

طراحی و ساخت موتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) با بازده بالا و نوسان گشتاور کم برای استفاده در کولر آبی

ایراندخت امیرجانی مروی^۱، فرزاد تهامی^۲
^۱ شرکت نیان الکترونیک،
^۲ دانشگاه صنعتی شریف،

چکیده - با توجه به استفاده گسترده از کولرهای آبی در کشور و پایین بودن بازده موتورهای القایی مورد استفاده در کولرهای آبی مقدار زیادی انرژی توسط این کولرها تلف می‌شود. در این مقاله روند طراحی سه موتور سنکرون مغناطیس دائم $250W$ ، $370W$ و $550W$ برای استفاده در کولرهای آبی با ظرفیت هوادهی $3000 m^3/h$ ، $5000 m^3/h$ و $7000 m^3/h$ بیان شده و نتایج بدست آمده به وسیله شبیه‌سازی و آزمایش عملی بررسی می‌شود. در طراحی این موتورها مهم‌ترین پارامترهای مورد نظر کاهش قیمت تمام شده، بازده زیاد، ریبیل گشتاور کم، سادگی ساخت و یکسان بودن ورق‌های مورد استفاده در هر سه موتور و قابلیت جایگزینی این موتورها با موتور کولرهای آبی معمولی می‌باشد. کلیدواژه - طراحی موتور، موتور سنکرون آهنربا دائم، کولر آبی

ملاحظاتی که در طراحی موتورهای الکتریکی برای کولر آبی باید در نظر داشت کاهش گشتاور ضربانی است زیرا منجر به افزایش سروصدای کولر می‌شود یکی از عوامل گشتاور ضربانی در موتورهای مغناطیس دائم گشتاور دندانه است که در برخی مراجع از جمله [۸-۱۲] راه‌کارهای مختلفی برای کاهش آن بررسی شده است از جمله عوامل موثر در گشتاور دندانه می‌توان به تعداد شیار استاتور، تعداد قطب‌های رتور، شکل آهنربا، نوع سیم پیچی استاتور، زاویه پیچش رتور و استاتور اشاره کرد. که در این مقاله با شیفت پله‌ای در رتور و همچنین استفاده از سیم‌پیچی توزیع شده و در نظر گرفتن تعداد شیار بر فاز بر قطب برابر با ۲ ریبیل گشتاور به کمتر از ۵ درصد کاهش یافت. در مرجع [۱۳] موتور مغناطیس دائم شار محوری با توان ۴۵۰ وات و سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه برای استفاده در کولر آبی طراحی شده است به شکلی که میزان مصرف آهنربا در آن بهینه شده است در حالی که در این مقاله پارامترهای مورد نظر بسیاری از جمله محدودیت‌های دستگاه‌های تولیدی و قیمت تمام شده نیز مد نظر بوده است. همچنین موتورهای مغناطیس دائم به طور کلی نسبت به موتورهای سوئیچ رلوکتانسی مورد استفاده در کولر آبی [۱۴] چگالی توان بالاتر و راندمان بهتر و ریبیل گشتاور کمتری دارند. همچنین به دلیل راندمان بالاتر IP بالاتری برای موتور مغناطیس دائم در نظر گرفته شده است. در این مقاله در

۱- مقدمه

کولر آبی از پر مصرف‌ترین وسیله‌های خنک کننده هوا برای مکان‌های مسکونی و تجاری در ایران است. موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به دلیل خصوصیتی همچون بازده، چگالی توان و گشتاور بالا، سادگی ساخت و تعمیر نگهداری آن نسبت به دیگر موتورهای جریان متناوب مورد توجه بسیاری از صنایع همچون نظامی، تولیدی و سیستم‌های اتوماسیون و ... قرار گرفته اند [۴-۱]. علاوه بر این موتورهای مغناطیس دائم می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که حداقل تلفات مسی و هسته را داشته باشند بنابراین بازده آنها حتی در توان‌های کمتر از یک اسب بخار و نیز در عملکرد در کمتر از بار نامی بسیار بالاست [۶]، [۵]. در کولر آبی این مساله اهمیت زیادی دارد زیرا موتور همیشه در بار نامی خود کار نمی‌کند و لازم است بازده موتور در بازه عملکرد آن مناسب باشد. علاوه بر این گرمای ناشی از تلفات موتور مستقیماً به هوای خارجی کولر منتقل می‌شود و بازده حرارتی کولر را نیز کاهش می‌دهد. یکی دیگر از مزایای موتورهای آهنربا دائم این است که تلفات سیم‌پیچی رتور و جریان گردابی رتور وجود ندارند و خنک کردن آنها ساده می‌باشد زیرا منشا اصلی تلفات استاتور است که به راحتی می‌توان حرارت را به پوسته یا در موتورهای بزرگ به سیستم خنک کننده انتقال داد [۷]. یکی از

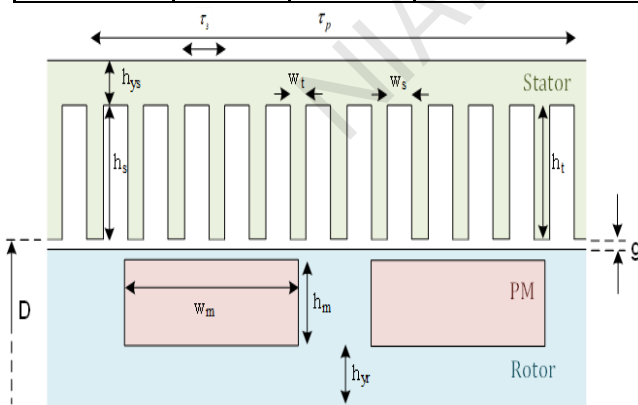
فصل نامه علمی، ترویجی عصر برق

۲-۱- کمیت‌های ورودی و خروجی

ابتدا باید مقدار کمیت‌های ورودی، مفروضات مشخص شود و سپس کمیت‌های خروجی که در طراحی باید به دنبال آنها بود، معرفی شوند. کمیت‌های ورودی موتور مورد نیاز در جدول ۱ بیان شده است. کمیت‌های خروجی نیز در شکل ۱ که شامل تصویر خطی از موتور مغناطیس دائم است، نمایش داده شده‌اند. با توجه به اینکه رتور آهنرباهای داخلی برای سرعت‌های بالا به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز مناسب هستند همچنین ساده بودن شکل آهنربا در موتورهای آهنربا داخلی که منجر به کاهش هزینه آن می‌شود از آهنربای داخلی استفاده شده است. از طرفی آهنرباهای داخلی نسبت به آهنرباهای سطحی کمتر در معرض غیر مغناطیس شدن قرار دارند.

جدول ۱: کمیت‌های ورودی طراحی موتور PMSM مورد نیاز

کمیت مورد نظر	نماد	واحد	مقدار
توان نامی موتور	P_{out}	W	۲۵۰-۳۷۰-۵۵۰
سرعت مکانیکی محور موتور	W_{shaft}	RPM	۱۵۰۰
تعداد فاز موتور	m	-	۳
ولتاژ موثر نامی در هر فاز	V_{in}	V-RMS	۲۲۰
فرکانس تغذیه موتور	f	Hz	۷۵
تعداد جفت قطب موتور	p	-	۳



شکل ۱: کمیت‌های خروجی در ساختار موتور مغناطیس دائم

۲-۲- انتخاب ساختار و نوع مواد

سه ماده اصلی بکار رفته در ماشین‌های آهنربای دائم، آهنربا، ورقه‌های فولاد الکتریکی و هادی مورد استفاده می‌باشد. نوع آهنربای دائم NdFeB، نوع هادی مس و نوع ورق مغناطیسی

بخش ۲ ابتدا روند طراحی سه موتور سنکرون مغناطیس دائم ۲۵۰، ۳۷۰ و ۵۵۰ وات بیان می‌شود، در بخش ۳ نتایج شبیه‌سازی سه بعدی موتور با نرم افزار مکسول نشان داده شده است، در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی حرارتی بیان شده و در نهایت در بخش ۵ نتایج آزمایش عملی بیان می‌شود.

۲- روند طراحی موتور

برای طراحی هر موتور الکتریکی باید ۶ عنصر اساسی را تعیین نمود. اول کمیت‌های ورودی، این کمیت‌ها عموماً از نوع میزان ولتاژ ورودی، توان نامی مورد نیاز، سرعت نامی موتور و ... خواهد بود. دوم انتخاب ساختار و نوع مواد، شروع طراحی با انتخاب ساختار ابتدایی ماشین و نوع مواد مورد استفاده در بخش‌های مختلف ماشین می‌باشد. در مرحله سوم کمیت‌های مشخص شده وارد مراحل طراحی می‌گردد که شامل مجموعه‌ای از فرمول‌های ریاضیاتی برای طراحی موتور الکتریکی می‌باشد. چهارم مفروضات، در مراحل طراحی برخی از کمیت‌ها مورد نیاز است که از قدم قبلی و یا کمیت‌های اولیه بدست نمی‌آید. این کمیت‌ها عموماً به صورت یک مقدار ثابت در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند و مقدار آنها با توجه به تجربه طراح و مطالب موجود در مراجع تعیین می‌شود. باید توجه داشت که مقدار کمیت‌های مفروض برای هر طراحی متفاوت است و با توجه به کمیت‌های اولیه و کاربرد موتور مورد نیاز تعیین خواهد شد. پنجم قیود، روند طراحی به کمک برخی قیود و شروط تحت کنترل قرار می‌گیرد تا بتوان از برخی پدیده‌های ناخواسته مانند اشباع مغناطیسی، اشباع حرارتی و مشکلات مکانیکی جلوگیری نمود. این قیود عموماً به صورت نامساوی اعمال شده و برای برخی کمیت‌های اساسی موتور مقدار حداکثر و یا حداقل تعیین می‌نماید. از کمیت‌های اساسی که قیود بر آنها اعمال می‌شود می‌توان به چگالی جریان سیم‌پیچی، حداقل پهنای دندانه، حداقل فاصله هوایی، حداقل ضخامت یوک استاتور و ... نام برد. ششم کمیت‌های خروجی، در انتها پس از پیاده‌سازی تمامی اقدامات بیان شده، کمیت‌های خروجی به عنوان نتیجه طراحی موتور الکتریکی استخراج می‌شوند. کمیت‌های خروجی عموماً ابعاد فیزیکی موتور الکتریکی مورد نظر (توصیف شده به کمک کمیت‌های ورودی و قیود) را شامل خواهند شد مانند طول موتور، قطر خارجی، قطر فاصله هموایی، ابعاد شیار و ...

فصل نامه علمی، ترویجی عصر برق

بدست می‌آید. حداقل پهنای دندان یکی از شروط طراحی است که برای جلوگیری از پدیده اشباع اعمال می‌شود. دندان استاتور محتمل‌ترین محل برای رخداد پدیده اشباع است و باید مقدار پهنای آن به نحوی انتخاب گردد که مقدار چگالی شار در سطح آن کمتر حدود مشخص شده در جدول مفروضات باشد. حداقل پهنای دندان استاتور به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$\omega_{\min} = \tau_s \left(\frac{B_{av}}{B_{t\max}} \right) \quad (۶)$$

اگر مقدار حداقل پهنای دندان از گام شیار استاتور کم شود، مقدار پهنای شیار به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\omega_s = (\tau_s - \omega_{\min}) = \tau_s \left(1 - \frac{B_{av}}{B_{t\max}} \right) \quad (۷)$$

برای بدست آوردن ارتفاع شیار استاتور ابتدا نیاز به محاسبه مساحت شیار استاتور وجود دارد. مساحت شیار باید به نحوی محاسبه گردد که تعداد هادی‌های موجود در هر شیار قابلیت جایگذاری داشته باشند. بنابراین مساحت هادی‌های مورد استفاده در سیم‌پیچی استاتور و متعاقباً مساحت شیار استاتور به صورت زیر خواهد بود:

$$A_{con} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_{L-L} J_s} \quad (۸)$$

$$A_s = \frac{A_{con} N_{ph}}{pq K_{cu}} \quad (۹)$$

پس از بدست آوردن مساحت شیار به سادگی با تقسیم آن بر پهنای شیار می‌توان ارتفاع شیار را یافت:

$$h_s = \frac{A_s}{\omega_s} \quad (۱۰)$$

ارتفاع یوک استاتور باید به نحوی انتخاب گردد که پدیده اشباع در آن روی ندهد و بر همین اساس خواهیم داشت:

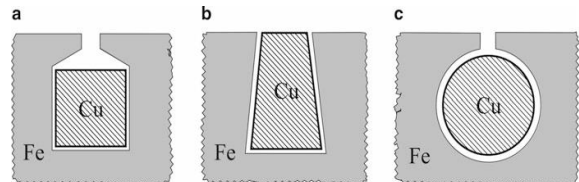
$$h_{ys} = \frac{\tau_s B_{av}}{2B_{y\max}} \quad (۱۱)$$

به این ترتیب قطر خارجی استاتور به صورت زیر خواهد بود:

$$D_o = D_i + 2h_{ys} + 2h_s \quad (۱۲)$$

در این مرحله باید ابتدا مقدار مناسبی برای طول فاصله هوایی انتخاب نمود. هر چه مقدار طول فاصله هوایی کمتر انتخاب شود مقدار بازده، ضریب توان، حجم آهنربای مورد نیاز موتور بهبود خواهد یافت. اما به علت وجود محدودیت‌های مکانیکی ساخت و افزایش احتمال ایجاد خطای ناهم محوری روتور که منجر به بروز خطای مکانیکی در عملکرد موتور می‌گردد، باید حداقل مقدار قابل قبول برای طول فاصله هوایی انتخاب نمود. طول فاصله

موتور با توجه به تلفات آن و فرکانس تغذیه موتور از محصولات سازندگان انتخاب شده است. همچنین جهت انتخاب نوع شیار استاتور نمونه‌هایی از شیاری‌های موجود در شکل ۲ نشان داده شده است جهت سهولت ساخت، کاهش هزینه ساخت و فراهم شدن فضای بیشتر برای سیم‌پیچی از شیار دوزنقه ای برای داشتن دندان مستطیلی استفاده شده است.



شکل ۲: نمایش انواع شیار برای استاتور (a) مربعی (b) دوزنقه ای (c) دایره ای

۲-۳- مراحل طراحی و قیود

با توجه به رابطه ابعادی (۱) می‌توان ابعاد موتور را با توان نامی ظاهری (S) در ارتباط دانست [۱۳]. بر همین اساس توان ظاهری نامی موتور با سرعت نامی موتور (n_s)، طول موتور (L) و توان دوم قطر داخلی استاتور (D_i^2) متناسب است. با استفاده از این رابطه می‌توان طول استاتور و قطر داخلی آن را یافت:

$$S = 1.11 * 10^{-3} * \pi^2 (K_w K_f B_{av} a c) D_i^2 L n_s \quad (۱)$$

در بخش مفروضات کمیتی با نام تعداد شیار بر قطب بر فاز (q) انتخاب شده است که به کمک آن و رابطه (۲) می‌توان تعداد کل شیاری‌های موجود در استاتور (S_s) را یافت. مقدار q هر چه بیشتر باشد شار فاصله هوایی به سینوسی نزدیک‌تر خواهد بود و رپل گشتاور کاهش می‌یابد. اما مقدار q را نمی‌توان بیش از حد زیاد گرفت چرا که تعداد شیاری‌ها افزایش یافته و پهنای دندان کم خواهد شد. کاهش پهنای دندان موجب ایجاد مشکلات مکانیکی و افزایش احتمال پدیده اشباع مغناطیسی می‌گردد.

$$S_s = 2pqm \quad (۲)$$

بر همین اساس گام هر شیار استاتور هم قابل محاسبه است:

$$\tau_s = \frac{\tau_p}{mq} \quad (۳)$$

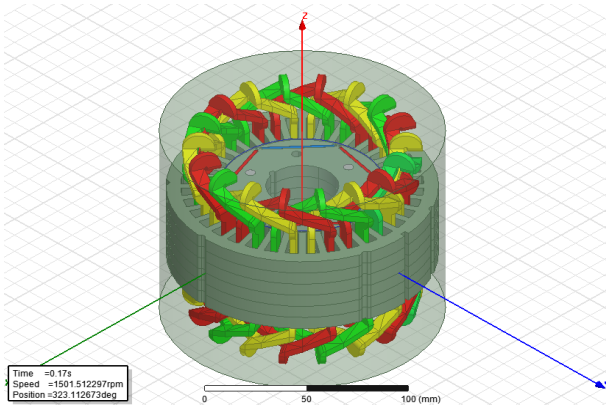
با استفاده از (۴) رابطه میان ولتاژ محرکه استاتور و تعداد دور سیم‌پیچی در هر فاز مشخص می‌شود و از این طریق تعداد دور سیم‌پیچی بدست خواهد آمد. این رابطه به کمک شار عبوری از هر قطب به دست می‌آید که در (۵) مقدار آن قابل محاسبه است.

$$E_p = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_{ph} \varphi_p K_w f \quad (۴)$$

$$\varphi_p = \frac{\pi L D_i}{P} B_{av} \quad (۵)$$

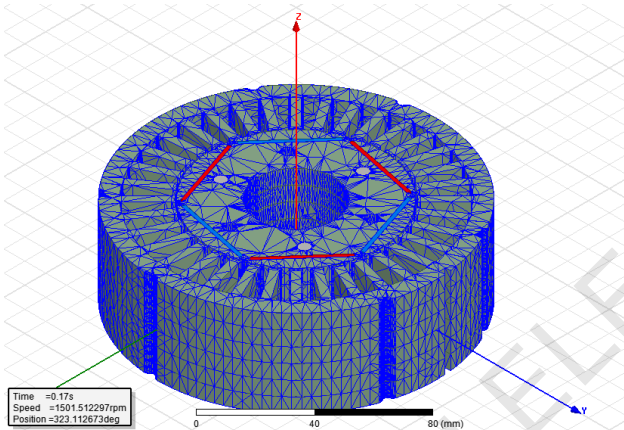
مقدار پهنای شیار با توجه به حداقل مقدار پهنای دندان استاتور

فصل نامه علمی، ترویجی عصر برق



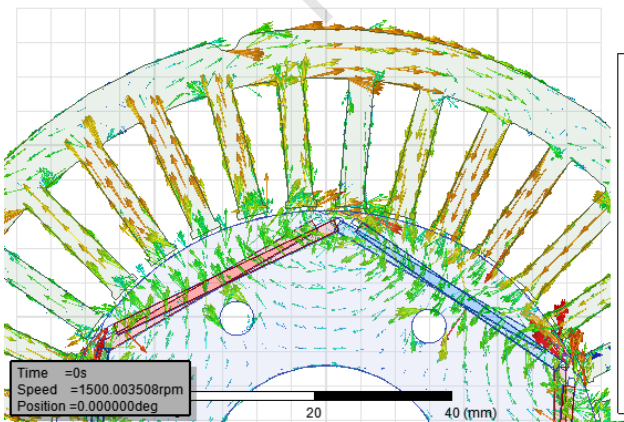
شکل ۳: نمای سه بعدی موتور شبیه‌سازی شده در مگسول

شکل ۴ مش بندی انجام شده برای حل معادلات مگسول را نشان می‌دهد در این مش بندی طول موتور به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر به ۶ قسمت مساوی تقسیم شده است که در شکل قابل مشاهده است.



شکل ۴: مش بندی انجام شده برای تحلیل سه بعدی معادلات مگسول

شکل ۵ مسیر و جهت خطوط چگالی شار مغناطیسی در ماشین را نمایش می‌دهد که در آن قطب‌های موتور و نیز شیفت دو قسمت رتور نسبت به هم قابل مشاهده است.



شکل ۵: تحلیل مسیر و جهت خطوط چگالی شار مغناطیسی

همچنین بخش مهمی از فرآیند طراحی بررسی چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی در نقاط مختلف ماشین می‌باشد. دو

هوایی عموماً در حدود چند دهم میلی متر (در توان‌های کم) تا چند میلی متر (در توان‌های بالا) محدود می‌شود. حال می‌توان قطر خارجی روتور را به صورت زیر نوشت:

$$D_r = D_i - 2g \quad (13)$$

گام قطب روتور و طول یوک روتور مانند آنچه در استاتور توصیف شده است، بدست می‌آید:

$$\tau_r = \frac{\pi D_r}{2p} \quad (14)$$

$$h_{yr} = \frac{\tau_r B_{av} \alpha}{2B_{y_{max}}} \quad (15)$$

پهنای آهنربا به صورت ضربی از گام قطب روتور بیان می‌شود و این ضریب بستگی به شکل آهنربای مورد استفاده دارد:

$$\omega_m = \alpha \tau_r \quad (16)$$

$$\alpha = 0.98 \times \frac{3}{\pi} \quad (17)$$

حجم آهنربای مورد نیاز در روتور متناسب با توان مورد نیاز موتور است و به مشخصات آهنربای مورد استفاده وابسته است. این تناسب با استفاده از ضریب بهره‌وری به تساوی تبدیل می‌گردد [۱۷]:

$$V_m = cv \frac{P_{in}}{B_r H_c f} \quad (18)$$

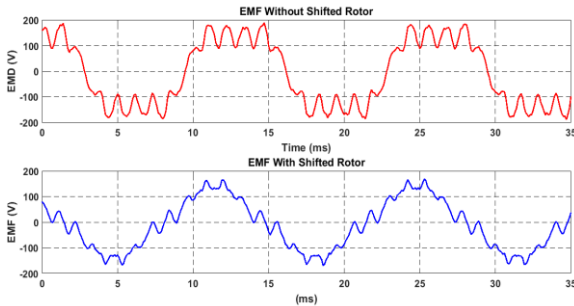
$$V_m = 2p(h_m l_m \omega_m) \quad (19)$$

۳- نتایج شبیه‌سازی مغناطیسی

قدم بعدی در طراحی ماشین‌های الکتریکی شبیه‌سازی ماشین طراحی شده از معادلات تحلیلی در نرم افزارهای تحلیل اجزای محدود می‌باشد. که در این قسمت از نرم افزار مگسول و شبیه‌سازی سه بعدی 3D استفاده شده است. در ادامه قسمت‌های مختلف از ماشین نشان داده می‌شود. باید توجه داشت که شکل ورقه‌های مورد استفاده در رتور و استاتور برای هر سه موتور یکسان است و تفاوت در تعداد ورق‌ها و طول ماشین می‌باشد. شکل ۳ نمای سه بعدی موتور شبیه‌سازی شده در مگسول را نشان می‌دهد که در آن رتور و استاتور و نحوه سیم‌پیچی موتور که توزیع شده و با گام کسری است قابل مشاهده می‌باشد.

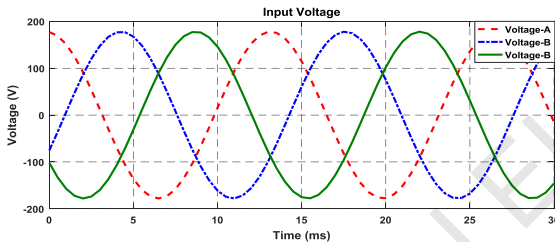
فصل نامه علمی، ترویجی عصر برق

مکان داده می‌شود. شکل ۸ EMF ایجاد شده در موتورها با رتور معمولی و با رتور شیفت داده شده را نمایش می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود با رتور شیفت داده شده شکل موج EMF به حالت سینوسی کامل نزدیک‌تر شده است.

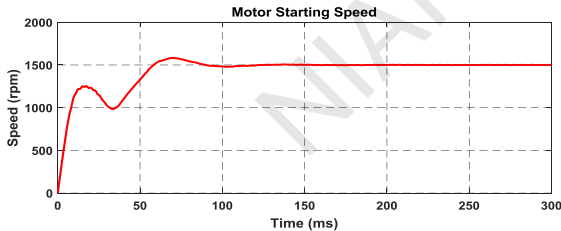


شکل ۸: EMF ایجاد شده در موتورها با رتور معمولی و با رتور شیفت داده شده

برای تغذیه هر سه موتور از ولتاژ سه فاز متعادل با دامنه ۲۲۰ ولت و فرکانس ۷۵ هرتز استفاده شده است که در شکل ۹ نمایش داده شده است. همچنین شکل ۱۰ تغییرات سرعت ماشین را از زمان راه‌اندازی همراه با حالت گذرای ابتدایی نمایش می‌دهد.



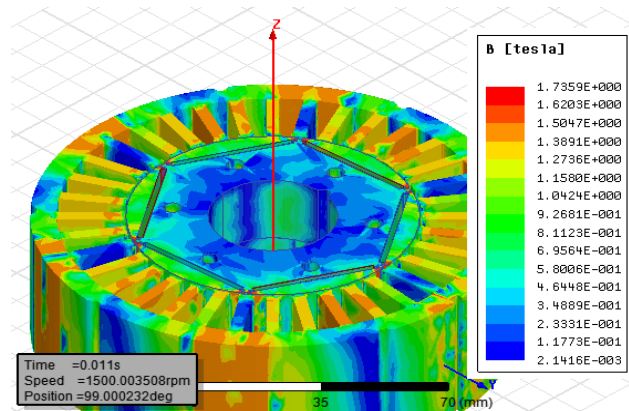
شکل ۹: ولتاژ تغذیه ورودی موتور



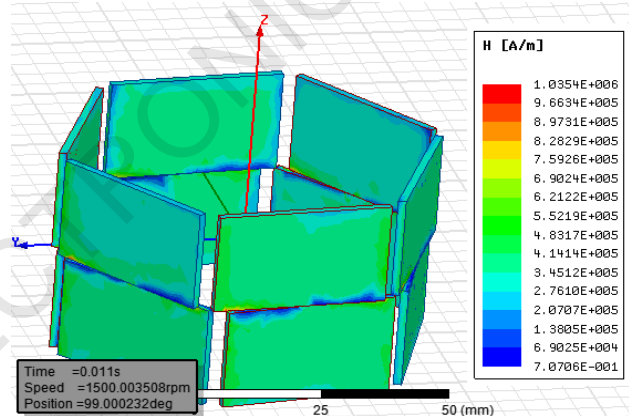
شکل ۱۰: تغییرات سرعت ماشین را از زمان راه‌اندازی

در شکل ۱۱ توان ورودی و خروجی موتور ۵۵۰ وات در بار و سرعت نامی نمایش داده شده است که صحت ابعاد بدست آمده از طراحی را نشان می‌دهد.

شکل ۶ و ۷ این دو مقدار را برای موتور در شرایط نامی نشان می‌دهد.



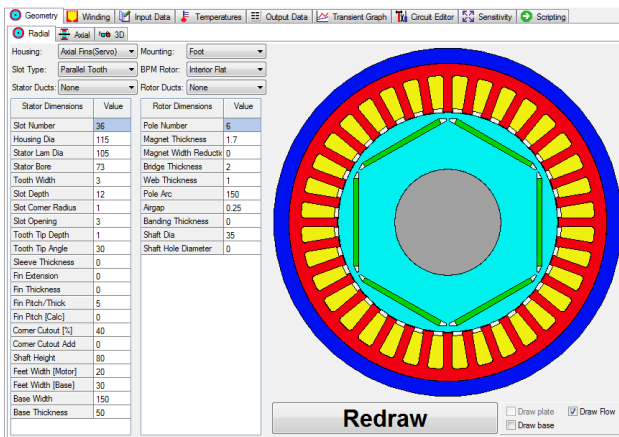
شکل ۶: نمایش چگالی شار مغناطیسی به منظور بررسی اشباع در هر یک از ورق‌های رتور و استاتور



شکل ۷: بررسی شدت میدان مغناطیسی در سطح آهنربا

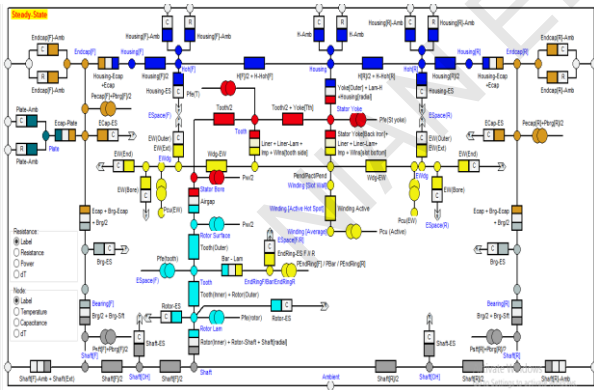
مقدار چگالی شار در نقاط مختلف ماشین باید بگونه‌ای باشد که شاهد اشباع در ماشین نباشیم. همچنین شدت میدان الکتریکی در سطح آهنربا باید از نیروی محرکه مغناطیس زدایی آهنربا کمتر باشد تا آسیبی به آن وارد نشود که با توجه به شکل ۶ چگالی شار در همه نقاط موتور کمتر از حد اشباع بوده و نیز شدت میدان مغناطیسی در سطح آهنربا بگونه‌ای است که آسیبی به آهنربا نمی‌رسد.

از طرفی یکی از مسائل مطرح در ماشین‌های الکتریکی کیفیت ولتاژ ضدمحرکه ایجاد شده در ماشین می‌باشد. برای بهبود کیفیت ولتاژ روش‌های گوناگونی مانند استفاده از سیم‌پیچی با گام کسری، سیم‌پیچی شیارکسری، انحراف دندان استاتور و یا رتور استفاده می‌شود. همچنین از دیگر مزایای این کارها می‌توان به کاهش رپل گشتاور یا توان اشاره نمود. اریب کردن (Slew) رتور یا استاتور هزینه ساخت را افزایش می‌دهد لذا در این مقاله از روش ساده تری جهت بهبود EMF استفاده می‌شود. در این روش رتور به دو قسمت مساوی تقسیم و نسبت به هم تغییر



شکل ۱۳: فضای نرم افزار MOTORCAD

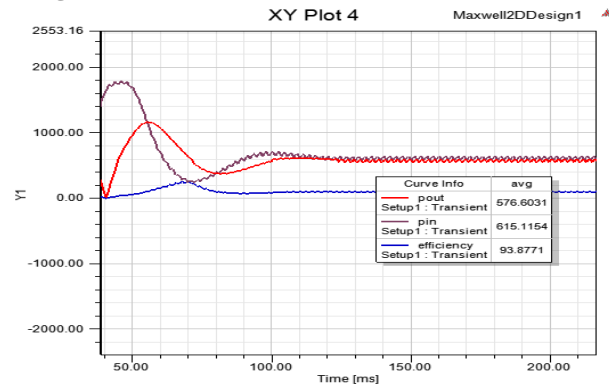
پس از تکمیل اطلاعات، این نرم افزار مدل حرارتی موتور، آهنربا دائم که شامل مجموعه‌ای از مقاومتهای حرارتی، خازنهای حرارتی و منابع تلفات می‌باشد، ارائه می‌کند. در این مدل خازنهای حرارتی برای مدل‌سازی گذراهای دمایی لحاظ می‌شود. با توجه به اینکه در این گزارش هدف تحلیل حالت دائمی دمای موتور آهنربا دائم می‌باشد، از تاثیر این خازنهای حرارتی در مدل صرف نظر شده است. شکل ۱۴ مدل حرارتی ارائه شده توسط MOTORCAD را برای موتور آهنربا دائم مورد نظر نشان می‌دهد.



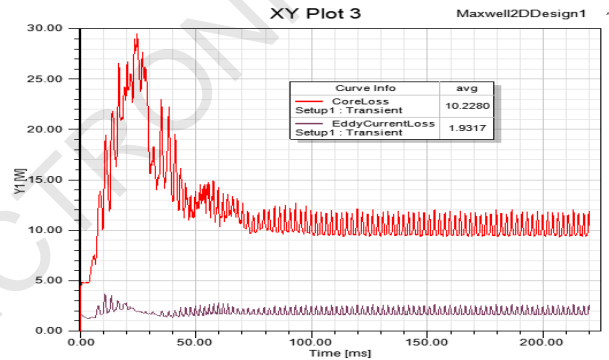
شکل ۱۴: مدل حرارتی ارائه شده توسط MOTORCAD برای

موتور ۵۵۰ وات

با استفاده از مدل حرارتی ارائه شده می‌توان توزیع دمایی را در سطح موتور یافت. در ادامه دمای نقاط مختلف ماشین تحت شرایط نامی برای موتور ۵۵۰ وات به ازای دمای محیط ۴۰ درجه در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. نرم افزار MOTORCAD برای قسمت‌های مختلف موتور، مقاومتهای حرارتی مختلفی در نظر می‌گیرد. در صورتی که نیاز به آنالیز حساسیت حرارتی باشد، می‌توان با استخراج این مقاومتهای از محیط نرم افزار



شکل ۱۱: توان ورودی و خروجی موتور ۵۵۰ وات همانطور که مشاهده می‌شود در حالت دائمی‌توان ورودی ۶۲۰ وات خروجی ۵۵۰ وات و بازدهی حدود ۹۳ درصد می‌باشد. همچنین تلفات هسته و هستریزاس برای موتور ۵۵۰ وات در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

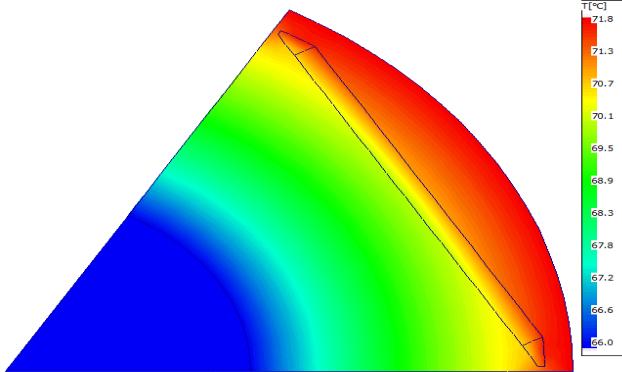


شکل ۱۲: تلفات هسته - تلفات هیستریزاس

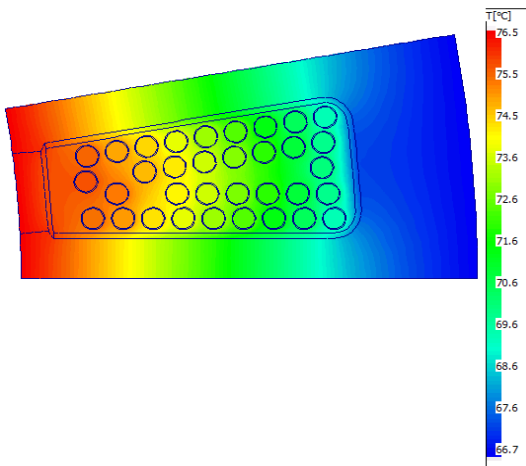
۴- شبیه‌سازی حرارتی

برای مدل کردن رفتار حرارتی موتور آهنربا دائم از نرم افزار MOTORCAD استفاده شده است. در این نرم افزار، اطلاعات کلی موتور آهنربا دائم که شامل ابعاد، تعداد شیار استاتور، شکل رتور و نحوه قرار گیری آهنرباها و ... به نرم افزار داده می‌شود که براساس این اطلاعات مدل حرارتی موتور محاسبه خواهد شد. در شکل ۱۳ فضای این نرم افزار و بخش وارد کردن اطلاعات قابل مشاهده است.

فصل نامه علمی، ترویجی عصر برق



(ب)



(ج)

شکل ۱۵: توزیع حرارتی (الف) در سطح موتور (ب) در یک قطب رتور (ج) در یک شیار استاتور

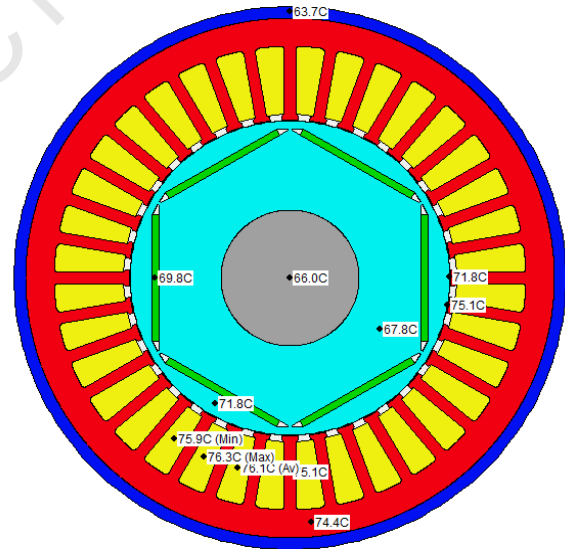
۵- نتایج آزمایش عملی

شکل ۱۶ نمای کلی موتور ۵۵۰ وات ساخته شده و سیستم تست موتور را نشان می‌دهد و در جدول ۳ نتایج آزمایش موتور آورده شده است.



(الف)

MOTORCAD و قرار دادن آن‌ها در یک نرم افزار تحلیل الکتریکی (مثل PSIM، ORCAD) تاثیر تغییرات بار، ولتاژ تغذیه، هارمونیک‌ها و عدم تعادل ولتاژ و ... را در تغییرات دمایی بخش‌های مختلف موتور مورد بررسی قرار گیرد. از آنجایی که در این گزارش فرض بر متعادل بودن ولتاژ تغذیه و نیز ثابت بودن بار است، نیازی به این بررسی حساسیت‌ها نیست. لازم به ذکر است که در تحلیل حرارتی منابع حرارتی به صورت منبع جریان و مقاومت‌های حرارتی به صورت مقاومت الکتریکی مدل می‌شود. بنابراین با پیدا کردن اختلاف پتانسیل دو سر این مقاومت‌ها می‌توان تغییرات دمایی بخش‌های مختلف موتور را به دست آورد. در صورتی که علاوه بر منابع حرارتی ارائه شده توسط نرم افزار منابع حرارتی دیگری هم وجود داشته باشند می‌توان با استفاده از یک نرم افزار تحلیل الکتریکی این منابع جدید را به صورت منبع جریان در مدل حرارتی قرار داد. لازم به ذکر است منابع حرارتی جدید که در نرم افزار MOTORCAD دیده نمی‌شوند عمدتاً ناشی هارمونیک‌های زمانی است که در اثر ضعف سیستم تغذیه پدید می‌آیند.



(الف)

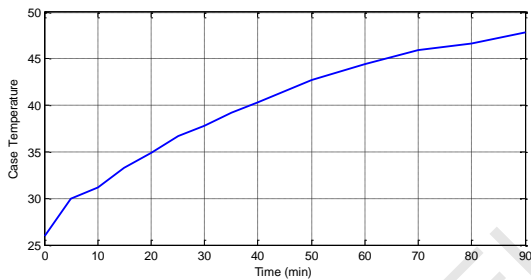
فصل نامه علمی، ترویجی عصر برق

موتورهای القایی آورده شده است. همچنین دمای بیان شده در این جدول دمای سیم‌پیچی استاتور می‌باشد.

جدول ۲: نتایج آزمایش موتور ۵۵۰ وات

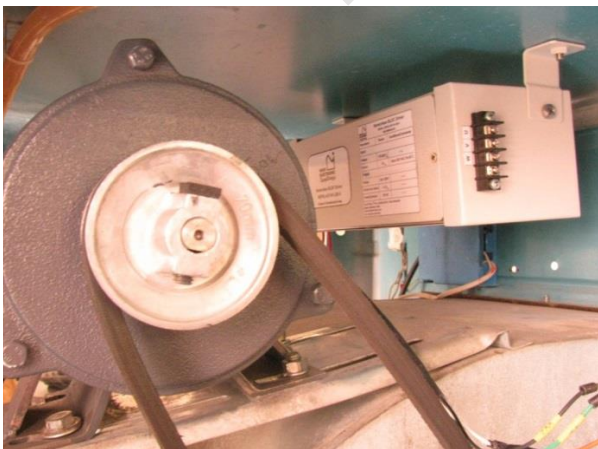
موتور: ۵۵۰ وات			دمای محیط: ۲۳°C		
زمان کار	دمای موتور	سرعت	توان ورودی	گشتاور	بازده
۰	۳۶	۱۵۱۰	۶۸۹	۴/۰۲۴	۹۲,۳
۵	۳۷	۱۵۱۱	۶۸۸	۴/۰۱۲	۹۲,۱
۱۰	۴۴	۱۵۱۲	۶۹۱	۴/۰۱۲	۹۱,۸
۱۵	۴۶/۸	۱۵۱۴	۶۸۹	۳/۹۹۶	۹۱,۹
۲۰	۵۰	۱۵۱۴	۶۹۲	۴/۰۱۲	۹۱,۸

به منظور آزمایش حرارتی، موتور با گشتاور نامی برای مدت طولانی کار کرده و تغییرات دمای بدنه با گذشت زمان ثبت گردید که در شکل ۱۷ قابل مشاهده است.



شکل ۱۷: تغییرات دمای بدنه موتور ۲۵۰ وات در حالت عملکرد پیوسته در بار کامل

همچنین برای آزمایش عملکرد موتور در داخل کولر موتور با تسمه‌ی ۵۵ و پولی ۶۵ روی کولر آبی مطابق شکل ۱۸ نصب شد. پس از دو ساعت کار در دور تند دمای موتور در حدود ۳۰ تا ۳۵ درجه ثابت ماند.



شکل ۱۸: نصب موتور ۵۵۰ وات در داخل کولر آبی



(ب)



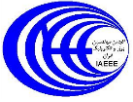
(ج)



(د)

شکل ۱۶: نمای کلی موتور ساخته شده (الف) دینامومتر آزمایش عملی (ب) موتور ۵۵۰ وات ساخته شده (ج) رتور (د) استاتور موتور ۵۵۰ وات

همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود قسمت (الف) سیستم تست دینامومتری مورد استفاده برای آزمایش عملی موتور است که در آن یک موتور و یک ژنراتور با هم جفت شده‌اند به همراه درایو مورد استفاده برای راه‌اندازی و کنترل سرعت موتور نشان داده شده است. در این حالت موتور توسط یک محرکه الکتریکی راه‌اندازی شده و با استفاده از یک ژنراتور که با موتور جفت شده است گشتاور خروجی موتور کنترل می‌شود. یک گشتاورسنج و سرعت سنج گشتاور و سرعت را اندازه‌گیری کرده و توان مکانیکی خروجی محاسبه می‌شود. همچنین قسمت (ب) نمای خارجی موتور ۵۵۰ وات ساخته شده را نشان می‌دهد و در قسمت (ج) و (د) رتور و سیم‌پیچی استاتور قابل مشاهده است. نتایج آورده شده به عنوان بازده در جدول ۲ بازده موتور بدون تلفات محرکه‌ی آن می‌باشد که به منظور مقایسه با



[11] Xia, Changliang, Zhen Zhang, and Qiang Geng. "Analytical modeling and analysis of surface mounted permanent magnet machines with skewed slots." *IEEE Transactions on Magnetics* 51.5 (2015): 1-8.

[12] Ueda, Yasuhito, et al. "Cogging-torque reduction of transverse-flux motor by skewing stator poles." *IEEE Transactions on Magnetics* 52.7 (2016): 1-4.

[۱۳] حمید لسانی، طراحی جامع ماشینهای الکتریکی، انتشارات دانش و فن، ۰۳۰.

[۱۴] نظامی وطن دوست میلاد، دارابی احمد و مددی احمد، "طراحی بهینه موتور شار محوری مغناطیس دائم برای کولر آبی"، سی امین کنفرانس بین المللی برق، تهران، آبان ۱۳۹۴.

[۱۵] بهرامگیری مریم، عفت نژاد رضا و بابایی مجتبی "طراحی و ساخت موتور سوئیچ رلوکتانسی برای کاربرد در کولرهای آبی جهت افزایش راندمان و کاهش مصرف انرژی"، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۲ شماره ۳، پاییز ۱۳۸۸.

[16] Bianchi, Nicola, Silverio Bolognani, and Paolo Frare. "Design criteria for high-efficiency SPM synchronous motors." *IEEE Transactions on energy conversion* 21.2 (2006): 396-404

[17] Mi, Chunting Chris. "Analytical design of permanent-magnet traction-drive motors." *IEEE Transactions on magnetics* 42.7 (2006): 1861-1866

در این مقاله روند طراحی و ساخت موتور آهنربا دائم با توان ۲۵۰-۳۷۰-۵۵۰ وات با بازده بالا برای استفاده در کولر آبی بیان شد و نتایج شبیه سازی و آزمایش عملی نشان داده شد. در این طراحی سادگی ساخت، بازده بالا، ریبیل گشتاور کم، یکسان بودن ورقه های مورد استفاده در سه موتور، قیمت تمام شده محصول و قابلیت جایگزینی با کولرهای القایی متداول مهم ترین پارامترهای مورد نظر بوده است. همچنین نتایج شبیه سازی و آزمایش عملی روی موتور مطلوب بودن رفتار موتور را نشان داد.

سپاسگزاری

در پایان از زحمات مدیریت ارشد شرکت نیان الکترونیک جناب آقای محمد علی چمنیان به خاطر حمایت های مادی و معنوی ایشان در انجام این پروژه تقدیر و تشکر می کنم.

مراجع

[1] Demir, Y., O. Ocak, and M. Aydin. "Design, optimization and manufacturing of a spoke type interior permanent magnet synchronous motor for low voltage-high current servo applications." *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International*. IEEE, 2013.

[2] Zhu, Xiaoyong, et al. "Co-reduction of torque ripple for outer rotor flux-switching PM motor using systematic multi-level design and control schemes." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64.2 (2017): 1102-1112.

[3] Li, Dawei, Ronghai Qu, and Thomas A. Lipo. "High-power-factor vernier permanent-magnet machines." *IEEE transactions on industry applications* 50.6 (2014): 3664-3674.

[4] 4. Zhu, Xiaoyong, et al. "Design and multicondition comparison of two outer-rotor flux-switching permanent-magnet motors for in-wheel traction applications." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64.8 (2017): 6137-6148.

[5] Morimoto, S., Y. Takeda, and H. Murakami. "Motors for home applications-development of environment-friendly electric motors." *Proc. of the 10th Inter. EPE-PEMC Conference, Cavtat&Dubrovnik, Croatia*. Vol. 131. 2002.

[6] Murakami, Hiroshi, et al. "Highly efficient brushless motor design for an air-conditioner of the next generation 42 V vehicle." *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE*. Vol. 1. IEEE, 2001.

[7] J. F. Gieras "Permanent magnet motor technology: design and applications," Third edition, CRC-Press 2009.

[8] Jahns, Thomas M., and Wen L. Soong. "Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives-a review." *IEEE transactions on industrial electronics* 43.2 (1996): 321-330.

[9] Nakano, Masatsugu, Yusuke Morita, and Toshihiro Matsunaga. "Reduction of cogging torque due to production tolerances of rotor by using dummy slots placed partially in axial direction." *IEEE Transactions on Industry Applications* 51.6 (2015): 4372-4382.

[10] Islam, Rakib, et al. "Permanent-magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction." *IEEE Transactions on industry applications* 45.1 (2009): 152-160.