

Analysis and Optimization of Triple-speed Coaxial Magnetic Gears

A. Moghimi, M. H. Aliabadi^{1*}, H. Feshki Farahani²

* Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran

(Received: 12/04/2020; Accepted: 26/07/2020)

Abstract

Besides introducing the triple-speed coaxial magnetic gear, the paper studies the influence of the geometric structure on torque and tangential and radial flux density. As rectangular and trapezoidal structures are more welcomed in most projects thanks to their ease of use, the present paper also introduces triple-speed coaxial magnetic gears with rectangular and trapezoidal structures. Then these gears are compared with crescent-shaped magnetic gear using the finite element method. The comparison shows that rectangular magnetic gears are not much different from crescent-shaped gears in terms of the flux density on the edges and corners. However, flux density distribution is more desirable in the former as the air gap between the middle rotor and modulators is variable, and less oscillation is experienced considering tangent and radial flux density distributions. Nonetheless, the trapezoidal structure presents unsatisfactory performance in comparison to the crescent-shaped structure in terms of flux density distribution and torque. An experimental crescent-shaped magnetic gear was built. The obtained results prove the validity of the use of this structure in triple-speed coaxial magnetic gears and the high performance of it compared to other structures used in magnetic gears.

Keywords: Rectangular Structure, Trapezoidal Structure, Magnetic Gear, Finite Element Method, Crescent-Shaped Structure, Triple-speed Coaxial

* Corresponding author E-mail: mah.hosseini-aliabadi@iauctb.ac.ir

تحلیل و بهینه‌سازی گیربکس‌های مغناطیسی سه سرعت هم‌محور

علی مقیمی^۱، محمود حسینی علی‌آبادی^{۲*}، حسن فشکی فراهانی^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی برق قدرت، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه آزاد واحد تهران مرکز، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۴، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵)

چکیده

در این مقاله ضمن معرفی گیربکس مغناطیسی سه سرعت هم‌محور، تأثیر ساختار هندسی بر روی گشتاور و چگالی شار مماسی و شعاعی بررسی شده است. با توجه به این که در بیشتر پروژه‌های ساخت، میل به ساختارهای مستطیلی و دوزنقه‌ای شکل به علت راحتی کار بالا است، در این مقاله ساختار مستطیلی و دوزنقه‌ای شکل گیربکس‌های مغناطیسی سه سرعت معرفی شد و سپس این گیربکس‌ها به روش اجزاء محدود، با گیربکس‌های مغناطیسی هلالی شکل مقایسه شدند. در این مقایسه نشان داده شد که گیربکس‌های مغناطیسی مستطیلی شکل از نظر چگالی شار لبه‌ها و گوشه‌ها با گیربکس‌های مغناطیسی هلالی شکل، تفاوت چندانی ندارند، اما توزیع چگالی شار در ساختار گیربکس مغناطیسی مستطیلی شکل، به علت متغیر بودن فاصله هوایی ما بین رتور میانی و مدولاتورها مطلوب‌تر است و نوسان کمتری در توزیع چگالی شار شعاعی و مماسی دارد اما ساختار دوزنقه‌ای شکل هم از نظر توزیع چگالی شار و هم از نظر گشتاور نسبت به ساختار هلالی دارای عملکرد نامطلوبی است. در پایان ساختار هلالی شکل ساخته شد و نتایج تجربی نشان داد که این ساختار در گیربکس‌های مغناطیسی سه سرعت مورد تأیید می‌باشد و دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر ساختارها در گیربکس مغناطیسی است.

کلید واژه‌ها: ساختار مستطیلی، ساختار دوزنقه‌ای، گیربکس مغناطیسی، روش اجزاء محدود، ساختار هلالی، هم‌محور سه سرعت

۱- مقدمه

گیربکس مغناطیسی یک دستگاه انتقال دور و گشتاور بدون اصطکاک است [۲]، که مزیت‌های بسیاری در مقابل گیربکس‌های مکانیکی ارائه می‌دهد [۳]. گیربکس‌های مغناطیسی اولیه به دلیل ضعف در آهنرباهای دائمی، دارای گشتاور کمی بودند [۴] و راندمان انتقال گشتاور آن‌ها پایین بود، به همین دلیل گیربکس‌های متحدالمرکز هم‌محور پیشنهاد داده شد [۲]. با توجه به هم‌محور بودن گیربکس‌های مغناطیسی، میزان راندمان استفاده از PMها به طور قابل توجهی زیاد شده است. و برای بهبود بیشتر از PMها ساختارهای ترکیبی پیشنهاد شده است [۵]. در حال حاضر برای این که بتوان گشتاور این گیربکس‌ها را بهبود داد مقالات متعددی تأثیر مولفه‌های طراحی را بررسی کرده‌اند، به گونه‌ای که تأثیرات مولفه‌ها بسیار در دقت طراحی به ما کمک می‌کند.

در [۶] تأثیر مولفه‌های (ضخامت یوک، ضخامت در آهنربا) بر حداکثر گشتاور ایستایی و [۷] برخی مولفه‌ها شامل طول هسته حلقه مدولاسیون، عرض هسته حلقه مدولاسیون، ارتفاع حلقه مدولاسیون و ضخامت یوک رتور بیرونی گیربکس مغناطیسی هم‌محور^۱ با آرایه‌های PM هالباخ^۲ بهینه شده و

با توجه به این که ساختار گیربکس مغناطیسی سه سرعت هم‌محور جدید می‌باشد لذا اهمیت مطالعات بر روی ساختارهای متفاوت در این نوع گیربکس‌های مغناطیسی بسیار دارای اهمیت هست. ساختار گیربکس‌های مغناطیسی سه سرعت به گونه‌ای است که می‌توان هرگونه نسبت تبدیلی را با آن انتقال داد. در این گیربکس مغناطیسی قطب‌های نصب شده در رتور بیرونی با قطب‌های موجود در لایه میانی کوپل شده و به همین ترتیب قطب‌های نصب شده در رتور میانی با قطب‌های موجود در لایه داخلی کوپل شده و می‌چرخد. در گیربکس‌های مغناطیسی دو سرعت با توجه به تفاوت در تعداد قطب‌های داخلی و خارجی، سرعت چرخش رتور خارجی کم‌تر از رتور داخلی می‌باشد [۱]. اما در گیربکس مغناطیسی سه سرعت به گونه دیگری می‌باشد؛ چرا که با طراحی تعداد جفت قطب‌های آهنربا در رتور میانی می‌توان سرعت چرخش در رتور بیرونی و رتور داخلی برابر هم باشند که می‌تواند در کاربردهای خاص مورد استفاده قرار گیرد. رتور میانی در گیربکس‌های مغناطیسی سه سرعت نقش پررنگ‌تری نسبت به دو رتور (داخلی و بیرونی) دارد.

¹ Coaxial magnetic gear (CMG)

² Halbach

$$B'_r(r, \theta) = \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{rm}(r) \cos(mp(\theta - w_r t) + mp\theta_0) \quad (۲)$$

$$\lambda_r(r, \theta) = \lambda_{r0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{rj}(r) \cos(jn_s(\theta - w_s t)) \quad (۳)$$

$$B_r(r, \theta) = B'_r(r, \theta) \times \lambda_r(r, \theta) \quad (۴)$$

$$B'_\theta(r, \theta) = \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{\theta m}(r) \sin(mp(\theta - w_r t) + mp\theta_0) \quad (۵)$$

$$\lambda_\theta(r, \theta) = \lambda_{\theta 0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{\theta j}(r) \cos(jn_s(\theta - w_s t)) \quad (۶)$$

$$B_\theta(r, \theta) = B'_\theta(r, \theta) \times \lambda_\theta(r, \theta) \quad (۷)$$

که در آن، p تعداد جفت قطب‌های آهنربای دائمی است، θ_0 زاویه ابتدایی رتور، n_s تعداد قطب‌های فرومغناطیسی است و ω_s و ω_r به ترتیب سرعت چرخش رتور آهنربای دائمی و قطب فرومغناطیسی هستند.

$b_{\theta m}$ ، b_{rm} ضرایب فوریه برای توزیع چگالی شار شعاعی و مماسی هستند، λ_{rj} و $\lambda_{\theta j}$ ضرایب فوریه برای قطب‌های فرومغناطیسی در حالت چگالی شار شعاعی و مماسی هستند و با جایگذاری چگالی شار مغناطیسی هوایی، شدت میدان مغناطیسی هوایی مطابق رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$H_g = H_c \left(1 - \frac{B_g}{B_r}\right) \quad (۸)$$

که در آن، H_c شدت میدان مغناطیسی بازدارنده و B_g چگالی شار در میانگین فاصله هوایی می‌باشد. همچنین انرژی نیز مطابق رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$W(\theta) = \frac{L_s l_g r_g}{2\mu_0} \iint B^2 d\delta \quad (۹)$$

L_s طول محوری فاصله هوایی، l_g ضخامت فاصله هوایی میان رتور و قطعات قطب‌های ثابت و r_g شعاع میانگین فاصله هوایی می‌باشد. در این ساختار هارمونیک‌ها نیز از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$V_{m,k} = |mp_h + kn_s| \quad (۱۰)$$

$$m = 1, 3, 5, \dots, \pm\infty$$

$$k = 0, \pm 1, \pm 3, \dots, \pm\infty$$

که در آن، p_h تعداد جفت قطب‌های رتور داخلی و n_s تعداد جفت مدولاتورهای مابین آهنرباهای دائمی می‌باشد.

$$W_{m,k} = \frac{mp_h}{mp_h + kn_s} W_h \quad (۱۱)$$

که در آن، w_h سرعت رتور داخلی می‌باشد و برای به دست آوردن دامنه هارمونیک بالا با ترکیب $m = 1$ و $k = -1$ سرعت چرخش در رتور میانی مطابق رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

در [۸] بهینه‌سازی ارتباط بین مولفه‌های طراحی بر حداکثر گشتاور و در [۹] تحلیل بر روی یک گیربکس مغناطیسی که تأثیرات مولفه‌های طراحی که موجب به بهینه‌سازی در گشتاور گیربکس مغناطیسی می‌شود مورد بررسی قرار گرفته است و در [۱۰] مولفه‌های طراحی (تعداد جفت قطب‌های آهنرباهای دائمی درونی و بیرونی و تجهیزات فرو مغناطیس، هندسه فرو مغناطیس و ضخامت آهنربا دائمی) گیربکس مغناطیسی بر روی گشتاور بهینه و عملکرد گیربکس مغناطیسی ارائه شده است. و همچنین در [۱۱] قطب‌های فرو مغناطیس در گیربکس‌های مغناطیسی در طول فرآیند طراحی نیاز به توجه ویژه‌ای دارند و نیاز است مطالعات زیادی بر روی آن‌ها صورت گیرد.

الگوی جدیدی از گیربکس‌های مغناطیسی میدان محوری توسط [۸] ارائه شده است تا مشکل ساخت را آسان کند. در همین راستا در سال ۲۰۱۶، آقای zhu ساختاری را ارائه داد که شامل یک رتور بیرونی و یک رتور درونی و ۲ رینگ مدولاتور ثابت می‌باشد. در [۱۲] یک مدولاسیون میدان محوری گیربکس مغناطیسی که در آن سرعت رتور داخلی و رتور بیرونی می‌تواند بر اساس تابع مدولاسیون دو حلقه ثابت تعریف گردد، برای تنظیم شار محوری معرفی گردید.

در [۱۳]، الگویی از گیربکس‌های مغناطیسی ارائه شده است که آهنرباهای دائم در درون هسته رتور قرار داده شده است. با توجه به مطالعات پیشین، مشاهده شد که بیشتر مطالعات در راستای گیربکس‌های دو سرعت بوده است لذا در این مقاله اهمیت بررسی ساختارهای هندسی در گیربکس‌های مغناطیسی سه سرعت مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- معادلات حاکم بر گیربکس مغناطیسی سه سرعت هم‌محور

با توجه به این‌که روزبه‌روز مطالعات بر روی گیربکس‌های مغناطیسی عمق بیشتری پیدا می‌کند نیاز است این فناوری در کلیه جهت‌ها مورد بررسی و واکاوی قرار گیرد. در این بخش معادلات حاکم برای ساختار سه سرعت بررسی شده است:

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (۱)$$

در رابطه (۱) ضریب نفوذپذیری مغناطیسی بیان شده است که در آن μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی هوایی، ΔB اختلاف چگالی شار اولیه و ΔH اختلاف شدت میدان مغناطیسی اولیه می‌باشد. چگالی شار مغناطیسی (شعاعی B_r و مماسی B_θ) در فاصله هوایی، مطابق معادلات زیر به دست می‌آید [۱۴].

زاویه‌های مطلوب در آهنرباها و اجزای فرو مغناطیس در گیربکس مغناطیسی سه سرعت هم‌محور مطابق فرمول‌های (۱۸ و ۱۹) هست.

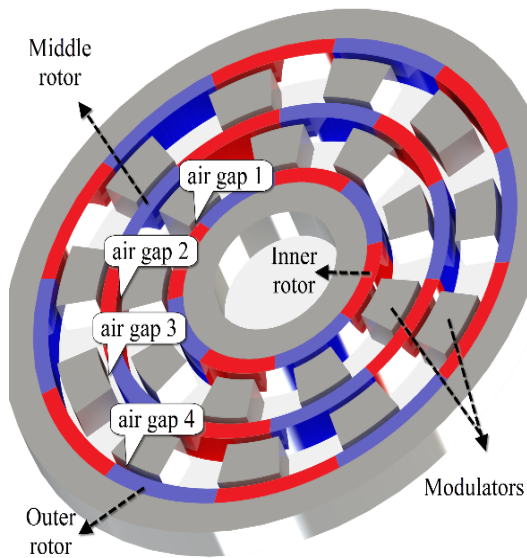
$$\Delta\theta_{(h,m,l)} = \left(\frac{360^\circ}{\text{Number of PM}} \right) - \Delta\theta_p \quad (21)$$

$$\Delta\theta_{(1,2)} = \left(\frac{360^\circ}{\text{Number of modulator}} \right) - \Delta\theta_{pp} \quad (22)$$

که در آن $\Delta\theta_p$ زاویه مواد پرکننده و $\Delta\theta_{pp}$ زاویه نگه‌دارنده مدولاتور می‌باشد.

۳- مقایسه ساختارهای مختلف گیربکس‌های مغناطیسی سه سرعت

ساختار گیربکس مغناطیسی سه سرعت مطابق شکل (۱) از سه رتور داخلی، میانی و بیرونی و دو مدولاتور تشکیل شده است. ساختار گیربکس مغناطیسی سه سرعت برخلاف گیربکس دو سرعت دارای ۴ لایه فاصله هوایی می‌باشد به‌گونه‌ای که تعداد فاصله هوایی‌ها در گیربکس مغناطیسی همیشه یک عدد زوج می‌باشد.



شکل (۱): ساختار گیربکس مغناطیسی سه سرعت هم‌محور هلالی شکل.

با توجه به این‌که در بیشتر پروژه‌های ساخت به‌دلیل راحتی کار، میل به سمت ساختارهای مستطیلی و دوزنقه‌ای بیشتر است لذا گیربکس مغناطیسی سه سرعت در این مقاله با سه ساختار

$$W_m = \frac{P_h}{p_h - n_{s1}} W_h \quad (12)$$

برای به‌دست آوردن سرعت رتور بیرونی مطابق رابطه (۱۳) عمل می‌گردد:

$$W_l = \frac{P_m}{p_m - n_{s2}} W_m \quad (13)$$

با توجه به این‌که ساختار پیشنهادی دارای سه رتور است، لذا دارای دو نسبت تبدیل مطابق روابط (۱۴ و ۱۵) می‌باشد.

$$G_{r1} = \frac{p_h - n_{s1}}{p_h} = \frac{W_h}{W_m} \quad (14)$$

$$G_{r2} = \frac{p_m - n_{s2}}{p_m} = \frac{W_m}{W_l} \quad (15)$$

که در آن، p_m تعداد جفت قطب رتور میانی، W_m سرعت رتور میانی و W_l سرعت رتور بیرونی می‌باشد. همچنین تعداد مدولاتورهای این گیربکس مطابق روابط (۱۶ و ۱۷) می‌باشد.

$$n_{s1} = p_h + p_m \quad (16)$$

$$n_{s2} = p_m + p_l \quad (17)$$

که در آن، p_l تعداد جفت قطب‌های رتور بیرونی می‌باشد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد این رتور دارای سه گشتاور متفاوت مطابق روابط (۱۸) الی (۲۰) می‌باشد.

$$T_i = \frac{L_{ef} R_h^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_{rh} B_{oh} d\theta \quad (18)$$

$$T_m = \frac{L_{ef} R_m^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_{rm} B_{om} d\theta \quad (19)$$

$$T_o = \frac{L_{ef} R_l^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_{rl} B_{ol} d\theta \quad (20)$$

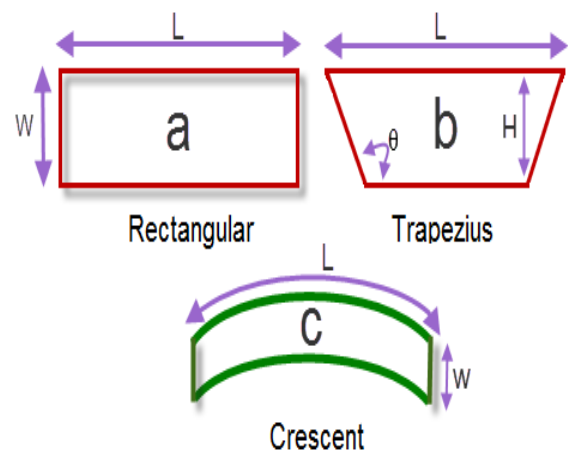
که در آن، L_{ef} طول مؤثر شعاعی، R_h شعاع فاصله هوایی داخلی، B_{rh} چگالی شار شعاعی در شکاف هوایی داخلی، B_{oh} چگالی شار مماسی در شکاف هوایی داخلی، R_m شعاع فاصله هوایی میانی، B_{rm} چگالی شار شعاعی در شکاف هوایی میانی، B_{om} چگالی شار مماسی در شکاف هوایی میانی، R_l شعاع فاصله هوایی بیرونی، B_{rl} چگالی شار شعاعی در شکاف هوایی بیرونی و B_{ol} چگالی شار شعاعی در شکاف هوایی بیرونی می‌باشد.

است. تمامی مولفه‌های مربوط به طول، عرض و اندازه در شکل (۳-ا) و (۳-ب) و شکل (۳-ج) و (۳-د) باهم برابر می‌باشد.

جدول (۱): مولفه‌های نهایی ساختار هلالی، مستطیلی و دوزنقه‌ای گیربکس‌های مغناطیسی سه سرعت هم‌محور مورد مقایسه.

نما د	کمیت	مقدار شکل (a-۳)	مقدار شکل (b-۳)	مقدار شکل (c-۳)	مقدار شکل (d-۳)
P_h	Number of high-speed PM rotor pole pairs	۴	۴	۴	۴
P_m	Number of middle-speed PM rotor pole pairs	۵	۵	۵	۵
P_l	Number of low-speed PM rotor pole pairs	۶	۶	۸	۸
N_{s1}	Number of ferromagnetic pole pieces (one)	۹	۹	۹	۹
N_{s2}	Number of ferromagnetic pole pieces (two)	۱۱	۱۱	۱۳	۱۳
R_o	Outer radius	mm ۵۲/۳۳	۵۲/۳۳ mm	۴۷/۳۳ mm	mm ۴۷/۳۳
T_{pi}	Thickness of PMs (inner rotor)	۳ mm	۳ mm	۳ mm	۳ mm
T_{pm}	Thickness of PMs (middle rotor)	۲ mm	۲ mm	۲ mm	۲ mm
T_{po}	Thickness of PMs (outer rotor)	۳ mm	۳ mm	۳ mm	۳ mm
T_{m1}	Thickness of modulators (N_{s1})	۵/۴ mm	۵/۴ mm	۲/۸۴ mm	۲/۸۴ mm
T_{m2}	Thickness of modulators (N_{s2})	۸/۶ mm	۸/۶ mm	۴/۱۶ mm	۴/۱۶ mm
T_y	Thickness of yokes	۶/۶۶ mm	۶/۶۶ mm	۶/۶۶ mm	۶/۶۶ mm
g	Each air gap length	۱ mm	-۰/۵ mm ۱/۴	۱/۵ mm	-۱/۵ mm ۱/۸
L_{ef}	Axial length	۳۰۰ mm	۳۰۰ mm	۳۰۰ mm	۳۰۰ mm
B_r	Remanence of PMs	۱/۲ T	۱/۲ T	۱/۲ T	۱/۲ T

هندسی مستطیلی و دوزنقه‌ای از نظر (ضخامت یوک‌ها، ضخامت ارتفاع آهنربا و مدولاتور، نسبت تبدیل، طول محوری، ضخامت طولی مدولاتورها، ضخامت طولی آهنرباها، فاصله هوایی ما بین مدولاتور و آهنربا، ضخامت آهنربای رتور داخلی، میانی و بیرونی، ضخامت آهنربای رتور (داخلی و میانی)، ضخامت آهنربای رتور (میانی و بیرونی)، ضخامت آهنربای رتور (داخلی و بیرونی)) با ساختار هلالی شکل به روش اجزاء محدود مورد مقایسه قرار گرفته است به گونه‌ای که تمامی مولفه‌ها در هر مقایسه باهم برابر می‌باشند. مفهوم ساختار مستطیلی و دوزنقه‌ای در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): ساختارهای مورد مطالعه گیربکس مغناطیسی سه سرعت.

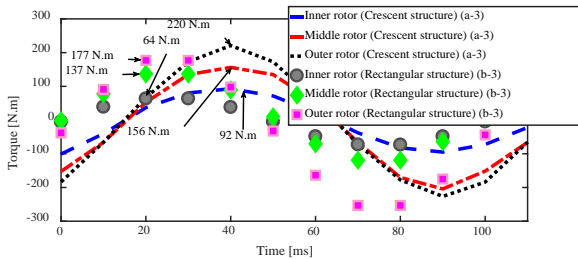
همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده شد، سه نوع ساختار در این مقاله مورد مقایسه قرار می‌گیرد لذا به دلیل دقت بالا در شبیه‌سازی دو گیربکس هلالی شکل با نسبت تبدیل‌های متفاوت با ساختارهای مستطیلی و دوزنقه‌ای مورد مقایسه قرار گرفته است.

با توجه به این‌که ساختار گیربکس مغناطیسی سه سرعت هم‌محور می‌باشد و تا به حال تحلیل مولفه‌های هندسی بر روی این گیربکس مغناطیسی سه سرعت انجام نشده است. لذا لازم است که تأثیرات مولفه‌های هندسی بر روی گشتاور و چگالی شار مورد بررسی قرار گیرد.

۴- ساختار نهایی و مقایسه

همان‌طور که قبلاً به آن اشاره شد دو نوع گیربکس مغناطیسی سه سرعت با ساختاری هلالی با سایر ساختارها مقایسه می‌شود که هر کدام دارای یک نسبت تبدیل‌های متفاوت می‌باشند لذا مولفه‌های طراحی دو گیربکس‌ها در جدول (۱) نشان داده شده

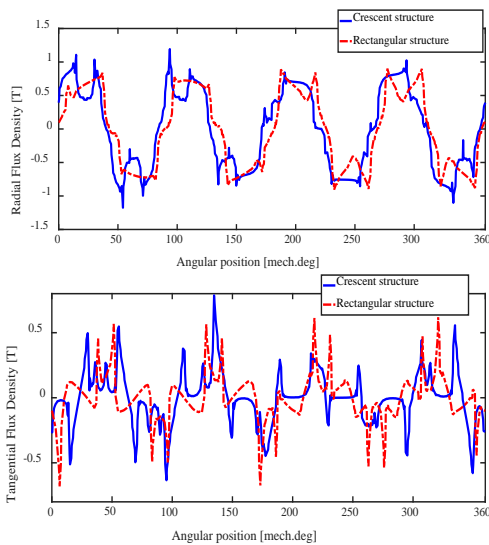
همچنین شکل (۳- c) با شکل (۳- d) مقایسه گردید و مشاهده شد که گشتاور در ساختارهای هلالی شکل بسیار مطلوب‌تر از سایر ساختارهای هندسی مورد مطالعه است و همچنین ساختار مستطیلی مطابق شکل‌های (۵ تا ۸) نشان می‌دهد که چگالی شار مماسی و شعاعی مطلوب‌تری نسبت به ساختار هلالی شکل دارد و همچنین مشخص شد که ساختار دوزنقه‌ای بسیار نامطلوب است زیرا از نظر چگالی شار و گشتاور بسیار عملکرد پایین دارد لذا حداکثر گشتاور ساختار مستطیلی و هلالی مطابق شکل (۴) نشان داده شده است.



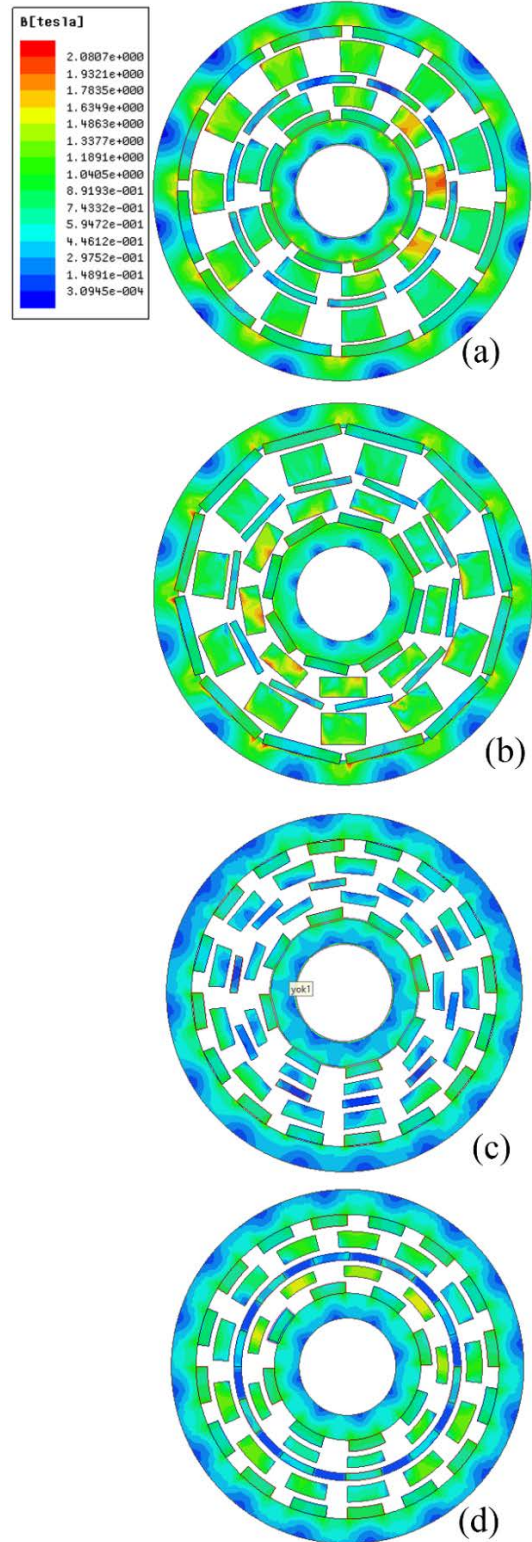
شکل (۴): حداکثر گشتاورهای گیربکس مغناطیسی سه سرعت در FEM.

همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است ساختار مستطیلی شکل از نظر حداکثر گشتاور نسبت به ساختار هلالی شکل دارای امتیاز می‌باشد به گونه‌ای که گشتاور در ساختار هلالی شکل نسبت به ساختار مستطیلی شکل در رتور داخلی، میانی و بیرونی به ترتیب ۳۰، ۱۲ و ۲۰ درصد بیشتر است.

همچنین در این گیربکس‌ها چگالی شار شعاعی و مماسی در ۴ فاصله هوایی، تحلیل و مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل‌های زیر مقایسه آن‌ها را نشان می‌دهد.



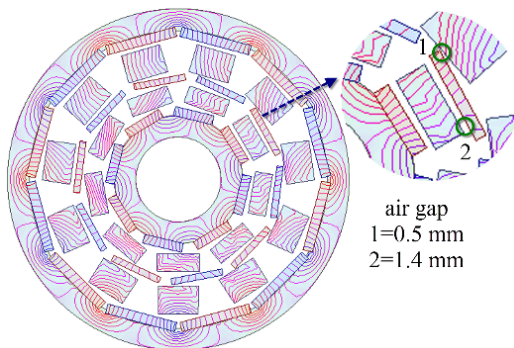
شکل (۵): چگالی شار شعاعی و مماسی در فاصله هوایی رتور داخلی (air gap 1).



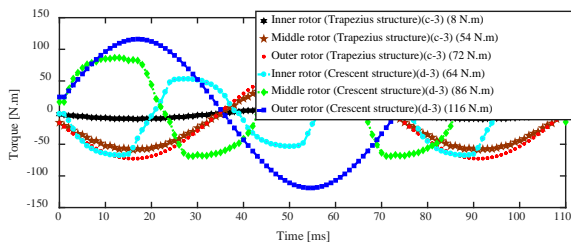
شکل (۳): الگوی مغناطیسی گیربکس‌های مغناطیسی سه سرعت هم‌محور مورد مقایسه.

با توجه به تحلیلی که در نرم‌افزار اجزاء محدود در ۲۰۰ rpm انجام شد گیربکس مغناطیسی شکل (۳- a) با شکل (۳- b) و

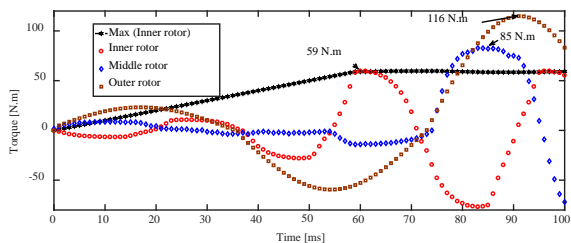
همان‌طور که از شکل‌های (۵) الی (۸) مشاهده می‌گردد چگالی شار شعاعی و مماسی در گیربکس مغناطیسی مستطیلی مطلوب‌تر از گیربکس‌های مغناطیسی هلالی شکل می‌باشد به‌گونه‌ای که مشاهده می‌شود در ساختار هلالی میل به سمت حداکثر چگالی شار بیشتر است لذا این مطلوب‌تر بودن چگالی شار ناشی از ساختار مستطیلی شکل در رتور میانی و فاصله‌ی هوایی ایجادشده مابین آن و مدولاتور می‌باشد چرا که در هنگام چرخش رتورها فاصله‌ی هوایی مابین آنها و مدولاتورها به‌صورت دینامیکی کم و زیاد می‌شود و در بازه $0.5 / 1$ الی $1.4 / 4$ mm به‌علت گوشه‌های ساختار هندسه مستطیل مطابق شکل (۹) تغییر می‌کند.



شکل (۹): فاصله هوایی $0.5 / 1$ الی $1.4 / 4$ mm در ساختار مستطیلی.

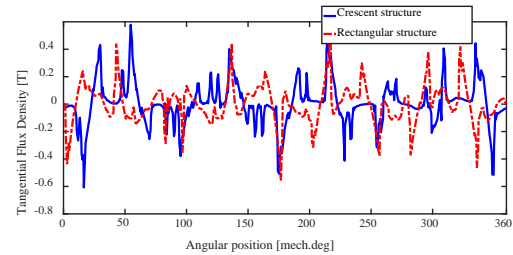
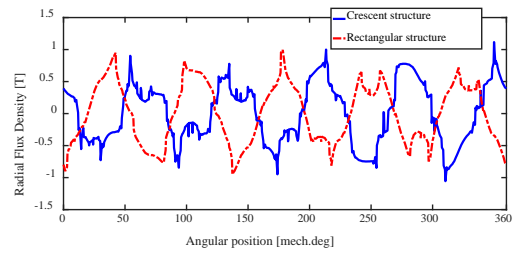


شکل (۱۰): حداکثر گشتاورهای گیربکس مغناطیسی سه سرعت در FEM.

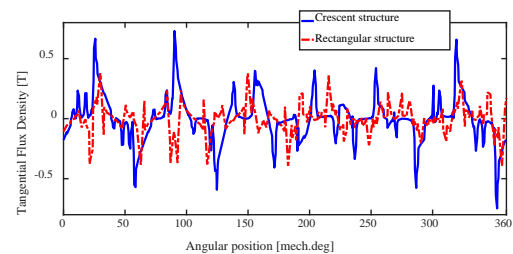
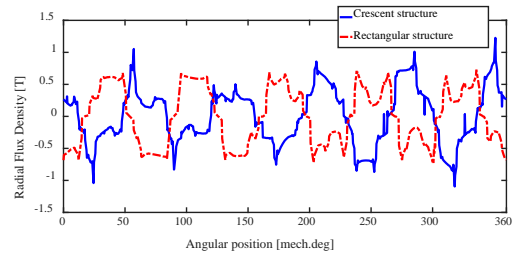


شکل (۱۱): حداکثر گشتاور گیربکس شکل (d-3) در حالت بارداری رتور داخلی.

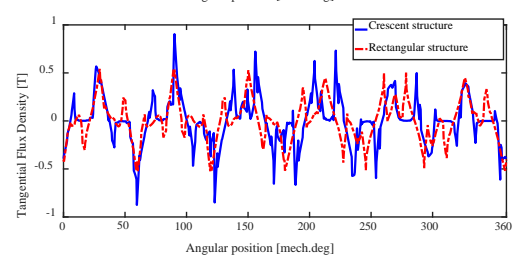
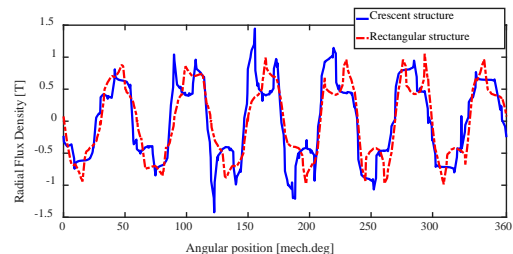
همان‌طور که در شکل (۱۰) مشخص است ساختار دوزنقه‌ای شکل از نظر حداکثر گشتاور نسبت به ساختار هلالی شکل دارای افت می‌باشد به‌گونه‌ای که گشتاور در ساختار هلالی شکل نسبت به ساختار دوزنقه‌ای شکل در رتور داخلی، میانی و بیرونی به



شکل (۶): چگالی شار شعاعی و مماسی در فاصله هوایی داخلی رتور میانی (air gap 2).



شکل (۷): چگالی شار شعاعی و مماسی در فاصله هوایی بیرونی رتور میانی (air gap 3).

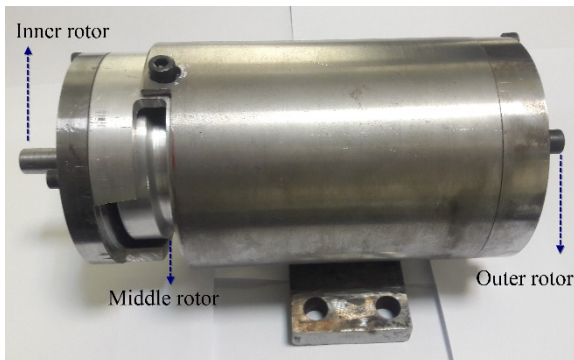


شکل (۸): چگالی شار شعاعی و مماسی در فاصله هوایی رتور بیرونی (air gap 4).

همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است؛ حداکثر گشتاور به روش اجزا محدود در رتور داخلی، میانی و بیرونی به ترتیب ۶۴ N.m، ۸۶ N.m و ۱۱۶ N.m است. لذا لازم است اعتبارسنجی در این نوع گیربکس انجام گردد که مراحل ساخت مطابق شکل (۱۴) نشان داده شده است.

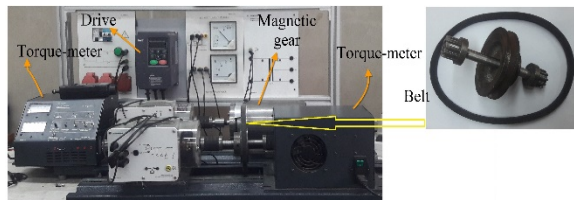


شکل (۱۴): قطعات تشکیل‌دهنده گیربکس مغناطیسی سه سرعت.



شکل (۱۵): نمونه اولیه گیربکس مغناطیسی سه سرعت.

همان‌طور که در شکل (۱۴ و ۱۵) نشان داده شده است گیربکس دارای سه رتور داخلی، میانی و بیرونی می‌باشد که شفت رتور میانی به وسیله تسمه چرخانده می‌شود و می‌توان از آن خروجی گشتاور گرفت.

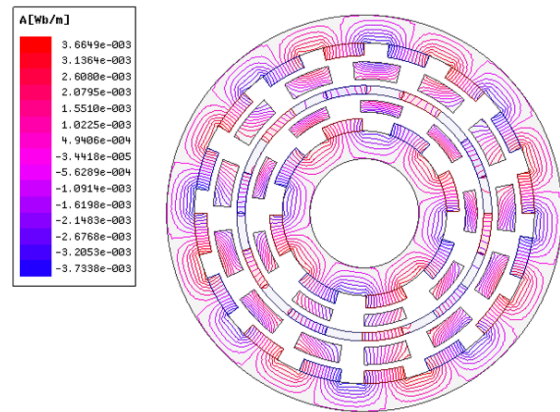


شکل (۱۶): آزمون طراحی شده برای رتور داخلی، میانی و بیرونی.

همان‌طور که از شکل (۱۷) مشخص است پس از طراحی تست بنچ برای این گیربکس سه سرعت، اندازه‌گیری گشتاور به صورت نقطه‌ای انجام شد. در این اندازه‌گیری گشتاورسنج، درایو، موتور و گیربکس مغناطیسی سه سرعت مشارکت داشتند.

گشتاور اندازه‌گیری شده به صورت نقطه‌ای مطابق شکل (۱۷ و ۱۸) نشان داده شده است و با توجه به مقایسه‌ای که از

ترتیب ۸۷، ۳۷ و ۳۸ درصد بیشتر است. همچنین در ادامه گیربکس شکل (۳-d) در حالت بارداری بر روی رتور داخلی مورد مطالعه قرار گرفت. در این حالت به رتور داخلی یک‌بار مکانیکی ۶۰ N.m وصل شد و رتور میانی با سرعت ۱۶۰ RPM به محرک وصل شد که به تبع سرعت رتور داخلی به ۲۰۰ RPM، رتور میانی به ۱۶۰ RPM و رتور بیرونی به ۱۰۰ RPM رسید و همان‌طور که از شکل (۱۱) مشخص است گشتاور رتور داخلی به ۵۹ N.m رسید.



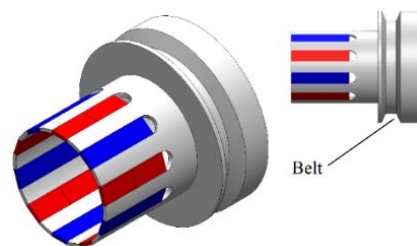
شکل (۱۲): الگوی توزیع چگالی شار در گیربکس مغناطیسی سه سرعت هم‌محور شکل (۳-d).

همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است چگالی شار در این گیربکس سه سرعت بسیار مطلوب توزیع شده است.

۵- اعتبارسنجی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی از ساختار هلالی

با توجه به تحلیلی که در بخش‌های قبل انجام شد برای اعتبارسنجی یک نمونه آزمایشگاهی گیربکس مغناطیسی سه سرعت شکل (۳-d) ساخته شد.

با توجه به اینکه تاکنون گیربکس مغناطیسی سه سرعت ساخته نشده است در ساخت آن ابتکارات زیادی به کار گرفته شد به طور مثال همان‌طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است رتور میانی به صورت تسمه خور طراحی شده است.



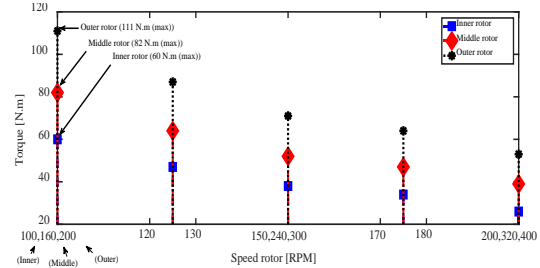
شکل (۱۳): رتور میانی گیربکس مغناطیسی سه سرعت.

مختلف به خصوص نیروگاه‌های بادی مورد استفاده قرار گیرد.

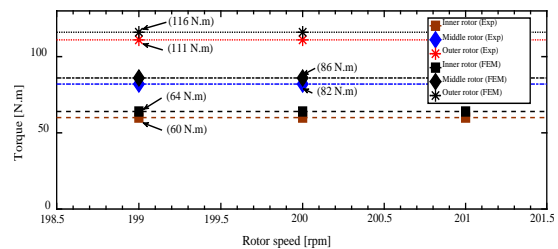
۷- مراجع

- [1] N. Niguchi and K. Hirata, "Cogging torque analysis of magnetic gear," IEEE transactions on industrial electronics, vol. 59, no. 5, pp. 2189-2197, 2011.
- [2] K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear," IEEE Transactions on magnetics, vol. 37, no. 4, pp. 2844-2846, 2001.
- [3] P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jorgensen, and O. Nielsen, "Development of a high-performance magnetic gear," IEEE transactions on industry applications, vol. 41, no. 3, pp. 764-770, 2005.
- [4] K. Chau, D. Zhang, J. Jiang, C. Liu, and Y. Zhang, "Design of a magnetic-gear outer-rotor permanent-magnet brushless motor for electric vehicles," IEEE transactions on magnetics, vol. 43, no. 6, pp. 2504-2506, 2007.
- [5] H.-S. Yan and Y.-C. Wu, "A novel design of a brushless dc motor integrated with an embedded planetary gear train," pp. 29-36, 2005.
- [6] T. Lubin, S. Mezani, and A. Rezzoug, "Analytical computation of the magnetic field distribution in a magnetic gear," IEEE Transactions on magnetics, vol. 46, no. 7, pp. 2611-2621, 2010.
- [7] L. Jing, L. Liu, M. Xiong, and D. Feng, "Parameters analysis and optimization design for a concentric magnetic gear based on sinusoidal magnetizations," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 24, no. 5, pp. 1-5, 2014.
- [8] L. Yong, X. Jingwei, P. Kerong, and L. Yongping, "Principle and simulation analysis of a novel structure magnetic gear," pp. 3845-3849, 2008.
- [9] N. W. Frank and H. A. Toliyat, "Gearing ratios of a magnetic gear for marine applications," pp. 477-481, 2009.
- [10] D. Evans and Z. Zhu, "Influence of design parameters on magnetic gear's torque capability," pp. 1403-1408, 2011.
- [11] M. Filippini, P. Alotto, G. Glehn, and K. Hameyer, "Magnetic transmission gear finite element simulation with iron pole hysteresis," Open Physics, vol. 16, no. 1, pp. 105-110, 2018.
- [12] D. Zhu, F. Yang, Y. Du, F. Xiao, and Z. Ling, "An axial-field flux-modulated magnetic gear," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 4, pp. 1-5, 2016.
- [13] K. Uppalapati, J. Kadel, J. Wright, K. Li, W. Williams, and J. Bird, "A low assembly cost coaxial magnetic gearbox," pp. 1-6, 2016.
- [14] K. Atallah, S. Calverley, and D. Howe, "Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear," IEEE Proceedings-Electric Power Applications, vol. 151, no. 2, pp. 135-143, 2004.

نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی انجام شد مشخص گردید که اختلاف و درصد خطا ۵ الی ۶ درصد است که رقم قابل قبولی جهت انجام مطالعات بعدی می‌باشد.



شکل (۱۷): نتایج اندازه‌گیری گشتاور نقطه‌ای



شکل (۱۸): مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی.

با توجه به نتایج تجربی می‌توان تأیید کرد که ساختار هلالی مورد مطالعه در این مقاله برای ساختارهای سه سرعت معتبر می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختارهای مختلفی از گیربکس‌های مغناطیسی سه سرعت بود ارائه و مقایسه گردید و مشخص شد گیربکس مغناطیسی با ساختار مستطیلی شکل از نظر توزیع چگالی شار مماسی و شعاعی از سایر گیربکس‌ها مطلوب‌تر است و در عین حال گیربکس مغناطیسی با ساختار ذوزنقه‌ای دارای چگالی شار و گشتاور پایین‌تری می‌باشد. پس از شبیه‌سازی ساختارهای اشاره شده در مقاله، در نهایت ساختار هلالی شکل مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بررسی نشان داد که این ساختار نسبت به ساختارهای دیگر مورد بحث کارایی بیشتری داشته و نتایج حاصله مطلوب‌تر می‌باشد. در پایان جهت بررسی اعتبار نتایج شبیه‌سازی، گیربکس مغناطیسی شکل (۳-d) برای اولین بار ساخته شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی ساختار هلالی و نتایج اندازه‌گیری مؤید این مطلب است که گیربکس مغناطیسی سه سرعت می‌تواند در آینده به‌عنوان ابزار قدرتمندی در صنایع

Analysis and optimization of Triple-speed Coaxial Magnetic Gears

A. Moghimi, M. H. Aliabadi*, H. Feshki Farahani

* Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran

(Received: 00/00/2021; Accepted: 00/00/2021)

Abstract

Besides introducing the triple-speed coaxial magnetic gear, the paper studies the influence of the geometric structure on torque and tangential and radial flux density. As rectangular and trapezoidal structures are more welcomed in most projects thanks to their ease of use, the present paper also introduces triple-speed coaxial magnetic gears with rectangular and trapezoidal structures. Then these gears are compared with crescent-shaped magnetic gear using the finite element method. The comparison shows that rectangular magnetic gears are not much different from crescent-shaped gears in terms of the flux density on the edges and corners. However, flux density distribution is more desirable in the former as the air gap between the middle rotor and modulators is variable, and less oscillation is experienced considering tangent and radial flux density distributions. Nonetheless, the trapezoidal structure presents unsatisfactory performance in comparison to the crescent-shaped structure in terms of flux density distribution and torque. An experimental crescent-shaped magnetic gear was built. The obtained results prove the validity of the use of this structure in triple-speed coaxial magnetic gears and the high performance of it compared to other structures used in magnetic gears.

Keywords: rectangular structure, trapezoidal structure, magnetic gear, finite element method, crescent-shaped structure, triple-speed coaxial.