

انتخاب مناسب الگوی مغناطیسی و چیدمان آهنربا با هدف بهینه‌سازی چند هدفه موتورهای با آهنربای سطحی

محمد رضا علیزاده پهلوانی^{۱*}، وحید زمانی فرادنبه^۲

۱- دانشیار، ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۰۶، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۱۷)

چکیده: در این مقاله، یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی گشتاور دندانه و چگالی شار با در نظر گرفتن اثر شیار استاتور در ماشین‌های با آهنربای سطحی ارائه شده است. از رابطه تنسور تنش ماکسول برای محاسبه گشتاور دندانه در فاصله هوایی استفاده می‌شود. الگوی مغناطیس‌شوندگی آهنربای شعاعی و موازی در نظر گرفته شده و نتایج به دست آمده از مدل تحلیلی، با روش المان محدود تایید می‌شود. با استفاده از مدل تحلیلی فراهم شده، اقدام به بهینه‌سازی همزمان گشتاور دندانه و نسبت مولفه مکانی اصلی به مولفه‌های مکانی مرتبه بالاتر چگالی شار فاصله هوایی می‌نماییم. گشتاور دندانه و مولفه‌های مکانی چگالی شار، به هندسه آهنربا بسیار حساس می‌باشند. بنابراین، با بهینه کردن هندسه آهنربا می‌توان عملکرد ماشین را بهبود بخشید. از روش‌های طراحی هندسه آهنربا استفاده شده بهینه‌سازی طول کمان آهنربا، جابجایی قطب آهنربا و استفاده از آهنربا با مغناطیس‌شوندگی متفاوت می‌باشد. از آن جهت که دو متغیر ذکر شده در تابع هدف از یک جنس نمی‌باشند، از مقادیر نرمالیزه شده متغیرها در تابع هدف استفاده شده است، برای بهینه‌سازی پارامترهای روتور از الگوریتم جستجوی مستقیم استفاده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مدل تحلیلی، ماشین آهنربای سطحی، الگوی مغناطیس‌شوندگی شعاعی و موازی، گشتاور دندانه، محتوای مولفه‌های چگالی شار

۱- مقدمه

گشتاور دندانه^۱ شناخته می‌شود. در واقع گشتاور دندانه از اثر متقابل بین آهنرباهای روتور و دندانه‌های استاتور حاصل می‌شود. در بیشتر روش‌های ارائه شده برای کاهش ضربه گشتاور، اقدام به کاهش محتوای مولفه‌های مکانی چگالی شار فاصله هوایی ماشین شده است. البته به دلیل غالب بودن نقش گشتاور دندانه در ضربه گشتاور، روش‌های طراحی بهینه متنوعی برای کاهش گشتاور دندانه معرفی شده‌اند.

این روش‌ها به بهینه نمودن ساختار هندسی رتور و یا استاتور می‌پردازند. روش‌های اعمال شده بر روی هندسه استاتور شامل روش‌های مورب کردن ورقه‌های استاتور [۱-۴]، استفاده از شیارهای مجازی روی دندانه‌های استاتور [۲ و ۴-۷]، بهینه‌سازی ابعاد شیارها [۱، ۴ و ۸] و استفاده از دندانه‌های غیریکنواخت استاتور [۹] می‌باشند.

اگرچه این تکنیک‌ها روش‌های کارآمدی هستند ولی نسبت به روش‌های دیگر که بر روی رتور اعمال می‌شوند دارای پیچیدگی

اگرچه ماشین‌های آهنربایی به دلیل امتیازهایی همچون چگالی گشتاور بالا، ساختار بدون جاروبک، کنترل ساده، ضربه توان مناسب و بازدهی بالا دارای برتری‌هایی نسبت به موتورهای القایی می‌باشند، ولی وجود ضربه گشتاور بالا در این ماشین‌ها، از معایب آنها برشمرده می‌شود. ضربه گشتاور ایجاد تنش‌های مکانیکی، ضربه سرعت و سرو صدا را در پی خواهد داشت. ضربه گشتاور در ماشین‌های آهنربایی به دلیل وجود مولفه‌های مکانی چگالی شار، مولفه‌های زمانی جریان آرمیچر و برهم‌کنش این مولفه‌ها می‌باشد.

بنابراین، حذف مولفه‌های مکانی چگالی شار کمک شایانی در حذف ضربه گشتاور می‌باشد. قسمت عمده مولفه‌های مکانی مرتبه پایین که در تولید ضربه گشتاور نقش آفرینی می‌کنند از توزیع غیر سینوسی mmf آهنربا ناشی می‌شوند. آن دسته از مولفه‌های مکانی مرتبه بالا که در ضربه گشتاور نقش عمده‌ای دارند به دلیل شیارهای استاتور ایجاد شده و گشتاور تولید شده توسط آنها به نام

الگوی مغناطیس‌شوندگی موازی توسعه می‌دهیم، همچنین مدل تحلیلی را برای ماشین با جابجایی قطب آهنربا و استفاده از آهنربا با دو نوع مغناطیس‌شوندگی توسعه خواهیم داد. در ادامه، به کمک الگوریتم جستجوی مستقیم، اقدام به بهینه‌سازی پارامترهای روتور هر کدام از ماشین‌ها می‌نماییم. هدف الگوریتم، بهینه‌سازی پارامترهای آهنربا برای داشتن کمترین گشتاور دندانه و بیشترین نسبت مولفه اصلی به مولفه‌های بالاتر چگالی شار فاصله‌هایی است. از آنجایی که این دو کمیت از یک جنس نمی‌باشند از روش نرمالیزه نمودن متغیرها استفاده شده است. در نهایت، نتایج تحلیلی به‌دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی توسط روش المان محدود تایید می‌شود.

۲- مدل تحلیلی

۲-۱- فرضیات و ویژگی‌های مسئله

در مدل تحلیلی ارایه‌شده، فرض‌های زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- از اشباع مغناطیسی چشم‌پوشی می‌شود.
- از حل رابطه پواسون و لاپلاس برای یافتن چگالی شار فاصله‌هایی استفاده شده است.
- تقارن دو بعدی بر مسئله حاکم است. شکل (۱-آ)
- حل مسئله برای ماشین بدون شیار انجام می‌شود و برای در نظر گرفتن اثر شیارها، از یک توزیع جریان‌های سطحی مجازی معادل در مرز هوا و دندانه‌های استاتور استفاده شده است. (شکل ۱-ب)
- ماشین آهنربای سطحی روتور داخلی است و شیار استاتور اسپوکی‌شکل^۵ با شعاع و زاویه ثابت فرض شده است. (شکل ۱-آ)
- توزیع جریان‌های سطحی مجازی معادل در یک الگوریتم تکراری محاسبه می‌شود.

ساختار ماشین در نظر گرفته‌شده و متغیرهای استفاده‌شده در شکل (۱-آ) نشان داده شده‌اند. این متغیرها در ضمیمه نیز تعریف شده‌اند. به جای حل رابطه لاپلاس در فاصله‌هایی شیاردار می‌توان از حل رابطه لاپلاس در یک ماشین بدون شیار استفاده نمود که اثر حذف شیارها به صورت یک جریان سطحی معادل بر روی شعاع

پیاده‌سازی بالاتری می‌باشند. برای بهینه‌سازی ساختار رتور، روش‌هایی همچون مورب کردن آهنربا [۷]، استفاده از آهنرباهای چند تکه [۵]، بهینه‌سازی ابعاد آهنربا^۱ [۳-۱ و ۵]، تغییر شکل آهنربا [۹]، تغییر در چیدمان آهنرباها [۱۱-۱۰]، جابجایی آهنربا^۲ [۷ و ۱۲] و استفاده از آهنرباهای متفاوت در یک قطب^۳ [۱۴-۱۳] ارائه شده است.

همان‌گونه که اشاره شد گشتاور دندانه از اثر متقابل بین شیار استاتور و مغناطیس دائم روتور به وجود می‌آید. بنابراین با انتخاب صحیح عرض آهنربا می‌توان این عامل را به حداقل رساند.

از دید سادگی پیاده‌سازی، روش جابه‌جایی قطب‌ها از ساده‌ترین روش‌ها می‌باشد [۷]. اگرچه جابه‌جا کردن آهنرباهای روتور باعث کاهش دامنه گشتاور دندانه می‌شود، ولی این کار تقارن نیم‌موج فرد ماشین را برهم می‌زند. با حذف تقارن نیم‌موج فرد، توزیع چگالی شار فاصله‌هایی علاوه بر داشتن مولفه‌های فرد، مولفه‌های زوج را نیز دربر خواهد گرفت. وجود مولفه‌های زوج مکانی مرتبه پایین که دارای دامنه قابل توجهی نیز می‌باشند در تولید ضربان گشتاور تاثیرگذار است. این موضوع در [۷] در نظر گرفته نشده است.

استفاده از آهنربا با پسماند مغناطیسی ضعیف‌تر در کناره‌های آهنربا با پسماند مغناطیسی بزرگ، باعث می‌شود شکل موج توزیع چگالی شار به حالت سینوسی نزدیک‌تر شود و نسبت دامنه مولفه اول چگالی شار به مولفه‌های مرتبه بالا افزایش یابد. همچنین با انتخاب عرض مناسب هر کدام از آهنرباها می‌توان بیشینه گشتاور دندانه را کاهش داد [۱۴].

برای بهینه‌سازی گشتاور دندانه توسط هریک از روش‌های گفته‌شده از مدل‌های تحلیلی و یا عددی استفاده شده است. روش‌های عددی همچون روش اجزای محدود اگرچه دقیق می‌باشند ولی نسبت به روش‌های تحلیلی زمانبر بوده و در گام‌های نخست بهینه‌سازی ماشین استفاده از آن‌ها مناسب نیست. در [۵ و ۷] گشتاور دندانه به شکل یک سری فوریه در نظر گرفته شده و کمینه‌سازی گشتاور دندانه به صورت کور و بدون دانستن ضرایب سری فوریه و با حذف مولفه‌های مولفه زوج گشتاور دندانه انجام شده است. بهینه‌سازی مولفه‌های چگالی شار در [۱۵] با ابزار محاسباتی المان محدود^۴ انجام شده است.

در [۱۶] الگوی مغناطیس‌شوندگی آهنربا شعاعی فرض شده است، در این مقاله، مدل تحلیلی ارایه‌شده در [۱۶] را برای آهنربا با

5. spoke-shape

1. optimal pole-arc
2. magnet pole-shifting
3. mixed materials

$$\nabla^2 A_I(r, \phi, \theta_r) = -\nabla \times M(\phi, \theta_r)$$

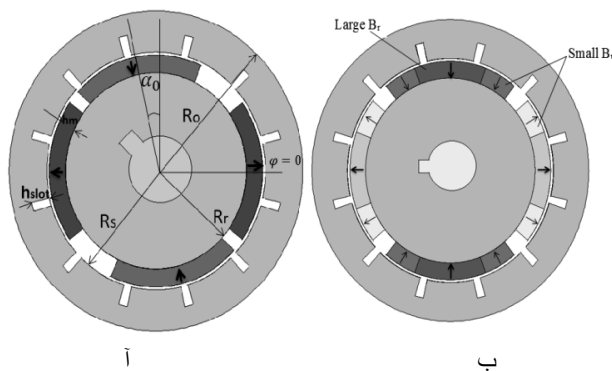
$$\nabla^2 A_{II}(r, \phi, \theta_r) = 0 \quad (3)$$

پارامترهای ماشین نمونه در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱). اطلاعات ماشین

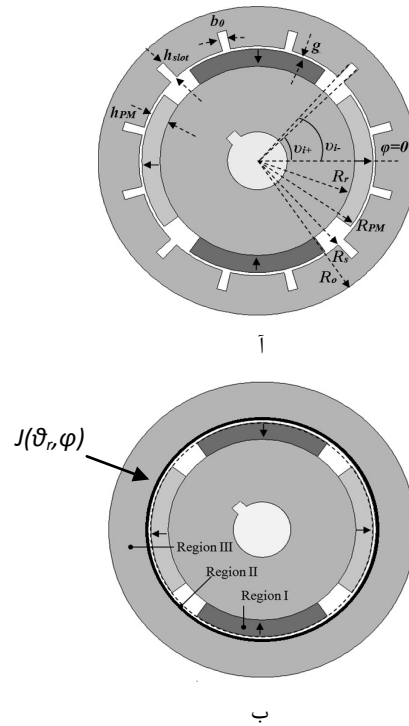
مقدار	نماد	پارامترهای ماشین	
۲	P	تعداد زوج قطب	
۱۲	Q _s	تعداد شیار استاتور	
۲۴/۵ mm	R _r	شعاع روتور	
۴۰ mm	R _o	شعاع خارجی استاتور	
۲۹/۷۵ mm	R _s	شعاع داخلی استاتور	
۰/۷۵ mm	g	فاصله هوایی	
۰/۳۸ T	B _{rem}	پسماند چگالی شار آهنربا	
۱	rμ	نفوذپذیری آهنربا	
۲۹ mm	R _m	ارتفاع آهنربا	
۴۰ mm	L _{stk}	طول محوری ماشین	
۵ mm	h _{slot}	ارتفاع شیار استاتور	
۲ mm	b.	دهانه باز شیار استاتور	
۰/۳۸ T	B _{rem2}	پسماند چگالی شار آهنربا وسط	در ماشین با دو نوع آهنربا
۰/۲۵ T	B _{rem1}	پسماند چگالی شار آهنرباهای کناری	

در این مقاله، روابط تحلیلی چگالی شار و گشتاور دندانه به‌دست‌آمده برای ماشین آهنربای سطحی در [۱۶] را برای ماشین آهنربای سطحی با جابجایی آهنربا روتور (شکل (۲-آ)) و ماشین با آهنرباهای متفاوت در هر قطب (شکل (۲-ب)) توسعه می‌دهیم.



شکل (۲). ماشین آهنربای سطحی: (آ) جابجایی قطب آهنربا، (ب) آهنربا با دو نوع مغناطیس‌شوندگی

داخلی استاتور در نظر گرفته شده است (شکل ۱-ب) [۱۶]. در این شکل، تابع $J(\theta_r, \phi)$ برای لحاظ نمودن اثر دندانه‌های استاتور در نظر گرفته شده است. روش به دست آوردن این تابع و توجیه استفاده از آن در بخش ۲-۲ آورده خواهد شد. نواحی در نظر گرفته‌شده برای حل رابطه لاپلاس و پواسون در شکل (۱-ب) به‌صورت رابطه (۱) و شرایط مرزی مسئله به‌صورت رابطه (۲) می‌باشند.



شکل (۱). ماشین شیاردار: (آ) آهنربای سطحی، (ب) ماشین بدون شیار با اعمال جریان‌های سطحی معادل

$$R_r < R < R_{PM}, \text{ region 1, PM}$$

$$R_{PM} < R < R_s, \text{ region 2, air gap} \quad (1)$$

$$R_s < R < R_o, \text{ region 3, stator yoke}$$

$$\left. \frac{\partial A_{III}}{\partial \phi} \right|_{R=R_o} = 0, \quad \left. \frac{\partial A_I}{\partial r} \right|_{R=R_r} = 0$$

$$\left. \frac{\partial A_{III}}{\partial \phi} \right|_{R=R_s} = \left. \frac{\partial A_{II}}{\partial \phi} \right|_{R=R_s}, \quad \left. \frac{\partial A_{II}}{\partial r} \right|_{R=R_s} = \mu_0 J(\theta_r, \phi) \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial A_{II}}{\partial \phi} \right|_{R=R_{PM}} = \left. \frac{\partial A_I}{\partial \phi} \right|_{R=R_{PM}}, \quad \left. \frac{\partial A_{II}}{\partial r} \right|_{R=R_{PM}} = \left. \frac{\partial A_I}{\partial r} \right|_{R=R_{PM}}$$

روابط پواسون و لاپلاس حاکم بر مسئله در رابطه (۳) آورده شده‌اند.

$$M_{cm} = (-1)^n E_n (1 - \cos(n\pi\alpha_0)), M_{sm} = (-1)^{n+1} E_n \times \sin(n\pi\alpha_0)$$

$$M_{c\phi n} = (-1)^n F_n \sin(n\pi\alpha_0), M_{s\phi n} = (-1)^n F_n \times (1 - \cos(n\pi\alpha_0))$$

$$E_n = \frac{2pB_{rem}}{\mu_0\pi} (X + Y), F_n = \frac{2pB_{rem}}{\mu_0\pi} (X - Y)$$

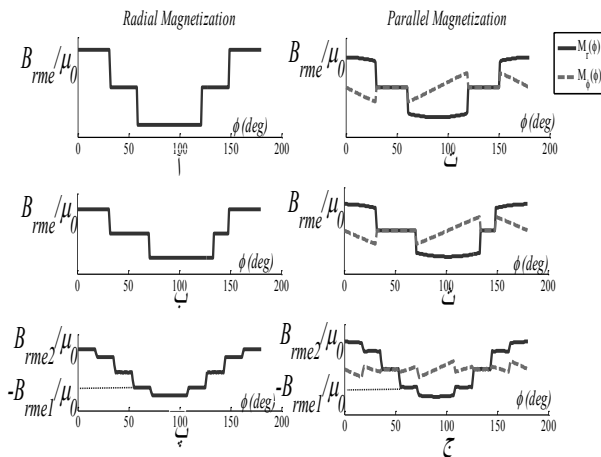
$$X = \frac{\sin(\frac{(np+1)\alpha\pi}{2p})}{np+1}, Y = \frac{\sin(\frac{(np-1)\alpha\pi}{2p})}{np-1} \quad (9)$$

$$M_{cm} = \frac{p(X+Y)(1-\cos(n\pi))}{\mu_0\pi} \left[B_{rem2} + 2B_{rem1} \cos\left(\frac{n\pi(\alpha_1+\alpha_2)}{2}\right) \right]$$

$$M_{s\phi n} = \frac{p(X-Y)(1-\cos(n\pi))}{\mu_0\pi} \left[B_{rem2} + 2B_{rem1} \cos\left(\frac{n\pi(\alpha_1+\alpha_2)}{2}\right) \right]$$

$$X = \frac{\sin(\frac{(np+1)\alpha\pi}{2p})}{np+1}, Y = \frac{\sin(\frac{(np-1)\alpha\pi}{2p})}{np-1}$$

$$M_{sm} = M_{c\phi n} = 0 \quad (10)$$



شکل (۳). توزیع تابع مغناطش آهنرباها برای آهنربا با الگوی مغناطیس‌شوندگی (آ) شعاعی، آهنربای سطحی، (ب) شعاعی، جابجایی آهنربا روتور، (پ) شعاعی، آهنربا با دو نوع مغناطیس‌شوندگی (ت) موازی، آهنربای سطحی، (ث) موازی، جابجایی آهنربا روتور، (ج) موازی، آهنربا با دو نوع مغناطیس‌شوندگی

۲-۲- جریان‌های سطحی معادل

طبق مفاهیم الکترومغناطیس، هر ماده فرومغناطیس قرارگرفته در یک میدان مغناطیسی را می‌توان با محیطی با نفوذپذیری مغناطیسی $(\mu=1)$ و جریان‌های سطحی مدل نمود. این جریان‌های سطحی از رابطه (۱۱) به‌دست می‌آیند که در آن بردار عمود بر سطح ماده فرومغناطیس است [۱۷]. از طرفی طبق تعریف بردار

در رابطه (۳)، M تابع مغناطش آهنرباهای سطحی است که توزیع آن در شکل (۲) آورده شده است. شکل‌های (۳-آ) تا (۳-پ) به‌ترتیب توزیع تابع مغناطش آهنربا با الگوی مغناطیس‌شوندگی شعاعی برای ماشین با آهنربای سطحی، جابجایی آهنربا روتور و آهنربا با دو نوع مغناطیس‌شوندگی است و شکل‌های (۳-ت) تا (۳-ج) به‌ترتیب توزیع تابع مغناطش آهنربا با الگوی مغناطیس‌شوندگی موازی برای ماشین با آهنربای سطحی، جابجایی آهنربا روتور و آهنربا با دو نوع مغناطیس‌شوندگی می‌باشد. در (۴) فوریه تابع مغناطش آهنربا و ضرایب آن برای شکل‌های (۳-آ) تا (۳-ج) در (۵-۱۰) آورده شده است.

$$M_r(r, \phi, \theta_r) = \sum_{n=1}^{\frac{n}{2}} \left[M_{cm} \cos(n\pi\phi - \theta_r) + M_{sm} \sin(n\pi\phi - \theta_r) \right]$$

$$M_\phi(r, \phi, \theta_r) = \sum_{n=1}^{\frac{n}{2}} \left[M_{c\phi n} \cos(n\pi\phi - \theta_r) + M_{s\phi n} \sin(n\pi\phi - \theta_r) \right] \quad (4)$$

$$M_{cm} = \frac{2B_{rem}}{\mu_0 n \pi} \sin\left(\frac{n\pi\alpha}{2}\right) (1 - \cos(n\pi))$$

$$M_{sm} = 0, M_\phi(r, \phi, \theta_r) = 0 \quad (5)$$

$$M_{cm} = (-1)^n \frac{2B_{rem}}{\mu_0 n \pi} \sin\left(\frac{n\pi\alpha}{2}\right) (1 - \cos(n\pi\alpha_0))$$

$$M_{sm} = (-1)^{n+1} \frac{2B_{rem}}{\mu_0 n \pi} \sin\left(\frac{n\pi\alpha}{2}\right) \times \sin(n\pi\alpha_0)$$

$$M_\phi(r, \phi, \theta_r) = 0 \quad (6)$$

$$M_{cm} = \frac{2(1 - \cos(n\pi))}{\mu_0 n \pi} \times \left[B_{rem1} \sin\left(\frac{n\pi[2\alpha_1 + \alpha_2]}{2}\right) + [B_{rem2} - B_{rem1}] \sin\left(\frac{n\pi\alpha_2}{2}\right) \right]$$

$$M_{sm} = 0, M_\phi(r, \phi, \theta_r) = 0 \quad (7)$$

$$M_{cm} = \frac{(1 - \cos(n\pi))pB_{rem}}{\mu_0\pi} (X + Y), M_{s\phi n} = \frac{(1 - \cos(n\pi))pB_{rem}}{\mu_0\pi} (X - Y)$$

$$X = \frac{\sin(\frac{(np+1)\alpha\pi}{2p})}{np+1}, Y = \frac{\sin(\frac{(np-1)\alpha\pi}{2p})}{np-1}$$

$$M_{sm} = M_{c\phi n} = 0 \quad (8)$$

جریان‌های تزریقی بر دیواره شیارها و جریان منتقل شده به شعاع داخلی استاتور باید چگالی شار یکسانی را در فاصله هوایی زیر شیارها ایجاد نمایند. به دلیل آن که این جریان‌های سطحی، تنها در چگالی شار زیر شیارها اثرگذارند، طبق قانون آمپر باید در هر نقطه فاصله هوایی با شعاع r در زیر شیارها، رابطه (۱۳) برقرار باشد.

$$\frac{\mu_0}{2\pi} \int_{R_s}^{R_s+h_{slot}} \frac{J_s(r, v_i, \theta_r)}{(x-r)} dx = \frac{\mu_0 J_{vi}(\theta_r) R_s \Delta\theta}{2\pi(R_s-r)} \quad (13)$$

J_{si} مورد نیاز در (۱۳) به کمک (۱۲) و به صورت (۱۴) مشخص می‌شود که در آن، علامت‌های مختلف به دلیل جهت‌های متفاوت بردار، عمود بر سطح دیواره‌های چپ و راست یک شیار می‌باشند.

$$J_{si\pm}(\theta_r) = \pm \frac{B_{rIII}(r, v_i\pm, \theta_r)}{\mu_0} \quad (14)$$

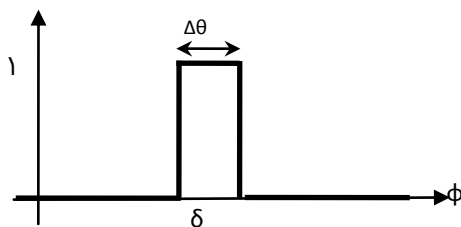
که در آن، v_{i+} و v_{i-} (شکل (۴)) زوایای دیواره‌های چپ و راست i -امین شیار استاتور و $B_{rIII}(r, v_i, \theta_r)$ مولفه شعاعی چگالی شار استاتور در دیواره دندانه با زاویه v_i است در حالی که روتور در موقعیت θ_r قرار دارد. زوایای دیواره دندانه‌ها در (۱۵) آورده شده است.

$$v_{i+} = \frac{(2i-1)\pi}{Q_s} - \frac{b_0}{2R_s}, \quad v_{i-} = \frac{(2i-1)\pi}{Q_s} + \frac{b_0}{2R_s}, \quad i = 1, 2, \dots, Q_s \quad (15)$$

با ساده‌سازی (۱۳)، جریان‌های سطحی مجازی معادل ظاهر شده در شرایط مرزی (۲)، $J(\theta_r, \phi)$ به صورت (۱۶) مشخص می‌شود.

$$J(\theta_r, \phi) = \sum_{i=1}^{Q_s} \left[J_{vi+}(\theta_r) U(v_{i+}) + J_{vi-}(\theta_r) U(v_{i-}) \right] \quad (16)$$

که در آن، تابع $U(\delta)$ یک تابع پالس با دامنه واحد و پهنا $\Delta\theta$ و مرکز δ می‌باشد و در شکل (۵) نشان داده شده است. به منظور در نظر گرفتن جریان‌های سطحی معادل در شرایط مرزی (۲)، نیاز به بیان این جریان به فرم سری فوریه است که در رابطه (۱۷) آورده شده است.



شکل (۵). تابع پالس $U(\delta)$

مغناطش ($M=B/\mu_0-H$)، رابطه بردار شدت میدان مغناطیسی با چگالی شار ($B=\mu_0\mu_r H$) و فرض بزرگ بودن ضریب نفوذپذیری مواد فرومغناطیس می‌توان (۱۱) را به صورت (۱۲) بازنویسی نمود.

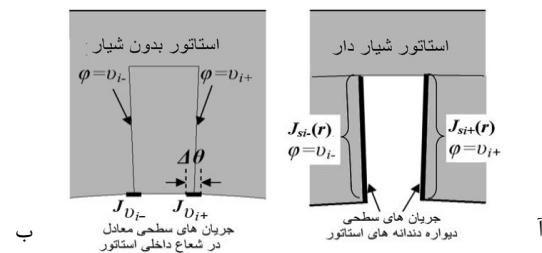
$$\mathbf{J}_s = \mathbf{M} \times \mathbf{a}_n \quad (11)$$

$$\mathbf{J}_s = \frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \mathbf{B} \times \mathbf{a}_n \cong \frac{\mathbf{B}_{rem}}{\mu_0} \quad (12)$$

در استاتور ماشین آهنربایی نیز به دلیل عبور چگالی شار از دندانه‌ها، جریان‌هایی سطحی بر روی دیواره دندانه‌ها تشکیل می‌شود. این جریان‌ها از عبور شار از مسیر شیارها جلوگیری می‌نمایند و سبب فرورفتگی در مولفه شعاعی چگالی شار فاصله هوایی و اعوجاج مولفه مماسی آن می‌گردند. از آنجایی که بردار عمود بر سطح دیواره دندانه‌های استاتور در راستای ϕ است، طبق (۱۲) مولفه شعاعی چگالی شار استاتور در مقادیر جریان‌های سطحی اثرگذار است.

با تزریق جریان‌هایی برابر با منفی جریان‌های سطحی دیواره شیارها در دیواره شیارها، اثر شیارها از بین رفته و استاتور شیاردار مانند یک استاتور بدون شیار رفتار می‌کند. از آنجایی که یافتن مولفه‌های چگالی شار در یک فاصله هوایی بدون شیار بسیار ساده‌تر از فاصله هوایی شیاردار است، می‌توان به جای حل رابطه پواسون و لاپلاس در یک فاصله هوایی شیاردار، این معادلات را در یک فاصله هوایی بدون شیار با حضور جریان‌هایی برابر با منفی جریان‌های سطحی دیواره‌های شیارها حل نمود.

با کم نمودن چگالی شار ایجادشده توسط این جریان‌های سطحی از چگالی شار ناشی از آهن‌ربا در ماشین بدون شیار، چگالی شار ماشین شیاردار به دست می‌آید. البته به منظور ساده‌سازی بیشتر مسئله می‌توان مطابق شکل (۴) جریان‌های تزریقی به دیواره دندانه‌های استاتور را به سطح داخلی استاتور منتقل نمود. جریان‌های انتقالی به شعاع داخلی استاتور دارای پهنا $\Delta\theta$ بوده و درست در زیر دیواره شیارهای استاتور قرار دارند.



شکل (۴). آ) استاتور شیاردار و جریان‌های سطحی، ب) جریان‌های سطحی معادل و جایگزینی فاصله هوایی شیاردار به فاصله هوایی یکنواخت

چگالی شار فاصله هوایی به صورت رابطه (۱۸) به دست می‌آیند. a_{sn} و Y_n به ترتیب از رابطه‌های (۱۹) - (۲۱) به دست می‌آیند.

$$B_{rII} = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \frac{\mu_0}{r} (r^{np} + R_s^{2np} r^{-np}) [a_{cn} \cos(np(\phi - \theta_r)) + a_{sn} \sin(np(\phi - \theta_r))] + Y_n (r^{np-1} + R_r^{2np} r^{-np-1}) (J_n \cos(np\phi) - J'_n \sin(np\phi))$$

$$B_{\phi II} = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \frac{\mu_0}{r} (r^{np} - R_s^{2np} r^{-np}) [a_{cn} \sin(np(\phi - \theta_r)) - a_{sn} \cos(np(\phi - \theta_r))] + Y_n (r^{np-1} - R_r^{2np} r^{-np-1}) (J_n \sin(np\phi) + J'_n \cos(np\phi)) \quad (18)$$

$$a_{cn} = np \times \frac{(np+1)(M_{cm} + M_s \phi_n) R_r^{2np} R_m^{-np+1} + (1-np)(M_{cm} - M_s \phi_n) R_m^{np+1} - 2(M_{cm} + np M_s \phi_n) R_r^{np+1}}{2(1-(np)^2)(R_r^{2np} - R_s^{2np})} \quad (19)$$

$$a_{sn} = np \times \frac{(np+1)(M_{cm} - M_s \phi_n) R_r^{2np} R_m^{-np+1} + (1-np)(M_{cm} + M_s \phi_n) R_m^{np+1} - 2(M_{cm} - np M_s \phi_n) R_r^{np+1}}{2(1-(np)^2)(R_r^{2np} - R_s^{2np})} \quad (20)$$

$$Y_n = \frac{-\mu_0 R_s^{n+1}}{2n R_r - R_s^{2n}} \quad (21)$$

همچنین مولفه شعاعی چگالی شار به دست آمده در آهن استاتور (ناحیه سوم) در (۲۲) آورده شده است که در آن، تابع $C_n(r)$ از (۲۳) به دست می‌آید.

$$B_{rIII}(r, \phi, \theta_r) = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \frac{-2\mu_0 (r^{np} - R_o^{2np} r^{-np})}{r(1 - R_o^{2np} R_s^{-2np})} [a_{sn} \sin(np(\phi - \theta_r)) + a_{cn} \cos(np(\phi - \theta_r))] + C_n(r) [J_n(\theta_r) \cos(np\phi) - J'_n(\theta_r) \sin(np\phi)] \quad (22)$$

$$C_n(r) = Y_n \frac{R_r^{2np} + R_s^{2np}}{R_s^{2np} - R_o^{2np}} (r^{np-1} - R_o^{2np} r^{-np-1}) \quad (23)$$

با استفاده از مولفه‌های چگالی شار و به کارگیری رابطه تنسور

$$J(\theta_r, \phi) = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} J_n(\theta_r) \sin(n\phi) + J'_n(\theta_r) \cos(n\phi)$$

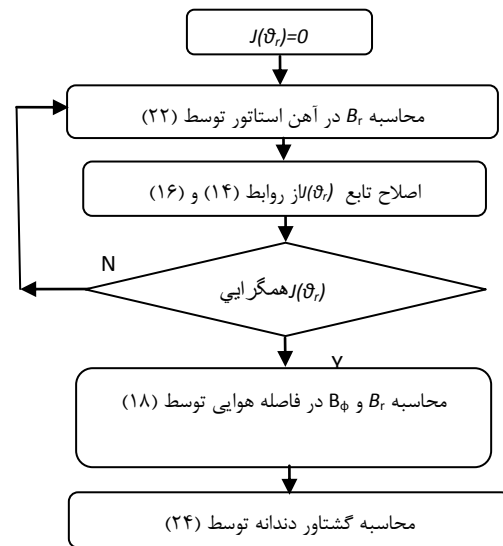
$$J'_n(\theta_r) = \sum_{i=1}^{Q_s} \zeta_n [J_{vi+}(\theta_r) \cos(nv_{i+}) + J_{vi-}(\theta_r) \cos(nv_{i-})]$$

$$J_n(\theta_r) = \sum_{i=1}^{Q_s} \zeta_n [J_{vi+}(\theta_r) \sin(nv_{i+}) + J_{vi-}(\theta_r) \sin(nv_{i-})]$$

$$\zeta_n = \frac{2}{n\pi} \sin\left(\frac{np}{2} \Delta\theta\right) \quad (17)$$

به دلیل آنکه پیش از حل مسئله و یافتن مولفه مماسی چگالی شار در استاتور امکان استفاده از (۱۴) برای یافتن توزیع دقیق و واقعی $J(\theta_r, \phi)$ وجود ندارد، می‌بایست تابع جریان‌های سطحی در یک فرایند تکراری و با پیش فرض اولیه صفر (مطابق با فلوجارت شکل ۶) به دست آیند.

با فرض این که ماشین بدون شیار (تابع جریان‌های سطحی برابر صفر) مقدار Br در آهن استاتور توسط (۲۲) محاسبه می‌شود در گام بعدی با قرار دادن مقدار Br (رابطه (۲۲)) در (۱۴) و (۱۶) مقدار اولیه برای جریان سطحی به دست می‌آید. در مرحله دوم، تکرار مقدار جریان به دست آمده در رابطه (۲۲) قرار می‌گیرد، با قرار دادن رابطه (۲۲) در رابطه‌های (۱۴) و (۱۶) جریان سطحی جدیدی به دست می‌آید. فرایند تکرار تا همگرایی جریان سطحی ادامه می‌یابد.



شکل (۶). فلوجارت یافتن توزیع مولفه‌های چگالی شار و جریان‌های سطحی معادل مجازی

۳-۲- روابط چگالی شار و گشتاور دندانه

با اعمال شرایط مرزی (۲) و حل (۳) با استفاده از روش جداسازی متغیرها برای ماشین آهنربایی، مولفه‌های شعاعی و مماسی

رابطه (۱۲) به دست می‌آید. f_1 و f_2 به ترتیب بیشینه گشتاور دندانه و THD چگالی شار بر حسب موقعیت روتور می‌باشد. از آن جایی که دو تابع هدف بالا از یک جنس نمی‌باشند، از مقادیر نرمالیزه شده و بدون واحد دو زیرتابع در محاسبه تابع هدف استفاده شده است.

۳-۲- نرمالیزه کردن توابع هدف

$$g_{pu}(x) = \frac{g(x) - G_{\min}}{G_{\max} - G_{\min}} \quad (26)$$

اگر G_{\min} و G_{\max} به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر تابع g بر روی فضای جستجوی $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ باشد، آنگاه مقدار نرمالیزه شده g در x ، $g_{pu}(x)$ به صورت رابطه (۲۶) تعریف می‌شود [۱۸].

$$F = w_1 f_{1pu} + w_2 f_{2pu} \quad (27)$$

بنابراین پس از محاسبه زیرتوابع f_1 و f_2 در تمام نقاط فضای جستجو، مقادیر f_{1pu} و f_{2pu} محاسبه می‌شوند. سپس مقدار تابع هدف نهایی در تمام نقاط فضای جستجو به صورت (۲۷) محاسبه می‌گردد.

جدول (۲). بازه و گام تغییر متغیرهای طراحی

بازه تغییرات	گام تغییرات	پارامتر	روش بهینه‌سازی
[0.6-0.9]	0.01	α	طول کمان آهنربا
[0.6-0.9]	0.01	α	جابجایی قطب آهنربا
[0-(1- α)*90deg]	1 deg	α_0	آهنربا
[0.3-0.7]	0.01	α_2	ماشین با دونوع آهنربا
$[Z - (\frac{0.9 - \alpha_2}{2})]$	0.01	α_1	آهنربا

که در آن، زیرنویس pu نمایانگر مقادیر نرمالیزه و هریک از این ضرایب وزنی (w_1, w_2)، اهمیت تابع هدف نظر خود را نشان می‌دهند. بازه تغییرات متغیرهای مورد نظر در فضای جستجو در جدول (۲) آورده شده است.

$$\begin{cases} \text{if } (0.6 - \alpha_2) < 0 \Rightarrow Z = 0 \\ \text{else } Z = \frac{0.6 - \alpha_2}{2} \end{cases} \quad (28)$$

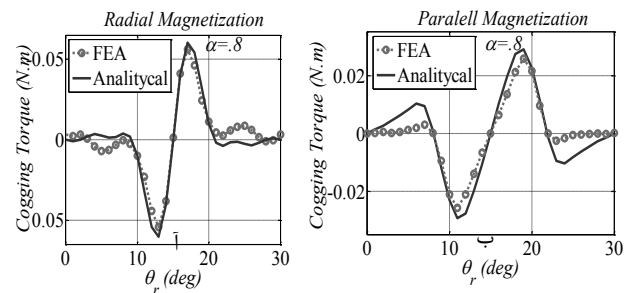
α در جدول (۲) طول نسبی کمان آهنربا، α_0 میزان جابجایی آهنربا روتور بر حسب درجه مکانیکی، α_2 طول نسبی کمان آهنربا با پسماند مغناطیسی بزرگ و α_1 طول نسبی کمان هر کدام از

$$T_{cog}(\theta_r) = \frac{l_{stk} r^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_r(r, \varphi, \theta_r) B_\varphi(r, \varphi, \theta_r) d\varphi = 2\pi p l_{stk} \sum_{n=1,2}^{\infty} Y_n (R_s^{2np} - R_r^{2np}) \quad (24)$$

$$[(a_{cn} J'_n + a_{sn} J_n) \sin(np\theta_r) + (a_{sn} J'_n - a_{cn} J_n) \cos(np\theta_r)]$$

تنش ماکسول، گشتاور دندانه به صورت رابطه (۲۴) به دست می‌آید.

شکل (۷)، گشتاور دندانه به روش تحلیلی و المان محدود برای ماشین آهنربای سطحی با الگوی مغناطیس‌شوندگی شعاعی و موازی را نشان می‌دهد. بیشینه گشتاور دندانه برای ماشین با الگوی مغناطیس‌شوندگی شعاعی و موازی و با طول نسبی کمان آهنربا ۰٫۸ به ترتیب برابر ۰٫۰۵ و ۰٫۰۳ نیوتون متر می‌باشد، که این مقدار بهینه نمی‌باشد. در قسمت ۳ با استفاده از سه روش طراحی آهنربا روتور به بهینه‌سازی، پارامترهای روتور می‌پردازیم.



شکل (۷). گشتاور دندانه برای ماشین آهنربای سطحی با الگوی مغناطیس‌شوندگی (آ) شعاعی، (ب) موازی

۳- بهینه‌سازی پارامترهای ماشین

۳-۱- بیان تابع هدف

تابع هدف در نظر گرفته شده دربرگیرنده دو زیرتابع به صورت (۲۵) است. به منظور بهینه کردن مقدار تابع هدف، از روش بهینه‌سازی چند هدفه با اعمال روش جستجوی مستقیم و وزن‌دهی زیرتوابع

$$f_1 = T_{cog}, \quad f_2 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^8 |B_n|^2}}{|B_{r1}|} \quad (25)$$

مورد نظر استفاده شده است. در واقع هدف از بهینه‌سازی، کمینه کردن گشتاور دندانه همزمان با کمینه نمودن درصد THD چگالی شار می‌باشد.

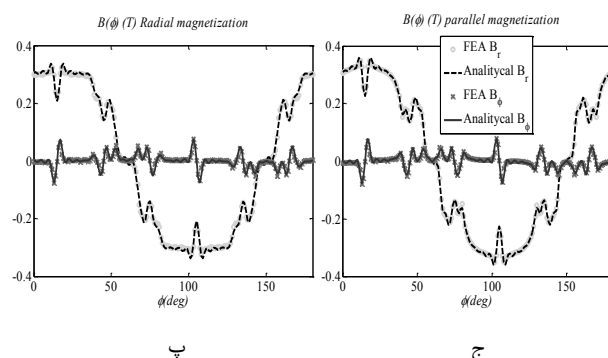
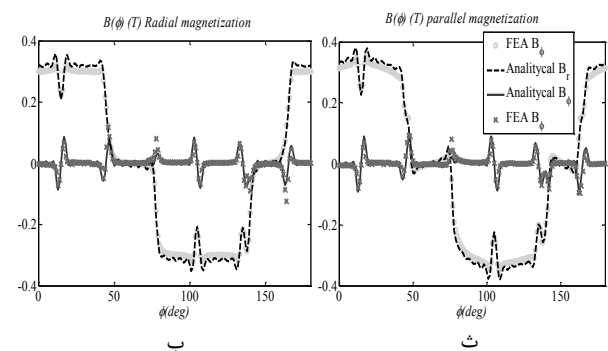
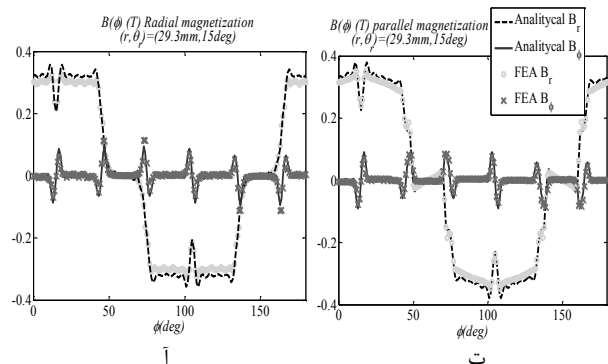
در رابطه (۲۵)، B_{rn} مولفه n-ام شعاعی چگالی شار است که از

به ترتیب در جدول‌های (۳ و ۴) آورده شده‌اند.

همچنین مقادیر تابع هدف و زیرتابع‌های آنها نیز گزارش شده است. پارامترهایی از ماشین که در جدول‌های (۳ و ۴) آورده نشده‌اند مانند پارامترهای اصلی ماشین، در جدول (۱) در نظر گرفته شده‌اند.

۴- نتایج

شکل (۸) مربوط به توزیع چگالی شار در راستای مماسی و عمودی در فاصله هوایی می‌باشد، روش تحلیلی توسط روش المان



شکل (۸). بهینه چگالی شار عمودی و مماسی فاصله هوایی برای ماشین با الگوی مغناطیس‌شوندگی شعاعی و روش (آ) بهینه‌سازی کمان آهنربا، (ب) جابجایی آهنربا، (پ) آهنربا متفاوت در یک قطب، همچنین ماشین با الگوی مغناطیس‌شوندگی موازی و روش روش (ت) بهینه‌سازی کمان آهنربا، (ث) جابجایی آهنربا، (ج) آهنربا متفاوت در یک قطب

محدود تأیید شده است. شکل‌های (۸-آ) تا (۸-پ) به ترتیب بهینه

جدول (۳). مقادیر بهینه برای ماشین با الگوی مغناطیس‌شوندگی شعاعی

روش	پارامتر	مقدار پارامتر بهینه	واحد
طول کمان آهنربا	α	۰/۷	-
	f_1	۰/۰۲۲	N.m
	f_2	٪۲۳	-
	F	۰	-
جابجایی قطب آهنربا	α	۰/۶۹	Deg
	α_0	۴	-
	f_1	۰/۰۰۳	N.m
	f_2	٪۲۴/۷	-
ماشین با دونوع آهنربا	α_1	۰/۱۶	-
	α_2	۰/۵۲	-
	f_1	۰/۰۰۷	N.m
	f_2	٪۱۳	-
	F	۰/۰۴۷	-

جدول (۴). مقادیر بهینه برای ماشین با الگوی مغناطیس‌شوندگی موازی

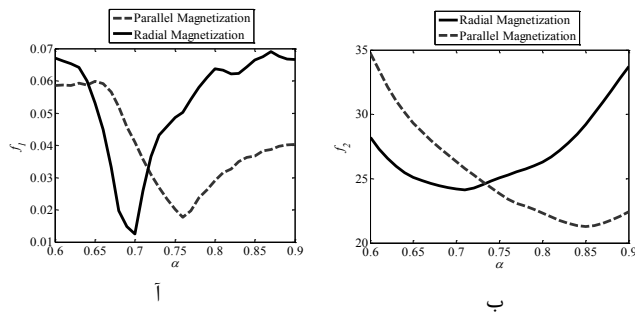
روش بهینه سازی	پارامتر	مقدار پارامتر بهینه	واحد
طول کمان آهنربا	α	۰/۷۶	-
	f_1	۰/۰۱۷	N.m
	f_2	٪۲۳	-
	F	۰/۰۶۸	-
جابجایی قطب آهنربا	α	۰/۷۴	Deg
	α_0	۴	-
	f_1	۰/۰۰۷	N.m
	f_2	٪۲۵	-
ماشین با دونوع آهنربا	α_1	۰/۱۶۵	-
	α_2	۰/۵۵	-
	f_1	۰/۰۱	N.m
	f_2	٪۱۱	-
	F	۰/۰۱۴	-

آهنرباهای کناری با پسماند مغناطیسی کوچک می‌باشد. Z در جدول (۲) از رابطه (۲۸) به دست می‌آید.

متغیرهای بهینه به دست آمده برای ماشین با الگوی مغناطیس‌شوندگی شعاعی و موازی در گستره و گام تغییرات جدول (۲) برای تابع هدف (۲۷) و ضرایب وزنی انتخابی برابر با $(w_1, w_2) = (1, 1)$

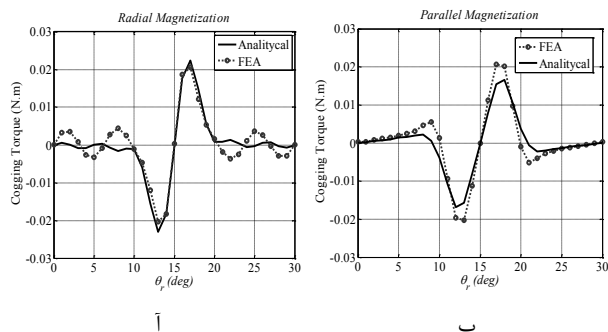
راستای عمودی و شار برای ماشین با دو نوع آهنربا در هر قطب (ج و پ) نسبت به نمودار ماشین‌های دیگر به سینوسی بیشتر شبیه می‌باشد.

در ماشین‌های آهنربای سطحی شکل (۱) مقدار گشتاور دندانه، به دهانه باز شیار استاتور و طول کمان آهنربا بستگی دارد و اندازه مولفه‌های چگالی شار، به طول کمان آهنربا وابسته می‌باشد. شکل



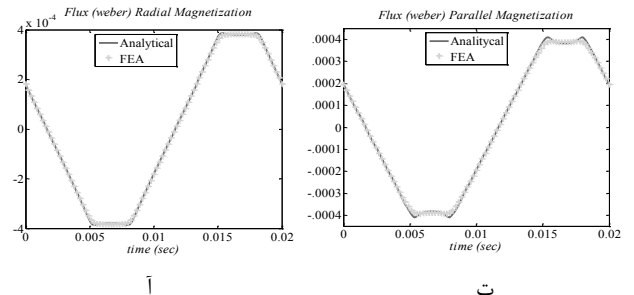
شکل (۱۰). تغییرات (آ) گشتاور دندانه، (ب) %THD چگالی شار فاصله هوایی، برحس طول نسبی کمان آهنربا برای ماشین شکل (۱)

(۱۰-آ) مربوط به نمودار تغییرات بیشینه گشتاور دندانه (f_1) ماشین شکل (۱) با الگوی مغناطیس‌شوندگی موازی و شعاعی است و شکل (۱۰-ب) مربوط به تغییرات %THD چگالی شار فاصله هوایی (f_2) ماشین شکل (۱) با الگوی مغناطیس‌شوندگی موازی و شعاعی می‌باشد. میزان حساسیت گشتاور دندانه به طول نسبی کمان آهنربا بیشتر از حساسیت %THD چگالی شار فاصله هوایی می‌باشد (شکل (۱۰)). میزان حساسیت گشتاور دندانه به طول نسبی کمان آهنربا برای ماشین با الگوی مغناطیس‌شوندگی شعاعی بیشتر از موازی می‌باشد (شکل (۱۰-آ)).

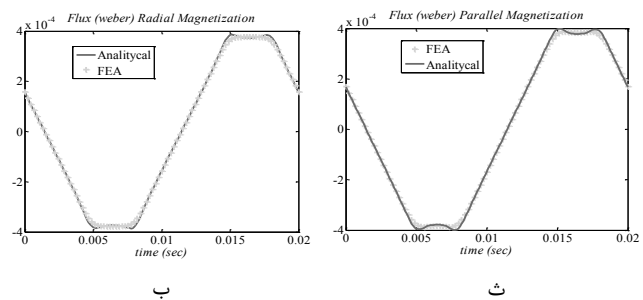


شکل (۱۱). گشتاور دندانه برای ماشین شکل (۱) با الگوی مغناطیس‌شوندگی (آ) شعاعی، (ب) موازی

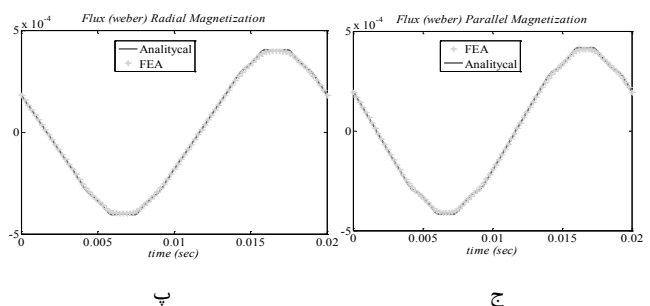
چگالی شار فاصله هوایی ماشین آهنربای سطحی با الگوی مغناطیس‌شوندگی شعاعی برای بهینه‌سازی کمان آهنربا، جابجایی آهنربا روتور و آهنربا متفاوت در یک قطب می‌باشد و شکل‌های (۳-ت) تا (۳-ج) به ترتیب مربوط به ماشین با الگوی مغناطیس‌شوندگی موازی است. توزیع چگالی شار در فاصله هوایی



آ ت



ب ث



ب ج

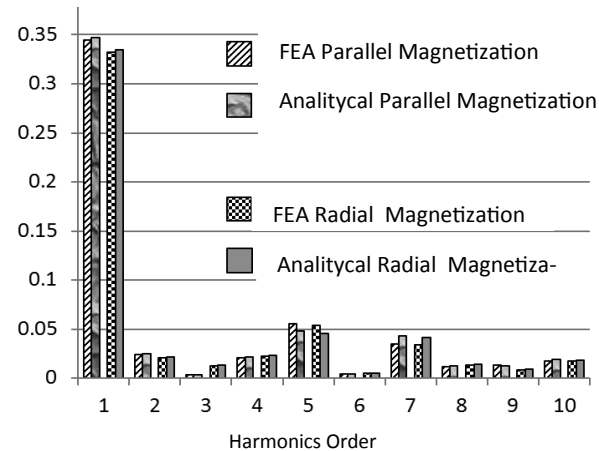
شکل (۹). بهینه شار ماشین با ساختار بیان شده در شکل (۸)

در شعاع ۲۹/۳ میلی‌متر) و موقعیت ۱۵ درجه روتور با پارامترهای جدول (۱) و پارامترهای بهینه جدول‌های (۳) و (۴) است.

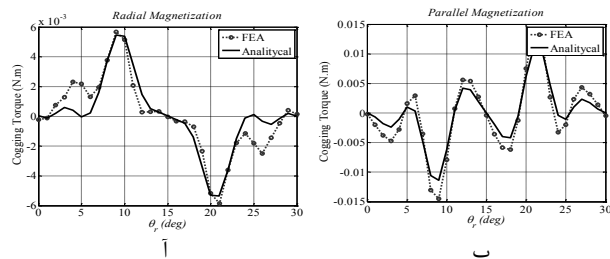
شکل (۹) مربوط به شار عبوری از یک کلاف در حالت بی‌باری است. ابتدا کلاف $(7\pi/12)$ و انتهای آن $(13\pi/12)$ می‌باشد. شکل‌های (۹-آ) تا (۹-ج) به ترتیب توزیع شار برحسب زمان برای ساختارهای ماشین بیان شده در شکل (۸) می‌باشد. روش تحلیلی با روش المان محدود تأیید شده است.

روش المان محدود، دقت بالای روش تحلیلی را در پیش‌بینی چگالی شار و شار ماشین نشان می‌دهد. نمودارهای چگالی شار در

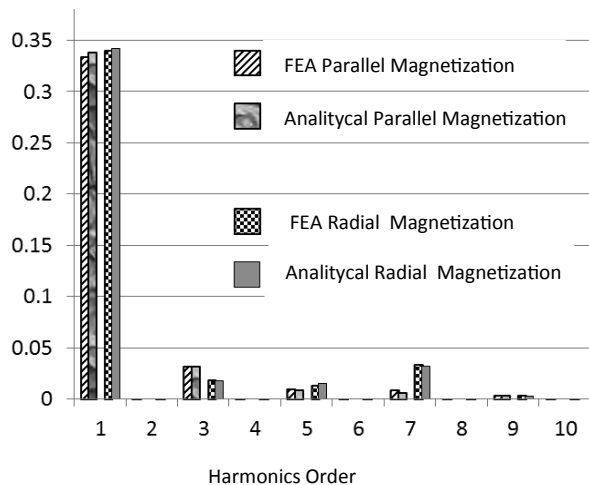
فرد ماشین بهم بخورد و توزیع چگالی شار علاوه بر مولفه‌های فرد دارای مولفه‌های زوج نیز باشد بنابراین، این روش بدترین وضعیت را از لحاظ THD% چگالی شار فاصله هوایی دارا می‌باشد. دو درجه آزادی (طول نسبی کمان آهنربا و میزان جابجایی آهنربا) در بهینه‌سازی گشتاور دندانه باعث شده است تا بیشینه گشتاور دندانه در این روش کمتر از روش بهینه‌سازی با طول کمان آهنربا باشد.



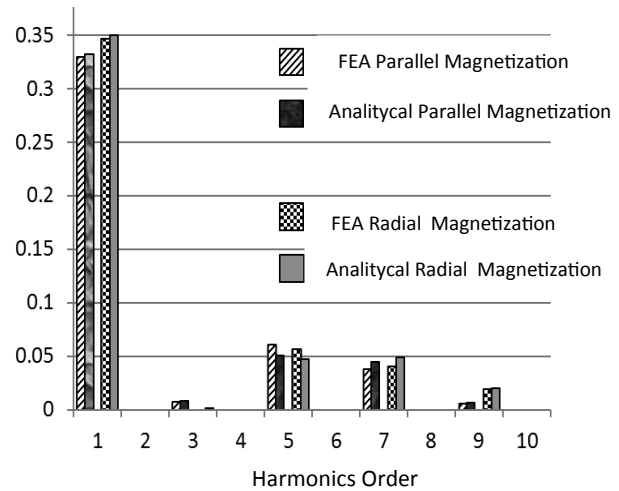
شکل (۱۴). طیف ده مولفه اول بهینه چگالی شار برای ماشین با جابجایی آهنربا



شکل (۱۵). گشتاور دندانه برای ماشین با آهنربا متفاوت در یک قطب و با الگوی مغناطیس‌شوندگی (آ شعاعی، ب موازی



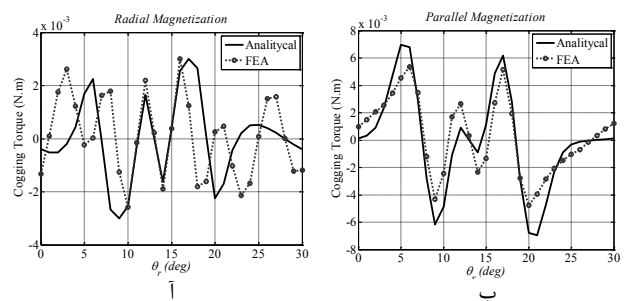
شکل (۱۶). طیف ده مولفه اول بهینه چگالی شار برای ماشین با آهنربا متفاوت در یک قطب



شکل (۱۲). طیف ده مولفه اول بهینه چگالی شار برای ماشین شکل (۱)

کمیته تابع F در رابطه (۲۷) برای ماشین شکل (۱) با الگوی مغناطیس‌شوندگی شعاعی در $\alpha = 0.7$ و الگوی مغناطیس‌شوندگی موازی $\alpha = 0.76$ می‌باشد، از اطلاعات جدول‌های (۳ و ۴) و همچنین نمودار شکل (۱۰) نیز مشخص می‌باشد. شکل‌های (۱۱-آ) و (۱۱-ب) به ترتیب نمودار بهینه گشتاور دندانه با الگوی مغناطیس‌شوندگی شعاعی و موازی می‌باشد. روش تحلیلی با روش المان محدود تأیید شده است. شکل (۱۲) طیف ده مولفه اول بهینه چگالی شار برای ماشین شکل (۱) می‌باشد. مقادیر شکل‌های (۱۱ و ۱۲) با اطلاعات جدول (۳ و ۴) مطابقت دارد. به علت تقارن نیم‌موج فرد، ماشین تنها مولفه‌های فرد چگالی شار را دارا می‌باشد.

شکل (۱۳-آ) و (۱۳-ب) به ترتیب نمودار بهینه گشتاور دندانه برای ماشین با جابجایی آهنربا (۲-آ) با الگوی مغناطیس‌شوندگی



شکل (۱۳). گشتاور دندانه برای ماشین با جابجایی آهنربا و با الگوی مغناطیس‌شوندگی (آ شعاعی، ب موازی

شعاعی و موازی می‌باشد. روش تحلیلی بار، روش المان محدود تأیید شده است. شکل (۱۴) طیف ده مولفه اول بهینه چگالی شار برای ماشین با جابجایی آهنربا با الگوی مغناطیس‌شوندگی شعاعی و موازی می‌باشد. جابجایی آهنربا روتور باعث می‌شود تقارن نیم موج

۶- مراجع

- [1] L. Zhu, S. Z. Jiang, and Z. Q. Zhu, "Analytical method for minimizing cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 45, no. 4, pp. 2020-2031, 2009.
- [2] T. M. Jahns and W. L. Soong, "Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives-a review," *IEEE Trans. on Indus. Electronics*, vol. 43, no. 2, pp. 321-330, 1996.
- [3] D. C. Hanselman, "Effect of skew, pole count and slot count on brushless motor radial force, cogging torque and back EMF," *Elect. Eng. Proc. Elect. Power Appl.* vol. 44, no. 5, pp. 325-330, 1997.
- [4] M. S. Islam and T. Sebastian, "Issues in reducing the cogging torque on mass produced permanent magnet brushless dc motor," *IEEE Trans. On Magn.*, vol. 43, no. 9, pp. 813-820, 2007.
- [5] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Trans. on Energy Convers.*, vol. 15, no. 4, pp. 407-412, 2000.
- [6] Mini Dai, A. Keyhani, and T. Sebastian, "Torque ripple analysis of a pm brushless dc motor using finite element method," *IEEE Trans. on Energy Convers.*, vol. 19, no.1, pp. 40-45, 2004.
- [7] N. Bianchi and S. Bolognani, "Design techniques for reducing the cogging torque in surface mounted PM motors," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 38, no.5, pp. 1259-1265, 2002.
- [8] S. M. Hwang and J. B. Eom, etc, "various design techniques to reduce cogging torque by controlling energy variation in permanent magnet motors," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 2806-2909, 2001.
- [9] S. M. Hwang and J. B. Eom, "Cogging torque and acoustic noise reduction in permanent magnet motors by teeth pairing," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 36, no. 5, pp. 3144-3146, 2000.
- [10] Y. Lin, Y. Hu, and T. Lin, "A method to reduce the cogging torque of spindle motors," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 209, no. 1-3, pp. 180-182, 2000.
- [11] N. Bianchi and S. Bolognani, "Torque Harmonic Compensation in a Synchronous Reluctance Motor," *IEEE Trans. on Energy Conv.*, vol. 23, no. 2, pp. 466-473, 2008.

شکل‌های (۱۳ و ۱۴) با اطلاعات جدول‌های (۳ و ۴) مطابقت دارد. با انتخاب طول نسبی کمان آهنربا میانی (α_1) و کناری (α_2) برابر با مقادیر بهینه جدول‌های (۳ و ۴) گشتاور دندانه و %THD چگالی شار در کمترین مقدار خود می‌باشند. شکل (۱۵-آ) و (۱۵-ب) بترتیب نمودار بهینه گشتاور دندانه برای ماشین (۲-ب) با الگوی مغناطس شونده‌گی شعاعی و موازی را نشان می‌دهد. روش تحلیلی با روش المان محدود تأیید شده است. شکل (۱۶) طیف ده مولفه اول بهینه چگالی شار برای ماشین شکل (۲-ب) می‌باشد. استفاده از آهنربا با مغناطیس شونده‌گی کوچکتر در کناره‌ها باعث می‌شود شکل توزیع چگالی شار به سینوس نزدیک‌تر شود و بنابراین THD چگالی شار در فاصله هوایی کاهش می‌یابد.

توان خروجی ماشین، نسبت مستقیم با مولفه اول ولتاژ در مولفه اول جریان دارد. هارمونیک اول ولتاژ نیز رابطه مستقیم با چگالی شار عبوری از فاصله هوایی دارد، بنابراین، توان خروجی ماشین با نسبت مولفه اول جریان در مولفه اول چگالی شار فاصله هوایی رابطه مستقیم دارد. در طراحی روتور جریان آرمیچر تغییر پیدا نمی‌کند. بنابراین، می‌توان بیان کرد، توان خروجی با مولفه اول چگالی شار رابطه مستقیم دارد. با توجه به شکل‌های (۱۲، ۱۴ و ۱۶) اندازه مولفه اول چگالی شار با طراحی روتور دچار تغییرات زیادی نشده است. بنابراین، روش‌های بیان‌شده تغییری در توان خروجی ماشین ایجاد نمی‌نمایند.

۵- نتیجه‌گیری

گشتاور دندانه و مولفه‌های توزیع چگالی شار، به هندسه آهنربا روتور وابسته است. با توجه به اطلاعات جداول (۳ و ۴) اگرچه جابجایی آهنربا روتور، موثرترین و ساده‌ترین روش کاهش گشتاور دندانه است، ولی جابجایی قطب آهنربا باعث می‌شود تقارن فرد توزیع چگالی شار به هم بخورد و توزیع شار علاوه‌بر مولفه‌های فرد، مولفه زوج نیز داشته باشد. مولفه‌های زوج مرتبه پایین دامنه قابل توجهی دارند؛ بنابراین، روش جابجایی آهنربا بدترین وضعیت THD چگالی شار را دارا می‌باشد. روش استفاده از آهنربا با مغناطیس شونده‌گی کوچکتر در کناره‌ها باعث می‌شود شکل توزیع چگالی شار به سینوس نزدیک‌تر شود و اندازه‌های مولفه‌های مرتبه بالاتر چگالی شار کاهش یابد. بنابراین، از لحاظ THD چگالی شار، این روش بهترین روش می‌باشد.

ضمایم

نماد متغیرهای به کار رفته در روابط مقاله به صورت زیر است.

R_{PM}	شعاع مرز میان هوا و آهنربا (m)
R_s	شعاع داخلی استاتور (m)
R_o	شعاع یوغ استاتور (m)
A	اندازه بردار پتانسیل مغناطیسی (Wb/m)
ϑ_r	موقعیت روتور (deg)
h_{slot}	عمق شیار (m)
γ_s	گام دندانه (deg)
γ_{so}	گام دهانه باز شیار (deg)
Q_s	تعداد شیارهای استاتور
B_r	مولفه شعاعی چگالی شار (T)
B_ϕ	مولفه مماسی چگالی شار (T)
T_{cog}	گشتاور دندانه (N.m)
h_m	ضخامت آهنربا (m)
B_{rl}	مولفه شعاعی چگالی شار فاصله هوایی (T)
B_{rll}	مولفه شعاعی چگالی شار در آهن استاتور (T)
α	نسبت کمان آهنربا به کمان قطب
α_0	میزان جابجایی آهنربا (deg)
b_0	دهانه باز شیار (m)

- [12] D. Wang, X. Wang, and etc, "Optimization of Magnetic Pole Shifting to Reduce Cogging Torque in Solid-Rotor Permanent-Magnet Synchronous Motors," IEEE Trans. on Magn., vol. 46, no. 5, pp. 1228-1234, 2010.
- [13] A. H. Isfahani, S. Vaez-Zadeh, and M. A. Rahman, "Using modular poles for shape optimization of flux density distribution in permanent magnet machines," IEEE Trans. Magn, vol. 44, no. 8, pp. 2009-2015, 2008.
- [14] L. Wu and Z. Q. Zhu, "Analytical Modeling of Surface-Mounted PM Machines Accounting for Magnet Shaping and Varied Magnet Property," IEEE Trans. Magn., vol. 50, no. 7, 2014.
- [15] Z. Azar and Z. Q. Zhu, "Influence of Electric Loading and Magnetic Saturation on Cogging Torque, Back-EMF and Torque Ripple of PM Machines," IEEE Trans. on Magn., vol. 48, no. 10, pp. 2650-2958, 2012.
- [16] S. T. Boroujeni and V. Zamani, "A Novel Analytical Model for No-Load, Slotted, Surface-Mounted PM Machines: Air gap Flux Density and Cogging Torque," IEEE. Trans. on Magn., vol. 51, no. 4, 2015.
- [17] D. K. Cheng, "Field and Wave Electromagnetics," Addison Wesley Publishing Company, 1983.
- [18] A. Varahram, J. R. Mohassel, and K. Mafinezhad, "Optimization of Array Factor in Linear Arrays using Modified Genetic Algorithm," International Journal of Engineering, Trans. B, vol. 174, no. 6, pp. 367-380, 2004.

Optimal Pole-Shaping in Surface-Mounted PM Machines using Analytical Modeling: Cogging Torque and Flux Density Harmonics

M. R. Alizadeh Pahlavani*, V. Zamani Faradonbeh

Malek-Ashtar University of Technology, Tehran

(Receive: 2015/01/26, Accept: 2015/12/08)

Abstract

An analytical model for prediction of air gap flux density and cogging torque in slotted Surface PM (SPM) machines have been presented. Cogging torque has been calculated by integrating the Maxwell stress tensor inside the air gap. Two different magnetization patterns (radial and parallel) have been considered and their results have been compared with each other. The obtained model has been verified with Finite Element Analysis (FEA). Using the proposed model, the cogging torque and low-order harmonics of the magnetic flux density have been optimized. The cogging torque and air-gap flux density THD are very sensitive to the pole-shaping, thus changing the pole-shaping optimization can be obtained. Three methods (optimal pole-arc, magnet pole-shifting and mixed materials) have been used to design pole-shaping in SPM machines. A weighted normalizing method has been applied with direct search method to find the optimum solution. Finally, the validity of the proposed model and the obtained results has been verified with FEA.

Keywords: analytical model, surface-mounted PM motors, parallel and radial magnetization, cogging torque, flux density harmonics

* Corresponding Author Email: Mr_Alizadehp@mut.ac.ir