



Research Article

Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

(2026) 5(3):39-50

Investigating the Startup Process of an Inductive Reluctance Switched Motor

Mohsen Daneshi¹, PhD Student, Mohammadali Abbassian¹, Assistant Professor, Hadi Saghafi¹, Assistant Professor

¹ Department of Electrical Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Abstract:

In this study, a new model of the switched reluctance induction machine with a structure of twelve poles in the stator and ten poles in the rotor has been designed and analyzed. This innovative topology has been proposed with the aim of reducing the length of the windings and, as a result, reducing the overall dimensions of the motor. The magnetic flux path in this structure has been optimized in such a way that, while reducing core losses, it provides a higher torque density than conventional structures. The performance of this machine has been simulated using the finite element method in the Magnet software environment and the results have been compared with previous similar examples. The findings show that the proposed motor, while maintaining the desired starting torque, significantly improves its performance over time and during the starting process. Although the initial value of the torque is lower than the final value, this issue is compensated by applying more current at the initial moments, without causing any damage to the power circuits or windings. As a result, the proposed design is not only optimized and compact in terms of physical structure, but also fully suitable and reliable for industrial and automotive applications in terms of dynamic performance.

Keywords: Set up, High torque, Electric machines, Switched reluctance machines, Electric vehicles.

Received: 13 October 2025

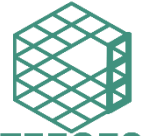
Revised: 5 November 2025

Accepted: 15 November 2025

Corresponding Author: Mohammadali Abbassian, m.a.abbasian@iau.ac.ir

DOI:





بررسی فرایند راه اندازی یک موتور سوئیچ رلوکتانس القایی

محسن دانشی^۱، دانشجوی دکترا، محمدعلی عباسیان^۲، استادیار، هادی ثقفی اصفهانی^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، خوراسگان، اصفهان، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، خوراسگان، اصفهان، ایران

۳- دانشکده مهندسی برق، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، خوراسگان، اصفهان، ایران

چکیده: در این پژوهش، یک مدل نوین از ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی با ساختار دوازده قطب در استاتور و ده قطب در روتور طراحی و تحلیل شده است. این توپولوژی نوآورانه با هدف کاهش طول سیم‌پیچ‌ها و در نتیجه کاهش ابعاد کلی موتور پیشنهاد شده است. مسیر شار مغناطیسی در این ساختار به گونه‌ای بهینه‌سازی شده که ضمن کاهش تلفات هسته، چگالی گشتاور بالاتری نسبت به ساختارهای متداول ارائه می‌دهد. شبیه‌سازی عملکرد این ماشین با استفاده از روش اجزای محدود در محیط نرم‌افزار مگنت انجام گرفته و نتایج حاصل با نمونه‌های مشابه پیشین مقایسه شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که موتور پیشنهادی، ضمن حفظ گشتاور راه‌اندازی مطلوب، به مرور زمان و در طول فرایند راه‌اندازی عملکرد خود را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. هرچند مقدار اولیه گشتاور نسبت به مقدار نهایی کمتر است، اما با اعمال جریان بیشتر در لحظات ابتدایی، این موضوع جبران می‌شود، بدون آن که به مدارهای قدرت یا سیم‌پیچ‌ها آسیبی وارد شود. در نتیجه، طراحی ارائه‌شده نه تنها از نظر ساختار فیزیکی بهینه و فشرده است، بلکه از منظر عملکرد دینامیکی نیز برای کاربردهای صنعتی و خودرویی کاملاً مناسب و قابل اعتماد خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: راه‌اندازی، گشتاور بالا، ماشین‌های الکتریکی، ماشین سوئیچ رلوکتانس، وسایل نقلیه الکتریکی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۴

نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد علی عباسیان؛ m.a.abbasian@iau.ac.ir

DOI:



با افزایش نگرانی‌ها درباره آلودگی هوا و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، توجه زیادی به توسعه و استفاده از وسایل نقلیه برقی شده است. طراحی سامانه محرکه برای خودروهای برقی و هیبریدی یکی از چالش‌های مهم است که باید نیازهای مختلفی مانند توان بالا، چگالی گشتاور، بازدهی، عملکرد در محدوده سرعت گسترده، اطمینان، تحمل خطا و هزینه‌های اقتصادی را تامین کند [۱]. در میان این نیازها، ملاحظات اقتصادی نقش کلیدی در رقابت صنعت خودرو دارد [۱]. افزایش تقاضا برای وسایل نقلیه برقی نیازمند ارائه راهکارهایی مقرون به صرفه است تا استفاده گسترده‌تر ممکن شود.

نیاز به تولید گشتاور^۱ بالا در سرعت‌های پایین برای تسهیل شتاب‌گیری و کاهش سرعت اهمیت طراحی ماشین‌های الکتریکی با چگالی گشتاور بالا را بیشتر می‌کند. ماشین‌های الکتریکی مجهز به آهنربای دائم، از جمله موتورهای سنکرون آهنربای دائم [۲، ۳] و موتورهای سنکرون رلوکتانس آهنربای دائم [۴]، گزینه‌های مناسبی برای کاربرد در خودروهای برقی هستند. این موتورها توانایی تولید گشتاور بالا دارند اما چالش‌هایی مثل مغناطیسی شدن آهنرباها و افزایش هزینه‌های تولید به علت گران شدن مواد آهنربایی را هم دارند. در سال‌های اخیر، موتورهای رلوکتانس سوئیچ‌شونده به دلیل مزایای اقتصادی ناشی از عدم نیاز به آهنربای دائم توجه زیادی در کاربردهای محرکه خودروها جلب کرده‌اند [۵]. هرچند چگالی گشتاور آنها ممکن است برای برخی کاربردهای خودروهای برقی کافی نباشد، پیشرفت‌های فنی در این زمینه می‌تواند عملکرد و چگالی توان این موتورها را بهبود دهد [۴].

از قرن نوزدهم تاکنون، انواع مختلفی از ماشین‌های رلوکتانس سوئیچ‌شونده با توپولوژی‌های متفاوت ساخته شده‌اند و در دهه‌های اخیر تحقیقات زیادی برای بهبود ساختار روتور و استاتور و افزایش بهره‌وری و چگالی گشتاور انجام شده است [۶، ۷]. طراحی‌های نوین مانند استاتور دوگانه با روتور اصلاح‌شده برای افزایش نیروی محرکه و بهره‌وری انرژی مطرح شده‌اند [۸]. اما یکی از مشکلات اصلی موتورهای رلوکتانس سوئیچ‌شونده ارتعاشات مزاحم ناشی از نیروهای نابرابر است. افزایش چگالی گشتاور معمولاً با کاهش فاصله هوایی همراه است که باعث اشباع مغناطیسی زیاد و افزایش نویز و ارتعاش می‌شود.

مرجع [۹] به طراحی و شبیه‌سازی یک موتور سوئیچ رلوکتانس برای استفاده در خودرو پرداخته است که از مزایای این پژوهش می‌توان به شبیه‌سازی کامل موتور در حالت گذرا^۲ و افزودن بخش درایو الکترونیکی به مدل اشاره کرد. همچنین انسیس مکسول به دلیل امکان اتصال بخش‌های مکانیکی با بخش‌های الکترونیکی و قابلیت تحلیل حرارتی، تنش و سایر تحلیل‌های جانبی نسبت به سایر نرم‌افزارهای مشابه برتری دارد. در همین تحقیق، دو موتور سوئیچ رلوکتانس در شرایط عملکرد عادی و حالت اشباع با هم مقایسه شده‌اند که نتایج نشان می‌دهد موتوری که در حالت اشباع کار می‌کند بازدهی بیشتری نسبت به موتور القایی خنک‌شونده با آب دارد و ساختار ساده‌تر، بازدهی بالاتر و محدوده سرعت گسترده‌تری از دیگر مزایای آن است. نتایج این مقالات تأییدی بر اعتبار علمی و جایگاه انسیس مکسول در تحلیل‌های اجزاء محدود محسوب می‌شود. در ادامه، مرجع [۱۰] تأثیر تعداد قطب‌های روتور و استاتور بر گشتاور تولیدی را بررسی کرده و نتایج مقایسه‌ای از نظر نوسانات گشتاور، چگالی گشتاور و تلفات توان ارائه داده است؛ طبق نتایج، افزایش تعداد قطب‌ها باعث کاهش نوسانات و افزایش چگالی گشتاور می‌شود، اما به دلیل کاهش زمان روشن ماندن کلیدها، تلفات افزایش یافته و کنترل زوایای سوئیچینگ پیچیده‌تر خواهد شد؛ همچنین اگر تعداد فازهای سیستم بیش از چهار فاز باشد، افزایش تعداد قطب‌ها تأثیر مثبتی در گشتاور ندارد و تعداد زیاد کلیدها کنترل موتور را دشوار می‌سازد. در مرجع [۱۱] عملکرد دینامیکی یک موتور سوئیچ رلوکتانس به عنوان نیروی محرکه در خودروی هیبریدی مورد بررسی قرار گرفته که نشان داده موتوری با تعداد قطب روتور بیشتر از استاتور، گشتاور استاتیکی بالاتر و نوسانات کمتری نسبت به نوع معمول دارد و برای کاربردهای مختلف خودروهای برقی مناسب ارزیابی شده است. در مرجع [۱۲] نیز یک موتور سوئیچ رلوکتانس ۱۲/۸ با روتور چندتکه طراحی و تحلیل شده که نسبت به مدل‌های رایج از بازدهی و گشتاور بالاتر و تلفات آهن و مس کمتری برخوردار است و استفاده از روتور چندتکه و مسیرهای شار مغناطیسی^۳ کوتاه نقش مؤثری در بهبود عملکرد داشته است. مطالعات نشان می‌دهد موتورهای سوئیچ رلوکتانس با مسیر شار کوتاه گشتاور بالاتری نسبت به سایر انواع دارند، اما ساختار پیچیده و روتور چندتکه^۴ می‌تواند مشکلات عملکردی ایجاد کند که برای حل این مسئله، موتور سوئیچ رلوکتانس القایی معرفی شده است؛ این موتور با طراحی نوین روتور ضمن حفظ مزایای گشتاور بالا، مسائل ناشی از ساختار چندتکه را کاهش داده و کارایی کلی را بهبود می‌بخشد. موتورهای سوئیچ رلوکتانس القایی با طراحی خاص خود مسیرهای مغناطیسی کوتاه‌تری ایجاد کرده که باعث افزایش گشتاور و بازده می‌شود؛ این ویژگی‌ها به ویژه در سامانه‌های پیش‌رانه





الکتریکی که نیازمند عملکرد بهینه و مصرف انرژی پایین هستند بسیار ارزشمند است و با توجه به رشد تقاضا برای خودروهای برقی و سامانه‌های صنعتی با بازده بالا، پژوهش در این حوزه اولویت یافته است. در مرجع [۱۳] موتور سوئیچ رلوکتانس القایی ۶/۴ با روتور سیم‌پیچی شده و اتصال کوتاه یکپارچه ویژه اتوبوس برقی طراحی و تحلیل شده که مسیر شار مغناطیسی کوتاه‌تر داشته و نسبت به موتور سوئیچ رلوکتانس معمولی ۶/۴ راندمان و توان بالاتری ارائه می‌دهد؛ این تحقیق تأکید می‌کند طراحی روتور با مسیر شار کوتاه اثربخشی بیشتری نسبت به سایر چیدمان‌ها دارد. همچنین در مرجع [۱۴] نوع دیگری از موتور سوئیچ رلوکتانس القایی ۱۲/۸ با روتور سیم‌پیچی شده معرفی و تحلیل شده که عملکرد آن با روتور چندتکه مقایسه شده و نشان داده شده استفاده از روتور یکپارچه با مسیر شار کوتاه ضمن حفظ بازده بالا، ساختار ساده‌تری داشته و فرآیند ساخت و مونتاژ را تسهیل می‌کند.

در این مقاله ساختار جدید «ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی»^۵ به‌طور کامل معرفی می‌شود. این ساختار با بهره‌گیری از اثر القایی در طراحی روتور، قادر است مسیر شار مغناطیسی را به‌طور مؤثری کوتاه کرده و سهم بیشتری از نیروی تولیدشده را به تولید گشتاور اختصاص دهد. در ادامه، پارامترهایی مانند گشتاور، شار مغناطیسی و سایر مشخصه‌های فنی این ماشین محاسبه شده و با نمونه‌های متداول مقایسه می‌شوند. برای اعتبارسنجی نتایج تحلیلی و بررسی عملکرد عملی ماشین، نمونه‌ای با ۱۲ قطب استاتور^۶ و ۱۰ قطب روتور^۷ با استفاده از روش اجزای محدود^۸ طراحی و نتایج آن ارزیابی می‌شود. همچنین در این فصل، عملکرد ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی با ماشین سنکرون آهن‌ربای دائم^۹ مقایسه شده و فرآیند راه‌اندازی^{۱۰} آن نیز مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

فرایند راه‌اندازی موتور سوئیچ رلوکتانس القایی با نمونه‌های متداول موتورهای سوئیچ رلوکتانس تفاوت‌های اساسی دارد. این تفاوت‌ها ضرورت بررسی دقیق‌تر این مرحله را آشکار می‌سازند، اما تاکنون تحلیل جامعی در این زمینه انجام نشده است. از این‌رو، در این مقاله برای نخستین‌بار تحلیل کاملی از فرایند راه‌اندازی این نوع موتور ارائه می‌شود و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، راهکارهایی جهت بهبود عملکرد در مرحله راه‌اندازی پیشنهاد خواهد شد.

۲- ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی

ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی، گونه‌ای از ماشین‌های با رلوکتانس متغیر است که در مقایسه با ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس متداول، از بازده تبدیل انرژی بیشتری برخوردار است. علت اصلی این بهبود عملکرد، استفاده از رساناهای القایی در ساختار روتور است؛ به طوری که ترکیب این رساناها با توپولوژی سوئیچ رلوکتانس موجب کاهش تلفات و بهبود رفتار مغناطیسی ماشین می‌شود. نمای کلی ساختار این ماشین در شکل مربوط نشان داده شده است.

استاتور از ورقه‌های نازک فولاد فرومغناطیسی با تلفات کم ساخته شده و سیم‌پیچی هر فاز به صورت متمرکز بر روی قطب‌های استاتور قرار گرفته است. این نحوه آرایش سیم‌پیچ‌ها ضمن تمرکز مؤثر شار مغناطیسی در ناحیه فعال، پاسخ دینامیکی ماشین را نیز بهبود می‌بخشد.

در روتور، سیم‌پیچ‌ها به صورت گام کوتاه^{۱۱} بر روی قطب‌ها پیچیده شده و دو سر آن‌ها به یکدیگر اتصال کوتاه شده‌اند. عبور شار مغناطیسی از این سیم‌پیچ‌ها سبب ایجاد جریان‌های القایی می‌شود که همچون سپر مغناطیسی عمل کرده و از نفوذ مستقیم شار به بدنه فلزی روتور جلوگیری می‌کنند. این پدیده علاوه بر کاهش تلفات ناشی از شار پراکندگی، در افزایش گشتاور نیز نقش مؤثری دارد. روتور نیز از لایه‌های نازک فولاد مغناطیسی ساخته شده تا تلفات ناشی از جریان‌های گردابی به حداقل برسد.

نحوه کارکرد این ماشین شباهت زیادی با ماشین سوئیچ رلوکتانس معمولی دارد. در حالت کارکرد موتوری، گشتاور الکترومغناطیسی زمانی تولید می‌شود که رلوکتانس در مسیر شار کاهش یابد. در لحظه‌ای که فاز «الف» تحریک شده و روتور در آستانه هم‌پوشانی با استاتور است، ماشین روتور را در جهت عقربه‌های ساعت حرکت می‌دهد تا رلوکتانس کمینه شود و شار به راحتی از میان شکاف هوایی عبور کند. اگر تحریک فازهای «ب» و «پ» نیز به ترتیب انجام گیرد، این چرخش ادامه یافته و حرکت پایدار فراهم خواهد شد.

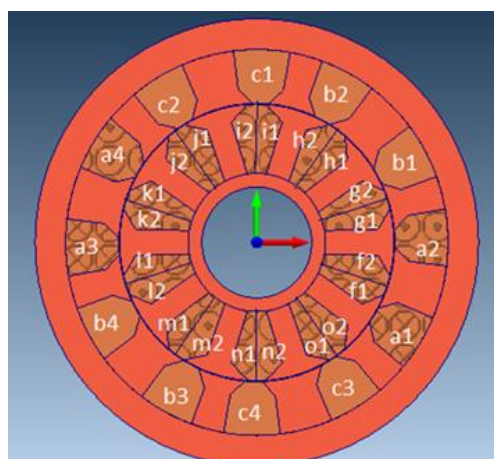
ساختار جدید موتور سوئیچ رلوکتانس القایی با ۱۲ قطب استاتور و ۱۰ قطب روتور، نسبت به نمونه‌ای که دارای ۱۲ قطب استاتور و ۸ قطب روتور است، از طول کلی کوتاه‌تری برخوردار است. این کاهش طول موتور به دلیل کوتاه‌تر شدن گام سیم‌پیچ‌های استاتور است که باعث می‌شود انتهای سیم‌پیچ‌ها یکدیگر را قطع نکنند و در نتیجه حجم کلی موتور کاهش یابد؛ این موضوع یک مزیت بسیار مهم در طراحی‌های فشرده و بهینه به شمار می‌آید.



برای تحقق این طراحی، لازم است ضخامت قطب‌های استاتور که سیم‌پیچ روی آن‌ها قرار دارد، تقریباً دو برابر ضخامت قطب‌های استاتوری باشد که سیم‌پیچ ندارند. این تغییر هندسی به حفظ عملکرد مغناطیسی مطلوب کمک می‌کند و همزمان با کاهش ابعاد فیزیکی موتور، ویژگی‌های الکترومغناطیسی آن را بهبود می‌بخشد.

در ساختار ۱۲/۱۰، سیم‌پیچی‌های استاتور و روتور به صورت متمرکز بر روی قطب‌ها قرار دارند که این موضوع موجب کاهش قابل توجه طول انتهای سیم‌پیچ می‌شود. از آنجا که مقاومت اهمی سیم‌پیچ متناسب با طول هادی است، کاهش طول سیم‌پیچ منجر به کاهش مقاومت و در نتیجه کاهش تلفات مسی در استاتور خواهد شد.

در موتور ۱۲/۱۰ پیشنهادی، طول سیم‌پیچ‌ها حدود ۲۰ درصد کمتر از ساختار ۱۲/۸ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت سیم‌پیچ‌های استاتور و تلفات اهمی نیز تقریباً به همین میزان کاهش می‌یابد که از مزایای مهم این توپولوژی به شمار می‌رود. شکل (۴-۱۱) نمای شماتیکی از موتور سوئیچ رلوکتانس القایی با توپولوژی ۱۲/۱۰ را نشان می‌دهد. در این تصویر، دو قطب روتور که با قطب‌های فاز یک استاتور همراستا شده‌اند، قابل مشاهده است. این موقعیت مربوط به حالتی است که بار خارجی روی روتور وجود ندارد و سیم‌پیچ‌های فاز یک استاتور تحریک شده‌اند؛ زیرا این حالت نشان‌دهنده موقعیت حداکثر پیوند مغناطیسی فاز یک است. این نوع طراحی، علاوه بر کاهش طول و حجم موتور، تأثیر قابل توجهی بر بهبود راندمان و کاهش تلفات دارد و می‌تواند در کاربردهایی که فضای محدود و وزن کم از اهمیت بالایی برخوردارند، بسیار مفید واقع شود. همچنین، افزایش ضخامت قطب‌های استاتور سیم‌پیچ‌دار، به افزایش ظرفیت عبور جریان و کاهش مقاومت اهمی کمک می‌کند که خود عاملی در کاهش تلفات مسی استاتور محسوب می‌شود.



شکل (۱): مقطع عرضی یک ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی سه فاز ۱۲/۱۰

جدول (۱): مشخصات موتور سوئیچ رلوکتانس القایی

Stator Outer Radius	115 mm
Stack Length	150 mm
Motor Length including End Windings	200
Number of stator teeth	12
Number of motor teeth	10
Maximum current	250 A
DC Voltage	600 V
Stator turn numbers	concentrated/30
Rotor turn numbers	concentrated/30
Airgap	0.5 mm
Core Material	M19
Current Density	15 A/mm ²



ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی ۱۲/۱۰ به عنوان یک ماشین رلوکتانس متغیر، نسبت به نمونه ۱۲/۸ دارای راندمان تبدیل انرژی بالاتری است. این به دلیل بهینه تر بودن طراحی سیم پیچی ها و بهبود مسیر شار مغناطیسی در آن است. استاتور این ماشین از ورقه های نازک ماده فرومغناطیسی نوع M-19 ساخته شده است که خواص مغناطیسی مناسبی داشته و تلفات هسته را کاهش می دهد. سیم پیچی های فاز به صورت متمرکز روی قطب های استاتور قرار گرفته اند که به کاهش تلفات و بهبود عملکرد مغناطیسی کمک می کند. همچنین، سیم پیچی های روتور به صورت گام کوتاه و دور هر قطب پیچیده شده و اتصال کوتاه شده اند که نقش مهمی در کاهش تلفات و بهبود گشتاور موتور دارد. روتور نیز از ورقه های ورقه ورقه شده آهن M-19 تشکیل شده است تا تلفات جریان گردابی کاهش یابد.

برای مقایسه عادلانه بین موتور سوئیچ رلوکتانس القایی ۱۲/۱۰ و موتور سوئیچ رلوکتانس معمولی، ابعاد بیرونی هر دو موتور برابر در نظر گرفته شده اند. قطر خارجی هر دو موتور ۱۱۵ میلی متر و طول استاتور برابر ۹۰ میلی متر است و فاصله هوایی ۰.۵ میلی متر تنظیم شده است. تعداد قطب های استاتور از طراحی موتور مرجع و تعداد قطب های روتور از مرجع [۱۴] انتخاب شده و برابر با ۱۰ در نظر گرفته شده است. همچنین، تعداد دور سیم پیچ ها در هر دو موتور برابر ۴۰ دور است تا پارامتر آمپر-دور مشابه باشد و بتوان گشتاور دو موتور را به طور دقیق مقایسه کرد. این نکته بسیار مهم است چرا که تفاوت در تعداد دور سیم پیچ ها باعث تغییر در گشتاور تولیدی می شود و مقایسه را غیرمنطقی می سازد.

با توجه به کاربرد موتورهای سوئیچ رلوکتانس القایی در خودروهای هیبریدی، که معمولاً نیازمند توان بالاتر از ۵۰ کیلووات و گشتاور بیش از ۲۰۰ نیوتن متر هستند، قدرت مورد نیاز در این طراحی حدود ۸۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. ضریب پرتابی شیار^{۱۳} (ضریب پر کردن فضای سیم پیچ در شیارهای استاتور) در موتور ۱۲/۱۰ مشابه نمونه ۱۲/۸ حدود ۶۰ درصد است. این موضوع نشان می دهد که فضای کافی برای سیم پیچ ها در هر دو موتور فراهم شده است.

از نظر هندسی و ابعادی، موتور ۱۲/۱۰ دارای طول کلی کمتری نسبت به موتور ۱۲/۸ است؛ به طور دقیق طول نهایی موتور ۱۲/۱۰ حدود ۲۷ درصد کمتر از موتور ۱۲/۸ است. این کاهش طول به علت طراحی گام کوتاه تر سیم پیچی ها و کاهش طول سیم پیچ ها استاتور به وجود آمده است که موجب کاهش حجم کلی موتور، کاهش وزن و بهبود چگالی توان موتور می شود. چنین مزایایی می تواند تاثیر قابل توجهی در بهبود کارایی و عملکرد موتور در کاربردهای حساس به اندازه و وزن مانند سیستم های پیشرانده خودروهای هیبریدی داشته باشد.

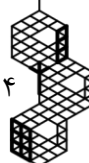
در تحلیل بر پایه روش اجزای محدود، از المان های مثلثی استاندارد استفاده گردیده است که برای مدل سازی دوبعدی مناسب می باشند. مش بندی به گونه ای انجام شده است که در نواحی با تغییرات کم شار مغناطیسی، مانند یوغ استاتور و روتور و همچنین بخش های سیم پیچی، اندازه المان ها بزرگ تر انتخاب شده و حداکثر ابعاد آن ها حدود نیم میلی متر در نظر گرفته شده است. در مقابل، در نواحی دارای گرادیان شدید شار، نظیر لبه قطب ها و فاصله هوایی، به منظور افزایش دقت محاسبات، اندازه المان ها کاهش یافته و حدود دو دهم میلی متر تنظیم شده است.

برای مرز خارجی دامنه حل، شرط مرزی دیریکله به صورت خودکار توسط نرم افزار اعمال شده است. همچنین برای مواد مغناطیسی هسته استاتور و روتور، از فولاد الکتریکی استاندارد استفاده شده و منحنی غیرخطی مغناطیس شونده آن از کتابخانه مواد نرم افزار فراخوانی گردیده است.

در مجموع، این پارامترها نشان دهنده بهبودهای قابل توجهی در طراحی موتور سوئیچ رلوکتانس القایی ۱۲/۱۰ نسبت به نمونه های قبلی است و زمینه ساز پیشرفت های بیشتر در بهره وری و عملکرد این نوع ماشین ها می شود.

۳- بررسی فرایند راه اندازی

اهمیت مطالعه فرایند راه اندازی از آن جا ناشی می شود که وجود سیم پیچ های اتصال کوتاه در روتور، موجب ایجاد مسیرهای گذرای متفاوتی برای شار مغناطیسی می گردد. پیش از راه اندازی و در لحظه نخست اعمال جریان به سیم پیچ های استاتور، هنوز جریانی در روتور القا نشده است تا نقش سپر مغناطیسی را ایفا کند و از نفوذ شار به دندان های روتور جلوگیری نماید. بنابراین انتظار می رود در





لحظات ابتدایی، شار مغناطیسی به ناچار از مسیرهای بلند عبور کند و مقاومت مغناطیسی بالاتری را تجربه نماید. این موضوع نیازمند تحلیل دقیق به کمک شبیه‌سازی عددی و روش اجزای محدود است.

مسئله اصلی آن است که آیا ماشین در چنین شرایطی، با وجود مسیرهای بلند شار، توانایی تولید گشتاور کافی برای آغاز چرخش را دارد یا خیر. همچنین باید مشخص شود که پس از شروع حرکت و ایجاد جریان‌های القایی در سیم‌پیچ‌های روتور، آیا مسیر شار کوتاه‌تر می‌شود و عملکرد مغناطیسی ماشین بهبود می‌یابد یا خیر. تاکنون این پرسش‌ها به‌طور جامع برای این خانواده از موتورهای مطرح و بررسی نشده‌اند، زیرا این ساختار موتور نسبتاً جدید بوده و بیشتر مطالعات پیشین بر تحلیل حالت ماندگار آن متمرکز بوده‌اند. از این‌رو، تحلیل رفتار گذرای راه‌اندازی همچنان موضوعی باز و نیازمند پژوهش‌های دقیق‌تر است.

برای شبیه‌سازی فرایند راه‌اندازی، ابتدا تنظیمات شبیه‌سازی به گونه‌ای انجام می‌شود که حالت گذرا شبیه‌سازی شود، نه حالت ماندگار. به این منظور، شکل جریان تحریک مطابق با شکل (۲) به هر یک از فازهای موتور اعمال می‌شود. با اعمال این جریان، در لحظات اولیه توزیع شار مغناطیسی در موتور محاسبه می‌شود.

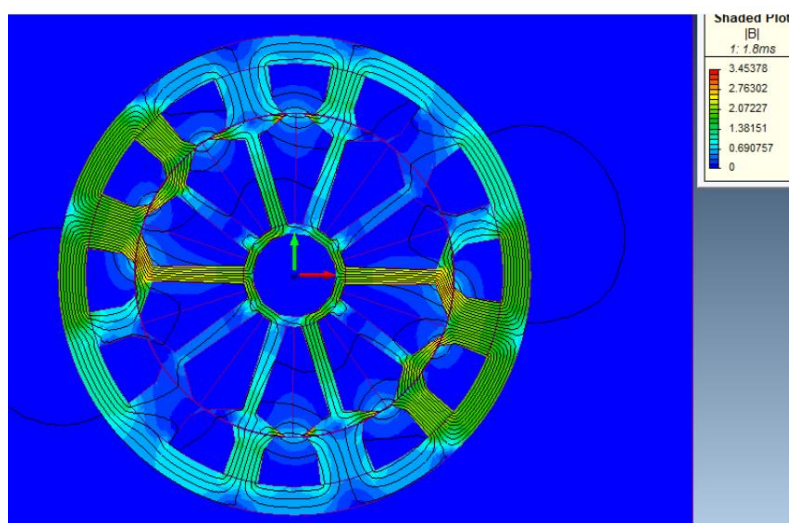
در اولین لحظات، همانطور که در شکل (۲-الف) مشاهده می‌شود، مسیر شار کوتاه نبوده و شار به صورت گسترده در تمام قطب‌های استاتور و روتور پخش شده است؛ به عبارت دیگر، تمامی قطب‌های استاتور و روتور دارای شار مغناطیسی می‌باشند.

علت این موضوع آن است که در لحظات اولیه، جریان هنوز به شکل مناسبی در سیم‌پیچ‌های روتور القا نشده و شار مغناطیسی کافی برای ایجاد توازن با شار استاتور شکل نگرفته است. با این وجود، مشاهده می‌شود که اندکی پس از شروع حرکت روتور، مسیرهای بلند شار به تدریج کوتاه‌تر می‌شوند. این کاهش مسیر شار بلند و تمرکز شار به صورت شار کوتاه، به تدریج ایجاد می‌شود.

این روند گذرا در فرایند راه‌اندازی را می‌توان به ترتیب زمانی در شکل‌های (۲-الف) تا (۲-هـ) مشاهده کرد، که در نهایت مطابق با شکل (۲-هـ) مسیر شار کاملاً کوتاه شده و دیگر هیچ شار قابل توجهی در قطب‌های روتور و قطب‌های تحریک نشده استاتور دیده نمی‌شود.

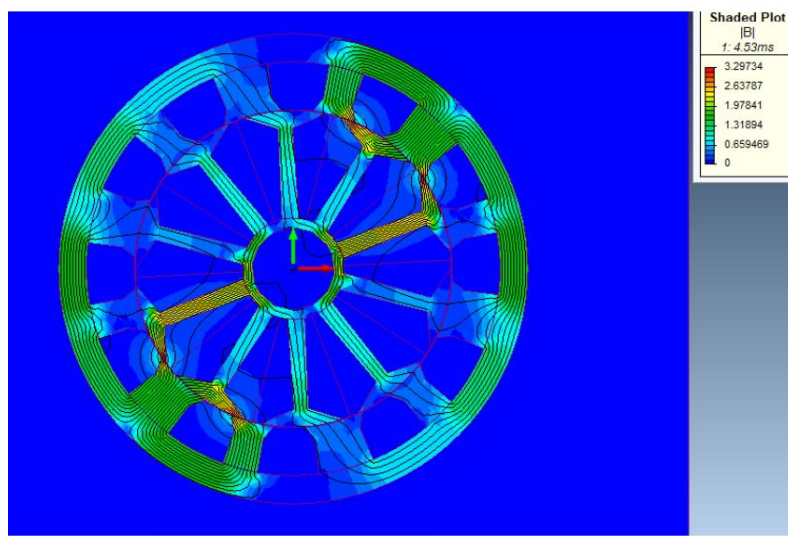
این نتیجه کاملاً مطلوب است؛ زیرا نشان می‌دهد که اگرچه در ابتدای کار مسیر شار کوتاه نیست، اما نهایتاً پس از اعمال حدود پنج پالسی جریان، مسیر شار کوتاه شده و مسیر شار کوتاه به‌صورت پایدار ایجاد می‌شود. شکل مربوط به گشتاور راه‌اندازی موتور در این فرایند در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، در لحظات اولیه راه‌اندازی گشتاور موتور در این لحظات اولیه کم است. این نتیجه منطقی و قابل انتظار است، زیرا در آغاز راه‌اندازی شار مغناطیسی هنوز در مسیر کوتاه متمرکز نشده است و این امر باعث ایجاد گشتاورهای منفی در قطب‌های تحریک نشده استاتور می‌شود که به کاهش گشتاور کل موتور منجر می‌شود. از سوی دیگر، به دلیل عدم تمرکز شار در اطراف قطب‌های تحریک شده، مقداری از شار به نواحی دیگر منتقل می‌شود که این موضوع باعث کاهش شار مؤثر در قطب‌های تحریک شده و در نهایت موجب کاهش گشتاور کل موتور می‌شود.

همان‌طور که شکل گشتاور موتور نشان می‌دهد، با گذشت زمان و کوتاه شدن مسیر شار، گشتاور موتور نیز افزایش یافته و در نهایت به مقدار مطلوب و مورد انتظار خود می‌رسد.

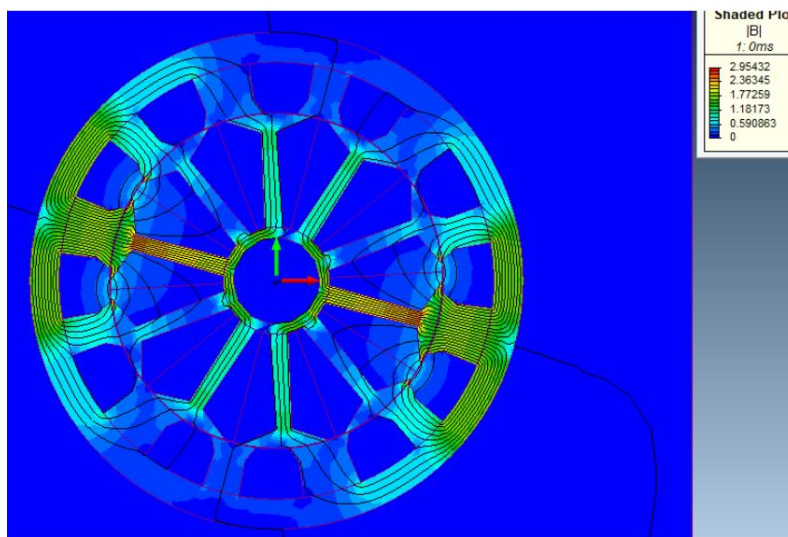


(الف)

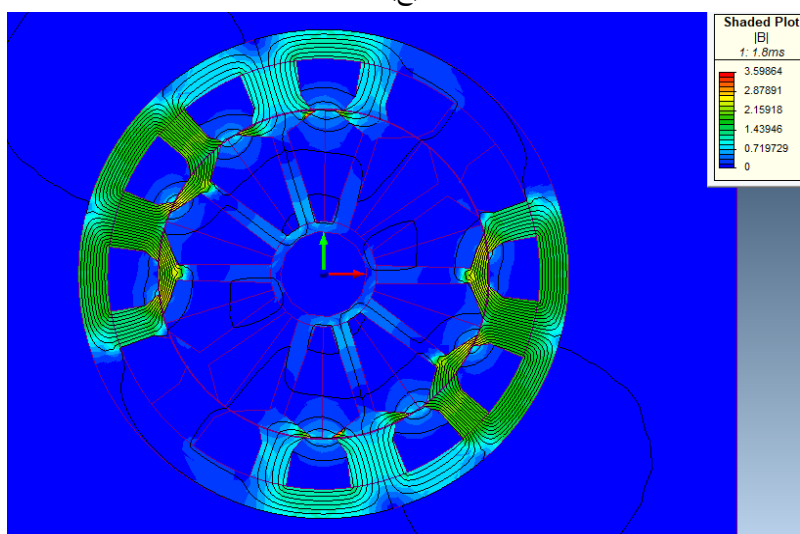




(ب)

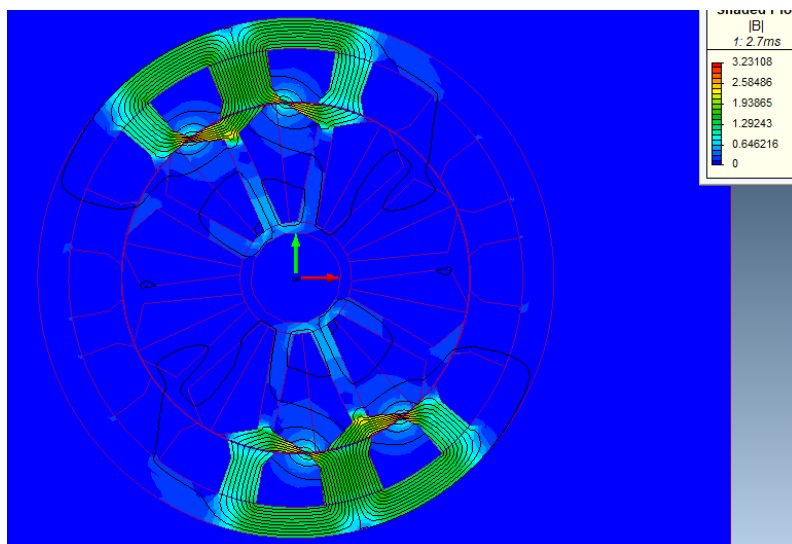


(ج)



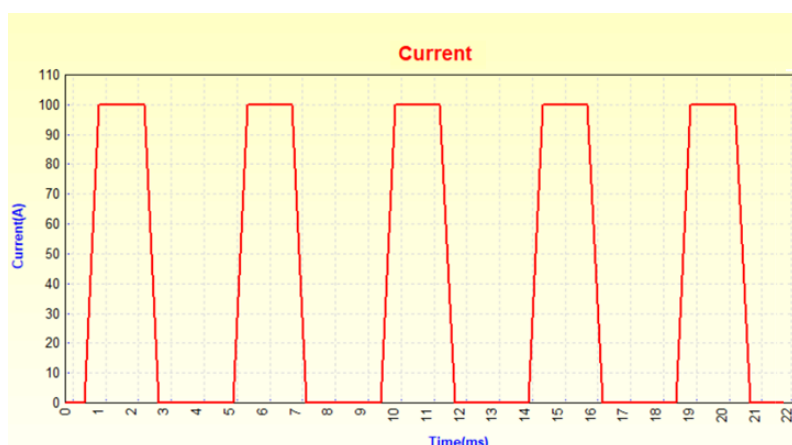
(د)



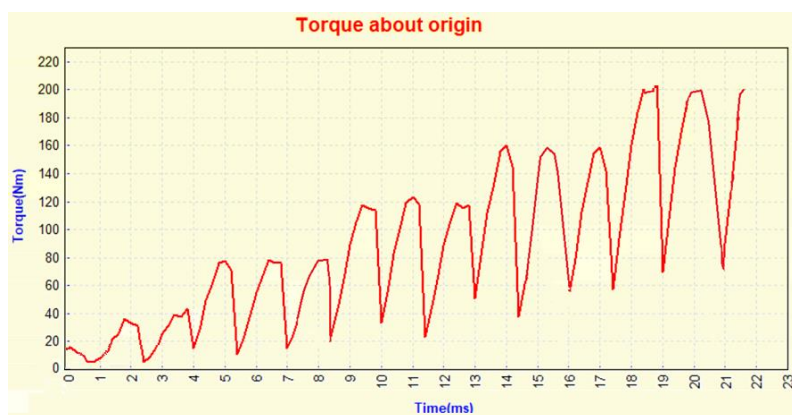


(ه)

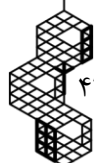
شکل (۲): توزیع شار مغناطیسی در ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی در فرایند راه اندازی



شکل (۳): شکل جریان تحریک فاز



شکل (۴): گشتاور گذرا در فرایند راه اندازی





بررسی فرایند راه اندازی حاوی نکات زیر است :

الف) در لحظات اولیه ی راه اندازی موتور، به دلیل عدم وجود جریان در سیم پیچ های روتور، هیچ شار مغناطیسی ای ایجاد نمی شود و شار استاتور، همه ی یوگ استاتور و قطب های روتور را اشغال می کند. این امر باعث ایجاد گشتاور منفی روی قطب هایی می شود که در مکان نامناسبی قرار دارند؛ یعنی در شرایط تحریک، قادر به ایجاد گشتاور مثبت نیستند. از طرفی، پخش شار در خانه ی قطب ها موجب کاهش نسبی شار مؤثر در سر قطب هایی می شود که در موقعیت مناسب تحریک برای ایجاد گشتاور مثبت قرار دارند.

ب) با این حال، نکته ی مثبت و امیدوار کننده این است که در لحظه ی صفر راه اندازی، گشتاور مثبت راه اندازی وجود دارد. این امر بسیار مهم و حیاتی است، چرا که اگر این گشتاور وجود نداشت، موتور در راه اندازی دچار مشکل می شد. مثلاً بدترین حالت این بود که گشتاور راه اندازی مقداری منفی می بود. در این صورت، امکان راه اندازی موتور از بین می رفت. ولی خوشبختانه، این مشکل در این موتور وجود ندارد.

ج) با گذشت زمان و اعمال پالس های تحریک بیشتر، کم کم مسیر شار به سمت کوتاه شدن می رود و گشتاور بالاتر می رود. زیرا به تدریج جریان در روتور القا می شود و شار مخالف روتور باعث برقراری مسیر شار کوتاه تری می شود و هم زمان، گشتاور موتور نیز افزایش می یابد؛ چون مسیر شار کوتاه تر می شود و نهایتاً به شکل مطلوب می رسد.

توضیح: در این بند به پدیده ای اشاره شده که طی آن، با گذشت زمان، به تدریج موتور به وضعیت پایدار و بهینه ای از شار و گشتاور می رسد.

د) نکته ی قابل مشاهده این است که گشتاور راه اندازی کم است؛ یعنی مقدار اولیه ی گشتاور کمتر از مقدار نهایی است، که این موضوع در برخی بارهای مکانیکی مشکل ایجاد می کند. البته این مسئله قابل حل است و در سایر ماشین های الکتریکی نیز ممکن است این مشکل وجود داشته باشد. برای حل این مشکل، می توان در لحظات اولیه ی راه اندازی، اندازه ی جریان را بالا برد تا گشتاور راه اندازی افزایش یابد. چون نیاز به افزایش جریان فقط در لحظات کوتاه اولیه ی راه اندازی است، این امر مشکل خاصی برای مدارات الکترونیک قدرت ایجاد نمی کند؛ زیرا سوئیچ های الکترونیکی قدرت قابلیت ایجاد جریان بالاتر از حد نامی خود را در لحظات گذرا دارند. از طرفی، جریان بالای راه اندازی، چون در مدت زمان کوتاهی اعمال می شود، آسیبی به سیم پیچ های موتور نمی زند و مشکل حرارتی هم ایجاد نمی کند.

ه) با توجه به نکات فوق، می توان نتیجه گرفت که این موتور مشکلی در راه اندازی ندارد و فرایند راه اندازی به آسانی صورت می گیرد.

۴- نتیجه گیری

ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی ۱۰/۱۲ با ویژگی های منحصر به فرد خود توانسته است توجه زیادی را به خود جلب کند. طراحی خاص سیم پیچ های روتور به ایجاد حفاظ مغناطیسی مؤثر و جلوگیری از ورود خطوط میدان مغناطیسی به بدنه روتور کمک می کند که این طراحی بر روی ایجاد مسیرهای مغناطیسی کوتاه تر تأثیر گذاشته و در نتیجه کارایی و عملکرد ماشین را افزایش می دهد. ماشین ۱۰/۱۲ شامل ویژگی های خاصی است که آن را به گزینه ای مناسب برای پیشراندهای الکتریکی تبدیل می کند؛ از جمله چگالی گشتاور بالا که امکان تولید گشتاور بیشتر در حجم مشابه را فراهم می کند، کاهش تلفات مس که منجر به کاهش نیاز به سیستم های خنک کننده و افزایش کارایی ماشین می شود، بازده بالا که به معنای استفاده بهینه تر از انرژی و کاهش هدررفت آن است، و طراحی بهینه سیم پیچ ها که موجب بهبود عملکرد و کارایی ماشین می شود. بررسی دقیق فرایند راه اندازی موتور نشان می دهد که این نوع موتور از نظر دینامیکی و الکترومغناطیسی قابلیت راه اندازی مناسبی دارد؛ اگرچه در لحظات اولیه ی راه اندازی به دلیل عدم وجود جریان در سیم پیچ های روتور، توزیع شار مغناطیسی به صورت یکنواخت انجام نمی شود و گشتاور منفی در برخی قطب ها ایجاد می شود، اما حضور گشتاور مثبت در لحظه ی صفر مانع از بروز مشکل در راه اندازی می شود که این موضوع اهمیت بالایی دارد. با گذشت زمان و اعمال تدریجی پالس های تحریک، مسیر شار اصلاح شده و کوتاه تر می شود و در نتیجه گشتاور موتور به تدریج افزایش یافته و به مقدار مطلوب می رسد. هرچند گشتاور اولیه ممکن است برای برخی بارهای مکانیکی کافی نباشد، این مشکل با افزایش کوتاه مدت جریان در لحظه ی شروع قابل حل است؛ از آنجا که مدارهای الکترونیکی قدرت توانایی عبور جریان گذرای بالا را دارند و این افزایش جریان در زمان بسیار کوتاهی اعمال می شود، نه تنها آسیبی به موتور وارد نمی شود، بلکه از نظر حرارتی نیز بی خطر است. در مجموع، نتایج تحلیل فرایند راه اندازی نشان می دهد که موتور مذکور از قابلیت راه اندازی مناسب و بدون نیاز به تمهیدات پیچیده برخوردار بوده و





می‌تواند در کاربردهای صنعتی به‌خوبی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه تمرکز اصلی این پژوهش بر تحلیل فرایند راه‌اندازی موتور القایی سوئیچ رلوکتانس ۱۲/۱۰ بوده است، بررسی عملکرد حالت ماندگار و راندمان تحت شرایط مختلف بارگذاری در این مقاله مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین، به‌عنوان ادامه مسیر تحقیق، مطالعه دقیق رفتار موتور در حالت پایدار، شامل ارزیابی تلفات، بازده، یکنواختی گشتاور و اثر تغییر پارامترهای سازه‌ای و الکتریکی، در دستور کار پژوهش‌های آتی قرار خواهد گرفت. نتایج این تحلیل‌ها می‌تواند تکمیل‌کننده یافته‌های این مقاله و گامی مهم در ارزیابی قابلیت به‌کارگیری این ساختار در سامانه‌های محرکه پیشرفته باشد.

مراجع

- [1]. L. Liu, Y. Huang, M. Zhao, and Y. Ruan, "Parametric modeling and optimization of switched reluctance motor for EV," *The Applied Computational Electromagnetic Society Journal*, vol. 37, no. 9, 2022, doi: 10.13052/2022.ACES.J.370904.
- [2]. A. Infantraj and M. S. Kumaran, "Evaluation and classification of stator turn-to-turn faults using electrical equivalent circuits for surface permanent magnet brushless direct current motors," *Journal of Power Electronics*, vol. 23, no. 9, 2023, doi: 10.1007/s43236-023-00663-7.
- [3]. S. Choi, W. Lee, and A. Kang, "Accuracy improvement of maximum torque per ampere control for interior permanent magnet synchronous motor drives reflecting PM flux linkage variations," *Journal of Power Electronics*, vol. 23, no. 9, 2023, doi: 10.1007/s43236-023-00696-y.
- [4]. L. Liu, P. Luo, and J. Zhao, "Sensorless initial position estimation strategy for permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor drives based on dual rotating high-frequency signal injection," *Journal of Power Electronics*, vol. 23, no. 9, 2023, doi: 10.1007/s43236-023-00703-2.
- [5]. T. J. E. Miller, "Electronic control of switched reluctance machines," Reed Educational and Professional Publishing, New York, NY, USA, pp. 227–245, 2001, doi: 10.1016/B978-0-7506-5073-1.X5000-7.
- [6]. L. Liu, Y. Huang, M. Zhao, and Y. Ruan, "Parametric modeling and optimization of switched reluctance motor for EV," *The Applied Computational Electromagnetic Society Journal*, vol. 37, no. 9, 2022, doi: 10.13052/2022.ACES.J.370904.
- [7]. B. Khan, F. Khan, W. Ullah, M. Umair, and S. Hussain, "Slot filling factor calculation and electromagnetic performance of single phase electrically excited flux switching motors," *The Applied Computational Electromagnetic Society Journal*, vol. 35, no. 8, 2020, doi: 10.47037/2020.ACES.j.350811.
- [8]. M. Abbasian, M. Moallem, and B. Fahimi, "Double stator switched reluctance motors: Fundamentals and magnetic force analysis," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 3, pp. 589–597, Sep. 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2049149.
- [9]. M. Popescu, D. Staton, A. Boglietti, D. Hawkins, and J. Goss, "Modern heat extraction systems for electrical machines – a review," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 3, pp. 2167–2175, May 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2543181.
- [10]. H. Hayashi et al., "Efficiency improvements of switched reluctance motors with high-quality iron steel and enhanced conductor slot fill," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 4, pp. 819–825, Dec. 2009, doi: 10.1109/TEC.2009.2037305.
- [11]. S. Li, S. Zhang, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Modeling, design optimization, and applications of switched reluctance machines: A review," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 3, pp. 2660–2681, May 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2903945.
- [12]. T. Guo, T. Schofield, and A. Emadi, "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, Dec. 2016, doi: 10.1109/TEC.2016.2621385.
- [13]. A. Madanimohammadi, M. Abbasian, M. Delshad, and H. Saghafi, "Electromagnetic and thermal analysis of a 6/4 induction switched reluctance machine for electric vehicle application," *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 38, no. 5, pp. 361–368, 2022, doi: 10.13052/2023.ACES.J.380509.





- [14]. M. Azamian, M. Abbasian, and D. Gerling, "Preliminary evaluation of induction switched reluctance motor for electric vehicle application," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 73492–73501, May 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3084892.

زیر نویس ها

-
- ¹ Torque
 - ² Transient
 - ³ Magnetic flux
 - ⁴ Segmental rotor
 - ⁵ Induction Switched Reluctance Machine
 - ⁶ Stator pole
 - ⁷ Rotor pole
 - ⁸ Finite Element Method
 - ⁹ Permanent Magnet Reluctance Machine
 - ¹⁰ Startup Process
 - ¹¹ Short step
 - ¹² slot fill factor

