

Design and Torque Analysis of Double-Slot Surface and Spoke-Type BLDC Motor Using Finite Element Method

Ali Esteki^{1,2}, M.Sc, Behrooz Majidi^{1,2}, Assistant Professor

¹Department of Electrical Engineering- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

²Smart Microgrid Research Center- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
ali.esteki457@yahoo.com, bmx@aut.ac.ir

Abstract

The aim of this paper is to investigate the impact of second slot in stator tooth on performance of two commonly used rotor structures, namely Surface-type and Spoke-type, for a brushless direct current (BLDC) motor. The comparative results are reported for different closing slot conditions. Afterwards by inserting a direct current driven winding or permanent magnets (PMs) into the stator tooth slots of best performed model of previous stage, two hybrid-brushless direct current (HBLDC) motors are introduced and studied. The results demonstrated that slot-closing strategy has high impact on torque fluctuations while the torque produced remain almost constant. For HBLDC, the auxiliary Electro-Magnetic field, placed in stator slot, developed torque performance of the motors. The finite element method (FEM) is used in stages of study.

Keywords: brushless direct current, double-slot stator, finite element method, surface and spoke-type, torque

Received: 27 Octo 2021

Revised: 22 December 2021

Accepted: 16 March 2022

Corresponding Author: Dr. Behrooz Majidi

طراحی و تحلیل گشتاور موتور بدون جاروبک جریان مستقیم شیار دابل با آهنرباهای اسپکی و سطحی با استفاده از روش اجزاء محدود

علی استکی^{۱،۲}، کارشناسی ارشد، بهروز مجیدی^{۱،۲}، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
۲- مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
ali.esteki457@yahoo.com, bmx@aut.ac.ir

چکیده: هدف از این تحقیق، مطالعه تأثیر شیار دوم در دندانه استاتور بر روی عملکرد دو ساختار متداول روتور به نام‌های اسپکی و سطحی، برای موتور جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC) است. نتایج برای حالت‌های مختلف بسته بودن شیارها ارائه و مقایسه شده است. سپس با جای‌گذاری یک سیم‌پیچ تغذیه شده با جریان مستقیم و یا آهنرباهای مغناطیس دائم درون شیار دندانه‌های استاتور موتوری که در مراحل قبل بهترین عملکرد را داشته، دو مدل هیبرید BLDC معرفی و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج حاکی از آن است که رویکرد بستن شیار به شدت بر روی نوسانات گشتاور مؤثر است در حالی که گشتاور تولیدی هر دو ساختار تقریباً ثابت مانده است. در خصوص HBLDC، میدان الکترومغناطیسی جانبی که در شیار دندانه استاتور جای‌گذاری شده عملکرد گشتاوری موتورها را بهبود می‌بخشد. در همه مراحل این تحقیق از روش اجزای محدود استفاده شده است.

کلمات کلیدی: روش اجزا محدود، شیار دوگانه استاتور، ماشین بدون جاروبک جریان مستقیم، مدل هیبرید

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۸/۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر بهروز مجیدی

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

۱- مقدمه

موتور جریان مستقیم بدون جاروبک^۱ (BLDC) اساسا دارای ساختاری مشابه یک ماشین آهنربا دائم دوار همراه با یک مجموعه از هادی‌های حامل جریان است. از این نظر، مشابه با یک موتور DC دارای کموتاتور معکوس شده بوده که در آن آهنربا می‌چرخد اما هادی‌های جریان ثابت باقی می‌مانند. در هر دو حالت، برای ثابت ماندن جهت گشتاور در یک جهت، جریان در هادی‌ها باید در هر زمان که یک قطب مغناطیسی از روبروی آن عبور می‌کند، معکوس شود. در یک موتور DC دارای کموتاتور، معکوس شدن پلاریته با استفاده از کموتاتور و جاروبک‌ها انجام می‌شود [۱-۳]. چون کموتاتور نسبت به روتور ثابت است لحظات کلیدزنی به‌طور اتوماتیک با تغییر پلاریته میدان مغناطیسی هادی‌ها سنکرون می‌گردد. در یک موتور BLDC معکوس شدن پلاریته با کلیدزنی ادوات الکترونیک قدرت انجام می‌شود. عملیات کموتاسیون در هر دو نوع ماشین مشابه به هم بوده و سنکرون با وضعیت روتور است و لذا معادلات دینامیکی مربوطه و مشخصه‌های سرعت-گشتاور آنها یکسان هستند [۱-۶]. از مزایای این موتورها می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد [۷]:

الف- نویز پائین: به دلیل عدم نیاز به هیچگونه جاروبک مکانیکی یا حلقه‌های لغزان^۲ در موتورهای مغناطیس دائم BLDC تمام نویزهای مکانیکی به استثنای نویزهای مربوط به بلبرینگ‌ها، کولپینگ‌ها و بار حذف می‌شوند.

ب- بهره بالا: بهره بالاتر موتورهای BLDC در اصل به واسطه وجود میدان آهنربا است که میدانی ثابت دارند و مصرف توان الکتریکی ندارد.

ج- هزینه نگهداری پایین و عمر بیشتر: چون جاروبک وجود ندارد، عمر موتور وابسته به عمر بلبرینگ‌ها و عمر آهنربا است.

د- ساختار مجتمع و متراکم: کاربردهای هوافضا و اتومبیل، نیاز به تجهیزات با وزن کمتر و حجم کوچکتری دارند تا بهره سوخت مصرفی را افزایش دهند و لذا نیاز به ذخیره‌سازی انرژی کمتری داشته باشند.

با وجود مزایای ذکر شده، این موتورها دارای مشخصات و معایب ذاتی هستند که عبارت‌اند از:

الف- قیمت مواد مغناطیسی: قیمت‌های مواد مغناطیس دائم با چگالی انرژی بالاتر، مانع از به‌کارگیری آنها در بسیاری از کاربردها می‌شود. به‌عنوان مثال سرامیک‌ها، کمترین قیمت را دارند و از طرفی دارای کمترین دانسیته انرژی نیز هستند. مغناطیس دائم از خانواده نفودوم^۳ بالاترین دانسیته انرژی را دارد که در حدود سه برابر قیمت سرامیک است.

ب- احتمال مغناطیس زدایی: در استفاده از مواد مغناطیس دائم باید مراقبت زیادی در برابر مقادیر بالای نیروهای مغناطیس زدا و یا درجه حرارت‌های بالا که می‌توانند اثر مغناطیسی آهنربا را از بین ببرند، به عمل آید.

مطالعات بسیار در خصوص عملکرد و به‌کارگیری موتور BLDC در صنایع مختلف مانند صنایع هوا فضا [۸-۱۳]، سانتریفیوژها [۱۴]، هارد دیسک کامپیوترهای شخصی [۱۵-۲۱]، خودروهای برقی [۱۹-۲۳]، پمپ‌ها [۲۴-۲۶]، انرژی بادی [۲۷] و همچنین مطالعاتی مربوط به ساختارهای نوین این موتورها [۲۸-۳۷] انجام شده است. در گام اول این تحقیق، یک ماشین بدون جاروبک جریان مستقیم با دو چینش برای آهنرباها درون روتور بصورت اسپکی و سطحی و ترکیب آنها با چهار شکل ساختاری برای شیارهای استاتور به‌منظور بهبود عملکرد این موتورها مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس در دندان‌های استاتور ساختارهایی با بهترین عملکرد برای هر دو چینش اسپکی و سطحی شیار اضافه می‌گردد. در این گام از تحقیق دو تغییر ساختاری بر روی شیارهای استاتور اعمال می‌شود. ابتدا عرض شیار دوم اضافه شده به دندان استاتور را تغییر و سپس همزمان با این تغییرات، چهار حالت باز و یا بسته بودن شیارهای اصلی سیم‌پیچی استاتور و شیارهای دندان در نظر گرفته می‌شود. تحقیقات با انتخاب بهترین عملکرد از بین ساختارها و حالت‌های فوق به این صورت ادامه می‌یابد. درون شیار اضافه شده به ساختار استاتور دو تحریک در نظر گرفته می‌شود: یکی با قرار دادن سیم‌پیچی DC درون این ساختارها و دیگری با قرار دادن آهنربای دائمی. با توجه به اینکه ازدیاد میدان مغناطیسی درون ساختار استاتور باعث افزایش چگالی شار درون استاتور می‌شود و به علت آن تلفات افزایش می‌یابد، عملکرد تلفاتی موتور با به‌کارگیری شش جنس ورق استاتور و روتور بررسی شده است. نتایج هر بخش به‌صورت جداگانه و با انجام مقایسه‌های مناسب ارائه شده‌اند.

۲- ساختارهای مورد مطالعه و رویکرد

در ابتدای این بخش به ارائه شمای کلی ساختارها و تغییرات مورد نظر پرداخته می‌شود. ساختار مورد مطالعه یک ساختار موتور بدون جاروبک جریان مستقیم با ۱۲ شیار برای استاتور و ۱۰ قطب آهنربایی برای روتور آن در دو قالب اسپکی و سطحی خواهد بود که مشخصات طراحی آن در جدول (۱) آمده است. رویکردهای مورد نظر در این مقاله شامل چندین بخش خواهند بود که به ترتیب زیر ارائه خواهند شد:

الف- برای دو ساختار روتور سطحی و اسپکی، چهار شکل هندسی مختلف برای شیارهای استاتور در نظر گرفته شده است که هر کدام مجزا از نقطه نظر عملکرد گشتاور آن‌ها بررسی خواهند شد.

ب- برای هر کدام از ساختارهای روتور، ساختار هندسی استاتور که بهترین عملکرد را داشته باشد انتخاب و در این مرحله بطور همزمان دو فرآیند بر روی آنها اعمال می‌شود. شیار دومی در دندانه‌های استاتور لحاظ می‌شود که عرض آن همزمان با چهار حالت باز-بسته بودن هر دو شیار لحاظ شده درون ساختار استاتور مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته شده است.

ج- بهترین عرض شیار دندانه با در نظر گرفتن نحوه باز-بسته بودن ورودی شیارها از نظر عملکردی، برای تبدیل به مدل تغذیه دوگانه (هیبرید) انتخاب شده‌اند. ابتدا یک سیم پیچ تحریک مستقیم درون شیارهای ثانویه استاتور لحاظ شده که برای چهار جنس سیم مختلف مس، آلومینیوم، نقره و طلا بررسی شده است و سپس سه ماده آهنربایی فریت، نئودیمیوم-آهن-بور و ساماریوم-کبالت درون شیارهای دوم جاگذاری شده‌اند.

د- در نهایت چهار ساختار که عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌های ارائه شده داشته‌اند جهت تعدیل تلفات ناشی از اضافه شدن میدان مغناطیسی درون استاتور، با جنس استیل‌های مختلف برای ورق‌های استاتور و روتور مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۱-۲- ساختار روتور

در این بخش تغییرات ساختاری چندانی برای روتور اجرا نشده و مدل اسپکی و سطحی که از ساختارهای کاربردی و معرفی شده در بسیاری از تحقیقات هستند مطابق شکل (۱) مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲-۲- سیم‌بندی اصلی ساختار استاتور

سیم‌بندی اصلی ساختار استاتور برای همه مدل‌ها بررسی شده یکسان و به صورت نشان داده شده در شکل (۲) در نظر گرفته شده است. این سیم‌بندی شامل یک سیم‌بندی سه‌فاز دو طبقه گام کامل برای یک استاتور ۱۲ شیار ۱۰ قطب محاسبه و اعمال شده است.

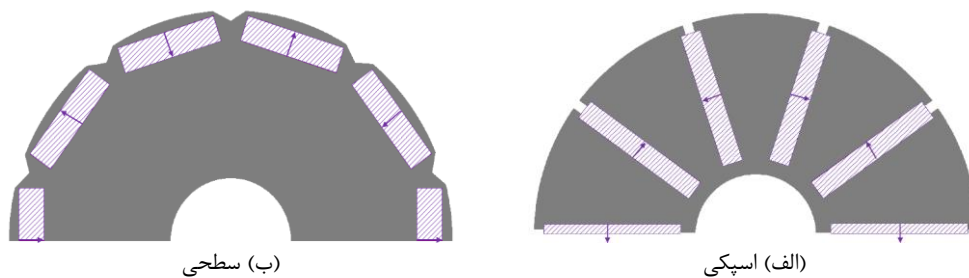
۳-۲- تغییر شکل شیار استاتور

چهار شکل هندسی قوسی^۴، دوزنقه‌ای^۵، پنج ضلعی^۶ و الماسی^۷ برای شیارهای اصلی ساختار استاتور مطابق شکل (۳) در نظر گرفته شده‌اند. این چهار ساختار در کنار دو مدل در نظر گرفته شده برای روتور، مجموعاً هشت مدل ابتدایی این تحقیق را تشکیل می‌دهند که هدف بهبود هرچه بیشتر این ساختارهاست. بنابراین بهترین ساختار برای هر دو ساختار روتور از نقطه نظر عملکرد گشتاوری برای ادامه تحقیقات انتخاب خواهند شد.

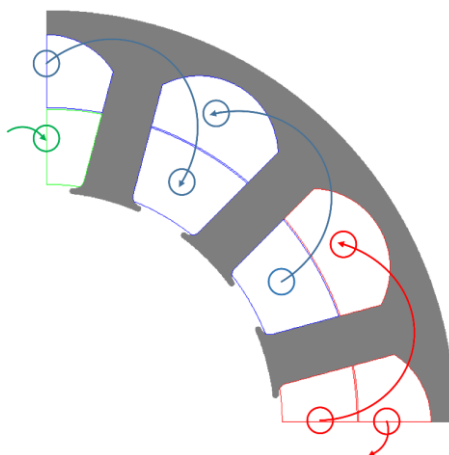
Table (1): Design Specifications

جدول (۱): مشخصات طراحی

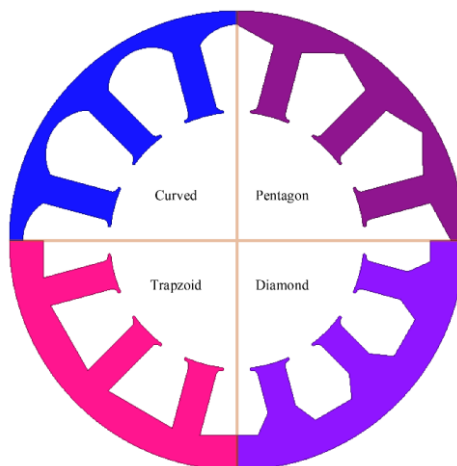
عنوان	واحد	مقدار	عنوان	واحد	مقدار
قطر خارجی استاتور	mm	۱۶۰/۵	ابعاد آهنربا روتور اسپکی	mm	۴*۲۷
قطر داخلی استاتور	mm	۸۹	ابعاد آهنربا روتور سطحی	mm	۵*۲۰
قطر خارجی روتور	mm	۸۸	تعداد شیار استاتور	---	۱۲
قطر داخلی روتور(شافت)	mm	۲۴	تعداد قطب روتور	---	۱۰
طول موتور	mm	۱۷۰	گام سیم پیچی	---	۱
طول دندانه استاتور	mm	۲۲	سرعت نامی موتور	RPM	۱۰۰۰



شکل (۱): ساختارهای روتور
Figure (1): Rotor schemes: (A) Spoke type, (B) Surface type



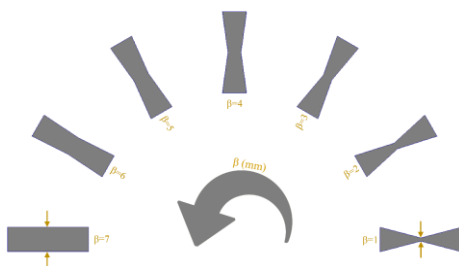
شکل (۲): نحوه سیم‌بندی ساختار استاتور
Figure (2): Winding stator pattern



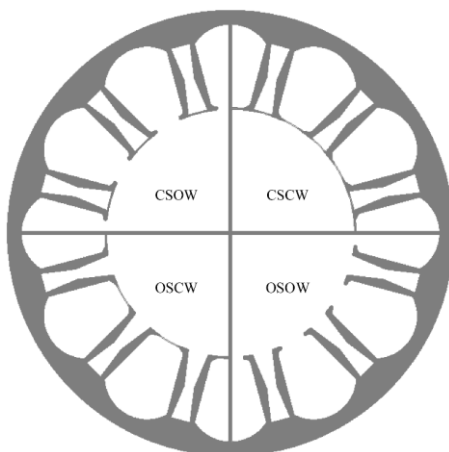
شکل (۳): ساختارهای شیار استاتور
Figure (3): Stator slot schemes

۲-۴- شیار دندانه و وضعیت دهانه شیارها

با اضافه شدن شیار ثانویه به دندانه استاتور، بسته و باز بودن دهانه شیارهای سیم‌پیچ اصلی و شیار اضافه شده به دندانه استاتور نیز مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. عرض شیار دندانه (β) همان‌طوری که در شکل (۴) نشان داده شده است، از ۱ تا ۷ میلی متر متغییر خواهد بود در شرایطی که به‌طور همزمان چهار حالت شیار سیم‌پیچ باز-شیار دندانه باز^۱ (OSOW)، شیار سیم‌پیچ باز-شیار دندانه بسته^۲ (CSOW)، شیار سیم‌پیچ بسته-شیار دندانه بسته^۱ (CSCW) و شیار سی‌پیچ بسته-شیار دندانه باز^{۱۱} (OSCW) برای آن‌ها در نظر گرفته خواهد شد [شکل (۵)].



شکل (۴): تغییرات عرض شیار دندانه استاتور (β)
Figure (4): Stator slot width scheme (β variation)



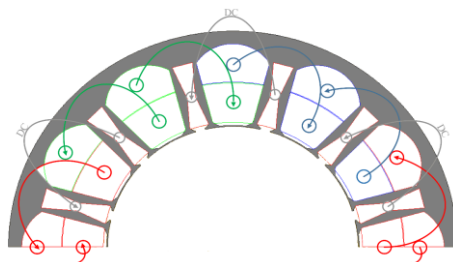
شکل (۵): نحوه مسدود کردن دهانه شیارهای استاتور
Figure (5): Stator slot opening scheme

۲-۵- مدل هیبرید

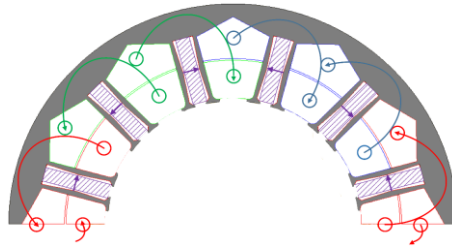
پس از اعمال موارد فوق دو ساختاری که برای روتور اسپکی و سطحی بهترین عملکرد گشتاوری را ارائه می‌دهند جهت تبدیل به مدل هیبرید انتخاب شده‌اند. بنا بر آنچه در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است، دوگانگی تغذیه موتورها از دو طریق اضافه کردن سیم پیچ جریان مستقیم ۲/۵ آمپری و جای‌گذاری آهنرباهای دائم درون شیار دندانه بر روی ساختارها اعمال می‌شود.

۲-۶- مواد آهنی

شش استیل مختلف به نام M15، M19، M22، M27، M36 و M43 برای ساختارهای آهنی ماشین (روتور و استاتور) جهت بررسی تأثیر جنس مواد آهنی بر کاهش تلفات ماشین مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از آنجایی که با تبدیل مدل‌ها به ساختار هیبرید، شدت میدان مغناطیسی مخصوصاً در استاتور افزایش می‌یابد در نتیجه افزایش چگالی شار درون ساختارهای آهنی مستقیماً تلفات فوکو و هیستریزیس را نیز متأثر می‌کند.



شکل (۶): هیبرید سیم‌پیچ جریان مستقیم
Figure (6): Hybrid DC winding



شکل (۷): هیبرید آهنربای دائم
Figure (7): Hybrid permanent magnets

۳- نتایج شبیه سازی

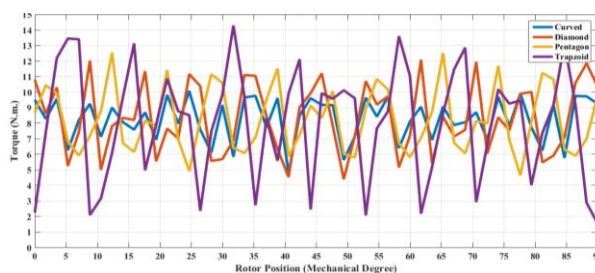
با توجه به آنچه در قسمت دوم بیان شد، موتور BLDC مورد نظر در چندین مرحله و با تغییرات ساختاری به قراری که عنوان شد مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. شایان ذکر است که کلیه شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی ساختار با استفاده از نرم‌افزار ماکسول^{۱۲} در شرایط یکسان صورت گرفته است. در ادامه این قسمت به بررسی نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها پرداخته می‌شود. جنس ورق‌های استیل استفاده شده برای مدل‌ها ورق M36 است.

۳-۱- تغییرات ساختار استاتور

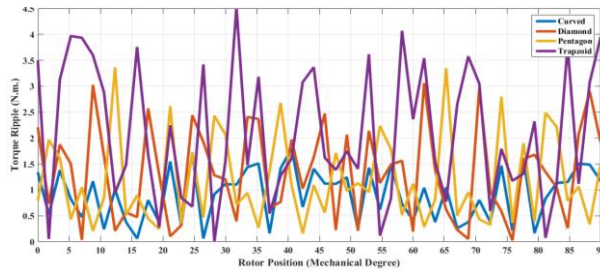
با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های (۸) الی (۱۱) که نشان دهنده گشتاور متوسط تولیدی ماشین و ضربان گشتاور معادل آن است، تغییرات شکل هندسی شیار سیم‌پیچ‌های استاتور برای هر دو ساختار روتور اسپکی و سطحی، تأثیر بسزایی در عملکرد گشتاوری موتور دارد به طوری که در موتور BLDC با روتور اسپکی ۱۰ قطب متوسط گشتاور تمامی مدل‌ها نزدیک به ۸ نیوتن‌متر است در حالی که نوسانات شدیدتری در ضربان گشتاور آن دیده می‌شود به صورتی که ضربان گشتاور از یک نیوتن‌متر در مدل قوسی تا ۳ نیوتن‌متر (معادل ۴۰ درصد گشتاور متوسط مدل‌ها) در مدل ذوزنقه‌ای تغییر می‌کند که در این بین بهترین عملکرد مربوط به موتور اسپکی با شیار سیم‌پیچی قوسی است. در ساختار BLDC با روتور سطحی ۱۰ قطب نیز متوسط گشتاور تولیدی ساختارها نزدیک به ۸ نیوتن‌متر است در حالی که ضربان گشتاور مدل‌ها از ۱۲/۵ درصد در ساختار پنج‌ضلعی تا ۲۵ درصد در ساختار قوسی متغیر خواهد بود. بنابراین نتایج، بهترین عملکرد در این قسمت نیز متعلق به ساختار سطحی با شیار سیم‌پیچی پنج ضلعی خواهد بود. توزیع چگالی شار در مدل‌های اسپکی-قوسی و سطحی-ذوزنقه‌ای در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. با وجود اینکه بخاطر محل قرارگیری آهنرباها در نزدیکی فاصله هوایی، محدوده بیشتری از ساختار در مدل سطحی در معرض اشباع‌های محلی قرار می‌گیرند، ولی در کل توزیع مناسب چگالی شار درون ساختارها مشهود است.

۳-۲- شیار دندانه و تغییر وضعیت دهانه شیارها

بهترین عملکرد در قسمت قبل به مدل اسپکی-قوسی و سطحی-ذوزنقه‌ای تعلق گرفت. حال با توجه به آنچه در قسمت دوم بیان شد، تغییرات ساختاری مطابق شکل‌های (۴) و (۵) بر روی این دو مدل اعمال می‌گردد.

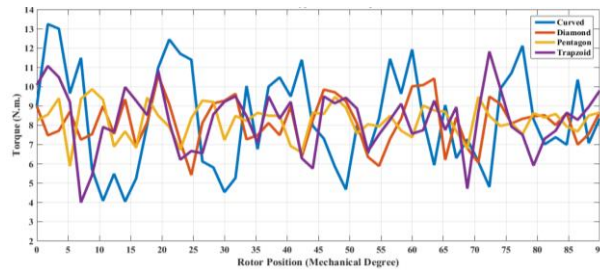


شکل (۸): گشتاور متوسط تولیدی در مدل اسپکی
Figure (8): Average torque in spoke type



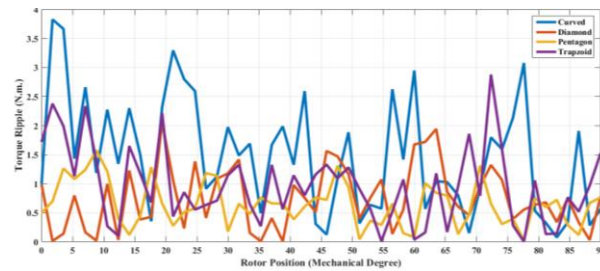
شکل (۹): ریبیل گشتاور تولیدی در مدل اسپکی

Figure (9): Torque ripple in spoke type



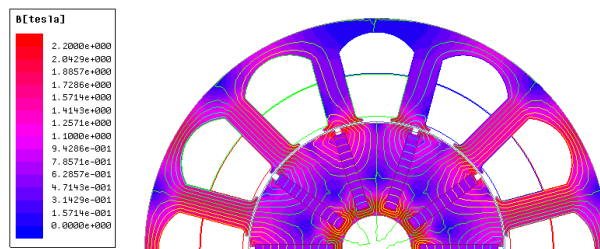
شکل (۱۰): گشتاور متوسط تولیدی در مدل سطحی

Figure (10): Average torque in surface type



شکل (۱۱): ریبیل گشتاور تولیدی در مدل سطحی

Figure (11): Torque ripple in surface type

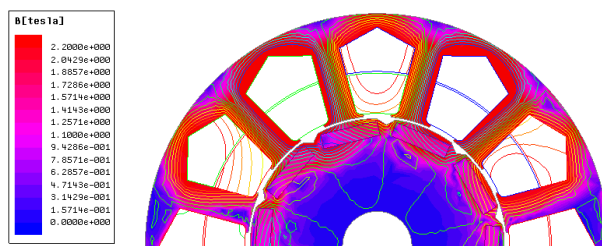


شکل (۱۲): توزیع چگالی شار در مدل اسپکی-قوسی

Figure (12): Flux density distribution in spoke-curved model

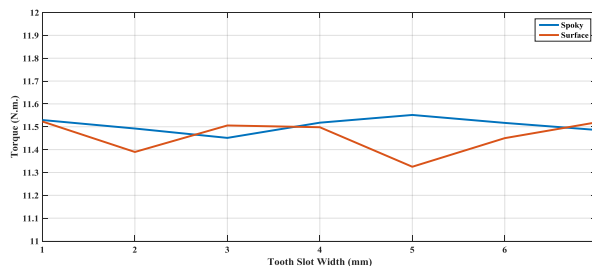
با توجه به نتایج ارائه شده در قالب شکل‌های (۱۴) تا (۲۱) تغییرات β تأثیر چشم‌گیری در ضربان گشتاور موتورها در هر دو مدل اسپکی و سطحی داشته‌اند در حالیکه گشتاور تولیدی بطور کلی افزایش داشته اما با تغییرات β تغییرات ناچیزی دارد و مقداری تقریباً ثابت و برابر ۱۱/۵ نیوتن‌متر را ارائه خواهند داد. با توجه به خروجی‌های به‌دست آمده، بهترین عملکرد از نقطه نظر ضربان گشتاور در موتور اسپکی-قوسی در حالت OSCW و به ازای β برابر ۵ میلی‌متر و برای موتور سطحی-ذوزنقه‌ای در حالت OSOW به ازای β برابر ۷ میلی‌متر حاصل می‌شود. توزیع چگالی شار در این دو ساختار بهبود یافته در شکل‌های (۲۲) و (۲۳) ارائه شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی فوق می‌توان متوجه شد که با وجود عملکرد مغناطیسی مناسب مدل اسپکی-قوسی-OSCW با β برابر ۵ میلی‌متر، مدل سطحی-ذوزنقه‌ای-OSOW به دلیل اعمال β برابر ۷ میلی‌متر متحمل

اشباع‌های محلی بیشتری مخصوصاً در دندانه‌ها خواهد شد. با این وجود همچنان توزیع چگالی شار از مقدار $2-1/8$ تسلا که مطلوب برای دندانه‌ها است خارج نشده‌اند [۴] و می‌توان عملکرد مناسبی را برای آن‌ها متصور بود.



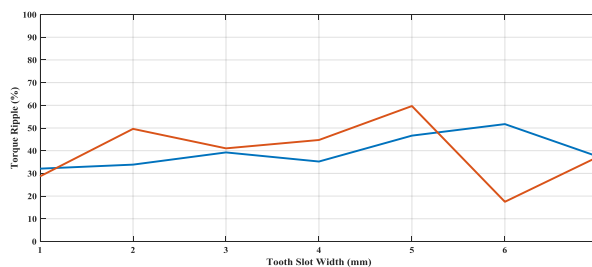
شکل (۱۳): توزیع چگالی شار در مدل سطحی-ذوزنقه‌ای

Figure (13): Flux density distribution in surface-trapezoid model



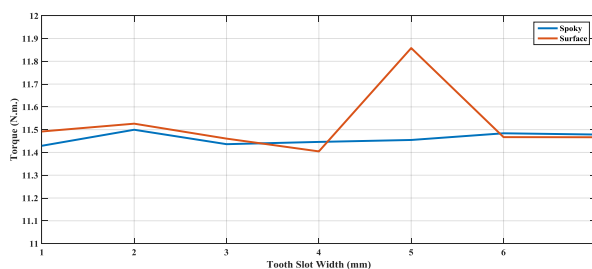
شکل (۱۴): تغییرات گشتاور به ازای تغییرات β در ساختار CSCW

Figure (14): Torque variation vs. β variation in CSCW scheme



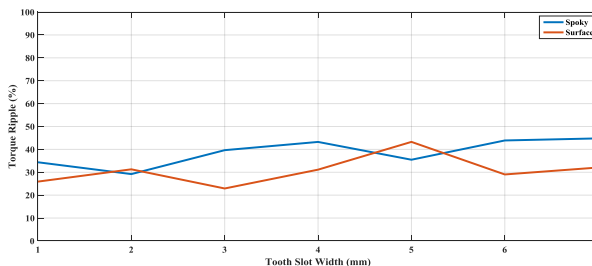
شکل (۱۵): تغییرات ضربان گشتاور به ازای تغییرات β در ساختار CSCW

Figure (15): Torque ripple variation vs. β variation in CSCW scheme



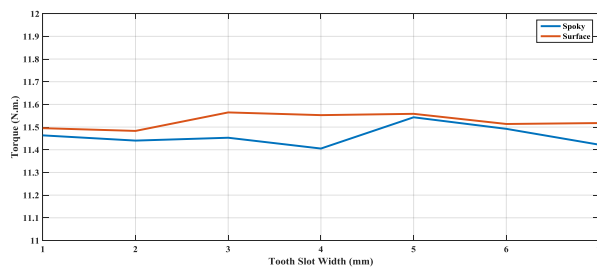
شکل (۱۶): تغییرات گشتاور به ازای تغییرات β در ساختار CSOW

Figure (16): Torque variation vs. β variation in CSOW scheme

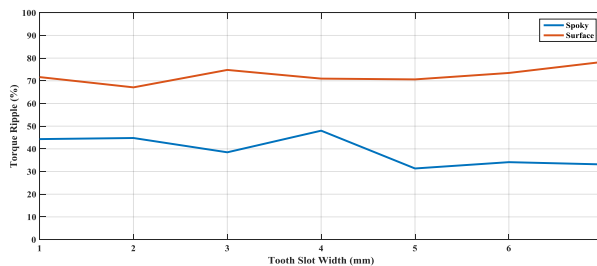


شکل (۱۷): تغییرات ضربان گشتاور به ازای تغییرات β در ساختار CSOW

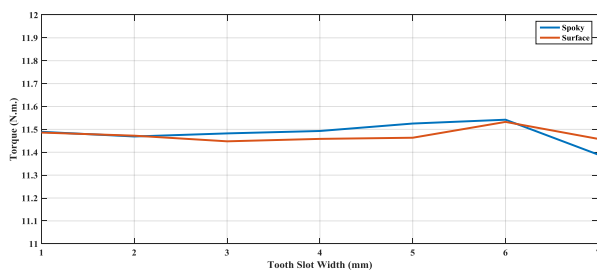
Figure (17): Torque ripple variation vs. β variation in CSOW scheme



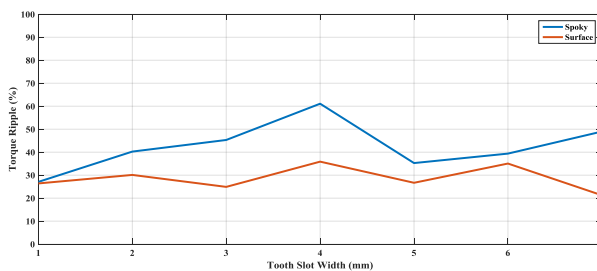
شکل (۱۸): تغییرات گشتاور به ازای تغییرات β در ساختار OSCW
Figure (18): Torque variation vs. β variation in OSCW scheme



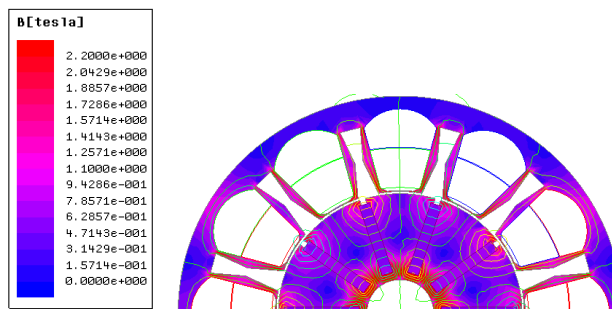
شکل (۱۹): تغییرات ضربان گشتاور به ازای تغییرات β در ساختار OSCW
Figure (19): Torque ripple variation vs. β variation in OSCW scheme



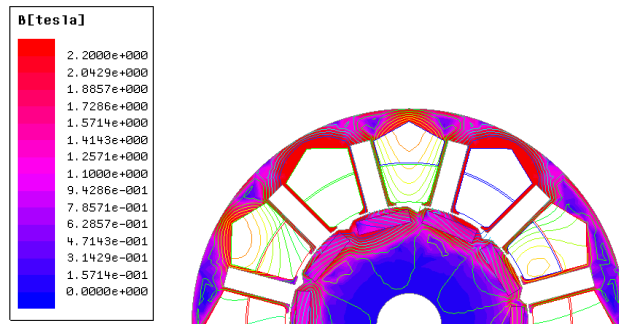
شکل (۲۰): تغییرات گشتاور به ازای تغییرات β در ساختار OSOW
Figure (20): Torque variation vs. β variation in OSOW scheme



شکل (۲۱): تغییرات ضربان گشتاور به ازای تغییرات β در OSOW
Figure (21): Torque ripple variation vs. β variation in OSOW scheme



شکل (۲۲): توزیع چگالی شار برای مدل OSCW اسپکی با β برابر ۵
Figure (22): Flux density distribution in OSCW with $\beta=5$



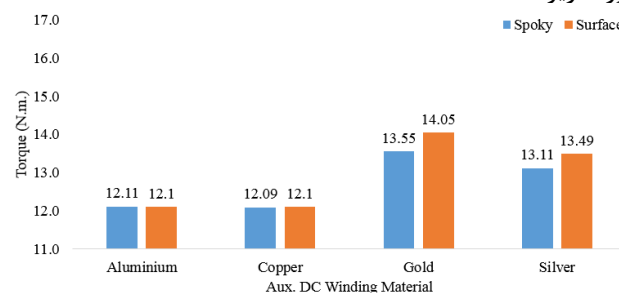
شکل (۲۳): توزیع چگالی شار برای مدل OSOW سطحی با β برابر ۷
Figure (23): Flux density distribution in OSOW with $\beta=7$

۳-۳- مدل های هیبرید

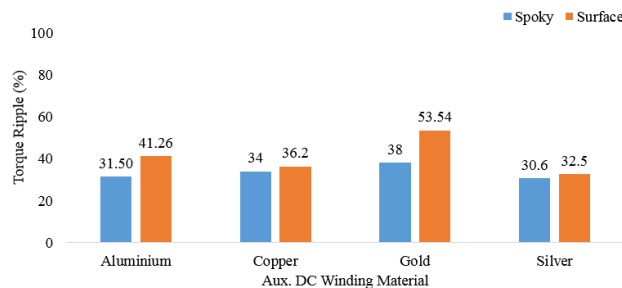
با تعیین مدل های بهبودیافته شیار دویل برای موتور BLDC اسپکی و سطحی و همچنین تعیین وضعیت نحوه باز-بسته بودن شیارهای استاتور و دندانه، دو مدل اسپکی-قوسی β برابر ۵ میلی-متر (OSCW) و مدل سطحی-دوزنقه‌ای β برابر ۷ میلی-متر (OSOW) به‌عنوان مدل های با عملکرد مطلوب انتخاب شده‌اند. حال این مدل ها را با اعمال یک میدان الکترومغناطیسی ناشی از یک سیم‌پیچ تعبیه شده درون شیارهای دندانه با جریان ثابت ۲/۵ آمپر و یک میدان مغناطیسی ناشی از قرارگیری آهنرباهای دائم درون این شیارها، به دو مدل هیبرید تبدیل خواهند شد که میدان مغناطیسی تولید شده در استاتور آن‌ها در هر دو حالت شامل یک میدان الکترو مغناطیسی ناشی از سیم‌پیچی سه‌فاز استاتور و یک میدان مغناطیسی ثابت ناشی از سیم پیچ DC و یا آهنربای دائم خواهد بود. نتایج ارائه شده در شکل‌های (۲۴) الی (۲۷) حاکی از آن است که با توجه به الزامات کاربردی ماشین، به‌کارگیری مواد مختلف در شیار دندانه توجیه پیدا می‌کند چرا که در مورد به‌کارگیری سیم‌پیچ DC، هزینه ساخت ماشین با سیم‌پیچ از جنس طلا و نقره به مراتب بالاتر خواهد بود که این مدل‌ها را برای کاربردهای خاص مانند کاربردهای نظامی مقرون به صرفه می‌کند. در مدل‌های هیبرید آهنربا، اعمال آهنرباهای خاک کمیاب که قدرت مغناطیسی بالاتری دارند، به شدت تداخل میدان‌های داخل استاتور را منجر می‌شود که به همین دلیل به‌کارگیری آهنرباهای با قدرت مغناطیسی بالا عملکرد مطلوبی را به‌همراه نخواهد داشت. در نهایت با توجه به نتایج، برای مدل بهبودیافته اسپکی و سطحی که از قسمت‌های قبل به‌دست آمده بود، با وجود عملکرد مناسب سیم‌پیچ DC از جنس نقره، به‌کارگیری آهنربای فريت برای هر دو مدل بهترین گزینه خواهد بود. توزیع چگالی شار در مدل‌های تغذیه هیبرید با آهنربای فريت در شکل‌های (۲۸) و (۲۹) ارائه شده‌اند.

۳-۴- تغییر مواد آهنی

با توجه به اعمال میدان مغناطیسی درون ساختارهای اسپکی و سطحی بهبود یافته در مراحل مختلف این تحقیق، چگالی شار درون ساختار استاتور به شدت افزایش می‌یابد به‌طوری‌که تلفات فوکو و هیستریزیس درون ساختار نیز افزایش می‌یابند. با توجه به رابطه تلفات آهنی موتور به‌صورت زیر:

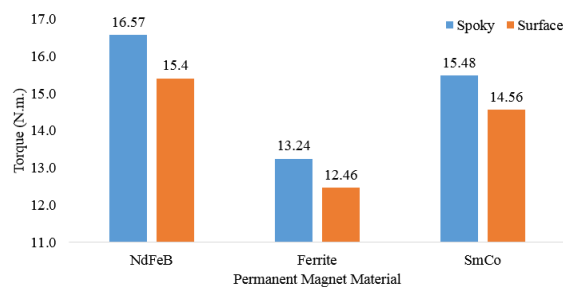


شکل (۲۴): گشتاور متوسط مدل‌های اسپکی و سطحی با تغذیه DC
Figure (24): Torque in spoke and surface hybrid DC models



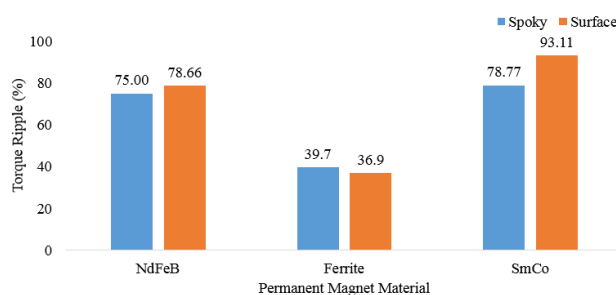
شکل (۲۵): ضربان گشتاور مدل‌های اسپکی و سطحی با تغذیه DC

Figure (25): Torque ripple in spoke and surface hybrid DC models



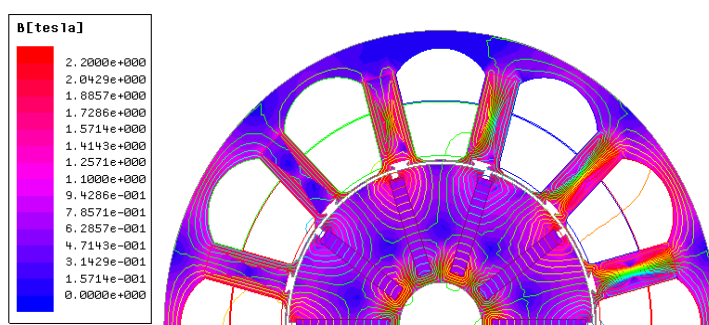
شکل (۲۶): گشتاور متوسط مدل‌های اسپکی و سطحی با آهنربا

Figure (26): Torque in spoke and surface hybrid PM models



شکل (۲۷): ضربان گشتاور مدل‌های اسپکی و سطحی با آهنربا

Figure (27): Torque Ripple in spoke and surface hybrid PM models

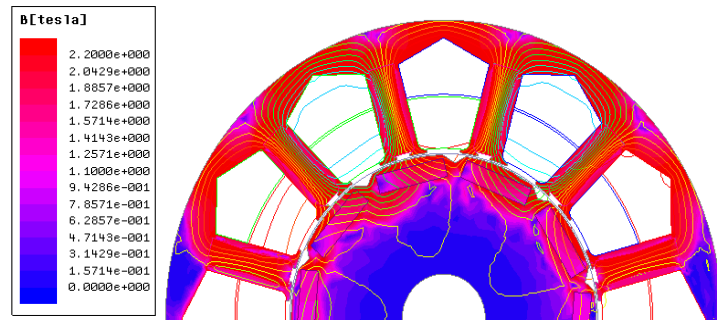


شکل (۲۸): توزیع چگالی شار در مدل اسپکی با آهنربای فریت

Figure (28): Flux Density distribution in Spoke model with Ferrite

$$P_{\text{iron}} = P_h + P_e = K_h B^\alpha f + K_e B^2 f^2 \quad (1)$$

که در آن P_h تلفات هیستریزیس، P_e تلفات فوکو، K_h و K_e به ترتیب ثابت هیستریزیس و فوکو هستند که به جنس ماده آهنی هسته‌های استاتور و روتور وابسته هستند. همچنین B چگالی شار، α ضریبی بین ۱/۵ تا ۲/۵ است و f معادل فرکانس است. افزایش چگالی شار در ساختار موتور تلفات آهنی موتور را بشدت افزایش می‌دهد.

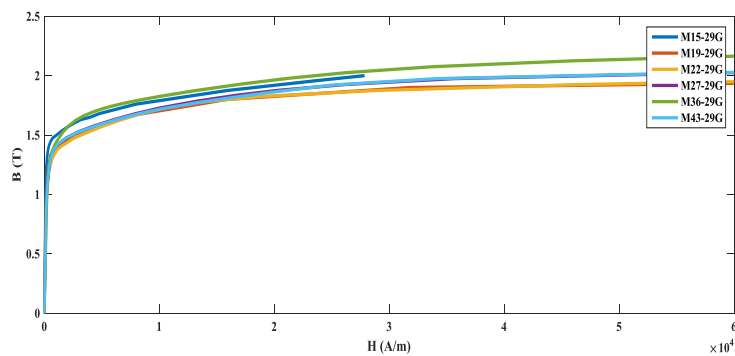


شکل (۲۹): توزیع چگالی شار در مدل سطحی با آهنربای فریت
Figure (29): Flux density distribution in surface model with Ferrite

یک راه کار جهت کاهش تلفات آهنی تغییر ضریب‌های K_e و K_h هستند. این ضریب‌های که به جنس مواد آهنی ساختار روتور و استاتور بستگی دارند با تغییر جنس مواد، تغییر می‌کنند و با به‌کارگیری مواد مناسب می‌توان تلفات آهنی را تا اندازه‌ای تعدیل کرد. برای این منظور، برای مدل‌های بهبودیافته هیبرید که به‌صورت پیش فرض با استیل M36 طراحی و شبیه‌سازی شده بودند، پنج استیل دیگر به نام M15، M19، M22، M27 و M43 در نظر گرفته شده است که نمودار مغناطیس شونده‌ی آن‌ها به‌صورت شکل (۳۰) است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۳۱)، برای مدل اسپکی ورق M19 و مدل سطحی ورق M27 مطلوب‌ترین عملکرد را از نقطه نظر تلفات، گشتاور و ضربان گشتاور ارائه می‌دهد.

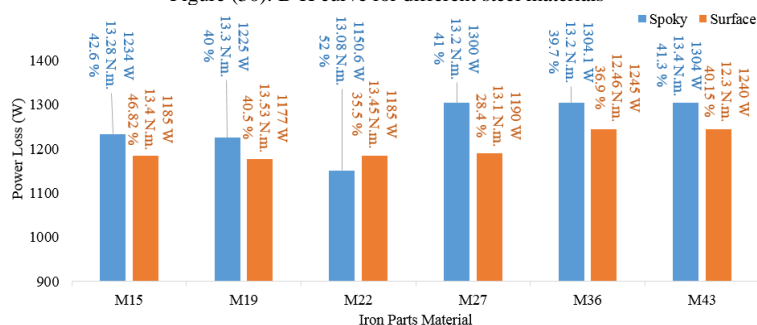
۵-۳- مشخصات نهایی مدل‌های بهبود یافته

با توجه به آنچه در قسمت‌های فوق انجام شد، دو ساختار اسپکی-قوسی با β برابر ۵ میلی‌متر (OSCW) تغذیه دوگانه با فریت و ساختار سطحی-دورنقه‌ای با β برابر ۷ میلی‌متر (OSOW) تغذیه دوگانه با فریت بهترین عملکرد را از نقطه نظر عملکرد گشتاوری ارائه می‌دهند.



شکل (۳۰): منحنی مغناطیس شونده‌ی استیل‌های مختلف

Figure (30): B-H curve for different steel materials



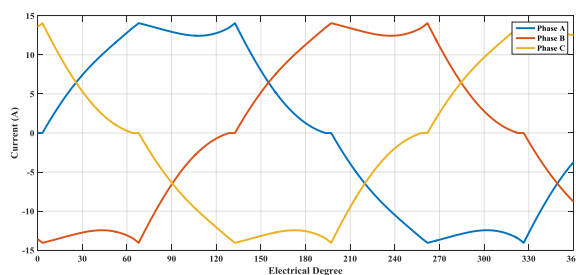
شکل (۳۱): نمودار نتایج تلفات موتورهای تغذیه دوگانه با فریت به‌ازای استیل‌های مختلف برای هسته

Figure (31): Power loss results for Hybrid models with Ferrite PMs and different steel materials

جریانی که توسط این دو ساختار از اینورتر کشیده می‌شود و ولتاژ القایی برگشتی^{۱۳} به صورت شکل‌های (۳۲)، (۳۳) و (۳۴) خواهد بود که توانی نزدیک به ۴ کیلووات را با راندمان نشان داده شده در شکل (۳۵) ارائه می‌دهند. توزیع چگالی شار در این ساختارها به صورت شکل‌های (۳۶) و (۳۷) خواهد بود که توزیعی یکنواخت همراه با اشباع‌های محلی را برای هر دو ساختار نشان می‌دهد.

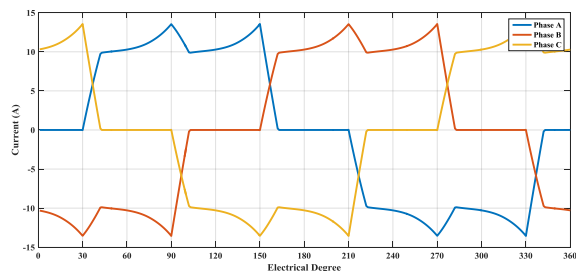
۴- نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق بررسی عملکرد یک موتور بدون جاروبک جریان مستقیم (BLDC) سه‌فاز با اعمال تغییرات ساختاری بر روی ساختمان استاتور است. میدان مغناطیسی لازم جهت عملکرد این موتور با یک سیم‌پیچی سه‌فاز دو طبقه که در یک ساختار ۱۲ شیار قرار گرفته و یک روتور ۱۰ قطب با دو آرایش اسپکی و سطحی برای آهنرباهای روتور تأمین می‌شود. در ابتدا چهار شکل هندسی برای شیارهای سیم‌پیچی استاتور در نظر گرفته شده که مدل اسپکی-قوسی و سطحی-دو زنگه‌ای بهترین عملکرد گشتاوری را مهیا نمودند. سپس در این دو ساختار شیار در دندانه استاتور لحاظ گردیده که عرض آن همزمان با بررسی نحوه باز-بسته بودن دهانه این شیارها مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به نتایج ارائه شده مدل OSCW با عرض ۵ میلی‌متر برای شیار دندانه در مدل اسپکی و مدل OSOW با شیار دندانه ۷ میلی‌متری در مدل سطحی با ارائه گشتاوری نزدیک به ۱۱/۵ نیوتن‌متر و ضربان گشتاور کمتر از ۳۰ درصد در مقایسه با مدل‌های دیگر و مدل‌های اولیه همین تحقیق، بهترین عملکرد را نتیجه داده‌اند.



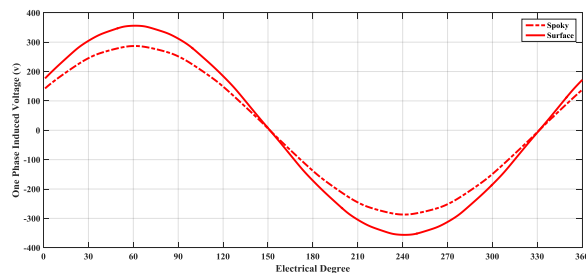
شکل (۳۲): جریان موتور اسپکی بهبود یافته

Figure (32): Current of optimized spoke type motor



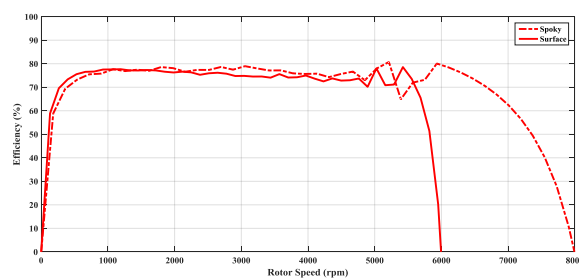
شکل (۳۳): جریان موتور سطحی بهبود یافته

Figure (33): Current of optimized surface type motor

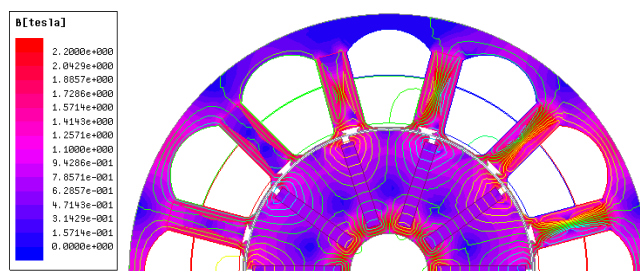


شکل (۳۴): ولتاژ القایی برگشتی مدل‌های بهبود یافته

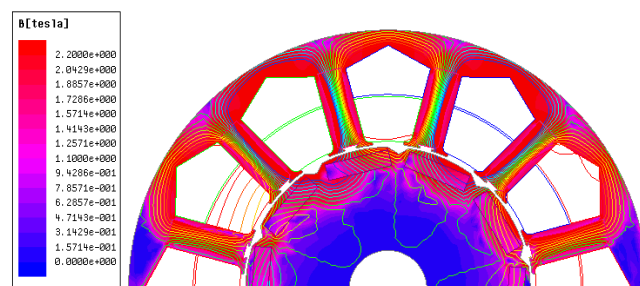
Figure (34): Back-EMF of optimized models



شکل (۳۵): راندمان مدل‌های بهبود یافته
Figure (35): Efficiency of the optimized models



شکل (۳۶): توزیع چگالی شار در مدل اسپکی بهبود یافته
Figure (36): Flux Density distribution in optimized spoke type



شکل (۳۷): توزیع چگالی شار در مدل سطحی بهبود یافته
Figure (37): Flux Density distribution in optimized surface type

سپس دو ساختار بهبود یافته با اعمال میدان مغناطیسی ثابتی درون شیارهای دندانه (سسیم پیچ DC و آهنربای دائم) به مدل های هیبرید تبدیل شده‌اند که این ساختارها برای چهار جنس سیم و سه ماده آهنربای دائم مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با بررسی نتایج مشخص گردیده که علیرغم عملکرد مطلوب مدل هیبرید با سیم پیچ DC از جنس نقره، به‌کارگیری آهنربای دائم فریت بخصوص از نقطه نظر اقتصادی بهترین گزینه است. با ازدیاد میدان مغناطیسی درون استاتور به‌موجب به‌کارگیری آهنربای فریت، تلفات آهنی داخل ساختار مدل‌های بهبود یافته افزایش چشم‌گیری پیدا کرده‌اند. راه‌کاری که برای کاهش تلفات آهنی در این تحقیق پیگیری شده تغییر جنس استیل هسته روتور و استاتور است که M15، M19، M22، M27، M36 و M43 برای این منظور در نظر گرفته شده‌اند. نتایج بیانگر عملکرد مطلوب تلفاتی مدل بهبود یافته اسپکی با ورق M19 و مدل بهبود یافته سطحی با ورق M27 است.

References

مراجع

- [1] S.J. Wang, C.C. Cheng, S.K. Lin, J.J. Ju, D.R. Huang, "An automatic pin identification method for a three-phase DC brushless motor", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 41, no. 10, pp. 3916-3918, Oct. 2005 (doi: 10.1109/TMAG.2005.854970).
- [2] W. Tong, S. Li, X. Pan, S. Wu, R. Tang, "Analytical model for cogging torque calculation in surface-mounted permanent magnet motors with rotor eccentricity and magnet defects", IEEE Trans. on Energy

- Conversion, vol. 35, no. 4, pp. 2191-2200, Dec. 2020 (doi: 10.1109/TEC.2020.2995902).
- [3] C.N. Tanaka, I.E. Chabu, "Flux reversal free splittable stator core doubly salient permanent magnet motor", IEEE Latin America Transactions, vol. 18, no. 08, pp. 1329-1336, Aug. 2020 (doi: 10.1109/TLA.2020.9-111067).
- [4] J.F. Gieras, M. Wing, "Permanent magnet motor technology: Design and applications", 2th Edition, Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [5] B. Majidi, J. Milimonfared, "Modeling, design, and sensitivity analysis of a continuous magnetic gear using finite-element method", Electric Power Components and Systems, vol. 44, no. 2, pp. 1029-1039, 2016 (doi: 10.1080/15325008.2016.1147507).
- [6] B. Majidi, J. Milimonfared, "Design and analysis of an interior continuous magnetic gear box using finite element method", Applied Computational Electromagnetics Society Journal, vol. 30, no. 1, pp. 109-116, January 2015.
- [7] D. Karamalian, B. Majidi, M.R. Yousefi, "Rotor design and analysis of 4/2 SRMs to produce continuous torque using finite element method", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 8, no. 33, pp. 13-20, Jan. 2017 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1396.8.32.2.2).
- [8] A. Tavakolzadeh, J. Feiz, G. Shahgholian, "Comparision between two methods to decrease cogging torque in single phase surface permanent magnet motor", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 4, no. 13, pp. 23-28, March 2013 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1392.4.13.3.7).
- [9] M. Jafarboland, A. Nekoubin, "Designing a two-phase BLDC motor and finite-element analysis of stator slots structure effects on the motor operation", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 5, no. 17, pp. 15-20, June 2014 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1393.5.17.2.1).
- [10] B.K. Lee, M. Ehsani, "Advanced BLDC motor drive for low cost and high performance propulsion system in electric and hybrid vehicles", Proceeding of IEEE/IEMDC, Cambridge, MA, pp. 246-251, June 2021 (doi: 10.1109/IEMDC.2001.939307).
- [11] P. Bogusz, M. Korkosz, A. Powrózek, J. Prokop, P. Wygonik, "An analysis of operation of brushless DC machine used in unmanned aerial vehicle hybrid drive", Proceeding of the IEEE/EDPE, Tatranska Lomnica, Slovakia, Sept. 2015 (doi: 10.1109/EDPE.2015.7325328).
- [12] P. Bogusz, M. Korkosz, A. Powrózek, J. Prokop, P. Wygonik, "An analysis of properties of the BLDC motor for unmanned aerial vehicle hybrid drive", Proceeding of the IEEE/EDPE, Tatranska Lomnica, Slovakia, Sept. 2015 (doi: 10.1109/EDPE.2015.7325338).
- [13] P. Bogusz, M. Korkosz, J. Prokop, "The analysis of high-speed multi-pole brushless motor with permanent magnets for hybrid drive of unmanned aerial vehicle", Proceeding of the IEEE/SME, pp. 1-6, Naleczow, Poland, Juen 2017 (doi: 10.1109/ISEM.2017.7993581).
- [14] R. Praveen, M. Ravichandran V.S. Achari, V.J. Raj, G. Madhu, G. Bindu, "Design and analysis of zero cogging brushless dc motor for spacecraft applications", Proceeding of the IEEE/ECTI, pp. 254-258, Chiang Mai, Thailand, May 2010.
- [15] P. Bogusz, M. Korkosz, J. Prokop, "A study of design process of BLDC motor for aircraft hybrid drive", Proceeding of the IEEE/ISIE, pp. 508-513, Gdansk, Poland, June 2011 (doi: 10.1109/ISIE.2011.5984077).
- [16] S. Yang, Y. Jung, J. Seo, M. Lee, J.H. Kim, "Numerical and experimental study on the cooling performance affected by ventilation holes of a BLDC motor for multi-copters", Proceeding of the IEEE/PEMC, Budapest, Hungary, pp. 293-298, Nov. 2018 (doi: 10.1109/EPEPEMC.2018.8521995).
- [17] H.M. Yang, J.W. Cha, B.H. Baik, B.I. Kwon, "Design and analysis of high speed BLDC motor for centrifuge", Proceeding of the IEEE/ICEMS, pp. 968-972, Pattaya, Thailand, Oct. 2015 (doi: 10.1109/ICE-MS.2015.7385176).
- [18] Z. Liu, S. Chen, Q. Zhang, "Design of brushless DC spindle motors for high speed HDD recording", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 34, no. 2, pp. 483-485, March 1998 (doi: 10.1109/20.667799).
- [19] S.X. Chen, Q.D. Zhang, H.C. Chong, T. Komatsu, C.H. Kang, "Some design and prototyping issues on a 20000 rpm HDD spindle motor with a ferro-fluid bearing system", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 37, no. 2, pp. 805-809, March 2001 (doi: 1 0.1109/20.917620).
- [20] S. Sung, G. Jang, J. Jang, J. Song, H. Lee, "Vibration and noise in a HDD spindle motor arising from the axial UMF ripple", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 49, no. 6, pp. 2489-2494, May 2013 (doi: 10.1109/TMAG.2013.2245318).
- [21] S. Sung, G. Jang, H. Lee, "Torque ripple and unbalanced magnetic force of a BLDC motor due to the connecting wire between slot windings", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 48, no. 11, pp. 3319-3322, Oct. 2012 (doi: 10.1109/TMAG.2012.2198879).
- [22] M.R. Pahlavani, Y.S. Ayat, A. Vahedi, "Minimisation of torque ripple in slotless axial flux BLDC motors in terms of design considerations", IET Electric Power Applications, vol. 11, no. 6, pp. 1124-1130, March 2017 (doi: 10.1049/iet-epa.2016.0754).
- [23] J. Hur, H.G. Sung, B.K. Lee, C.Y. Won, B.H. Lee, "Development of high-efficiency 42V cooling fan motor

- for hybrid electric vehicle applications”, Proceeding of the IEEE/VPPC, pp. 1-6, Windsor, UK, Sept. 2006 (doi: 10.1109/VPPC.2006.364307).
- [24] A. Sateesh, P. Sudip, P. Anjaneya, J. Kumar, “Modelling of brushless DC hub motor to control the speed of indigenous powered wheelchair”, Proceeding of the IEEE/ComPE, pp. 091-094, Shillong, India, July 2020 (doi: 10.1109/ComPE49325.2020.9200192).
- [25] W. Cui, Y. Gong, M. Xu, “A permanent magnet brushless DC motor with bifilar winding for automotive engine cooling application”, IEEE Trans. on Magnetics, vol. 48, no. 11, pp.3348-3351, Nov. 2012 (doi: 10.1109/TMAG.2012.2202095).
- [26] T.Y. Lee, M.K. Seo, Y.J. Kim, S.Y. Jung, “Motor design and characteristics comparison of outer-rotor-type BLDC motor and BLAC motor based on numerical analysis”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 4, pp. 1-6, June 2016 (doi: 10.1109/TASC.2016.2548079).
- [27] S. Sashidhar, B. Fernandes, “A low-cost semi-modular dual-stack PM BLDC motor for a PV based bore-well submersible pump”, Proceeding of the IEEE/ICEM, pp. 24-30, Berlin, Germany, Sept. 2014 (doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960154).
- [28] S. Sashidhar, B. Fernandes, “Comparison of a ferrite based single, three-phase spoke and surface permanent magnet BLDC motor for a PV submersible water pump”, Proceeding of the IEEE/ICIT, pp. 671-676, Seville, Spain, March 2015 (doi: 10.1109/ICIT.2015.7125175).
- [29] S. Sashidhar, B. Fernandes, “A novel ferrite SMDS spoke-type BLDC motor for PV bore-well submersible water pumps”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 64, no. 1, pp. 104-114, Jan. 2016 (doi: 10.1109/TIE.2016.2609841).
- [30] Z. Zhang, Y. Yan, Y. Tao, “A new topology of low speed doubly salient brushless DC generator for wind power generation”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 48, no. 3, pp. 1227-1233, March 2012 (doi: 10.1109/TMAG.2011.2169805).
- [31] M. Fazil, K. Rajagopal, “A novel air-gap profile of single-phase permanent-magnet brushless DC motor for starting torque improvement and cogging torque reduction”, IEEE Trans. on magnetics, vol. 46, no.11, pp. 3928-3932, Nov. 2010 (doi: 10.1109/TMAG.2010.2057514).
- [32] J. Kumar, V. Gowtham, S. Sashidhar, “Comparison of synchronous reluctance, PM assisted synchronous reluctance and spoke-type BLDC motor for an E-rickshaw”, Proceeding of the IEEE/ICIT, Valencia, Spain, March 2021 (doi: 10.1109/ICIT46573.2021.9453466).
- [33] C. He, T. Wu, “Design, analysis and experiment of a permanent magnet brushless DC motor for electric impact wrench”, Proceeding of the IEEE/ICEM, Lausanne, Switzerland, Nov. 2016 (doi: 10.1109/ICELMACH.2016.7732736).
- [34] G.T. Paula, J. Monteiro, T. Almeida, M. Santana, “Different slot configurations for direct-drive pm brushless machines”, IEEE Latin America Transactions, vol. 13, no. 3, pp. 634-639, March 2015 (doi: 10.1109/TLA.2015.7069085).
- [35] S.K. Lee, G.H. Kang, J. Hur, B.W. Kim, “Stator and rotor shape designs of interior permanent magnet type brushless DC motor for reducing torque fluctuation”, IEEE Trans. on Magnetics, vol. 48, no. 11, pp. 4662-4665, Nov. 2012 (doi: 10.1109/TMAG.2012.2201455).
- [36] P. Yeji, K. Hyunwoo, I. Hyungkwan, H. Sang-Hawn, L. Ju, J. Dong-Hoon, “Efficiency improvement of permanent magnet BLDC with halbach magnet array for drone”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 30, no. 4, pp. 1-9, June 2020 (doi: 10.1109/TASC.2020.2971672).
- [37] S. Sashidhar, B. Fernandes, “Braking torque due to cross magnetization in unsaturated IPM BLDC machines and its mitigation”, IEEE Trans. on Magnetics, vol. 53, no. 1, pp. 1-9, Oct. 2016 (doi: 10.1109/TMAG.2016.2618343).

زیر نویس ها

1. Brushless direct current
2. Slip ring
3. NdFeB
4. Curved
5. Trapezoid
6. Pentagon
7. Diamond
8. Open slot open winding
9. Close slot open winding
10. Close slot close winding
11. Open slot close winding
12. Maxwell software
13. Back-EMF