مقایسه دو روش کاهش گشتاور دندانه‌ای در ماشین تکفاز ۶ قطب مغناطیس دائم با آهن‌ربای سطحی

امیرحسین توکل‌زاده(۱) – جواد فیض(۲) – غضنفر شاهقلیان(۳)
(۱) کارشناس ارشد - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد
(۲) استاد - دانشکده فنی، دانشگاه تهران
(۳) استادیار - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

تاریخ دریافت: بهار ۱۳۹۱ تاریخ پذیرش: زمستان ۱۳۹۱

خلاصه: ماشین‌های مغناطیس‌دائم با آهن‌ربای سطحی پرکاربردترین ساختار روتور را در این نوع ماشین‌ها دارا هستند. در ماشین‌های شیاردار، ویژگی‌های عکس العمل ناچیز آرمیچر و توانایی تحمل اضافه بار زیاد را می‌توان با انتخاب آهن‌رباهای سطحی به دست آورد. یک فاصله هوایی یکنواخت، طبیعت اصلی موتور آهن‌ربای دائم، ساختار آهن‌ربای سطحی و بدون شیار است. گشتاور دندانه‌ای، از رلوکتانس متغیر فاصله هوایی به دلیل وجود شیارها به وجود می‌آید. گشتاور دندانه‌ای را می‌توان به روشهای مختلف کاهش داد. در این مقاله دو روش جابه‌جایی و قطعه‌ای کردن آهن‌ربای دائم منصوب بر روی موتور بررسی شده و عمل آنها مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نشان داده می‌شود که در این ساختار، شیوه جابه‌جایی آهن‌رباها، بیشترین تأثیر را در کاهش گشتاور دندانه‌ای دارد.

کلمات کلیدی: ماشین مغناطیس دائم با آهن‌ربای سطحی، انتقال آهن‌ربا، آهن‌ربای قطعه‌ای.

۱- مقدمه

در ماشین‌های مغناطیس دائم با آهن‌ربای سطحی (SMPM) آهن‌رباها روی سطح روتور قرار می‌گیرند و پرکاربردترین ساختار روتور این را نوع ماشین‌ها دارا هستند [۱]-[۳]. آهن‌رباها روی سطح روتور چسبانده می‌شوند و با نوارهای فایبرگلاس یا فایبرکربن به آهن‌رباهای دیگر محکم می‌شوند. ماشین‌های با آهن‌ربای سطحی آسان‌تر از دیگر ماشین‌های مغناطیس دائم تولید می‌شوند و در نتیجه هزینه تولید آن کمتر است. بزرگترین عیب این ماشین‌ها، پایداری آن‌ها در برابر میدان‌های مغناطیس‌زداست. آهن‌ربا همچنین تحت نیروی گریز از مرکز شدیدی است. اما در سرعت‌های نه چندان زیاد نوارهای فایبرگلاس به خوبی آهنرباها را در برابر نیروی گریز از مرکز محافظت می‌کنند. از آنجا که ضریب نشتی آهنربا با نشتی هوا برابر است رلوکتانس محورهای d و q برابرند. ماشین‌های SMPM قطب برجسته ندارند و گشتاور تولید شده فقط ناشی از تأثیر متقابل بین جریان‌های استاتور و آهن‌ربا است. آهن‌ربا به ندرت کل گام قطب را پوشش می‌دهد. بنابراین هیچ شاری از روی فاصله هوایی بین آهن‌رباها عبور نمی‌کند. کمان کامل قطب ۱۸۰ درجه الکتریکی است و یک شکل موج ولتاژ کامل تولید می‌کند، ولی این امر هارمونیک‌های جریان را افزایش می‌دهد. با کاهش کمان قطب و پر کردن جای خالی آن‌ها با فلزهای نرم، شکل موج شار خروجی، سینوسی‌تر می‌شود و این تقلیل هارمونیک‌ها و تلفات روتور را در پی دارد. گشتاور دندانه‌ای را می‌توان به روش‌های مختلف کم کرد. در این مقاله دو روش جابه‌جایی و قطعه‌ای کردن آهن‌ربا بررسی شده و تأثیر آنها روی عملکرد موتور مورد مقایسه واقع شده است. در این ساختار شیوه جابه‌جایی آهن‌رباها، بیشترین تأثیر را در کاهش گشتاور دندانه‌ای دارد.

۲- ویژگی‌های ماشین‌های مغناطیس‌دائم سطحی

گشتاور نرم و نویز کم، از ویژگی‌های ساختارهای بدون شیار در موتورهای SMPM است [۴]-[۸]. فقدان شیار و دندانه‌ها به معنی وجود یک فاصله هوایی بزرگ برای میدان مغناطیسی وابسته به جریانها در سیم‌پیچ‌هاست و این امر باعث حذف عکس‌العمل آرمیچر

می‌شود که منجر به کار بهتر موتور در اضافه بار و عدم تغییر نیروی ضدمحرکه در سیم‌پیچ‌های استاتور هنگام تغییر بار ماشین خواهد شد. در ماشین‌های شیاردار، ویژگی‌های عکس العمل ناچیز آرمیچر و توانایی تحمل اضافه بار را می‌توان با انتخاب آهن‌رباهای سطحی به دست آورد. یک فاصله هوایی یکنواخت، طبیعت اصلی ساختار SMPM است. این فاصله هوایی یکنواخت، اندوکتانس استاتور کوچک و پایدار ایجاد می‌کند که به طور سنتی در طراحی کنترل‌کننده‌های گشتاور با واکنش سریع مطلوب است. در SMPM برجستگی وجود دارد ولی ماشین با آهن‌ربای دفن شده، ویژگی‌هایی شبیه ماشین‌های سنکرون قطب برجسته دارد. SMPM، با سیم‌پیچی معمولی به این دلایل انتخاب می‌شود که بدون قطب‌برجسته و در نتیجه بدون گشتاور رلوکتانسی است. در این صورت طراحی مبدل برای این ماشین‌ها نسبت موتور با PM دفن شده ساده‌تر است. به علت شناخت کافی و سادگی ساخت، ساختار ماشین شارشعاعی با سیم‌پیچی کلاسیک و استاتور مورق، انتخاب می‌شوند. ماشین‌های مغناطیس دائم سطحی به طور خلاصه دارای ویژگیهای زیرند:

مزایا:*رایج‌ترین ساختار *ماده مغناطیسی کمتر نسبت به ساختار درونی نیاز دارد* روش ساخت آن‌ها، شناخته شده، آسان و اقتصادی است *آهن‌رباها به وسیله چسب و نوارهای کربنی یا فایبرگلاس روی استوانه فلزی ضد زنگ (غیرمغناطیسی و لی رسانا) محکم می‌شوند که البته این استوانه دارای تلفات زیادی در سیم‌پیچی نوع متمرکز است.

معایب:*به دلیل سطحی بودن توانایی کمتری در مقابل نیروی گریز از مرکز در سرعتهای زیاد دارند *وجود گشتاور دندانه‌ای.

۳- محاسبات گشتاور

در شکل (۱) ساختار شیار، آهن‌ربا و شار عبوری به صورت نمونه نشان داده شده‌اند [۹و۱۰].

گشتاور لحظه‌ای، از مشتق کو-انرژی نسبت به موقعیت روتور-استاتور در فاصله هوایی ایجاد می‌شود. رابطه گشتاور و کو-انرژی در معادلات (۱) و (۲) بیان شده‌اند [۱-۴ و ۷-۸ و ۱۱ و ۱۳].

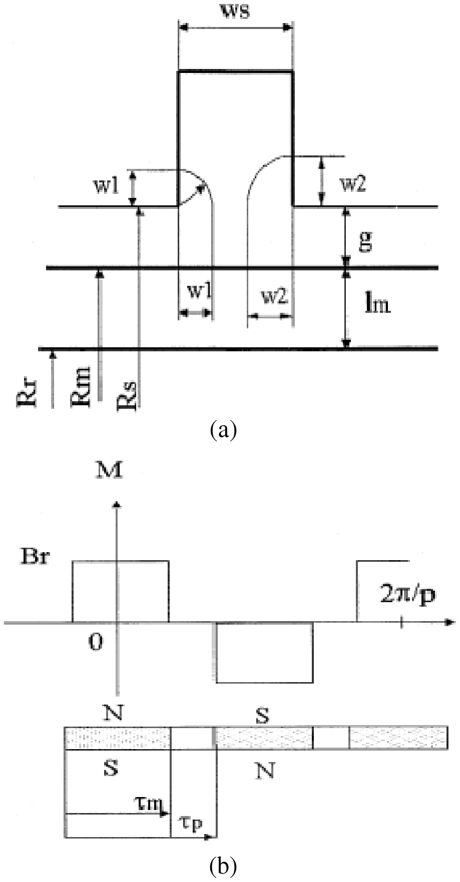
$$T_{el}=\frac{\delta w}{\delta \theta} \qquad (۱)$$

$$W' = W'_{pm} + W'_{pm-d} + W'_{el} \qquad (۲)$$

که در آن، W'_{pm} مولفه کو-انرژی ایجاد شده میدان آهن‌رباها (گشتاور دندانه‌ای)، W'_{pm-d} مولفه کو-انرژی ایجاد شده در اثر تقابل میدان آرمیچر و میدان آهن‌ربا (گشتاور الکترومغناطیسی)، W_{el} مولفه کو-انرژی ایجاد شده به علت میدان آرمیچر (گشتاور رلوکتانسی) است.

از آنجا که به علت آهن‌رباهای سطحی SMPM، قطب برجسته‌ای موجود نیست پس گشتاور رلوکتانسی صفر است. گشتاور الکترومغناطیسی را می‌توان از جمع گشتاورهای تولیدی به وسیله واکنش میدان-جریان هر شیار به صورت زیر به دست آورد:

$$T_d(\theta_1)=\frac{2\pi r^2 L}{N}\sum_{m=1}^{N} B_{PM}\left(\frac{2\pi}{N}m+\theta_1\right).J\left(\frac{2\pi}{N}m+\theta_1\right) \qquad (۳)$$



شکل (۱) :a: ساختار شیار b: ساختار آهنربا [۲۲]

Fig. (1): A: Slot structure, B: Magnet structure

که در آن، N تعداد نمونه‌ها در هر ارزیابی است.

اگر $\frac{2\pi}{N}m+\theta_1$ در یک شیار فاز A و جهت جریان مثبت باشد، داریم:

$$J\left(\frac{2\pi}{N}m+\theta_1\right)=\frac{i_a}{w_s} \qquad (۴)$$

اگر $\frac{2\pi}{N}m+\theta_1$ یک شیار فاز A و جهت جریان منفی باشد، داریم:

$$J\left(\frac{2\pi}{N}m+\theta_1\right)=\frac{-i_a}{w_s} \qquad (۵)$$

و در خارج از شیار صفر است.

۴- گشتاوردندانه‌ای

ماشین‌های PM کارایی خوبی دارند [۱۰]و[۱۴]- [۲۲]. ریپل گشتاور ناشی از هارمونیک‌های جریان و ولتاژ در ماشین و گشتاور دندانه‌ای وابسته به ساختار فیزیکی موارد نامطلوب در تولید گشتاور موتور هستند. گشتاور دندانه‌ای در یک ماشین مغناطیس‌دائم ناشی از واکنش بین آهن‌رباهای روی روتور و دندانه‌های استاتور است. این اجزای حاشیه‌ای سعی در برقراری تعادل بین دندانه‌های استاتور و آهنرباها

دارند، مهمتر آن که دارای اثر نامطلوبی است و کمک به اعوجاج، لرزش و نویز خروجی می‌کند. این گشتاور بعضی مواقع، گشتاور گیر یا گشتاور دندانه‌ای خوانده می‌شود. در حالت گیر، ماکزیمم مقدار فضای فاصله هوایی بین روتور و استاتور و بنابراین کمترین مقدار رلوکتانس فاصله هوایی بین روتور و استاتور وجود دارد. طراحی نامناسب ماشین، منجر به ایجاد گشتاور دندانه‌ای می‌شود که ممکن است تا ۲۵٪ گشتاور تولیدی باشد. حتی در بسیاری از ماشین‌ها موجود، ۵ تا ۱۰ درصد از گشتاور تولیدی، گشتاور دندانه‌ای است. در مواردی که گشتاور دندانه‌ای نباید از ۱ تا ۲ درصد بیشتر باشد، این مضر است. نیاز برای رفع این مشکل، منجر به اتخاذ راه‌حل‌های ویژه و جدید شده است. ریپل گشتاور الکترومغناطیسی سه دلیل اصلی دارد. نخست، شکل غیر سینوسی جریانها در اکثر ماشین‌های جریان مستقیم بدون جاروبک، دوم، عدم تطابق در شکل نیروی ضدمحرکه و شکل جریان، سوم وجود شیارهای استاتور است. گشتاور دندانه‌ای، از رلوکتانس متغیر فاصله هوایی به دلیل وجود شیارها به وجود می‌آید (به علت تمایل روتور به داشتن رلوکتانس کمتر). گشتاور به علت عبور از دندانه‌های دیواره به وجود می‌آید، معادله گشتاور دندانه‌ای به صورت زیر است:

$$T_{cog}(\theta_1)=\frac{\pi.L.R_s}{2.\mu_0.N}\sum_{m=1}^{N}[B_{PM}^2\left(\frac{2\pi}{N}m+\theta_1\right).(R_M+g_a).ssg \qquad (۶)$$

در سمت چپ دهانه شیار $g_a=w1+g$ و ssg=1 است.

در سمت راست دهانه شیار: ssg=-1 و g_a=w2+g است.

بیرون از دهانه شیار: ssg=0 و g_a=0 است.

مهمترین و اساسی‌ترین دغدغه در ماشین‌های مغناطیس‌دائم با آهن-ربای سطحی، گشتاور دندانه‌ای است که رابطه تحلیلی کامل آن در معادله (۷) که شکل دیگری از معادله (۶) است، در زیر آمده است [۲۳]-[۳۳]:

$$T_c=-\frac{\pi L_{ef}N_L}{4\mu_o}(R_2^2-R_1^2)\sum_{i=1}^{\infty}iG_{a_iN_L}\sin(iN_L\theta) \qquad (۷)$$

که در آن، N_L ک.م.مبین تعداد شیار و تعداد قطب، L_{ef} طول عرضی مؤثر ماشین، R_2 شعاع خارجی فاصله هوایی، R_1 شعاع داخلی فاصله هوایی است.

$$f(i)=\sin\left(\frac{i\pi\alpha_p}{2}\right)\frac{1}{\left(\frac{iNp}{2}\right)-1}\left(\frac{R_m}{R_s}\right)^{\frac{iN_p}{2}+1}*k \qquad (۸)$$

$$k=\left\{\frac{\left(\frac{iN_p}{2}-1\right)+2\left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{\frac{iN_p}{2}+1}-\left(\frac{iN_p}{2}+1\right)\left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{iN_p}}{\frac{\mu_r+1}{\mu_r}\left[1-\left(\frac{R_r}{R_s}\right)^{iN_p}\right]-\frac{\mu_r-1}{\mu_r}\left[\left(\frac{R_m}{R_s}\right)^{iN_p}-\left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{iN_p}\right]}\right\} \qquad (۹)$$

که در آن، α_p نسبت کمان آهن و گام قطب، μ_r نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهن‌ربا، R_s شعاع هسته استاتور، R_r شعاع هسته روتور، R_m شعاع هسته روتور همراه با آهنربا و B_δ چگالی شار ماکزیمم در فاصله هوایی است.

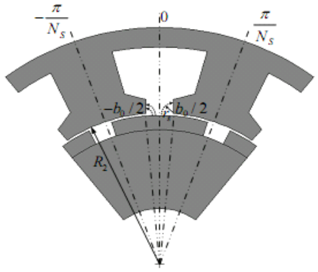
$$B_{a_iN_L}=\frac{2N_p}{i\pi N_L}B_\delta^2\sin\left(iN_L\frac{\alpha_p\pi}{N_p}\right) \qquad (۱۰)$$

$$\alpha'_p=\frac{\sum_{i=1}^{\infty}\frac{2}{i\pi}f(i)\sin\left(\frac{i\pi}{2}\right)}{\sum_{i=1}^{\infty}f(i)} \qquad (۱۱)$$

$$G_{a_iN_L}=\frac{2N_s}{\pi}[\int_{\frac{b_o}{2}}^{\frac{\pi}{N_s}}\cos(iN_L\theta)d\theta \qquad (۱۲)$$

$$C_\phi=\frac{R_2-g-h_m/2}{R_2-g/2} \qquad (۱۳)$$

معادلات بالا بر اساس ساختار شکل (۲) نوشته شده است. بر اساس معادلات بالا، در یک ماشین با آهن‌ربای سطحی، میزان گشتاور دندانه‌ای با نوع ماشین و جزئیات طراحی ماشین بستگی دارد. از این رو تغییرات در میزان این گشتاور به نوع طراحی تک تک قسمتها و فن طراح بستگی دارد.



شکل (۲): ساختار شیار و آهن ربا [۱۵]

Fig. (2): Structure of magnet and slot

سهم گشتاور دندانه‌ای هر آهن‌ربا، به صورت زیر است:

$$T_{cog_p}=\sum_{k=1}^{\infty}T_{PN_sk}\sin(N_sk\theta) \qquad (۱۴)$$

که در آن، T_{PN_sk} ضریب هر آهن‌ربا است.

گشتاور دندانه‌ای را می‌توان به روشهای مختلف کم کرد. اکثر این روش‌ها به شرح زیر مربوط به مرحله طراحی است: *اریب شیارهای آهن‌رباها *تغییر طول کمان آهنربا *تغییر عمق شعاعی کفشک *استفاده از شیارهای کوچک در هر قطب [۲۵]و[۳۰].

۵- شبیه‌سازی

حال به بررسی و شبیه‌سازی موارد از بین برنده گشتاور دندانه‌ای پرداخته می‌شود، ماشین مورد بررسی یک موتور تکفاز PM با مشخصات ذکر شده در جدول (۱) است که شکل آهن ربا به صورت مکعب خم شده ساده است.

تحلیلها و شبیه‌سازی‌های این قسمت توسط نرم‌افزار infolytica-magnet انجام می‌شود.

Table (1): Specification of the machine
جدول (۱): مشخصات ماشین

نوع ماشین	تکفاز
تعداد قطب	6
فرکانس	50 Hz
سرعت	100 rpm
طول هسته	5 cm
شعاع روتور	6.6789 cm
شعاع استاتور	9.789 cm
نوع آهن ربا	NdFeB
ضخامت آهن‌ربا	1 cm

در روش اول آهن‌رباها با توجه به صورت زیر تغییر مکان یافت [۲۳]-[۲۸].

تغییر مکان آهنربا: در ماشینهای عرفی، بخشی از گشتاور دندانه‌ای ناشی از آهنربا در هر فاز است و بنابراین، در مجموع یک گشتاور دندانه‌ای تمام عیار به وجود می‌آید. برای جلوگیری از اثر افزایشی گشتاور، آهن‌رباها می‌توانند نسبت به یکدیگر جابه‌جا شوند تا گشتاور دندانه‌ای آهن‌رباها خارج از فاز قرار گیرند. این تغییرات پیشنهادی، اندکی وابسته به عدد صحیح بودن تعداد شیارهای زیر هر قطب باشد. در ماشین‌های با تعداد صحیح شیار زیر هر قطب، هر قطب به صورت مضرب کامل دندانه‌های استاتور است. بنابراین در هر فاز اثرات دندانه‌ای هر آهن‌ربا، ایجاد و افزوده می‌شود گشتاور دندانه‌ای کل، برای یک ماشین همراه با تعداد صحیح شیارهای زیر هر قطب به صورت زیر است:

$$T_{cog} = N_p \sum_{k=1}^{\infty} T_{N_s k} \sin(N_s k\theta) \qquad (۱۵)$$

که به معادله زیر منجر می‌شود:

$$T_{cog} = \sum_{k=1}^{\infty} T_{N_s k} \sin(N_s k\theta) \qquad (۱۶)$$

فرکانس مبنای معادله (۱۵)، N_s برابر چرخش مکان یکی است، یعنی برای ماشین‌های با تعداد صحیح شیار زیر هر قطب، کوچکترین مضرب مشترک تعداد شیارها و تعداد قطبها (m) به سادگی برابر تعداد شیارها، N_s است. به دلیل اینکه هر آهن‌ربا در هر فاز، همراه با استراحت است، هر کدام به صورت صحیح برای جابه‌جایی نسبت به یکدیگر قرار گرفته است. گشتاور دندانه‌ای کل در ماشین‌ها، جمع جابه‌جایی‌های انجام شده هر آهن‌ربا به صورت زیراست:

$$T_{cog} = \sum_{h=0}^{N_p-1} \sum_{k=1}^{\infty} T_{PN_s k} \sin(N_s k(\theta - h\theta_0)) \qquad (۱۷)$$

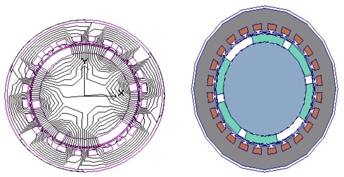
که در آن، θ_0 زاویه هر آهن‌ربا نسبت به بقیه است که مشخصاً برای حذف اثر هارمونیک‌های گشتاور دندانه‌ای است. برای از بین بردن هارمونیک‌های بزرگ، θ_0 باید به صورت معادله زیر باشد:

$$\theta_0 = \frac{2\pi}{N_s N_p} \qquad (۱۸)$$

پس گشتاور دندانه‌ای شبکه به صورت زیر کاهش می‌یابد:

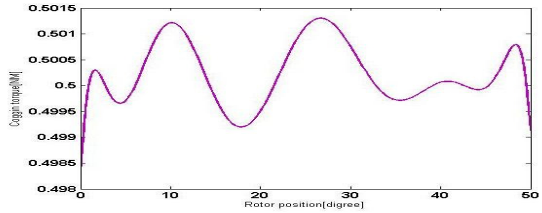
$$T_{cog} = \sum_{k=1}^{\infty} T_{N_s N_p k} \sin(N_s N_p k\theta) \qquad (۱۹)$$

حال با استفاده از معادلات بالا اگر آهن‌رباهای ماشین با گام آهن‌ربای ۴۰/۸ درجه به اندازه ۱۰ درجه انتقال یابد، مطابق شکل (۳) است [۲۳-۳۵]:



شکل (۳): روتور با آهن‌رباهای انتقال یافته
Fig. (3): Rotor with shifted magnets

با توجه شکل (۳) مشخص می‌شود که سیم پیچ هر شیار در معرض شارهای منظم ناشی از آهن رباها قرار نمی‌گیرد و شارهای دریافتی به دلیل جابه جایی دچار تأخیر و تأویل است که باعث ایجاد هارمونیک و زیر هارمونیک در چگالی شار فاصله هوایی و در نتیجه شار پیوندی سیم پیچ می‌شود. گشتاور دندانه‌ای این ساختار به شکل (۴) است:



شکل (۴):۶ قطب انتقال یافته
Fig. (4): Shifted pole

در روش بعدی آهن‌رباها به صورت شکل (۵) تغییر شکل داده می‌شود.

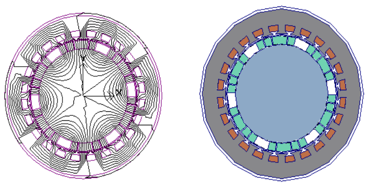
در ماشین مغناطیس دائم، با شیار زیر هر قطب مربوط به هر فاز و قطعات آهن‌ربا، مقدار کلی گشتاور دندانه‌ای از روابط زیر به دست می‌آید [۳۱ و ۳۴]:

$$T_c = \sum_{l=1}^{N} \sum_{i=1}^{\infty} T_i^l \sin(iN_s(\theta + \alpha_l)) \qquad (۲۰)$$

$$\alpha_l = k * s_w + \sum_{j=1}^{k} \beta_j \qquad (۲۱)$$

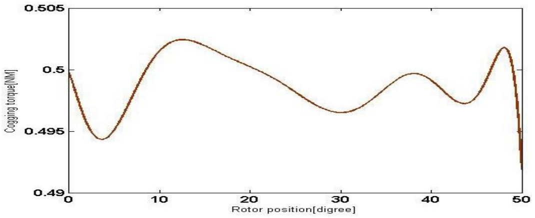
که در آن، N تعداد قطعات در هر آهن‌ربا، K تعداد قطعاتی است که در آن محاسبه می‌شود، s_w عرض هر قطعه بر حسب زاویه الکتریکی، β_j عرض فاصله هوایی بین قطعات آهن‌ربا است. در این قسمت فرض می‌شود که هر قطب آهنربا به ۵ قسمت تقسیم می‌شود و تعداد قطعات محاسبه شده ۴ است. مطابق شکل (۵) عرض هر قطعه ۲۴.۴۸ درجه الکتریکی و فاصله هوایی بین آن‌ها ۱ درجه است.

در شکل (۵) دیده می‌شود که شار خروجی از یک قطب به صورت ناپیوسته است. به همین دلیل شار ناشی از یک آهن‌ربا در فاصله هوایی و شار پیوندی سیم‌پیچ به صورت گسسته و نامنظم دریافت می‌شود که باعث ایجاد هارمونیک و زیرهارمونیک در خروجی می‌گردد. گشتاور دندانه‌ای این ساختار در شکل(۶) نشان داده شده است.



شکل (۵): روتور با آهن‌رباهای قطعه‌ای

Fig. (5): Rotor with sliced magnets

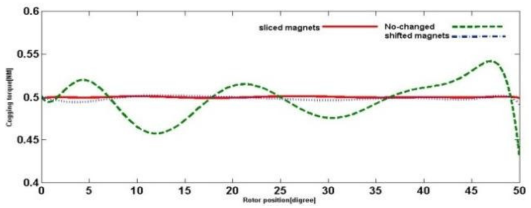


شکل (۶): ۶ قطب قطعه‌ای

Fig. (6): 6 sliced pole

۶- مقایسه

دو روش جابه‌جایی و قطعه کردن آهن‌ربا در شکل (۷) مقایسه شده‌اند:



شکل (۷): مقایسه

Fig.(7): Comparison

در ساختار جابه‌جا شده آهن‌رباها، گشتاورگیر حدود ۱۶/۲درصد نسبت به آهن‌رباهای قطعه‌ای کمتر است، به طور کلی جابه‌جایی آهن‌رباها، بیشترین تأثیر را درکاهش گشتاور دندانه‌ای دارد.

۷- نتیجه‌گیری

بر اساس دو روش مطرح شده در مقاله، بهترین روش کاهش گشتاور گیر، جابه‌جایی ۱۰ درجه آهن‌رباهاست. با این حال ساخت روتور و آهنربا در این دو روش در مقابل روشهای دیگر دشوار و هزینه بر است اما روش جابه جایی ارزانتر و ساخت آن آسانتر است. در این دو روش با تغییرات چگالی شار فاصله هوایی، B_g، دامنه هارمونیکهای فضایی گشتاور تغییر می‌یابد. با آهنرباهای سطحی، تنها راه برای متأثر کردن توزیع جریان پیوسته تولیدی به وسیله یک آهنربا، شکل خود آهنربا است. با تغییر شکل آهنربا، چندین هارمونیک از گشتاور کاسته می‌شود و از این رو تغییر شکل آهن‌ربا هارمونیک‌های ماشین را بسیار خوب کاهش می‌دهد. در این دو روش، آهن‌ربا در یک قسمت، طوری قرار داده می‌شوند که فاصله آن مقداری کمتر از گام قطب باشد و مقداری فضای آزاد بین هر قسمت ایجاد شود. عیب اصلی روش جابه‌جایی آهن‌ربا، ترکیبات زیر هارمونیک‌های تولید شده به دلیل عدم تقارن آهنربا است. زیر هارمونیک‌های روتور، بسیار مضرند زیرا شیارها در ناحیه لبه آن قسمت استاتور پر می‌شوند که باعث تولید زیر هارمونیک می‌شود. در ساختار قطعه قطعه‌ای، تعداد مشخصی از قطعه‌های آهنربا و فاصله هوایی بین آنها وجود دارد که باعث گسترده شدن پهنای قطب می‌شود و این امر کاهش گشتاور را در پی دارد و از طرفی زیرهارمونیک‌ها را افزایش می‌دهد. این روشها با تغییر ساختارهایی همراه است که می‌تواند علاوه بر کاهش گشتاور دندانه‌ای، دامنه گشتاور اصلی را کاهش دهد یا تغییراتی در آن ایجاد کند که شاید مضرات بیشتری به همراه داشته باشد. به عبارت دیگر اکثر روش‌هایی که برای مقابله با گشتاور دندانه‌ای به کار می‌رود، نیروی ضدمحرکه و بنابراین گشتاور راه‌اندازی برآیند را کاهش می‌دهد. بنابراین نکته کلیدی در طراحی موتور، کوشش برای حداکثر کردن گشتاور خروجی و حداقل سازی گشتاور دندانه‌ای است.

References

[1] G.R. Slemon, "On the design of high-performance surface-mounted PM motors", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 30, pp. 134–140, Jan./Feb. 1994.

[2] A. Shaht, A. Keihani, H. Shewy, "Space craft fly wheel high speed pm Synchronous motor design", Jou. of the Oret. Appl. Info. Tech. (JATIT), pp. 2005-2010, 2005.

[3] A.B. Proca, A. Keyhani, A. El-Antably, W. Lu, M. Dai, "Analytical model for permanent magnet motors with surface mounted magnets", IEEE Trans. on Ene. Con.., Vol. 18, No. 3, pp. 386–391, Sep. 2003.

[4] D. Kang, P. Curiac, Y. Jung, S. Jung, "Prospects for magnetization of large PM rotors: Conclusions from a development case study", IEEE Trans. on Ene. Con., Vol. 18, No. 3, Sep. 2003.

[5] J.B. Wang, K. Atallah, Z.Q. Zhu, D. Howe, "Modular 3-phase permanent magnet brushless machines for in wheel applications", IEEE Trans. on Vehi. Tech., Vol. 57, No. 5, pp. 2714-2720, 2008.

[6] A.B. Proca, W. Lu, M. Dai, "Analytical model for permanent magnet motors with surface mounted magnets", IEEE Trans on Ene. Con., Vol. 18, No. 3, Sep. 2003.

[7] A. Piippo, M. Hinkkanen, Z.Q. Zhu, J. Luomi, "Sensorless control of PMSM drives using a combination of voltage model and HF signal injection", IEEE/IAS, Vol. 2, No. 2, pp. 964–970, Seattle, 2004.

[8] H. Polinder, M.J. Hoeijmakers, "Eddy-current losses segmented surface-mounted magnets of pm machines", IEEE/EPA, Vol. 146, No. 3, pp. 442–445, May 1999.

[9] M. Refaie, M. Jahns, W. Novotny, "Analysis of surface permanent magnet machines with fractional-slot concentrated windings", IEEE Trans. on Ene. Con., Vol. 21, No. 1, March 2006.

[10] J.Y. Hung, Z. Ding, "Design of current storeduce torque ripple in brushless permanent magnet motors", IEEE/EPA, Vol. 140, pp. 260–266, July1993.
[11] O.A. Mohammed, S. Liu, Z. Liu, "A phase variable model of brushless de motors based on finite element analysis and its coupling with external circuits", IEEE Trans. Magn, Vol. 41, pp. 1576-1579, 2005.
[12] J.E. Rucker, Kirtley, J.L. McCoy, T.J. Jr, "Design and Analysis of a Permanent Magnet Generator for Naval Applications", IEEE/ESTS, Vol.42, No.6, pp.451–458, 2005
[13] J. dela Ree, N. Boules, "Torque production in permanent-magnet synchronous motors", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 25, pp. 107–112, Jan./Feb. 1989.
[14] O. Aglen, A. Andersson, "Therm alanalysis of a high speed generator", IEEE Trans. of Ind. Appl., Vol. 1, PP. 547-554, 12-16 Oct. 2003.
[15] M. Aydin, Z.Q. Zhu, T.A. Lipo, D. Howe, "Minimization of cogging torque in axial-flux permanent-magnet machines: Design concepts", IEEE Trans. Magn., Vol. 43, No. 9, pp. 3614–3622, Sep. 2007.
[16] C.S. Koh, J.S. Seol, "New cogging-torque reduction method for brushless permanent-magnet motors", IEEE Trans. Magn., Vol. 39, No. 6, pp. 3503–3506, Nov. 2003.
[17] G.H. Kang, Y.D. Son, G.T. Kim, J. Hur, "A novel cogging torque reduction method for interior-type permanent-magnet motor", IEEE Trans. Magn., Vol. 45, No. 1, pp. 161–167, Jan./Feb. 2009.
[18] W.N. Fu, Z.J. Liu, C. Bi, "A dynamic model of the disk drive spindle motor and its applications", IEEE Trans. Magn., Vol. 38, No. 2, pp. 973–976, Mar. 2002.
[19] B. Ackermann, J.H.H. Janssen, R. Sottek, R.I. Van Steen, "New technique for reducing cogging torque in a class of brushless DC motors", IEE Proc. B—Electr. Power Appl., Vol. 139, No. 4, pp. 315–320, Jul. 1992.
[20] Y. Yang, X. Wang, R. Zhang, T. Ding, R. Tang, "The optimization of pole arc coefficient to reduce cogging torque in surface-mounted permanent magnet motors", IEEE Trans. Magn., Vol. 42, No. 4, pp. 1135–1138, Apr. 2006.
[21] M. Markovic´, M. Jufer, Y. Perriard, "Determination of tooth cogging for ceinahard-disk brushless DC motor", IEEE Trans. Magn, Vol. 41, No. 12, pp. 4421–4426, Dec. 2005.
[22] N. Bianchi, S. Bolognani, "Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors", IEEE Trans. Ind. Appl, Vol. 38, No. 5, pp. 1259–1265, Sep. 2002.
[23] L. Dosiek, P. Pillay, "Cogging torque reduction in permanent magnet machines", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 43, No. 6, Nov./Dec. 2007.
[24] C. Bretón, J. Bartolomé, J.A. Benito, G. Tassinario, I. Flotats, C.W. Lu, B.J. Chalmers, "Influence of machine symmetry on reduction of cogging torque in permanent magnet brushless motors", IEEE Trans. Magn., Vol. 36, No. 5, pp. 3819–3823, Sep. 2000.
[25] Z.Q. Zhu, D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines", IEEE Trans. Ene. Con.., Vol. 15, No. 4, pp. 407–412, Dec. 2000.
[26] S.M. Hwang, J.B. Eom, Y.H. Jung, D.-W. Lee, B.S. Kang, "Various design technique storeduce cogging torque by controlling energy variation in permanent magnet motors", IEEE Trans. Magn., Vol. 37, No. 4, pp. 2806–2809, Jul. 2001.
[27] Z.Q. Zhu, S.R, wanich, N. Schofield, D. Howe, "Reduction of cogging torque in interior magnet brushless machines", IEEE Trans. Magn, Vol. 39, No. 5, pp. 3238–3240, Sep. 2003.
[28] T. Ishikawa, "A method of reducing ripple torque in permanent magnet motors without skewing", IEEE Trans. Magn, Vol. 29, No. 2, pp. 2028–2031, Mar. 1993.
[28] N. Bianchi, S. Bolognani, "Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 38, No. 5, pp. 1259–1265, Sep./Oct. 2002.
[30] R. Lateb, N. Takorabet, F. Meibody-Tabar, "Effect of magnet segmentation on the cogging torque in surface-mounted permanent-magnet motors", IEEE Trans. Magn., Vol. 42, No. 3, pp. 442–445, Mar. 2006.
[31] S.A. Saied, K. Abbaszadeh, S. Hemmati, M. Fadaie, "A new approach to cogging torque reduction in surface-mounted permanent-magnet motors", Euro. Jou. of Sci. Res., Vol. 26, No. 4, pp. 499-50, 2009.
[32] Z.Q. Zhu, L.J. Wu, D.A. Staton, M. Popseco, D. Hawkins, "Comparison of analytical models of cogging torque in surface-mounted PM machines", IEEE Trans. Magn., Vol. 59, No. 6, pp. 2414–2425, Oct. 2012.
[33] Y. Wang, J. Zhu, S. wang, Y. Guo, W. XU, "Nonlinear Magnetic Model of Surface Mounted PM Machines Incorporating Saturation Saliency, "IEEE Trans. Magn., Vo.45, No.10,pp.4684–4687,Oct. 2009
[34] Z.Q. Zhu, L.J. Wu, D.A. Staton, M. Popseco, D. Hawkins, "Analytical modeling of eddy current loss in retaining sleeve of surface-mounted PM machines accounting for influence of slot opening", IEEE/CIE, pp. 611–616, May 2012.
[35] N. Boules, "Two dimensional field analysis of cylindrical machines with permanent magnet excitation", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. IA-20, pp. 1267–1277, Mar. 1984.