

طراحی بهینه موتور مغناطیس دائم داخلی برای افزایش محدوده تضعیف شار و کاهش حجم آهنربای مصرفی

مهدی اره پناهی و وحید سنایی تراب

مطلب بیان کننده اهمیت بسیار بالای افزایش مقدار CPSR موتور است. رسیدن به CPSR بزرگ برای یک موتور IPM با لایه آهنربا در هر قطب و توزیع سینوسی سیم‌پیچی استاندارد در استاتور، بسیار دشوار است [۱]. مقدار CPSR با قابلیت تضعیف شار موتور رابطه تنگاتنگی دارد. در یک موتور الکتریکی به منظور دستیابی به سرعت‌های بیشتر از سرعت نامی و تولید گشتاور مناسب که عملاً بتواند موتور را در محدوده مقدار نامی آن حفظ کند، شار فاصله هوایی باید تضعیف شود. ساختارهای متنوعی تا کنون برای افزایش CPSR در موتورهای مغناطیس دائم ارائه شده است [۲] تا [۶]. از جالب‌ترین ایده‌های ارائه شده برای افزایش قابلیت تضعیف شار ایده چند تکه کردن آهنربا در هر قطب روتور و ایجاد یک پل آهنی بین تکه‌های آهنرباست. در [۱] این ایده بررسی شده و یک طراحی بهینه بر اساس آن انجام شده است. چند تکه کردن آهنرباها با وجود تأثیر زیادی که بر افزایش مقدار CPSR دارد بخش قابل توجهی از شار آهنرباها را در روتور تلف می‌کند. به بیان دیگر باعث می‌شود قسمتی از شار آهنرباها وارد فاصله هوایی نشود که باعث افت گشتاور تولیدی موتور خواهد شد. از طرفی با کاهش گشتاور در سرعت‌های پایین، توان نامی موتور نیز کاهش خواهد یافت. برای حل این مشکل در این مقاله با ترکیب دو ایده چند تکه کردن آهنربا و استفاده از پل‌های هوایی غیر متعارف^۴ یک طرح جدید ارائه شده است. طرح پیشنهادی علاوه بر افزایش CPSR و کاهش حجم آهنربای مصرفی در روتور، حداقل افت توان را نیز تضمین می‌کند.

۲- تضعیف شار در موتورهای مغناطیس دائم

شکل ۱ مشخصه ایده‌آل تضعیف شار یک موتور سنکرون را نشان می‌دهد. موتور از لحظه راه‌اندازی تا سرعت نامی تحت گشتاور نامی و توان متغیر بهره‌برداری می‌شود و عملاً ولتاژ موتور به صورت خطی تا مقدار نامی افزایش می‌یابد. در محدوده سرعت‌های بیشتر از نامی چون ولتاژ موتور به مقدار نامی خود رسیده و نیز توان هم به مقدار نامی رسیده است بنابراین برای این که توان ثابت بماند و سرعت افزایش یابد باید گشتاور کاهش یابد، پس موتور به صورت توان (نامی) ثابت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

بنابراین می‌توان محدوده کنترل دور موتور را به دو قسمت ناحیه گشتاور ثابت (از سرعت صفر تا سرعت نامی) و ناحیه توان ثابت (سرعت‌های بیش از نامی) که همان ناحیه تضعیف شار^۵ است، تقسیم کرد. با توجه به این که در موتور مغناطیس دائم، آهنربا میدانی ثابت در راستای محور d ایجاد می‌کند، لذا به منظور تضعیف شار و در نتیجه افزایش سرعت باید یک جریان منفی در راستای محور d (i_d منفی) در

چکیده: موتورهای مغناطیس دائم داخلی از یک سو به دلیل ویژگی‌هایی نظیر بازده بالا و دارا بودن نسبت توان به حجم بیشتر در مقایسه با موتورهای القایی و سوئیچ‌شونده رلوکتانسی و از سوی دیگر استحکام مکانیکی بهتر و خطر مغناطیس‌زدایی کمتر نسبت به موتورهای مغناطیس دائم سطحی، یک انتخاب مناسب جهت کاربرد در صنایع حمل و نقل محسوب می‌شوند. با این وجود همواره کاهش هزینه ساخت این موتورها و افزایش محدوده سرعت تحت توان ثابت (CPSR) همواره یکی از مسایل مورد توجه در طراحی این ماشین‌ها بوده است. این مقاله یک طراحی بهینه را برای موتور مغناطیس دائم داخلی به منظور دستیابی به CPSR بزرگ و کاهش حجم آهنربای مصرفی به طور هم‌زمان ارائه می‌دهد. بهینه‌سازی در دو مرحله انجام می‌شود، در مرحله اول به کمک الگوریتم ژنتیک مقدار CPSR موتور نسبت به طرح اولیه افزایش می‌یابد و در مرحله دوم با ترکیب دو ایده ساختار آهنرباهای چند تکه شده و استفاده از پل‌های هوایی غیر متعارف طرحی ارائه می‌شود که ضمن افزایش مقدار CPSR، حجم آهنربای مصرفی را نیز کاهش خواهد داد.

کلید واژه: طراحی بهینه، موتور مغناطیس دائم داخلی، تضعیف شار، پل آهنی و پل هوایی.

۱- مقدمه

موتور مغناطیس دائم داخلی^۱ با محدوده سرعت تحت توان ثابت^۲ وسیع برای کاربردهایی که نیاز به ذخیره انرژی دارند یک انتخاب ایده‌آل محسوب می‌شود [۱]. یکی از این کاربردها در خودروهای الکتریکی^۳ است. CPSR مطابق (۱) به صورت نسبت ماکسیمم سرعتی که موتور می‌تواند توان نامی را تحویل دهد به سرعت نامی تعریف می‌شود

$$CPSR = \frac{\omega_{max}}{\omega_n} \quad (1)$$

مهم‌ترین عملکرد یک وسیله نقلیه که وابسته به قدرت موتور آن است، رفتار شتاب‌گیری است. رفتار شتاب‌گیری توسط مدت زمان مورد نیاز برای رسیدن سرعت وسیله نقلیه از سرعت صفر به سرعت مرجع با بار کامل تعریف می‌شود. در [۲] نشان داده شده که برای یک وسیله نقلیه با پارامترهای مشخص و عملکرد شتاب‌گیری معین، چنانچه مقدار CPSR تقریباً ده برابر شود توان مورد نیاز وسیله نقلیه نصف خواهد شد. این

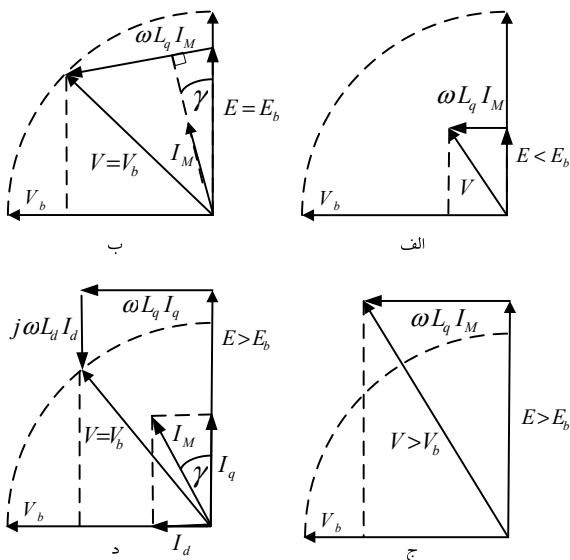
این مقاله در تاریخ ۱۱ آذر ماه ۱۳۹۲ دریافت و در تاریخ ۱۷ فروردین ماه ۱۳۹۴ بازنگری شد.

مهدی اره پناهی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تفرش، تفرش، (email: arehpanahi@tafreshu.ac.ir)

وحید سنایی تراب، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تفرش، تفرش، (email: vahidsanaie@gmail.com)

1. Interior Permanent Magnet
2. Constant Power Speed Range
3. Electric Vehicle

4. Non Conventional Air Bridge
5. Flux Weakening



شکل ۲: شرایط بهره‌برداری موتور IPM در سرعت‌های مختلف.

محدودیت ولتاژهای محورهای d و q و محاسبه مقدار جریان منفی محور d از (۳) محاسبه می‌شود

$$V = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} = \omega_e \sqrt{(L_q i_q)^2 + (\psi_m - L_d i_d)^2} \quad (3)$$

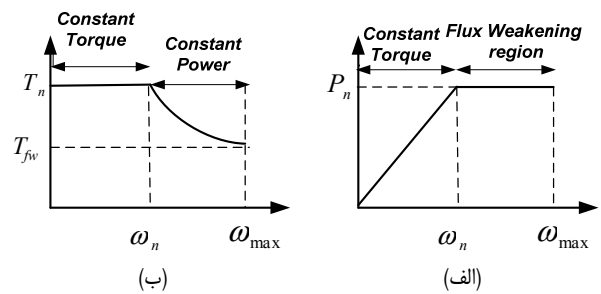
صرف نظر از تلفات، توان خروجی بر حسب پارامترهای نرمالیزه شده (پارامترها بر حسب مقادیر نامی نرمالیزه شده‌اند) می‌تواند به صورت (۴) بیان شود [۷]

$$P_n = V_{qn} I_{qn} + V_{dn} I_{dn} = \omega_{pu} (E_n I_n \cos \gamma + \frac{X_{dn} + X_{qn}}{\gamma} I_n^2 \sin^2 \gamma) \quad (4)$$

که در آن اندیس n معرف پارامتر نرمالیزه شده است. در سرعت‌های کم، ولتاژ موتور کمتر از مقدار نامی است اما به محض این که سرعت از مقدار نامی فراتر رود محدودیت ولتاژ شروع به محدود کردن زاویه جریان می‌کند به نحوی که پیک توان در جریان نامی در یک زاویه جریان γ که بین زاویه جریان ماکسیمم گشتاور (بیان شده با γ^*) و 90° درجه است، قرار گیرد. هنگامی که $\gamma = 90^\circ$ توان خروجی بسیار کوچک است و بنابراین برای هر طراحی موتور یک محدودیت بر روی سرعت وجود خواهد داشت که سرعت تا مقداری کم شود که توان نامی قابل حصول باشد. برای بررسی عملکرد تضعیف شار ماشین و محاسبات مربوط، ابتدا باید اندوکتانس‌های محورهای d و q محاسبه شوند. مقدار این اندوکتانس‌ها در بررسی عملکرد ماشین بسیار تأثیرگذار است و بنابراین روش محاسبه این اندوکتانس‌ها بسیار حایز اهمیت است. در این مقاله روش محاسبه اندوکتانس بر اساس بسط فوریه شکل موج چگالی شار فاصله هوایی است [۸]. شکل ۳ چگالی شار فاصله هوایی و مؤلفه اصلی یک موتور IPMSM نمونه، چهارقطبی با ۳۶ شیار را نشان می‌دهد.

با استفاده از حل معادلات میدان مغناطیسی، امکان به دست آوردن مؤلفه شعاعی توزیع چگالی شار $B_{gn}(v_r)$ در فاصله هوایی وجود دارد (v_r موقعیت زاویه‌ای ارجاع داده شده به سیستم قطبی است). مؤلفه اصلی چگالی شار فاصله هوایی با مرجع قرار دادن محور d به صورت (۵) حاصل می‌شود

$$B_{dM} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B_{gn}(v_r) \cos(v_r) dv_r \quad (5)$$



شکل ۱: (الف) مشخصه توان- سرعت و (ب) مشخصه گشتاور- سرعت.

سیم‌پیچی‌های استاتور تزریق کرد. با افزایش سرعت، i_d منفی مورد نیاز برای کاهش ولتاژ ضدمحرکه القایی و حفظ محدودیت ولتاژ، افزایش می‌یابد و به دلیل وجود محدودیت مقدار جریان مؤثر استاتور که نباید از مقدار نامی فراتر رود، جریان محور q (i_q) کاهش خواهد یافت. از طرفی با توجه به (۲)، نقش مهمی را در تولید مؤلفه اصلی گشتاور موتور مغناطیس دایم (گشتاور الکترومغناطیسی) بر عهده دارد. پس کاهش آن کاهش گشتاور را به دنبال خواهد داشت. در نتیجه موتوری دارای قابلیت تضعیف شار بهتری است که با یک i_d منفی معین و حفظ توان خروجی، بیشترین کاهش را در شار پیوندی ایجاد کند

$$T_e = T_{PM} + T_{rel} = \frac{3}{2} p (\psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (2)$$

که T_{PM} گشتاور ایجادشده توسط آهن‌ربا (گشتاور الکترومغناطیسی)، T_{rel} گشتاور رلوکتانسی و L_d و L_q به ترتیب اندوکتانس‌های محورهای d و q است.

۳- ارزیابی عملکرد موتور در ناحیه تضعیف شار

عملکرد موتور IPM از لحظه راه‌اندازی تا سرعت‌های بیش از نامی در چهار حالت خلاصه می‌شود که در شکل ۲ به صورت دیاگرام فازوری نشان داده شده است:

شکل ۲- الف: ناحیه عملکرد عادی موتور است و V_b ولتاژ نامی موتور است. این ناحیه شامل سرعت صفر تا نزدیکی سرعت نامی است که در آن گشتاور ثابت است و ولتاژ و توان به صورت خطی افزایش می‌یابند. ولتاژ و توان در این ناحیه کمتر از مقدار نامی هستند و موتور در این ناحیه به صورت گشتاور نامی ثابت کنترل دور می‌شود.

شکل ۲- ب: در این نقطه سرعت و ولتاژ به مقدار نامی خود رسیده‌اند و جریان نیز همچنان در مقدار نامی قرار دارد. این نقطه مرز بین عملکرد عادی موتور و عملکرد ناحیه تضعیف شار است. زاویه جریان در موتور به گونه‌ای است که مؤثر ولتاژ را در مقدار نامی تثبیت کرده است.

شکل ۲- ج: در این دیاگرام سرعت از مقدار نامی بیشتر شده و مقدار ولتاژ ضدمحرکه نیز افزایش یافته و بنابراین ولتاژ موتور باید از مقدار نامی بیشتر شود تا شرایط کارکرد فراهم گردد. ولی افزایش ولتاژ به بیش از مقدار نامی امکان‌پذیر نیست و بنابراین موتور نمی‌تواند عملاً تحت این شرایط به عملکرد ایمن خود ادامه دهد. به همین علت بحث تضعیف شار در موتور مطرح می‌شود.

شکل ۲- د: برای حفظ محدودیت ولتاژ و جریان افت ولتاژ محور d (ناشی از افزایش نیروی ضدمحرکه E) باید یک جریان با جهت مخالف در راستای محور d در استاتور تزریق شود تا ولتاژ موتور در مقدار نامی تثبیت شود. در این حالت زاویه جریان نسبت به زمانی که محدودیت ولتاژ وجود ندارد (شکل ۲- ج) افزایش می‌یابد تا بتواند شرط تثبیت اندازه ولتاژ نامی را برقرار کند.

جدول ۱: ابعاد استاتور و طراحی اولیه روتور.

مقدار	پارامترهای روتور	مقدار	پارامترهای استاتور
۰٫۸	فاصله هوایی (mm)	۲۷٫۷	قطر خارجی (mm)
۵۰	قطر محور (mm)	۱۵۷٫۱	قطر داخلی (mm)
۳۶۵۳۹۷	حجم آهن ربا (mm ^۳)	۳۶	تعداد شیارها
۸٫۵	ضخامت آهن ربا (mm)	۲۴۷٫۱	سطح مقطع شیار (mm ^۲)
۹۶٫۸	عرض آهن ربا (mm)	۶	عرض دندانه (mm)
۱۱۱	طول روتور (mm)	۲	دهانه شیار (mm)

جدول ۲: مشخصات آهن ربا استفاده شده.

نوع آهن ربا	NDFe۳۵
پرمالیتیه نسبی (μ)	۱٫۰۹۹۷۸
چگالی شار پسماند (Br)	۱٫۲۳ T
شدت میدان مغناطیس زدا (Hc)	-۸٫۹ × ۱۰ ^۵ A/m

– ماکسیمم چگالی شار در آهن پشت استاتور ۱٫۷ تسلا باشد. همان طور که ذکر شد موتوری دارای قابلیت تضعیف شار بهتری است که با یک I_{ds} منفی معین، بیشترین کاهش را در شار پیوندی ناشی از مغناطیس دایم (Ψ_m) ایجاد کند. جریان مشخصه بهترین تعریف برای عبارت فوق است که به صورت (۷) تعریف می شود [۴]

$$I_{ch} = \frac{\Psi_m}{L_d} \quad (7)$$

که در آن I_{ch} جریان مشخصه موتور است. به طور کلی در موتورهای مغناطیس دایم به سبب پایین بودن مقدار اندوکتانس محور d ، جریان مشخصه بزرگتر از جریان نامی است که این موضوع باعث محدودیت عملکرد تضعیف شار موتور می شود.

اگر بتوان جریان مشخصه موتور را به جریان نامی نزدیک تر کرد، قابلیت تضعیف شار موتور افزایش می یابد. ارزیابی عملکرد موتور نمونه نشان می دهد که موتور نمونه فاقد قابلیت تضعیف شار است (شکل های ۴ و ۵). بنابراین در گام اول طی یک فرایند بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تلاش می شود تا جریان مشخصه هرچه بیشتر به یک نزدیک شود یعنی قابلیت تضعیف شار موتور افزایش یابد. سپس در گام بعدی با حفظ قابلیت تضعیف شار حجم آهن ربا کاهش خواهد یافت. با توجه به این که ابعاد استاتور در طی فرایند بهینه سازی بدون تغییر در نظر گرفته می شوند، سه پارامتر مهم فاصله هوایی (g)، ضخامت آهن ربا (W_m) و پهنای آهن ربا (L_m) به عنوان متغیرهای بهینه سازی انتخاب می شوند. محدودیت های اعمال شده به این سه پارامتر عبارتند از:

(۱) محدودیت فاصله هوایی ($0.5 \text{ mm} < g < 1.2 \text{ mm}$).

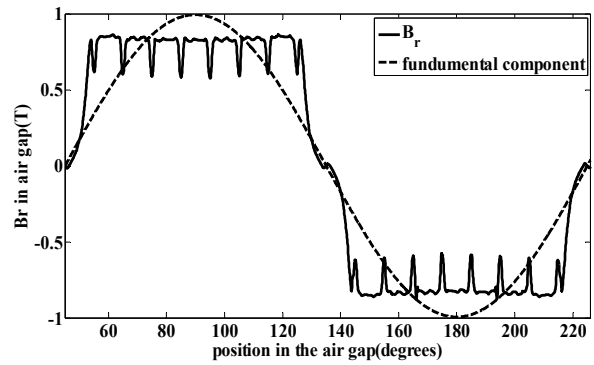
(۲) محدودیت ضخامت آهن ربا ($0.5g < W_m < 1.0g$) که g طول فاصله هوایی است.

(۳) محدودیت پهنای آهن ربا ($L_m < 92.5 \text{ mm}$).

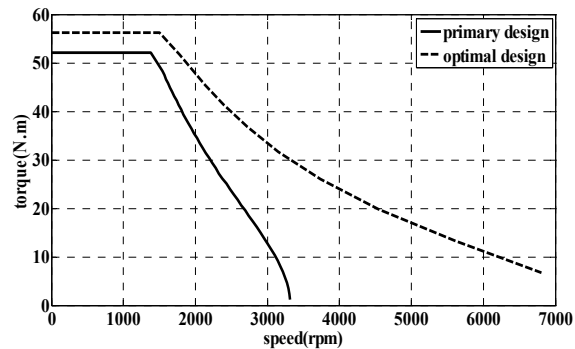
تابع هدف به صورت (۸) تعریف می شود (در بهینه سازی از پارامترهای نرمالیزه شده استفاده می شود)

$$OF = \min\left(\frac{\Psi_{mn}}{L_{dn}} - 1\right) \quad (8)$$

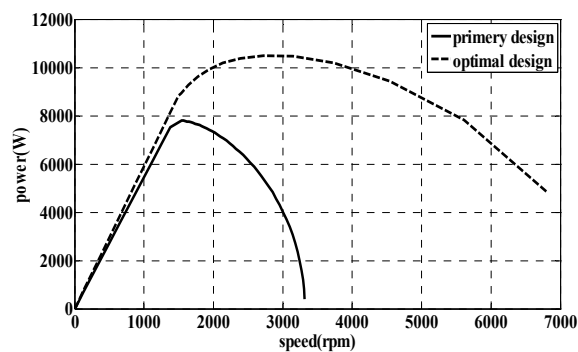
نتایج حاصل از انجام فرایند بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای ابعاد روتور در جدول ۳ آورده شده است. پارامترهای قبل از بهینه سازی با توجه به اطلاعات جدول ۱ به دست آمده اند. این طراحی در این تحقیق با عنوان طرح ۱ معرفی می شود.



شکل ۳: چگالی شار و مؤلفه اصلی آن در حالت بی باری در وسط فاصله هوایی.



شکل ۴: مقایسه گشتاور-سرعت قبل و بعد از بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک.



شکل ۵: مقایسه توان-سرعت قبل و بعد از بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک.

با استفاده از مقدار چگالی شار حاصل از (۵)، شار از حاصل ضرب آن در سطح مقطع عبوری یک قطب به دست می آید. سپس مقدار پیک شار پیوندی محور d به صورت (۶) به دست می آید

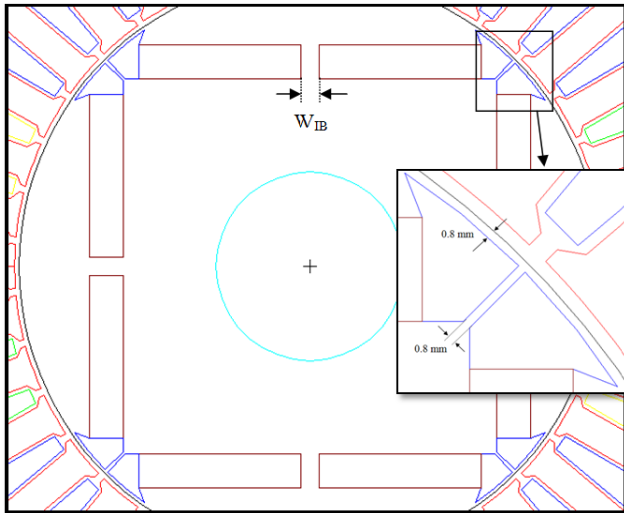
$$\lambda_d = B_{dM} \frac{K_w NDL_{fe}}{2P} \quad (6)$$

که K_w ضریب سیم پیچی، N تعداد دور در هر فاز سیم پیچی، D قطر داخلی استاتور، L_{fe} طول مؤثر ماشین و P تعداد زوج قطبها است و به همین ترتیب مقدار L_q نیز از رابطه $L_q = \lambda_q / I_q$ محاسبه می شود.

۴- طراحی اولیه موتور IPM نمونه

مشخصات یک موتور IPM نمونه ۸٫۵ Kw، چهار قطب، ۵۰ هرتز با ولتاژ نامی ۱۲۰ V در جدول ۱ آورده شده و مشخصات آهن ربا استفاده شده در روتور نیز در جدول ۲ آمده است.

در طراحی موتور IPM نمونه از تلفیق مدل مغناطیسی و الکتریکی ارائه شده در [۷] و همچنین روابط محاسبه حجم و ابعاد آهن ربا ارائه شده در [۹] استفاده شده است. محدودیت های اعمالی در طراحی عبارتند از: – ماکسیمم چگالی شار دندانه های استاتور ۱٫۲ تسلا باشد.



شکل ۸: نمایی از روتور و پل هوایی غیر متعارف در طرح پیشنهادی.

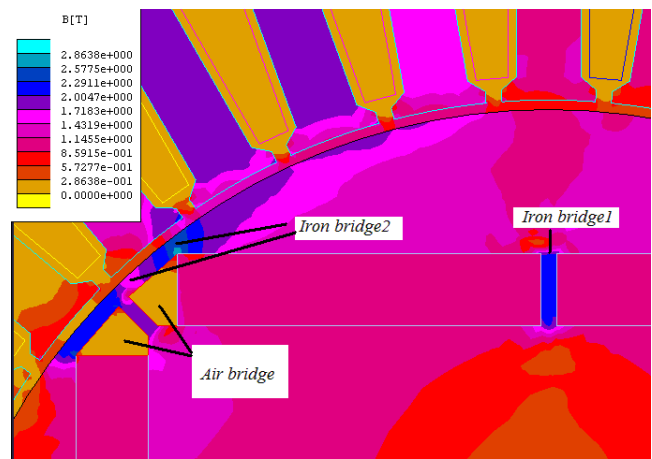
جدول ۳: پارامترهای موتور قبل و بعد از بهینه‌سازی.

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی	بعد از بهینه‌سازی
فاصله هوایی	۰٫۸ mm	۱٫۲ mm
قطر روتور	۱۵۵٫۵ mm	۱۵۴٫۷ mm
عرض آهن‌ربا	۹۶٫۸ mm	۹۱ mm
طول آهن‌ربا	۱۱۱ mm	۱۱۱ mm
ضخامت آهن‌ربا	۸٫۵ mm	۹ mm
چگالی شار فاصله هوایی	۰٫۹۴ T	۰٫۸۹۸ T
تابع هدف	۰٫۳۹۷	۰٫۱۳۷

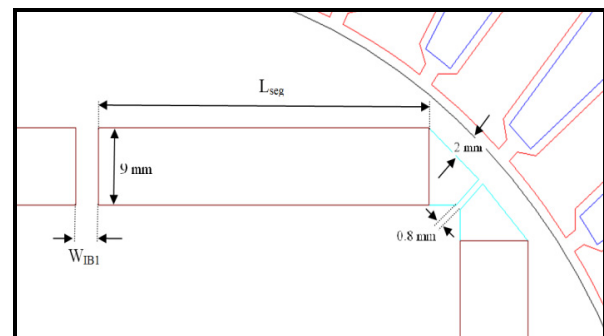
عبور شارهای روتور از آنها باعث کاهش شار پیوندی آهن رباهای قطب‌های مجاور و در حقیقت باعث انتقال بیشتر شار آهن‌رباها به فاصله هوایی می‌شود.

چون پل‌ها در راستای عبور شار محور d قرار دارند باعث کاهش رلوکتانس این محور و در نتیجه افزایش اندوکتانس محور d خواهند شد.

دو اثر مهم ذکر شده با توجه به (۸) باعث کاهش جریان مشخصه موتور می‌گردد، لذا قابلیت تضعیف شار در سرعت‌های بیشتر از نامی افزایش خواهد یافت. با این وجود کاهش شار پیوندی مطلوب نیست زیرا علاوه بر کاهش گشتاور در سرعت‌های پایین، تلف کردن بخشی از ظرفیت مغناطیسی آهن‌ربا به لحاظ اقتصادی توجیه ندارد. باید توجه کرد که در این مرحله از طراحی، حجم آهن‌رباها نسبت به طراحی اولیه تغییر می‌کند و با افزایش پهنای پل آهنی بین تکه‌های آهن‌ربا، حجم آهن‌ربا به اندازه حجم پل‌های آهنی کاهش خواهد یافت. این کاهش حجم آهن‌ربا نسبت به حجم اولیه، باعث کاهش بیشتر چگالی شار در فاصله هوایی و در نتیجه افت بیشتر گشتاور خواهد شد. برای حل این مشکل و رسیدن به یک طراحی بهینه از ساختار پل هوایی غیر متعارف در کناره‌های آهن‌ربا استفاده می‌شود. برای مشاهده تأثیر ساختار پل هوایی غیر متعارف و متعارف با دو تکه آهن‌ربا در هر قطب نسبت به طراح ۲، دو طرح دیگر با عنوان طرح ۳ و طرح پیشنهادی معرفی می‌شوند. در طرح ۳ پهنای پل آهنی بین تکه‌های آهن‌ربا ۵ mm در نظر گرفته شده و همچنین از ساختار پل هوایی متعارف در کناره‌های آهن‌ربا استفاده شده که در شکل ۷ نشان داده شده است. در طرح پیشنهادی با ترکیب ساختار آهن‌ربای چند تکه شده در هر قطب و یک ساختار غیر متعارف پل هوایی که در شکل ۸ نشان داده شده، یک طرح جدید ارائه شده است. ویژگی



شکل ۶: روتور ماشین IPM با آهن‌ربای دو تکه شده در هر قطب و پل‌های آهنی.



شکل ۷: نمایی از تکه‌های آهن‌ربا و پل‌های هوایی روتور در طرح ۳.

همان طور که از نتایج جدول ۳ مشخص است برای افزایش اندوکتانس محور d فاصله هوایی افزایش یافته است. شکل‌های ۴ و ۵ مشخصه توان-سرعت و گشتاور-سرعت موتور قبل و بعد از بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهند. همان طور که در شکل‌ها مشخص است موتور قبل از بهینه‌سازی فاقد قابلیت تضعیف شار است، یعنی در سرعت‌های بیشتر از نامی که ۱۵۰۰ rpm است توان افت شدیدی می‌یابد و موتور قابلیت حفظ توان را در این سرعت‌ها حتی برای افزایش اندکی در سرعت ندارد. اما بعد از بهینه‌سازی CPSR از مقدار ۱ به ۳٫۳۳ افزایش یافته، یعنی تا سرعت ۵۰۰۰ rpm نامی از موتور قابل دریافت است.

۵- بهینه‌سازی برای کاهش حجم آهن‌ربا (طرح ۲)

در این مرحله هدف بهینه‌سازی کاهش حجم آهن‌ربای مصرفی با حفظ CPSR است. برای دستیابی به این هدف از ترکیب دو ایده یعنی چند تکه کردن آهن‌ربا [۱] و پل‌های هوایی غیر متعارف [۱۰] استفاده شده است. یک طراحی جدید از ترکیب این دو ایده ارائه شده که با حفظ سادگی ساختار نسبت به موتور IPM متعارف با بیشترین کاهش در حجم آهن‌ربای مصرفی، حداقل افت گشتاور را خواهد داشت. همچنین محدوده تضعیف شار را نیز بهبود می‌بخشد. در ساختار ماشین IPM با آهن‌ربای چند تکه شده، بین هر دو تکه یک پل آهنی (iron bridge۱) قرار می‌گیرد و پل‌های آهنی دیگر در بالای موانع شار (iron bridge۲) که نزدیک فاصله هوایی هستند، ایجاد می‌شوند که در شکل ۶ به خوبی نشان داده شده‌اند. این پل‌ها توسط شار آهن‌رباهای چند تکه شده همواره در شرایط اشباع هستند. با این حال ضریب نفوذپذیری نسبی آهن اشباع شده تقریباً ۲٫۵ برابر ضریب نفوذپذیری نسبی هوا است. این طرح با عنوان طرح ۲ در این مقاله معرفی شده است.

وجود پل‌های آهنی بین تکه‌های آهن‌ربا دو اثر مهم دارد:

جدول ۴: مقایسه پارامترهای چهار طرح ارائه شده.

پارامتر	طرح ۱	طرح ۲	طرح ۳	طرح پیشنهادی
L_d (mH)	۱۶٫۲	۱۶٫۸	۱۷٫۸	۱۶٫۵
L_q (mH)	۲۱٫۱۶	۲۰٫۸۶	۲۰٫۸۶	۱۹٫۳۶
ψ_m (mweb)	۶۹۷٫۸	۶۴۸٫۴	۵۸۵٫۲	۶۵۷٫۳
ω_{max} (rpm)	۵۰۰۰	۹۰۰۰	۱۷۰۰۰	۸۰۰۰
CPSR	۳٫۳۳	۶	۱۱٫۳	۵٫۳۳
T_n (N.m)	۵۶٫۲۸	۵۴٫۱۷	۴۹٫۹۵	۵۳٫۸۹
P_n (kw)	۸٫۸	۸٫۵	۷٫۸۴	۸٫۴۶
کاهش حجم آهنربای روتور نسبت به طرح ۱ (%)	-	۲٫۲	۵٫۵	۵٫۵

هر قطب می‌توان به قابلیت تضعیف شار بالایی دست یافت ولی ایده تکه کردن آهنربا به تنهایی بخش زیادی از ظرفیت مغناطیسی آهنرباهای روتور را تلف می‌کند. اگر ایده چند تکه کردن آهنربا با طراحی مناسب پل‌های هوایی کناره‌های آن ترکیب شود، بخشی از شار آهنربا که در ناحیه‌های کناری آن تلف می‌شد به فاصله هوایی برمی‌گردد. از این طریق ائتلاف شار ایجاد شده توسط پل‌های آهنی بین تکه‌های آهنربا جبران می‌شود. در ضمن قابلیت تضعیف شار نیز نسبت به طرح IPM متعارف افزایش خواهد یافت. در این مقاله با ترکیب دو ایده چند تکه کردن آهنربا در هر قطب و طراحی مناسب پل‌های هوایی نشان داده شد که می‌توان ضمن بهبود قابلیت تضعیف شار و کاهش بیشتر در حجم آهنربای مصرفی، حداقل افت توان را نیز تضمین کرد. در عین حال این ساختار، ساده و بسیار شبیه به طرح موتور IPM متعارف است. در این مقاله همچنین طرح پیشنهادی با دو طرح دیگر مقایسه شد که برتری طرح پیشنهادی را در پی داشت.

مراجع

- [1] R. Dutta and M. F. Rahman, "Design and analysis of an interior permanent magnet (IPM) machine with very wide constant power operation range," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 25-33, Mar. 2008.
- [2] A. M. EL-Refaie and T. M. Jahns, "Optimal flux weakening in surface PM machines using fractional-slot concentrated windings," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 41, no. 3, pp. 790-800, May/June 2005.
- [3] A. M. EL-Refaie and T. M. Jahns, "Comparison of synchronous PM machine types for wide constant-power speed range operation," *COMPEL: The International J. for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 27, no. 5, pp. 967-984, 2008.
- [4] J. S. Lawler, *Field Weakening Operation of AC Machines for Traction Drive Applications*, Ph.D. Dissertation, University of Tennessee, Knoxville, 2009.
- [5] T. Finken, M. Felden, and K. Hameyer, "Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles," in *Proc. of the 2008 Int. Conf. on Electrical Machines, IECM'08*, 5 pp., Sep. 2008.
- [6] A. Hassanpour Isfahani and S. Sadeghi, "Design of a permanent magnet synchronous machine for the hybrid electric vehicle," *World Academy of Science, Engineering and Technology* 45, 2008.
- [7] C. Chris Mi, "Analytical design of permanent-magnet traction-drive motors," *IEEE Trans on Magnetics*, vol. 42, no. 7, pp. 1861-1866, Jul. 2006.
- [8] N. Bianchi, "Electrical machine analysis using finite elements," University of West Florida Published in 2005 by Taylor and Francis Group.
- [9] Y. K. Chin, *A Permanent Magnet Synchronous Motor for an Electric Vehicle*, Sweden, Printed in Sweden Universitetservice US AB, Thesis for Degree of Master of Science, 2004.
- [10] K. C. Kim, D. H. Koo, J. P. Hong, and J. Lee, "A study on the characteristics due to pole-arc to pole-pitch ratio and saliency to improve torque performance of IPMSM," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 43, no. 6, pp. 2516-2518, Jun. 2007.

طرح جدید در توجه هم‌زمان به تأثیر پل‌های آهنی ۱ و ۲ (که در شکل ۶ مشخص شده‌اند) بر عملکرد موتور است.

۶- نتایج شبیه سازی

برای بررسی تأثیر پل هوایی غیر متعارف در کناره‌های آهنربا طرح‌های ۳ و پیشنهادی با هم مقایسه می‌شوند که نتایج در جدول ۴ آورده شده است. سطر آخر جدول ۴ درصد کاهش حجم آهنربای استفاده شده در روتور نسبت به طرح ۱ را نشان می‌دهد. ضخامت پل آهنی بین تکه‌های آهنربا در هر دو طرح برابر ۵ mm است و تنها تفاوت آنها در ساختار پل هوایی کناره‌های آهنربا است. تأثیر ساختار پل غیر متعارف بر شکل و مقدار دامنه چگالی شار فاصله هوایی است. طرح پیشنهادی نسبت به طرح ۳ دارای دامنه چگالی شار بزرگ‌تری در فاصله هوایی است و علت آن، تأثیر ساختار پل هوایی غیر متعارف بر بزرگ‌تر شدن طول مسیر مغناطیسی پل آهنی ۲ (پل آهنی بالای موانع شار) و اشباع بیشتر این مسیر است که سبب افزایش رلوکتانس این مسیر خواهد شد و در نتیجه بخشی از شاری که قبلاً مسیر خود را از طریق پل آهنی ۲ می‌بست و وارد فاصله هوایی نمی‌شد اکنون وارد فاصله هوایی می‌شود و چگالی شار را در فاصله هوایی افزایش می‌دهد. به بیان دیگر ساختار غیر متعارف پل هوایی کاهش چگالی شار ناشی از عریض‌تر شدن پل آهنی ۱ را جبران می‌کند. طرح ۲ مانند طرح ۳ است با این تفاوت که ضخامت پل آهنی بین تکه‌های آهنربا ۲ mm است یعنی کاهش حجم آهنربا در طرح ۳ و پیشنهادی، ۲/۵ برابر بیشتر از طرح ۲ است.

طرح‌های ۲، ۳ و طرح پیشنهادی که دارای آهنرباهای چند تکه شده هستند، مطابق انتظار دارای اندوکتانس محور d بیشتر و محدوده تضعیف شار وسیع‌تری نسبت به موتور نمونه هستند. اما هر سه طرح بنا به دلایلی که ذکر شد نسبت به موتور نمونه دارای افت گشتاور محسوسی هستند. طرح ۳ بیشترین کاهش در حجم آهنربای مصرفی را دارد و همچنین دارای بیشترین محدوده تضعیف شار یا CPSR است که این به سبب عریض‌تر بودن پل آهنی ۱ است و در نتیجه افزایش بیشتر اندوکتانس محور d از یک سو و از بین رفتن مقدار بیشتری از شار پیوندی آهنربا (ψ_m) از سوی دیگر توجیه‌پذیر است، اما افت گشتاور و توان نامی که در این طرح نسبت به سایر طرح‌ها دیده می‌شود عملاً این طرح را ناکارآمد کرده است. طرح ۲ و طرح پیشنهادی از نظر گشتاور، توان نامی و محدوده تضعیف شار عملکرد مشابهی دارند و با این حال کاهش حجم آهنربا در طرح پیشنهادی ۲/۵ برابر بیشتر است.

۷- نتیجه گیری

در یک موتور IPM متعارف با استفاده از ایده چند تکه کردن آهنربا در

وحید سنایی مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را به ترتیب از دانشگاه سمنان در سال ۱۳۸۷ و دانشگاه تفرش در سال ۱۳۹۰ دریافت نمود. ایشان هم اکنون در دانشگاه آزاد بهبهان تدریس می‌کنند. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده شامل طراحی ماشین‌های الکتریکی و کنترل توان راکتیو در سیستم‌های قدرت است.

مهدی اره پناهی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه تبریز و کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق- قدرت را در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۸ از دانشگاه امیرکبیر دریافت کرده است و هم‌اکنون به عنوان استادیار عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه تفرش می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی و ساخت ماشین‌های الکتریکی، الکترومغناطیس محاسباتی و طراحی و ساخت کنترل کننده‌های موتورهای الکتریکی.