

Design of a New Magnetic Coaxial Gearbox

P. Naderi^{*}, A. Ramezannezhad², A. A. Motie Birjandi³

** University of Shahid Rajaei, Arak, Iran*

(Received: 14/05/2020; Accepted: 07/07/2020)

Abstract

This paper presents a new structure in the magnetic gearbox field, which can bring better performances rather than the conventional one. This work aims to describe a developed magnetic gear with a novelty in its physical structure which cause gearbox can experience a new magnetic field distribution. Having experienced a further distribution in its magnets plan, the new model can reveal better performances rather than the original coaxial gearboxes. Although dimensions of the new coaxial gearbox get smaller than the ones in typical design, torque transfer and fluctuating rates have incredibly improved. Simulation results, based on the proposed models, are extracted from a time-stepping finite element analysis. ANSYS Maxwell software uses the Finite Element Method in its calculations and reports the results to validate the magnetic systems operations.

Keywords: Coaxial Magnetic Gearbox, Dynamic Load Processing, Finite Element Method, Magnet Distribution, Transfer Torque, Dynamic Analysis

^{*} Corresponding author E-mail: p.naderi@sru.ac.ir

طراحی یک گیربکس مغناطیسی محوری جدید

پیمان نادری^{۱*}، آرمان رمضان‌نژاد^۲، علی اکبر مطیع بیرجندی^۳

۱- دانشیار، ۲- دانشجوی دکتری، ۳- دانشیار، گروه قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۷)

چکیده

در این مقاله ساختاری جدید از گیربکس مغناطیسی ارائه شده است که می‌تواند عملکرد بهتری را در مقایسه با نمونه‌های متداول از خود نشان دهد. هدف این کار بررسی یک نوآوری در ساختار فیزیکی گیربکس مغناطیسی می‌باشد که باعث شده میدان مغناطیسی توزیع مناسب‌تری در ماشین داشته باشد. تنظیم موقعیت آهنرباها در طرح جدید سبب توزیع بهتر شار مغناطیسی می‌شود و در نتیجه عملکرد ماشین نسبت به نمونه‌های مرسوم بهبود می‌یابد. در ضمن، تغییرات ذکر شده، این امکان را پدید می‌آورد که میزان چگالی شار در فاصله هوایی افزایش یابد و همچنین سامانه، پایداری بالاتری داشته باشد. گیربکس مغناطیسی جدید با ابعادی کوچک‌تر از طرح‌های پیشین، علاوه بر این که مقدار گشتاور انتقالی افزایش یافته است، ماشین نوسان کمتری را تجربه می‌کند. نتایج شبیه‌سازی‌ها مبتنی بر روش اجزاء محدود می‌باشد و با استفاده از نرم‌افزار تحلیل الکترومغناطیسی ANSYS Maxwell محاسبات و اعتبارسنجی مورد نظر انجام گرفته است.

کلید واژه‌ها: گیربکس مغناطیسی محوری، فرایند بارگذاری پویا، روش اجزای محدود، توزیع آهنرباها، گشتاور انتقالی، تحلیل دینامیکی

۱- مقدمه

می‌کنند که آهنرباها با روش‌های مختلفی در کنار هم قرار گرفته‌اند. آن‌ها سعی کردند تا برتری طرحی را که جهت میدان مغناطیسی در آن در راستای شعاعی می‌باشد را اثبات کنند و همچنین توانستند نرخ انتقال گشتاور و مقدار نوسان را بهبود دهند [۴]. اگرچه گشتاور انتقالی در آزمایش استاتیکی افزایش یافته است، اما اثر تغییر موقعیت آهنربا در حالت دینامیکی بررسی نشده است. استفاده از روش اجزاء محدود^۲ توانسته است دقت و سرعت محاسبات را بالا ببرد و اغلب مطالعات از این روش برای تحلیل نتایج خود استفاده می‌کنند [۷-۵].

در مرجع [۸] روش بهینه‌سازی معرفی شد که تاثیر اندازه و شکل آهنرباها را بر روی گیربکس مغناطیسی بررسی می‌کند. آپالیتی و همکاران. به تازگی مطالعاتی بر روی تاثیر ابعاد آهنرباها در مقدار چگالی شار، گشتاور کاهینگ و کاهش نوسان در این ماشین‌ها داشته‌اند [۹]. گرچه تحلیل حالت‌گذرا راهی مناسب برای بررسی دینامیکی سیستم می‌باشد، اما اغلب محققان از نتایج شبیه‌سازی‌های استاتیکی برای اعتبارسنجی مدل‌های الکترومغناطیسی خود استفاده می‌کنند. در مطالعاتی دیگر، علاوه بر نوآوری در طراحی اجزای تشکیل دهنده گیربکس مغناطیسی، بررسی مواد اولیه این قطعات نیز مورد توجه قرار گرفته است [۱۰ و ۱۱].

در سه دهه اخیر، گرایش به استفاده از گیربکس‌های مغناطیسی با توجه به ویژگی‌ها و مزیت‌های منحصر به فرد آن‌ها در صنعت افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده است. این ماشین را می‌توان یک سیستم هیبریدی مکانیکی-مغناطیسی نامید، زیرا با استفاده از سیستم‌های مغناطیسی، امکان انتقال انرژی مکانیکی را ما بین بخش‌های مکانیکی متحرک میسر می‌سازد. گیربکس‌های مغناطیسی در زمینه‌های مختلف صنعتی مانند الکترونیک و مکانیک استفاده می‌شوند و این ظرفیت را دارند که در سیستم‌های رباتیک و هوافضا نیز به کار گرفته شوند. با وجود قابلیت‌های فراوان گفته شده، میزان انتقال انرژی در دستگاه‌های بزرگ به هیچ وجه قابل قبول نمی‌باشد. روش‌های مختلفی برای بهبود کارایی گیربکس مغناطیسی وجود دارد، یکی از آن‌ها افزایش تاثیر متقابل مابین آهنرباها و مواد فرومغناطیس موجود در ماشین می‌باشد.

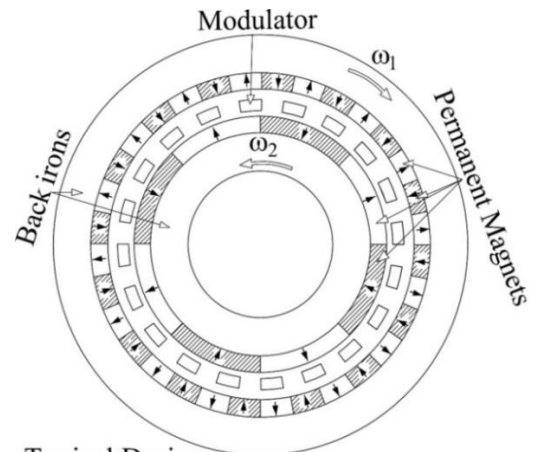
محققان بسیاری تاثیر ساختارهای مختلف را بر روی عملکرد گیربکس مغناطیسی بررسی کرده‌اند [۳-۱]، ولی بیشتر آن‌ها بر روی عملکرد ایستایی ماشین متمرکز شده‌اند. جیان و همکاران. دو گیربکس مغناطیسی هم محور را درحالی با هم مقایسه

² Finite Element Method

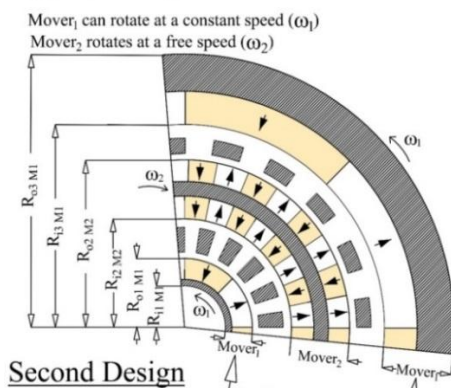
* نویسنده مسئول: p.naderi@sru.ac.ir

مطالعات دینامیکی انجام گرفته بر روی عملکرد گیربکس مغناطیسی بسیار محدود است، و تحقیقات محدودی اثر بار مکانیکی را در نتایج خود در نظر گرفته‌اند [۱۶ و ۱۷]. برای مطالعه و شبیه‌سازی یک طرح الکترومغناطیسی در حالت اتصال به بار مکانیکی، می‌بایست با استفاده از یک حل گر حالت گذرا، این امکان فراهم شود که، حداکثر ظرفیت ماشین به‌طور دقیق مورد ارزیابی قرار گیرد [۲۰-۱۸]. علی‌رغم مطالعات دینامیکی در مراجع قبلی، بار مورد مطالعه از نوع گشتاور ثابت بوده و نمی‌تواند توانایی ماشین را به‌طور کامل مورد ارزیابی قرار دهد. همان‌طور که می‌دانیم، در یک سیستم دوار، اتصالات مکانیکی فراوانی وجود دارد و نیروهای چرخان می‌توانند فشار و استرس فراوانی بر روی اجزای ماشین اعمال کنند. هر یک از این موارد را نیز به‌عنوان بار می‌توان در نظر گرفت. در صنعت ماشین‌های الکتریکی سه بار مکانیکی متداول وجود دارند که به‌صورت تابعی ریاضی از سرعت تعریف می‌شوند [۲۱]. مطالعه تحت بار گیربکس مغناطیسی نقش مهمی در آشکارسازی توان دینامیکی دستگاه دارد.

تحقیق ارائه شده مبتنی بر بررسی اثر تغییر ساختار بر مولفه‌های دینامیکی ماشین می‌باشد. گیربکس‌های مغناطیسی از دیرباز با مشکل اتصال مغناطیسی ضعیف در هنگام انتقال انرژی مواجه بوده‌اند و نوآوری‌های فراوانی انجام گرفته تا بتواند مقدار گشتاور انتقالی را بهبود بخشد و تلاش شد تا با تغییر در ساختار گیربکس مغناطیسی به این مهم دست پیدا شود. ارائه گیربکس مغناطیسی با ساختاری دوطبقه، نوآوری نخستین ارائه شده در این مطالعه می‌باشد. در بخش بعدی، این سیستم در سه حالت بارگذاری مکانیکی متداول مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت و مشخصات آن با مدل گیربکس مغناطیسی محوری مقایسه شد. بررسی دینامیکی سیستم گیربکس مغناطیسی در بارگذاری‌های مختلف کار جدیدی بود که برای اولین بار در این پژوهش انجام گرفته است و در بخش آخر تلاش شد تا با استفاده از تغییر در اندازه یکی از اجزای سازنده ماشین پایداری دینامیکی ماشین بهبود یابد. در شکل (۱) دو نمونه از گیربکس مغناطیسی محوری را نشان می‌دهد. مدل اول نمونه‌ای از گیربکس مغناطیسی مرسوم و طرح دوم نشان‌دهنده ساختاری جدید از گیربکس مغناطیسی می‌باشد. توزیع مناسب و تنظیم محل قرارگیری آهنرباها و بخش‌های متحرک، از جمله از نوآوری‌های موجود در این طرح می‌باشند. مبنای تقسیم‌بندی این مطالعه به شرح زیر می‌باشد: در ابتدا مشخصات و ابعاد دو طرح بررسی می‌شوند، در قسمت بعدی جزئیات تجزیه و تحلیل طرح‌ها بیان می‌گردند. در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی توضیح داده می‌شود و در انتهای مطالعه، بخش نتیجه‌گیری قرار دارد.



Typical Design



شکل (۱): طرح‌های اول (متداول) و دوم گیربکس مغناطیسی محوری.

در مرجع [۱۲]، طرحی از گیربکس مغناطیسی به نام دو لایه قوسی معرفی شد و با استفاده از روشی جدید شبه سه بعدی بهبود یافته مورد بررسی قرار گرفت. با این وجود، از ساختار استاتیکی مدل در حالت بی‌باری استفاده شده است. در مطالعه‌ای دیگر، شکل مدولاتور در مدل ارائه شده به‌طور کامل کرده است و در ادامه بررسی بیشتر نشان داد که تغییر طول مدولاتور می‌تواند مقدار چگالی شار شکاف هوایی و گشتاور انتقالی را افزایش دهد [۱۳].

در مرجع [۱۴]، طرحی متفاوت از گیربکس مغناطیسی معرفی شد که در آن آهنرباها موقعیت‌های مکانی متفاوتی را تجربه می‌کنند. در ادامه مدل مغناطیسی با استفاده از روش‌های نظریه تابع سیم‌پیچی^۱ و اجزاء محدود مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفت. مشابه با این تحقیق، در مرجع [۱۵] از روش‌های ذکر شده فوق، برای بهینه‌سازی ابعاد یک گیربکس مغناطیسی محوری استفاده گردید و در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Maxwell خروجی‌ها اعتبارسنجی شدند. لازم به‌ذکر است که نتایج تحلیل تابع تئوری سیم‌پیچی در حالت اشباع دقت کافی را ندارند.

¹ Winding Function Theory

علاوه بر این، سرعت روتور دوم نزدیک به سرعت محاسبه شده باشد و از محدوده مجاز خارج نگردد.

۲-۲- متغیرها و محدودیت‌های مدل

برای آشکارسازی عملکرد حالت گذرای ماشین دو نوع پارامتر ثابت و متغیر در شبیه سازی استفاده شده است. گروه اول مربوط به بار دینامیکی متصل به گیربکس است و پارامترهای گروه دوم به مشخصات فیزیکی خود دستگاه مربوط می‌شود. پارامترهای گروه اول مانند دامنه بار (a) و اندازه توان ریاضی متغیر سرعت (b) که در رابطه گشتاور بار (T_l) ظاهر می‌شود و با توجه به شرایط تغییر می‌کنند. از سویی دیگر، پارامترهای وابسته به ساختار ماشین مانند ضریب ممان اینرسی (J) و ضریب تعدیل (B) که در بیشتر مواقع ثابت هستند و به طراحی ماشین وابسته‌اند.

مطالعه بر روی حالت‌های مختلف بارگذاری نشان داد که گیربکس مغناطیسی به شدت به ضرایب a و b حساس است. لازم به ذکر است که این ضرایب برای مطالعه سه بار متداول صنعتی در فرایند شبیه‌سازی انتخاب می‌شود و مقادیر b را با توجه به نوع بار می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$T_l = a \times \omega^b \quad \text{where } b \in \{0, 1, 2\} \quad (2)$$

علاوه بر متغیرهای گشتاور بار، پارامترهای وابسته به ساختار ماشین هم در محاسبات و فرایند شبیه‌سازی تاثیرگذارند، ارتباط بین پارامترهای گروه اول و دوم در رابطه دینامیکی ماشین به صورت زیر می‌باشد:

$$T_{out} = T_l + J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (3)$$

با افزایش دامنه a در رابطه (۲) می‌توان حداکثر بار مکانیکی قابل تحمل برای گیربکس مغناطیسی را تعیین کرد، علاوه بر بار مکانیکی دیگر پارامترهای موثر در دینامیک ماشین مانند J و B که در رابطه (۳) بیان شده‌اند نیز به‌طور گسترده‌ای در شبیه‌سازی‌های این مطالعه استفاده شده‌اند.

۲-۳- راهبرد پردازش

هدف این بخش، ارائه راهکاری برای استخراج پارامترهای دینامیکی استفاده شده در رابطه (۲) می‌باشد. در این راستا سعی شد تا توابع بار مختلفی به گیربکس مغناطیسی متصل گردد. از مسیر فرایند آزمون و خطا که همراه با رعایت محدودیت سرعت می‌باشد می‌توان سه تابع بار مکانیکی هدف T_{l1} ، T_{l2} و T_{l3} را به دست آورد. این گشتاورهای بار متناسب با سرعت هستند و مقدار دامنه آن‌ها از روش اجزاء محدود و با کمک نرم‌افزار ANSYS Maxwell محاسبه می‌شوند.

جدول (۱): ابعاد و مشخصه‌های هر طرح.

Machine Dimensions	1st Model	2nd Model	Modified Design
R_{i1M1} (mm)	۳۰/۵	۱۰/۴	۱۳
R_{o1M1} (mm)	۴۵/۵	۱۸	۲۲/۶
R_{i2M2} (mm)	۵۱	۲۷/۲	۳۴
R_{o2M2} (mm)	۶۶	۳۹/۴	۴۴
R_{i3M3} (mm)	-	۴۵/۲	-
R_{o3M3} (mm)	-	۵۳/۳	-
Airgap (mm)	۰/۳۴-۰/۳۴	۰/۳۴-۰/۳۴	۰/۳۴-۰/۶۸
$h_{M(max)}$ (mm)	۸/۴۲	-	۸/۴۲
$h_{M(min)}$ (mm)	۵/۲	۵/۲	-
N_{PM1}	۸	۸	۸
N_{PM2}	۳۲	۳۲	۳۲

۲-۳- ساختار گیربکس مغناطیسی

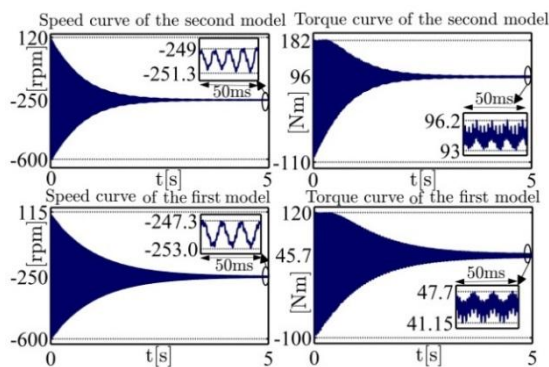
در این قسمت علاوه بر شرح روابط ریاضی و طرح‌های ارائه شده، معیارهایی جهت تعیین حداکثر ظرفیت عملکرد گیربکس‌ها نیز ارائه می‌شود. به منظور مطالعه عملکرد گیربکس‌های مغناطیسی، سطح مقطعی از طرح‌های مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۱) نشان داده می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در طرح جدید سطوح داخلی و خارجی گیربکس توسط مجموعه‌ای از آهنربا پوشیده شده است، درحالی‌که در مدل‌های محوری قدیمی تنها یک طرف بخش‌های متحرک، قطعات آهنربا وجود دارد.

۲-۱- توصیف مدل

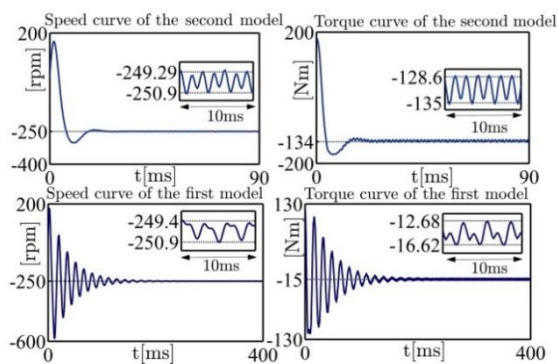
مشخصات اولیه دو گیربکس مغناطیسی محوری در جدول (۱) نمایش داده شده است. این مشخصات شامل شعاع داخلی و خارجی روتورهای اول و دوم، ابعاد مدولاتورها، تعداد آهنرباها (N_{PM1} و N_{PM2}) و اندازه فاصله هوایی می‌باشد. تعداد مدولاتورها (N_{HM}) در طرح دوم دو برابر مدل اول می‌باشد ($N_{HM2} = 2 \times N_{HM1} = 40$). جنس این قطعات از آهن می‌باشد و به عنوان پل فرومغناطیسی جهت عبور شار استفاده می‌شود. ارتباط بین تعداد مدولاتورها و قطب‌های بخش متحرک به صورت زیر می‌باشد:

$$N_{HM} = N_{PM1} + N_{PM2} \quad (1)$$

در صورت عدم برقراری رابطه (۱) بین مدولاتورها و آهنرباها پاسخ خروجی گیربکس مغناطیسی طراحی شده متعادل نخواهد بود. در طرح دوم، روتور شماره یک از دو بخش داخلی و خارجی متصل به هم تشکیل شده است که در اطراف روتور دوم می‌چرخد. برای تعیین حداکثر توانایی انتقال گشتاور، می‌بایست بیشترین بارگذاری ممکن بر روی روتور دوم صورت گیرد،



شکل (۲): مشخصه‌های طرح‌های اول و دوم در بارگذاری اول.



شکل (۳): مشخصه‌های طرح‌های اول و دوم در بارگذاری دوم.

در تمامی طرح‌های ارائه شده، روتور اول با سرعت 1000 rpm چرخانده می‌شود و روتور دوم با سرعتی برابر با 250 rpm در خلاف جهت روتور اول آزادانه می‌چرخد. در انتها می‌توان مشاهده کرد که تغییر ظاهری طرح تأثیری در اندازه سرعت ندارد، درحالی‌که میزان گشتاور انتقالی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۳-۱- تحلیل آزمایش بارگذاری اول

شکل (۲) نمودارهای انتقال گشتاور و سرعت مربوط به طرح‌های اول و دوم را نشان می‌دهد. T_{I1} از نوع بار ثابت می‌باشد و می‌توان اثر دینامیکی آن را با اتصال به گیربکس‌ها بررسی نمود. همگرایی نتایج نشان‌دهنده سازگاری ماشین‌ها با این نوع از بار می‌باشد. بررسی نتایج نشان داد که تغییر ساختار باعث بهبود نرخ انتقال گشتاور شده است و مقدار متوسط گشتاور انتقالی از 45 Nm در طرح اول به حدود 96 Nm در طرح دوم می‌رسد. در ادامه، برای بررسی فرکانس نوسانات، بازه 50 ms در انتهای شبیه‌سازی انتخاب گردید و مشاهده شد که فرکانس نوسان در طرح دوم به اندازه 2 kHz کاهش می‌یابد. همچنین، دامنه نوسانات در سرعت و گشتاور به ترتیب 15% و 168% کاهش را تجربه می‌کنند. در مجموع طرح دوم توانسته درجه سازگاری را بالاتر برد.

معادله (۴) ارتباط مابین بخش‌های متحرک گیربکس مغناطیسی را نشان می‌دهد (N_{PM2} و N_{PM1} ، قطب‌های روتورهای اول و دوم می‌باشند).

$$\omega_{m2} = - (N_{PM1} / N_{PM2}) \times \omega_{m1} \quad (4)$$

با توجه به رابطه (۴) می‌توان مشاهده نمود که بخش‌های متحرک دو گیربکس (روتورها) با سرعتی متفاوت و در خلاف جهت یکدیگر می‌چرخند. جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم افزار ANSYS Maxwell، از رابطه (۴) استفاده می‌شود. به عبارتی دقیق‌تر، در صورتی که سرعت بخش‌های متحرک به مقدار محاسبه شده در این رابطه همگرا شوند نتایج آزمایش و شبیه‌سازی قابل قبول است. فرایند تحلیلی انجام گرفته برای تعیین حداکثر بار قابل تحمل برای گیربکس به شرح زیر است:

ابتدا به صورت تصادفی مقداری برای a انتخاب می‌کنیم و شبیه‌سازی را برای این بار مکانیکی انتخابی انجام می‌دهیم، در صورتی که سرعت همگرا به مقدار محاسبه شده در رابطه (۴) باشد، مقدار a قابل قبول بوده و فرایند شبیه‌سازی را دوباره تکرار نماییم. فرآیند تکرار، تا زمانی ادامه می‌یابد که مقدار خروجی سرعت منطقی باشد و در ادامه با انتخاب گام^۱ افزایشی مناسب برای a ، دقت محاسبات را می‌توان بالا برد. جدول (۲) نتایج نهایی پروسه تکرار حل گر حالت گذرا^۲ را در بارگذاری‌های مختلف را نشان می‌دهد و حداکثر ظرفیت مجاز بار مکانیکی را معرفی می‌نماید.

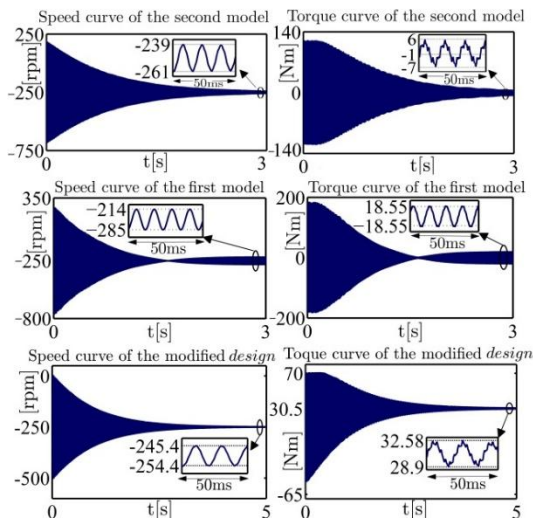
۳- نتایج شبیه‌سازی

نرم‌افزار الکترومغناطیسی ANSYS Maxwell که برای تحلیل مدل‌های ارائه شده در این مطالعه استفاده شد و توانست مدل‌های مختلف گیربکس مغناطیسی را در حالت‌های بارگذاری مختلف با دقت بسیار بالایی بررسی کند. برای بررسی میزان سازگاری گیربکس‌های مغناطیسی با سه بار مکانیکی متداول از یک حل گر حالت گذرا استفاده می‌شود تا بتوان رفتار دینامیکی ماشین را تحلیل نمود.

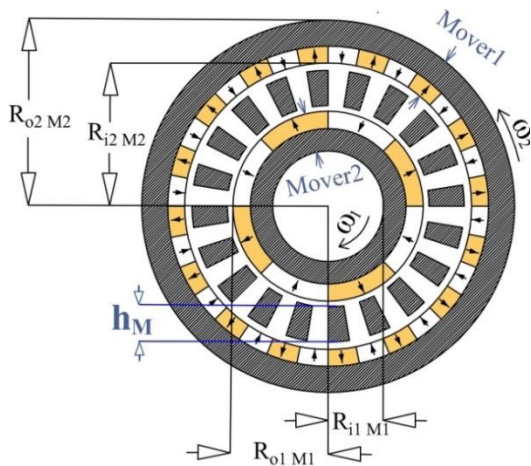
جدول (۲): پارامترهای ماشین و بار

Parameters	1 st Design	2 nd Design	Modified Design
$J(\text{Kg}/\text{m}^3)$	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
$B(\text{N.m.s}/\text{rad})$	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
T_{I1}	$-5.5 \times \omega^0$	$-95 \times \omega^0$	-
T_{I2}	$-0.55 \times \omega^1$	$-5 \times \omega^1$	-
T_{I3}	$-2 \times 10^{-8} \cdot \omega^2$	$-5 \times 10^{-5} \cdot \omega^2$	$-2.7 \times 10^{-3} \cdot \omega^2$

^۱ Step^۲ Transient Solver^۳ دور بر دقیقه^۴ نیوتون متر



شکل (۴): مشخصه‌های طرح‌های اول، دوم و بهبودیافته در بار سوم



شکل (۵): مشخصه‌های ظاهری گیربکس مغناطیسی بهبودیافته

در شکل (۵) برای رفع این مشکل راه حلی ارائه گردید که در آن، طول مدولاتور یا h_M افزایش پیدا می‌کند. این نمونه را طرح اصلاح شده نامیده شد. همانطوری که در منحنی‌های شکل (۴) دیده می‌شود، این تغییر توانست متوسط گشتاور انتقالی را به حدود $30/5 \text{ Nm}$ برساند و دلیل این امر، افزایش تمایل شارها برای عبور از مدولاتور می‌باشد. در نتیجه میزان چگالی گشتاور در فاصله‌های هوایی به میزان چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

۳-۴- تحلیل تراکم شار در آزمون بارگذاری دوم

برخی از پارامترهای طراحی نقشی حیاتی در عملکرد یک دستگاه الکترومغناطیسی ایفا می‌کنند، از جمله آن‌ها می‌توان شکاف هوایی، جنس قطعات، اندازه مدولاتور و آهن‌ریا را نام برد و با انتخاب مناسب این پارامترها می‌توان طرحی بهینه را ارائه نمود. بررسی شکل‌های (۶ و ۷)، اثر برخی از این پارامترها را در ساختار گیربکس مغناطیسی نشان می‌دهند.

۳-۲- تحلیل آزمایش بارگذاری دوم

در این قسمت بار T_{I2} به گیربکس‌های تحت مطالعه دینامیکی متصل گردید. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۳) می‌توان دریافت که گیربکس‌های محوری بالاترین درجه‌سازگاری را با این نوع از بار دارند و علت آن است که رابطه ریاضی T_{I2} متناسب با سرعت است و این خاصیت ویژه می‌تواند هم راستا با ضریب میرایی بیان شده در رابطه (۲)، پایداری دینامیکی کل را بالا ببرد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که گیربکس‌ها در حداقل زمان ممکن، به حالت پایدار خود می‌رسند درحالی‌که دامنه و فرکانس نوسان نیز محدود می‌باشد.

با وجود اینکه گیربکس محوری طرح اول سازگاری خوبی از خود نشان داد، اما همچنان نوسانات حالت گذرا وجود دارد. آزمایشی مشابه بر روی طرح دوم انجام گرفت و همانگونه که در شکل (۳) نشان داده شده است، نتایج به میزان زیادی بهبود یافته‌اند. علاوه بر این، مدل دوم دینامیک سریعتری دارد و در مدت ۲۵ میلی‌ثانیه به $99/95\%$ بیشترین سرعت و همچنین $99/5\%$ گشتاور نهایی خود می‌رسد. درباره طرح اول می‌توان گفت که دینامیک کندتری دارد و بعد از گذشت 200 ms به $99/5\%$ سرعت نهایی و $98/5\%$ بیشترین گشتاور خود می‌رسد. قابل توجه است که متوسط گشتاور انتقالی در طرح دوم 135 Nm بود که در مقایسه با طرح نخستین با مقدار 120 Nm افزایش قابل قبولی را تجربه می‌کند. از طرفی دیگر، نرخ نوسانات از $13/13\%$ به $2/42\%$ رسیده است.

۳-۳- تحلیل آزمایش بارگذاری سوم

شکل (۴) در رابطه با سومین آزمایش بارگذاری می‌باشد، در این آزمایش T_{I3} وابسته به مربع سرعت است. در نگاه اول با توجه به زیاد بودن دامنه و فرکانس نوسانات و پایین بودن نرخ انتقال گشتاور، به نظر می‌رسد که گیربکس مغناطیسی محوری سازگاری مناسبی با این نوع از بار را ندارد. بررسی بیشتر نتایج نشان داد که سرعت در مدل اول بعد از گذشت $2/9 \text{ s}$ ، به $14/2\%$ مقدار نهایی خود رسیده است، درحالی‌که متوسط گشتاور انتقالی نزدیک به صفر است و همچنین دامنه نوسانات بسیار بالا می‌باشد. از جمله معضلات تولید این گشتاور سینوسی با دامنه بالا این است که باعث کشیده شدن جریان نوسانی زیادی از منبع الکتریکی خواهد شد که بسیار مخرب است. بررسی طرح دوم نشان داد که نوسان بهبود یافته است و به مقدار $4/4\%$ در زمان $2/9 \text{ s}$ رسیده است، با این حال گشتاور انتقالی بهبود قابل توجهی پیدا نکرده و به مقدار 1 Nm رسیده است و به نظر رسید که دو طرح، در مواجهه با بار T_{I3} کارایی کافی را ندارند.

در انتها می‌توان گفت که طرح‌های دوم و اصلاح‌شده شرایط بهتری را از نظر اندازه چگالی شار در خود دارند و این تغییرات ساختاری سبب بهبود چگالی شار به میزان $0.4 T^2$ گردیده است.

۴- نتیجه‌گیری

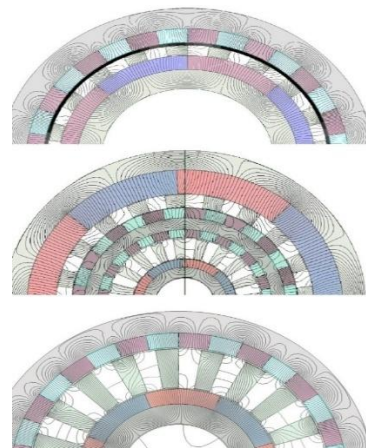
در این مقاله یک گیربکس مغناطیسی محوری با ساختاری جدید ارائه گردید و در ادامه با مدلی متداول مقایسه شد. علاوه بر این، از روش المان محدود در فرایند شبیه‌سازی استفاده گردید تا برتری دینامیکی مدل جدید اثبات شود. تغییر ساختار ارائه شده در مدل جدید می‌تواند مقدار گشتاور انتقالی و و پایداری سیستم را افزایش دهد. در انتها تاثیر اندازه مدولاتور بر روی عملکرد سیستم مورد مطالعه می‌گیرد.

۵- پیشنهاد برای کارهای آینده

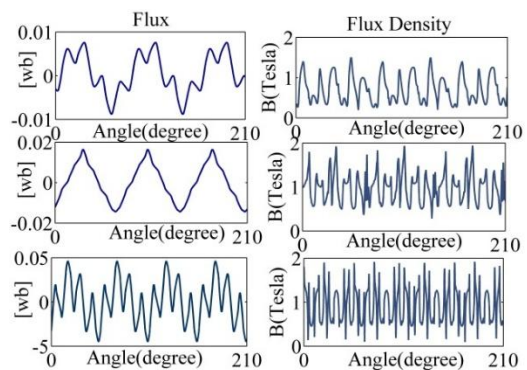
تغییرات اخیر در ساختار گیربکس‌های مغناطیسی، توانسته راندمان کلی دستگاه را بهبود بخشد. از طرفی می‌توان گفت که عملکرد موفق طرح‌های جدید به میزان زیادی به نرخ انتقال گشتاور وابسته است. در مدل پیشنهادی اول، با افزایش طبقات استاتور و روتور این امکان میسر می‌شود که آهنربا در محیط دستگاه توزیع شود که این امر می‌تواند علاوه بر بالا بردن کارایی دستگاه میزان پایداری سیستم الکترومغناطیسی را نیز افزایش دهد. در مورد دوم می‌توان کار بر روی گیربکس‌های مخروطی را پیشنهاد داده شود.

۶- مراجع

- [1] J. Keller, Y. Guo, and L. Sethuraman, "Gearbox Reliability Collaborative Investigation of Gearbox Motion and High-Speed-Shaft Loads," National Renewable Energy Lab, Golden, CO, Tech. Rep. TP-5000-65321, 2016.
- [2] S. Pakdelian, M. Moosavi, H. A. Hussain, and H. A. Toliyat, "Control of an electric machine integrated with the trans-rotary magnetic gear in a motor drive train," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 1, pp. 106-114, 2016.
- [3] L. Sun, M. Cheng, and H. Jia, "Analysis of a novel magnetic-gear dual-rotor motor with complementary structure," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 11, pp. 6737-6747, 2015.
- [4] L. Jian, K. Chau, Y. Gong, J. Jiang, C. Yu, and W. Li, "Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies," IEEE Transactions on magnetics, vol. 45, no. 10, pp. 4526-4529, 2009.
- [5] 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.
- [6] F. T. Jørgensen, T. O. Andersen, and P. O. Rasmussen, "The cycloid permanent magnetic gear," in Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, vol. 1, IEEE, pp. 373-378, 2006.



شکل (۶): توزیع شار طرح‌های اول، دوم و اصلاح شده.



شکل (۷): منحنی‌های تغییرات شار و چگالی شار

آزمایش این قسمت نیز مشابه بخش‌های قبلی، در حالت گذرا و تحت تاثیر بار T_{12} انجام گرفته است. علت این انتخاب، عملکرد رفتاری متعادل تر گیربکس‌ها تحت این نوع از بارگذاری می‌باشد. در ادامه شکل (۶) خطوط توزیع و پراکندگی شار را در طرح‌های اول و دوم و همچنین مدل اصلاح‌شده را نمایش می‌دهد. همانطوری که مشاهده می‌شود، مدولاتور نقش پل را برای عبور شار مغناطیسی را ایفاء می‌کند و انتخاب یک افزایش طول مناسب می‌تواند مقدار شار نشتی را کاهش دهد. شکل (۷) منحنی‌های خطوط شار و چگالی شار مربوط به سه طرح را نمایش می‌دهد. در طراحی اول، با توجه به کوتاه بودن اندازه مدولاتور، میزان شار نشتی بالا می‌باشد.

طرح دوم از لحاظ ظاهری، ترکیبی از طرح‌های اول و اصلاح شده می‌باشد و تحلیل چگالی شار شکل (۷) نشان می‌دهد که بخش خارجی شارنشتی بیشتری را نسبت به قسمت داخلی تجربه می‌کند. همچنین، توزیع فیزیکی مناسب سبب شده است که مقدار شار فاصله هوایی برابر با $16/4 \text{ mWb}^1$ گردد که به صورت تقریبی دو برابر شار فاصله هوایی طرح اولیه است.

- [14] N. W. Frank and H. A. Toliyat, "Analysis of the concentric planetary magnetic gear with strengthened stator and interior permanent magnet inner rotor," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 47, no. 4, pp. 1652–1660, 2011.
- [15] A. Nordel'of and A.-M. Tillman, "A scalable life cycle inventory of an electrical automotive traction machine part ii: manufacturing processes," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 23, no. 2, pp. 295–313, 2018.
- [16] N. Niguchi and K. Hirata, "Transmission torque analysis of a novel magnetic planetary gear employing 3-d fem," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 48, no. 2, pp. 1043–1046, 2012.
- [17] M. Desvaux, B. Traull'e, R. L. G. Latimier, S. Sire, B. Multon, and H. B. Ahmed, "Computation time analysis of the magnetic gear analytical model," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 5, pp. 1–9, 2017.
- [18] S. Mousavi, "Design of new type high efficiency magnetic gear," M.Sc. Thesis, Istanbul Technical Univ., May 2015.
- [19] S. Pakdelian, M. Moosavi, H. A. Hussain, and H. A. Toliyat, "Control of an electric machine integrated with the trans-rotary magnetic gear in a motor drive train," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 1, pp. 106–114, 2016.
- [20] C.-C. Huang, M.-C. Tsai, D. G. Dorrell, and B.-J. Lin, "Development of a magnetic planetary gearbox," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 3, pp. 403–412, 2008.
- [21] G. K. Dubey, "Fundamentals of electrical drives," Alpha Science Int'l Ltd., 2001.
- [7] L. Sun, M. Cheng, and H. Jia, "Analysis of a novel magnetic-g geared dual-rotor motor with complementary structure," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 11, pp. 6737–6747, 2015.
- [8] M. Benarous and M. Trezieres, "Design of a cost-effective magnetic gearbox for an aerospace application," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 17, pp. 4081–4084, 2019.
- [9] K. K. Uppalapati, M. D. Calvin, J. D. Wright, J. Pitchard, W. B. Williams, and J. Z. Bird, "A magnetic gearbox with an active region torque density of 239 n_m/l," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 2, pp. 1331–1338, 2017.
- [10] S.-J. Kim, C.-H. Kim, S.-Y. Jung, and Y.-J. Kim, "Optimal design of novel pole piece for power density improvement of magnetic gear using polynomial regression analysis," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 3, pp. 1171–1179, 2015.
- [11] M. A. Rahimi, M. Durali, and M. Asghari, "A design approach for coaxial magnetic gear and determination of torque capability," *Scientia Iranica*, vol. 25, no. 2, pp. 772–789, 2018.
- [12] S. A. Afsari, "Performance Analysis and Optimization of a Novel Arcuate Double-sided Magnetic Gear using Quasi 3-D Analytical Modeling for Wind Power Application," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 1, no. 2, pp. 1–9, 2019. (In Persian)
- [13] S. J. Kim, E.-J. Park, S.-Y. Jung, and Y.-J. Kim, "Transfer torque performance comparison in coaxial magnetic gears with different flux modulator shapes," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, pp. 1–4, 2017.