Downloaded from jiaeee.com at 21:47 +0330 on Wednesday January 15th 2020

طراحی ماشین شار محوری مغناطیس دائم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات بهبودیافته

حمید محمد حسین[۱] میلاد نظامی وطن‌دوست[۲] حمید رادمنش[۳]

۱- استادیار، دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران
hmh.1343@yahoo.com
۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
milad_nezami@yahoo.com
۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران
Hamid.radmanesh@aut.ac.ir

چکیده: در این مقاله با استفاده از معادلات اندازه، الگوریتم IPSO (Improve Particle Swarm Optimization) و نرم‌افزار اجزاء محدود طراحی بهینه یک موتور AF (Axial Flux) بدون شیار ارائه می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی IPSO به‌دلیل اجرای موازی مدت زمان اجرای الگوریتم طراحی موتور را کاهش می‌دهد. این کاهش با تعداد CPUهای متناسب است. هدف بهینه‌سازی دستیابی به Back EMF (Electromotive force) تقریباً سینوسی، حداقل سازی وزن آهن‌ربا و حداکثر سازی بازده است. به‌منظور محاسبه دقیق ضخامت آهن‌ربا دائم معادله جدید ارائه شده است. در گام اول پارامترهای بهینه‌سازی طراحی مانند تعداد قطب، فاصله هوایی، بارگذاری الکتریکی و ... به‌وسیله IPSO مشخص‌شده تا بدین‌صورت اهداف طراحی ارضاء شود. موتور طراحی‌شده به‌وسیله معادلات اندازه و IPSO، به کمک روش اجزاء محدود مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا صحت نتایج به‌دست‌آمده تائید شود.

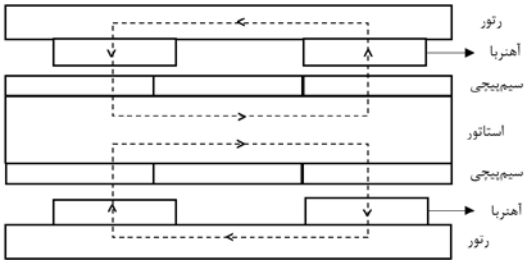
کلمات کلیدی: موتور AFPM، IPSO، بهینه‌سازی، آهن‌ربا دائم و روش اجزاء محدود

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۲
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۰۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۲
نام نویسندهی مسئول: دکتر حمید محمد حسین
نشانی نویسندهی مسئول: ایران تهران دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا

Downloaded from jiaeee.com at 21:47 +0330 on Wednesday January 15th 2020

۱- مقدمه

علاقه‌مندان استفاده از موتورهای آهن‌ربا دائم (PM) به دلیل دارا بودن مشخصه عملکرد خوب و نویز کم این نوع موتورها در حال افزایش است[۱]. کاهش قیمت مواد مغناطیس دائم و ادوات الکترونیک قدرت که به‌طور مستقیم بر قیمت تمام شده موتورهای PM تأثیرگذار است، باعث استفاده بیش‌ازپیش این نوع موتورها در کاربردهای مختلف شده است[۲]. موتورهای PM ازنظر جهت حرکت شار فاصله هوایی به دو دسته شار محوری (AF) و شار (RF) شعاعی تقسیم‌بندی می‌شوند. ساختار موتورهای آهن‌ربای دائم (AFPM) به دلیل حرکت محوری شار فاصله هوایی، به‌صورت دیسکی است که این نوع ساختار باعث به وجود آمدن ویژگی‌های برجسته‌ای همچون چگالی گشتاور بالا، راندمان عالی و تخت بودن ساختار موتور می‌شود. از طرف دیگر ماشین‌های AFPM ازلحاظ تعداد رتور و استاتور و نحوه ساخت استاتور نیز دارای تنوع می‌باشند. ازجمله ساختارهای استاتور می‌توان به شیاردار، بدون شیار و بدون هسته اشاره کرد. تنوع ساختار در موتورهای AFPM باعث ایجاد تنوع عملکردی و کاربردی نیز شده است. ازجمله تفاوت عملکردی این نوع موتورها می‌توان به نوسانات گشتاور خروجی اشاره کرد. این ساختار به دو صورت یک رتور و دو استاتور (AFIR) و دو رتور و یک استاتور (TORUS) ساخته می‌شود[۳]. به دلیل پیچیده بودن فرآیند ساخت، استفاده بهینه از سیم‌پیچ‌ها و هسته استاتور، موتورهای AFPM با ساختار تک استاتور و دو رتور گسترش بیشتری پیداکرده‌اند. در ماشین‌ها شار محوری شار عبوری بین استاتور و رتور در راستای محور جابجا می‌گردد حال آنکه این مورد در ماشین‌های متداول امروزی به صورت شعاعی انتشار می یابد. به عبارت دیگر شار تولید شده به وسیله آهن‌ربا دائم موجود بر روی رتور ابتدا به صورت محوری وارد فاصله هوایی، سیم‌پیچ‌ها و هسته استاتور شده، سپس قسمتی از محیط هسته استاتور را بصورت شعاعی پیموده و مجدد مسیر هسته استاتور، سیم‌پیچ‌ها و فاصله هوایی را به صورت محوری طی می‌کند و وارد قطب مخالف آهنربا دائم می‌شود.ساختار ماشین شار محوری مغناطیس دائم بدون شیار در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل(۱): ساختار ماشین شار محوری مغناطیس دائم بدون شیار

در [۴] از روش بازسازی میدان سه‌بعدی برای مدل‌سازی ماشین‌های شار محوری مغناطیس دائم استفاده می‌شود. برای مدل سازی ولتاژ کاهش‌یافته نیز از روش محاسبه شار نشتی استفاده می‌شود. با توجه به نوع ساختار ماشین‌های شار محوری مغناطیس دائم در تحلیل به روش اجزاء محدود باید از مدل سه‌بعدی استفاده شود. روش بازسازی میدان سه‌بعدی دارای دقت بالای همانند تحلیل به روش اجزاء محدود است و حجم محاسباتی بسیار کمتری دارد که باعث افزایش سرعت پاسخ‌دهی و سهولت در انجام بهینه‌سازی می‌شود.

در [۵] به منظور حداقل سازی گشتاور دندانه‌ای موتور شار محوری مغناطیس دائم چندین روش مورب کردن آهن‌ربا دائم ارائه شده است. میزان کاهش گشتاور دندانه‌ای نسبت به تغییرات میزان مورب بودن آهن‌ربا دائم و هندسه آهن‌ربا بررسی شده است. با توجه به بررسی نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از آهن‌ربا دائم مورب شده نسبت به آهن‌رباهای مرسوم میزان گشتاور دندانه‌ای را به میزان چشمگیری کاهش می‌دهد.

موتورهای شار محوری مغناطیس دائم با آهن‌ربا سطحی و بدون هسته استاتور دارای راندمان بیشتر و طول محوری کمتری نسبت به موتورهای با هسته استاتور هستند. در [۶] موتور شار محوری مغناطیس دائم دو رتور و یک استاتور با رتور نوع اسپوک و بخش رتور سینوسی ارائه شده است. موتور ارائه شده دارای آهن‌ربا داخلی، بخش رتور اسپوک و فاصله هوایی متغیر است که باعث سینوسی شدن شکل موج back EMF می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش میزان چگالی شار فاصله هوایی، موتور معرفی‌شده دارای چگالی توان و چگالی گشتاور بیشتری نسبت به موتورهای مرسوم با آهن‌ربا سطحی است.

در [۷] با استفاده از مدار معادل مغناطیسی بهبودیافته ژنراتور سنکرون یک ژنراتور شار محوری مغناطیس دائم بدون هسته دو رتور و یک استاتور بااتصال مستقیم به‌منظور استفاده در توربین بادی طراحی شده است. در مدار معادل معرفی شده اشباع رتور نیز در نظر گرفته می‌شود. از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات (MPSO) برای بهینه سازی ژنراتور استفاده شده است. اهداف طراحی حداقل سازی هزینه مواد مورداستفاده در ژنراتور و حداکثر سازی بازده انرژی سالیانه است.

در [۸] برای کاهش میزان گشتاور دندانه‌ای موتور از دو روش شیفت آهن‌ربا دائم و آهن‌ربا نامتقارن استفاده‌شده است. نتایج استخراج شده نشان‌دهنده این موضوع است که استفاده همزمان دو روش آهن‌ربا مورب و شیفت آهن‌ربا تأثیر بسزایی در کاهش میزان گشتاور دندانه‌ای دارد. این دو روش بدون اضافه شدن پیچیدگی خاصی در فرآیند ساخت و ایجاد تغییر در ساختار موتور قابل‌اعمال هستند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که طراحی موتور شار محوری مغناطیس دائم با گشتاور دندانه‌ای کوچک و پشته نیرومحرکه مغناطیسی (back EMF) تقریباً سینوسی باوجود ضرایب صحیح شیار بر فاز بر قطب نیز امکان‌پذیر است.

به منظور کنترل سرعت موتورهای الکتریکی ورش‌های متعددی ارائه شده است که یکی از متدوال‌ترین روش‌های، روش DTC است که در مراجع [۱۱-۹] بیان شده است.

در طراحی ماشین‌های الکتریکی، متغیرهای اختیاری وجود دارد که طراح آن‌ها را با توجه به هدف طراحی و تجربه تعیین می‌کند. این متغیرهای اختیاری تأثیر بسزایی بر مشخصه عملکرد و ابعاد ما شین طراحی‌شده دار ند ازاین‌رو در طراحی ماشین های الکتریکی از الگوریتم‌های بهینه سازی ا ستفاده می شود.. به دلیل پیچیدگی و وجود وابستگی بین معادلات حاکم بر طراحی ماشین‌های الکتریکی زمان اجرا برنامه بهینه‌سازی نسبتاً زیاد است. برای کاهش زمان محاسباتی از بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) موازی شده ا ستفاده می شود. PSO دارای سرعت همگرایی نسبتاً بالایی است و از طرفی موازی نوشتن برنامه این امکان را فراهم می‌کند تمام CPUها کامپیوتر استفاده کرد. در این مقاله با ا ستفاده از معادلات اندازه و الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات بهبودیافته IPSO معرفی‌شده الگوریتم طراحی بهینه ماشین AFPMارائه می‌شود. با استفاده از الگوریتم معرفی‌شده موتوری با توان یک کیلووات و سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه (RPM) با استفاده از IPSO ارائه می‌شود.

۲- معادلات اندازه ماشین AFPM

پارامترهای اصلی یک ماشین الکتریکی مانند ابعاد آن را می‌توان با استفاده از معادله توان خروجی به دست آورد. با صرف‌نظر از شار نشتی در ماشین‌های الکتریکی معادله یک به دست می‌آید[۱۲].

$$P_{out} = \eta \frac{m}{T}\int_0^T e_{(t)} i_{(t)} dt = m K_p \eta E_{pk} I_{pk} \quad (۱)$$

که T دوره پریود ا ست که وابسته به فرکانس می‌با شد، η راندمان، m تعداد فازها، $e_{(t)}$ ولتاژ القایی ناشی از فوران فاصله هوایی، $i_{(t)}$ جریان یک‌فاز، K_p ضریب شکل موج توان الکتریکی، E_{pk} حداکثر مقدار Back EMF و I_{pk} حداکثر مقدار جریان یک‌فاز است. مقدار K_p از معادله ۲ قابل‌محاسبه است.

$$K_p = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{e_{(t)} i_{(t)}}{E_{pk} I_{pk}} dt \quad (۲)$$

از طرفی ضریب دیگر بنام ضریب شکل موج جریان نیز تعریف می‌شود که با استفاده از معادله ۳ قابل‌محاسبه است.

$$K_i = \frac{I_{pk}}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (\frac{i_{(t)}}{I_{pk}})^2 dt)}} \quad (۳)$$

که I_{rms} مقدار جریان مؤثر یک‌فاز است.

با فرض اینکه فوران فاصله هوایی و ولتاژ القایی ناشی از آن کاملاً سینوسی باشد، Back EMF برای تمامی ماشین‌های الکتریکی از معادله زیر قابل‌محاسبه است.

$$E_{ph-rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_{ph} B_g A_g f K_w \quad (۴)$$

که E_{ph-rms} ولتاژ مؤثر فاز، K_w ضریب سیم‌پیچی، N_{ph} تعداد دور یک‌فاز، B_g چگالی فوران میانگین فاصله هوایی، A_g سطح مقطع عبور فوران و f فرکانس منبع تغذیه می‌باشد.

به دلیل رفتار غیرخطی آهن مورداستفاده در ماشین‌های الکتریکی، نحوه توزیع سیم‌پیچ‌ها و یا شکل فوران ایجادشده به‌وسیله آهن‌ربا دائم، فوران فاصله هوایی و back EMF از حالت سینوسی خارج‌شده و معادله ۴ دیگر برقرار نیست. با کنار گذاشتن فرضیات معادله ۴ می‌توانیم این معادله را برای تمامی شکل موج‌های فوران و EMF Back بسط داد.

$$E_{pk} = \sqrt{2} E_{ph-rms} \quad (۵)$$

$$B_{gp} = \frac{\pi}{2} B_g \quad (۶)$$

که E_{pk} حداکثر مقدار EMF فاصله هوایی و B_{gp} حداکثر مقدار چگالی فوران فاصله هوایی است. با استفاده از معادله ۲ تا ۶ داریم:

$$E_{pk} = 4 N_{ph} B_{gp} A_g f K_w \quad (۷)$$

سطح مقطع عبوری فوران در ماشین‌های AFPM با استفاده از معادله زیر قابل‌محاسبه است.

$$A_g = \pi(1-\lambda^2)\frac{D_o}{8p} \quad (۸)$$

$$E_{pk} = K_e N_{ph} B_{gp} \frac{f}{p} \pi (1-\lambda^2) D_o^2 \quad (۹)$$

که K_e شامل ضریب سیم‌پیچی و یک ضریب ثابتی، p تعداد جفت قطب ما شین، D_o قطر خارجی ما شین، λ : سبت قطر خارجی به قطر داخلی ماشین الکتریکی است. جریان یک‌فاز ماشین با استفاده از معادله زیر قابل‌محاسبه است.

$$I_{ph} = \frac{A\pi D_{ave}}{2mN_{ph}} \quad (۱۰)$$

$$D_{ave} = D_o \frac{1+\lambda}{2} \quad (۱۱)$$

$$I_{pk} = \frac{A\pi}{2mN_{ph}} D_o \frac{1+\lambda}{2} K_i \quad (۱۲)$$

با استفاده از معادله ۱۲ و ۹ می‌توان معادله اساسی ماشین‌های AFPM را به دست آورد.

$$P_{out} = \eta m E_{pk} I_{pk} K_p \cos(\varphi) \quad (۱۳)$$

$$P_{out} = \frac{\pi}{2}\eta m K_e K_i K_p B_{gp} A \frac{f}{p}(1-\lambda^2)\frac{1+\lambda}{2}\cos(\varphi) D_o^3 \quad (۱۴)$$

پس حال می‌توان با استفاده معادله ۱۳ قطر خارجی ماشین را به محاسبه کرد. پس داریم:

$$D_o = \sqrt{\left(\frac{P_{out}}{\frac{\pi}{2}\eta m K_e K_i K_p B_{gp} A \frac{f}{p}(1-\lambda^2)\frac{1+\lambda}{2}\cos(\varphi)}\right)} \quad (۱۵)$$

Downloaded from jiaeee.com at 21:47 +0330 on Wednesday January 15th 2020

Downloaded from jiaeee.com at 21:47 +0330 on Wednesday January 15th 2020

چگالی توان ماشین نسبت توان خروجی ماشین الکتریکی به حجم اشغال شده به‌وسیله آن است که با استفاده از معادله ۱۶ قابل‌محاسبه است.

$$P_{den} = \frac{P_{out}}{\frac{\pi}{4} D_o^2 L_{tot}} \quad (۱۶)$$

که L_{tot} طول محوری ماشین الکتریکی است که از چهار قسمت تشکیل‌شده است.

$$L_{tot} = L_{cs} + 2L_{cr} + 2W_{cu} + 2g + 2L_{pm} \quad (۱۷)$$

که t_p گام قطب، B_{cs} حداکثر مقدار چگالی فوران در استاتور و K_a نسبت متوسط چگالی فوران به حداکثر مقدار چگالی فوران در فاصله هوایی می‌باشد.

$$t_p = \frac{\pi D_o}{4p}(1+\lambda) \quad (۱۸)$$

$$K_a = \frac{B_g}{B_{gp}} \cong \frac{2}{\pi} \quad (۱۹)$$

با استفاده از معادله ۱۷ الی ۱۹ داریم:

$$L_{cs} = \frac{B_{gp} K_a \pi D_o (1+\lambda)}{8pB_{cs}} \quad (۲۰)$$

به دلیل ساختار دوطرفه، فوران فاصله هوایی از دو سمت وارد استاتور می‌شود، به همین دلیل ضخامت استاتور دو برابر مقدار محاسبه شده در معادله ۱۷ در نظر گرفته می‌شود. حال با روش مشابه می‌توان طول هسته رتور را نیز به دست آورد.

$$2B_{cr}L_{cr}L_i = B_u t_p L_i \rightarrow L_{cr} = \frac{B_u t_p}{2B_{cr}} = \frac{B_u \pi D_o (1+\lambda)}{8pB_{cr}} \quad (۲۱)$$

که B_u نسب چگالی فوران فاصله هوایی به ضریب نشتی است. به دلیل وجود فاصله هوایی بین آهن‌ربا دائم و هسته استاتور تمامی فوران به وجود آمده به‌وسیله آهن‌ربا از هسته استاتور عبور نمی‌کند و یا آن را به‌طور کامل دور نمی‌زند به معنی دیگر، فوران ایجادشده به‌وسیله آهن‌ربا دائم دارای نشتی است. در ماشین‌های بدون شیار این نشتی به دو صورت نشتی زیگزاگ و نشتی آهن‌ربا دائم با رتور اتفاق می‌افتد. این دو نشتی با استفاده از معادله ۲۲ قابل‌محاسبه می‌باشند[۱۳].

$$K_d = \frac{1}{1+(\mu_r \frac{g w_{pm}}{L_{pm}(w_{pm}+2g)})(\frac{2L_{pm}}{\pi \mu_r w_{pm}} \ln(1+\frac{\pi g}{L_{pm}}) + \frac{4L_{pm}}{\pi \mu_r w_{pm}} \ln(1+\frac{\pi g}{t_p - w_{pm}}))} \quad (۲۲)$$

که L_{pm} ضخامت آهن‌ربا، μ_r ضریب نفوذپذیری مغناطیسی آهن‌ربا و w_{pm} عرض متوسط آهن‌ربا است. برای محاسبه طول آهن‌ربا از روش‌های مختلفی استفاده می شود ولی در مقالات متعدد از معادله ۲۱ برای محاسبه ضخامت آهن‌ربا استفاده می‌شود. در این رابطه نسبت عرض آهن‌ربا به گام قطب تقریباً ۰/۵۸ در نظر گرفته‌شده است. به همین عملاً دلیل نمی‌توان نسبت عرض آهن‌ربا به گام قطب را متغیر طراحی قرار دارد.

$$L_{pm} = \frac{\mu_r B_g}{B_r - \frac{B_{gp}}{K_d}} K_c (g + W_{cu}) \quad (۲۳)$$

به‌منظور افزایش دقت الگوریتم طراحی و در نظر گرفتن نسبت عرض آهن‌ربا به گام قطب به‌عنوان یک متغیر طراحی از معادله ۲۴ استفاده می‌شود.

$$L_{pm} = \frac{t_p \log\left(\frac{\frac{e^{\frac{2\pi g}{t_p}} - \frac{16 B_r e^{-\frac{\pi g}{t_p}} \sin(\frac{\pi\alpha}{2})}{B_g \pi^2} + 1}{U_r (e^{\frac{2\pi g}{t_p}} - 1)} + 1}{\frac{e^{\frac{2\pi g}{t_p}} - \frac{16 B_r e^{-\frac{\pi g}{t_p}} \sin(\frac{\pi\alpha}{2})}{B_g \pi^2} + 1}{U_r (e^{\frac{2\pi g}{t_p}} - 1)} - 1} \right)}{2\pi} \quad (۲۴)$$

معادله ۲۴ از معادله معرفی‌شده در مرجع [۱۳] استخراج‌شده است.

به دلیل اینکه قطر داخلی ماشین الکتریکی محدودکننده تعداد سیم‌های قرارگرفته شده در کنار یکدیگر است، طول پیشانی سیم‌پیچ‌ها به قطر داخلی ماشین الکتریکی وابسته است. پس داریم:

$$W_{cu} = \frac{D_o \lambda - \sqrt{(D_o \lambda) - \frac{12}{\pi K_{cu}} N_{ph} A_{cu}}}{2} \quad (۲۵)$$

که A_{cu} سطح مقطع سیم، N_{ph} تعداد دور هر فاز و K_{cu} ضریب پرکنندگی سیم‌پیچ‌ها است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی PSO

طراحی ماشین‌های الکتریکی باهدف حداقل سازی آهن‌ربا مصرفی، یک تابع بهینه سازی چند منظور با پیچیدگی زیاد بین روابط طراحی است. به همین دلیل طراحی ماشین‌های الکتریکی دارای حجم محاسباتی بالایی و درنتیجه مدت‌زمان اجرا زیادی هستند. برای کاهش زمان اجرای برنامه باید از الگوریتم‌های بهینه سازی با سرعت همگرایی بالا و یا باقابلیت نو شته شدن به صورت موازی استفاده کرد. در این مقاله از الگوریتم PSO که به‌صورت موازی نوشته‌شده است بهره می‌گیریم.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیازمند متغیرهای هستند که با تغییر آن‌ها بین بازه‌های تعیین‌شده به پاسخ بهینه دست پیدا کنند. متغیرهای مورداستفاده در این تابع بهینه‌سازی شامل تعداد جفت قطب، ولتاژ ورودی، چگالی جریان، بارگذاری الکتریکی، نسبت قطر خارجی به قطر داخلی، چگالی فوران فاصله هوایی، نسبت عرض آهن‌ربا دائم به گام قطب و طول فاصله هوایی است. فلوچارت PSO مرسوم در شکل ۲ نمایش داده‌شده است. به دلیل وابستگی بین نتایج ذرات و نقاط بهینه محلی و سرا سری در حلقه داخلی الگوریتم PSO، این نوع الگوریتم را نمی‌توان به‌صورت موازی نوشت و اجرا کرد.

با اعمال تغییرات می‌توان این الگوریتم بهینه‌سازی را به‌صورت موازی نوشت و اجرا نمود. فلوچارت الگوریتم IPSO در شکل ۳ نمایش داده‌شده است.

پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی به‌صورت زیر است.

جدول (۱): مشخصات PSO

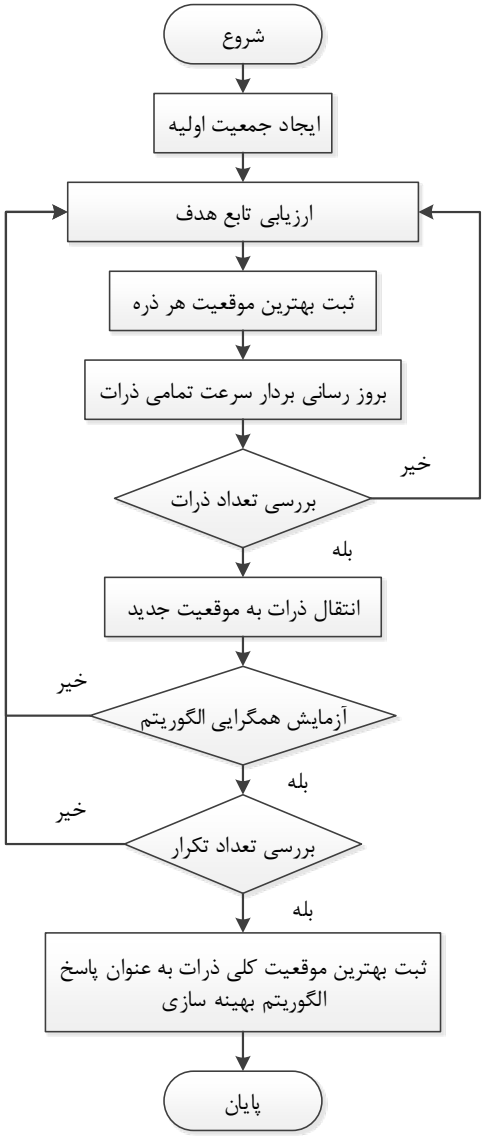
ضریب آموزش شخصی	$C_1 = 1.49$
ضریب آموزش سراسری	$C_2 = 1.49$
تعداد جمعیت	$Npop = 1000$
حداکثر تعداد چرخش	$MaxIt = 30$
حداکثر سرعت ذرات	$VelMax = 0.1(VarMax - Varmin)$
حداقل سرعت ذرات	$VelMin = -0.1(VarMax - Varmin)$

در این مقاله توابع هدف بهینه سازی سینوسی کردن شکل موج Back EMF، حداقل سازی میزان آهنربا مصرفی و حداکثر سازی راندمان می‌باشد. Back EMF سینوسی باعث سینوسی شدن جریان ورودی موتور و کاهش نوسانات گشتاور می‌شود. از آنجایی که قیمت مواد کمیاب مانند کبالت بالا است، کاهش آهنربا دائم مورد استفاده در ماشین باعث کاهش قیمت اولیه می‌شود و طرف دیگر افزایش راندمان منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود.

در طراحی ماشین‌های الکتریکی محدودیت‌های مکانیکی، الکتریکی وجود دارد که باید در فرآیند طراحی به آنها توجه کرد. برخی از این محدودیت مانند حداکثر فضای که ماشین می‌تواند اشغال کند، دمای سیم‌پیچ‌ها، حداکثر ولتاژ ورودی، حداکثر فرکانس و ... می‌باشد. در راستایی برآورده کردن محدودیت‌های موجود جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۲): محدودیت‌های طراحی ماشین

قطر داخلی ماشین (mm)	$D_O < 300$
نسبت قطر داخلی به قطر خارجی	$0.4 < \lambda < 0.75$
ضخامت یوغ رتور و استاتور (mm)	L_{cs} , $L_{cr} < 30$
طول فاصله هوایی (mm)	$g < 20$
حداکثر چگالی شار رتور و استاتور (Tesla)	B_{cs} , $B_{cr} < 1.5$
چگالی پسماند آهن‌ربا دائم (Tesla)	$B_r = 1.3$
حداکثر ولتاژ ماشین (Volt)	$V_L < 220$
حداکثر جریان ماشین (Amper)	$I_{ph} < 3$
چگالی شار فاصله هوایی (Tesla)	$B_g < 0.4$
بارگذاری الکتریکی ()	$A < 30000$
توان خروجی ماشین (Wat)	$P_{out} = 1000$
حداکثر تعداد قطب (Pole)	$P < 6$
حداقل راندمان	$\eta > 0.9$
تعداد فاز	$m = 3$
دمای سیم پیچی ماشین (Centigrade)	$T_{coil} = 80$



شکل (۲): فلوچارت PSO مرسوم[۱۴]

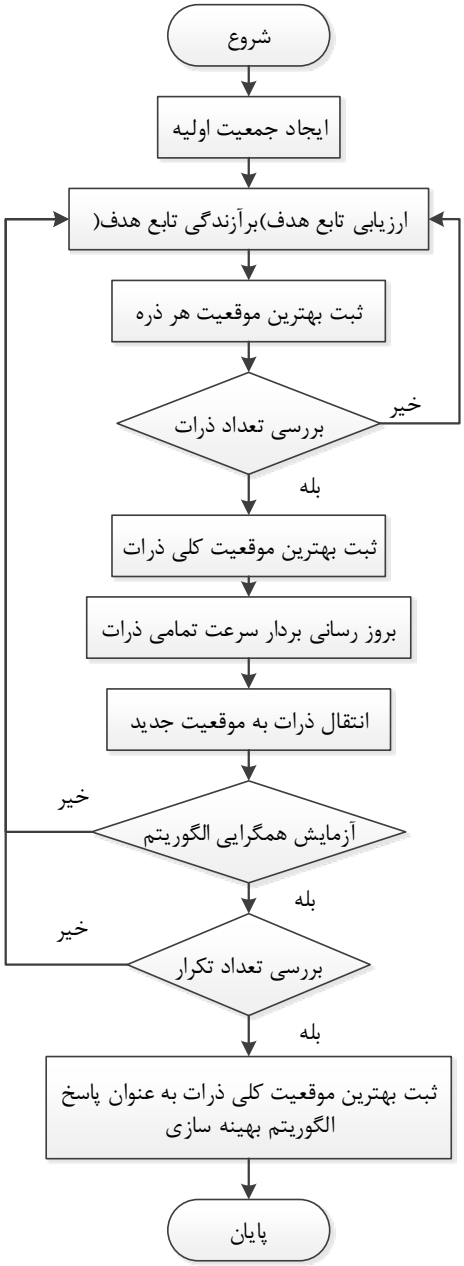
۴- نتایج تجزیه‌وتحلیل نرم‌افزار اجزاء محدود (FEA)

با استفاده از معادلات اندازه ماشین‌های الکتریکی TROUS و الگوریتم IPSO، می‌توان پارامترهای ماشین الکتریکی موردنظر را باهدف حداقل سازی آهن‌ربا مصرفی و ایجاد Back EMF تقریباً سینوسی به دست آورد. طراحی انجام‌شده به کمک روش اجزاء محدود اعتبار سنجی شده.

تغییرات مدت‌زمان اجرا و پاسخ الگوریتم طراحی بهینه که با تلفیق معادلات اندازه ماشین های الکتریکی TROUS و الگوریتم IPSO به‌دست‌آمده است نسبت به تغییر تعداد جمعیت الگوریتم IPSO وابسته است که در شکل ۴ و ۵ نمایش داده‌شده است.

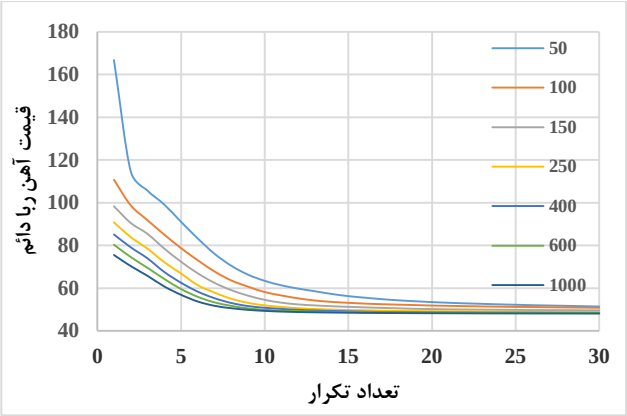
Downloaded from jiaeee.com at 21:47 +0330 on Wednesday January 15th 2020

Downloaded from jiaeee.com at 21:47 +0330 on Wednesday January 15th 2020



شکل (۳): فلوچارت IPSO

با توجه به شکل ۴ و ۵ با افزایش تعداد ذارت PSO پاسخ نهایی بهبود پیدا می‌کند ولی از طرف دیگر مدت‌زمان اجرا برنامه نیز افزایش خواهد دا شت. متغیرهای اختیاری و پارامترهای به‌دست‌آمده به‌و سیله الگوریتم طراحی در جدول ۴ آورده شده است.



شکل (۴): تغییرات مقدار تابع بهینه‌سازی نسبت به تغییرات جمعیت IPSO

شکل (۵): تغییرات زمان اجرا برنامه نسبت به تغییرات جمعیت PSO

جدول (۳): مشخصات ماشین طراحی‌شده

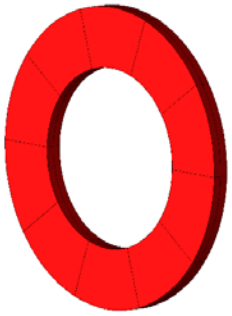
P	$V_L(V)$	$J_s(I/mm^2)$	A
۵	۱۹۵/۲۳	۶	۲۶۷۲۰
$D_o(mm)$	$L_{cs}(mm)$	$L_{cr}(mm)$	$L_{pm}(mm)$
۱۵۹/۲۸	۹/۹۲	۵/۸۳	۲/۹۵
λ	α	$B_g(T)$	g(mm)
۰/۷	۰/۶۹	۰/۳۵	۱/۰۱
N_{ph}	$W_{cu}(mm)$	n	$P_{den}(w/mm^2)$
۱۰۰۱	۳/۳۶	۰/۹۳	۱/۳۸۳۱

جدول (۴): ویژگی عملکردی ماشین طراحی‌شده

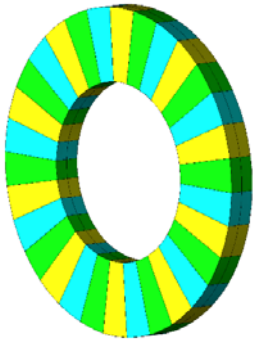
	B_g	B_{gp}	$B_{p,stator}$	$B_{p,rotor}$	B_u
تحلیلی	۰/۳۵	۰/۵۰۷	۱/۵	۱/۵	۰/۴۱۲
	P_{fe}	I_{ph}	cos(φ)	η	
تحلیلی	۶/۷۲۶	۱/۸۴۵	۰/۹۸	۰/۹۳	

با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی IPSO، معادلات اندازه و تابع هدف مورد نظر، ما شین طراحی می شود ک نتایج آن در جدول ۳ و ۴ نمایش داده شده است.

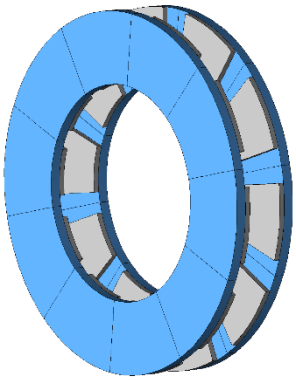
با ا ستفاده از پارامترهای به‌د ست‌آمده می‌توان موتور AFPM را در محیط نرم‌افزار های اجزاء محدود موردبررســـی قرارداد و میزان د قت الگوریتم طراحی بهینه ارائه شده را تعیین کرد.



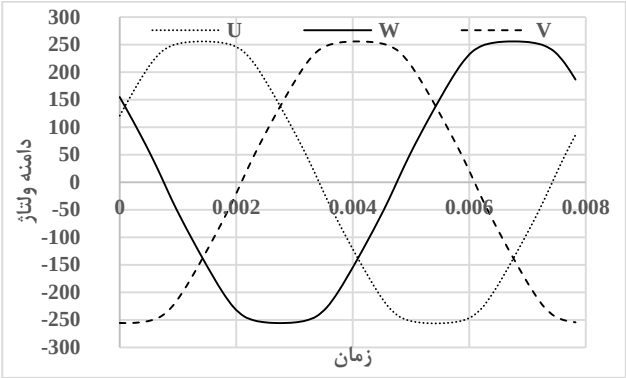
شکل (۶): هسته استاتور موتور شار محوری مغناطیس دائم



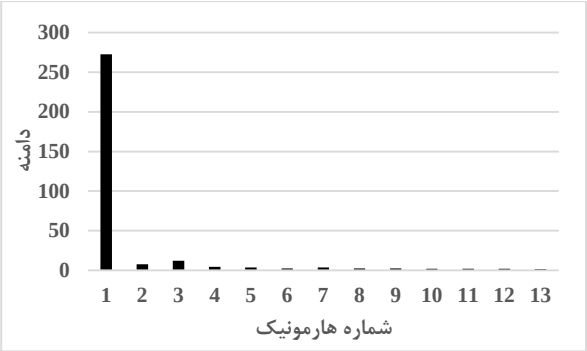
شکل (۷): سیم پیچی موتور شار محوری مغناطیس دائم



شکل (۸): هسته رتور و آهن‌ربا موتور شار محوری مغناطیس دائم



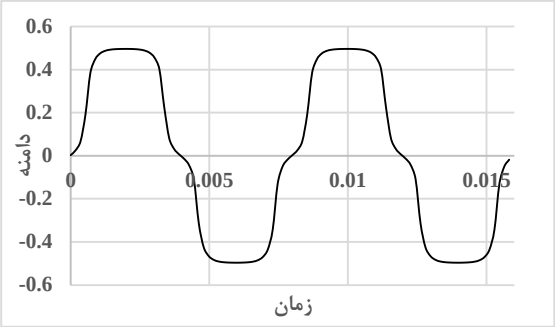
شکل (۹): ولتاژ القاء شده در سیم‌پیچ‌ها در حالت بی‌باری



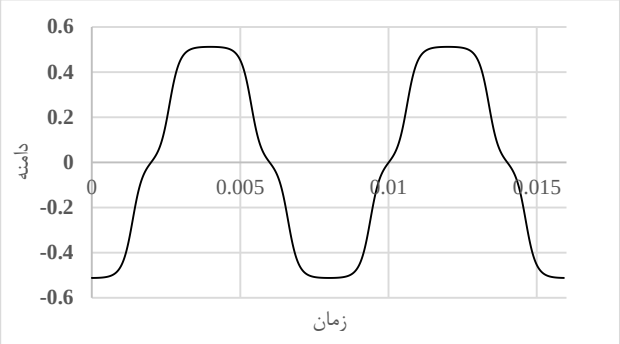
نمودار (۱): دامنه هارمونیک‌ها Back EMF

با توجه به شــکل ۹ و نمودار ۱ شــکل موج back EMF به مقدار سینوسی خالص بسیار نزدیک است و این شکل موج دارای ۰/۹۲۸۹ در صد توزیع هارمونیکی[۲](THD) ا ست. به دلیل اینکه شکل ۹ و نمودار ۱ از تحلیل اجزاء محدود حاصل شـده‌اند و این روش یک روش عددی اســت و دقت آن به پارامترهای بســیار زیادی وابســته اســت. به دلیل خطای اندکی که در محاسبات عددی روش اجزاء محدود وجود دارد در نمودار ۱ هارمونیک‌های زوج نیز دیده می‌شوند.

توزیع فوران مغناطیس به‌د ست‌آمده در فا صله هوایی با ا ستفاده از شبیه سازی اجزاء محدود و الگوریتم طراحی بهینه در شکل ۱۰ و ۱۱ نمایش داده‌شده است.



شکل (۱۰): چگالی فوران فاصله هوایی به‌دست‌آمده از الگوریتم طراحی بهینه

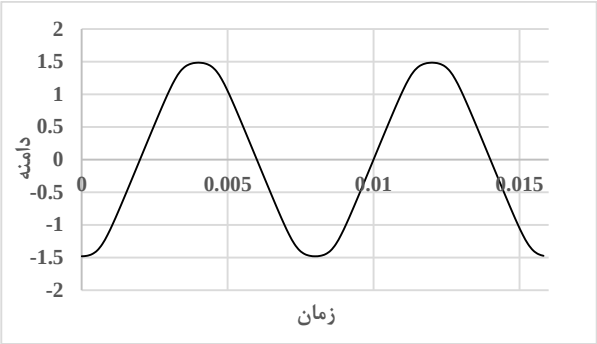


شکل (۱۱): چگالی فوران به‌دست‌آمده درروش اجزاء محدود

شــکل ۱۰ از معادله معرفی در مرجع [۱۰] و شــکل ۱۱ از تحلیل روش اجزاء محدود حاصل شده است.

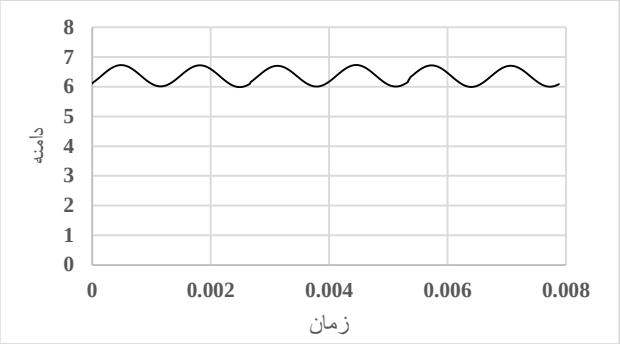
Downloaded from jiaeee.com at 21:47 +0330 on Wednesday January 15th 2020

با مقایســه شــکل ۱۰ و ۱۱ می‌توان گفت الگوریتم طراحی بهینه دقت قابل قبولی دارد. چگالی فوران مغناطیسی فاصله‌ای هوای دارای THD در حدود ۹/۳۲ اســت که این امر باعث دور شــدن شــکل موج back EMF از حالت سینو سی خالص می شود در صورتی‌که Back EMF ناشــی از همین چگالی فوران دارای THD در حدود۰/۹۲۸۹ اســت که این عدد در حد ایده‌آل اســت. این کاهش THD در Back EMF به دلیل توزیع سیم‌پیچ‌ها در فضای ۶۰ درجه الکتریکی ا ستاتور اســت. بنابراین می‌توان گفت که توزیع سـیم‌پیچ‌ها در فضـایی اسـتاتور باعث نزدیک شدن Back EMF به حالت سینوسی خالص می‌شود اما نمی‌توان میزان توزیع سیم‌پیچ بیش از ۶۰ قرارداد.

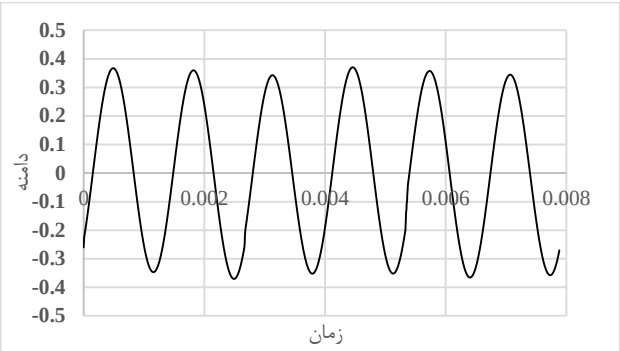


شکل(۱۲): توزیع چگالی فوران در هسته استاتور

چگالی فوران هسته ا ستاتور مانند Back EMF دارای شکل موج تقریباً ســینوســی اســت. بنابراین به دلیل وجود Back EMF تقریباً ســینوســی و عدم وجود شــیار در اســتاتور انتظار می‌رود که موتور طراحی شده دارای نو سانات گشتاور کوچکی با شد. شکل ۱۳ و ۱۴ به ترتیب گشتاور و نوسانات گشتاور خروجی موتور است.



شکل (۱۳): گشتاور خروجی



شکل (۲۴): نوسانات گشتاور خروجی

در جدول ۴ مقادیر به‌د ست‌آمده به روش تحلیلی و اجزاء محدود با یکدیگر مقایســه شــده‌اند که این جدول نشــان‌دهنده دقت الگوریتم طراحی بهینه است.

جدول (۲): مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از روابط تحلیل با روش اجزاء محدود

	B_g	B_{gp}	$B_{p,stator}$	$B_{p,rotor}$	B_u
تحلیلی	۰/۳۵	۰/۵۰۷	۱/۵	۱/۵	۰/۴۱۲
اجزاء محدود	۰/۳۴۳	۰/۴۷۹	۱/۴۷۹	۱/۴۹۲	۰/۴۳۲
	P_{fe}	I_{ph}	$\cos(\varphi)$	η	
تحلیلی	۶/۷۲۶	۱/۸۴۵	۰/۹۸	۰/۹۳	
اجزاء محدود	۶/۶۳۹	۱/۷۵۴	۰/۹۶	۰/۹۳	

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی بهینه یک موتور AFPM با اســتفاده از معادلات اندازه و الگوریتم IPSO ارائه شــده اســت. تابع هدف بهینه‌ســازی، به دســت آوردن Back EMF تقریباً ســینوســی و حداقل ســازی ابعاد آهن‌ربای دائم مصرفی است. کاهش هزینه اولیه ساخت موتور AFPM تا حد زیادی به وزن آهن‌ربای دائم م صرفی وابسته ا ست. برای کاهش ز مان م حاســبات طراحی بهینه موتور AFPM از الگوریتم IPSO اســتفاده‌شــده اســت. الگوریتم IPSO معرفی‌شــده را برخلاف الگوریتم PSO مرســوم می‌توان به‌صــورت موازی نوشــت و اجرا کرد. به همین دلیل با افزایش تعداد واحد CPU سرعت اجرای الگوریتم طراحی بهینه معرفی‌شده به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند.

با استفاده از الگوریتم طراحی بهینه موتور AFPM معرفی‌شده، موتوری با توان ۱ کیلووات و با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه طراحی شده ا ست. صــحت نتایج به‌دســت‌آمده با اســتفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود اعتبار سنجی شده است. نتایج به‌دست‌آمده دقت بالای الگوریتم طراحی بهینه پیشنهادشده را تائید کرده است.

In this paper, the optimum design of an AFPM motor has been presented using sizing equations and IPSO algorithm. The objective function of optimization is to obtain almost sinusoidal Back EMF and minimizing dimensions of used permanent magnet. The reduction of initial cost of AFPM Motor construction is greatly dependent on the weight of used permanent magnet. The IPSO algorithm has been used to reduce the computation time of AFPM Motor optimization design. It is possible to write the introduced IPSO algorithm in parallel and implement unlike conventional PSO algorithm. For this reason, by increasing the number of CPU units the speed of introduced optimal design algorithm implementation is linearly increases.

Downloaded from jiaeee.com at 21:47 +0330 on Wednesday January 15th 2020

By using introduced optimal design algorithm of AFPM motor, a motor with power of 1 kW and speed of 1500 rpm has been designed. The accuracy of the obtained results has been validated using Finite Element software. The obtained results have been confirmed the high accuracy of the proposed optimal design algorithm.

مراجع

[1] Cao, R., C. Mi, and M. Cheng, Quantitative comparison of flux-switching permanent-magnet motors with interior permanent magnet motor for EV, HEV, and PHEV applications. IEEE Transactions on magnetics, 2012. 48(8): p. 2374-2384.

[2] Mahmoudi, A., et al ,Design, analysis, and prototyping of an axial-flux permanent magnet motor based on genetic algorithm and finite-element analysis. IEEE Transactions on Magnetics, 2013. 49(4): p. 1479-1492.

[3] Mahmoudi, A., et al., Improvement to performance of solid-rotor-ringed line-start axial-flux permanent-magnet motor. Progress In Electromagnetics Research, 2012. 124: p. 383-404.

[4] Ajily, E., K. Abbaszadeh, and M. Ardebili, Three-dimensional field reconstruction method for modeling axial flux permanent magnet machines. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015. 30(1): p. 199-207.

[5] Aydin, M. and M. Gulec, Reduction of cogging torque in double-rotor axial-flux permanent-magnet disk motors: A review of cost-effective magnet-skewing techniques with experimental verification. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014. 61(9): p. 5025-5034.

[6] Aydin, M. and M. Gulec, A new coreless axial flux interior permanent magnet synchronous motor with sinusoidal rotor segments. IEEE Transactions on Magnetics, 2016. 52(7) :p. 1-4.

[7] Daghigh, A., H. Javadi, and H. Torkaman, Design optimization of direct-coupled ironless axial flux permanent magnet synchronous wind generator with low cost and high annual energy yield. IEEE Transactions on Magnetics, 2016. 52(9): p. 1-11.

[8] Gulec, M. and M. Aydin, Magnet asymmetry in reduction of cogging torque for integer slot axial flux permanent magnet motors. IET Electric Power Applications, 2014. 8(5): p. 189-198.

[۹] عرب مارکده, غ و م. صدوق, کنترل مستقیم گشتاور و ضریب توان یک موتور القایی با خطی سازی ورودی-خروجی با استفاده از مبدل ماتریسی. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران, ۱۳۹۰. ۸(۱): صفحه ۳۹-۳۱.

[۱۰] مویدی راد, ح، م.ع. شمسی نژاد و م. فرشاد, بهبود عملکرد درایو کنترل سرعت موتور القایی در محدوده ی سرعت های پایین و بالا با جبران ساز شار روتور. مهندسی برق و الکترونیک ایران نشریه ۱۳۹۱. ۹(۲): صفحه ۵۹-۶۴.

[۱۱] مویدی راد, ح، م. فرشاد و م.ع. شمسی نژاد, مقاوم سازی و بهبود عملکرد درایو موتور القایی در قبال تغییرات شایع پارامترهای موتور در حین کار با استفاده از کنترل کننده ی هوشمند مبتنی بر یادگیری عاطفی. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران, ۱۳۹۶. ۱۲(۱): صفحه ۱۱۸-۱۰۳.

[12] Huang, S., et al., A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998. 34(1) : p. 92-97.

[13] Parviainen, A., Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines. Acta Universitatis Lappeenrantaensis, 2005.

[14] Jin'no, K. and T. Shindo. Analysis of dynamical characteristic of canonical deterministic PSO. in Evolutionary Computation (CEC), 2010 IEEE Congress on. 2010. IEEE.

[1] Permanent Magnet
[2] Axial Flux
[3] Radial Flux
[4] Axial Flux Permanent Magnet
[5] Axial Flux Internal Rotor
[6] Multi Particle Swarm Optimization
[7] Electromotive force
[8] Particle Swarm Optimization
[9] Particle Swarm Optimization
[10] Improve Particle Swarm Optimization
[11] Rotational Per Minutes
[12] Total Harmonic Distortion

Downloaded from jiaeee.com at 21:47 +0330 on Wednesday January 15th 2020