	Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology Vol. 15/ No. 57/ Spring 2024 P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://jipet.iaun.ac.ir/
---	---

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1403.15.57.5.4>
Research Article

Comparison of Double Stator Switched Reluctance Machine and Induction Switched Reluctance Machine

Mohammad Joodi, *PhD Student*, Mohammadali Abbasian, *Assistant Professor*, Majid Delshad, *Associate Professor*

Faculty of Engineering- Isfahan(Khorasgan)Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran
mohammad.joode@gmail.com, m.abbasian@khuif.ac.ir, delshad@khuif.ac.ir

Abstract

Design and optimization of high-power electric machines for the use of electric vehicles is one of the important issues today for the development of green technologies. Engines required for electric vehicles must have a power of more than 50 kW and must also produce torques of more than 200 Nm. The motors currently most commonly used in electric vehicle propulsion are permanent magnet synchronous machines. Due to the many problems of using permanent magnets in electric machines, the use of non-magnet electric machines such as switched reluctance machines have received much attention. Double stator switched reluctance machine is one of the newest types of these machines. Recently, another new type of electric machine called induction switched reluctance machine has been introduced for the use of electric vehicles. In this machine, the rotor conductors act like a magnetic shield by deflecting the magnetic flux, preventing magnetic field lines from passing through the rotor body. In this paper, a double-stator switched reluctance machine and an induction switched reluctance machine are considered and their properties are extracted by finite element method. The simulation results including torque profile, torque density and efficiency are presented and compared. Finally, the best topology for electric propulsion is proposed.

Keywords: double stator, electric vehicle, induction, switched reluctance machine, torque

Received: 13 June 2022

Revised: 22 July 2022

Accepted: 22 August 2022

Corresponding Author: Dr. Mohammadali Abbasian

Citation: M. Joodi, M.A. Abbasian, M. Delshad, "Comparison of double stator switched reluctance machine and induction switched reluctance machine", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 57, pp. 75-84, Spring 2024 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1403.15.57.5.4>

مقاله پژوهشی

مقایسه ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی با ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور

محمد جودی، دانشجوی دکترا، محمدعلی عباسیان، استادیار، مجید دلشاد، دانشیار

دانشکده فنی مهندسی - واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
mohammad.joode@gmail.com, m.abbasian@khuisf.ac.ir, delshad@khuisf.ac.ir

چکیده: طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌های الکتریکی توان بالا برای کاربرد خودروهای الکتریکی یکی از موضوع‌های مهم امروزه برای توسعه فناوری‌های سبز است. موتورهای مورد نیاز برای خودروهای برقی باید توانی بالاتر از ۵۰ کیلووات داشته باشند و همچنین باید گشتاورهای بیشتر از ۲۰۰ نیوتن-متر را تولید کنند. موتورهایی که در حال حاضر بیشتر در قوای محرکه خودروهای برقی استفاده می‌شوند از نوع ماشین سنکرون آهنربای دائم هستند. با توجه به مشکل‌های فراوان استفاده از آهنربای دائم در ماشین‌های الکتریکی، استفاده از ماشین‌های الکتریکی بدون آهنربا مانند ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور یکی از جدیدترین نوع این ماشین‌ها است. اخیراً نوع جدید دیگری از ماشین‌های الکتریکی با نام ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی برای کاربرد خودرو برقی معرفی شده است. در این ماشین، هادی‌های روتور با انحراف شار مغناطیسی مانند سپر مغناطیسی عمل می‌کنند و از عبور خطوط میدان مغناطیسی به داخل بدنه روتور جلوگیری می‌کنند. در این مقاله یک ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور (DSSRM) و یک ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی (ISRM) در نظر گرفته شده و ویژگی‌های آنها به روش اجزای محدود استخراج می‌شود. نتایج شبیه‌سازی شامل شکل گشتاور، چگالی گشتاور و راندمان ارائه و مقایسه شده است. در نهایت، بهترین توپولوژی برای پیکربندی ماشین‌های الکتریکی پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: القایی، دو-استاتور، گشتاور، ماشین سوئیچ رلوکتانس، وسایل نقلیه الکتریکی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۳/۲۳

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۴/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۵/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدعلی عباسیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: اصفهان - ارغوانیه - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

به منظور کمینه نمودن آلاینده‌های سوخت‌های فسیلی و افزایش راندمان خودروها، وسایل نقلیه الکتریکی و خودروهای هیبریدی^۱ به عنوان یک فناوری نوین در حال شکل‌گیری هستند. خودروهای برقی به جای موتور احتراق داخلی^۲، دارای موتور الکتریکی هستند. از طرف دیگر اندازه موتور احتراق داخلی در خودروهای هیبریدی از خودروهای معمولی کوچک‌تر است. در نتیجه، آلاینده‌های کمتری تولید می‌کنند و مصرف سوخت بهتری دارند [۱].

استفاده از خودروهای برقی به دهه هفتاد میلادی بر می‌گردد. از آن زمان تاکنون بسیاری از شرکت‌های سازنده خودرو در دنیا به ساخت خودروها با پیش‌رانه برقی^۳ روی آورده‌اند. در این دوره طراحان و مهندسان خودرو بر روی خودروهای برقی کار کرده‌اند و اکثر خودروسازان نمونه‌های اولیه برقی خود را روانه بازار کرده‌اند یا حتی آنها را به تولید انبوه رسانده‌اند. ولی چالش‌های اصلی که بر میزان پذیرش خودروهای الکتریکی تأثیر منفی می‌گذارد، هزینه اولیه بالا، کمبود ایستگاه‌های شارژ و زمان شارژ است [۲]. خودروهای برقی از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده که مهم‌ترین آنها موتورهای الکتریکی، کنترل‌کننده‌ها و سامانه ذخیره انرژی الکتریکی هستند. قسمت اصلی سیستم محرک خودروهای الکتریکی شامل موتور الکتریکی و درایو است که بهینه‌سازی این دو جزء موضوع اصلی مطالعه‌های اخیر در این رابطه بوده است. ماشین‌های الکتریکی به کار رفته در خودروهای برقی باید دارای ویژگی‌هایی مانند گشتاور بالا، چگالی توان بالا، قابلیت اطمینان بالا^۴، راندمان بالا، سطح کم صدا و لرزش و هزینه مناسب باشند [۳]. موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به طور گسترده در پیش‌رانه خودروهای برقی استفاده می‌شوند [۴]. موتورهای سنکرون مغناطیس دائم از گشتاور و چگالی توان بالا سود می‌برند، اما مواد مغناطیس دائم به کار رفته در آنها از مواد کمیاب خاکی مانند نتودیمیم^۵ تولید می‌شوند. در سال‌های اخیر، قیمت مواد خاکی کمیاب افزایش یافته و دچار نوسان‌های شدید شده است [۵]. لذا مهندسان و محققان تلاش‌های زیادی را برای حذف یا حداقل کاهش مواد مغناطیس دائمی از ماشین‌های الکتریکی به کار رفته در سیستم‌های محرکه الکتریکی انجام داده‌اند.

ماشین سوئیچ رلوکتانس گزینه مهم دیگر برای کاربرد در وسایل نقلیه الکتریکی است. تلاش‌های زیادی برای توسعه ماشین سوئیچ رلوکتانس به عنوان یک جایگزین بالقوه در پیش‌رانه‌های الکتریکی صورت گرفته است [۶]. استفاده از موتورهای سوئیچ رلوکتانس به اواخر قرن نوزدهم میلادی باز می‌گردد. در آن موقع توسعه این گونه موتورها و درایوهای لازم آن به دلیل فقدان کلیدهای با سرعت قطع و وصل بالا متوقف گردید. با رشد صنعت الکترونیک قدرت از جمله ساخت کلیدهای با سرعت عملکرد و جریان قطع بالا در اوایل دهه ۶۰ و نظر به مزیت‌های موتورهای سوئیچ رلوکتانس، توجه محققان به تکمیل و رشد این گونه موتورها و درایوهای آنها جلب گردید. گشتاور تولیدی در ماشین سوئیچ رلوکتانس تنها از نوع گشتاور رلوکتانسی است. در نتیجه قابلیت تولید گشتاور در این ماشین‌ها زیاد نیست. این ماشین الکتریکی چون آهنربای دائمی است می‌تواند در دماهای بالا و سرعت چرخش بالا کار کند [۷].

در دهه‌های اخیر، دانشمندان برای طراحی و توسعه توپولوژی‌های ماشین سوئیچ رلوکتانس جدید با گشتاور بالاتر و نویز و ارتعاش کمتر کار کرده‌اند [۸]. محققان به توسعه توپولوژی‌های انقلابی ماشین سوئیچ رلوکتانس برای غلبه بر مشکلات ماشین سوئیچ رلوکتانس فکر کرده‌اند. مثلاً موتور سوئیچ رلوکتانس با شار محوری در مرجع [۹] معرفی شده است که دارای گشتاور بالاست. به عنوان مثال دیگر، یک موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور غیریکپارچه^۶ با مسیر شار مغناطیسی کوتاه، به نام ماشین رلوکتانس سوئیچ سگمنتال^۷، توسط مکرو [۸] پیشنهاد شده است. نسخه بهبودیافته این ماشین جدید با سیم‌پیچی بهینه در مرجع [۱۰] ارائه شده است. به عنوان مثالی دیگر در سال ۲۰۲۰، یک ماشین سوئیچ رلوکتانس با روتور سگمنتال برای کاربرد وسایل نقلیه الکتریکی با گشتاور ریبیل کم طراحی شده است [۱۱].

ماشین سوئیچ رلوکتانس با مسیر شار مغناطیسی کوتاه، دسته‌ای از ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس است که از مسیر شار مغناطیسی کوتاه بهره می‌برد. در این ماشین‌ها شار کل یوغ استاتور^۸ و روتور را دور نمی‌زند. این امر منجر به تلفات آهن کمتر، نویز و لرزش کمتر و چگالی گشتاور بیشتر می‌شود. ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس سگمنتال جزو این دسته ماشین‌ها هستند. این نوع ماشین‌ها را می‌توان در پیکربندی‌های مختلف طراحی کرد. برخی از این ماشین‌ها دارای استاتور سگمنتال و روتور غیر سگمنتال هستند، اما برخی دیگر از توپولوژی‌ها دارای روتور غیر سگمنتال و استاتور سگمنتال هستند [۱۲].

ماشین‌های سویچ رلوکتانس سگمنتال می‌توانند تا ۵۰ درصد بیشتر از ماشین‌های سویچ رلوکتانس معمولی گشتاور تولید کنند. دلیل این افزایش چشمگیر گشتاور آن است که خطوط شار مغناطیسی در ماشین‌های سویچ رلوکتانس سگمنتال بیشتر در جهت حرکتی جهت‌گیری می‌شوند. علاوه بر این، نیروهای شعاعی دامنه کمتری دارند و موتور نویز و لرزش کمتری را تجربه می‌کند. این یک دستاورد بزرگ در زمینه طراحی ماشین سویچ رلوکتانس است، اما یک اشکال مهم وجود دارد که توسعه ماشین‌های سویچ رلوکتانس سگمنتال را دشوار می‌کند. مشکل این است که روتور یا استاتور ماشین‌های سویچ رلوکتانس سگمنتال از چندین قطب فرومغناطیسی تشکیل شده که در یک محفظه غیر فرومغناطیسی نصب شده‌اند. این ساختار مونتاژ ماشین را سخت می‌کند و به‌ویژه از دستیابی به شکاف هوایی بسیار کوچک و یکنواخت بین استاتور و روتور جلوگیری می‌کند. اگر ماشین سویچ رلوکتانس سگمنتال از یک شکاف هوایی بسیار کوچک بهره نبرد، اندوکتانس فاز در موقعیت همپوشانی به اندازه کافی بزرگ نخواهد بود که موتور بتواند سطوح گشتاور بسیار بالایی تولید کند [۱۳]. همچنین روند مونتاژ روتور سگمنتال یا استاتور سگمنتال در فرآیند تولید انبوه ماشین ممکن است باعث عدم یکنواختی شکاف فاصله هوایی شود که منجر به عدم تعادل نیروهای شعاعی می‌شود. این نیروهای نامتعادل، منبع اصلی ارتعاش در ماشین‌های الکتریکی هستند [۱۴]. یک نمونه خلاقانه دیگر از ماشین سویچ رلوکتانس که دارای گشتاور بالاست، ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور است که برای کاربرد وسایل نقلیه در سال ۲۰۱۰ معرفی شده است [۱۵]. در این ماشین، یک روتور استوانه‌ای توخالی بین دو استاتور قرار گرفته است. چگالی گشتاور در ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور دو برابر ماشین سویچ رلوکتانس معمولی است. اما ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور دارای ساختاری پیچیده است و مونتاژ آن بسیار دشوار است. در مرجع [۱۶] یک موتور سویچ رلوکتانس دو-استاتور با روشی جدید طراحی شده است. نتایج ارائه شده حاکی از برتری ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور در تولید گشتاور و توان را دارد. در این مرجع نیروهای حرکتی و همچنین گشتاور موتور با تحلیل اجزای محدود محاسبه و بهینه‌سازی انجام شده است.

برای اینکه بتوان بدون قطعه‌ای ساختن روتور یا استاتور، بتوان مسیر شار را در موتور کوتاه کرد، در مرجع [۱۷] ساختاری ارائه شده است. در این ساختار می‌توان با بهره‌گیری از اثر القای مغناطیسی، مسیر شار را کوتاه کرد و درصد بیشتری از نیروهای تولیدی ماشین را در راستای تولید حرکت و گشتاور به‌کار گرفت. این امر می‌تواند منجر به تحویلی بزرگ در طراحی ماشین‌های الکتریکی و نحوه نگرش به بهینه‌سازی آن شود. برای دستیابی به این هدف، در این مرجع "ماشین سویچ رلوکتانس القایی"^۹ معرفی گردیده است.

در این مقاله، یک ماشین سویچ رلوکتانسی القایی با توان ۱۶۰ کیلووات برای کاربرد خودرو برقی معرفی شده و عملکرد آن با یک موتور سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور مقایسه شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه، پس از معرفی هر دو ماشین، با استفاده از روش اجزای محدود، گشتاور آنها در جریان‌های مختلف محاسبه می‌شود و راندمان محاسبه می‌گردد.

۲- ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور

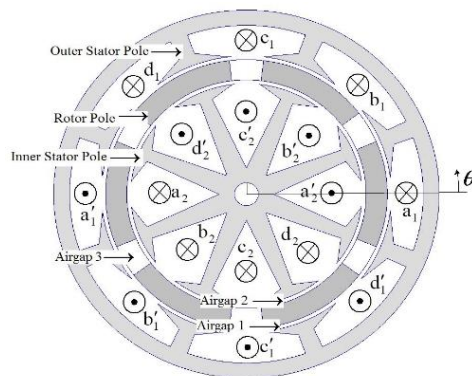
ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور^{۱۰} (DSSRM)، یک ماشین رلوکتانس متغیر است که دارای راندمان تبدیل انرژی بیشتری نسبت به ماشین سویچ رلوکتانس معمولی است. شکل (۱) ساختار ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور چهار فاز را نشان می‌دهد. دو استاتور این ماشین ساخته شده از ورقه‌های ماده فرومغناطیسی است. سیم‌پیچی‌های فازهای این ماشین روی استاتور داخلی و خارجی و به‌صورت متمرکز قرار دارند.

استاتور خارجی و داخلی به‌ترتیب در بیرون و داخل یک روتور سیلندری توخالی قرار دارند. روتور در این ماشین از قطعات آهن موقر تشکیل شده است. قطعات‌های روتور توسط یک قفسه غیرمغناطیسی از جنس آلومینیم کنار هم‌دیگر ثابت نگه داشته می‌شوند که یک ساختار پیوسته برای روتور به‌وجود می‌آورد. تعداد قطعات تشکیل‌دهنده روتور برابر با تعداد قطب‌های روتور است. در موتور سویچ رلوکتانس دو-استاتور نشان داده شده در شکل، تعداد قطب‌های استاتور برابر با ۸ و تعداد قطب‌های روتور برابر با ۶ در نظر گرفته شده است. در این ساختار به‌دلیل توخالی بودن روتور، روتور سبک بوده و دارای ممان اینرسی کم و سرعت پاسخ

زیاد است. بین روتور و استاتورهای داخلی و خارجی یک فاصله هوایی وجود دارد که امکان حرکت آزادانه روتور را به وجود می‌آورد و از طرفی بین قطب‌های روتور فاصله بزرگی وجود دارد که این فاصله با یک ماده غیرمغناطیسی پر شده است. ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور یک ماشین تک‌تحریکه و دارای سیم‌پیچی‌های متمرکز برای هر فاز است. این سیم‌پیچی‌ها بر روی قطب‌های استاتور داخلی و خارجی قرار می‌گیرند و دوه‌دو به صورت سری به هم وصل می‌شوند تا نهایتاً یک ماشین چهار فاز را تشکیل دهند. ترمینال‌های سیم‌پیچی‌های استاتور داخلی و خارجی از طریق سوراخی که روی محور استاتور داخلی قرار دارد، قابل دسترسی هستند. نحوه قرار گرفتن سیم‌پیچی‌ها در شیارها به گونه‌ای است که مسیر شار ایجاد شده همه یوغ استاتور را در بر نمی‌گیرد و به نوعی شار با مسیر کوتاه در ماشین ایجاد شده که این امر باعث کاهش تلفات هسته می‌گردد [۱۳].

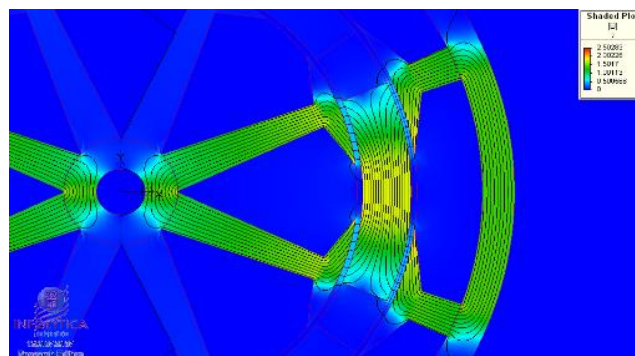
اصول عملکرد ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور کاملاً شبیه اصول عملکرد ماشین سوئیچ رلوکتانس معمولی است. در ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور در حالت عملکرد موتوری، گشتاور الکترومغناطیسی به گونه‌ای ایجاد می‌شود تا رلوکتانس مغناطیسی در مسیر شار کمترین مقدار شود. اگر فاز a موتور تحریک شود، روتور تمایل دارد که در جهت ساعتگرد حرکت کند تا رلوکتانس سیستم به کمترین مقدار برسد و مسیر شار در داخل هوا حداقل شود. سپس اگر فازهای b و c و d به ترتیب تحریک گردند، همانند ماشین سوئیچ رلوکتانس معمولی حرکت دورانی روتور در جهت عقربه‌های ساعت ادامه می‌یابد و با ادامه این روند، گردش پایدار روتور ایجاد خواهد شد.

برای بررسی مسیر شار در ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور، یک مدل اجزای محدود دو بعدی از ماشین در نرم‌افزار مگنت ایجاد می‌شود. مشخصات این ماشین در جدول (۱) ارائه شده است. مدل اجزاء محدود ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور در حالی که جریان فاز a، ۲۰۰ آمپر در نظر گرفته شده، حل می‌گردد. شکل (۲)، مسیر شار کوتاه داخل موتور را که به روش اجزای محدود به دست آمده نشان می‌دهد. در این ماشین، غالب نیروی شعاعی که تولید می‌شود در جهت حرکت روتور قرار دارد و نیروی حرکتی زیادی ایجاد می‌کند که می‌تواند منجر به تولید گشتاور بیشتر شود.



شکل (۱): شمای یک ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور چهار فاز

Figure (1): A four phase double stator switched reluctance machine



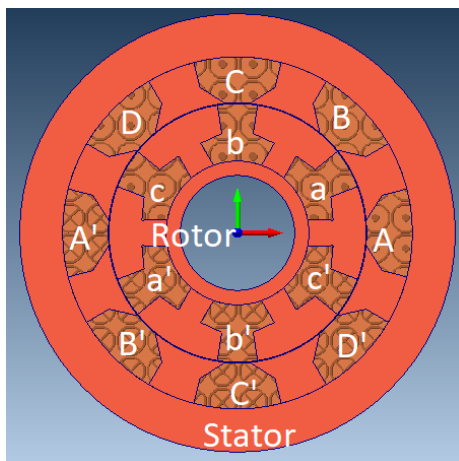
شکل (۲): توزیع شار مغناطیسی ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور

Figure (2): Flux distribution of the double stator switched reluctance machine

۳- ماشین سویچ رلوکتانس القایی

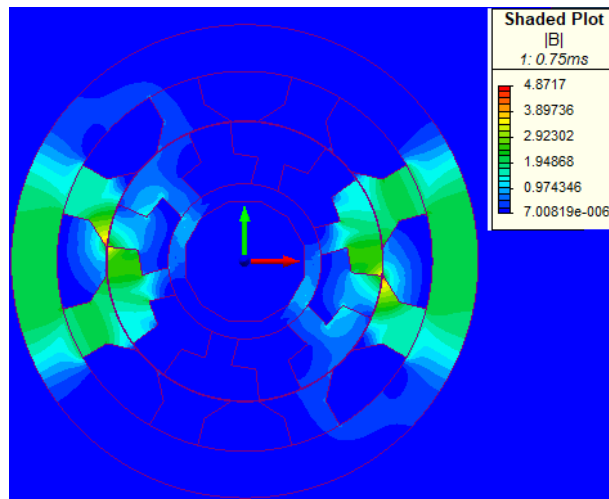
ماشین سویچ رلوکتانس القایی مطابق شکل (۳)، از یک استاتور، یک رتور و چندین سیم‌پیچ اتصال کوتاه که در رتور قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. این ماشین به وسیله سیم‌پیچ‌های جداگانه تحریک می‌شود که در شیارهای استاتور قرار گرفته‌اند. سیم‌پیچ‌های اتصال کوتاه شده روی رتور توسط هیچ منبع خارجی تحریک نمی‌شوند، اما جریان به هادی‌های رتور القا می‌شود. چیدمان سیم‌پیچ‌های رتور مطابق شکل (۳)، نهایتاً یک مسیر شار کوتاه را حول سیم‌پیچ استاتور تحریک شده، ایجاد می‌کند. بر مبنای قانون القای فاراده، هادی‌ها روی رتور می‌توانند بر مسیر شار مغناطیسی اثر بگذارند و آن‌را در جهت مطلوب، جهت‌دهی نمایند. قرار گرفتن هادی‌ها در یک موقعیت مناسب با چیدمان و اتصال درست، ضرورت این مسأله است. با توجه به این نکته، ماشین سویچ رلوکتانس القایی معرفی شده است. در این ماشین یک مسیر شار مغناطیسی کوتاه در موتور به دست می‌آید، در حالی که هیچ رتور یا استاتور چندتکه‌ای در ماشین وجود ندارد. این یک مزیت مهم است که می‌تواند چگالی گشتاور بالا و چگالی توان بالا را حاصل کند. ماشین سویچ رلوکتانس القایی می‌تواند در ساختارها و تعداد قطب‌های مختلف طراحی شود. در این مقاله یک ماشین سویچ رلوکتانس القایی چهار فاز با استاتور ۸ قطب و رتور ۴ قطب با توان ۱۶۰ کیلووات برای کاربرد خودرو برقی ارائه شده است. وجود چهار فاز در این موتور به قابلیت اطمینان موتور می‌افزاید و در صورتی که یک یا دو فاز از کار بیفتند، موتور همچنان به کار خود ادامه می‌دهد.

در این ماشین سویچ رلوکتانس القایی چهار فاز، یک سیم‌پیچ در هر فاز وجود دارد که به وسیله منبع بیرونی تغذیه می‌شوند. برای مثال AA' فاز A را تشکیل داده‌اند. به همین ترتیب برای فازهای B, C, D و نیز همین مسأله صادق است. هر سیم‌پیچ استاتور از سیم‌پیچ‌های متمرکز تشکیل شده است. در سمت رتور، سه سیم‌پیچ متمرکز اتصال کوتاه شده aa', bb' و cc' پیچیده شده‌اند. در نگاه اول، ماشین سویچ رلوکتانس القایی می‌تواند شبیه یک ماشین القایی به نظر برسد. اما چندین اختلاف بین ماشین القایی و ماشین سویچ رلوکتانس القایی وجود دارد. در ماشین سویچ رلوکتانس القایی، هر سیم‌پیچ رتور باید از دیگر سیم‌پیچ‌های رتور کاملاً جدا باشد. تعداد قطب‌های رتور و استاتور آن نیز بر مبنای روش‌های طراحی ماشین سویچ رلوکتانس معمولی طراحی می‌گردد و همچنین پروفایل گشتاور ماشین سویچ رلوکتانس القایی شبیه ماشین سویچ رلوکتانس معمولی است. همچنین این ماشین با پالس‌های دی‌سی تحریک می‌شود که با تغذیه ماشین القایی که با جریان سینوسی است کاملاً متفاوت است [۱۸]. مطابق قانون القای فاراده، زمانی که یک فاز ماشین سویچ رلوکتانس القایی تحریک می‌شود و رتور می‌چرخد، میدان مغناطیسی در سیم‌پیچ‌های رتور بر حسب زمان تغییر می‌کند و نیروی محرکه الکتریکی در آن ایجاد می‌شود که جهت آن و جریان القایی در سیم‌پیچ‌های رتور می‌تواند توسط قانون لنز تعیین شود. نتیجه اینکه این امر از ورود خطوط شار به یوغ رتور جلوگیری می‌کند و یک مسیر شار کوتاه حول فاز استاتور تحریک شده ایجاد می‌کند. یک مدل دوبعدی از یک ماشین سویچ رلوکتانس القایی با مشخصات ارائه شده در جدول (۲) در نرم‌افزار مگنت ایجاد شده است تا به روش اجزای محدود تحلیل گردد.

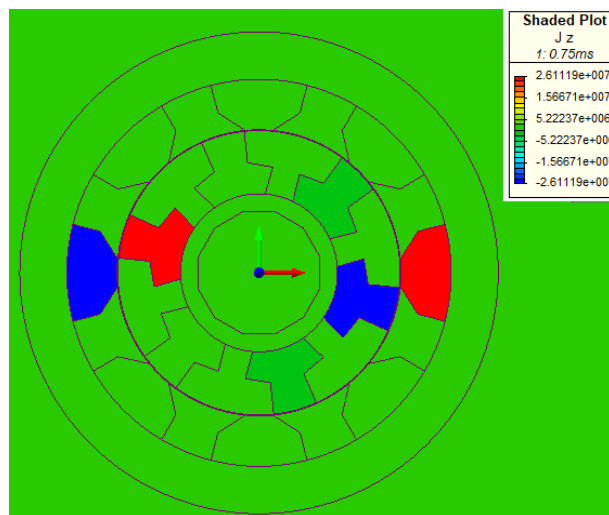


شکل (۳): شمای یک ماشین سویچ رلوکتانس القایی چهار فاز

Figure (3): A four phase induction switched reluctance machine



شکل (۴): توزیع شار در ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی با وجود سیم پیچ روی روتور
 Figure (4): Flux distribution of the induction switched reluctance machine



شکل (۵): جریان های القایی در سیم پیچ های استاتور و روتور ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی
 Figure (5): Current distribution of the induction switched reluctance machine

شبیه سازی گذرای ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی به روش اجزای محدود در نرم افزار مگنت انجام می شود. شکل (۵) توزیع شار مغناطیسی محاسبه شده در این حالت را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، مسیر شار کوتاه ایجاد می شود و مسیرهای شار مغناطیسی در این حالت فقط حول فاز تحریک شده توزیع شده اند. در واقع غالب فضای استاتور و روتور بدون شار است که این نتیجه ای بسیار مطلوب است و منجر به افزایش گشتاور خواهد شد.

۴- مقایسه ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی با ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور

برای اینکه ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی را با ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور در توانایی گشتاور و راندمان مقایسه شوند، هر دو ماشین مورد تحلیل و بررسی به روش اجزای محدود قرار می گیرند و گشتاور و راندمان آنها محاسبه می گردد. مطابق جدول (۱)، مشخصات هر دو ماشین که برای شبیه سازی در نظر گرفته شده اند از لحاظ شعاع خارجی، طول موتور، طول فاصله- هوایی و تعداد قطب یکسان هستند. در صورتی که روش خنک کنندگی این دو ماشین با اسپری روغن باشد، چگالی جریان حداکثر هادی ها می تواند حدود ۲۰ آمپر بر میلی متر مربع باشد و حداکثر جریان فاز به ۲۰۰ آمپر برسد.

Table (1): Motor specifications

جدول (۱): مشخصات موتور

اندازه	پارامتر
۱۶۰ کیلووات	توان
۸۰۰ ولت	ولتاژ
۲۰۰ آمپر	جریان
۱۵ سانتی‌متر	شعاع خارجی استاتور
۱۵ سانتی‌متر	طول موتور
۰/۵ میلی‌متر	طول فاصله هوایی
۸	تعداد قطب استاتور
۶	تعداد قطب روتور
۴	تعداد فاز
۵۰	تعداد دور سیم‌پیچ هر فاز استاتور
۵۰	تعداد دور سیم‌پیچ هر قطب روتور (فقط برای موتور سوئیچ رلوکتانس القایی)
M19	نوع ورق هسته
روغن	سیستم خنک‌کننده

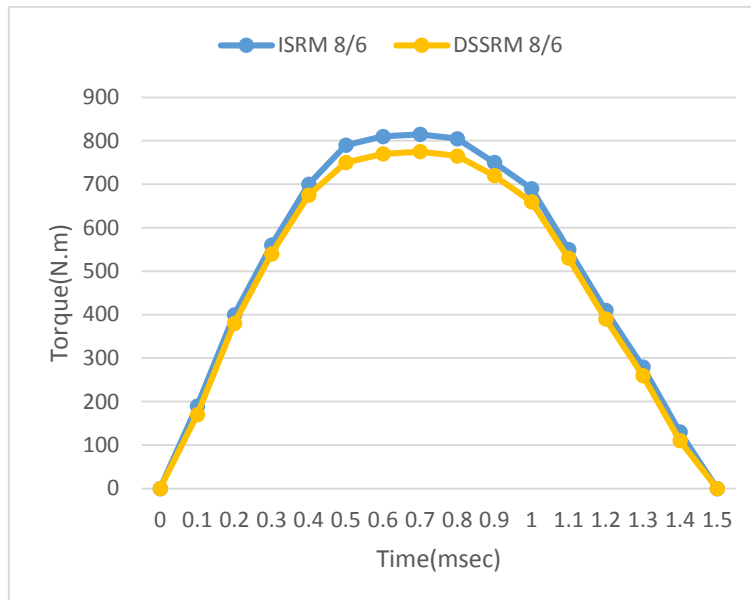
پس از مدل‌سازی به روش اجزای محدود دو ماشین، پروفایل گشتاور و گشتاور متوسط هر دو ماشین در جریان‌های مختلف محاسبه می‌شوند که نتایج آن در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ماشین سویچ رلوکتانس القایی گشتاور بیشتری در مقایسه با ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور تولید می‌کند. شکل (۶) نشان می‌دهد که این افزایش در حوالی قله گشتاور حدود ۲۰ درصد است، ولی در سایر نواحی حدود ۵ تا ۱۰ درصد است. همچنین گشتاور متوسط ارائه شده در شکل (۷) نشان‌دهنده این مطلب است که هرچه جریان موتور افزایش یابد، قدرت تولید گشتاور در ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که هرچه جریان موتور بیشتر و در نتیجه شار افزایش یابد، نقش القای مغناطیسی بیشتر می‌شود و خطوط شار بیشتری در راستای حرکت قرار می‌گیرند. این امر موجب افزایش نیروهای حرکتی و در نتیجه گشتاور موتور می‌گردد [۱۵].

در مرحله بعد راندمان ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور و ماشین سویچ رلوکتانس القایی با استفاده از نتایج آنالیز اجزای محدود محاسبه و مقایسه می‌شوند که نتایج آن در شکل (۸) نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که راندمان ماشین سویچ رلوکتانس القایی بیشتر از راندمان ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور در توان‌های مختلف است که این نتیجه‌ای بسیار مطلوب است. در شرح تحلیلی، علت بالاتر بودن راندمان ماشین سویچ رلوکتانس القایی نسبت به ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور، لازم است رابطه راندمان ماشین‌های الکتریکی که مطابق زیر است، برای این دو ماشین بررسی شود:

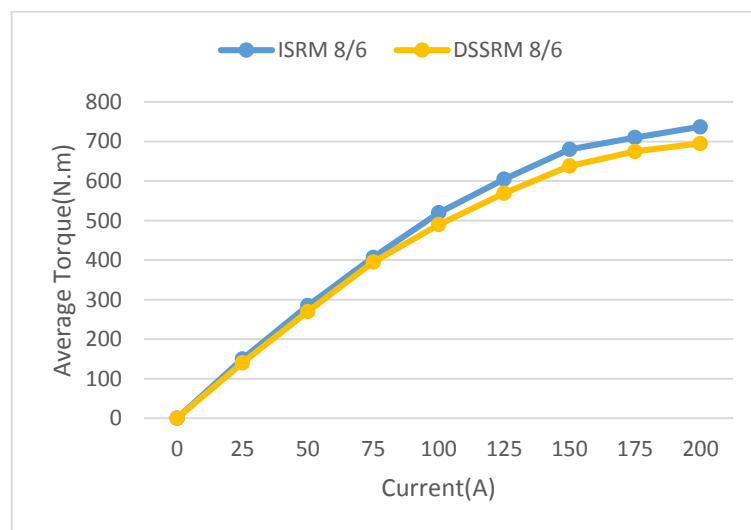
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{fe} + P_{cu}} = \frac{T\omega}{T\omega + P_{fe} + P_{cu}} \quad (1)$$

که P_{out} توان تولیدی موتور، T گشتاور تولیدی موتور، ω سرعت زاویه‌ای موتور، P_{fe} تلفات آهن و P_{cu} تلفات مسی موتور است. در یک سرعت و جریان معین، گشتاور خروجی موتور ماشین سویچ رلوکتانس القایی نسبت به ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور همواره بالاتر است. در نتیجه توان خروجی ماشین سویچ رلوکتانس القایی نسبت به ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور در هر سرعت و جریان معین بالاتر است. از طرف دیگر، از آنجا که شار در ماشین سویچ رلوکتانس القایی وارد یوغ روتور نمی‌شود، در نتیجه حجم کمتری از آهن این ماشین نسبت به ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور دارد. همچنین با توجه به کمتر بودن دامنه شار ماشین سویچ رلوکتانس القایی نسبت به ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور که از مشاهده نتایج آنالیز اجزای محدود حاصل شده، می‌توان به این امر از نظر کیفی پی برد که تلفات آهن ماشین سویچ رلوکتانس القایی نسبت به ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور کمتر است. در مورد تلفات مس دو ماشین نیز با توجه به مساوی بودن آمپر دور دو ماشین در زمان اعمال جریان‌های برابر به یک فاز، و یکسان در نظر گرفتن هادی‌های مورد استفاده در سیم‌بندی، و از طرفی

با توجه به نتایج آنالیز جریان سیم پیچ روتور ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی که در مرجع [۱۸] ارائه شده است، می توان نتیجه گرفت که تلفات اهمی ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی نسبت به ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور کمتر است. توضیحات فوق نشان دهنده این امر است که راندمان محاسبه شده به روش اجزای محدود، با بررسی های تحلیلی نیز انطباق دارد.



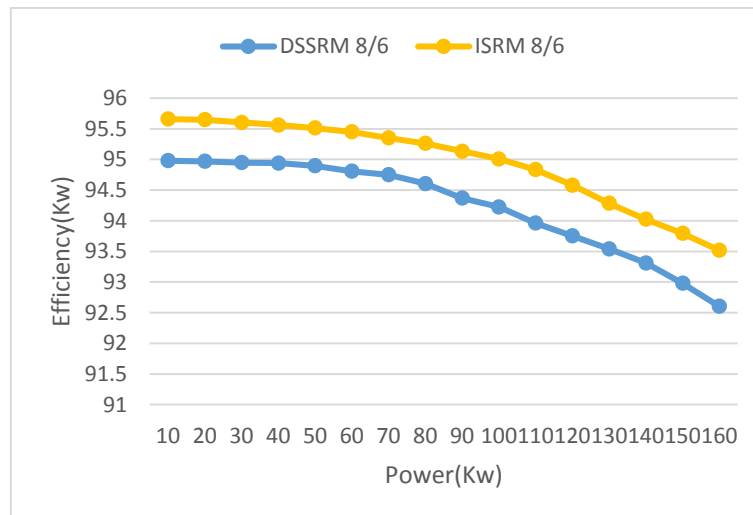
شکل (۶): پروفایل گشتاور ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی در مقایسه با ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور در جریان ۱۰۰ آمپر
Figure (6): Torque profile of the induction switched reluctance machine and double stator switched reluctance machine



شکل (۷): گشتاور متوسط ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی در مقایسه با ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور در جریان های مختلف
Figure (7): Torque average of the induction switched reluctance machine and double stator switched reluctance machine

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک ماشین سوئیچ رلوکتانس دو-استاتور چهار فاز و یک ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی چهار فاز برای کاربرد خودرو برقی مورد بررسی قرار گرفتند. برای ارزیابی این دو ماشین، مدل اجزا محدود برای هر ماشین در نرم افزار مگنت ایجاد شد و به روش گذرای معنایسی حل شد. سپس مشخصات گشتاور و راندمان آنها به دست آمد. با مقایسه نتایج به دست آمده، مشاهده شد که ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی تولید گشتاور و همچنین راندمان بهتری دارد.



شکل (۸): راندمان ماشین سویچ رلوکتانس القایی در مقایسه با ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور در توان‌های مختلف
Figure (8): Efficiency of the induction switched reluctance machine and double stator switched reluctance machine

البته قابلیت تولید گشتاور ماشین سویچ رلوکتانس القایی نسبت به ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور برتری چشم‌گیری ندارد و فقط در حد ۵ درصد گشتاور بیشتر در توان‌های بالا تولید می‌کند، ولی از آنجا که ساختن ماشین سویچ رلوکتانس القایی به دلیل نداشتن روتور یا استاتور قطعه‌ای، نسبت به ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور که روتور قطعه ای دارد بسیار ساده‌تر است، در نتیجه گزینه بهتری برای کاربرد خودرو برقی است. از طرفی راندمان ماشین سویچ رلوکتانس القایی از ماشین سویچ رلوکتانس دو-استاتور بالاتر است که این نیز از مزایای مهم این ماشین است.

References

مراجع

- [1] B. Bilgin, A. Emadi, M. Krishnamurthy, "Comprehensive evaluation of the dynamic performance of a 6/10 SRM for traction application in PHVs", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 60, no. 7, pp. 2564-2575, July 2013 (doi: 10.1109/TIE.2012.2196015).
- [2] I. Boldea, L. N. Tutelea, L. Parsa, D. Dorrell, "Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 61, no. 10, pp. 231-239, Oct. 2014 (doi: 10.1109/TIE.2014.2307839).
- [3] B. Bilgin, J.W. Jiang, A. Emadi, "Switched reluctance motor drives fundamentals to applications", Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 2019 (ISBN: 978-1138304598).
- [4] Y.R. Kang, J.C. Son, D.K. Lim, "Optimal design of IPMSM for fuel cell electric vehicles using autotuning elliptical niching genetic algorithm", IEEE Access, vol. 8, pp. 117405-117412, June 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.3004722).
- [5] Z. Chen, G. Li, "A V-type permanent magnet motor simulation analysis and prototype test for Electric vehicle", IEEE Access, vol. 7, pp. 174839-174846, Dec. 2019 (doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957420).
- [6] E. Afjei, A. Siadatian, H. Torkaman, "Magnetic modeling, prototyping and comparative studying of quintuple-set switched reluctance motor", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 51, no. 8, pp. 1-7, Aug. 2015 (doi: 10.1109/TMAG.2015.2418257).
- [7] G. Qu, Y. Fan, "Design of a new consequent-pole segmented dual-stator permanent magnet machine", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 11, no. 4, pp. 69-98, June 2021 (doi: 10.1109/TMAG.2021.3087133).
- [8] B.C. Mecrow, E.A. El-Kharashi, J.W. Finch, A.G. Jack, "Preliminary performance evaluation of switched reluctance motors with segmental rotors", IEEE Trans. on Energy Conversions, vol. 19, no. 4, pp. 679-686, Dec. 2004 (doi: 10.1109/TEC.2004.837290).
- [9] R. Madhavan, B.G. Fernandes, "A novel axial flux segmented SRM for electric vehicle application", Proceeding of the IEEE/ICEM, pp. 1-6, Rome, Italy, Sept. 2010 (doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5608140).
- [10] J.D. Widmer, B.C. Mecrow, "Optimised segmental rotor switched reluctance machines with a greater number of rotor segments than stator slots", Proceeding of the IEEE/IEMDC, pp. 1183-1188, Niagara Falls, Canada, May 2011 (doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994770).

- [11] M. Kondelaji, M. Mirsalim, "Segmented-rotor modular switched reluctance motor with high torque and low torque ripple", *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 1, pp. 62-72, Mar. 2020 (doi: 10.1109/TTE.2020.2969356).
- [12] S. Li, S. Zhang, T. G. Habetler, R. G. Harley, "Modeling, design optimization, and applications of switched reluctance machines_A review," *IEEE Trans. on Industrial Applications*, vol. 55, no. 3, pp. 2660-2681, May 2019 (doi: 10.1109/TIA.2019.2897965).
- [13] S.R. Mousavi-Aghdam, M.R. Feyzi, N. Bianchi, "Design and analysis of a novel high-torque stator-segmented SRM", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 3, pp. 79-88, Dec. 2016 (doi: 10.1109/TIE.2015.2-494531).
- [14] R. Vandana, S. Nikam, B.G. Fernandes, "Criteria for design of high-performance switched reluctance motor", *Proceeding of the IEEE/ICEM*, pp. 129-135, Marseille, France, Sept. 2012 (doi: 10.1109/ICEIMach.2012.6-349853).
- [15] M. Abbasian, M. Moallem, B. Fahimi, "Double-stator switched reluctance machine (DSSRM): Fundamentals and magnetic force analysis", *IEEE Trans. on Energy Conversions*, vol. 25, no. 3, pp. 589-597, Sept 2010 (doi: 10.1109/TEC.2010.2051547).
- [16] M. Asgar, E. Afjei, H. Torkaman, "A new strategy for design and analysis of a double-stator switched reluctance motor: Electromagnetics, FEM, and experiment", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 51, no. 12, pp. 1-8, Aug. 2015 (doi: 10.1109/TMAG.2015.2465307).
- [17] M. Abbasian, "Induction switched reluctance motor", U.S. Patent 2017 0 370 296 A1, June 2020.
- [18] M. Azamian, M. Abbasian, D. Gerling, "Preliminary evaluation of Induction switched reluctance motor for electric vehicle application", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 26693-26701, May 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.202-1.3084892).

زیر نویس ها

1. Hybrid vehicles
2. Internal combustion engine
3. Electric propulsion
4. High reliability
5. Neodymium
6. Segmental rotor
7. Segmental switched reluctance machine
8. Stator yoke
9. Induction switched reluctance machine
10. Double stator switched reluctance machine