

طراحی بهبودیافته ماشین سنکرون مغناطیس دایم شارمحوری با استفاده از الگوریتم PSO

محمدرضا علیزاده پهلوانی، یوسف شهبازی آیت و ابوالفضل واحدی

K_r : ضریب تصحیح چگالی شار مغناطیسی در سطح استاتور
 K_w : ضریب سیم‌پیچی
 L_{cr} : ضخامت هسته روتور
 L_{cs} : ضخامت هسته استاتور
 L_g : فاصله سطح آهن‌رباها تا سطح استاتور
 L_{pm} : ضخامت آهن‌ربا
 L_r : ضخامت روتور
 L_s : ضخامت استاتور
 L_t : طول کلی ماشین
 n : مرتبه هارمونیک
 n_s : سرعت ماشین بر حسب دور بر ثانیه
 N_{ph} : تعداد دوره‌های سری هر فاز
 P_{out} : توان خروجی نامی ماشین
 P_{den} : چگالی توان خروجی ماشین
 p : تعداد جفت قطب
 R_o : شعاع خارجی ماشین
 R_i : شعاع داخلی ماشین
 v_i' : سرعت حرکت ذره در مرحله قبلی در الگوریتم PSO
 v_i^{t+1} : سرعت حرکت ذره در مرحله فعلی در الگوریتم PSO
 V_m : پتانسیل مغناطیسی اسکالر
 w : ضریب اینرسی
 W_{cu} : پیش‌آمدگی سیم‌پیچی در راستای محوری
 x : محور مختصات
 x_g^{best} : بهترین موقعیت تجربه‌شده تمام ذرات در الگوریتم PSO
 x_i^{best} : بهترین موقعیت تجربه‌شده ذره در الگوریتم PSO
 x_i^t : موقعیت ذره در مرحله قبلی الگوریتم PSO
 x_i^{t+1} : موقعیت ذره در مرحله فعلی الگوریتم PSO
 z : محور مختصات
 α_p : نسبت قوس قطب به گام قطب
 σ : چگالی بارهای مغناطیسی فرضی در سطح آهن‌ربا
 λ : نسبت قطر داخلی به قطر خارجی
 τ_p : گام قطب
 μ_o : ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در فضای آزاد
 μ_r : ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی

چکیده: این مقاله یک طراحی بهبودیافته از ماشین سنکرون مغناطیس دایم شارمحوری (AFPM) را با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) ارائه می‌دهد که در آن محدودیت‌های عملی لحاظ شده است. ابتدا روابط طراحی ارائه شده و یک نمونه ماشین AFPM با توان ۲۰ کیلووات طراحی شده و سپس با استفاده از الگوریتم PSO چگالی توان خروجی بهبود یافته است. مقایسه‌ای میان ماشین بهبودیافته و یک نمونه ساخته‌شده صورت گرفته است. ماشین بهبودیافته دارای چگالی توان بیشتری نسبت به نمونه موجود ساخته‌شده می‌باشد. در ادامه تحقیق با استفاده از روش‌های تحلیلی بر اساس معادلات ماکسول چگالی شار مغناطیسی در ناحیه فاصله هوایی محاسبه شده که نتایج تحلیلی توافق بسیار خوبی با نتایج ناشی از نرم‌افزار المان محدود دارد و می‌توان با استفاده از این روش، چگالی شار مغناطیسی و نیروی محرکه القایی ماشین الکتریکی را در زمان بسیار کمتری نسبت به نرم‌افزار المان محدود محاسبه نمود.

کلیدواژه: طراحی بهبودیافته، ماشین مغناطیس دایم، ماشین شارمحور TORUS-NS.

فهرست علایم و اختصارات

A_m : بارگذاری الکتریکی ماشین در شعاع متوسط
 B_{ang} : چگالی شار مغناطیسی متوسط در فاصله هوایی
 B_{cr} : چگالی شار مغناطیسی هسته روتور
 B_{cs} : چگالی شار مغناطیسی هسته استاتور
 B_r : چگالی شار مغناطیسی باقی‌مانده آهن‌ربا
 B_u : چگالی شار مغناطیسی قابل دسترس در سطح آهن‌ربا
 c_1 : ضریب یادگیری خودی در الگوریتم PSO
 c_2 : ضریب یادگیری کلی در الگوریتم PSO
 D_g : قطر متوسط ماشین
 D_i : قطر داخلی ماشین
 D_o : قطر خارجی ماشین
 D_t : قطر کلی ماشین
 f : فرکانس کاری ماشین
 g : طول فاصله هوایی
 J_s : چگالی جریان الکتریکی
 K_{cu} : ضریب پرتشنگی مس

این مقاله در تاریخ ۳۰ شهریور ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۱۰ خرداد ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

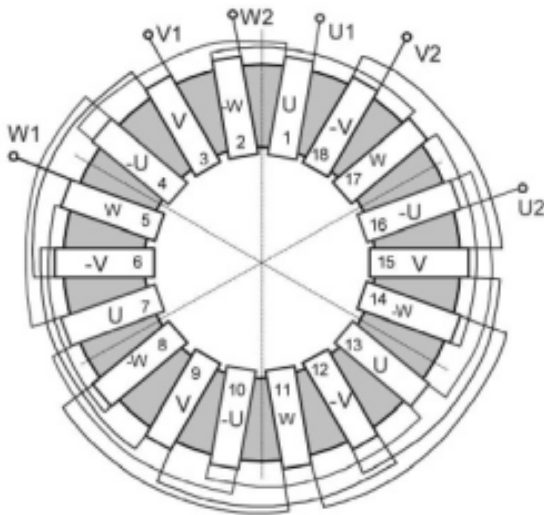
محمدرضا علیزاده پهلوانی، مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، (email: mr_alizadehp@iust.ac.ir).

یوسف شهبازی آیت، مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، (email: yusef.shahbazi@gmail.com).

ابوالفضل واحدی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، (email: avahedi@iust.ac.ir).

۱- مقدمه

ماشین‌های AFPM به عنوان ماشین‌هایی با چگالی توان بالا شناخته شده‌اند که دارای ساختار متنوعی می‌باشند [۱] و [۲]. یکی از انواع ساختارهای ماشین شارمحوری، نوع استاتور میانی بدون شیار می‌باشد که از دو دیسک روتور و یک هسته استاتور واقع در بین آن دو تشکیل شده



شکل ۳: سیم‌پیچی تروئیدی هسته استاتور بدون شیار [۴].

حجم کلی ماشین AFPM به صورت (۲) می‌باشد

$$V_{tot} = \frac{\pi}{4} D_i^2 L_t \quad (2)$$

چگالی توان ماشین به صورت نسبت توان خروجی به حجم کلی ماشین تعریف می‌شود و به صورت (۳) قابل بیان می‌باشد

$$P_{den} = \frac{P_{out}}{V_{tot}} \quad (3)$$

در طراحی ماشین AFPM با مشخص‌بودن توان خروجی ماشین و با انتخاب مناسب پارامترهای مختلف در (۱)، قطر خارجی ماشین تعیین می‌شود. قطر کلی ماشین به صورت زیر قابل محاسبه است

$$D_i = D_o + 2W_{cu} \quad (4)$$

برآمدگی سیم‌پیچی در راستای شعاعی از (۵) قابل محاسبه است

$$W_{cu} = \frac{D_i - \sqrt{D_i^2 - \frac{2A_m D_g}{K_{cu} J_s}}}{2} \quad (5)$$

قطر متوسط ماشین به صورت رابطه زیر می‌باشد

$$D_g = \frac{D_o + D_i}{2} \quad (6)$$

طول کلی ماشین هم از مجموع ضخامت‌های روتور و استاتور و فاصله میان دو روتور و استاتور تشکیل شده که به صورت رابطه زیر می‌باشد

$$L_t = L_s + 2L_r + 2g \quad (7)$$

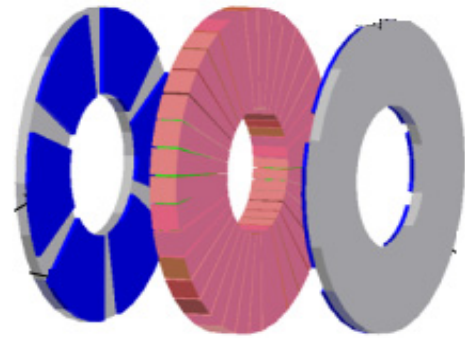
ضخامت استاتور از (۸) و ضخامت هسته استاتور از (۹) قابل محاسبه می‌باشند

$$L_s = L_{cs} + 2W_{cu} \quad (8)$$

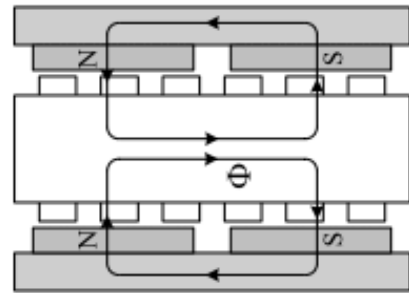
$$L_{cs} = \frac{B_{avg} \pi D_o (1 + \lambda)}{4 p B_{cs}} \quad (9)$$

چگالی شار مغناطیسی هسته استاتور با توجه به فرکانس کاری ماشین می‌تواند از (۱۰) محاسبه شود [۸]

$$B_{cs} = \begin{cases} 5.7 \cdot f^{-0.7} [T] & f > 40 [Hz] \\ 1.7 - 1.8 [T] & f \leq 40 [Hz] \end{cases} \quad (10)$$



شکل ۱: ماشین AFPM با ساختار استاتور میانی بدون شیار [۴].



شکل ۲: مسیر شار مغناطیسی در ماشین AFPM با ساختار استاتور میانی بدون شیار [۴].

است. شکل ۱ ساختار مربوط به این ساختار را نشان می‌دهد و در شکل ۲ نیز مسیر عبور شارهای مغناطیسی ناشی از آهن‌رباهای دائم دیسک روتور نشان داده شده است. این ساختار دارای مزایایی از جمله چگالی توان بالا و نویز صوتی کم نسبت به دیگر ساختارهای ماشین‌های شارمحور می‌باشد [۳].

سیم‌پیچی ماشین AFPM با ساختار استاتور میانی بدون شیار به صورت تروئیدی می‌باشد که یک نمونه از این نوع سیم‌پیچی در شکل ۳ ارائه شده است [۴].

از جمله روش‌های بهینه‌سازی ماشین‌های الکتریکی استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک می‌باشد که محققین از آن بهره جسته‌اند که در آنها به محدودیت‌های عملی اشاره نشده است [۵] تا [۷]. در نتیجه نتایج ناشی از آنها ممکن است از نظر عملی مقدور نباشد.

در این مقاله معادلات طراحی ماشین AFPM در بخش ۲ ارائه شده است. ملاحظات طراحی و محدودیت‌های عملی در بخش ۳ معرفی شده‌اند. در بخش ۴ الگوریتم PSO معرفی و بهینه‌سازی ماشین انجام شده و نتایج حاصل از طراحی ماشین، قبل و بعد از بهینه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به زمان‌بر بودن پروسه شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود، در بخش ۵ یک روش تحلیلی با استفاده از معادلات ماکسول ارائه شده که به کمک آن چگالی شار مغناطیسی ناشی از آهن‌رباها و نیروی محرکه القایی در ماشین AFPM محاسبه شده است. در بخش ۶ نتایج روش تحلیلی با نتایج ناشی از نرم‌افزار المان محدود مورد مقایسه قرار گرفته است. در نهایت بخش ۷ شامل نتیجه‌گیری می‌باشد.

۲- روابط طراحی در ماشین AFPM

معادله ابعادی برای ماشین AFPM دووجهی به صورت (۱) بیان می‌شود [۸]

$$P_{out} = \eta \frac{\pi^2}{16} K_w n_s B_{avg} A_m \cos \phi (1 - \lambda^2) (1 + \lambda) D_o^2 \quad (1)$$

بارگذاری الکتریکی ویژه و چگالی جریان سیم‌پیچ‌ها بر اساس روش خنک‌کاری و بازده خروجی ماشین در نظر گرفته می‌شوند. فاصله هوایی برای کاهش حجم و مقدار آهن‌رباها و در نتیجه کاهش قیمت ماشین تا حد امکان باید کوچک در نظر گرفته شود. همچنین محدودیت‌های ناشی از تلفات سطح روتور و محدودیت‌های مکانیکی باید لحاظ شود. برای ماشین‌های PM با اندازه کوچک و متوسط، طول فاصله هوایی بین ۱ تا ۲ میلی‌متر لحاظ می‌شود [۹].

علاوه بر محدودیت‌هایی که در طراحی الکترومغناطیسی ماشین AFPM وجود دارد، برخی محدودیت‌های عملی و مکانیکی با توجه به ساختار ماشین باید مورد توجه قرار گیرد.

در سرعت‌های پایین و متوسط ماشین‌های شارمخوری با تعداد جفت قطب زیاد، ضخامت یوغ استاتور اگر بر اساس معادلات الکترومغناطیسی محاسبه شود، ممکن است بسیار نازک شود که در چنین مواردی حداقل ضخامت یوغ استاتور توسط محدودیت‌های مکانیکی و عملی تعیین می‌شود.

در ساختارهای شیاردار، عرض دندانه نیز علاوه بر حد مجاز بارگذاری مغناطیسی به محدودیت‌های ساخت نیز بستگی دارد. برای ماشین‌های AFPM، عرض دندانه در شعاع داخلی استاتور کم است و بنابراین ساختار مناسبی باید انتخاب شود تا عرض دندانه مناسبی در شعاع داخلی استاتور اختیار گردد.

همچنین دیسک روتور باید به اندازه کافی ضخیم باشد تا در برابر نیروی محوری میان روتور و استاتور بدون انحراف بیش از حد مجاز، مقاومت کند.

حداکثر قطر خارجی قاب ماشین نیز با توجه به استانداردهای قاب ماشین محدود می‌شود. بنابراین قطر خارجی هسته استاتور باید محدود باشد و فضایی برای سیم‌پیچی‌های انتهایی در راستای شعاعی در نظر گرفته شود. همچنین فضایی برای ضخامت دیواره قاب در حدود ۱۰ میلی‌متر باید لحاظ شود. همچنین برای داشتن فضای مناسب میان شفت و هسته استاتور برای سیم‌پیچی‌های انتهایی در شعاع داخلی در نظر گرفته شود که این موضوع باعث محدودیت قطر داخلی پشته استاتور می‌گردد [۹].

مقادیر چگالی شار مغناطیسی متوسط، بارگذاری الکتریکی و چگالی جریان می‌تواند با توجه به نوع ساختار ماشین AFPM و نحوه خنک‌سازی آن با استفاده از جدول ۱ تعیین شود [۱].

با استفاده از روابط طراحی ارائه‌شده در بخش ۲ و با لحاظ محدودیت‌های اشاره‌شده در بخش ۳، می‌توان ماشین‌های AFPM را طراحی نمود.

یک نمونه ماشین AFPM در [۱۰] ساخته شده که مشخصات آن مطابق جدول ۲ می‌باشد. استفاده از معادلات بخش ۲ نتایج مشابه با جدول ۲ برای یک ماشین AFPM با توان ۲۰ کیلووات می‌دهد. در ادامه یک طراحی بهبودیافته با استفاده از الگوریتم PSO بر روی ماشین مورد نظر انجام شده است.

۴- طراحی بهبودیافته ماشین AFPM با استفاده از الگوریتم PSO

الگوریتم PSO یک الگوریتم قوی برای بهینه‌سازی می‌باشد که از عملکرد دسته‌جمعی حیوانات مانند پرندگان و ماهی‌ها اقتباس شده است. این الگوریتم یک روش فراابتکاری و مبتنی بر روش تکراری می‌باشد. در الگوریتم PSO هر یک از جواب‌های مسئله به عنوان یک ذره در

جدول ۱: مقادیر معمول برای بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی [۱].

چگالی شار مغناطیسی (ساختار بدون شیار)	B_{avg}	۰٫۵-۰٫۶ [T]
چگالی شار مغناطیسی (ساختار شیاردار)	B_{avg}	۰٫۶۵-۰٫۷۵ [T]
بارگذاری الکتریکی (خنک‌سازی با آب)	A_m	۴۰-۸۰ kA/m
بارگذاری الکتریکی (خنک‌سازی با هوا)	A_m	۱۶-۳۲ kA/m
چگالی جریان (خنک‌سازی با آب)	J_s	۱۰-۱۲ A/mm ^۲
چگالی جریان (خنک‌سازی با هوا)	J_s	۴-۶ A/mm ^۲

ضخامت روتور مجموع ضخامت هسته روتور و ضخامت آهن‌ربا می‌باشد و از (۱۱) قابل محاسبه است

$$L_r = L_{cr} + L_{PM} \quad (11)$$

ضخامت هسته روتور از (۱۲) و ضخامت آهن‌رباهای دایم از (۱۳) قابل محاسبه می‌باشند

$$L_{cr} = \frac{\alpha_p B_u \pi D_o (1 + \lambda)}{\lambda p B_{cr}} \quad (12)$$

$$L_{PM} = \frac{\mu_r B_{avg} \pi D_o}{B_r - B_u} (g + W_{cu}) \quad (13)$$

۳- ملاحظات طراحی و محدودیت‌های عملی

در طراحی ماشین AFPM برخی ملاحظات برای انتخاب پارامترهای طراحی باید لحاظ شود که می‌توان آنها را به دو دسته ملاحظات مربوط به طراحی الکترومغناطیسی و ملاحظات مربوط به محدودیت‌های مکانیکی تقسیم کرد.

به عنوان مثال انتخاب تعداد جفت قطب به سرعت ماشین، ابعاد و فرکانس کاری ماشین وابسته است. معمولاً در سرعت‌های پایین تعداد زیاد قطب‌ها ترجیح داده می‌شود اما برای ماشین‌های AFPM با ابعاد کوچک، استفاده از تعداد قطب زیاد به دلیل محدودیت اندازه، امکان‌پذیر نمی‌باشد.

در طراحی ساختارهای با استاتور شیاردار، در مواردی که ابعاد ماشین کوچک است، عرض دندانه‌ها و شیارها بسیار نازک می‌شوند که موجب عمیق‌تر شدن شیارها می‌گردند. این موضوع باعث افزایش شار نشتی و در نتیجه کاهش گشتاور خروجی می‌شود.

بارگذاری مغناطیسی ویژه در ماشین‌های مغناطیسی دایم به مشخصه‌های مواد آهن‌رباها و چگالی شار مغناطیسی مجاز در دندانه‌های ماشین بستگی دارد. برای کاربردهای با سرعت پایین و متوسط، چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا مقدار مس مورد نیاز و نیز اندازه و ابعاد ماشین کاهش یابد. آهن‌رباهای خاک کمیاب NdFeB بهترین گزینه می‌باشند چرا که دارای چگالی انرژی زیاد و چگالی شار پسماند بالا هستند. مشکلاتی که در مورد این آهن‌رباها مطرح است، هدایت الکتریکی بالا و قیمت بالای آنها می‌باشد.

انواع مواد مغناطیسی نرم در هسته‌های استاتور و روتور با توجه به چگالی شار مغناطیسی و فرکانس کاری انتخاب می‌شوند.

جدول ۳: حالت‌های مختلف طراحی ماشین AFPM.

حالت اول	طراحی بدون انجام بهینه‌سازی
حالت دوم	طراحی بهینه با لحاظ محدودیت قطر خارجی
حالت سوم	طراحی بهینه بدون محدودیت قطر خارجی

جدول ۴: قیود در نظر گرفته شده برای پارامترهای مختلف ماشین.

توان خروجی ماشین	P_{out}	۲۰ [kw]
تعداد جفت قطب‌ها	p	۶
چگالی شار باقی‌مانده آهن‌رباها	B_r	۱٫۲ [T]
ضریب نفوذپذیری نسبی آهن‌رباها	μ_r	۱٫۰۵
بارگذاری الکتریکی	A_m	۳۲ kA/m
چگالی جریان	J_s	۷ A/mm ^۲

جدول ۵: حدود متغیرهای بهینه‌سازی.

چگالی شار مغناطیسی متوسط فاصله هوایی	B_{avg}	۰٫۵-۰٫۶ [T]
قوس قطب به گام قطب	α_p	۰٫۵-۰٫۹۵
نسبت قطر داخلی به قطر خارجی	λ	۰٫۲-۰٫۹
طول فاصله هوایی	g	۱-۲ [mm]

جدول ۶: مشخصات ماشین AFPM قبل و بعد از طراحی بهبودیافته.

	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
P_{out}	۲۰ [kw]	۲۰ [kw]	۲۰ [kw]
P_{den}	۳٫۶۴ [w/cm ^۲]	۳٫۹۴ [w/cm ^۲]	۳٫۹۷ [w/cm ^۲]
L_{pm}	۶ [mm]	۶٫۵ [mm]	۵ [mm]
D_o	۳۰۰ [mm]	۳۰۰ [mm]	۳۲۰ [mm]
D_i	۱۵۵ [mm]	۱۴۱ [mm]	۱۵۳ [mm]
α_p	۰٫۸	۰٫۶۶	۰٫۶۲
L_{cr}	۱۰ [mm]	۸٫۵ [mm]	۷ [mm]
L_{cs}	۲۲ [mm]	۱۹ [mm]	۱۶ [mm]
W_{cu}	۷ [mm]	۷٫۶ [mm]	۷٫۴ [mm]
g	۲ [mm]	۱ [mm]	۱ [mm]
L_t	۷۳ [mm]	۶۵ [mm]	۵۷ [mm]

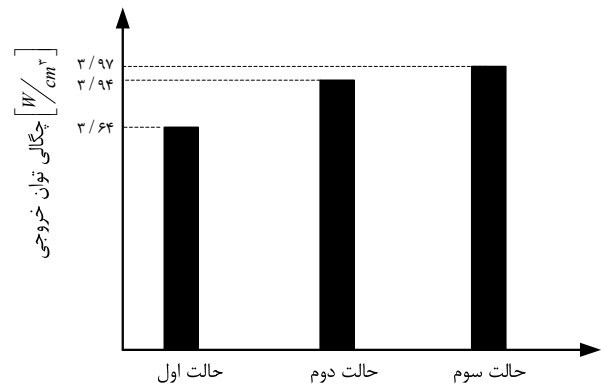
با توجه به متغیرهای بهینه‌سازی و تابع هدف در نظر گرفته شده، تابع ریاضی زیر را می‌توان برای تابع هدف بهینه‌سازی در نظر گرفت

$$F_{obj} = P_{den}(B_{avg}, \lambda, \alpha_p, g, D_o) \quad (۱۶)$$

نتایج ناشی از طراحی بهبودیافته با استفاده از الگوریتم PSO و مقایسه آن با قبل از انجام بهینه‌سازی در جدول ۶ ارائه شده است.

شکل ۴ مقایسه میان چگالی توان ماشین AFPM را در سه حالت مختلف طراحی نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۴ قابل مشاهده است، در حالت سوم یعنی طراحی بهبودیافته برای ماشین AFPM با توان خروجی ۲۰ کیلووات بدون لحاظ محدودیت قطر خارجی بیشترین چگالی توان خروجی حاصل می‌شود و بعد از آن نیز طراحی بهبودیافته با محدودیت قطر خارجی بیشترین چگالی توان را داراست.

در ادامه تحقیق با استفاده از روابط تحلیلی و بر اساس معادلات ماکسول به محاسبه چگالی شار مغناطیسی ناشی از آهن‌رباها در فاصله هوایی و نیروی محرکه القایی ناشی از آن در سیم‌پیچی آرمیچر پرداخته شده است.



شکل ۴: مقایسه میان چگالی توان خروجی ماشین AFPM در سه حالت مختلف ارائه شده در جدول ۵.

جدول ۷: مشخصات مربوط به ماشین AFPM [۱۰].

توان خروجی ماشین	P_{out}	۲۰ [kw]
تعداد جفت قطب‌ها	p	۶
تعداد دور سیم‌پیچی هر کلاف آرمیچر	n_c	۹
جنس آهن‌رباها		NdFeB
شکل آهن‌رباها		دو زنگه‌ای
چگالی شار باقیمانده آهن‌رباها	B_r	۱٫۲ [T]
ضریب نفوذپذیری نسبی آهن‌رباها	μ_r	۱٫۰۵
ضخامت آهن‌ربا	L_{pm}	۶ [mm]
قطر خارجی ماشین	D_o	۳۰۰ [mm]
قطر داخلی ماشین	D_i	۱۵۵ [mm]
قوس قطب به گام قطب	α_p	۰٫۸
ضخامت یوغ روتور	L_{cr}	۱۰ [mm]
ضخامت یوغ استاتور	L_{cs}	۲۲ [mm]
پیش‌آمدگی سیم‌پیچی در راستای محوری	W_{cu}	۷ [mm]
فاصله هوایی	g	۲ [mm]
طول کلی ماشین	L_t	۷۳ [mm]

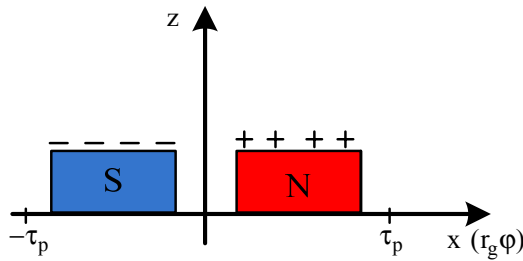
نظر گرفته می‌شود، هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از محدوده متغیرها محاسبه می‌کند و سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که قبلاً در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. پس از انجام حرکت جمعی ذرات، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این پروسه در هر مرحله تکرار می‌شود تا آن که جواب مورد نظر حاصل شود. بر این اساس مقدار مرحله بعد هر ذره، به صورت (۱۴) و سرعت حرکت مرحله فعلی مطابق (۱۵) تعریف می‌شود

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (۱۴)$$

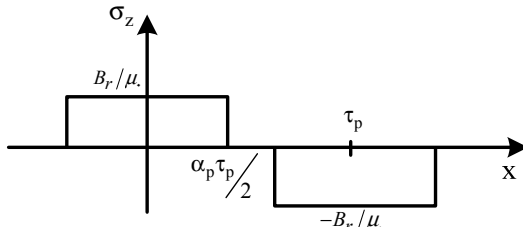
$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1r_1(x_i^{best} - x_i^t) + c_2r_2(x_g^{best} - x_i^t) \quad (۱۵)$$

در این بخش از مقاله، طراحی بهبودیافته ماشین AFPM با استفاده از الگوریتم PSO و با تابع هدف دستیابی به حداکثر چگالی توان خروجی انجام شده است. طراحی بهبودیافته در دو حالت انجام شده که در حالت اول محدودیت قطر خارجی لحاظ شده که برابر ۳۰۰ میلی‌متر و در حالت دوم برای قطر خارجی محدودیتی لحاظ نشده است.

جدول ۳ سه حالتی که مقایسه برای آنها انجام شده را بیان می‌کند. جدول ۴ قیود در نظر گرفته شده برای طراحی بهبودیافته را نشان می‌دهد که این قیود با توجه به نمونه ساخته شده می‌باشد [۱۰]. جدول ۵ حدود متغیرهای در نظر گرفته شده برای طراحی بهبودیافته را نشان می‌دهد.



شکل ۷: توزیع بارهای مغناطیسی فرضی بر روی آهن‌رباها.



شکل ۸: توزیع چگالی بار مغناطیسی آهن‌رباها.

$$\sigma_z(x) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \sigma_n \sin \frac{n\pi\alpha_p}{2} \cos \left(\frac{n\pi}{\tau_p} x \right) \quad (18)$$

$$\sigma_n = \frac{4B_r}{n\pi\mu}$$

با توجه به عدم وجود جریان الکتریکی در محاسبه چگالی شار مغناطیسی بی‌باری، پتانسیل مغناطیسی اسکالر در معادله لاپلاس صدق می‌کند که در حالت دوبعدی و در دستگاه مختصات دکارتی به صورت (۱۹) می‌باشد

$$\frac{\partial^2 V_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_m}{\partial z^2} = 0 \quad (19)$$

در ناحیه (I) و (IV) چون ضریب نفوذپذیری بی‌نهایت فرض شده است برای محدود شدن چگالی شار مغناطیسی، میدان مغناطیسی در این ناحیه صفر می‌باشد. صفر بودن میدان مغناطیسی، یک پتانسیل مغناطیسی اسکالر ثابت را نتیجه می‌دهد. این مقدار ثابت می‌تواند برابر صفر لحاظ شود ($V_{m1} = V_{m4} = 0$). با استفاد از روش جداسازی متغیرها و با توجه به نحوه توزیع چگالی بار مغناطیسی در مسیر محیطی که به صورت تابعی زوج می‌باشد، در ناحیه (II) و (III) جواب کلی معادله لاپلاس به صورت (۲۰) و (۲۱) می‌باشد

$$V_{m2}(x, z) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} A_n \sinh \left(\frac{n\pi}{\tau_p} z \right) \cos \left(\frac{n\pi}{\tau_p} x \right) \quad (20)$$

$$V_{m3}(x, z) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} B_n \sinh \left(\frac{n\pi}{\tau_p} (L_g + L_{pm} - z) \right) \cos \left(\frac{n\pi}{\tau_p} x \right) \quad (21)$$

ضرایب A_n و B_n در روابط بالا می‌توانند با استفاده از شرایط مرزی به دست آیند.

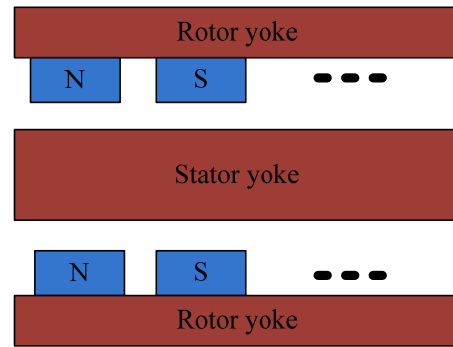
پیوستگی پتانسیل، شرایط مرزی زیر را موجب می‌شود

$$V_{m2}(x, z=0) = V_{m3}(x, z=0) \quad (22)$$

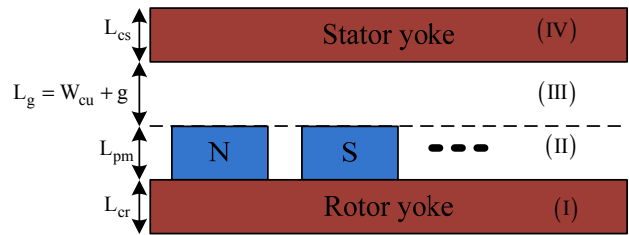
$$V_{m2}(x, z=L_{pm} + L_g) = V_{m3}(x, z=L_{pm} + L_g) \quad (23)$$

$$V_{m2}(x, z=L_{pm}) = V_{m3}(x, z=L_{pm}) \quad (24)$$

در روابط فوق V_{m2} ، V_{m3} ، V_{m1} ، V_{m4} به ترتیب پتانسیل مغناطیسی در نواحی (I)، (II)، (III) و (IV) می‌باشند.



شکل ۵: مدل دوبعدی ماشین در شعاع متوسط ماشین.



شکل ۶: مدل دوبعدی ماشین در شعاع متوسط برای محاسبه چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی.

۵- محاسبه چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی ناشی از آهن‌رباها

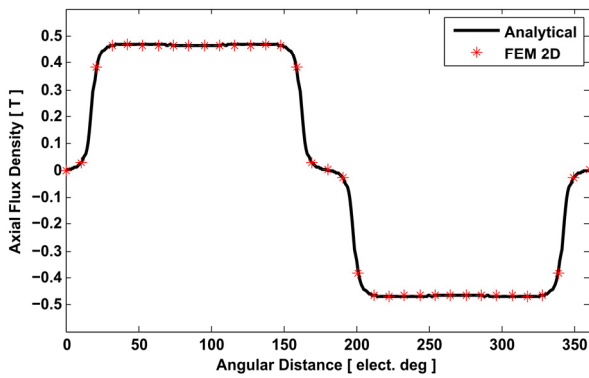
شکل ۵ مدل ماشین در شعاع متوسط برای محاسبه چگالی شار مغناطیسی بی‌باری بدون حضور سیم‌پیچی استاتور را نشان می‌دهد. با توجه به تقارن موجود در مدل ماشین برای محاسبه چگالی شار فاصله هوایی می‌توان نصف ماشین را لحاظ کرد که به صورت شکل ۶ خواهد بود. در شکل ۶ ماشین به چهار ناحیه تقسیم شده که ناحیه اول شامل یوغ روتور، ناحیه دوم شامل آهن‌رباها، ناحیه سوم فاصله میان آهن‌رباها تا یوغ استاتور که شامل فاصله هوایی و سیم‌پیچی آرمیچر است و در نهایت ناحیه چهارم که شامل یوغ استاتور است. به منظور کاهش پیچیدگی محاسبات، فرض شده که اشباع مغناطیسی در هسته‌های روتور و استاتور رخ نمی‌دهد یعنی هسته‌های روتور و استاتور دارای ضریب نفوذپذیری بی‌نهایت هستند. همچنین منحنی مغناطیسی آهن‌رباها به صورت خطی بوده و ضریب نفوذپذیری نسبی آنها مقداری ثابت است.

برای محاسبه چگالی شار مغناطیسی بی‌باری می‌توان از پتانسیل مغناطیسی اسکالر استفاده کرد که این پتانسیل ناشی از بارهای مغناطیسی فرضی می‌باشد. شکل ۷ توزیع بارهای مغناطیسی فرضی بر روی سطح آهن‌رباها را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

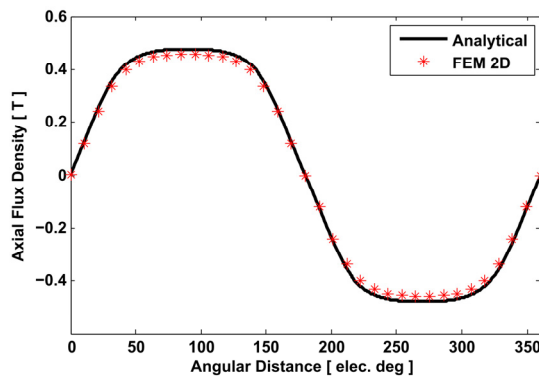
چگالی بارهای مغناطیسی فرضی در سطح آهن‌رباها می‌تواند مطابق (۱۷) لحاظ شود [۱۱]

$$\sigma = \begin{cases} \frac{+B_r}{\mu} & , \text{ N poles} \\ \frac{-B_r}{\mu} & , \text{ S poles} \end{cases} \quad (17)$$

توزیع چگالی بار مغناطیسی برای آهن‌رباها به صورت شکل ۸ قابل مشاهده است که می‌تواند با استفاده از سری فوریه به صورت (۱۸) بیان شود



شکل ۱۱: مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی در نزدیکی سطح آهن‌ریا بر حسب فاصله محیطی.



شکل ۱۲: مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی در نزدیکی سطح استاتور بر حسب فاصله محیطی.

با داشتن چگالی شار مغناطیسی ناشی از آهن‌ریاها در ناحیه سیم‌پیچی، می‌توان نیروی محرکه القایی در ماشین را مطابق رابطه زیر به دست آورد

$$V_{ph,n,rms} = \sqrt{2} \pi \frac{f}{p} N_{ph} K_{wn} (R_o^r - R_i^r) K_r \hat{B}_{yn,s} \quad (27)$$

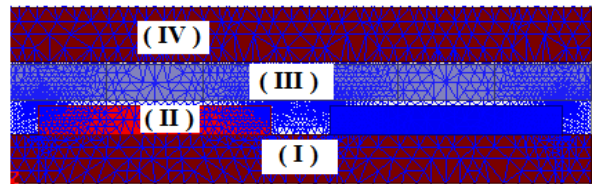
جدول ۵ مقدار نیروی محرکه القایی و هارمونیک‌های آن را برای ماشین AFPM در سرعت ۱۰۰۰ rpm نشان می‌دهد. همان گونه که از جدول ۷ قابل مشاهده است، تطابق خوبی میان روش تحلیلی و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد.

۷- نتیجه‌گیری

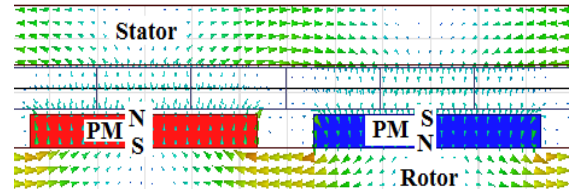
در این مقاله طراحی بهبودیافته ماشین AFPM با ساختار استاتور میانی بدون شیار با استفاده از الگوریتم PSO انجام شد و نتایج با یک نمونه ساخته‌شده مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که می‌توان از الگوریتم بهینه‌سازی PSO در طراحی بهبودیافته ماشین الکتریکی بهره برد و با توجه به تابع هدف تعریف‌شده نتایج بهتری حاصل نمود. همچنین یک روش تحلیلی مبتنی بر معادلات ماکسول و حل معادله لاپلاس ارائه شد که با استفاده از آن می‌توان چگالی شار مغناطیسی ناشی از آهن‌ریاها و نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر را با دقت بسیار خوبی به دست آورد. نتایج المان محدود و نتایج آزمایشگاهی، صحت روش ارائه‌شده را تأیید می‌کند.

مراجع

- [1] F. Giulii Capponi, G. De Donato, and F. Caricchi, "Recent advances in axial-flux permanent-magnet machine technology," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 48, no. 4, pp. 2190-2205, Nov./Dec. 2012.



شکل ۹: مش‌بندی یک جفت قطب از ماشین در نرم‌افزار المان محدود (یوغ روتور (I)، آهن‌ریاها (II)، فاصله هوایی (III) و یوغ استاتور (IV)).



شکل ۱۰: توزیع بردارهای چگالی شار مغناطیسی در نواحی مختلف ماشین.

جدول ۷: نیروی محرکه القایی و درصد هارمونیک‌ها.

هارمونیک‌ها	روش تحلیلی	اندازه‌گیری [۱۰]
اول	۶۱٫۵ [V]	۶۱٫۶ [V]
سوم	٪۱۱٫۶	٪۱۲٫۴
پنجم	صفر	٪۰٫۳
هفتم	٪۰٫۹	٪۰٫۷

با توجه به وجود چگالی بار مغناطیسی فرضی در مرز دو محیط، یکی دیگر از شرایط مرزی در مرز بین دو محیط (II) و (III) به صورت زیر می‌باشد

$$B_{zr} - B_{z\tau} = B_r \quad (25)$$

با مشخص شدن ضرایب A_n و B_n ، پتانسیل مغناطیسی اسکالر در ناحیه (II) و (III) به دست می‌آید و در نهایت چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی (ناحیه III) به صورت رابطه زیر خواهد بود

$$-\mu \times \sigma_n \times \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_p} x\right) \times B_{z\tau} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left(\mu_r \sinh\left(\frac{n\pi}{\tau_p} L_g\right) \coth\left(\frac{n\pi}{\tau_p} L_{pm}\right) + \cosh\left(\frac{n\pi}{\tau_p} L_g\right) \right) \quad (26)$$

۶- نتایج روش تحلیلی و مقایسه با نتایج المان محدود

شکل ۹ مدل دوبعدی یک جفت قطب از ماشین AFPM را در شعاع متوسط در نرم‌افزار المان محدود Ansoft Maxwell نشان می‌دهد که مش‌بندی شده است. مشخصات ماشین AFPM مطابق جدول ۲ می‌باشد که بر اساس یک نمونه ساخته شده است [۱۰].

شکل ۱۰ بردارهای چگالی شار مغناطیسی که توسط نرم‌افزار المان محدود به دست آمده‌اند را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱ مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی و شکل ۱۲ مؤلفه محوری چگالی شار مغناطیسی در نزدیکی هسته استاتور را نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود که چگالی شار در نزدیکی سطح آهن‌ریاها حالت دوزنقه‌ای داشته و با دور شدن از سطح آهن‌ریاها به شکل سینوسی نزدیک‌تر می‌شود. همچنین شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهد که تطابق بسیار خوبی میان نتایج تحلیلی ارائه‌شده و نتایج ناشی از نرم‌افزار المان محدود وجود دارد.

محمد رضا عزیززاده پهلوانی در سال ۱۳۷۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید چمران اهواز و در سال ۱۳۸۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران دریافت نمود. از سال ۱۳۷۷ الی ۱۳۸۸ نامبرده به عنوان محقق سیستم‌های قدرت در مرکز تحقیقات کنترل دانشگاه صنعتی مالک اشتر به کار مشغول بود و در سال ۱۳۸۲ به دوره دکتری مهندسی برق در دانشگاه علم و صنعت وارد گردید و در سال ۱۳۸۸ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. دکتر عزیززاده از سال ۱۳۸۸ در مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر در تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشگاه با مرتبه دانشیاری می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ماشین‌های الکتریکی و الکترونیک قدرت، سیستم پالسی، شبکه‌های الکتریکی و کنترل می‌باشد.

یوسف شهبازی آیت در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تهران دریافت نمود. نامبرده در سال ۱۳۹۰ در دوره دکتری مهندسی برق در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران پذیرفته شد و اینک نیز دانشجوی دکتری مهندسی برق در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده شامل طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌های الکتریکی، روش‌های تحلیلی و عددی در ماشین‌های الکتریکی می‌باشد.

ابوالفضل واحدی در سال ۱۳۶۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه فردوسی مشهد دریافت نمود و مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۷۴ از دانشگاه پلی تکنیک لورن فرانسه به پایان رسانده است و هم اکنون استاد دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت می‌باشد. نامبرده پروژه‌های متعددی در زمینه ماشین‌های الکتریکی متداول و مخصوص و درایو آن‌ها راهنمایی کرده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده شامل طراحی، پیاده‌سازی و بهینه‌سازی ماشین‌های الکتریکی از جمله موتورهای وسایل نقلیه و درایو می‌باشد.

- [2] M. Aydin, S. Huang, and T. A. Lipo, "Axial flux permanent magnet disc machines: a review," in *Proc. of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM*, pp. 61-71, Jun. 2004.
- [3] S. Huang, M. Aydin, and T. A. Lipo, "Comparison of (non-slotted and slotted) surface mounted PM motors and axial flux motors for submarine ship drives," in *Proc. 3rd Naval Symp. on Electrical Machines*, 10 pp., University of Wisconsin-Madison, 2000.
- [4] J. F. Gieras, R. J. Wang, and M. Kamper, *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, 2nd Edition, Springer Science + Business Media B.V., 2008.
- [5] B. Mirzaeian, M. Moallem, V. Tahani, and C. Lucas, "Multiobjective optimization method based on a genetic algorithm for switched reluctance motor design," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, no. 3, pp. 1524-1527, May 2002.
- [6] S. A. Gholamian, *Optimum Design and Manufacturing of Axial Flux Permanent Magnet Motor for Electric Vehicle Application*, Ph.D Dissertation, K. N. Toosi Univ. Technology, Tehran, Iran, Jan. 2008.
- [7] S. Y. Jung, H. Jung, S. C. Hahn, H. K. Jung, and C. G. Lee, "Optimal design of direct-driven PM wind generator for maximum annual energy production," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 6, pp. 1062-1065, Jun. 2008.
- [8] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi, and T. A. Lipo, "A comparison of power density for axial flux machines based on the general purpose sizing equation," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 14, no. 2, pp. 185-192, Jun. 1999.
- [9] N. Rostami, M. R. Feyzi, J. Pyrhonen, A. Parviainen, and V. Behjat, "Genetic algorithm approach for improved design of a variable speed axial-flux permanent-magnet synchronous generator," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 12, pp. 60-65, Dec. 2012.
- [10] J. R. Bumby, R. Martin, M. A. Mueller, E. Spooner, N. L. Brown, and B. J. Chalmers, "Electromagnetic design of axial-flux permanent magnet machines," in *Proc. Inst. Elect. Eng., Elect. Power App.*, vol. 151, no. 2, pp. 151-160, Mar. 2004.
- [11] O. de la Barriere, S. Hlioui, H. Ben Ahmed, M. Gabsi, and M. LoBue, "3-D formal resolution of maxwell equations for the computation of the no-load flux in an axial flux permanent-magnet synchronous machine," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 1, pp. 128-136, Jan. 2012.