تأثیر تغییر ابعاد و جنس آهنربا در بهینه‌سازی گشتاور گیربکس‌های مغناطیسی با استفاده از آنالیز اجزای محدود

منصور بهبودی[۱]، محمود حسینی علی آبادی*[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی برق قدرت، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکز ،دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، man.behboodi.eng@iauctb.ac.ir

۲*- استادیار، گروه مهندسی برق قدرت، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکز ،دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، mah.hosseini-aliabadi@iauctb.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۷/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۸/۹/۳۰

چکیده: در گیربکس‌ها اجزای ضروری و جدایی ناپذیر سیستم‌های انتقال قدرت می‌باشند، گیربکس‌های مکانیکی به علت داشتن چگالی گشتاور بالا استفاده می‌شود، اما مشکلات و معایبی مانند اغتشاش، گرما، لرزش، سر و صدا، قابلیت اطمینان، نیاز به نگهداری، نیاز به روغن‌کاری و وجود اصطکاک، در این نوع گیربکس‌ها باعث شده تا نوع دیگری از گیربکس‌ها به نام گیربکس‌های مغناطیسی، جایگزین گیربکس‌های مکانیکی گردند. عمده مشکل استفاده از گیربکس‌های مغناطیسی گشتاور پایین‌شان در مقایسه با گیربکس-های مکانیکی می‌باشد که در این مطالعه با انتخاب یک نمونه از گیربکس‌های مغناطیسی با استفاده از روش اجزای محدود در محیط دوبعدی نرم افزار Maxwell، به بهینه‌سازی گشتاور گریبکس‌های مغناطیسی پرداخته شده است. تغییراتی که در این مطالعه بر روی گیربکس انجام شده است بررسی تاثیر تغییرات ابعاد و جنس آهنرباها بر روی رفتار گشتاوری گیربکس مغناطیسی می‌باشد. در نهایت این مطالعه نشان می‌دهد که با تغییرات جزئی ابعاد و جنس آهنربا می‌توان گشتاور گیربکس‌های مغناطیسی را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: گیربکس مغناطیسی، گشتاور ، آهنربا، بهینه‌سازی، روش اجزای محدود

۱- مقدمه

گیربکس‌ها یکی از اعضای سیستم انتقال قدرت می‌باشد، که وظیفه‌شان تبدیل دور و گشتاور است. گیربکس، گشتاور (قدرت) و دور موتور را تغییر داده و به دلخواه مصرف کننده تبدیل می‌کند.

در ابتدا گیربکس‌های مکانیکی برای انجام این وظیفه ساخته شدند. چگالی گشتاور یکی از معیارهای مهم برای ارزیابی عملکرد گیربکس مکانیکی است. این معیار که از نسبت حداکثر گشتاور تولیدی بر اندازه حجم بدست می‌آید ظرفیت انتقال گشتاور را نشان می‌دهد. مهندسان مکانیک برای افزایش چگالی گشتاور بر روی طرح‌های مختلفی از جمله بهبود شکل دندانه‌های فلزی و انتخاب فلزات مخصوص با استحکام بالا تمرکز کرده‌اند از آنجایی که در گیربکس‌های مکانیکی قسمت‌های متحرک به واسطه دندانه فلزی با یکدیگر درگیر می‌شوند، این مکانیزم اتصال باعث ایجاد معایب ذاتی و انکارناپذیری می‌شود. مشکلات و معایبی چون اصطکاک ناشی از مکانیزم عمل تماسی، تلفات وابسته به انتقال انرژی چون گرما، لرزش، نیاز به روغن‌کاری دوره‌ای [۱]، سر و صدا و نویزهای شنوایی [۲] ناشی از تماس فیزیکی شفت‌های ورودی و خروجی[۳]، که این معایب هزینه تعمیر و نگهداری این گیربکس‌ها را افزایش داده و طول عمر مفید این گیربکس‌ها را کاهش می‌دهد[۷-۴] .

گیربکس‌های مغناطیسی می‌توانند راه حل مناسبی برای این مشکل باشند [۴] که به دلیل عدم تماس فیزیکی به خوبی معایب گیربکس‌های مکانیکی را مرتفع سازند. اما عمده مشکل استفاده از گیربکس‌های مغناطیسی گشتاور پایین‌شان در مقایسه با گیربکس‌های مکانیکی می-باشد [۸]، که برای عملکرد بهتر گیربکس‌های مغناطیسی می‌باید گشتاور این نوع گیربکس‌ها را بهبود بخشید. مفهوم گیربکس مغناطیسی

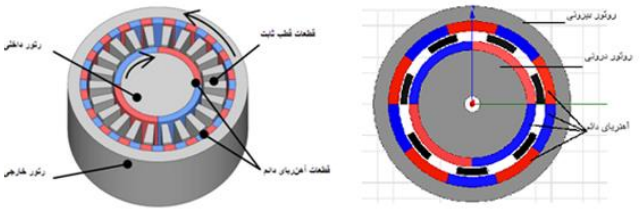
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

تقریبا یک قرن پیش و در سال ۱۹۰۱ توسط Armstrong ارائه شد [۹]. گیربکس‌های مغناطیسی اولیه شباهت بسیاری زیادی به گیربکس-های مکانیکی داشتند و حاوی آهنربای دائمی بودند که بر روی دو شفت جداگانه نصب می‌شدند. تفاوت این نوع گیربکس‌ها با گیربکس‌های مکانیکی در نحوه انتقال گشتاور بود به این ترتیب که به جای استفاده از دندانه‌ها از آهنرباها برای این منظور استفاده می‌شد.

مکانیزم انتقال گشتاور بدون تماس فیزیکی، باعث جدا شدن تماس مکانیکی شفت ورودی و خروجی از یکدیگر شده و این نکته مشکلاتی چون مشکل روغن‌کاری، خنک‌کنندگی را از بین می‌برد. عدم تماس فیزیکی باعث کاهش قابل توجه در نویزهای شنوایی، افزایش قابلیت اطمینان و حفاظت در مقابل اضافه‌بار در راندمان حداکثر را به دنبال دارد. [۵و۱۰]. مطالعات گسترده‌ای در رابطه با گسترش، بهبود عملکرد و بازده گیربکس‌های مغناطیسی انجام شده است و مدل‌ها و طراحی-های مختلفی برای رسیدن به این هدف ارائه شده است. اما همه این طراحی‌ها دارای یک اجزای مشترک می‌باشند. به طور کلی گیربکس‌ها از ۳ جزء اصلی رتور درونی، رتور بیرونی و قطعات ثابت قطب تشکیل می‌شوند که رتور درونی و بیرونی به ترتیب به شفت با سرعت بالا و شفت با سرعت پایین مربوط می‌شوند [۱۱].

اساس کار این گیربکس‌ها بر این است که با دوران رتور درونی میدان ناشی از قطب‌های داخلی جریانی در لایه میانی القاء کرده و باعث ایجاد میدان مغناطیسی در این لایه می‌شود. با توجه به قانون لنز این میدان با میدان به وجود آورنده خود مخالفت می‌کند و میدانی در جهت مخالف ایجاد می‌کند. قطب‌های نصب شده در رتور بیرونی با قطب‌های به وجود آمده در لایه میانی کوپل شده و می‌چرخد که این چرخش در جهت خلاف گردش رتور درونی می‌باشد. با توجه به تفاوت در تعداد قطب‌های داخلی و خارجی سرعت چرخش روتور بیرونی کمتر از روتور درونی می‌باشد [۶]. شکل (۱) برش شعاعی یک گیربکس مغناطیسی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): برش شعاعی گیربکس مغناطیسی [۶]

در اواخر دهه ۶۰ میلادی نسل جدیدی از گیربکس‌های مغناطیسی ارائه شد[۱۲] که دارای سه قسمت روتور درونی، روتور بیرونی و قسمت مدولاتور بین این دو بود، که بازده بالاتری نسبت به نسل‌های قبلی خود داشتند. این گیربکس‌ها در ابتدا برای مصارف کوچک استفاده می-شدند[۴]. در سال ۱۹۸۰ که نوعی آهنربای خاک کمیاب به نام نئودمیوم آهن بور با بازدهی بالا وارد بازار شد و تحقیق بر روی گیربکس‌های مغناطیسی علایق را تحریک کرد [۷]. در سال ۲۰۰۱، Howe و Attallahیک گیربکس مغناطیسی با بازدهی بالا به نام CMG، (گیربکس مغناطیسی هم محور) را پیشنهاد دادند، که اصل کار آن براساس مدولاسیون میدان مغناطیسی که توسط دو رتور آهنربا دائم تولید می‌شود، می‌باشد[۱۱] .

در این مطالعه با انتخاب یک نمونه از گیربکس‌های مغناطیسی با استفاده از روش اجزای محدود در محیط دوبعدی نرم افزار Maxwell، به بهینه‌سازی گشتاور گریبکس‌های مغناطیسی پرداخته می‌شود. پس از مقدمه و تاریخچه‌ای از مطالعات انجام شده بر روی گیربکس‌های مغناطیسی، تاثیر ابعاد آهنربا در بهینه سازی گشتاور گیربکس‌های مغناطیسی به روش اجزای محدود بررسی شده و در ادامه به تاثیر تغییر جنس آهنربا بر روی گشتاور پرداخته شده و در آخر نتیجه گیری حاصل از تاثیر همزمان تغییرات ابعاد و جنس آهنربا بر روی گشتاور گیربکس‌های مغناطیسی ارائه می‌گردد.

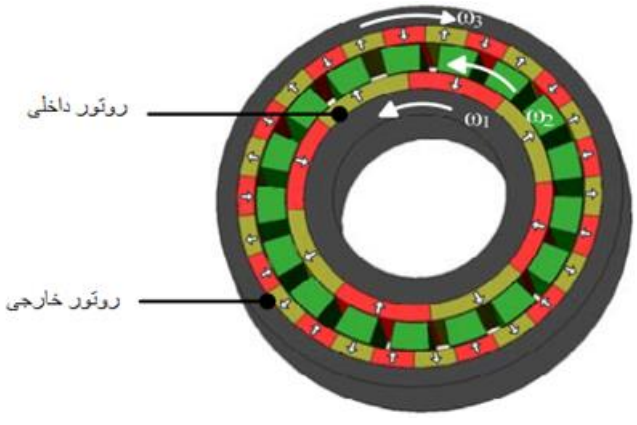
۲- تاثیر تغییر ابعاد آهنربا در بهینه‌سازی گشتاور گیربکس‌های مغناطیسی

گیربکس مغناطیسی نمونه، با توجه به در دسترس بودن پارامترهای فیزیکی آن، از میان ساختارهای مختلف انتخاب شده است و اثرات تغییر جزئی ابعاد آهنرباهای موجود در گیربکس مغناطیسی بر ماکزیمم گشتاور و ریپل آن در گیربکس مغناطیسی مورد تحلیل قرار گرفته است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو بعدی گیربکس مغناطیسی تحت تغییرات ذکر شده به وسیله نرم افزار Maxwell ارائه می‌گردد. سپس تغییرات گشتاور مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای اولین بار در این مقاله تغییرات گشتاوری در بهترین حالت تغییرات ابعاد آهنرباهای موجود در گیربکس مغناطیسی بر روی گشتاور خروجی بررسی شده است.

۲-۱- روابط تحلیلی گیربکس مورد مطالعه

یک ساختار نمونه از گیربکس مغناطیسی هم محور با آهنرباهای قرار گرفته روی سطح در شکل (۲) نشان داده شده است که از پنج قسمت اساسی تشکیل شده است [۱۳]:



شکل (۲): گیربکس مغناطیسی هم مرکز [۱۳]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

روتور داخلی

روتور خارجی

آهنرباهای سطحی روتور داخلی

آهنرباهای سطحی روتور خارجی

فولادهای الکتریکی که در فضای بین دو روتور و در همسایگی دو مجموعه از آهنرباهای سطحی قرار گرفته‌اند.

اگر روتور داخلی دارای p_1 جفت قطب و در سرعت ω_1 بچرخد و روتور خارجی دارای p_3 جفت قطب و در سرعت ω_3 چرخش کند، با فرض n_2 قطعه فولادی بین دو روتور خواهیم داشت:

$$n_2 = p_1 + p_3 \quad (۱)$$

و رابطه بین دو سرعت روتوری با فرض سرعت زاویه‌ای ω_2 برای فولادهای الکتریکی، به صورت زیر خواهد بود:

$$\omega_1 = \frac{n_2}{p_1}\omega_2 - \frac{p_3}{p_1}\omega_3 \quad (۲)$$

با جایگذاری رابطه (۱) در رابطه (۲) خواهیم داشت [۱۳ و ۱۴]:

$$\omega_1 = \frac{n_2}{n_2-p_3}\omega_2 - \frac{p_3}{n_2-p_3}\omega_3 \quad (۳)$$

همچنین اگر $\omega_3 = 0$ باشد، آنگاه:

$$\omega_1 = \frac{n_2}{n_2-p_3}\omega_2 \quad (۴)$$

با صرف‌نظر از تلفات، رابطه توان بین روتورها و معادله گشتاور به صورت زیر خواهد بود:

$$T_1\omega_1 + T_2\omega_2 + T_3\omega_3 = 0 \quad (۵)$$

$$T_1 + T_2 + T_3 = 0 \quad (۶)$$

چگالی گشتاور حجمی یک ماشین چرخشی می‌تواند با استفاده از رابطه (۷) بیان شود:

$$T_d = \frac{T}{\pi r^2 d} \quad (۷)$$

که T گشتاور ماکزیمم، d طول پشته موتور و r شعاع روتور بیرونی است.

$$\omega_3 = 0 \text{ اگر } \rightarrow \quad T_2 = -\frac{n_2}{n_2-p_3}T_1 \quad (۸)$$

$$\omega_2 = 0 \text{ اگر } \rightarrow \quad T_3 = -\frac{p_3}{n_2-p_3}T_1 \quad (۹)$$

و از رابطه (۸) و (۹) خواهیم داشت:

$$T_2 = -\frac{n_2}{p_3}T_3 \quad (۱۰)$$

۲-۲- روابط مربوط به روتور داخلی و خارجی

با توجه به شکل (۳) اگر r_{i1} شعاع درونی روتور داخلی، r_{o1} شعاع بیرونی روتور خارجی باشد و θ_{s1} طول کمان قطب فولادی روتور داخلی باشد، آنگاه عرض قطب فولادی و ارتفاع آن از روابط زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$W_{s1} = r_{o1}\theta_{s1} \text{ و } L_1 = r_{o1} - r_{i1} \text{ و } \theta_{s1} = \frac{\pi}{2p_1} \quad (۱۱)$$

همچنین برای روتور خارجی داریم:

$$W_{s3} = r_{i3}\theta_{s3} \text{ و } L_3 = r_{o3} - r_{i3} \text{ و } \theta_{s3} = \frac{\pi}{2p_3} \quad (۱۲)$$

که در آن r_{i3} شعاع درونی روتور خارجی، r_{o3} شعاع بیرونی روتور خارجی می‌باشد و θ_{s3} طول کمان قطب فولادی روتور خارجی می‌باشد.

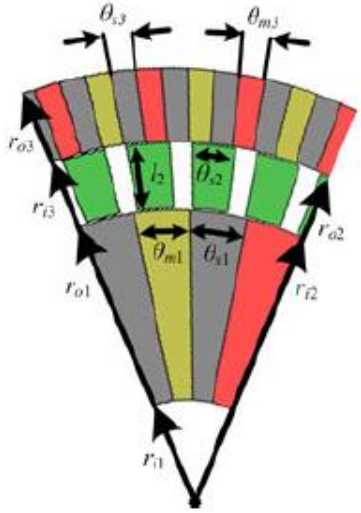


شکل (۳): گیربکس مغناطیسی نمونه جهت تحلیل روابط [۱۴]

۳-۲- مدل گیربکس مغناطیسی شار متمرکز مورد بررسی

در این مقاله یک ساختار جدید از گیربکس مغناطیسی در نظر گرفته شده که بجای آهنرباهای سطحی در ساختار مرسوم، از آهنرباهای مستطیلی در داخل ساختارهای روتوری استفاده می‌کند. آهنرباهای قرار گرفته در هر دو روتور به شکل مستطیلی و در جهت شعاعی گسترش یافته‌اند، به صورتی که در ساختار روتور داخلی از آهنرباهای بلند و در ساختار روتور خارجی از آهنرباهای کوتاه استفاده شده است. پارامترهای هندسی و مش‌بندی گیربکس مغناطیسی مورد مطالعه به ترتیب در شکل های (۴) و (۵) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است تعداد جفت قطب‌های موجود در روتور داخلی و خارجی با توجه به رابطه (۱) به صورت زیر بدست می‌آید:

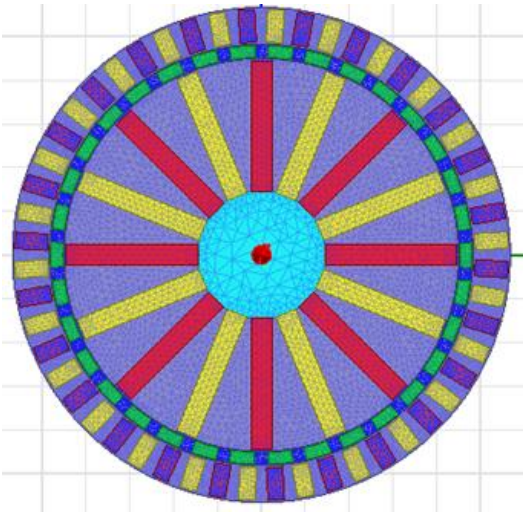
$$p_1 = 8 \quad \text{و} \quad p_3 = 26 \quad \text{و} \quad n_2 = 34$$



شکل (۴): پارامترهای هندسی گیربکس مغناطیسی مورد مطالعه [۱۳]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019



شکل (۵): مش بندی گیربکس مورد مطالعه

پارامترهای هندسی مورد نیاز در طراحی گیربکس مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): پارامترهای هندسی مورد نیاز

	پارامتر	مقدار	واحد
روتور داخلی	تعداد جفت قطب p_1	۸	
	شعاع داخلی r_{i1}	۲۵	میلی‌متر
	فاصله هوایی g	۰/۵	میلی‌متر
	کمان بین قطب‌ها θ_{s1}	$\pi/16$	رادیان
روتور خارجی	تعداد جفت قطب p_3	۲۶	
	شعاع خارجی r_{o3}	۱۱۰	میلی‌متر
	فاصله هوایی g	۰/۵	میلی‌متر
	کمان بین قطب‌ها θ_{s3}	$\pi/52$	رادیان
قسمت آهنی	تعداد جفت قطب n_2	۳۴	

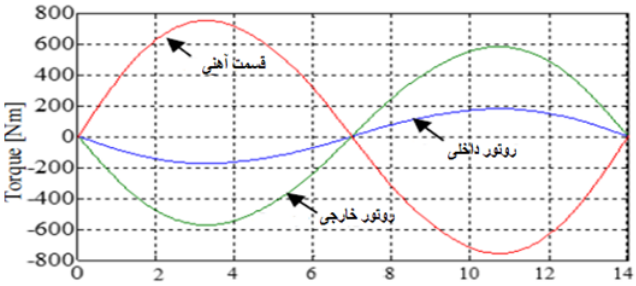
همچنین جهت مغناطیسی شدن آهنربا در مختصات استوانه‌ای به صورت یکی در میان در جهت $-\varphi$ و $+\varphi$ تنظیم شده است.

۳- تاثیر تغییر ابعاد آهنربا

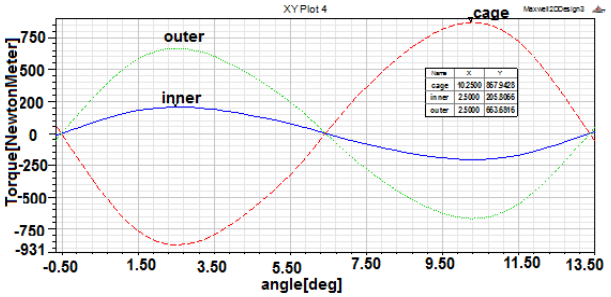
شبیه‌سازی گیربکس موردنظر در محیط دو بعدی نرم افزار المان محدود Maxwell انجام شده است، در مرحله اول گیربکس ساکن است و مشخصه گشتاور استاتیکی آن با تغییر زاویه مکانیکی دو روتور به صورت پله‌ای بدست آورده می‌شود. در مرحله دوم گیربکس در حالت کارکرد معمول خود قرار دارد و مشخصه های گشتاور دینامیکی آن در حوزه زمان در نقطه کار تنظیم شده بدست می‌آید. توجه می‌کنیم که روتور خارجی در سرعت ۲۰ رادیان بر ثانیه و سرعت روتور داخلی با استفاده رابطه (۲) برابر ۶۵- رادیان بر ثانیه تنظیم شده است.

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی حالت استاتیک

در شکل (۷)، به ترتیب شکل موج گشتاور استاتیکی قسمت آهنی، گشتاور استاتیکی روتور داخلی و گشتاور روتور خارجی نشان داده شده است. همان طور که مشخص است مقدار ماکزیمم گشتاور برای قسمت آهنی حدود ۸۶۸ برای روتور داخلی حدود ۲۰۶ و برای روتور خارجی حدود ۶۶۴ نیوتن متر می‌باشد که بهبود در گشتاور استاتیکی را نسبت به شکل مرجع نشان می‌دهد. همچنین درستی رابطه (۵) در شکل (۶) قابل مشاهده است.



الف



ب

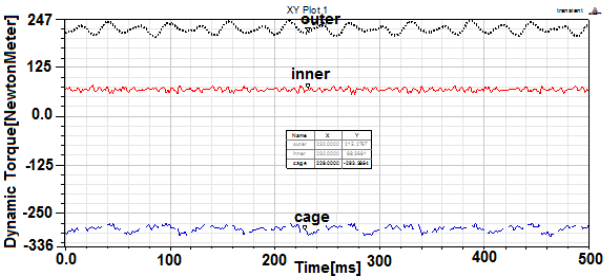
شکل (۶): گشتاور استاتیک قسمت‌های مختلف (الف) مرجع [۱۳] ، (ب) نمودار حاصل از تحلیل FEM

در شکل (۶)، به ترتیب شکل موج گشتاور استاتیکی قسمت آهنی، گشتاور استاتیکی روتور داخلی و گشتاور روتور خارجی نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است مقدار ماکزیمم گشتاور برای قسمت آهنی حدود ۸۶۸ برای روتور داخلی حدود ۲۰۶ و برای روتور خارجی حدود ۶۶۴ نیوتن متر می‌باشد که بهبود در گشتاور استاتیکی را نسبت به شکل مرجع نشان می‌دهد. همچنین درستی رابطه (۵) در شکل (۶) قابل مشاهده است.

۳-۲- نتایج شبیه‌سازی حالت دینامیکی

در شکل (۷) گشتاور دینامیکی مربوط به گیربکس مغناطیسی نشان داده شده است که به ترتیب برای روتور خارجی، روتور داخلی و قسمت آهنی مقدار متوسط ۲۲۲ و ۶۸ و ۲۸۸- نیوتن بر متر را دارد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شکل موج های گشتاور تقریباً همواری از شبیه سازی گیربکس بدست آمده است.

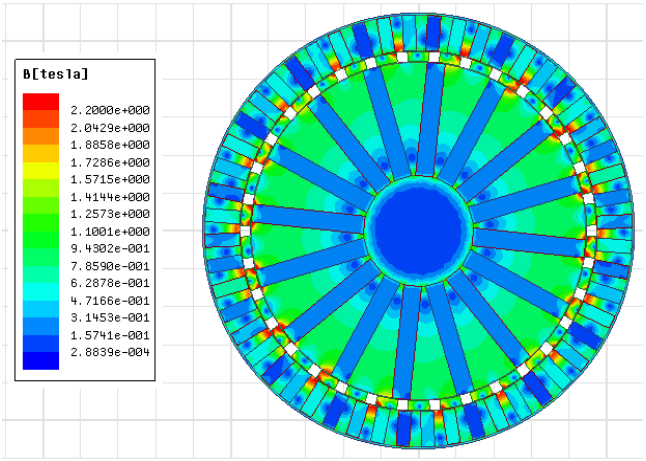
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



شکل (۷): گشتاور دینامیکی قسمت‌های مختلف گیربکس مغناطیسی

۳-۳- توزیع خطوط شار و چگالی گشتاور

در ادامه توزیع خطوط شار و چگالی گشتاور در ساختار شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۸) مشخص است فقط در بخشی از آهن های سگمنت شده و بخشی از آهن روتور بیرونی که در سمت شکاف هوایی قرار دارند، اشباع مشاهده می‌شود و در بقیه قسمت‌ها توزیع چگالی شار خوب است.



شکل (۸): چگالی شار در قسمت‌های مختلف گیربکس مغناطیسی

۴-۳- فرآیند بهینه‌سازی

در این شبیه‌سازی به سبب اهمیت بیشتر آهنرباهای موجود در گیربکس، اثرات تغییر جزئی ابعاد آنها بر ماکزیمم گشتاور و ریپل آن موردبررسی قرارگرفت. با بررسی طول آهنرباها مشخص شد که با کمتر کردن آن، ریپل گشتاور کم می‌شود اما از متوسط گشتاور نیز کاسته می‌شود که مطلوب ما نیست. از طرفی مقدار ماکزیمم طول آهنرباهای داخلی توسط قطر روتور داخلی و ماکزیمم طول آهنرباهای خارجی توسط طول روتور بیرونی محدودشده‌است، بنابراین برای دراختیار داشتن حداکثر گشتاور که هدف مقاله نیز بوده، باید مقدار آنها حداکثر برابر با ۵۹/۸ mm برای آهنربای داخلی و ۱۸/۶ mm برای آهنربای خارجی درنظرگرفته‌شود.

در مورد عرض آهنرباهای داخلی و خارجی، باید به این نکته توجه کرد افزایش عرض با افزایش متوسط گشتاور همراه خواهد بود، دلیل آن هم قوی‌تر شدن آهنرباها می‌باشد، اما ریپل گشتاور نیز افزایش خواهد یافت و برعکس. بنابراین با هدف افزایش گشتاور، افزایش عرض مطلوب خواهد بود، اما در افزایش عرض ما دو محدودیت داریم:

افزایش عرض آهنربای خارجی باعث باریک‌تر شدن قسمت آهنی روتور خارجی شده و منجر به اشباع بیشتر آهن می‌شود. این موضوع با توجه به توزیع چگالی شار در قسمت آهنی روتور خارجی در شکل (۸) نیز روشن است.

افزایش عرض آهنربای داخلی باعث کاهش قدرت مکانیکی ساختار می‌شود، چون با کاهش قسمت آهنی روتور داخلی در سمت یوغ همراه خواهد بود و از یک مقدار به بعد عملاً ممکن نیست، چون نمی‌توان به جهت فیزیکی آهنرباها را در روتور داخلی مهار کرد، زیرا دیگر قسمت آهنی نمی‌ماند که به یوغ متصل شود.

با توجه به این دو محدودیت تحلیل پارامتری عرض‌های دو آهنربا فقط برای مقدارهای جزئی ممکن خواهد بود. با بررسی این موضوع مشخص شد که مقدار بهینه برای عرض هر دو آهنربا برابر مقدارهای مرجع خواهد بود که برای آهنربای داخلی ۹/۵ mm و برای آهنربای خارجی ۷ mm می‌باشد.

۴- تأثیر تغییر جنس آهنربا

در گیربکس‌های مکانیکی وظیفه انتقال گشتاور به عهده چرخ دنده‌ها می‌باشد که در اتصال با یکدیگر و حرکت بر روی هم، گشتاور را از محور ورودی (منبع تولید توان مکانیکی) به محور خروجی انتقال می‌دهند. در گیربکس‌های مغناطیسی این وظیفه بر عهده آهنرباهای دائم استفاده شده در قطب‌های موجود در روتورهای داخلی و خارجی می‌باشد. این قطب‌ها به مانند چرخ‌دنده‌های موجود در گیربکس‌های مکانیکی در اتصال فیزیکی با یکدیگر قرار ندارند و به واسطه شارهای مغناطیسی که بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند گشتاور را انتقال می‌دهند. میزان نیرویی که این قطب‌ها به یکدیگر وارد می‌کنند به عوامل مختلفی همچون جنس آهنربای دائم بستگی دارد.

۱-۴- انواع آهنربای دائم

یکی از مهمترین تفاوت‌ها در مدل های مختلف گیربکس مغناطیسی، آهن رباها هستند؛ آهنرباهای دائمی شامل چند دسته کلی می‌باشند:

آهنربای سرامیکی

آلنیکو

ساماریوم کبالت

خاک کمیاب

از این میان دو نمونه که خواص و کارایی بیشتری دارند به صورت خاص بررسی می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

۲-۴- مقایسه آهنربای دائم خاک کمیاب و ساماریوم کبالت

در ادامه دو جنس از آهنرباهای خاک کمیاب (Nd-Fe-B) و ساماریوم کبالت (Sm-Co) استفاده می‌شود که مشخصات آن ها در جدول زیر مشاهده می‌شود [۱۵].

جدول (۲): مقایسه مشخصات مغناطیسی آهنرباهای دائم مورد نظر [۱۵]

	Hc (kA/m)	Br (T)	BHmax (Kj/m3)	Tc (C)
NdFeB	۷۵۰-۲۰۰۰	۱/۹-۴	۲۰۰-۴۰۰	۳۱۰-۴۰۰
SmCo	۶۰۰-۲۰۰۰	۱/۰-۱/۸	۱۵۰-۲۴۰	۷۲۰

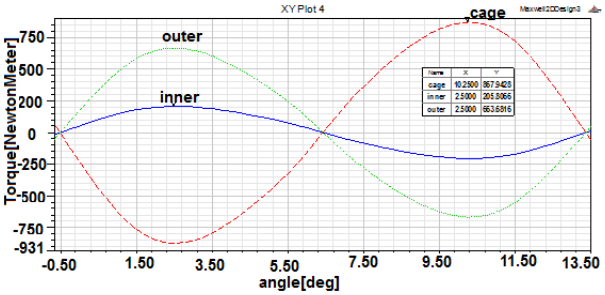
به دلیل افزایش چشمگیر قیمت این آهنرباهای دائم، بررسی قیمت اهمیت زیادی پیدا می‌کند. در جدول (۳) نمونه‌هایی از قیمت این آهنرباها آورده شده است.

جدول (۳): لیست قیمت مواد تشکیل دهنده آهنرباهای دائم مورد نظر [۱۵]

ماده	قیمت (بر حسب دلار بر کیلوگرم)
Co	۴۰/۷۶
Nd	۲۲۸/۲۸
Sm	۲۱۱/۹۷
B	۴/۰۸
Fe	۰/۴۹

با توجه به اطلاعات جداول (۲) و (۳) قیمت تمام شده برای هر یک از آهنرباهای دائم به صورت جدول (۴) بیان می‌شود. از این رو می‌توان دریافت که میزان مصرف هریک از آهنرباها در قیمت تمام شده گیربکس تاثیر به سزایی دارد. با این شرایط می‌توان به لزوم بررسی تاثیر جنس آهنرباهای مصرفی در گیربکس مغناطیسی به خوبی پی برد. این بررسی به بحث تجاری‌سازی این ماشین نیز کمک خواهد کرد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی با آهنربای دائم Ne-Fe-B در شکل (۹) و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با آهنربای دائم Sm-CO در شکل (۱۰) آورده شده است. در این شبیه‌سازی پارامترهای مربوط به گیربکس، همان پارامترهای مربوط به گیربکس نمونه می‌باشد و تنها جنس آهنرباهای استفاده شده عوض شده است.



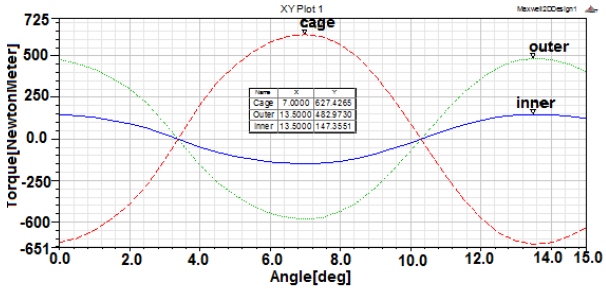
شکل (۹): گشتاور استاتیک قسمت‌های مختلف حاصل از تحلیل FEM با استفاده از Ne-Fe-B

با توجه به شکل (۹) ماکزیمم گشتاور برای قسمت آهنی ۸۶۸ ، برای روتور داخلی ۲۰۶ و برای روتور خارجی ۶۶۴ نیوتن متر می‌باشد.

جدول (۴): قیمت تمام شده برای هر یک از آهنرباهای دائم مورد نظر [۱۵]

آهنربای دائم	NdFeB	SmCo
حجم (cm3)	۹۷۸	۹۷۸
چگالی (g/cm3)	۷/۵	۸/۴
ترکیبات	%۳۲/۲۹-۵Nd	%۳۵Sm
	%۶۸/۶ -۶۳/۹Fe	%۶۰Co
	%۱/۱-۲/۱B	% ۲/۵Fe
	%۱/۰-۲/۶Re	% ۲/۵ Cu
Br(T)	۱/۱	۱/۰
گشتاور روتور خارجی (Nm)	۴۵۶	۳۸۹
چگالی گشتاور (kN/m3)	۶۷	۵۶
قیمت (USD/Nm)	۱/۵	۲/۰۹

در شکل (۱۰)، به ترتیب شکل موج گشتاور استاتیکی قسمت آهنی، گشتاور استاتیکی روتور داخلی و گشتاور روتور خارجی با استفاده از SmCo نشان داده شده است.



شکل (۱۰): گشتاور استاتیک قسمت‌های مختلف حاصل از تحلیل FEM با استفاده از Sm-CO

همان طور که از شکل (۱۰) مشخص است ماکزیمم گشتاور برای قسمت آهنی حدود ۶۲۷ ، برای روتور داخلی حدود ۱۴۷ و برای روتور خارجی حدود ۴۸۳ نیوتن متر می‌باشد. مقایسه مقادیر به دست آمده از شکل (۹) که در آن از آهنربای دائم Ne-Fe-B استفاده شده است، با شکل (۱۰) که در آن از Sm-CO استفاده شده است در جدول زیر نمایش داده شده است. طبق جدول (۵) با استفاده از آهنربای دائم Nd-Fe-B می توان به گشتاور بالاتری دست یافت.

جدول (۵): مقایسه مقادیر گشتاور ماکزیمم

نوع آهنربای دائم	ماکزیمم گشتاور قسمت آهنی	ماکزیمم گشتاور روتور داخلی	ماکزیمم گشتاور روتور خارجی
NdFeB	۸۶۸ (نیوتن متر)	۲۰۶ (نیوتن متر)	۶۶۴ (نیوتن متر)
SmCo	۶۴۷ (نیوتن متر)	۱۴۷ (نیوتن متر)	۴۸۳ (نیوتن متر)

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

۵- نتیجه‌گیری

همان‌طور که ملاحظه گردید با افزایش عرض آهنربای داخلی و خارجی، گشتاور نیز افزایش پیدا کرد، اما این افزایش عرض آهنربای خارجی باعث باریک تر شدن قسمت آهنی روتور خارجی شده و منجر به اشباع بیشتر آهن می‌شود. همچنین با افزایش عرض آهنربای داخلی، قدرت مکانیکی کاهش می یابد. بنابراین برای بهینه کردن گشتاور، فقط می توان طول آهنربای داخلی و خارجی را به مقدار جزئی تغییر داد.

با استفاده از نتیجه حاصله از جداول (۴) و (۵) و شکل های (۹) و (۱۰) به خوبی مشخص می شود که با استفاده از آهنربای دائم Nd-Fe-B در مقایسه با Sm-Co با صرف هزینه کمتر می توان به گشتاور بالاتری دست یافت.

مراجع

[1] Matthew, Johnson, Matthew C. Gardner, and Hamid and A. Toliyat, "Analysis of Axial Field Magnetic Gears with Albach Arrays", In IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), pp. 108-114 , 2015.

[2] M. Aubertin, A. Tounzi, and Y. L. Menach, "Study of an Electromagnetic Gearbox Involving Two Permanent Magnet Synchronous Machines Using 3-D-FEM", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 11, November 2008.

[3] K. atllah, S. D. Calverly and D. Howe, "Design, Analyesis and Realisation of a High Performance Magneits Gear", IEE Proc-electr. Power Appl, Vol. 151, No. 2, March 2004.

[4] E. Gouda, S. mezani, L. Baghli, and A. Rezzoug, "Comparative Study between Mechanical and Magnetic Planetary Gears", IEEE Transactions on Magnetics, February 2011.

[5] L. L. Wang, J. X. Shen, P. C. K. Luk, W. Z. Fei, C. F. Wang, and H. Hao, "Development of a Magnetic-Geared Permanent-Magnet Brushless Motor", IEEE Transactions On Magnetics, Octobr 2009.

[6] N. Niguchi and K. Hirata, "Cogging Torque Analysis of Magnetic Gear", IEEE Transactions on Industrial Electronics, May 2012.

[7] Li. Xianglin, et al. "Comparison of Magnetic-Geared Permanent-Magnet Machines", Progress In electromagnetics Research , Vol. 133, pp. 177–198, 2013.

[8] N. Niguchi, K. Hirata, M. Muramatsu, and Y. Hayakawa, "Transmission Torque Characteristics in a Magnetic Gear", XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010.

[9] C. G. Armstrong, "Power transmitting device," US Pat. 687 292, 1901.

[10] L. Jian, K. T. Chau, and J. Z. Jiang, "A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent_Magnet Brushless Machine for Wind Power Generation", IEEE Transactions on Industry Application, May/June 2009.

[11] K. Atallah, and D. Howe, "A Novel High-Performance Magnetic Gear", IEEE Transactions on Magnetics , Vol. 37, No. 4, pp. 2844-2846, 2001.

[12] T. B. Martin, "Magnetic transmission," US Pat. 3 378 710, 1968.

[13] K. K. Uppalapati, J. Z. Bird, J. Wright, J. Pitchard, M. Calvin, and W. Williams, "A Magnetic Gearbox with an Active Egion Torque Density of 239Nm/L", in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 54, Issue. 2, March/April 2018.

[14] K. K. Uppalapati, J. Z. Bird, D. Jia, et al. "Performance of a Magnetic Gear using Ferrite Magnets for Low Speed Ocean Power Generation", Energy Convertion Congress and Exposition (ECCE), pp. 3348-3355, 2012.

[15] C. Mu, K. Chau, L. Wenlong and L. Chunhua, "Cost-effectiveness Comparison of Coaxial Magnetic Gears with Different Magnet Materials", Transactions on Magnetics – Conferences, 20 June 2013.

رزومه



منصور بهبودی در تهران متولد شده است (۱۳۶۵). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه (۱۳۸۹) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه ماشین های الکتریکی و الکترونیک قدرت است و در حال حاضر و دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی می‌باشد.



محمود حسینی علی آبادی تحصیلات دانشگاهی خود را در هر دو مقطع کارشناسی و کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت در دانشگاه امیرکبیر (۱۳۸۰ و ۱۳۸۲) و دکتری مهندسی برق را در استخراج انرژی تجدیدپذیر با استفاده از ژنراتور الکتریکی جدید سپری کرده است (۱۳۹۱) . فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه ماشین‌های الکتریکی و پدیده‌های ویژه در سیستم قدرت است و در حال حاضر عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز می‌باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

Influence of magnet and dimensional changes on magnetic gearbox torque optimization using finite element analysis

Mansour Behboodi[1], Mahmoud Hosseini Aliabadi[2]

1- MSc student - Department of Electrical Engineering, Tehran Center Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, man.behboodi.eng@iauctb.ac.ir
2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Tehran Center Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract: Gearboxes are indispensable and indispensable components of power transmission systems. Mechanical gearboxes are used because of their high torque density, but problems and disadvantages such as perturbation, heat, vibration, noise, reliability, need for maintenance, lubrication and friction are all caused by these gearboxes. To replace other types of gearboxes, magnetic gearboxes replace mechanical gearboxes. The main drawback of using magnetic gearboxes is their low torque compared to mechanical gearboxes. In this study, we selected a sample of magnetic gearboxes using finite element method by 2D Maxwell software, to optimize magnetic torque. The changes made in this study to the gearbox are to investigate the effect of changing the dimensions and type of the magnets on the torque behavior of the magnetic gearbox. Finally, this study shows that magnetically transmitted torque can increase the torque of the magnets by slight variations in magnitude and type.

Keywords: Magnetic gearbox, torque, magnet, optimization, finite element method

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]