مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISSN: 1605-9719
سال ۲۷، شماره ۱۲۲، صفحات ۳–۷

گیربکس‌های مغناطیسی با قدرت انتقال بالا

رسول محرمی[۱ و *]، محمد مصطفی محمدی[۱]، بهمن نعمتی[۲]
[۱] استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان
[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان
*مسئول مکاتبات: bahmannemati73@gmail.com

◄ چکیده

گیربکس‌ها، اجزای ضروری و جدایی‌ناپذیر سیستم‌های انتقال قدرت می‌باشند. این ماشین‌ها گشتاور را به سرعت و در بعضی مواقع سرعت را به گشتاور تبدیل می‌کنند. استفاده از گیربکس‌های مکانیکی در این سیستم‌ها از دیرباز تاکنون به عنوان رابطی میان بخش تولید نیروی محرکه و بخش مصرف این توان متداول بوده است. با گسترش استفاده از این گیربکس‌ها مشکلات و معایب این ماشین‌ها ظاهر شده و طراحان را بر آن داشته تا به دنبال جایگزینی مناسب برای گیربکس مکانیکی باشند. گیربکس‌های مغناطیسی به دلیل نداشتن تماس فیزیکی میان روتورهای داخلی و خارجی، بسیاری از مشکلاتی چون نیاز به روغن‌کاری و گریس‌کاری‌های دوره‌ای، سر و صدا، نیاز به تعمیرات دوره‌ای و ... که به دلیل تماس فیزیکی گریبان‌گیر گیربکس‌های مکانیکی بوده است را ندارد.

◄ واژگان کلیدی

گیربکس مغناطیسی
ویژگی‌های گشتاور
فتوالاستیسیته
انتقال قدرت

◄ تاریخچه مقاله

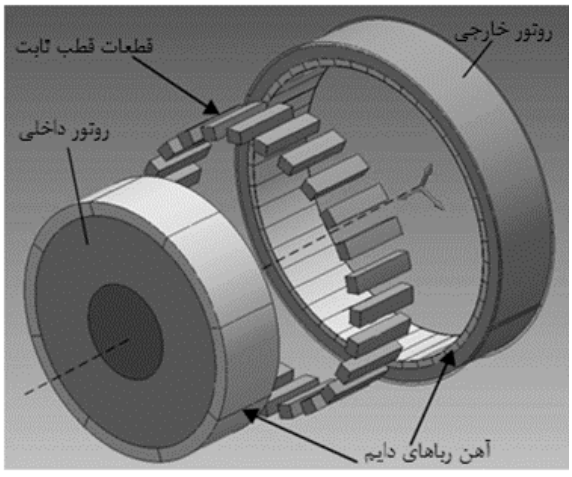
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۰

۱ مقدمه

گیربکس‌ها یکی از اعضای سیستم انتقال قدرت میباشد که وظیفه گیربکس در این سیستم‌ها تبدیل دور و گشتاور است. گیربکس وظیفه دارد که گشتاور (قدرت) و دور موتور را تغییر داده و به دلخواه مصرف کننده آن را درآورد. در ابتدا گیربکس‌های مکانیکی برای انجام این وظیفه ساخته شده‌اند.

گیربکس‌های مکانیکی کاربردهای وسیعی در ماشین‌های صنعتی و انتقال قدرت دارند. با اینکه این گیربکس‌ها دارای ویژگی‌ها و مزایای متعدد و بسیار مهمی هستند و نقش غیر قابل انکاری در صنعت دارند اما دارای معایب ذاتی و انکارناپذیری نیز می‌باشند که گشتن به دنبال جایگزینی مناسب برای این گیربکس‌ها را اجتناب‌ناپذیر نموده است. مشکلات و معایبی چون اصطکاک ناشی از مکانیزم عمل تماسی، تلفات وابسته به انتقال انرژی چون گرما، روغن‌کاری‌های متعدد و دوره‌ای و سر و صدا و نویزهای شنوایی ناشی از تماس فیزیکی شفت‌های ورودی و خروجی دارند که این معایب هزینه‌ی تعمیر و نگهداری این گیربکس‌ها را افزایش داده و طول عمر مفید این گیربکس‌ها را کاهش می‌دهد. گیربکس‌های مغناطیسی می‌توانند راه حل مناسبی برای این مشکل بوده و جایگزین مناسبی برای گیربکس‌های مکانیکی باشند. [۱]

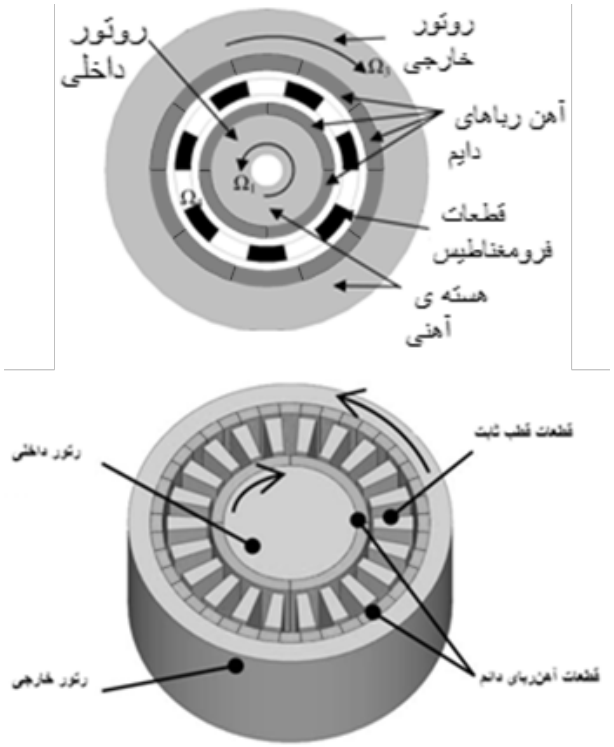
گیربکس‌های مغناطیسی تکنولوژی جدیدی هستند که به سرعت پدیدار شده‌اند. مکانیزم انتقال گشتاور بدون تماس فیزیکی، مهم‌ترین مشخصه و مزیت این گیربکس‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر این مشخصه و خصوصیت ذاتی باعث جدا شدن تماس مکانیکی شفت ورودی و خروجی از یکدیگر شده و این موضوع به نوبه‌ی خود مشکلات بعدی چون مشکل روغن‌کاری، خنک‌کنندگی را از بین می‌برد. عدم تماس فیزیکی همچنین باعث کاهش قابل توجه در نویزهای شنوایی، افزایش قابلیت اطمینان و حفاظت در مقابل اضافه بار در راندمان حداکثر را به دنبال دارد. [۲] مطالعات گسترده‌ای در رابطه با گسترش، بهبود عملکرد و بازده‌ی گیربکس‌های مغناطیسی انجام شده است و مدل‌ها و طراحی‌های متفاوت و زیادی در راستای این هدف ارئه شده است. اما همگی این طراحی‌ها دارای اشتراکاتی هستند. به عبارت دیگر همه‌ی آنها دارای یک اجزای مشترک می‌باشند همان طوریکه در شکل ۱ مشاهده می‌شود، گیربکس‌ها دارای ۳ جزء اصلی رتور خارجی، رتور داخلی و قطعات ثابت قطب می‌باشند که رتور داخلی و خارجی به ترتیب به شفت با سرعت بالا و شفت با سرعت پایین مربوط می‌شوند.



شکل ۱: اجزای اصلی گیربکس مغناطیسی

اساس کار این گیربکس‌ها بر این است که با دوران رتور داخلی میدان ناشی از قطب‌های داخلی جریانی در لایه‌ی میانی القاء کرده و باعث ایجاد میدان مغناطیسی در این لایه می شود. با توجه به قانون لنز این میدان با میدان به وجود آورنده‌ی خود مخالفت می‌کند و میدانی در جهت مخالف ایجاد می‌شود. قطب‌های نصب شده در رتور خارجی با قطب‌های به وجود آمده در

لایه‌ی میانی کوپل شده و می‌چرخد که این چرخش در جهت خلاف گردش رتور داخلی می‌باشد. با توجه به تفاوت در تعداد قطب‌های داخلی و خارجی سرعت چرخش روتور خارجی کمتر از روتور داخلی می‌باشد. [۳] شکل ۲ برش شعاعی یک گیربکس مغناطیسی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: برش شعاعی گیربکس مغناطیسی [۳]

۲ اهمیت بررسی گیربکس‌های مغناطیسی

مهم‌ترین چالش‌های پیش روی طراحان و مهندسان بوده است. با اختراع چرخ‌دنده‌ها و پس از آن گیربکس‌های مکانیکی و بهره‌گیری از این ماشین تازه وارد به صنعت، مشکلات استفاده از این دستگاه‌ها نیز هم‌زمان خودنمایی کرده است.

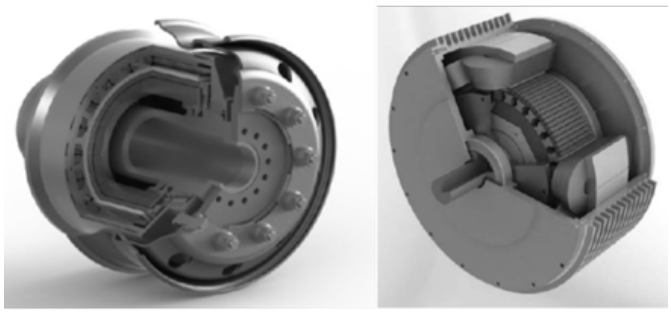
از جمله مشکلاتی که ناشی از تماس فیزیکی چرخ‌دنده‌ها در این گیربکس‌ها است می‌توان به خرد شدن دندانه‌ها هنگام افزایش بار، وجود استهلاک برای چرخ دنده ها و عمر کوتاه آن، نیاز به روان کاری و مراقبت، اعمال شدن نیروی زیاد بر یاتاقان، نیاز به دقت زیاد در ماشین کاری دنده ها به خصوص درباره‌ی منحنی دنده ها که دقت آن بسیار حساس و حیاتی است، نیاز به ماده مستحکم و چقرمه برای ساخت چرخ دنده به علت وجود تنش زیاد روی دنده ها و حذف عملیات سخت کاری سطحی چرخ دنده ها در نتیجه ساده تر شدن فرایند تولید و کاهش هزینه اشاره کرد. می‌توان ضرورت تحقیق بر روی گیربکس مغناطیسی را در موارد زیر خلاصه نمود:

۱. بالابودن گشتاور تولیدی
۲. بالا بودن راندمان
۳. ایجاد گشتاوری مطمئن و بی نوسان
۴. کاهش قیمت تمام شده و تجاری سازی محصول و...

۳ کاربرد گیربکس‌های مغناطیسی

گیربکس‌های مغناطیسی به دلیل داشتن چگالی گشتاور به وزن بالا و ابعاد کوچک و نسبت تبدیل‌های بالا در عملگرهای مورد استفاده در صنایع هوا و فضا [۴] کاربرد دارد. همچنین این گیربکس‌ها به دلیل عدم نیاز به نشت بندهای مکانیکی و حذف آنها و کاهش هزینه های نگهداری در پمپها و کمپرسورهای فشار بالا مورد استفاده قرار می گیرد.

ایزوله بودن ورودی و خروجی گیربکس و میرا کننده ضربه و شوک و وجود محدود کننده گشتاور و جلوگیری از فشار بیش از حد به بار و درایو سبب شده تا از این گیربکس‌ها در صنایع حفاری و صنایع سنگین استفاده شود. و در نیروگاه های بادی و موتورهای گشتاور بالا در خودروهای الکتریکی به عنوان In wheel motor مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۵]



شکل ۳: شماتیک یک الکتروموتور با ساختار چرخدنده هاي مغناطيسي [۵]

۴ معایب گیربکس‌های مغناطیسی

گیربکس‌های مغناطیسی نسبت به گیربکس‌های مکانیکی دارای معایب کمتری هستند از جمله این معایب می‌توان به سفتی پیچشی[۱] بسیار پایین در مقایسه با گیربکس مکانیکی [۶]، تلفات هیسترزیس در هسته‌های هر دو روتور داخلی و خارجی (بدنه‌ی گیربکس) و قطعات فرومغناطیس لایه‌ی میانی [۷] و همچنین تلفات ناشی از جریان‌های گردابی[۲] القایی در آهن‌رباهای دایم روتور و قطعات فرومغناطیس اشاره کرد.

۵ معادلات حاکم بر گیربکس مغناطیسی

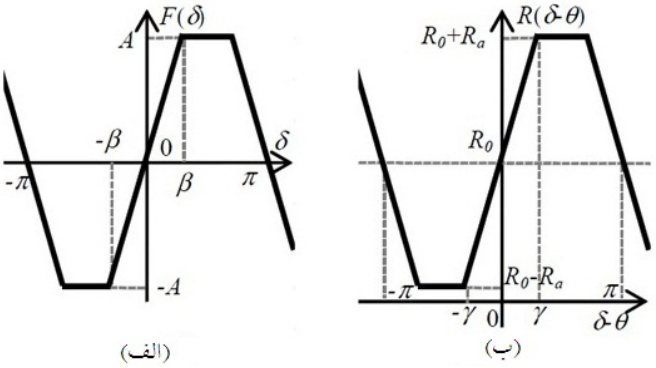
با صرف نظر کردن از آهن‌رباهای روتور دارای سرعت پایین در معادلات حاکم بر گیربکس‌های مغناطیسی، تنها آهن‌رباهای روتور سرعت بالا که نیروی مغناطیسی [۳] را تولید می‌کند مطابق شکل ۴ الف، در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ ب، قطعات قطب ثابت که هدایت مغناطیسی را انجام می‌دهند [۴]، نشان داده شده است. در این شکل θ زاویه روتور را نشان می‌دهد. [۸]

در این مدل، سری های فوریه فضایی $F(\theta)$ (نیروی محرکه مغناطیسی) و $R(\theta)$ (رلوکتانس)[۵] به ترتیب در روابط (۱) و (۲) نشان داده شده اند.

$$F(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} a_m \sin\left[(2m-1)N_h\theta\right] \qquad (1)$$

[1]Torsionally stiff [2]Eddy current [3]Magnetic Motive Force (mmf) [4]Permeance [5]Reluctance

$$R(\theta) = R_{\circ} \sum_{l=1}^{\infty} a_l \sin\left[(2m-1)N_s\theta\right] \qquad (2)$$



شکل ۴: (الف) توزیع نیروی محرکه‌ی مغناطیسی،(ب) نفوذپذیری مغناطیسی [۸]

در روابط بالا، N_h تعداد جفت قطب‌ها در روتور سرعت بالا و N_s تعداد قطعات قطب‌های ثابت می‌باشد. شار مغناطیسی $\phi(\theta)$ از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned}\phi(\theta) = &\sum_{m=1}^{\infty} a_m R_{\circ} \sin\left[(2m-1)N_h\theta\right] \\ &+ \sum_{l=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} a_l a_m \left[\cos\left[(2l-1)N_s\right.\right. \\ &\left.-(2m-1)N_h\right]\theta \\ &\left.-\cos\left[(2l-1)N_s-(2m-1)N_h\right]\theta\right] \end{aligned} \qquad (3)$$

شار مغناطیسی شامل هارمونیک‌های اول $H_1(l,m)$ ، دوم $H_2(l,m)$ و سوم $H_3(l,m)$ در رابطه‌ی (۴) نشان داده شده است.

$$\begin{cases} H_1(m) = (2m-1)N_h \\ H_2(l,m) = (2l-1)N_s - (2m-1)N_h \\ H_3(l,m) = (2l-1)N_s + (2m-1)N_h \end{cases} \qquad (4)$$

یک روتور سرعت بالا با سرعت $\Delta\theta$ می‌چرخد، سپس شار مغناطیسی $\phi(\theta)$ می‌تواند از رابطه (۵) بدست آید:

$$\begin{aligned}\phi(\theta) = &\sum_{m=1}^{\infty} a_m R_o \sin\left[H_1(m)(\theta+\Delta\theta)\right] \\ &+ \sum_{l=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} a_l a_m \left\{\cos\left[H_2(l,m)(\theta - \frac{H_1(m)\Delta\theta}{H_2(l,m)})\right]\right. \\ &\left.-\cos\left[H_3(l,m)\left(\theta+\frac{H_1(m)\Delta\theta}{H_3(l,m)}\right)\right]\right\} \end{aligned} \qquad (5)$$

مطابق رابطه (۵) شار مغناطیسی که دارای هارمونیک‌های $H_1(m)$، $H_2(m)$، $H_3(l,m)$ می‌باشد، به ترتیب با سرعت‌های $\Delta\theta$، $H_1(m)\Delta\theta/H_2(l,m)$، $H_1(m)\Delta\theta/H_2(l,m)$ می‌چرخد.

برای عمل کردن بعنوان گیربکس کاهشی، تعداد جفت قطب‌ها در روتور سرعت پایین N_l باید با $H_3(l,m)$ و یا $H_2(l,m)$ برابر باشد، بنابراین رابطه‌ی میان N_h تعداد قطب‌های روتور سرعت بالا، N_s تعداد قطعات میانی و N_l تعداد قطب‌های روتور سرعت پایین را می‌توان از رابطه (۶) بدست آورد:

$$(2l-1)\mathrm{N}_s = \mathrm{N}_l \mp (2\mathrm{m}-1)\mathrm{N}_\mathrm{h} \qquad (6)$$

سپس نسبت تبدیل گیربکس، G_r از رابطه (۷) بدست می‌آید:

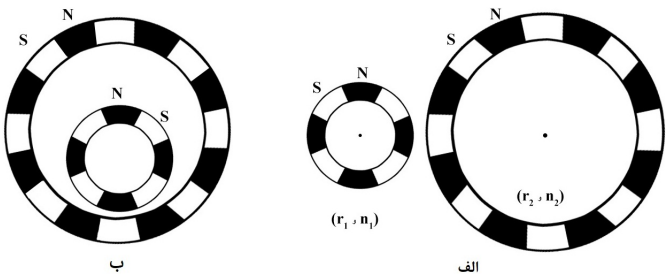
$$G_r = \mp\frac{(2m-1)N_n}{N_1} \qquad (7)$$

از روابط فوق، نیروی محرکه مغناطیسی، رلوکتانس، شار مغناطیسی و نسبت تبدیل گیربکس بدست می‌آید و در ادامه این روابط می‌توان انرژی مغناطیسی، چگالی شار میدان مغناطیسی وگشتاور دندانه‌ای در روتور را محاسبه نمود.

۶ گیربکس مغناطیسی برای مکانیزم‌های انتقال گشتاور کوچک

مکانیزم انتقال گشتاور میان محرک‌هایی چون موتورهای کوچک الکترواستاتیک بسیار مشکل است. یکی از بزرگترین دلایل این مشکل کمبود تجهیزات دقیق و با کیفیت بالا در سری‌های چرخ دنده می‌باشد. تکنولوژی موجود در ساخت دستگاه‌های کوچک صنعتی، نمی‌تواند چرخ‌دنده‌ی خوب و ایده‌الی را بسازد که انتقال گشتاور به درستی انجام گیرد. [۹]

شکل ۵ مفهوم کلی گیربکس مغناطیسی را بیان می‌کند. این گیربکس فاقد دندانه‌ی چرخ‌دنده‌های معمولی بوده و به این ترتیب فضای میان دو روتور خالی می‌باشد. گیربکس مغناطیسی از مواد مغناطیسی چون هیدرواکسیدآهن و مواد مغناطیسی نادر زمین ساخته شده است و محیط بیرونی را به صورت موضعی مغناطیسی کرده‌اند تا قطب‌های مغناطیسی کوچکی را ایجاد کنند.



شکل ۵: گیربکس مغناطیسی، (الف) خارجی و (ب) داخلی

به جهت بدست آوردن چرخشی نرم و روان ملزومات زیر باید رعایت شود:

۱. گام قطبی ۲ محور می‌بایست برابر بوده باشد، که ارتباط ساده‌ی (۸) در بدست آمدن این شرط وجود دارد:

$$r_1 : r_2 = n_1 : n_2 \qquad (8)$$

r_1 و r_2 به ترتیب شعاع‌های روتور درونی و بیرونی و n_1 و n_2 تعداد قطب‌های روتور درونی و بیرونی می‌باشند.

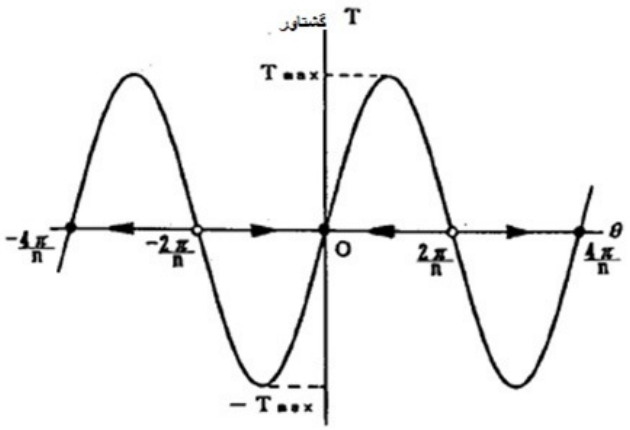
۲. تعداد قطب‌های هر روتور می‌بایست زوج بوده باشد.

۷ ویژگی‌های انتقال گشتاور

منحنی گشتاور NCMG (Non-Contact Magnetic Gear) در شکل ۶ نشان داده شده است که در آن λ طول موج منحنی گشتاور از رابطه‌ی (۹) بدست می‌آید:

$$\lambda = \frac{۴\pi}{n} \qquad (۹)$$

ماکزیمم گشتاور در $\frac{۱}{n}$ زاویه‌ای محور ظاهر می‌شود، در این حالت نقاط مثبت و منفی پایدار بر اساس چرخش پدیدار گشته‌اند. اگر میزان بارگذاری کمتر از گشتاور ماکزیمم باشد یک نیروی بازدارنده در نقاط ثابت عمل کرده و اگر بارگذاری بزرگتر از گشتاور ماکزیمم باشد نقطه‌ی تعادل به نقطه‌ی پایدار بعدی در مقابل نزدیک‌ترین نقطه‌ی ناپایدار می‌رود، که بدین ترتیب گیربکس دوران می‌کند. این مشخصه‌ی منحصر به فرد به گیربکس این اجازه را می‌دهد که به عنوان یک محدودکننده‌ی گشتاور استفاده شده و از بارگذاری بیش از حد اجتناب می‌کند.



شکل ۶: منحنی گشتاور NCMG [۸]

این ویژگی نقش بسیار مهمی در کاربردهای غیرصنعتی دارد و سبب می‌شود تا مکانیزم‌های جدید، ایمن و کم‌هزینه تولید شود. از این سیستم‌ها می‌توان در ربات‌های خانگی و پزشکی استفاده نمود. هرچند به ویژگی‌هایی چون ایمنی بالا، بی‌سر وصدا بودن و تمیزی نیز نیازمند است.

شکل ۷ تغییرات گشتاور ماکزیمم متناسب با چرخش در روتورهای سرعت بالا و کم‌سرعت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود چگالی گشتاور انتقالی بیشتر از ۱۰۰ $KN/m^۳$ قابل دست‌یابی است.

۸ نتیجه گیری

به علت ایراداتی که در چرخ دنده های معمولی بر اثر تماس مکانیکی بین دنده ها وجود دارد، نیاز به حذف این تماس می‌باشد تا اشکالات مذکور حذف شوند . برای این منظور از ایده ای به نام چرخ‌دنده مغناطیسی استفاده شده است. در این چرخ دنده ، دنده ها از جنس آهنربا هستند و انتقال قدرت بر اثر ربایش و دافعه بین آنها اتفاق می‌افتد. زمانی که هیچ گشتاوری به چرخ دنده محرک وارد نشود ، به چرخ‌دنده متحرک نیز گشتاوری وارد نمی شود به محض وارد آمدن گشتاور به چرخ‌دنده محرک بر اساس قانون سوم نیوتون همان گشتاور نیز به چرخ دنده متحرک وارد می شود. در صورتی که گشتاور مورد نیاز برای چرخاندن چرخ‌دنده متحرک بیش از مقدار اعمالی باشد، چرخ‌دنده محرک می‌چرخد و متحرک ثابت می‌ماند و بین آنها یک اختلاف فاز اتفاق می افتد . با افزایش این اختلاف فاز ، دو چرخ‌دنده همگام با هم می‌چرخند و انتقال قدرت صورت می‌گیرد. برای پژوهش‌های آینده می‌توان بر روی انواع مختلفی از گیربکس مغناطیسی با نرم افزار شبیه سازی کرد و نتایج حاصله را برآورد کرد. همچنین می‌توان بر روی جنس و ابعاد و ضخامت و تعداد آهنرباها و جفت قطب های مغناطیسی، در گیربکس مغناطیسی مانور بیشتری داد.

مراجع

[1] Gouda, E, Mezani, S, Baghli, L, and Rezzoug, A. Comparative study between mechanical and magnetic planetary gears. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(2):439, 2011.

[2] Dorrell, David G, Knight, Andrew M, Evans, Lyndon, and Popescu, Mircea. Analysis and design techniques applied to hybrid vehicle drive machines—assessment of alternative ipm and induction motor topologies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(10):3690–3699, 2012.

[3] Uppalapati, Kiran K and Bird, Jonathan Z. An iterative magnetomechanical deflection model for a magnetic gear. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(2):245–248, 2014.

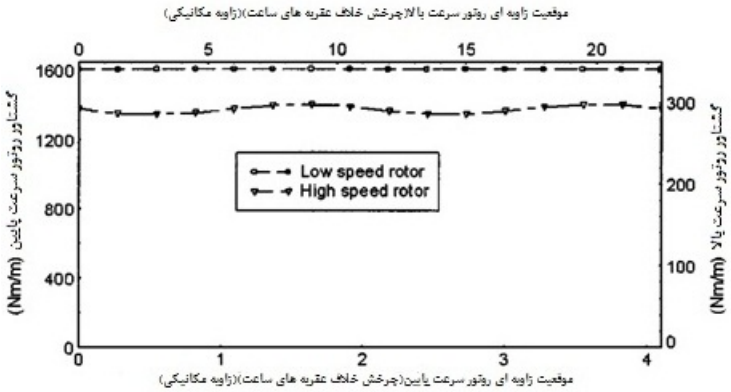
[4] Wang, Jiabin, Wang, Weiya, Atallah, Kais, and Howe, David. Design considerations for tubular flux-switching permanent magnet machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(11):4026–4032, 2008.

[5] Shah, Laxman, Cruden, Andrew, and Williams, Barry W. A variable speed magnetic gear box using contra-rotating input shafts. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(2):431–438, 2011.

[6] Frank, Nicolas W, Pakdelian, Siavash, and Toliyat, Hamid A. Passive suppression of transient oscillations in the concentric planetary magnetic gear. *IEEE transactions on energy conversion*, 26(3):933–939, 2011.

[7] Zhu, Dehong, Yang, Fei, Du, Yi, Xiao, Feng, and Ling, Zhijian. An axial-field flux-modulated magnetic gear. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(4), 2016.

[8] Jørgensen, Frank T, Andersen, Torhen Ole, and Rasmussen, Peter Omand. The cycloid permanent magnetic gear. in *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*, vol. 1, pp. 373–378. IEEE, 2006.



شکل ۷: تغییرات ماکزیمم گشتاور بر روی روتورهای سرعت بالا و سرعت پایین [۱۰]

[9] Ikuta, K, Makita, S, and Arimoto, S. Study on the non-contact magnetic gear (1st report). in *Procedure of Annual Conference of Japan Robotic Society*, vol. 8, pp. 663–668, 1990.

[10] Chen, Yiduan and Fu, Weinong. A novel hybrid-flux magnetic gear and its performance analysis using the 3-d finite element method. *Energies*, 8(5):3313–3327, 2015.