخه‌های برقی جذاب است. همچنین از این مدل موتور برای توسعه خودروهای برقی استفاده شده است. با این حال نمونه‌های متداول روتور داخلی نسبت به روتور خارجی در دوچرخه‌های برقی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. موتورهای سوئیچ رلوکتانس روتور خارجی دارای مزیت‌هایی مثل سرعت چرخش بیشتر، وزن سبک‌تر و تولید گشتاور آسان‌تر در مقایسه با موتورهای سوئیچ رلوکتانس روتور داخلی هستند [۱۱، ۱۲]. در مرجع [۱۳] یک تابع اشتراکی گشتاور بهبودیافته به‌منظور اجرا و پیاده‌سازی کمینه‌سازی ریپل گشتاور ارائه گردیده است. تابع اشتراکی گشتاور مورد نیاز از زوایای روشنی و همپوشانی و گشتاور مطلوب می‌باشد. در مرجع [۱۴] یک روش برای تعیین شکل موج جریان فازهای مجاور در ناحیه کموتاسیونی بین دو فاز با در نظر گرفتن اثر اشباع مغناطیسی پیشنهاد شده که نتیجه آن بروز کمترین میزان تلفات اهمی در ماشین است و نقاط برخورد آنها با منحنی دایره‌ای شکل تلفات اهمی با کمترین شعاع انتخاب می‌شود. در مرجع [۱۵] یک تابع اشتراکی گشتاور برون خط به‌منظور کاهش ریپل گشتاور پیشنهاد شده است. تابع هدف از دو تابع هدف ثانویه شامل فاکتور تیخونوف به‌منظور کمینه کردن جریان یا تلفات اهمی و مشتق جریان مرجع پیشنهاد شده است.

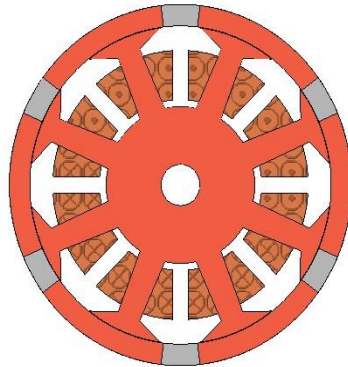
در این مقاله، گشتاور ثابت در سطوح جریان‌های فاز مختلف با در نظر گرفتن مشخصات گشتاور غیر خطی و اثرات اشباع مغناطیسی به دست خواهد آمد. همچنین به حداقل رساندن تلفات توان به عنوان تابع هدف ثانویه فرض می‌شود. یک تابع معکوس پذیر تحلیلی جدید برای ارایه گشتاور تولید شده معرفی خواهد شد و تابع اشتراک گشتاور بهینه با توجه به کمینه‌سازی اتلاف توان با حل مساله بهینه‌سازی تحلیلی پیشنهاد خواهد شد. بدین ترتیب ابتدا ساختار یک موتور سوئیچ رلوکتانس روتور خارجی با تعداد قطب‌های $8/6$ و به صورت روتور سگمندی در نرم افزار Magnet شبیه سازی می‌شود. پس از آن به یکی از سیم‌پیچ‌های آن جریان‌های $6, 4, 2$ و 8 آمپر داده می‌شود. همانطور که در عنوان مقاله بیان شده است پس از شبیه‌سازی موتور هدف کاهش نیروی شعاعی و تثبیت گشتاور مماسی می‌باشد. در هر جریان، برای موقعیت‌های 0 تا 30 درجه (موقعیت‌های غیر هم پوشانی کامل تا هم پوشانی کامل) شار شعاعی و مماسی را به دست آورده و سپس با استفاده از رابطه نیرو- شار، نیروی شعاعی وارد به سگمنت متناظر روتور در هر موقعیت به دست آورده می‌شود. با استفاده از نرم افزار Matlab، معادله منحنی مربوط به نیروهای شعاعی به‌دست‌آمده بر حسب موقعیت، جریان و نیرو با استفاده از روش برازش منحنی محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از رابطه گشتاور - جریان و مقادیر اندوکتانس سیم‌پیچ‌ها در هر موقعیت و جایگذاری در تابع نیروی شعاعی بدست آمده، مقادیر گشتاور مرجع هر فاز بدست می‌آید. لازم به ذکر است که گشتاور مرجع فاز با قید این که مجموع لحظه‌ای گشتاور برابر با گشتاور مرجع موتور باشد بدست می‌آید. با جایگذاری گشتاور مرجع هر فاز در تابع نیروی شعاعی مقادیر نیروی شعاعی حاصل می‌شود. به منظور مقایسه و بررسی صحت روش پیشنهادی، تابع اشتراکی گشتاور خطی^۳ برای موتور به عنوان گشتاور مرجع فاز تعریف و نیروی شعاعی آن نیز بدست می‌آید. سپس با شبیه‌سازی و رسم دو نیروی شعاعی به صورت هم‌زمان، کاهش ریپل گشتاور و شباهت آن به گشتاور در حالت خطی همراه با کاهش نیروی شعاعی نسبت به حالت خطی نشان داده می‌شود.

۲- معرفی موتور SR مورد تحلیل

در شکل (۱) ساختار کلی موتور سوئیچ رلوکتانس مورد نظر نشان داده شده است. با نگاه اولیه به شکل ظاهری موتور، مشخصات ابتدایی آن نمایان می‌شود. ظاهر این موتور نشان دهنده تعداد قطب‌های روتور و استاتور آن که تشکیل یک موتور سوئیچ رلوکتانس $8/6$ و 4 فاز را می‌دهد است، سپس همانطور که مشاهده می‌شود، باتوجه به مکان پیچش سیم‌پیچ‌ها، روتور خارجی بودن موتور نمایان است و این بدان معنی می‌باشد که قسمت گردان موتور در قسمت خارجی و قسمت ثابت در داخل موتور می‌باشد، همچنین سگمندی بودن قسمت

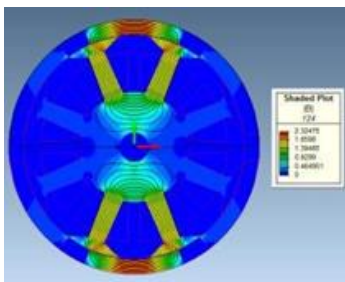


گردان یا همان روتور موتور در نگاه اولیه به آن قابل مشاهده می‌باشد. استاتور دارای ۸ قطب می‌باشد که بر روی هر قطب دو عدد کلاف سیم‌پیچی قرار می‌گیرد و کلاف‌های سیم‌پیچی به صورت گام بلند جایگذاری می‌شوند. هر کدام از قسمت‌های موتور مانند روتور، استاتور، سگمنت‌ها و فاصله بین سگمنت‌ها از مواد و آلیاژهای مخصوص به خود ساخته شده است. جنس استاتور از نوع 19M یکی از آلیاژهای فولاد و سگمنت‌های موتور نیز همجنس با استاتور می‌باشد. فاصله بین سگمنت‌ها به وسیله Aluminum پوشانده شده است. سیم‌پیچ‌ها از جنس copper یا همان مس است. شبیه‌سازی موتور باتوجه به مشخصات معرفی شده و جنس قسمت‌های مختلف، در نرم افزار Magnet انجام می‌شود.

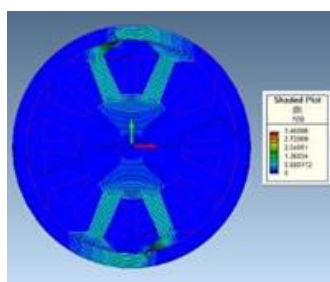


شکل (۱) : موتور SR مورد تحلیل

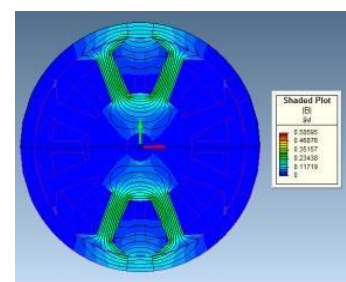
زمانی که جریان هشت آمپر به موتور داده می‌شود شار مورد نیاز در هسته موتور ایجاد می‌شود که با توجه به تغییر رلوکتانس در قسمت روتور موتور و همچنین موقعیت سگمنت‌ها عبور این شار باعث چرخش روتور می‌شود. در شکل (۲) مسیر شار ایجاد شده و مقدار چگالی شار در موتور در سه موقعیت نامهمپوشانی، نیمه همپوشانی و همپوشانی در هشت آمپر نشان داده شده است.



ج : همپوشانی (aligned)



ب: نیمه همپوشانی (half aligned)



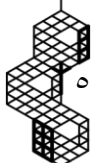
الف : ناهمپوشانی (unaligned)

شکل (۲) : شار و چگالی شار در سه موقعیت روتور

۳- روش بهینه سازی نیروی شعاعی

جهت بدست آوردن رفتار موتور و همچنین مشخصه‌های مختلف آن نیاز است تا جریان‌های مختلفی به موتور داده شود. در اینجا برای جریان دادن به موتور از سیم‌پیچ شماره ۳ استفاده شده است، در واقع جریان‌های ۶،۴،۲ و ۸ آمپر به این فاز داده شده است. در هر جریان روتور از زاویه ۰ تا ۳۰ درجه چرخانده می‌شود. بدین ترتیب از نرم افزار ۱۲۴ حالت خروجی برای گشتاور، شارپیوندی، انرژی، کوانترژی، نیروهای وارد بر موتور و سایر مشخصات موتور استخراج می‌شود.

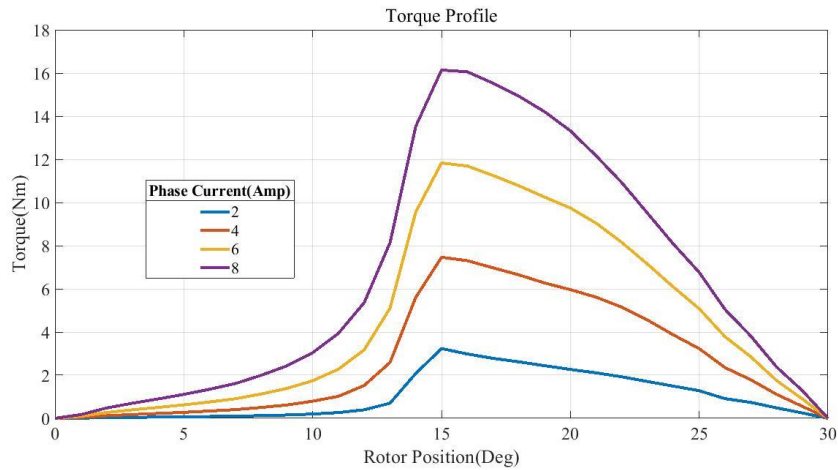
شکل (۳) نمونه گشتاور موتور در هر چهار جریان در زوایای ۰ تا ۳۰ درجه نشان داده شده است که منحنی گشتاور در سطوح مختلف جریان را به ما معرفی می‌کند. همچنین طبق رابطه (۱) اندوکتانس سیم‌پیچ مورد نظر در هر جریان بدست آمده که در شکل (۴) نشان



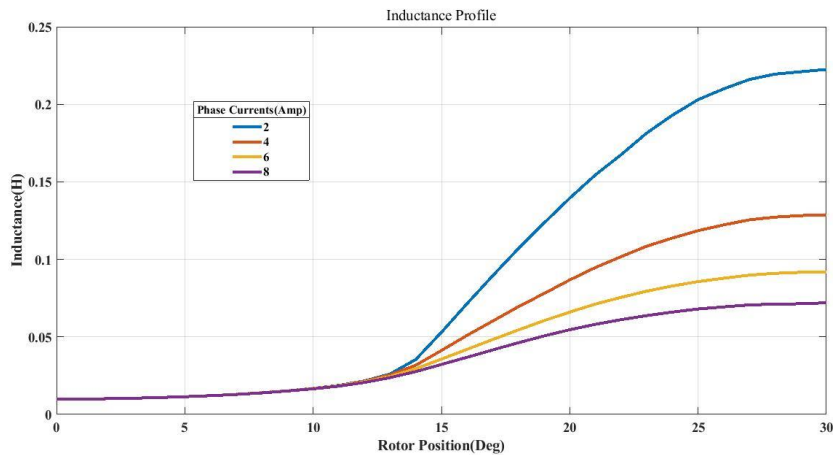


داده شده است. در این شکل به خوبی کارکرد موتور SRM در حالت اشباع را نشان می‌دهد، که دلیل این امر کاهش مقدار شار در مقابل افزایش جریان می‌باشد.

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (1)$$



شکل (۳): گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس روتور سگمندی مفروض در جریان‌ها و زوایای روتور مختلف



شکل (۴): اندوکتانس سیم‌پیچ‌های هر فاز موتور در جریان‌ها و زوایای روتور مختلف

در بازه هدایت یک موتور سوئیچ رلوکتانس چهارفاز حداکثر تنها دوفاز قابلیت تولید گشتاور در جهت حرکت روتور را دارند. یعنی اگر زاویه بین ناهمپوشانی تا همپوشانی کامل به سه بازه تقسیم شود، در بازه اول فاز فعلی به همراه فاز قبلی، در بازه دوم فقط فاز فعلی و در بازه سوم فاز فعلی به همراه فاز بعدی فعال می‌شود. پس بدین ترتیب همین اتفاق نیز برای گشتاور خواهد افتاد. یعنی گشتاور کل یا گشتاور مرجع مجموع گشتاور فاز فعلی با فاز قبلی یا بعدی می‌باشد:

$$T_L = T_K + T_{K+1} \quad (2)$$

گشتاورهای T_K و T_{K+1} ، گشتاورهای فاز فعلی و فاز بعدی می‌باشند:



$$T_k = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (3)$$

$$T_{k+1} = \frac{1}{2} i_{k+1}^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (4)$$

در رابطه (۴) i_{k+1} جریان و $\frac{\partial L}{\partial \theta}$ مشتق اندوکتانس نسبت به مشتق موقعیت فاز قبلی و یا فاز بعدی می‌باشد. به دلیل اینکه در بازه‌ای فاز فعلی با فاز قبلی و در بازه‌ای با فاز بعدی فعال است، اندوکتانس نیز در این رابطه به همین صورت می‌باشد.

در هر فاز رابطه $\frac{\partial L}{\partial \theta}$ مربوط به همان فاز می‌باشد به همین علت در اینجا جهت ساده‌تر بیان کردن روابط، $\frac{\partial L}{\partial \theta}$ در رابطه (۳) A و $\frac{\partial L}{\partial \theta}$ در رابطه (۴) B فرض شده است.

زمانی که به موتور جریان داده می‌شود سگمنت متناظر با هر سیم‌پیچ بر روی روتور شروع به حرکت کرده و به سمت سیم‌پیچ تحت جریان کشیده می‌شود تا در حالت همپوشانی قرار گیرد. نیروی وارد شده به سگمنت به دوشکل نیروی شعاعی و نیروی مماسی می‌باشد. همانطور که قبلاً بیان شد نیروی شعاعی باعث ایجاد نویز و سروصدا در موتور می‌شود و هدف کاهش این نیرو می‌باشد، به همین علت نیاز است که ابتدا نیروی شعاعی وارد به یک سگمنت را در جریان‌های مختلف بدست آورد. در رابطه (۵) نیروی شعاعی نشان داده می‌شود.

$$f_n = \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2 - B_t^2) \quad (5)$$

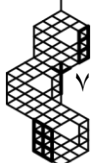
در رابطه بالا f_n نیروی شعاعی، B_n چگالی شار شعاعی، B_t چگالی شار مماسی و μ_0 ضریب نفوذ مغناطیسی خلاء می‌باشد. ابتدا نیاز است تا چگالی شار را در هر موقعیت برای هر کدام از حالت‌های مماسی و شعاعی بدست آورد. اینکار با استفاده از نرم افزار Magnet انجام می‌شود. ابتدا سطح مورد نظر جهت محاسبه نیرو مشخص و انتخاب می‌شود که در اینجا سطح مشخص، سطح سگمنت می‌باشد. در هر موقعیت ابتدا محدوده‌های مرزی سگمنت مورد نظر انتخاب و با استفاده از قابلیت تحلیل نرم افزار Magnet یکبار چگالی شار شعاعی و یکبار چگالی شار مماسی وارد به آن محاسبه می‌شود. سپس مجموع چگالی شارهای بدست آمده در تمام نقاط سگمنت محاسبه می‌شود. پس از محاسبه این مجموع، از طریق رابطه (۵) نیروی شعاعی وارد به سگمنت در هر موقعیت بدست آورده می‌شود. بدین ترتیب این روند و مراحل برای سایر موقعیت‌ها یعنی از ۰ تا ۳۰ درجه در هر جریان محاسبه شده و در نهایت کلیه نیروهای شعاعی وارد به سگمنت در هر جریان و هر موقعیت بدست آورده می‌شود.

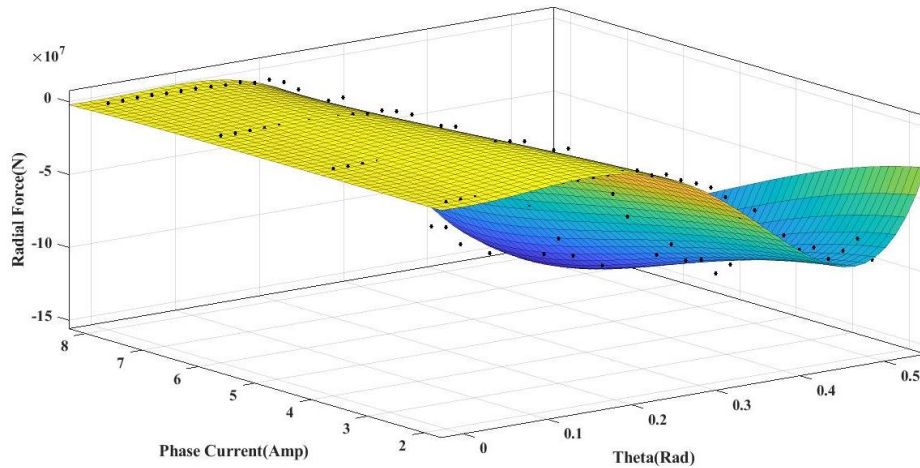
پس از بدست آمدن نیروهای شعاعی در هر زاویه روتور و جریان فاز، نیاز است تا معادله‌ای برای این نیروها بدست آورد، برای این منظور در این مقاله از روش برازش منحنی به کمک جعب ابزار مربوطه در نرم افزار MATLAB استفاده شده است. در این راستا معادله‌ای چند جمله‌ای بفرم رابطه زیر برای منحنی سه بعدی نوشته می‌شود که با تغییر ضرائب چند جمله‌ای مناسب‌ترین گراف برای نقاط استخراج شده حاصل می‌شود. نمودار سه بعدی آن در شکل (۵) نشان داده شده است. تابع پیشنهادی برای پردازش نقاط به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$z = f(x, y) \quad (6)$$

$$z = x^2 (Ay^6 + Bx^3 + Cy^2 + D + Ex^2) + Fy^6$$

مقدار ضرایب A، B، C، D، E و F بر حسب تکنیک‌های برازش منحنی و بصورت ارائه شده در جدول شماره (۱) نشان داده می‌شود با جایگذاری این ضرائب می‌توان مقادیر مناسب نیروی شعاعی را برای زوایای مختلف روتور و جریان فاز بدست آورد.





شکل (۵): نمودار سه بعدی جریان، موقعیت و نیروی شعاعی

جدول (۱): ضرایب تابع نیروی شعاعی

A	۱۱۴۸
B	۲.۹۲۲۴۱۰
C	-۶.۹۱۱۴ + ۰.۶
D	۶.۴۶۵۴ ۸
E	-۱.۴۷۹۴ ۱۰
F	۸.۶۸

هدف اصلی از بدست آوردن نیروی شعاعی، کمینه کردن مقدار آن است، بدین معنی که جمع دو نیروی f_k و f_{k+1} کمترین مقدار ممکن بشود.

$$\text{Min}: f_k(T, \theta) + f_{k+1}(T, \theta) \quad (7)$$

۴- بدست آوردن مقدار گشتاور مرجع فاز

همانطور که در قسمت قبل ذکر شد، نیاز است تا نیرو برحسب گشتاور و موقعیت یا همان موقعیت قرارگیری روتور بدست آورده شود. رابطه‌ایی که برای نیروی شعاعی معرفی شد نیرو را برحسب جریان و موقعیت بدست می‌آورد. به این ترتیب برای اصلاح این امر باید روابط (۳) و (۴) را بر حسب جریان بازنویسی شود:

$$i_k^2 = 2T_K / \left(\frac{\partial L}{\partial \theta}\right) \quad (8)$$

$$i_{k+1}^2 = (2 * T_{K+1}) / \left(\frac{\partial L}{\partial \theta}\right) \quad (9)$$



سپس طبق رابطه (۶)، رابطه (۷) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد، که در آن y یا همان جریان را از رابطه (۸) و (۹) جایگزین می‌شود:

$$z = (x^2(Ay^6 + Bx^3 + Cy^2 + D + Ex^2) + FY^6) + (x^2(Ay^6 + Bx^3 + Cy^2 + D + Ex^2) + Fy^6) \quad (10)$$

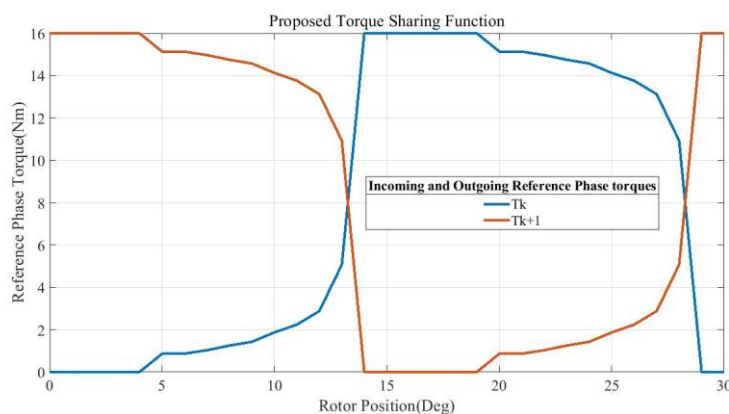
در این رابطه:

$$Y = i_K, y = i_{K+1} \quad (11)$$

هنگامی که تابع Z در رابطه (۱۰) بازنویسی و رابطه جریان و موقعیت جایگذاری شود، حاصل یک تابع با متغیر T_K می‌شود. سپس از تابع مشتق‌گیری و برابر با صفر قرار داده می‌شود:

$$\frac{\partial Z}{\partial T} = 0 \quad (12)$$

پس از حل معادله بالا گشتاور مرجع فاز حاصل می‌شود. لازم به ذکر است که در هر نقطه حاصل مجموع گشتاور فازهای تحت کموتاسیون باید برابر با گشتاور مرجع مورد نیاز روی روتور باشد. برای مثال اگر هدف تولید گشتاوری برابر با ۱۶ نیوتن متر موردنظر باشد باید $T_{(k)} + T_{(k+1)} = 16$ یعنی گشتاور مرجع موتور باشد. سپس با جایگذاری مقدار مینیمم گشتاور فاز در تابع نیروی شعاعی، مینیمم تابع یا همان نیروی شعاعی بدست می‌آید. لازم به ذکر است که به منظور صحت سنجی روش ارائه شده در این مقاله گشتاور موتور مرجع برابر با مقدار $T_L = 16$ انتخاب می‌شود. شکل (۶) نمودار مینیمم T_K و T_{K+1} را نشان می‌دهد.



شکل (۶): نمودار گشتاور مرجع محاسبه شده برای هر فاز موتور به ازای گشتاور مرجع کل برابر با ۱۶ نیوتن متر

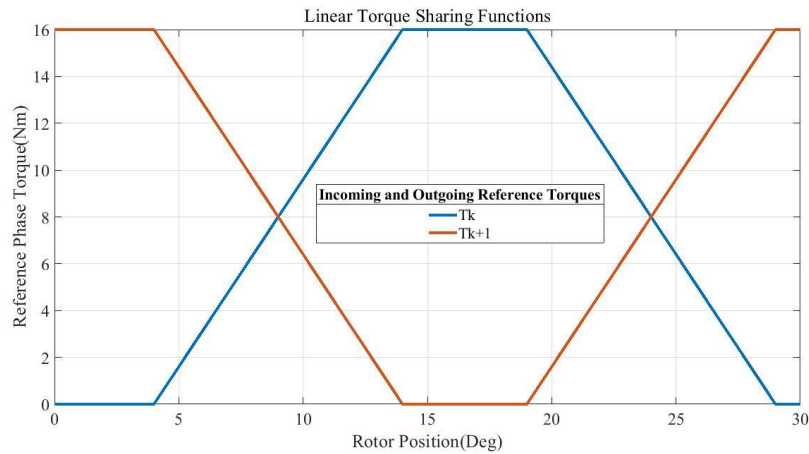
۵- مقایسه گشتاور با تابع اشتراکی گشتاور خطی

مدل‌های مختلفی با توجه به نقطه شروع، مقدار پیک و پایان گشتاور برای حالت خطی گشتاور ارائه می‌شود. در موقعیتی که گشتاور افزایش پیدا کرده و به مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌رسد شروع به افزایش به صورت خطی با شیبی نزدیک به شیب افزایش گشتاور غیر خطی بدست آمده می‌کند. نقطه شروع تقریباً متناسب با شروع گشتاور غیر خطی می‌باشد. این افزایش به صورت خطی تا گشتاور ماکزیمم ادامه پیدا می‌کند. پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم، گشتاور در مقدار ماکزیمم ثابت می‌ماند و تا موقعیتی که گشتاور غیر خطی شروع به کاهش می‌کند ادامه پیدا می‌کند. پس از آن در موقعیت نزول گشتاور غیر خطی، گشتاور خطی نیز تقریباً با همان شیب شروع

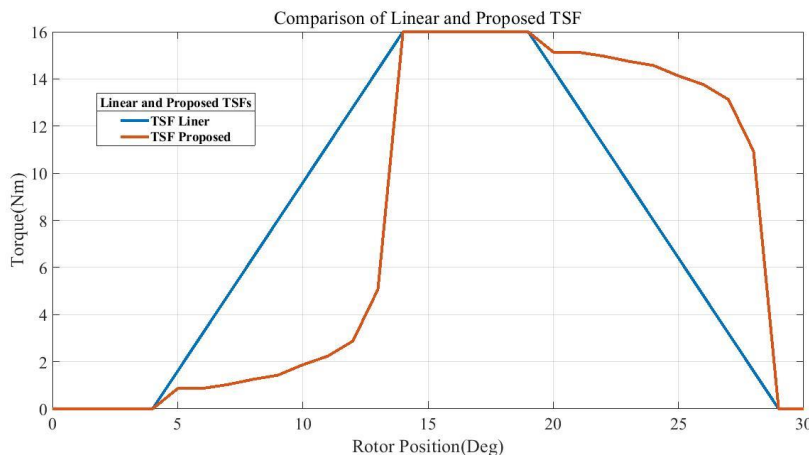




به کاهش می‌کند تا به مقدار صفر برسد. به این ترتیب یک سیکل مدل گشتاور خطی ایده‌آل ایجاد می‌شود. در زیر، شکل (۷) این گشتاور را نشان می‌دهد. برای مقایسه دو مدل گشتاور غیرخطی و گشتاور مدل خطی، دو نمودار را باید همزمان رسم می‌کنیم. ترسیم این نمودار به صورت شکل (۸) می‌باشد.



شکل (۷): نمودار گشتاور مرجع هر فاز موتور در حالت استفاده از تابع اشتراکی گشتاور خطی

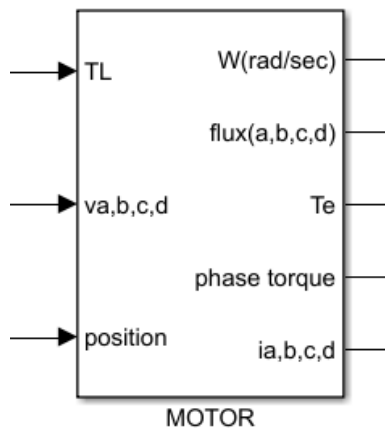


شکل (۸): مقایسه گشتاور مرجع دو تابع اشتراکی گشتاور خطی و تابع پیشنهادی

۶- شبیه سازی و نتایج

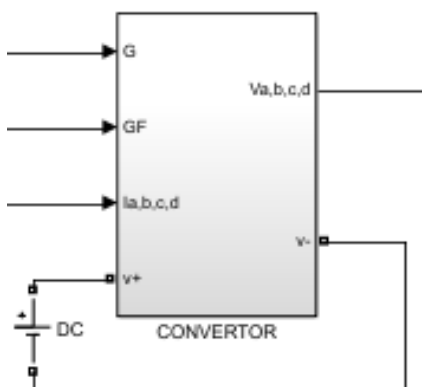
به منظور اعتبار سنجی و مقایسه روش پیشنهادی در کاهش ریبیل گشتاور، موتور چهار فاز مورد نظر در نرم افزار Magnet و روش پیشنهادی، در نرم افزار Matlab شبیه سازی می‌شود. برای پیاده سازی این توابع نیاز است که موتور و سیستم درایو آن را شبیه سازی و خروجی‌های آن مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرد. پس در ابتدا بلوک دیاگرام موتور با توجه به معادلات توصیف کننده رفتار SRM آورده خواهد شد و بعد از آن بلوک دیاگرام درایو موتور و سیستم کنترلی آن نیز به همین ترتیب آورده خواهد شد. بلوک دیاگرام موتور و ورودی‌ها و خروجی‌های در شکل (۹) نشان داده شده است. در این شکل نمای کلی بلوک دیاگرام نشان داده شده است که در داخل این بلوک معادلات توصیف کننده و رفتار دینامیکی موتور قرار می‌گیرد. همانطور که نشان داده می‌شود بلوک دارای ورودی‌هایی از جمله گشتاور بار، ولتاژهای فاز و زاویه موقعیت روتور و خروجی‌هایی از جمله سرعت، شارپیوندی فازها، گشتاور الکترومغناطیسی، گشتاور فازها و جریان فازها می‌باشد.





شکل (۹): بلوک دیاگرام مدل SRM

یکی از قسمت‌های مهم سیستم کنترلی برای SRM، مبدل نامتقارن برای اعمال ولتاژهای کنترل شده به فازهای موتور SR می‌باشد. این مبدل یا همان converter دارای انواع ساختارهای متفاوت با هدف‌های ویژه‌ای هستند. یکی از مباحث کلیدی در مورد درایو ماشین‌های سوئیچ رلوکتانسی، توپولوژی طراحی مبدل توان می‌باشد. عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس به شدت تحت تاثیر عملکرد و خصوصیات مبدل الکترونیک قدرت می‌باشد بلوک دیاگرام مبدل ذکر شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): بلوک دیاگرام معرف مبدل نامتقارن

شکل (۱۱) در زیر مدل ارائه شده جهت شبیه سازی کلی موتور سوئیچ رلوکتانس را نشان می‌دهد. در مدل ارائه شده جهت شبیه سازی و اثبات ادعای بیان شده در قبل، گشتاور بدست آمده مربوط به فاز به عنوان گشتاور رفرنس هر فاز در ورودی تعریف می‌شود سپس از گشتاور خروجی هر فاز فیدبک گرفته شده و با گشتاور رفرنس فاز مقایسه می‌شود. با افزایش سرعت ماشین گشتاور آن که به عنوان گشتاور بار معرفی شده است کاهش پیدا می‌کند و به همان ترتیب گشتاور فاز نیز کاهش پیدا می‌کند. در این مدل از سرعت خروجی موتور فید بک گرفته می‌شود و به عنوان ورودی آنکدر معرفی می‌شود. خروجی آنکدر موقعیت را معرفی می‌کند که این موقعیت ورودی بلوک گشتاور رفرنس معرفی می‌شود و گشتاور رفرنس در هر زاویه را نشان می‌دهد. جهت مقایسه گشتاور موتور با حالت اشتراکی گشتاور خطی، نیاز است تا گشتاور فاز در حالت خطی را به عنوان گشتاور رفرنس به ورودی اعمال کنیم. با اینکار گشتاور خروجی هر فاز با گشتاور مرجع خطی مقایسه شده و مقدار مورد نیاز به موتور اعمال می‌شود.

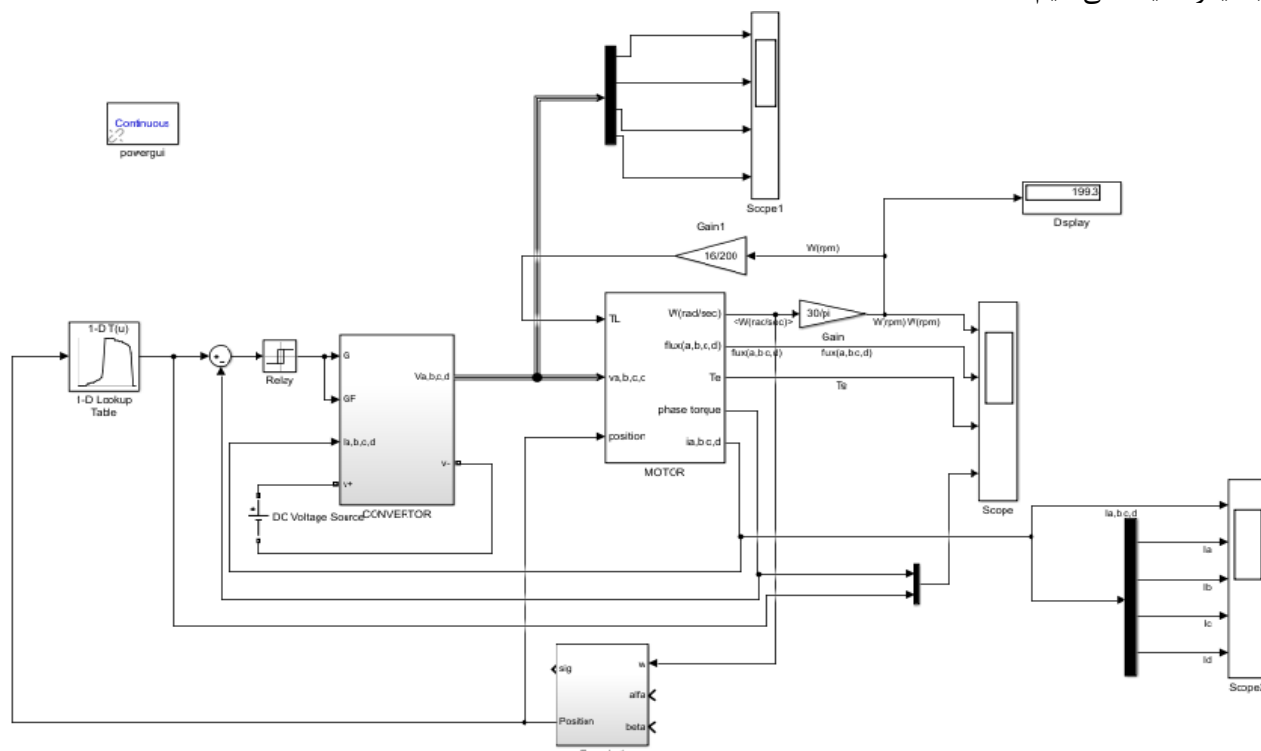
مشخصات موتور در جدول پیوست مقاله ارائه شده است. تابع معرفی شده گشتاور و تابع اشتراکی گشتاور خطی هرکدام به صورت جداگانه بعنوان ورودی معرفی می‌شوند. و نتایج حاصل از آن در شکل‌های (۱۲)، (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) نمایش داده می‌شوند. شکل (۱۲) نمای شبیه سازی موتور را بترتیب برای سرعت، شار هر فاز، گشتاور خروجی و مقایسه گشتاور خروجی با گشتاور رفرنس فاز را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود گشتاور دارای ریبیل کمی است و با افزایش سرعت گشتاور خروجی نسبت به گشتاور رفرنس کاهش





پیدا می‌کند همچنین شکل (۱۳) خروجی جریان موتور در هر فاز و مجموع آن را نشان می‌دهد. مراحل انجام شده مجدداً برای گشتاور در حالت اشتراکی خطی تکرار می‌شود، یعنی گشتاور خطی فاز به عنوان گشتاور رفرنس جهت شبیه سازی معرفی و سپس نتایج بررسی می‌شود. همانند مرحله قبل شکل (۱۴) نمای سرعت، شار، گشتاور خروجی و مقایسه گشتاور خروجی با گشتاور رفرنس و شکل (۱۵) نمای جریان خروجی موتور در هر فاز را نشان می‌دهد. در این مرحله نیز از شکل (۱۴) نتیجه گرفته می‌شود که ریبیل گشتاور در حالت اشتراکی گشتاور خطی نیز خیلی کم است. با مشاهده هر دو خروجی شبیه سازی در دو حالت خطی و تابع غیر خطی که معرفی شد می‌توان نتیجه گرفت که گشتاور بدست آمده گشتاور مناسبی می‌باشد زیرا کاهش ریبیل که جهت بهبود عملکرد موتور مدنظر بود، میسر گردیده و بسیار به گشتاور در حالت خطی نزدیک است.

سپس با استفاده از تابع معرفی شده برای بدست آوردن گشتاور، نیروی شعاعی را برای هر دو حالت گشتاور بدست و همانند شکل (۱۶) با یکدیگر مقایسه می‌کنیم.

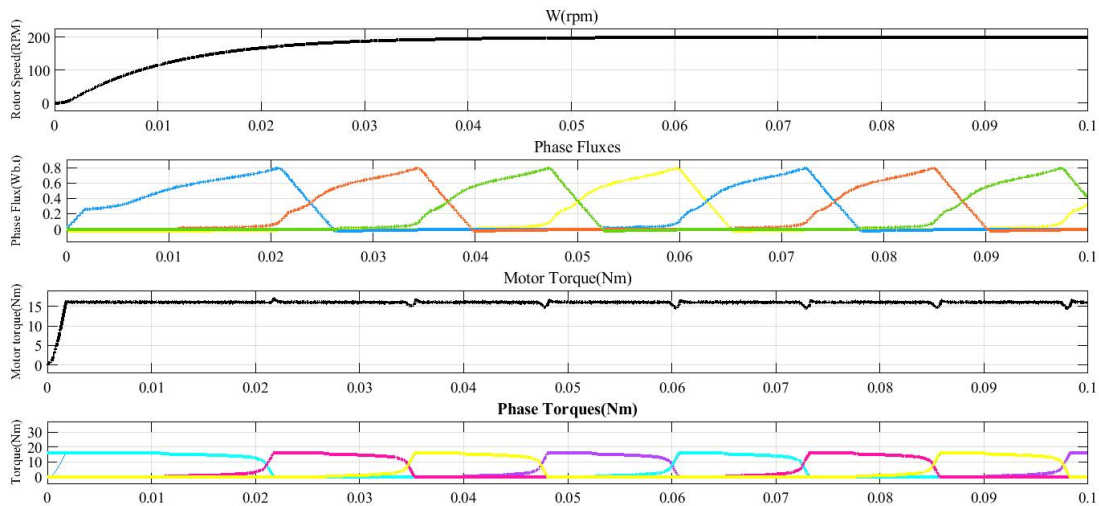


شکل (۱۱): مدل کلی سیستم شبیه سازی ارائه شده موتور سوئیچ رلوکتانس

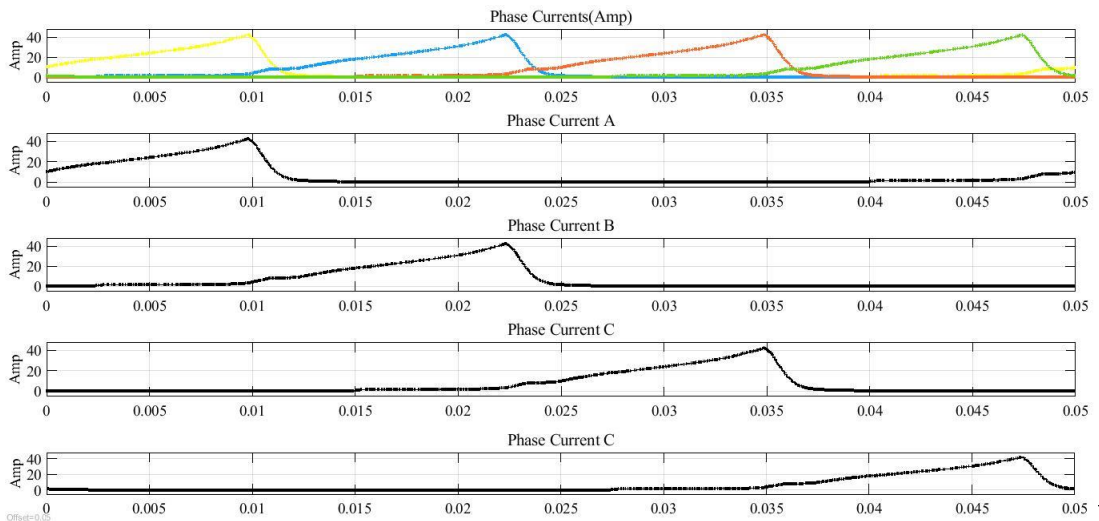
۷- نتیجه گیری

پس از جریان دهی به موتور سوئیچ رلوکتانس شبیه سازی شده، دو نیروی مماسی و شعاعی به روتور وارد می‌شود. در بین این دو نیرو، نیروی شعاعی باعث ایجاد ارتعاش و لرزش شده و سپس سر و صدا را به همراه داشت. همچنین ریبیل گشتاور نیز باعث بروز سر و صدا و نویز صوتی در موتور می‌شود. از این رو تابعی جهت نیروی شعاعی موتور مورد نظر معرفی شد تا نیروی شعاعی و ریبیل گشتاور را کاهش و آن را تثبیت کند. برای اثبات تابع معرفی شده، ابتدا نیاز به معرفی تابع گشتاور مرجع فاز موتور و پس از آن معرفی تابع اشتراکی گشتاور خطی به عنوان مرجع فاز جهت مقایسه ریبیل گشتاور در مرحله اول و با بدست آوردن نیروی شعاعی در هر حالت و مقایسه آنها با یکدیگر در مرحله بعدی می‌باشد. سپس بررسی‌های لازم جهت نتیجه‌گیری و اثبات روش معرفی شده، انجام شود. بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می‌دهد که تابع معرفی شده برای نیروی شعاعی و بدست آوردن گشتاور مرجع فاز از آن، گشتاوری با ریبیل کم همانند گشتاور اشتراکی خطی معرفی می‌کند، با این تفاوت که این گشتاور دارای نیروی شعاعی کمتری نسبت به حالت اشتراکی خطی می‌باشد و در بدترین حالت برای تحقق هدف مورد نظر هر دو نیروی شعاعی با یکدیگر مساوی و در بهترین حالت نیروی شعاعی بدست آمده ۶۲ درصد با نیروی شعاعی در حالت خطی تفاوت دارد که این خود دلیلی بر اثبات ادعا و روش مطرح شده جهت کاهش نیروی شعاعی و تثبیت گشتاور در این تحقیق می‌باشد.

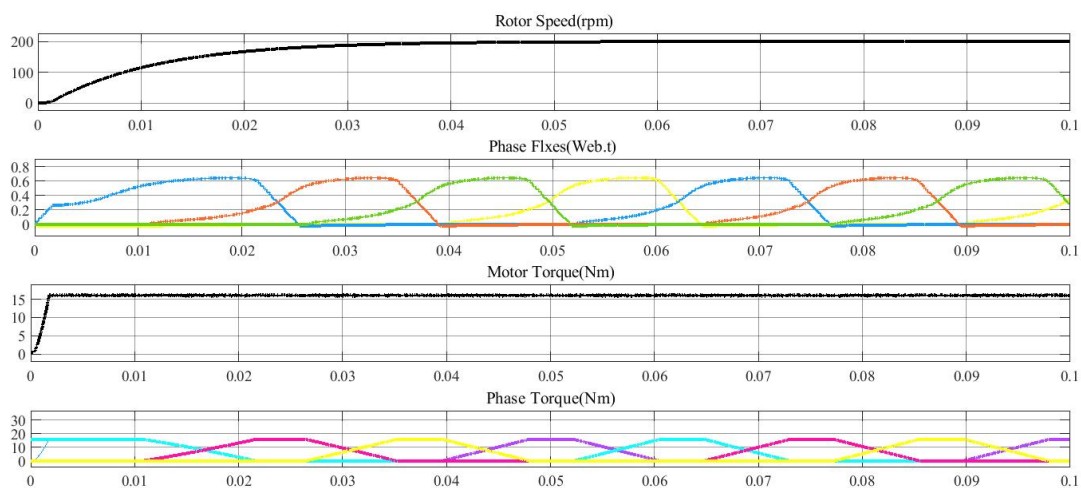




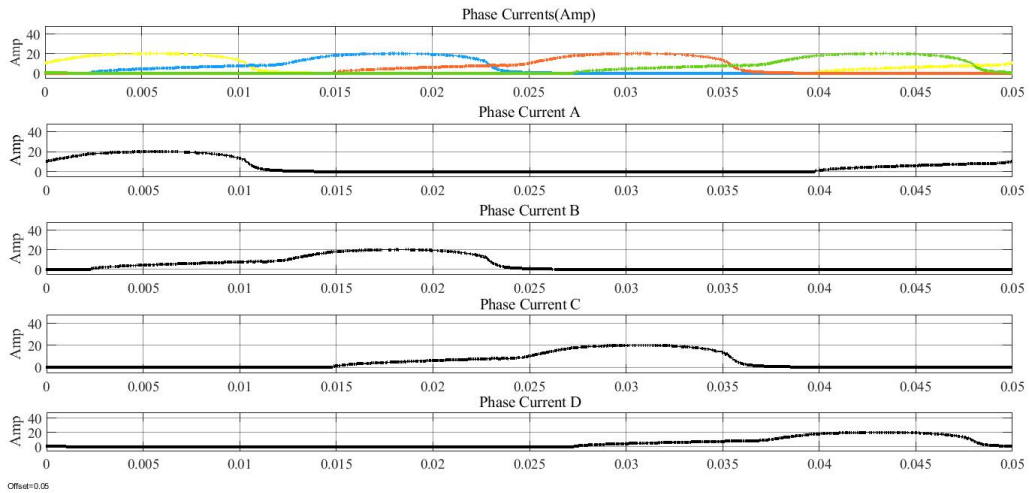
شکل (۱۲): خروجی سرعت، شار، گشتاور موتور و گشتاور مرجع هر فاز با استفاده از روش پیشنهادی



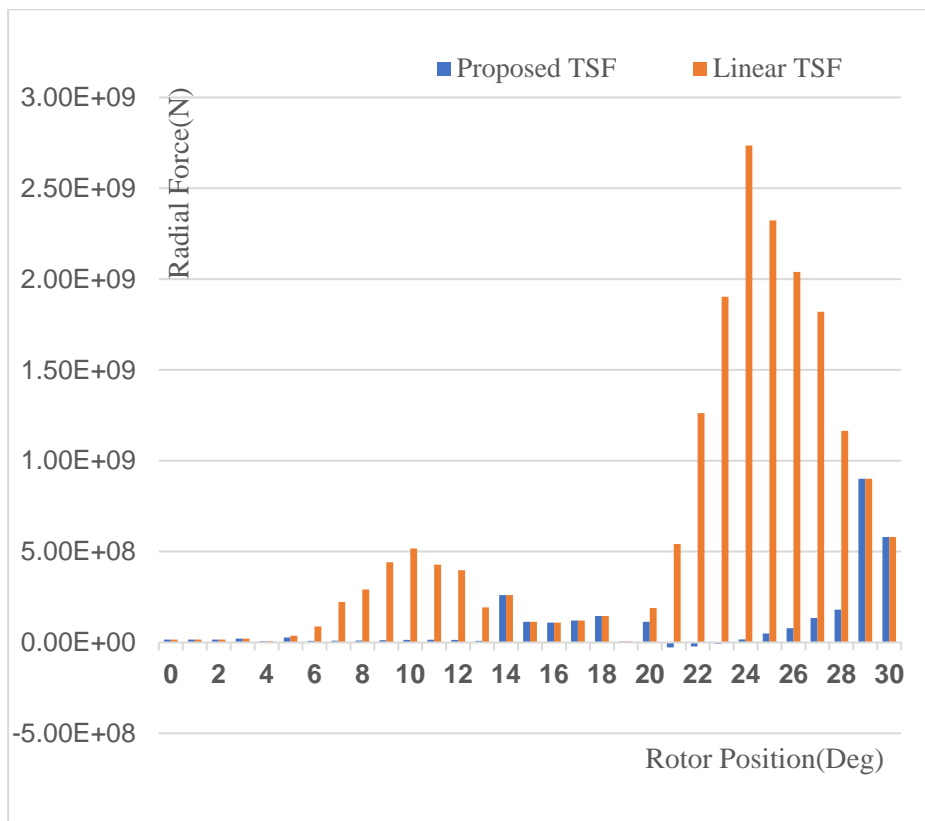
شکل (۱۳): جریان خروجی موتور برای تابع معرفی شده



شکل (۱۴): خروجی سرعت، شار، گشتاور موتور و گشتاور هر فاز در حالت استفاده از تابع اشتراکی گشتاور خطی



شکل (۱۵): جریان خروجی موتور در هر فاز در حالت خطی



شکل (۱۶): مقایسه دامنه نیروی شعاعی در دو حالت گشتاور خطی و گشتاور معرفی شده



جدول (پ-۱) ابعاد موتور سوئیچ رلوکتانس شبیه سازی شده

عنوان	مقدار
تعداد قطب روتور	۸
تعداد قطب استاتور	۶
تعداد فاز	۴
قطر خارجی استاتور	۱۹۳/۱ mm
قطر خارجی روتور	۲۲۰ mm
فاصله هوایی	۰/۳ mm
زاویه کمان قطب روتور	۴۷ deg
زاویه کمان قطب استاتور	۳۰ deg
جنس هسته	M19
جنس سیم پیچ ها	copper
جنس فاصله بین سگمنت ها	Aluminum
تعداد دور سیم پیچ ها	۱۵۰

جدول (پ-۲) مشخصات موتور SR شبیه سازی شده

عنوان	مقدار
تعداد فاز	۴
توان نامی وردی	۸۵۰ Watt
توان نامی خروجی	۶۷۰ Watt
ولتاژ نامی	۱۵۰ V
جریان نامی	۵/۶۷ A
سرعت نامی	۴۰۰ Rpm
گشتاور نامی	۱۶ Nm

مراجع

- [1] S. K. Sahoo, S. Dasgupta, S. K. Panda and J. -X. Xu, "A Lyapunov Function-Based Robust Direct Torque Controller for a Switched Reluctance Motor Drive System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 2, pp. 555-564, Feb. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2132740.
- [2] A. D. Callegaro, B. Bilgin and A. Emadi, "Radial Force Shaping for Acoustic Noise Reduction in Switched Reluctance Machines," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 10, pp. 9866-9878, Oct. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2891050
- [3] Sh. Wang, Q. Zhan, Z. Ma and L. Zhou, "Implementation of a 50-kW four-phase switched reluctance motor drive system for hybrid electric vehicle," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 1, pp. 501-504, Jan. 2005, doi: 10.1109/TMAG.2004.838985.





- [4] A. V. Radun, "High-power density switched reluctance motor drive for aerospace applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 1, pp. 113-119, Jan.-Feb. 1992, doi: 10.1109/28.120219.
- [5] J. Furqani, M. Kawa, C. A. Wiguna, N. Kawata, K. Kiyota and A. Chiba, "Current Reference Selection for Acoustic Noise Reduction in Two Switched Reluctance Motors by Flattening Radial Force Sum," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 4, pp. 3617-3629, July-Aug. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2910497.
- [6] V. P. Vujčić, "Minimization of Torque Ripple and Copper Losses in Switched Reluctance Drive," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 388-399, Jan. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2158447.
- [7] R. (Ramu) Krishnan, *Switched reluctance motor drives : modeling, simulation, analysis, design, and applications*. CRC Press, 2001. Accessed: Jul. 24, 2022.
- [8] H. J. Zhang, C. Gao and S. H. Wang, "Analysis of radial force for switched reluctance motor," *2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, 2013, pp. 418-419, doi: 10.1109/ASEMD.2013.6780809.
- [9] X. Deng and B. Mecrow, "A comparison of conventional and segmental rotor 12/10 switched reluctance motors," *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2019, pp. 1508-1513, doi: 10.1109/IEMDC.2019.8785221.
- [10] V. Hanaeinejad and M. Abbasian, "A Non-segmental Outer Rotor Switched Reluctance Machine for In-Wheel Electric Vehicle Application," *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering*, vol. 43, no. 4, pp. 909-918, Dec. 2019, doi: 10.1007/S40998-019-00192-9.
- [11] B. Bilgin, A. Emadi and M. Krishnamurthy, "Design Considerations for Switched Reluctance Machines with a Higher Number of Rotor Poles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 10, pp. 3745-3756, Oct. 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2141102.
- [12] P. C. Desai, M. Krishnamurthy, N. Schofield and A. Emadi, "Novel Switched Reluctance Machine Configuration with Higher Number of Rotor Poles Than Stator Poles: Concept to Implementation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 2, pp. 649-659, Feb. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2034678.
- [13] Ch. Choi, S. Kim, Y. Kim and K. Park, "A new torque control method of a switched reluctance motor using a torque-sharing function," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 5, pp. 3288-3290, Sept. 2002, doi: 10.1109/TMAG.2002.802295.
- [14] A. Jin-U, "Copper Loss and Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors Considering Nonlinear and Magnetic Saturation Effects," *Journal of Power Electronics*, vol. 14, no. 2, pp. 351-361, Mar. 2014.
- [15] J. Ye, B. Bilgin and A. Emadi, "An Offline Torque Sharing Function for Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motor Drives," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 2, pp. 726-735, June 2015, doi: 10.1109/TEC.2014.2383991.

زیر نویس ها

¹ Switched reluctance motor (SRM)

² Torque ripple

³ Linear torque sharing function

