

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

حمید محمد حسین^۱ میلاد نظامی وطن دوست^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 نرم افزار اجزاء محدود طراحی بهینه یک موتور AF (Axial Flux) بدون شیار ارائه می شود. الگوریتم بهینه سازی IPSO به دلیل اجرای موازی مدت زمان اجرای الگوریتم طراحی موتور را کاهش می دهد. این کاهش با تعداد CPU های متناسب است. هدف بهینه سازی دستیابی به Back EMF (Electromotive force) تقریباً سینوسی، حداقل سازی وزن آهن ربا و حداکثر سازی بازده است. به منظور محاسبه دقیق ضخامت آهن ربا دائم معادله جدید ارائه شده است. در گام اول پارامترهای بهینه سازی طراحی مانند تعداد قطب، فاصله هوایی، بارگذاری الکتریکی و ... به وسیله IPSO مشخص شده تا بدین صورت اهداف طراحی ارضاء شود. موتور طراحی شده به وسیله معادلات اندازه و IPSO، به کمک روش اجزاء محدود مورد ارزیابی قرار می گیرد تا صحت نتایج به دست آمده تأیید شود.

کلمات کلیدی: موتور AFPM، IPSO، بهینه سازی، آهن ربا دائم و روش اجزاء محدود

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حمید رادمنش

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - خیابان شمشیری - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری - دانشکده‌ی مهندسی برق

۱- مقدمه

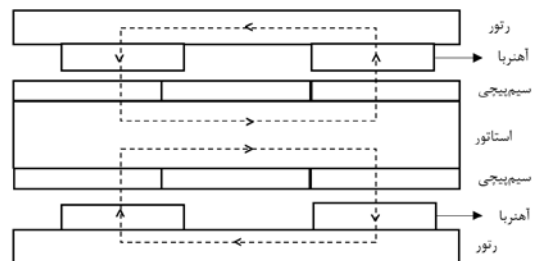
مدل سازی ولتاژ کاهش یافته نیز از روش محاسبه شار نشستی استفاده می شود. با توجه به نوع ساختار ماشین های شار محوری مغناطیس دائم در تحلیل به روش اجزاء محدود باید از مدل سه بعدی استفاده شود. روش بازسازی میدان سه بعدی دارای دقت بالای همانند تحلیل به روش اجزاء محدود است و حجم محاسباتی بسیار کمتری دارد که باعث افزایش سرعت پاسخ دهی و سهولت در انجام بهینه سازی می شود. در [۵] به منظور حداقل سازی گشتاور دندانه ای موتور شار محوری مغناطیس دائم چندین روش مورب کردن آهنربا دائم ارائه شده است. میزان کاهش گشتاور دندانه ای نسبت به تغییرات میزان مورب بودن آهنربا دائم و هندسه آهنربا بررسی شده است. با توجه به بررسی نتایج به دست آمده، استفاده از آهنربا دائم مورب شده نسبت به آهنرباهای مرسوم میزان گشتاور دندانه ای را به میزان چشمگیری کاهش می دهد.

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 می شود. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با افزایش میزان چگالی شار فاصله هوایی، موتور معرفی شده دارای چگالی توان و چگالی گشتاور بیشتری نسبت به موتورهای مرسوم با آهنربا سطحی است.

در [۷] با استفاده از مدار معادل مغناطیسی بهبود یافته ژنراتور سنکرون یک ژنراتور شار محوری مغناطیس دائم بدون هسته دو رتور و یک استاتور با اتصال مستقیم به منظور استفاده در توربین بادی طراحی شده است. در مدار معادل معرفی شده اشباع رتور نیز در نظر گرفته می شود. از الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ازدحام ذرات (MPSO) برای بهینه سازی ژنراتور استفاده شده است. اهداف طراحی حداقل سازی هزینه مواد مورد استفاده در ژنراتور و حداکثر سازی بازده انرژی سالیانه است.

در [۸] برای کاهش میزان گشتاور دندانه ای موتور از دو روش شیفت آهنربا دائم و آهنربا نامتقارن استفاده شده است. نتایج استخراج شده نشان دهنده این موضوع است که استفاده همزمان دو روش آهنربا مورب و شیفت آهنربا تأثیر بسزایی در کاهش میزان گشتاور دندانه ای دارد. این دو روش بدون اضافه شدن پیچیدگی خاصی در فرآیند ساخت و ایجاد تغییر در ساختار موتور قابل اعمال هستند. همچنین نتایج نشان می دهند که طراحی موتور شار محوری مغناطیس دائم با گشتاور دندانه ای کوچک و پشته نیرو محرکه مغناطیسی (back EMF) تقریباً سینوسی با وجود ضرایب صحیح شیار بر فاز بر قطب نیز امکان پذیر است.

علاقه مندان 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 به طور مستقیم بر قیمت تمام شده موتورهای PM تأثیرگذار است، باعث استفاده بیش از پیش این نوع موتورها در کاربردهای مختلف شده است [۲]. موتورهای PM از نظر جهت حرکت شار فاصله هوایی به دو دسته شار محوری (AF) و شار (RF) شعاعی تقسیم بندی می شوند. ساختار موتورهای آهنربای دائم (AFPM) به دلیل حرکت محوری شار فاصله هوایی، به صورت دیسکی است که این نوع ساختار باعث به وجود آمدن ویژگی های برجسته ای همچون چگالی گشتاور بالا، راندمان عالی و تخت بودن ساختار موتور می شود. از طرف دیگر ماشین های AFPM از لحاظ تعداد رتور و استاتور و نحوه ساخت استاتور نیز دارای تنوع می باشند. از جمله ساختارهای استاتور می توان به شیاردار، بدون شیار و بدون هسته اشاره کرد. تنوع ساختار در موتورهای AFPM باعث ایجاد تنوع عملکردی و کاربردی نیز شده است. از جمله تفاوت عملکردی این نوع موتورها می توان 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 می شود [۳]. به دلیل پیچیده بودن فرآیند ساخت، استفاده بهینه از سیم پیچ ها و هسته استاتور، موتورهای AFPM با ساختار تک استاتور و دو رتور گسترش بیشتری پیدا کرده اند. در ماشین ها شار محوری شار عبوری بین استاتور و رتور در راستای محور جابجا می گردد حال آنکه این مورد در ماشین های 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، سیم پیچ ها و هسته استاتور شده، سپس قسمتی از محیط هسته استاتور را بصورت شعاعی پیموده و مجدد مسیر هسته استاتور، سیم پیچ ها و فاصله هوایی را به صورت محوری طی می کند و وارد قطب مخالف آهنربا دائم می شود. 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 سه بعدی برای مدل سازی ماشین های شار محوری مغناطیس دائم استفاده می شود. برای



$$E_{ph-rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_{ph} B_g A_g f K_w \quad (4)$$

که تعداد 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 مورد استفاده در ماشین‌های الکتریکی، نحوه توزیع سیم‌پیچ‌ها و یا شکل فوران ایجاد شده به وسیله آهن‌ربا دائم، فوران فاصله هوایی و back EMF از حالت سینوسی خارج شده 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.

$$E_{pk} = \sqrt{2} E_{ph-rms} \quad (5)$$

$$B_{gp} = \frac{\pi}{2} B_g \quad (6)$$

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:

$$E_{pk} = 4 N_{ph} B_{gp} A_g f K_w \quad (7)$$

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

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

$$E_{pk} = K_e N_{ph} B_{gp} \frac{f}{p} \pi (1 - \lambda^2) D_o^2 \quad (9)$$

که K_e شامل ضریب سیم‌پیچی و یک ضریب ثابتی، p تعداد جفت قطب ماشین، D_o قطر خارجی ماشین، λ نسبت قطر خارجی به قطر داخلی ماشین الکتریکی است. جریان یک‌فاز ماشین با استفاده از معادله زیر قابل محاسبه است.

$$I_{ph} = \frac{A \pi D_{ave}}{2m N_{ph}} \quad (10)$$

$$D_{ave} = D_o \frac{1 + \lambda}{2} \quad (11)$$

$$I_{pk} = \frac{A \pi}{2m N_{ph}} D_o \frac{1 + \lambda}{2} K_i \quad (12)$$

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

$$P_{out} = \eta m E_{pk} I_{pk} K_p \cos(\varphi) \quad (13)$$

$$P_{out} = \frac{\pi}{2} \eta m K_e K_i K_p B_{gp} A \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) \frac{1 + \lambda}{2} \cos(\varphi) D_o^3 \quad (14)$$

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

$$D_o = \sqrt{\left(\frac{P_{out}}{\frac{\pi}{2} \eta m K_e K_i K_p B_{gp} A \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) \frac{1 + \lambda}{2} \cos(\varphi)} \right)} \quad (15)$$

به منظور کنترل سرعت موتورهای الکتریکی ورش‌های متعددی ارائه شده است که یکی از متداول‌ترین روش‌های، روش DTC است که در مراجع [۹-۱۱] 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 ماشین طراحی شده دارند از این‌رو در طراحی ماشین‌های الکتریکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. 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 بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) موازی شده استفاده می‌شود. 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 استفاده از معادلات اندازه و الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات بهبودیافته IPSO معرفی شده الگوریتم طراحی بهینه ماشین AFPM ارائه می‌شود. با استفاده از الگوریتم معرفی شده 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 صرف نظر از شار نشتی در ماشین‌های الکتریکی معادله یک به دست می‌آید [۱۲].

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

که T دوره پریود است که وابسته به فرکانس می‌باشد، 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 قابل محاسبه است.

$$K_p = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{e_{(t)} i_{(t)}}{E_{pk} I_{pk}} dt \quad (2)$$

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

$$K_i = \frac{I_{pk}}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{i_{(t)}}{I_{pk}} \right)^2 dt}} \quad (3)$$

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 قابل محاسبه است.

$$L_{pm} = \frac{\mu_r B_g}{B_r - \frac{B_{gp}}{K_d}} K_c (g + W_{cu}) \quad (23)$$

به منظور افزایش دقت الگوریتم طراحی و در نظر گرفتن نسبت عرض آهن ربا به گام قطب به عنوان یک متغیر طراحی از معادله ۲۴ استفاده می شود.

$$L_{pm} = \frac{t_p \log \left(\frac{e^{\frac{2\pi}{t_p} - \frac{16B_r e^{-\frac{2\pi}{t_p}} \sin(\frac{\pi\alpha}{2})}}{B_r \pi^2} + 1}{U_r (e^{\frac{2\pi}{t_p}} - 1)} \right)}{2\pi} \quad (24)$$

معادله ۲۴ از معادله معرفی شده در مرجع [۱۳] استخراج شده است.

به دلیل اینکه قطر داخلی ماشین الکتریکی محدودکننده تعداد سیم های قرار گرفته شده در کنار یکدیگر است، طول پیشانی سیم پیچ ها به قطر داخلی ماشین الکتریکی وابسته است. پس داریم:

$$W_{cu} = \frac{D_o \lambda - \sqrt{(D_o \lambda)^2 - \frac{12}{\pi K_{cu}} N_{ph} A_{cu}}}{2} \quad (25)$$

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

۳- الگوریتم بهینه سازی PSO

طراحی ماشین های الکتریکی باهدف حداقل سازی آهن ربا مصرفی، یک تابع بهینه سازی چند منظور با پیچیدگی زیاد بین روابط طراحی است. به همین دلیل طراحی ماشین های الکتریکی دارای حجم محاسباتی بالایی و در نتیجه مدت زمان اجرا زیادی هستند. برای کاهش زمان اجرای برنامه باید از الگوریتم های بهینه سازی با سرعت همگرایی بالا و یا با قابلیت نوشته شدن به صورت موازی استفاده کرد. در این مقاله از الگوریتم PSO که به صورت موازی نوشته شده است بهره می گیریم.

الگوریتم های بهینه سازی نیازمند متغیرهای هستند که با تغییر آن ها بین بازه های تعیین شده به پاسخ بهینه دست پیدا کنند. متغیرهای مورد استفاده در این تابع بهینه سازی شامل تعداد جفت قطب، ولتاژ ورودی، چگالی جریان، بارگذاری الکتریکی، نسبت قطر خارجی به قطر داخلی، چگالی فوران فاصله هوایی، نسبت عرض آهن ربا دائم به گام قطب و طول فاصله هوایی است. فلوچارت PSO مرسوم در شکل ۲ نمایش داده شده است. به دلیل وابستگی بین نتایج ذرات و نقاط بهینه محلی و سرا سری در حلقه داخلی الگوریتم PSO، این نوع الگوریتم را نمی توان به صورت موازی نوشت و اجرا کرد.

چگالی توان ماشین نسبت توان خروجی ماشین الکتریکی به حجم اشغال شده به وسیله آن است که با استفاده از معادله ۱۶ قابل محاسبه است.

$$P_{den} = \frac{P_{out}}{\frac{\pi}{4} D_o^2 L_{tot}} \quad (16)$$

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

$$L_{tot} = L_{cs} + 2L_{cr} + 2W_{cu} + 2g + 2L_{pm} \quad (17)$$

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 می باشد.

$$t_p = \frac{\pi D_o}{4p} (1 + \lambda) \quad (18)$$

$$K_a = \frac{B_g}{B_{gp}} \cong \frac{2}{\pi} \quad (19)$$

با استفاده از معادله ۱۷ الی ۱۹ داریم:

$$L_{cs} = \frac{B_{gp} K_a \pi D_o (1 + \lambda)}{8p B_{cs}} \quad (20)$$

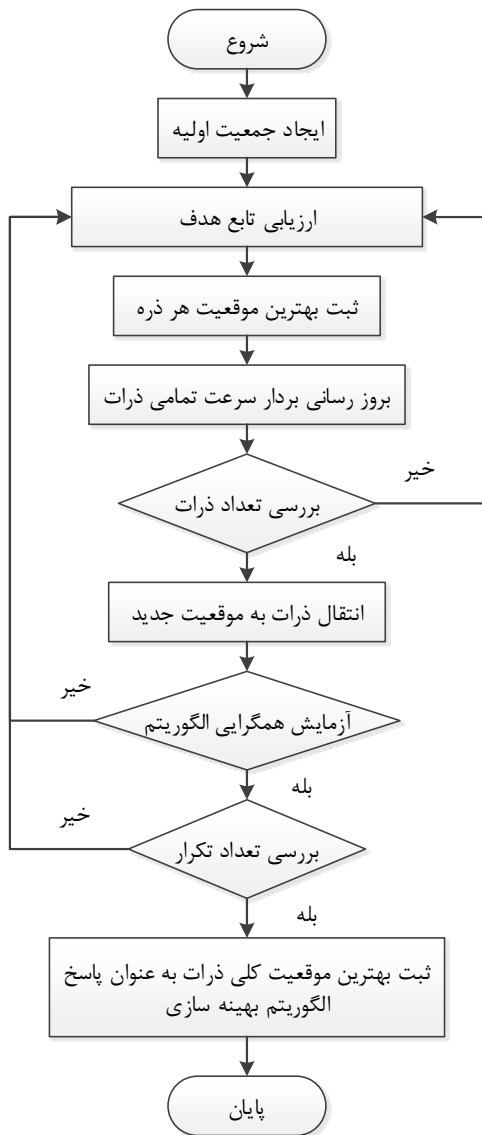
به دلیل ساختار دوطرفه، فوران فاصله هوایی از دو سمت وارد استاتور می شود، به همین دلیل ضخامت استاتور دو برابر مقدار محاسبه شده در معادله ۱۷ در نظر گرفته می شود. حال با روش مشابه می توان طول هسته رتور را نیز به دست آورد.

$$2B_{cr} L_{cr} L_i = B_u t_p L_i \rightarrow L_{cr} = \frac{B_u t_p}{2B_{cr}} = \frac{B_u \pi D_o (1 + \lambda)}{8p B_{cr}} \quad (21)$$

که B_u نسب چگالی فوران فاصله هوایی به ضریب نشتی است. به دلیل وجود فاصله هوایی بین آهن ربا دائم و هسته استاتور تمامی فوران به وجود آمده به وسیله آهن ربا از هسته استاتور عبور نمی کند و یا آن را به طور کامل دور نمی زند به معنی دیگر، فوران ایجاد شده به وسیله آهن ربا دائم دارای نشتی است. در ماشین های بدون شیار این نشتی به دو صورت نشتی زیگزاگ و نشتی آهن ربا دائم با رتور اتفاق می افتد. این دو نشتی با استفاده از معادله ۲۲ قابل محاسبه می باشند [۱۳].

$$K_d = \frac{1}{1 + (\mu_r \frac{g W_{pm}}{L_{pm} (W_{pm} + 2g)}) (\frac{2L_{pm}}{\pi \mu_r W_{pm}} \ln(1 + \frac{\pi g}{L_{pm}}) + \frac{4L_{pm}}{\pi \mu_r W_{pm}} \ln(1 + \frac{\pi g}{t_p - W_{pm}}))} \quad (22)$$

که L_{pm} ضخامت آهن ربا، μ_r ضریب نفوذپذیری مغناطیسی آهن ربا و W_{pm} عرض متوسط آهن ربا است. برای محاسبه طول آهن ربا از روش های مختلفی استفاده می شود ولی در مقالات متعدد از معادله ۲۱ برای محاسبه ضخامت آهن ربا استفاده می شود. در این رابطه نسبت عرض آهن ربا به گام قطب تقریباً ۰/۵۸ در نظر گرفته شده است. به همین عملاً دلیل نمی توان نسبت عرض آهن ربا به گام قطب را متغیر طراحی قرار داد.



شکل (۲): فلوجارت PSO مرسوم [۱۴]

۴- نتایج تجزیه و تحلیل نرم افزار اجزاء محدود (FEA)

با استفاده از معادلات اندازه ماشین های الکتریکی TROUS و الگوریتم IPSO، می توان پارامترهای ماشین الکتریکی مورد نظر را با هدف حداقل سازی آهنربا مصرفی و ایجاد Back EMF تقریباً سینوسی به دست آورد. طراحی انجام شده به کمک روش اجزاء محدود اعتبار سنجی شده. تغییرات مدت زمان اجرا و پاسخ الگوریتم طراحی بهینه که با تلفیق معادلات اندازه ماشین های الکتریکی TROUS و الگوریتم IPSO به دست آمده است نسبت به تغییر تعداد جمعیت الگوریتم IPSO وابسته است که در شکل ۴ و ۵ نمایش داده شده است.

با اعمال تغییرات می توان این الگوریتم بهینه سازی را به صورت موازی نوشت و اجرا نمود. فلوجارت الگوریتم IPSO در شکل ۳ نمایش داده شده است.

پارامترهای الگوریتم بهینه سازی به صورت زیر است.

جدول (۱): مشخصات PSO

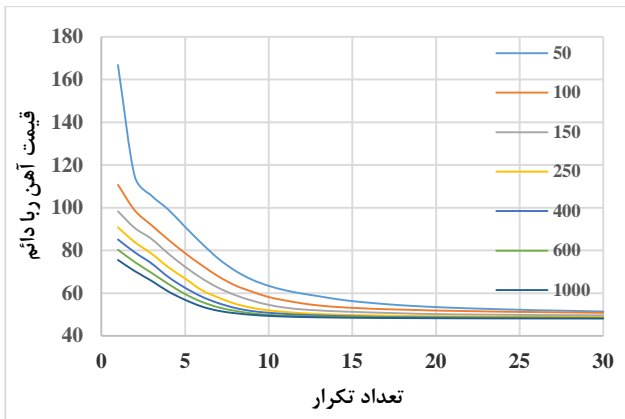
$C_1 = 1.49$	ضریب آموزش شخصی
$C_2 = 1.49$	ضریب آموزش سراسری
Npop = 1000	تعداد جمعیت
MaxIt = 30	حداکثر تعداد چرخش
$VelMax = 0.1(VarMax - Varmin)$	حداکثر سرعت ذرات
$VelMin = -0.1(VarMax - Varmin)$	حداقل سرعت ذرات

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

در طراحی ماشین های الکتریکی محدودیت های مکانیکی، الکتریکی وجود دارد که باید در فرآیند طراحی به آنها توجه کرد. برخی از این محدودیت مانند حداکثر فضای که ماشین می تواند اشغال کند، دمای سیم پیچ ها، حداکثر ولتاژ ورودی، حداکثر فرکانس و ... می باشد. در راستایی برآورده کردن محدودیت های موجود جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۲): محدودیت های طراحی ماشین

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



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



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

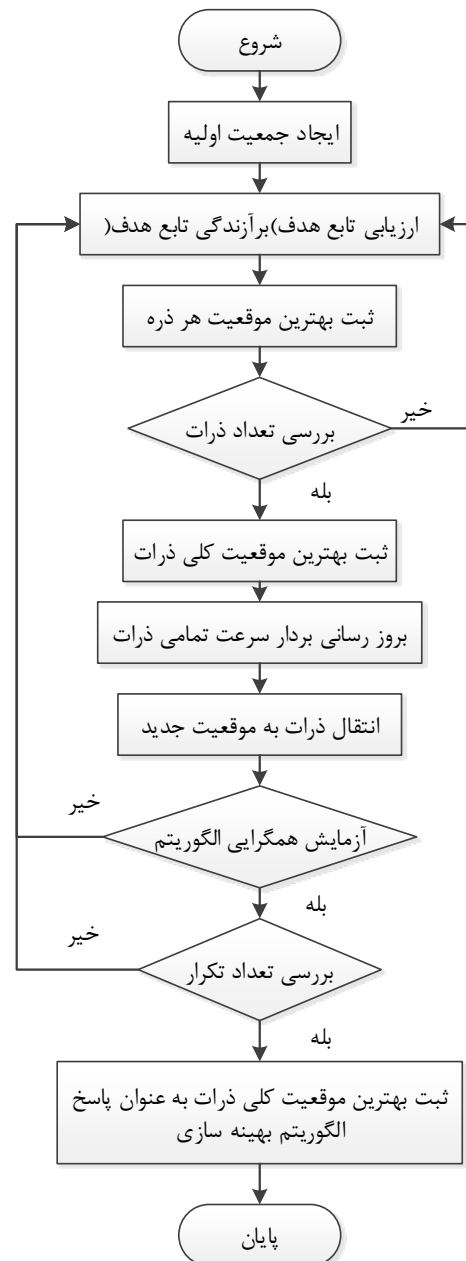
جدول (۳): مشخصات ماشین طراحی شده

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 طراحی شده

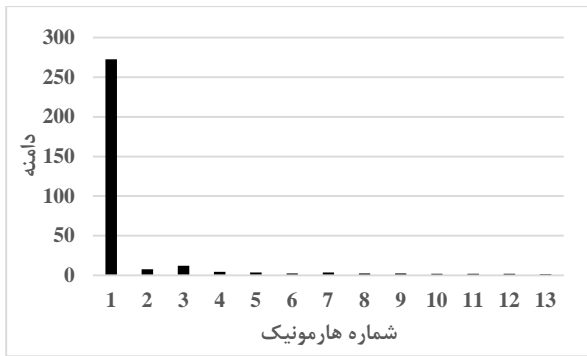
B_g	B_{gp}	$B_{p, stator}$	$B_{p, rotor}$	B_u
تحلیلی	۰/۳۵	۰/۵۰۷	۱/۵	۰/۴۱۲
P_{fe}	I_{ph}	$\cos(\varphi)$	η	
تحلیلی	۶/۷۲۶	۱/۸۴۵	۰/۹۸	۰/۹۳

با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی IPSO، معادلات اندازه و تابع هدف مورد نظر، ماشین طراحی می‌شود که نتایج آن در جدول ۳ و ۴ نمایش داده شده است.



شکل (۳): فلوچارت IPSO

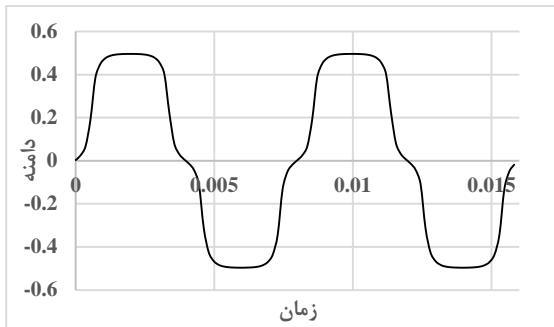
با توجه به شکل ۴ و ۵ با افزایش تعداد ذرات PSO پاسخ نهایی بهبود پیدا می‌کند ولی از طرف دیگر مدت‌زمان اجرا برنامه نیز افزایش خواهد داشت. متغیرهای اختیاری و پارامترهای به دست آمده به وسیله الگوریتم طراحی در جدول ۴ آورده شده است.



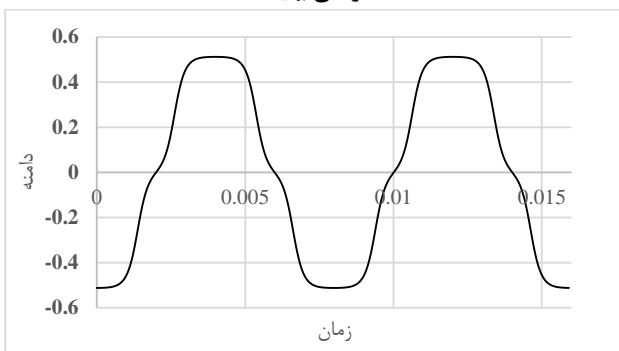
نمودار (۱): دامنه هارمونیک‌ها Back EMF

با توجه به شکل ۹ و نمودار ۱ شکل موج Back EMF به مقدار سینوسی خالص بسیار نزدیک است و این شکل موج دارای 0.9289 در صد توزیع هارمونیک (THD) است. به دلیل اینکه شکل ۹ و نمودار ۱ از تحلیل اجزاء محدود حاصل شده‌اند و این روش یک روش عددی است و دقت آن به پارامترهای بسیار زیادی وابسته است. به دلیل خطای اندکی که در محاسبات عددی روش اجزاء محدود وجود دارد در نمودار ۱ هارمونیک‌های زوج نیز دیده می‌شوند.

توزیع فوران مغناطیس به دست آمده در فاصله هوایی با استفاده از شبیه سازی اجزاء محدود و الگوریتم طراحی بهینه در شکل ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده است.



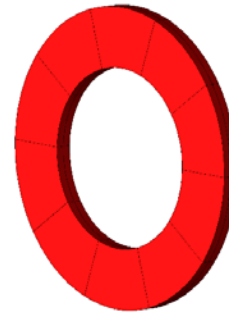
شکل (۱۰): چگالی فوران فاصله هوایی به دست آمده از الگوریتم طراحی بهینه



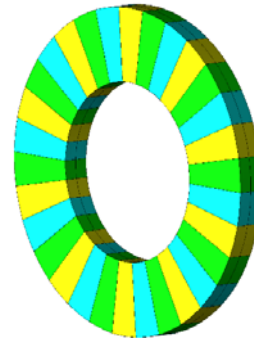
شکل (۱۱): چگالی فوران به دست آمده در روش اجزاء محدود

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

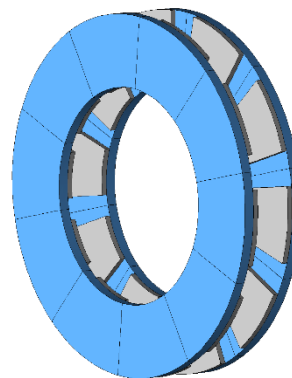
با استفاده از پارامترهای به دست آمده می‌توان موتور AFPM را در محیط نرم افزارهای اجزاء محدود مورد بررسی قرار داد و میزان دقت الگوریتم طراحی بهینه ارائه شده را تعیین کرد.



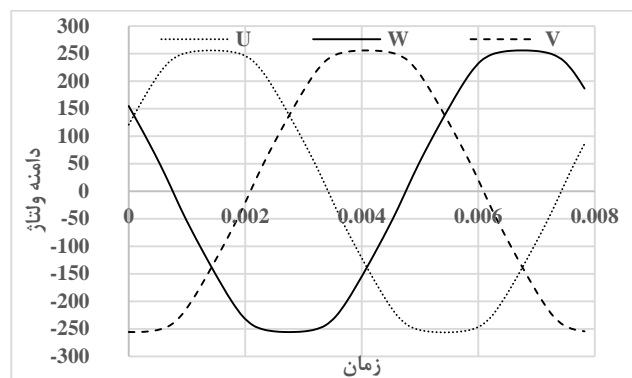
شکل (۶): هسته استاتور موتور شار محوری مغناطیس دائم



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



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



شکل (۹): ولتاژ القاء شده در سیم پیچها در حالت بی باری

در جدول ۴ مقادیر به دست آمده به روش تحلیلی و اجزاء محدود با یکدیگر مقایسه شده‌اند که این جدول نشان دهنده دقت الگوریتم طراحی بهینه است.

جدول (۲): مقایسه نتایج به دست آمده با استفاده از روابط تحلیلی با روش اجزاء محدود

	روش اجزاء محدود				
	B_g	B_{gp}	$B_{p, \text{stator}}$	$B_{p, \text{rotor}}$	B_u
تحلیلی	۰/۳۵	۰/۵۰۷	۱/۵	۱/۵	۰/۴۱۲
اجزاء محدود	۰/۳۴۲	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	

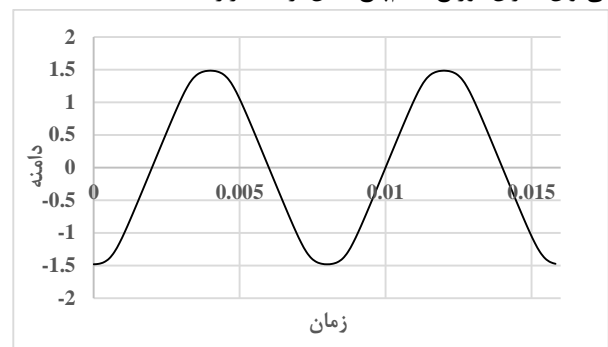
۵- نتیجه گیری

در این مقاله طراحی بهینه یک موتور AFPM با استفاده از معادلات اندازه و الگوریتم IPSO ارائه شده است. تابع هدف بهینه‌سازی، به دست آوردن Back EMF تقریباً سینوسی و حداقل سازی ابعاد آهن‌ربای دائم مصرفی است. کاهش هزینه اولیه ساخت موتور AFPM تا حد زیادی به وزن آهن‌ربای دائم مصرفی وابسته است. برای کاهش زمان محاسبات طراحی بهینه موتور AFPM از الگوریتم IPSO استفاده شده است. الگوریتم IPSO معرفی شده را برخلاف الگوریتم PSO مرسوم می‌توان به صورت موازی نوشت و اجرا کرد. به همین دلیل با افزایش تعداد واحد CPU سرعت اجرای الگوریتم طراحی بهینه معرفی شده به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند.

با استفاده از الگوریتم طراحی بهینه موتور AFPM معرفی شده، موتوری با توان ۱ کیلووات و با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه طراحی شده است. صحت نتایج به دست آمده با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود اعتبار سنجی شده است. نتایج به دست آمده دقت بالای الگوریتم طراحی بهینه پیشنهاد شده را تأیید کرده است.

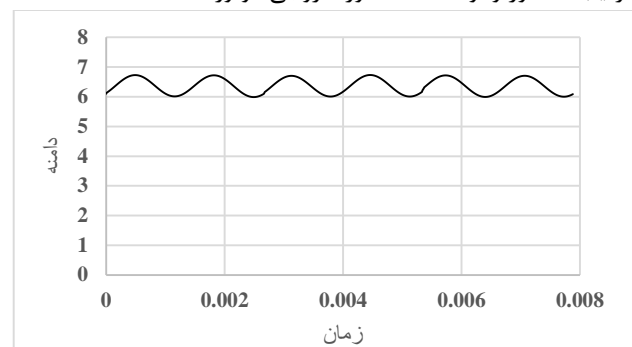
In this paper, the optimum design of an AFPM motor has been presented using sizing equations and IPSO algorithm. The objective function of optimization is to obtain almost sinusoidal Back EMF and minimizing dimensions of used permanent magnet. The reduction of initial cost of AFPM Motor construction 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.

با مقایسه شکل ۱۰ و ۱۱ می‌توان گفت الگوریتم طراحی بهینه دقت قابل قبولی دارد. چگالی فوران مغناطیسی فاصله‌ای هوای دارای THD در حدود ۹/۳۲ است که این امر باعث دور شدن شکل موج Back EMF از حالت سینوسی خالص می‌شود در صورتی که Back EMF ناشی از همین چگالی فوران دارای THD در حدود ۰/۹۲۸۹ است که این عدد در حد ایده‌آل است. این کاهش THD در Back EMF به دلیل توزیع سیم‌پیچ‌ها در فضای ۶۰ درجه الکتریکی استاتور است. بنابراین می‌توان گفت که توزیع سیم‌پیچ‌ها در فضایی استاتور باعث نزدیک شدن Back EMF به حالت سینوسی خالص می‌شود اما نمی‌توان میزان توزیع سیم‌پیچ بیش از ۶۰ قرارداد.

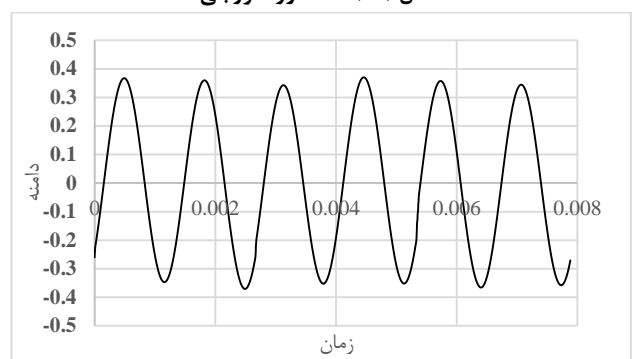


شکل (۱۲): توزیع چگالی فوران در هسته استاتور

چگالی فوران هسته استاتور مانند Back EMF دارای شکل موج تقریباً سینوسی است. بنابراین به دلیل وجود Back EMF تقریباً سینوسی و عدم وجود شیار در استاتور انتظار می‌رود که موتور طراحی شده دارای نوسانات گشتاور کوچکی باشد. شکل ۱۳ و ۱۴ به ترتیب گشتاور و نوسانات گشتاور خروجی موتور است.



شکل (۱۳): گشتاور خروجی



شکل (۱۴): نوسانات گشتاور خروجی

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 مدل 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.

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

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