

طراحی و تحلیل حرارتی یک موتور جریان مستقیم بدون جاروبک با توان ۳۰۰ وات

امین کلاه‌دوز^۱، محسن شاکری^۲، علی جبباری^۳، شعبانعلی گل^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، aminkolahdooz@gmail.com

۲- دانشیار، گروه ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، shakeri@nit.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری، گروه ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، jabbari84@gmail.com

۴- مربی، گروه الکترونیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، shabangol@yahoo.com

چکیده

هدف از مقاله ارائه شده بررسی طراحی و آنالیز حرارتی یک موتور DC آهنربای دائم بدون جاروبک برای جایگزینی با موتور القائی و گیربکس آن در کاربردی خاص با سرعت ۲۲۰ دور بر دقیقه و توان ۳۰۰ وات می‌باشد. در این مقاله یک روش مناسب برای طراحی موتوری که بتواند به‌طور مستقیم به بار متصل گردد ارائه شده است. طراحی موتور براساس معیار آنالیز میدان الکترومغناطیسی انجام گرفته که معیار حد نهائی در این طراحی، از بین رفتن خاصیت مغناطیسی آهنرباها می‌باشد. در این پژوهش در ابتدا، طراحی موتوری مورد بررسی قرار می‌گیرد و روابط حاکم بر این روش طراحی ارائه می‌گردد و در مرحله بعد رفتار حرارتی موتور در انتخاب مواد مصرفی در زمان ساخت، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از نتایج طراحی و با توجه به نوع مواد بدست آمده در آنالیز حرارتی موتور نمونه ساخته شده و نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی آن ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه شده دارای کارائی بالا در طراحی و آنالیز حرارتی موتور BLDC می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

آنالیز حرارتی، آنالیز مدار معادل، موتور DC بدون جاروبک، معیار حد نهایی

۱- مقدمه

در آن‌ها توسط جاروبک که یک بخش مکانیکی بوده انجام می‌گیرد باید گفت که اولاً هر بخش مکانیکی نیاز به تعمیر و نگهداری دارد که این مورد نیز مستثنی نیست، ثانیاً به‌دلیل اصطکاک موجود بین اجزاء این بخش از راندمان موتور کاسته می‌شود و ثالثاً جرقه‌های به‌وجود آمده در هنگام تعویض قطب‌ها نیز احتمال آتش‌گرفتن موتور را افزایش می‌دهد.

به‌منظور فرار از این مشکلات با کمک گرفتن از خاصیت میدان مغناطیسی، کنترل موتورهای DC به‌صورت الکتریکی صورت

موتورهای آهن‌ربای دائم بدون جاروبک^۱ در تجهیزات کامپیوتری، ربات‌ها و وسایل الکتریکی استفاده می‌شوند. برای کاربردهایی با سرعت پائین، استفاده از موتورهای آهن‌ربای دائم نیاز به گیربکس را که در ماشین‌های القائی استاندارد وجود دارد، حذف می‌کند. گیربکس‌ها در مرور زمان دچار فرسایش و شکستگی شده و تعمیر آن‌ها هزینه بردار می‌باشد. همچنین در حین کار، به‌جز ایجاد سر و صدای اضافی، مقداری از توان مکانیکی موتور را نیز مصرف می‌کنند. در مورد موتورهای جریان مستقیم با جاروبک که عمل کموتاسیون

می‌گیرد. به علت این که عملکرد این کنترل‌کننده با شناسایی موقعیت روتور صورت می‌پذیرد، موتور قدرت کنترل سرعت و گشتاور را نیز خواهد داشت که احتیاج به انکودر را نیز حذف می‌کند. به این گونه از موتورهای اصطلاحاً موتورهای آهن‌ربای دائم جریان مستقیم بدون جاروبک گفته می‌شود [۱].

امروزه، این ماشین‌ها به‌طور گسترده برای توربین‌های بادی و محرکه‌های قایق‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲ - ۳]. استفاده از این نوع ماشین‌ها در این وسایل، باعث کاهش سر و صدا و کاهش نشستی روغن می‌گردد. تعداد زیاد قطب‌ها و قطر بزرگ این نوع موتورها، به دلیل داشتن سرعت‌های پائین می‌تواند از مشخصه‌های آن‌ها برشمرد.

موتور مورد بررسی در این مقاله برای یک کاربرد صنعتی که احتیاج به توان ۳۰۰ وات و سرعت مجاز ۲۲۰ دور بر دقیقه دارد تمرکز پیدا کرده است. این موتور مربوط به کاربردهای سرعت کم است و با توجه به اینکه موتورهای BLDC برای سرعت‌های خیلی زیاد نیز کاربرد دارند، در هنگام طراحی باید مواردی از جمله میزان نوسان گشتاور، میزان سر و صدا، نحوه قرارگیری آهن‌رباها، نوع بلبرینگ مورد استفاده و نحوه خنک‌کاری سیم‌پیچ‌ها مورد بررسی قرار گیرد. هرکدام از این موارد تاثیری بر روی راندمان و پارامترهای اصلی طراحی خواهد داشت. درایور این‌گونه از موتورها نسبت به موتورهای سرعت بالا نیز دارای تفاوت‌هایی است که مهمترین آن، تعداد دفعات کلیدزنی در هر چرخش می‌باشد که خود آن به‌خاطر تلفاتی که ایجاد می‌کند بر روی راندمان تاثیر می‌گذارد.

مهم‌ترین هدف در مورد نحوه طراحی موتور، کارکرد مداوم آن می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، با توجه به شرایط کاری موتور، انتخاب مناسبی از شکل و پوسته آن مطلوب است [۴]. در حال حاضر، انتخاب بهینه پارامترهای موتور و بدست آوردن روابط کامل‌تر، زمینه‌ای است که محققین در تلاش برای یافتن آن می‌باشند [۵ - ۶]. به‌عنوان مثال، آقای Song، روشی را برای طراحی موتوری بدون بلبرینگ ارائه داده است [۷]. در این روش، طراحی به‌گونه‌ای انجام گرفته است که نیروی مغناطیسی بتواند روتور را به‌صورت معلق در هوا و بین استاتور قرار دهد. آقای Libert و همکارانش نیز روش طراحی خود را در زمینه موتورهای آهن‌ربای سرعت پائین می‌باشند و به‌طور مستقیم به بار خارجی متصل می‌گردند، بررسی کرده‌اند [۸ - ۹].

در طول فرآیند تبدیل انرژی در ماشین الکتریکی، درصدی از انرژی به‌صورت گرما تلف می‌شود. هر ماده عایقی دارای دمای کارکرد مشخصی بوده که در این دما به‌طور مطمئن به کار خود ادامه می‌دهد. افزایش دمای بیش از اندازه، علاوه بر کاهش عمر مفید

سیستم عایقی، ممکن است اجزاء مکانیکی ماشین را نیز شدیداً تحت تاثیر قرار دهد [۱۰]. این امر لزوم انجام آنالیز حرارتی موتور را قبل از ساخت الزامی می‌کند. آنالیز حرارتی در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌است. به‌عنوان مثال، آقای Chin، در تحقیقات خود به مقایسه روش آنالیز المان محدود و آنالیز مدار معادل با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری موجود پرداخته‌است [۱۱ - ۱۲]. آقای Staton، نیز به بررسی رفتار گرمایی دو موتور الفائی و دو موتور سنکرون رلوکناسی پرداخته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تست آزمایشگاهی را مقایسه کرده است [۱۳].

این پژوهش بخشی از فرآیند طراحی تا ساخت یک نمونه موتور DC آهن‌ربای دائم بدون جاروبک می‌باشد. بخش کنترل موتور در [۱۴] مورد بررسی قرار گرفته و بخش آنالیز المان محدود میدان الکترومغناطیسی موتور در پژوهش‌های بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این موتور برای کاربردهایی با گشتاور بالا در سرعت پائین، مانند توربین‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش، بعد از ارائه طراحی موتور، تحلیل حرارتی آن برای ۳ کارکرد عمده پیوسته، کوتاه‌مدت و دوره‌ای که موتور در طول مدت عمر خود ممکن است با آن مواجه شود، ارائه شده‌است. با استفاده از تحلیل انجام شده مواد مناسب برای اجزاء ماشین انتخاب گردید. یک نمونه موتور براساس طراحی ارائه‌شده، ساخته شده و نتایج حاصل از آن در بخش نهائی آورده شده است.

۲- روش طراحی

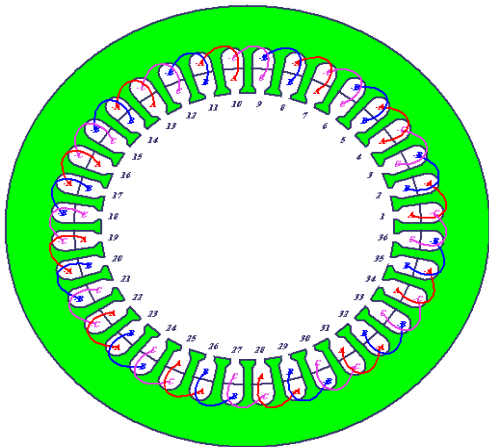
تعداد فازها، قطب‌ها و شیارهای استاتور براساس نحوه پیکربندی سیم‌پیچ‌ها و براساس پارامترهای طراحی، بدست می‌آیند. تعداد قطب‌ها براساس میزان اینرسی، نوع مواد آهن‌رباها، مقدار گشتاور دندانه‌ای، سرعت چرخشی و غیره وابسته می‌باشد [۱۵].

ضخامت یوک موتور نیز تابعی از تعداد قطب موتور است به‌طوری‌که اگر تعداد قطب‌ها دو برابر شود این ضخامت نصف خواهد شد. این مقدار به‌کمک رابطه (۱) بدست می‌آید. در یک بار الکتریکی و مغناطیسی معین با قطر روتور مشخص، قطر نهائی ماشین می‌تواند با افزایش در تعداد قطب‌ها، کاهش یابد.

$$h_{rbh} = h_{sbh} \frac{\pi \cdot B_g \cdot D_r}{4 \cdot p \cdot B_{iron}} \quad (1)$$

در رابطه بالا، h_{rbh} ، h_{sbh} به ترتیب ارتفاع یوک در استاتور و روتور بوده، B_g ، B_{iron} به ترتیب چگالی شار در آهن و فاصله هوایی، D_r قطر روتور و p تعداد قطب‌ها می‌باشد. میزان چگالی مغناطیسی در فاصله هوایی از رابطه (۲) بدست می‌آید:

سبک از جنس NdFeB انتخاب گردیدند. تعداد فازها، شیارها و قطبها نیز به ترتیب برابر ۳، ۳۶ و ۲۴ انتخاب شدند [۱۶].
سیمپیچهای استاتور، تعداد شیارهای آن و نحوه قرارگیری سیمپیچها در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- ساختار سیمپیچی و استاتور

باتوجه بهنسبت تعداد کویل به تعداد قطبها مقدار اندازه بوبین، یک بدست می‌آید. این بدان معنا است که کویل از شیار اول وارد شده و از شیار دوم خارج می‌گردد. در جدول (۱) اندازه نوسان گشتاور موتور، وزن و حجم آن ارائه گردیده است. نسبت وزن مس به تلفات مسی، نوسانات گشتاور، کل وزن و گشتاور دندانه‌ای نیز در این جدول آورده شده است.

ساختارهای موجی سه‌فاز برای شکل جریان مربعی با موقعیت‌های کلیدزنی ترانزیستورها در شکل (۲) نشان داده شده است.

حرکت این موتور توسط یک مدار که شامل ۶ عدد کلید می‌باشد صورت می‌گیرد. برای اطلاعات بیشتر در مورد نحوه کلیدزنی و عملکرد مدار کلیدزنی می‌توانید از مرجع [۱۷] استفاده نمایید.

اندازه‌های طراحی موتور و شکل شیار استاتور به ترتیب در جدول (۲) و شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱- نوسانات گشتاور، وزن و حجم موتور

تلفات مسی/ وزن مس	۲۵/۲۷۴ وات : ۴/۰۲۷ کیلوگرم
نوسانات گشتاور	٪۱۵
وزن کل	۱۰/۲ کیلوگرم
اندازه گشتاور دندانه‌ای	۱۰ ^{-۱۳} * ۸/۴۴ نیوتن متر

$$B_g = \frac{B_r}{2 \cdot g_c \cdot \frac{\mu_r}{l_m}} \quad (2)$$

که g_c فاصله هوایی، μ_r گذردهی نسبی و l_m ضخامت آهن‌ریا است. بر این اساس برای قطر داخلی استاتور (D_{is}) خواهیم داشت:

$$D_{is} = D_r + 2 \cdot (l_m + g) \quad (3)$$

پهنای دندانه استاتور نیز با توجه به رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$b_{stator} = \frac{\pi \cdot D_{is} \cdot B_g}{Q \cdot B_{iron}} \quad (4)$$

برای طول موثر موتور، با فرض اینکه S_1 بالاترین سطح جریان بار، T گشتاور مجاز و k_s ضریب اشغال شیار باشد، داریم:

$$L = \frac{3T}{\pi \cdot (D_{is} - g)^2 \cdot B_g \cdot \left(\frac{k_s}{k_{safefy}}\right)} \quad (5)$$

اگر N را کل تعداد کانداکتورها در نظر بگیریم آنگاه:

$$N = \frac{2 \cdot Emf}{L \cdot D_{is} \cdot B_g \cdot k_w \cdot \omega_m} \quad (6)$$

که Emf نیروی الکترومغناطیسی برگشتی و k_w ضریب فاکتور سیمپیچها است. نسبت تعداد کانداکتورها به تعداد شیارها (Q) از رابطه (۷) و ثابت گشتاور از رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$n_s = \frac{3 \cdot N}{Q} \quad (7)$$

$$k_T = \frac{T}{I} = \frac{1}{3} (Z \cdot D \cdot L \cdot B_g \cdot k_w) \quad (8)$$

با داشتن مساحت شیار از رابطه (۹)، قطر خارجی استاتور، از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$A_{slot} = \frac{\pi}{Q} \cdot \left[\left(\frac{D_{is}}{2} + h_{slot} \right)^2 - \left(\frac{D_{is}}{2} \right)^2 \right] - b_{is} \cdot h_{slot} \quad (9)$$

$$D_{os} = D_{is} + 2(h_{slot} + h_{sbh}) \quad (10)$$

h_{slot} ارتفاع شیار استاتور و b_{is} پهنای دندانه استاتور است.

اندازه‌های خارجی ماشین براساس شکل استاتور و سیمپیچهای انتهایی بدست می‌آید. طول سیمپیچهای انتهایی نیز وابسته به نحوه پیکربندی سیمپیچها می‌باشد.

۳- هندسه و مشخصات موتور

پارامترهای مهم در طراحی موتورهای بدون جاروبک نوع روتور، نحوه سیمپیچی و قرارگیری آهن‌ریاها و نوع روش کنترل آن می‌باشد [۱۵].

در این پژوهش، موتور از نوع شار شعاعی انتخاب شده است. آهن‌ریاها نیز به دلیل چگالی انرژی بالا نسبت به ابعاد و داشتن وزن

۴- آنالیز حرارتی موتور

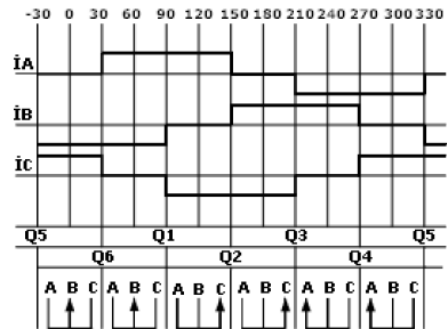
مدار حرارتی در حالت پایدار شامل مقاومت‌های حرارتی و منابع گرمایی بین اجزا تشکیل دهنده موتور می‌باشد. برای آنالیز گذرا، ظرفیت‌های حرارتی و گرمایی، با تغییر در میزان انرژی داخلی بدنه نسبت به زمان تغییر می‌کند. مقاومت‌های حرارتی هدایت و جابجایی و ظرفیت گرمایی از روابط زیر بدست می‌آید [۱۸]:

$$R_{conduction} = \frac{l}{A \cdot k} \quad [K/W] \quad (11)$$

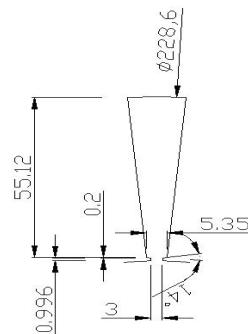
$$R_{convection} = \frac{1}{A_{cool} \cdot h} \quad [K/W] \quad (12)$$

$$C = V \cdot \rho \cdot c \quad (13)$$

l فاصله بین نقاط، A مساحت درگیر، A_{cool} بخش عرضی خنک‌کاری بین دو ناحیه، h و k به ترتیب ضریب جابجایی و هدایت گرمایی، V حجم، ρ چگالی و c ظرفیت گرمایی ویژه ماده است. آنالیز حرارتی موتور با استفاده از نرم‌افزار MotorCAD در ۳ کارکرد عمده موتور صورت گرفته است. شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب نمای روبرو و جانبی هندسه موتور شبیه‌سازی شده را در محیط این نرم‌افزار نشان می‌دهد. شکل (۶) پارامترهای هندسی سیم‌پیچ‌ها و نحوه سیم‌پیچی را نشان می‌دهد.



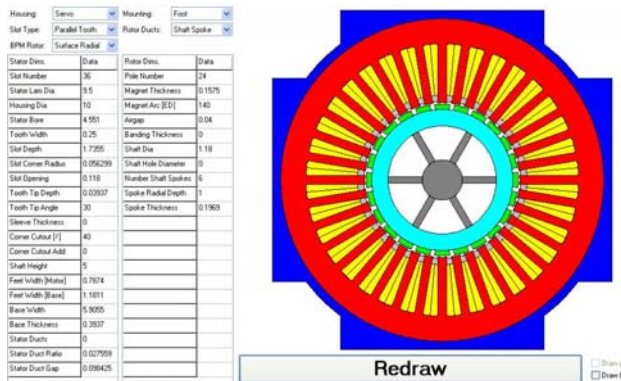
شکل ۲- شکل موج جریان‌ها برحسب زوایای کلیدزنی



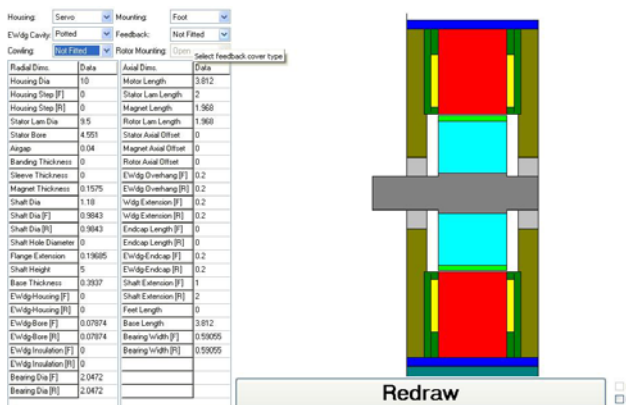
شکل ۳- شکل فیزیکی و اندازه‌های یک شیار (mm)

جدول ۲- مقادیر بدست آمده از طراحی موتور

اندازه‌های الکتریکی			
سرعت مجاز	۲۲۰ rpm	جریان مجاز	۲/۴ آمپر
سرعت ماکزیمم	۳۰۴ rpm	توان خروجی مجاز	۳۰۰ وات
توان خروجی ماکزیمم	۶۰۶ وات	گشتاور ماکزیمم	۱۲/۹ نیوتن‌متر
اندازه‌های داخلی استاتور			
جریان ماکزیمم	۴۰ آمپر	ولتاژ مجاز	۱۵۰ ولت
ضخامت	۰/۵ mm	قطر داخلی	۱۱۵/۶ mm
هدایت‌گر	مس	قطر خارجی	۲۴۱/۳ mm
تعداد کنداکتورها به شیار	۱۰۰	طول فاصله هوائی	۱/۰۱۴ mm
نوع سیم‌پیچی	۲ لایه	طول	۴۰ mm
مقاومت به فاز	۱/۷۲ ohm	قطر سیم	۰/۹۱۲ mm
اندازه‌ها و مشخصات آهن‌رباها			
دوام (B _r)	۱/۲۳	آهن‌ربا	NdFeB
انرژی ماکزیمم	۲۷۳/۶۷۵	(Hc)	۸۹۰۰۰۰
ضخامت آهن‌ربا	mm۵		
اندازه‌های روتور خارجی			
قطر خارجی	۱۱۳/۶ mm	قطر داخلی	۹۰ mm
تعداد قطب	۲۴	طول	۵۰ mm



شکل ۴- نمای روبرو موتور در نرم‌افزار MotorCAD

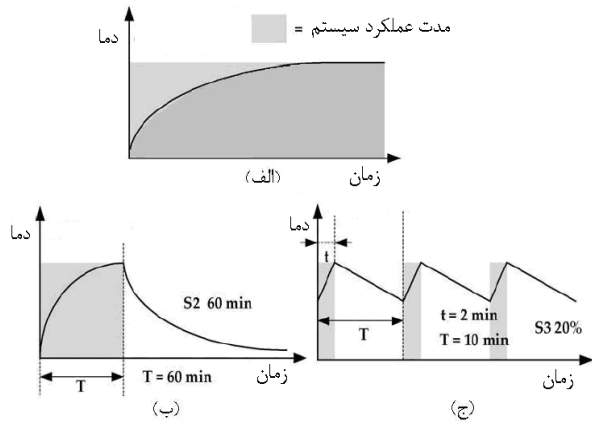


شکل ۵- نمای جانبی موتور در نرم‌افزار MotorCAD

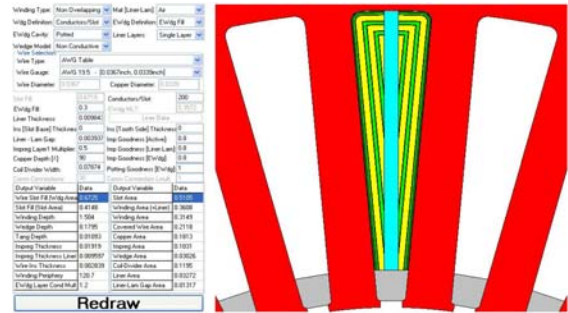
۴-۲- نتایج آنالیز

مدار معادل موتور برای تحلیل حرارتی مطابق شکل (۸) طراحی شد. نتایج عددی بدست آمده در نرم افزار برای ۳ کارکرد پیوسته، کوتاه مدت و دوره‌ای به ترتیب در شکل‌های (۹ - ۱۱) نشان داده شده است.

بیشترین دما در جدول (۳) آورده شده است. دمای محیط برای شروع عملیات 25°C تنظیم می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که، مقدار بیشترین افزایش دما 90°C است که در سیم‌پیچ‌ها به وجود می‌آید. ثابت زمانی حرارتی T در بخش‌های مختلف موتور را می‌توان بر اساس شکل (۹) تقریب زد، که این مقدار برای سیم‌پیچ‌ها حدود 2800 ثانیه می‌باشد. با توجه به نتایج تحلیل حرارتی طراحی مهندسی موتور بر اساس انتخاب مناسب مواد به طوری که در جدول (۴) آورده شده انجام گرفت.



شکل ۷- (الف) کارکرد پیوسته (ب) کارکرد کوتاه مدت (ج) کارکرد دوره‌ای

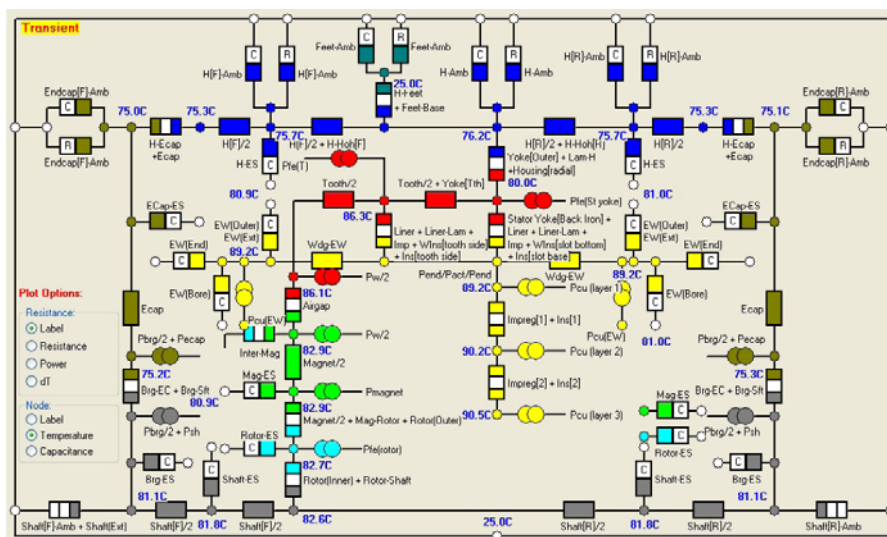


شکل ۶- مدل سیم‌پیچی برای نمونه موتور

میزان مقاومت حرارتی در این نرم افزار به طور خودکار بر اساس اندازه‌ها و داده‌های مواد محاسبه می‌شود و دقت این محاسبات وابسته به نحوه تماس اجزاء موتور به هم می‌باشد.

۴-۱- انواع کارکردهای موتور

در آنالیز حرارتی موتورها ۳ کارکرد عمده همانند شکل (۷) مورد بررسی قرار می‌گیرد. این ۳ کارکرد عبارتند از: (۱) کارکرد پیوسته (نوع S1): در این کارکرد یک بار ثابت در مدت زمان طولانی به ماشین اعمال می‌شود تا به تعادل حرارتی برسد. (۲) کارکرد کوتاه مدت (نوع S2): عبارت است از کار در بار ثابت برای مدت زمان معین (N) همراه با یک دوره استراحت T (R) که کمتر بوده و زمان استراحت به اندازه‌ای است که ماشین به حالت سرد باز می‌گردد. (۳) کارکرد دوره‌ای (نوع S3): در این حالت مدت زمان بارگذاری و استراحت که برای کارکرد کوتاه مدت تعریف شد، متناوباً تکرار می‌شود.



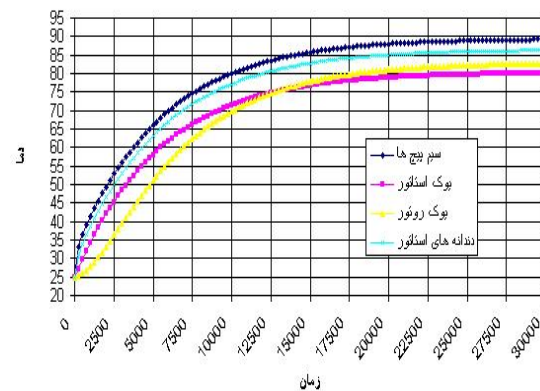
شکل ۸- مدار معادل موتور

جدول ۴- مواد انتخابی برای اجزاء مختلف موتور

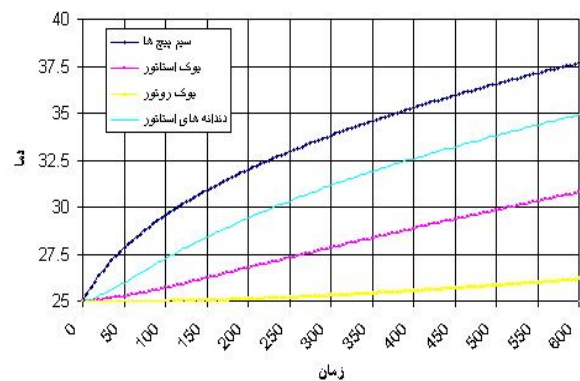
مشخصات	جنس	اجزا
مورق ^۴	M-19 steel	استاتور
مورق	M-19 steel+St37	روتور
-----	St37	شافت
-----	آلومینیوم	بدنه
-----	چدن	درپوشها
Max. Temperature 120°C	کلاس E (فنل فرمالدئید)	مواد عایقی
قطر ۰/۹۱۲ میلیمتر	مس (سیم لاکه)	سیم بندی
Max. Temperature 180°C	Araldit 2014	چسب
Max. Temperature 150°C	NdFeB	آهنرباها

جدول ۳- دماهای ماکزیمم

اجزا	دما (°C)	اجزا	دما (°C)
سیم پیچ ۱	۸۹/۴۴	دندانه استاتور	۸۶/۴۸
سیم پیچ ۲	۹۰/۳۷	یوک استاتور	۸۰/۲۵
سیم پیچ ۳	۹۰/۶۸	یوک روتور	۸۳/۰۵
آهنرباها	۸۳/۱۸		



شکل ۹- نتایج عددی برای عملیات S1



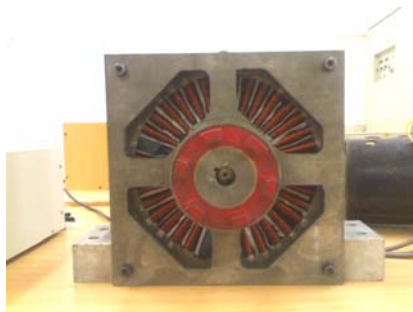
شکل ۱۰- نتایج عددی برای عملیات S2



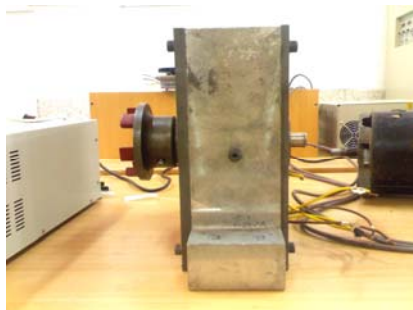
شکل ۱۱- نتایج عددی برای عملیات S3

۵- نتایج تست آزمایشگاهی

نمونه موتور ساخته شده برای کاربردهای محرکه در شکل (۱۲) نشان داده شده است. استاتور از ۸۰ عدد ورق ۰/۵ میلیمتری با جنس M19 تشکیل شده است. شیارهای استاتور به منظور کاهش گشتاور دندانه‌ای به اندازه ۱/۳ گام شیار به صورت مورب قرار داده شده‌اند. آهنرباها نیز از نوع نئودیمیوم-آهن - بورون با چگالی شار ۱/۲۳ تسلا بوده که با چسب بر روی روتور، نصب شده‌اند.



(الف) نمای روبرو



(ب) نمای جانبی

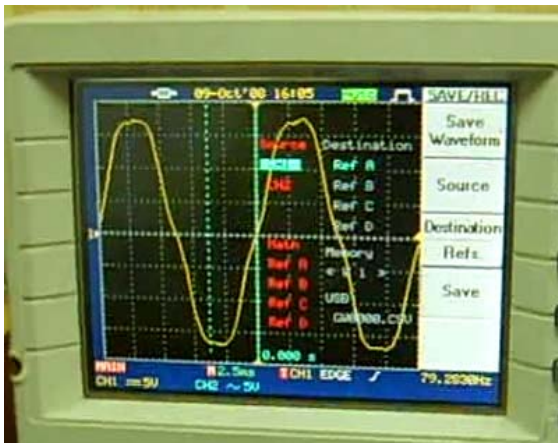
شکل ۱۲- نمونه موتور ساخته شده

مقادیر اندازه‌گیری شده برای BEMF نسبت به سرعت‌های مختلف ماشین در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با استفاده از نمودار بدست آمده در شکل، می‌توان ثابت جریان را بدست آورد. ثابت جریان دستگاه با استفاده از رابطه (۱۴) قابل محاسبه می‌باشد.

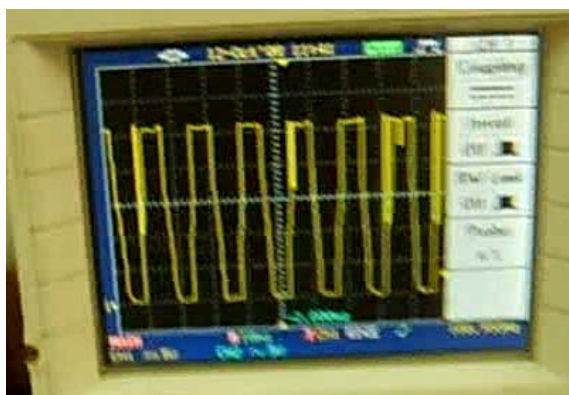
$$k_E = \frac{V}{n} \quad (14)$$

که V نیروی الکترومغناطیسی برگشتی در هر خط می‌باشد.

مقادیر بدست آمده در تست آزمایشگاهی و حل تحلیلی در جدول (۶) آورده شده است. اختلاف موجود بین این دو مقدار نشان دهنده اشتباه درحین ساخت می‌باشد. دلیل این اختلاف به‌خاطر این بوده که فاصله هوایی ایجاد شده درحین ساخت بیشتر از مقدار طراحی شده بدست آمده است. با افزایش در فاصله هوایی، مقدار چگالی شار در این فاصله کاهش می‌یابد. BEMF نیز با اندازه چگالی شار فاصله هوایی متناسب می‌باشد.



شکل ۱۳- شکل موج BEMF



شکل ۱۴- سیگنال کلیدزنی

هدف این بخش ارائه نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی موتور و مقایسه آن نتایج با خروجی آنالیز المان محدود می‌باشد. این تست‌ها با استفاده از یک دستگاه تست الکترونیکی با دقت بالا، که قادر به محاسبه گشتاور تا ۲۵ نیوتن‌متر می‌باشد، انجام شده است. به‌منظور بدست آوردن عملکرد یک موتور آهن‌ربای دائم، تست‌های زیر احتیاج می‌باشد:

۵-۱- اندازه‌گیری اندوکتانس و مقاومت

اولین مرحله در اندازه‌گیری عملکرد موتور، بدست آوردن مقاومت و اندوکتانس موتور می‌باشد. این مقادیر در تعیین پارامترهای موتور موثر نمی‌باشند و فقط صحت ساخت هسته موتور را بررسی می‌کنند. اختلاف این مقادیر با مقادیر بدست آمده در حل تحلیلی به مفهوم خطا در ساختار موتور می‌باشد.

مقاومت فازها به‌طور مستقیم بعد از ساخت استاتور موتور اندازه‌گیری شده که در جدول (۵) این مقادیر آورده شده است. اندوکتانس فازها نیز بعد از مونتاژ موتور با استفاده از یک آنالیزگر امپدانس قابل محاسبه بوده که این مقدار به‌طور تقریبی ۱۴۰ میلی‌هنری اندازه‌گیری شده است. مقدار محاسبه شده از حل تحلیلی برای اندوکتانس برابر ۱۳۵ میلی‌هنری می‌باشد. با توجه به دقت دستگاه اندازه‌گیری که دارای فرکانس بالا (۱ کیلوهرتز) با جریان فاز خیلی کم (در حد میلی‌آمپر) بوده مقدار خطای بدست آمده قابل قبول می‌باشد.

مقدار اندوکتانس در موقعیت‌های مختلفی از روتور، برای مشخص شدن یکنواختی فاصله آهن‌رباها و فاصله هوایی محاسبه شده که نتیجه قابل قبولی را به همراه داشته است.

جدول ۵- مقدار مقاومت فازهای اندازه‌گیری شده

سیم پیچ	فاز A	فاز B	فاز C
	۱/۷۱	۱/۷۰	۱/۷۲

۵-۲- اندازه‌گیری BEMF

اهمیت این تست در رابطه با گشتاور و back-emf تولید شده می‌باشد. با استفاده از این تست ثابت جریان می‌تواند محاسبه شود. روش کار به این صورت بوده که در حالت موتوری، دستگاه ساخته شده راه‌اندازی شده و اندازه نیروی الکتروحرکتی برگشتی موتور در سرعت‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود.

نیروی الکترومغناطیسی برگشتی موتور نمونه برای یک فاز اندازه‌گیری شده و در شکل (۱۳) نشان داده شده است. شکل (۱۴) نیز شکل موج کلیدزنی را برای هر فاز نشان می‌دهد.

جدول ۷- نتایج تست موتور

راندمان	گشتاور	سرعت	جریان ورودی	ولتاژ ورودی
۷۷/۸۵	۵	۲۴۰	۰/۸۵	۱۸۹/۹
۸۱/۸۹	۱۳/۵	۲۲۰	۲	۱۸۹/۹
۷۳/۴	۵	۲۱۴/۵	۰/۹	۱۷۰
۷۸/۰۱	۱۳/۵	۱۹۷	۲/۱	۱۷۰
۷۴/۴۷	۵	۱۹۲	۰/۹	۱۵۰
۷۸/۱۸	۱۲/۳	۱۷۳	۱/۹	۱۵۰
۷۳/۶۹	۵	۱۵۲	۰/۹	۱۲۰
۹۱/۲۶	۱۲/۲	۱۴۰	۱/۶۴	۱۱۹/۵
۷۵/۰۵	۵	۱۲۹	۰/۹	۱۰۰
۷۲/۴۹	۸/۸	۱۱۸	۱/۵	۱۰۰
۷۴/۱۷	۵	۱۰۲	۰/۹	۸۰
۷۴/۱۵	۷/۳	۹۷	۱/۲۵	۸۰
۷۳/۳۴	۵	۸۸/۵	۰/۹	۷۰/۲
۷۰/۵۶	۶/۴	۸۵	۱/۱۵	۷۰/۲

۶- نتایج

نتایج به دست آمده به صورت زیر قابل دسته بندی می باشد:

$$k_T = \frac{T}{I} = \frac{1}{3}(Z.D.L.B_g.k_w) \quad (۱۵)$$

الف) مقادیر بدست آمده برای مقاومت فازها نشان دهنده صحت تعداد کنداکتورها در هر فاز می باشد.

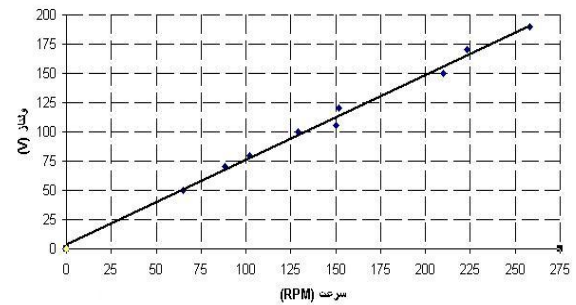
ب) مقادیر اندوکتانس به دست آمده اختلافی جزئی با مقدار تحلیلی آن داشت که می توان آن را با دقت دستگاه توجیه کرد. مقدار اندوکتانس برای موقعیت های مختلفی از روتور یکسان بود که نشان دهنده یکنواختی فاصله هوایی و همچنین فاصله بین آهن رباها دارد.

ج) ثابت جریان بدست آمده در تست آزمایشگاهی به علت اینکه فاصله هوایی ایجاد شده در ساخت بیشتر از مقدار طراحی شده بوده، اندازه کمتری دارد.

د) خطی بودن گشتاور نسبت به جریان عملکرد مناسب موتور را نشان داده و اختلاف موجود در ثابت گشتاور در دو حالت با توجه به رنج سرعت قابل نظر کردن است.

ه) در سرعت ۲۲۰ دور بر دقیقه که موتور برای این مقدار طراحی شده، مقدار راندمان و توان موتور با حل تحلیلی و حل المان محدود تطابق مناسبی دارد.

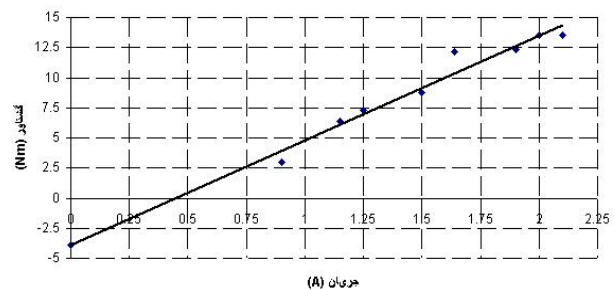
و) با اینکه تست های مربوط به رفتار حرارتی موتور انجام نگرفته اما میزان حرارت به وجود آمده در موتور در موقع تست دیگر بخش ها و با توجه به مدت زمان کارکرد در حد مطلوب قرار داشت.



شکل ۱۵- نمودار ولتاژ بر حسب سرعت

۵-۳- اندازه گیری گشتاور و جریان

در هنگام انجام تست اندازه گیری BEMF، می توان مقادیر گشتاور و جریان را نیز بدست آورد. مقادیر اندازه گیری شده برای گشتاور نسبت به جریان های ورودی به سیستم کنترلر در شکل (۱۶) نشان داده شده است که یک حالت خطی را نشان می دهد. با استفاده از نمودار بدست آمده در شکل، می توان ثابت گشتاور را بدست آورد. ثابت گشتاور دستگاه با استفاده از رابطه (۱۵) قابل محاسبه می باشد. مقایسه ای بین مقادیر بدست آمده در تست آزمایشگاهی با حل تحلیلی در جدول (۶) آورده شده است.



شکل ۱۶- نمودار گشتاور بر حسب جریان

جدول ۶- مقایسه ثابت های موتور

حل تحلیلی	اندازه گیری شده	
۴/۷۲	~۴/۷۶	ثابت گشتاور
۷/۵	~۷/۱۶	ثابت جریان

جدول (۷) برخی از مقادیر بدست آمده در تست موتور را نشان می دهد. در سرعت ۲۲۰ دور بر دقیقه که موتور برای این مقدار طراحی شده مقدار راندمان و توان موتور با حل تحلیلی و حل المان محدود تطابق مناسبی دارد. اختلافات موجود در مقادیر بدست آمده با حل المان محدود را با خطاهایی که در حین ساخت و مونتاژ موتور به وجود آمده، از قبیل عدم هم محوری دقیق روتور با استاتور، اصطکاک بیشتر در بلبرینگ ها و غیره می توان توجیه کرد.

۷- نتیجه‌گیری

با استفاده از معیار آنالیز میدان الکترومغناطیسی، موتور آهن‌ربای دائم بدون جاروبکی برای کاربردهایی با گشتاور بالا طراحی و ساخته شد. نمونه موتوری طراحی شده با توان ۳۰۰ وات و سرعت ۲۲۰ دور بر دقیقه، نتایج رضایت‌بخشی را در عمل نشان داد. آنالیز حرارتی موتور نشان می‌دهد که، به‌علت کوچک‌تر بودن ثابت زمانی در سیم‌پیچ‌ها، بیشترین مقدار حرارت به‌وجود آمده در بین اجزا موتور، در این قسمت است. همچنین دمای به‌وجود آمده در سطح پوسته‌ی موتور کمتر از دما در مرکز آن می‌باشد. به‌دلیل تماس ترمینال با هوای اطراف به‌جای تماس با ورقه‌های فلزی، دما در این قسمت بیشتر از بخش فعال خود سیم‌پیچ می‌باشد. از آنجاکه ماکزیمم دمای به‌وجود آمده در شرایط کارکرد پیوسته به 90°C می‌رسد و مواد انتخابی قادر به تحمل این درجه حرارت می‌باشند بنابراین موتور طراحی شده، از لحاظ حرارت به‌وجود آمده در قسمت‌های مختلف آن، دارای عملکرد مناسبی می‌باشد. با توجه به ماکزیمم دمای به‌وجود آمده جنس انتخابی برای مواد عایقی از کلاس E به کلاس A که قدرت تحمل ماکزیمم دمای 105°C را دارند، تغییر پیدا کرد. ثابت‌های موتور، جریان بار و گشتاور خروجی اندازه‌گیری شده تطابق مناسبی را با مقادیر محاسبه‌شده، دارند. نتایج بدست آمده ثابت کرده که آهن‌رباهای روتور، شیارها و سیم‌پیچ‌های استاتور مورد استفاده در موتور، در بیشترین توان خود کار می‌کنند.

۸- مراجع

- [1] K.J. Tseng, G.H. Chen; "Computer-Aided Design and Analysis of Direct-Driven Wheel Motor Drive", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 12 No. 3, 1997.
- [2] F. Caricchi, F. Crescimbin, O. Honorati; "Modular Axial-flux Permanent-magnet Motor for Ship Propulsion Drives", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, September 1999.
- [3] M. Rosu, V. Nahkuri, A. Arkkio, T. Jokinen, J. Mantere, J. Westerlund; "Permanent Magnet Synchronous Motor for Ship Propulsion Drive", Proc. of Symposium on Power Electronics Electrical Drives Advanced Machines Power Quality "SPEEDAM '98", Sorrento, Italy, June 1998.
- [4] C. Sadarangani; "Electrical Machines- Design and Analysis of Induction and Permanent Magnet Motors", IREE-EME 2000:018, KTH, 2000.
- [5] Y.K. Chin, W.M. Arshad, T. Bäckström, C. Sadarangani; "Design of a Compact BLDC

Motor for Transient Applications", European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 3 - 10, August 2001.

- [6] W.M. Arshad, Y.K. Chin, T. Bäckström, J. Soulard, S. Östlund, C. Sadarangani; "On Finding Compact Motor Solutions for Transient Applications", IEEE International Electric Machines and Conference, pp. 743 - 747, June 2001.
- [7] W. Song, K.J. Tseng, W.K. Chan; "Design of a Bearingless BLDC Motor", Nanyang Technological University, Singapore 639798.
- [8] F. Libert, J. Soulard, J. Engström; "Design of a 4-pole Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor", International Conference on Electrical Machines, ICEM 2002, August 2002.
- [9] F. Libert, J. Soulard; "Design Study of low-speed Direct-Driven Permanent Magnet Motors with Concentrated Windings", the 6th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems, September 2005.
- [10] D.C. Hanselman; "Brushless Permanent Magnet Motor Design", McGraw-Hill, 1994.
- [11] Y.K. Chin, E. Nordlund, D.A. Staton, "Thermal Analysis Lumped-Circuit model and Finite Element Analysis", sixth International Power Engineering Conference, pp. 435 - 440, November 2003.
- [12] Y.K. Chin, D.A. Staton; "Transient Thermal Analysis Using both Lumped-circuit Approach and Finite Element Method of a Permanent Magnet Traction Motor", IEEE Africon, pp. 1027 - 1035, September 2004.

۹- پی‌نوشت‌ها

- 1- Brushless DC motor (BLDC)
- 2- Rest Period
- 3- Thermal Time Constant
- 4- Lamination