طراحی یک ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی چهار فاز برای کاربرد کامیون برقی

میثم اعظمیان جزی[۱]، محمدعلی عباسیان*[۲]

۱- دانشجوی دکترا، گروه برق، دانشکده فنی‌و مهندسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
*۲- استادیار، گروه برق، دانشکده فنی‌و مهندسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران،
m.abbasian@khuisf.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۳۰

چکیده: در حال حاضر طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌های الکتریکی جهت استفاده در خودروهای برقی به‌صورت بنیادین مورد توجه قرار گرفته‌است. موتورهای مورد نیاز برای کامیون برقی باید توانی بالاتر از ۱۶۰ کیلووات داشته باشند. این نوع موتورها معمولا از جنس ماشین سنکرون آهنربای دایم هستند. با توجه به بالا بودن اندازه این ماشین در توانهای بسیار بالا، نیاز به استفاده از حجم زیادی از آهنربای دایم در این ماشین می‌باشد. باتوجه به هزینه بالای آهنربای دائم و تولید آن از مواد خاک کمیاب، استفاده از ماشین‌های الکتریکی بدون آهنربا گزینه بهتری می‌باشد. موتورهای سوییچ رلکتانس گزینه مناسبی برای این کابردها است، ولی گشتاور آن نسبت به ماشین آهنربای دائم کمتر است. لذا طراحی مدل‌های نوینی از ماشین سوئیچ رلوکتانس برای کاربرد کامیون برقی ضروری است. در این مقاله، یک ماشین سوییچ رلوکتانسی القایی چهار فاز با توان ۱۵۰ کیلووات برای کاربرد کامیون برقی معرفی شده و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. نوآوری برمبنای قرار گرفتن سیم‌پیچ‌ها روی رتور انجام شده تا مسیر شار مغناطیسی را در رتور هسته و استاتور ماشین الکتریکی کوتاه کند. در نتیجه، یک گشتاور بالا تولید می‌شود. پس از معرفی ماشین، با استفاده از روش اجزای محدود و نرم افزار مگنت، گشتاور آن در جریانهای مختلف محاسبه می‌شود و راندمان محاسبه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: ماشین سوئیچ رلوکتانس، القایی، گشتاور، وسایل نقلیه الکتریکی، کامیون برقی.

۱- مقدمه

اخیرا برخی شرکت‌های سازنده کامیون مانند مرسدس بنز و ولوو به ساخت کامیون با پیشرانه برقی روی آورده‌اند. با توجه به افزایش روزافزون آلاینده‌های زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی برای حمل و نقل، همچنین روند روبه‌رشد هزینه‌های استخراج و تولید این سوخت‌ها، از طرف دیگر الزامات جهانی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای، استفاده از موتورهای الکتریکی در خودروهای سنگین مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از خودروهای برقی به اواخر دهه هفتاد میلادی برمی‌گردد. زمانی که با اولین بحران انرژی همراه شده‌است. برخی از مهمترین اهداف خودروهای برقی عبارتند از: کمینه نمودن آلایندگی سوخت‌های فسیلی، حداقل شدن هزینه تمام‌شده پیشرانه در ساختار هزینه، بازیابی انرژی و کاهش وزن خودروهای برقی جهت افزایش راندمان این خودروها. بعلاوه مزایای خودروهای برقی در مقایسه با خودروهای معمولی عبارتند از: بازیافت نیروی تلف‌شده در هنگام ترمزگیری، کاهش در وزن موتور و ابعاد آن، کاهش گرمایش زمین به دلیل کاهش میزان آلایندگی، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، استفاده بهینه از نفت در پتروشیمی و افزایش دو برابری راندمان نسبت به خودروهای معمولی.

خودروهای برقی از قسمتهای مختلفی تشکیل شده که مهمترین آنها موتورهای الکتریکی، کنترل‌کننده‌ها و سامانه ذخیره انرژی الکتریکی هستند. چیدمان خاص کلیدهای قدرت در این گونه خودروها، اجازه می‌دهند که در هنگام شتاب گیری جریان از منبع به‌سمت محرک الکتریکی جاری گردد و در هنگام ترمز و یا کاهش

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.2.6.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 2- Summer 2022

سرعت به سمت ذخیره‌ساز انرژی برگردد. به عنوان مثال در هر مرحله ترمز گیری تویوتا پریوس تا ۳۵ در صد از انرژی را به منبع بازمی‌گرداند [۱].

قسمت اصلی سیستم محرک خودروهای الکتریکی شامل موتورالکتریکی و درایو می‌باشد که بهینه‌سازی این دو جزء موضوع اصلی مطالعات اخیر در این رابطه بوده و ماشین‌های الکتریکی با چگالی گشتاور بالا بسیار مورد توجه قرارگرفته‌اند. نه‌تنها در صنعت حمل و نقل، بلکه بیش از ۶۰٪ نیروی محرک در تجهیزات صنعتی توسط موتورهای الکتریکی تامین می‌گردد، بنابراین پیشنهاد راه حل های جدید طراحی و کنترل ماشین‌های الکتریکی علاوه‌بر صنعت خودرو برای سایر صنایع نیز جذاب خواهد بود. در زمینه طراحی اغلب موتورهای الکتریکی، اهدافی وجود دارد که بایستی مد نظر قرار گیرد. این اهداف می‌توانند شامل حذف مواد خاک کمیاب، افزایش گشتاور، افزایش راندمان و کاهش تلفات گردد [۲].

به عنوان موتور محرک خودروبرقی، گزینه اول استفاده از ماشین سنکرون آهنربای دائم می‌باشد که دارای راندمان بالا و چگالی گشتاور خوبی است [۴]-[۳]. استفاده از آهنربای دائم در ماشین‌های الکتریکی مانند ماشین سنکرون آهنربای دائم، امکان ایجاد میدان‌های الکتریکی قوی را بدون استفاده از سیم پیچ در موتور فراهم می‌کند. این امر موجب کاربرد موتورهای آهنربای دایم در کاربردهای با گشتاور بالا می‌گردد. گشتاور تولیدی در موتور سنکرون آهنربای دائم از نوع داخلی، ترکیبی از گشتاور رلوکتانسی و گشتاور ناشی از وجود آهنربای دائم است. درنتیجه این ماشین الکتریکی دارای چگالی گشتاور بالاتری نسبت به سایر موتورها از جمله موتور سنکرون آهنربای دایم از نوع سطحی و ماشین سوییچ رلوکتانس می‌باشد. با این حال، ماکزیمم بار این نوع موتورها با محدودیت حداکثر دمای مجازی که آهنربای دائم داخل ماشین می‌تواند تحمل کند مواجه می‌شود[۵]. از طرف دیگر آهنربای دائم از مواد کمیاب تولید می‌شود و دارای قیمت زیاد بوده و علاوه بر آن مشخصات مغناطیس دائم به مرور زمان و در اثر حرارت بالای درون موتورهای الکتریکی تغییر می‌نماید که این موارد در کاربردهای خودروبرقی مطلوب نیست. ماشین القایی نامزد مهم دیگر برای کاربرد در وسایل نقلیه الکتریکی است. موتور القایی چگالی توان قابل قبولی دارد، اما در مقایسه با ماشین الکتریکی سنکرون آهنربای دائم دارای راندمان پائینی است. هادی‌های روی رتور موتور القایی منابع مهم تولید تلفات اهمی ماشین هستند.

استفاده از موتورهای سوییچ رلوکتانس به اواخر قرن نوزدهم میلادی باز می‌گردد. در آن موقع توسعه این‌گونه موتورها و درایوهای لازم آن به‌دلیل 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 مزایای موتورهای سوییچ رلوکتانس، توجه محققان به تکمیل و رشد این گونه موتورها و درایوهای آنها جلب گردید. گشتاور تولیدی در ماشین سوییچ رلوکتانس تنها از نوع گشتاور رلوکتانسی است. در نتیجه قابلیت تولید گشتاور در این ماشین چندان زیاد نیست. مع‌الوصف این ماشین کاربردهای متعددی در صنعت دارد. از مزایای این ماشین می‌توان به راندمان زیاد، ساختار ساده و محکم موتور، کارایی و عملکرد مناسب آن در شرایط محیطی نامناسب، هزینه‌های نگهداری کم و تعمیرات موتور و سادگی مدارهای سوییچینگ مورد نیاز درایو، اشاره نمود[۶].

برای کاربرد ماشین‌های الکتریکی در کامیون برقی، رسیدن به گشتاور حداکثر از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا باید طرح بهینه‌ای از موتورهای الکتریکی با گشتاور بسیار بالا ارائه نمود. روش‌های کلاسیک در بهینه سازی ماشین‌های الکتریکی، مبتنی بر اصولی هستند که در بکارگیری آنها نحوه توزیع مؤلفه‌های میدان و نیرو در نظر گرفته نمی‌شوند. لذا در روش‌های مرسوم، عمدتاً با سعی و خطا و بدون ارایه درکی روشن و عمیق از نحوه تولید نیرو و مؤلفه‌های درگیر در ایجاد گشتاور، اقدام به بهینه‌سازی ماشین می‌گردد. این روش‌ها نتوانسته‌اند به بهینه‌سازی مطلوب منجر شوند و طراحی ماشینهای الکتریکی با روش‌های آنالیز مؤلفه‌های میدان و نیرو می‌تواند باعث تغییرات قابل توجهی در نحوه طراحی آنها گردد[۷].

در دهه‌های اخیر تلاش‌های گسترده‌ای برای طراحی بهینه یا ارائه مدلهای خلاقانه ماشین سوییچ رلوکتانس شده است و چندین نمونه جدید معرفی شده است [۱۶]-[۸]. برای مثال، ماشین سوییچ رلوکتانس تکه‌ای در سال ۲۰۰۴ معرفی شد [۸]. در این ساختار روتور از چندین قسمت فرومغناطیس تشکیل شده است. به دلیل ساختار چند قسمتی، شار مغناطیسی نمی‌تواند همه یوغ استاتور را دور بزند و لذا مسیر شار کوتاه حاصل می‌شود. ماشین سوییچ رلوکتانس تکه‌ای می‌تواند گشتاوری معادل ۴۰٪ بیشتر از نمونه مشابه ماشین سوییچ رلوکتانس سنتی ایجاد کند. اما ساخت یک رتور تکه‌ای می‌تواند باعث ایجاد اشکالاتی عملی شود. در مرجعی دیگر موتور سوئیچ رلوکتانسی معرفی شده که تعداد قطبهای روتور آن بیش از قطبهای استاتور است [۹]. همچنین موتور سوئیچ رلوکتانس با شار محوری در مرجع [۱۱] معرفی شده است. یک نمونه دیگر ماشین سوییچ رلوکتانس که دارای گشتاور بالاست، ماشین سوییچ رلوکتانسی استاتور دوبل است که برای کاربرد وسایل نقلیه در سال ۲۰۱۰ معرفی شده است [۱۶]. در این ماشین، یک روتور استوانه‌ای گرد بین دو استاتور قرار گرفته است. چگالی گشتاور در ماشین سوییچ رلوکتانسی استاتور دوبل دو برابر ماشین سوییچ رلوکتانسی استاتور معمولی است. اما ماشین سوییچ رلوکتانسی استاتور دوبل دارای ساختاری پیچیده است و مونتاژ آن بسیار دشوار است.

در مرجع [۱۷] ساختاری ارائه شده است تا بتوان با بهره‌گیری از اثر القا مسیر شار را کوتاه کرد و درصد بیشتری از نیروهای تولیدی ماشین را در راستای تولید حرکت و گشتاور بکار گرفت. این امر می‌تواند منجر به تحولی بزرگ در طراحی ماشین‌های الکتریکی و نحوه نگرش به بهینه‌سازی آن شود. برای دستیابی به این هدف، در این

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.2.6.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 2- Summer 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

مرجع ماشین سوییچ رلکتانس جدیدی با ساختار متفاوت تحت عنوان "ماشین سوییچ رلوکتانس القایی" معرفی گردیده است.

در این مقاله، یک ماشین سوییچ رلوکتانسی القایی با توان ۱۵۰ کیلووات برای کاربرد کامیون برقی معرفی شده و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. طراحی بر مبنای نحوه قرار گرفتن سیم‌پیچ‌ها روی رتور انجام شده تا مسیر شار مغناطیسی را در رتور هسته و استاتور ماشین الکتریکی کوتاه کند. در نتیجه، یک گشتاور بالا با راندمان بالا تولید می‌شود. پس از معرفی ماشین، با استفاده از روش اجزای محدود، گشتاور آن در جریان‌های مختلف محاسبه می‌شود و راندمان محاسبه می‌گردد.

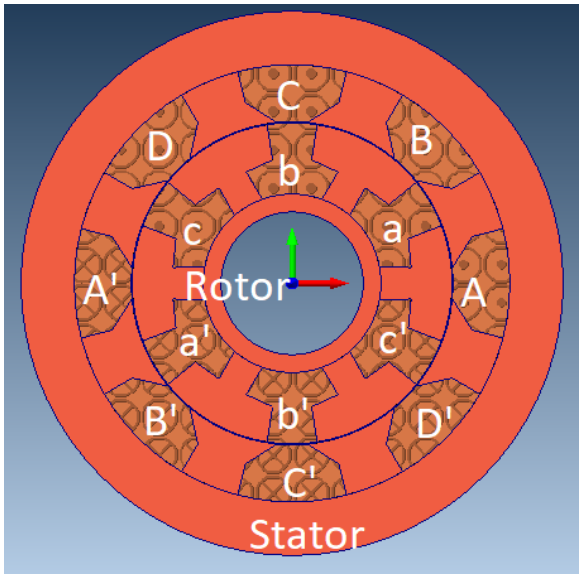
از آنجا که ماشین‌های الکتریکی در توان‌های مختلف رفتار و کارایی متفاوتی از خود نشان می‌دهند، برای هر نوع کاربرد و هر سطحی از توان باید طراحی و آنالیز خاص آن صورت گیرد. به‌عنوان مثال ممکن است ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی ۸۰ کیلووات، راندمان و گشتاور بهتری نسبت به ماشین سوئیچ رلوکتانس معمولی داشته باشد، ولی ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی ۱۵۰ کیلووات این برتری را نداشته باشد. از طرف دیگر، تعداد فازهای این ماشین تاثیر مهمی بر عملکرد و کارایی ماشین دارد. در این مقاله علت انتخاب نوع چهار فاز این ماشین، افزایش قابلیت اطمینان موتور در کاربرد خطیری چون کامیون برقی است. درواقع چون کامیون اغلب در جاده‌های بیابانی یا کوهستانی حرکت می‌کند، باید کامیون برقی به شیوه بسیار مطمئن و با کمترین خرابی موتور الکتریکی کشنده و حداکثر قابلیت اطمینان طراحی گردد. زیرا درصورت خرابی موتور در جاده های خارج از شهر، دسترسی به تعمیرگاه بسیار دشوار خواهد بود. با عنایت به این توضیحات باید ساختاری از ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی برای کامیون برقی طراحی شود که بیشترین قابلیت اطمینان را داشته باشد. یکی از روشهای افزایش قابلیت اطمینان ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی، افزایش تعداد فاز آن است. نکته مهم در این ماشین خاص این است که اگر یک فاز یا حتی دو فاز آن هم از کار بیفتد، ماشین همچنان قابلیت کار با دو فاز باقیمانده را دارد. البته در صورت از کار افتادن یک فاز یا دو فاز، تولید گشتاور موتور کاهش می‌یابد، ولی با این حال کامیون می‌تواند با سرعت حرکت کمتر به تعمیرگاه منتقل گردد. لذا با درنظر گرفتن اصل مهم قابلیت اطمینان، در این مقاله برای اولین بار یک موتور الکتریکی با چهار فاز از نوع ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی برای کاربرد کامیون برقی، به روش اجزای محدود طراحی می‌شود.

برای طراحی ماشین سوئیچ رلوکتانس القایی چهار فاز با کارایی مناسب، باید نحوه سیم‌بندی سیم‌پیچ‌های روتور و استاتور آن به‌گونه ای مناسب انجام شود که این امر در این مقاله صورت می‌گیرد. همچنین باید دید که آیا این ساختار چهار فاز در سطح توان بسیار بالا برتری خود را نسبت به ماشین سوئیچ رلوکتانس معمولی حفظ میکند، که این موضوع هم بطور کامل با آنالیز اجزای محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج ارائه می‌شوند.

۲- ماشین سوییچ رلوکتانس القایی ۱۵۰ کیلووات

بر مبنای قانون القای فاراده، هادی‌ها روی رتور می‌توانند بر مسیر شار مغناطیسی اثر بگذارند و آن را 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 سوییچ رلوکتانس القایی معرفی شده است. در این ماشین یک مسیر شار مغناطیسی کوتاه در موتور به‌دست می‌آید، درحالی‌که هیچ رتور یا استاتور چند تکه‌ای در ماشین وجود ندارد. این یک مزیت مهم است که می‌تواند چگالی گشتاور بالا و چگالی توان بالا را حاصل کند. ماشین سوییچ رلوکتانسی القایی می‌تواند در ساختارها و تعداد قطب‌های مختلف طراحی شود. در این مقاله یک ماشین سوییچ رلوکتانس القایی چهار فاز با استاتور ۸ قطبه و رتور۶ قطبه با توان ۱۵۰ کیلووات برای کاربرد کامیون برقی ارائه شده است. وجود چهار فاز در این موتور به قابلیت اطمینان موتور می‌افزاید و درصورتی‌که یک یا دو فاز از کار بیفتند، موتور همچنان به کار خود ادامه می‌دهد.

ماشین سوییچ رلوکتانس القایی مطابق شکل ۱، 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 سیم پیچ‌های رتور مطابق شکل ۱، نهایتاً یک مسیر شار کوتاه را حول سیم پیچ استاتور تحریک شده ایجاد می‌کند.



شکل ۱: شمای یک ماشین سوییچ رلوکتانس القایی چهار فاز

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.2.6.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 2- Summer 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

در این ماشین سوییچ رلوکتانس القایی چهار فاز، یک سیم پیچ 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 C،B و Dنیز همین مسأله صادق است. هر سیم استاتور از سیم‌پیچ‌های متمرکز تشکیل شده است. در سمت رتور سه سیم پیچ متمرکز اتصال کوتاه شده cc',bb',aa' پیچیده شده است. در نگاه اول، ماشین سوییچ رلوکتانس القایی می‌تواند شبیه یک ماشین القایی به نظر برسد. اما چندین اختلاف بین ماشین القایی و ماشین سوییچ رلوکتانس القایی وجود دارد. در ماشین سوییچ رلوکتانس القایی ، هر سیم پیچ رتور باید از دیگر سیم پیچ‌های رتور کاملا جدا باشد. تعداد قطب‌های رتور و استاتور آن نیز بر مبنای روش‌های طراحی ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی طراحی می‌گردد و همچنین پروفایل گشتاور ماشین سوییچ رلوکتانس القایی شبیه ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی است. همچنین این ماشین با پالسهای DC تحریک می‌شود که با تغذیه ماشین القایی که با جریان سینوسی است کاملا متفاوت می‌باشد.

بر طبق قانون فاراده القایی، زمانی که یک فاز ماشین سوییچ رلوکتانس القایی تحریک می‌شود و رتور می‌چرخد، میدان مغناطیسی در سیم‌پیچ‌های رتور اتصال کوتاه شده 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.

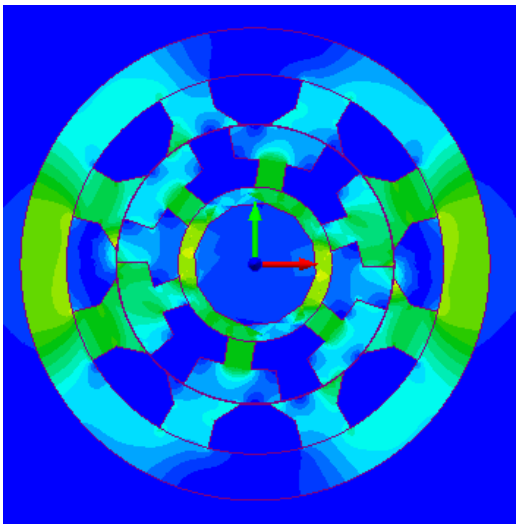
در ماشین سوییچ رلوکتانس القایی اگر ماشین به اشباع نرود، گشتاور می‌تواند توسط رابطه زیر بیان شود:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL_{eq}}{d\theta} \qquad (۱)$$

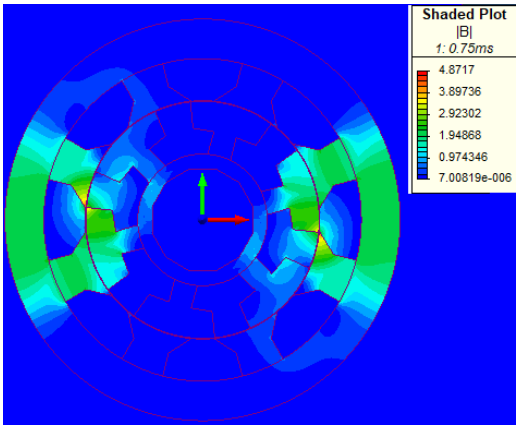
که L_{eq} اندوکتانس معادل سیم‌پیچ استاتور تحریک شده استاتور ناشی از القای خودی و همچنین کوپلینگ مغناطیسی بین سیم‌پیچ استاتور تحریک شده و سیم رتور است. θ موقعیت روتور و i جریان روتور است.

۳- تحلیل اجزاء محدود ماشین سوییچ رلوکتانس القایی چهار فاز

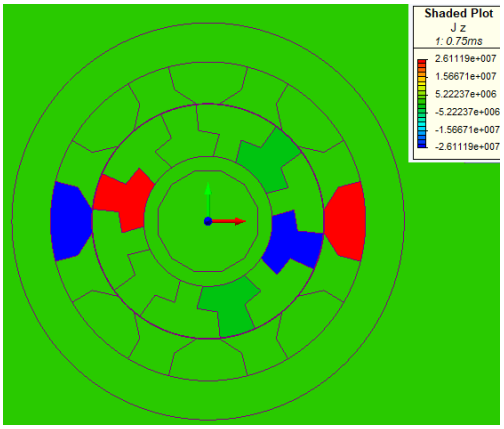
برای آنکه اثر سیم‌پیچ‌های اتصال کوتاه شده حول قطب‌های رتور را بررسی کنیم، یک مدل دوبعدی از یک ماشین سوییچ رلوکتانس القایی با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ در نرم افزار مگنت ایجاد شده است تا به روش اجزای محدود تحلیل گردد. در ابتدا فرض شده است که هیچ سیم‌پیچی حول قطب‌های رتور ماشین سوییچ رلوکتانس القایی وجود ندارد و فاز A تحریک می‌شود در حالی که رتور در سرعت ۲۵۰۰rpm می‌چرخد. این مدل با استفاده از تحلیل گذرای اجزای محدود در مگنت شبیه‌سازی شده و خطوط شار مغناطیسی محاسبه شده و در شکل ۲ رسم شده‌اند. همانطور که میبینیم در این حالت که سیم‌پیچ‌ها روی روتور حذف شده‌اند، مسیر شار کوتاه ایجاد نمی‌شود و مسیرهای شار مغناطیسی در این حالت در همه ماشین توزیع شده‌اند و غالب فضای استاتور و روتور را اشغال کرده‌اند.



شکل ۲: توزیع شار در ماشین سوییچ رلوکتانس القایی بدون وجود سیم‌پیچ روی روتور



شکل ۳: توزیع شار در ماشین سوییچ رلوکتانس القایی با وجود سیم‌پیچ روی روتور



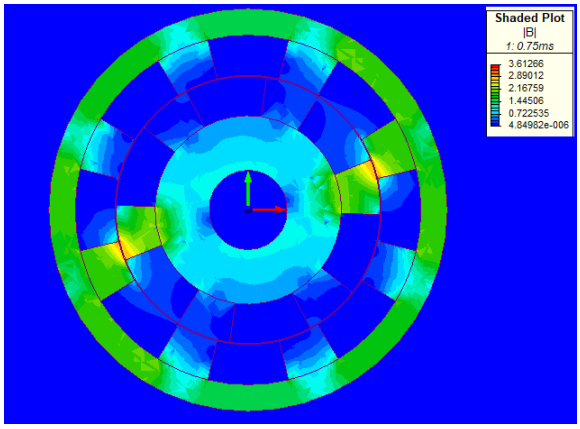
شکل ۴: جریان‌های القایی در سیم‌پیچ‌های استاتور و روتور ماشین سوییچ رلوکتانس القایی

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.2.6.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 2- Summer 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

در مرحله بعد، سیم‌پیچ‌های اتصال کوتاه شده به روتور ماشین سوییچ رلوکتانس القایی اضافه می‌شود که در شکل ۱ نشان داده شده است. سپس شبیه‌سازی گذرای ماشین سوییچ رلوکتانس القایی به روش اجزای محدود در نرم‌افزار مگنت با همان شرایط قبل مجددا انجام می‌شود. شکل ۳ توزیع شار مغناطیسی محاسبه شده در این حالت را نشان می‌دهد. همانطور که می‌بینیم در این حالت که سیم‌پیچ‌ها روی روتور قرار دارند، مسیر شار کوتاه ایجاد می‌شود و مسیرهای شار مغناطیسی در این حالت فقط حول فاز تحریک شده توزیع شده‌اند و غالب فضای استاتور و روتور بدون شار است که این نتیجه ای بسیار مطلوب است که منجر به افزایش گشتاور خواهد شد. به علاوه جریان های القایی در سیم پیچ‌های استاتور و روتور ماشین سوییچ رلوکتانس القایی در این شبیه سازی به‌دست آمده و در شکل ۴ قابل مشاهده هستند.

۴- مقایسه ماشین سوییچ رلوکتانس القایی با ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی

به‌دلیل اینکه هیچ منبع مغناطیسی روی روتور ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی وجود ندارد، تنها گشتاور رلوکتانسی در آن ایجاد می‌شود. اما در ماشین سوییچ رلوکتانس القایی، سیم‌پیچ‌های رتور جریان القایی را حمل می‌کنند و بر گشتاور کل اثر می‌گذارند. در واقع میدان مغناطیسی متغیر با زمان با جریان‌های حلقه روتور اثر متقابل دارند و گشتاور القایی تولید می‌شود.



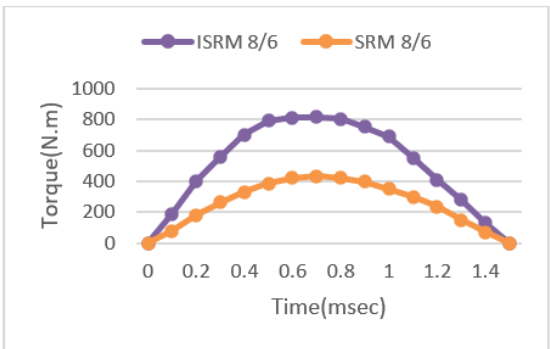
شکل ۵: توزیع شار مغناطیسی ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی

برای اینکه ماشین سوییچ رلوکتانس القایی را با ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی در توانایی گشتاور و راندمان مقایسه کنیم، یک ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی چهار فاز مورد تحلیل و بررسی به روش اجزای محدود قرار می‌گیرد و گشتاور آن محاسبه می‌گردد. مشخصات این ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی که برای شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته در جدول ۱ آورده شده است. ابعاد، تعداد قطب‌ها، تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ و فاصله‌های هوایی ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی با ماشین سوییچ رلوکتانس القایی که قبلا تحلیل شد یکسان است. یک مدل اجزای محدود دو بعدی ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی ایجاده شده و با همان روش قبلی تحریک شده است. توزیع شار ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که میبینیم مسیر توزیع شار در ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی کوتاه نیست.

درصورتی‌که روش خنک‌کنندگی این دو ماشین روش خنک‌کنندگی اسپری روغن باشد، چگالی جریان حداکثر هادی‌ها می‌تواند حدود ۲۰ آمپر بر میلیمتر مربع باشد و حداکثر جریان فاز به ۲۰۰A برسد، در این مرحله، پروفایل گشتاور و گشتاور متوسط هر دو ماشین محاسبه می‌شوند که نتایج آن در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ماشین سوییچ رلوکتانس القایی گشتاور بیشتری در مقایسه با ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی تولید می‌کند که حتی به نزدیک دو برابر هم می‌رسد. در مرحله بعد راندمان ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی و ماشین سوییچ رلوکتانس القایی محاسبه و مقایسه می‌شوند که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که راندمان ماشین سوییچ رلوکتانس القایی حدودا دو درصد بیشتر از راندمان ماشین سوییچ رلوکتانس در توان‌های مختلف است که این نتیجه‌ای بسیار مطلوب است.

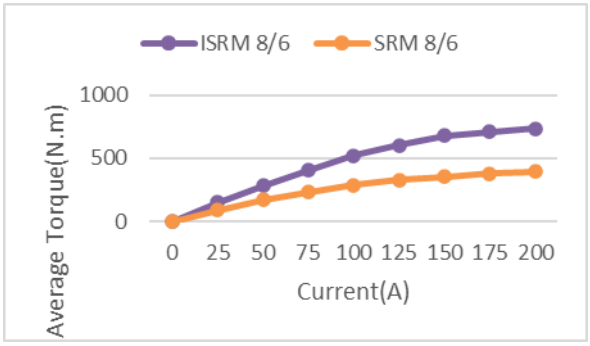
جدول (۱): مشخصات هر دو موتور ISRM و SRM

توان	۱۵۰ کیلووات
ولتاژ	۸۰۰ ولت
جریان	۲۰۰ آمپر
شعاع خارجی استاتور	۱۵ سانتی متر
طول موتور	۱۵ سانتی متر
تعداد قطب استاتور	۸
تعداد قطب روتور	۶
تعداد فاز	۴
تعداد دور سیم پیچ هر فاز استاتور	۵۰
تعداد دور سیم پیچ هرقطب روتور	۵۰
نوع ورق هسته	M19
سیستم خنک کننده	روغن

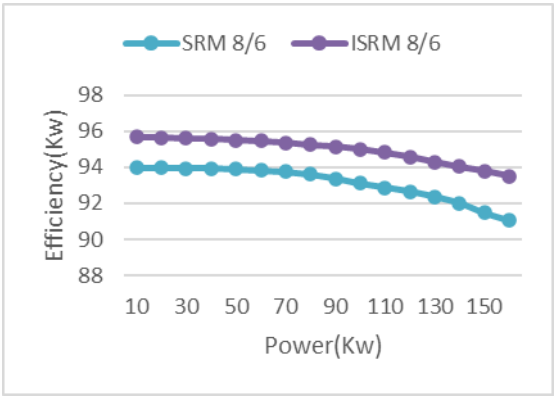


شکل ۶: پروفایل گشتاور ماشین سوییچ رلوکتانس القایی در مقایسه با ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی در جریان ۱۰۰ آمپر

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.2.6.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 2- Summer 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]



شکل ۷: گشتاور متوسط ماشین سوییچ رلوکتانس القایی در مقایسه با ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی در جریان‌های مختلف



شکل ۸: راندمان ماشین سوییچ رلوکتانس القایی در مقایسه با ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی در توان‌های مختلف

۴- نتیجه

در این مقاله، یک ماشین سوییچ رلوکتانس القایی چهار فاز با توان ۱۵۰ کیلووات برای کاربرد کامیون برقی معرفی شد. در این ماشین الکتریکی، با قراردادن سیم‌پیچ اتصال کوتاه شده بر روی رتور، یک مسیر شار مغناطیسی کوتاه به‌دست آمد. برای ارزیابی این ماشین سوییچ رلوکتانس، یک مدل اجزا محدود ۲ بعدی ماشین در نرم افزار مگنت ایجاد شد و به روش گذرای مغناطیسی حل شد. همچنین یک ماشین سوئیچ رلوکتانس معمولی با همان مشخصات شبیه‌سازی و تحلیل شد. سپس مشخصات گشتاور و راندمان آنها به‌دست آمد. با مقایسه ماشین سوییچ رلوکتانس القایی و ماشین سوییچ رلوکتانس معمولی، مشاهده شد که ماشین سوییچ رلوکتانس القایی پیشنهادی عملکرد بسیار مطلوبی در تولید گشتاور وهمچنین راندمان دارد. در نتیجه می‌تواند در کاربرد کامیون برقی که گشتاور بسیار بالایی نیاز دارد به کار رود.

۵-مراجع

[1] N. Zabihi and R. Gouws, ``A review on switched reluctance machines for electric vehicles," in *Proc. IEEE 25th Int. Symp. Ind. Electron. (ISIE)*, Santa Clara, CA, USA, Jun. 2016, pp. 799_804, doi: 10.1109/ISIE.2016.7744992.

[2] I. Boldea, L. N. Tutelea, L. Parsa, and D. Dorrell, ``Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 10, pp. 231_239, Oct. 2014, doi: 10.1109/TIE.2014.2301754.

[3] B. Bilgin, J. W. Jiang, and A. Emadi, *Switched Reluctance Motor Drives Fundamentals to Applications*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2019.

[4] Y.-R. Kang, J.-C. Son, and 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, Jun. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3004722.

[5] Z. Chen and 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] R. Vandana and B. G. Fernandes, ``Design methodology for high performance segmented rotor switched reluctance motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 1, pp. 11_21, Mar. 2015, doi: 10.1109/TEC.2014.2336861.

[7] E. Bostanci, M. Moallem, A. Parsapour, and B. Fahimi, ``Opportunities and challenges of switched reluctance motor drives for electric propulsion: A comparative study," *IEEE Trans. Transport. Electri_c.*, vol. 3, pp 58-57, no.1, Mar. 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2649883.

[8] B. C. Mecrow, E. A. El-Kharashi, J. W. Finch, and A. G. Jack, ``Preliminary performance evaluation of switched reluctance motors with segmental rotors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 4, pp. 679_686, Dec. 2004, doi: 10.1109/TEC.2004.837290.

[9] J. D. Widmer and B. C. Mecrow, ``Optimised segmental rotor switched reluctance machines with a greater number of rotor segments than stator slots," in *Proc. IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. (IEMDC)*, May 2011, pp. 1183_1188, doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994770.

[10] V. Rallabandi and B. G. Fernandes, ``Design procedure of segmented rotor switched reluctance motor for direct drive applications," *IET Electr Power Appl.*, vol. 8, no. 3, pp. 77_88, Mar. 2014, no. 1, pp. 58_75, Mar. 2017, doi: 10.3233/JAE-160006.

[11] R. Madhavan and B. G. Fernandes, ``A novel axial _flux segmented SRM for electric vehicle application," in *Proc. 19th Int. Conf. Electr. Mach. (ICEM)*, pp. 100-105, Rome, Italy, Sep. 2010, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5608140.

[12] S. Li, S. Zhang, T. G. Habetler, and R. G. Harley, ``Modeling, design optimization, and applications of switched reluctance machines_A review," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 3, pp. 2660_2681, May 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2897965.

[13] A. Chiba, K. Kiyota, N. Hoshi, M. Takemoto, and S. Ogasawara, ``Development of a rare-earth-free SR motor with high torque density for hybrid vehicles," *IEEE*

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.2.6.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 2- Summer 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Trans. Energy Convers., vol. 30, no. 3, pp. 175_182, Mar. 2015, doi: 10.1109/TEC.2014.2343962.

[14] R. Vandana, S. Nikam, and B. G. Fernandes, ``Criteria for design of high performance switched reluctance motor," in *Proc. 20th Int. Conf. Electr.Mach.*, pp. 129_135 Marseille, France, Sep. 2012, doi: 10.1109/ICElMach.2012.6349853.

[15] M. Abbasian, M. Moallem, and B. Fahimi, ``Double-stator switched reluctance machines (DSSRM): Fundamentals and magnetic force analysis," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 3, pp. 589_597, Sep. 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2051547.

[16] S. R. Mousavi-Aghdam, M. R. Feyzi, and N. Bianchi, ``Design and analysis of a novel high-torque stator-segmented SRM," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 3, pp. 79_88, Dec. 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2494531.

رزومه

میثم اعظمیـــان جـــزی در اصـفهان متولـد شـده اسـت.وی مـدرک دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی بـرق- قـدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان خوراسـگان (۱۳۹۵) دریافـت کـرد. وی هم اکنون دانشجوی دکترای مهندسی برق در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان خوراسگان میباشد. فعالیت‌های پژوهشی و علاقـه‌منـدی ایشان در زمینه موتورهای الکتریکی و درایو میباشد.

محمدعلی عباسیان در اصفهان متولد شده اسـت. وی کارشناسـی و کارشناسی ارشد و دکترای خود را از دانشگاه صنعتی اصفهان در رشته مهندسی برق قدرت دریافت کرده است و از سال ۱۳۹۲ استادیار گروه برق در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان خوراسگان اسـت. فعالیـت-های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشـان در زمینـه موتورهـای الکتریکـی و درایو میباشد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.2.6.0]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 2- Summer 2022

Design of a four-phase induction switched reluctance machine for electric truck application

Meysam Azamian Jazi[1], Mohammadali Abbasian[2]

1-PhD student - Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran
2-Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran, m.abbasian@khuisf.ac.ir

Abstract: At present, the design and optimization of electric machines for use in electric vehicles has been fundamentally considered. The motors required for electric trucks must have a power of more than 160 kW. These types of motors are usually made of permanent magnet synchronous machine. Due to the high size of this machine at very high powers, it is necessary to use a large volume of permanent magnets in these machines. Due to the high cost of permanent magnets and their production from rare earth materials, the use of non-magnet electric machines is a better option. But its torque is less than that of a permanent magnet machine. Therefore, designing new models of switched reluctance machines is necessary for the use of electric trucks. In this paper, a four-phase induction switched reluctance machine with a power of 160 kW is introduced for the use of electric trucks and its performance is evaluated. The innovation is based on the placement of coils on the rotor to shorten the path of the magnetic flux in the rotor core and stator of the electric motor. As a result, a high torque is produced. After the introduction of the machine, using the finite element method, its torque in different currents is calculated and efficiency is calculated.

Keywords: Switched reluctance machine, Induction, Torque, Electric vehicle, Electric truck

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.2.6.0]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 2- Summer 2022