فصلنامه پژوهش در علوم، مهندسی و فناوری
دوره ۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹
صفحات ۱۲-۱۹
ISSN: 2476-5082
www.uctjournals.com

اصول عملکرد و الزامات تعلیق مغناطیسی در یاتاقان‌های مغناطیسی

سامان هوشیان
کارشناس ارشد برق گرایش الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی
Saman.hoshian@znu.ac.ir
منیره علیزاده
کارشناس ارشد برق گرایش الکترونیک ، مهندس شرکت نمانور آسیا
QC@namanoorasia.com

چکیده
در این مقاله ابتدا اصول پیدایش و همچنین عملکرد تعلیق مغناطیسی بررسی شده و در ادامه چگونگی استفاده از تعلیق مغناطیسی در یاتاقان مغناطیسی و همچنین نوع عملکرد یاتاقان‌های مغناطیسی ارائه می‌گردد. در نهایت الزاماتی مطرح می-شود که بتوان با رعایت این الزامات یک سیستم تعلیق مغناطیسی مناسب برای یاتاقان‌های مغناطیسی معرفی نمود.

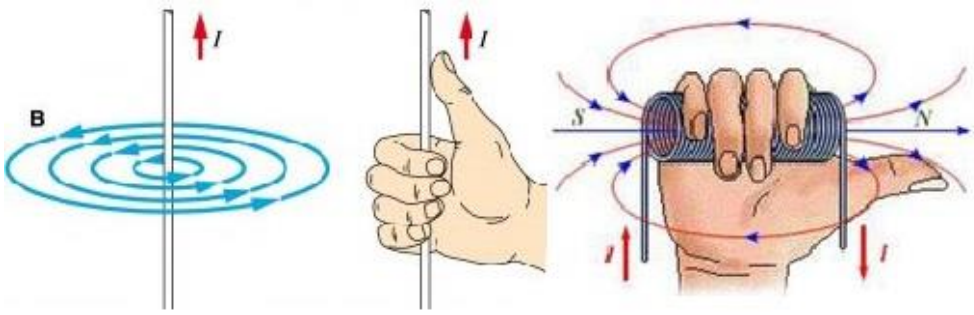
کلمات کلیدی: تعلیق مفناطیسی، یاتاقان مغناطیسی، شناوری مغناطیسی

۱. مقدمه

یاتاقان‌های مغناطیسی امروزه به صورت گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند، که برای مطالعه آن ابتدا باید با روش عملکرد و حتی چگونگی پیدایش آنها آشنا شده تا بتوانیم بر روی این سیستم‌ها مطالعه دقیقی داشته باشیم.

۲. اصول عملکرد تعلیق مغناطیسی

همان‌طورکه می‌دانیم و در شکل ۱ نشان داده شده است. در هر سیم با توجه به جهت جریان جاری شده در سیم‌پیچ، میدان-های مغناطیسی ایجاد می‌گردد، که این میدان‌ها، هم جهت داشته و هم باعث ایجاد یک نیروی مغناطیس می‌گردند که با میزان جریان عبوری رابطه مستقیم دارند. اگر این سیم را به صورت سیم‌لوله درآوریم، تعداد دور سیم‌لوله در نیروی مغناطیسی تاثیر گذار خواهد بود، و اگر در داخل این سیم‌لوله یک هسته آهنی قرار گیرد باعث تقویت میدان‌هایی که در اطراف این سیم-لوله ایجاد شده می‌گردد. درسیم لوله میدان‌های مغناطیسی تولید شده جهت دار در یک میدان مشخص قرار می‌گیرند که می-توان ابتدا و انتهای سیم لوله را با استفاده از قانون دست راست با دو قطب N و S نامگذاری نمود.



شکل ۱- نحوه ایجاد میدان در سیم و تعیین قطب بندی در سیم‌لوله

۲-۱. تعلیق مغناطیسی

تعلیق مغناطیسی دراصل به دو صورت امکان پذیر می‌باشد[۱]:

۱. جذب

۲. دفع

در حالت اول میدان‌های مغناطیسی تولید شده در سیم‌لوله باعث ایجاد نیروی کششی بر روی اجسام فلزی و یا آهن‌ربا می-گردد که برای نمونه می‌توان به جرثقیل‌های مغناطیسی و یا یاتاقان‌های مغناطیسی-شعاعی اشاره نمود.

در حالت دوم میدان‌های مغناطیسی تولید شده در سیم‌لوله به دلیل تغییر جهت جریان جاری در سیم‌لوله نسبت به حالت قبل باعث ایجاد یک نیروی دافعه بر روی اجسام فلزی و یا آهن‌ربا می‌گردند.

۲-۲. الزامات تعلیق مغناطیسی

ریشه کلمه تعلیق معلق نمودن می‌باشد، ولی درعلم مکانیک به کنترل در آوردن هر چیز به واسطه یک وسیله دیگر را تعلیق می‌نامند. مانند سیستم تعلیق ماشین که کنترل چرخ‌ها را به راننده داده، ولی باعث معلق شدن چرخ‌ها نمی‌گردد. در سیستم-های تعلیق مغناطیسی هم امکان معلق نمودن وجود دارد و هم امکان کنترل، که جهت استفاده از این سیستم‌ها الزاماتی باید درنظر گرفته شود که عبارت‌اند از[۲]:

۱. باتوجه به ماهیت مغناطیسی اولین الزام این سیستم، سیم‌پیچ‌ها و آهن‌ربا بوده که باعث ایجاد میدان‌های الکترومغناطیسی و مغناطیسی می‌گردند.

۲. به دلیل هائز اهمیت بودن تلفات در ورق‌های هسته که با منحنی هیسترزیس نمایش داده می‌شود جنس هسته استفاده شده یکی دیگر از الزامات این سیستم می‌باشد.

باتوجه به موارد بالا به هر فرایندی که در آن قطب‌های مغناطیسی باعث کنترل اجسام فلزی در اطراف خود گردند را می‌توان تعلیق مغناطیسی نامید.

یکی از موارد استفاده از تعلیق مغناطیسی، یاتاقان‌های مغناطیس می‌باشد که با استفاده از میدان‌های مغناطیسی باعث معلق نمودن و کنترل اجسام فلزی و یا آهن‌ربا در مجاورت خود خواهند شد.

۲-۳. شناوری مغناطیسی

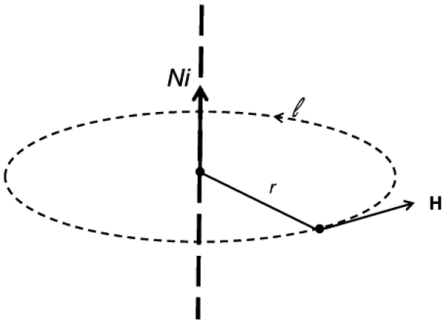
مبنای اصلی عملکرد یاتاقان‌های مغناطیسی شناوری مغناطیسی می‌باشد، در واقع این روشی است که به کمک آن می‌توان با استفاده از میدان‌های مغناطیسی در حضورمیدان‌های گرانشی اجسام فلزی را معلق نمود. مجموعه جسم به همراه مولدهای میدان مغناطیسی و زمین، یک سیستم شناوری مغناطیسی نامیده می‌شود[۳].

درساختمان یاتاقان مغناطیسی چیدمان قطب‌ها باید به گونه‌ای باشد تا برآیند نیروی کششی ایجاد شده برابر صفر گردد، چراکه اگر چیدمان به صورت نامتقارن باشد میدان‌های مغناطیسی ایجاد شده توسط قطب‌ها، قطعه آهن‌ربا به تعلیق درآمده را به خود جذب نموده و به قطب می‌چسبد به همین دلیل اگر چیدمان قطب‌ها به صورت متقارن باشد با کشش هرقطب به سمت خود برآیند این نیروها صفرشده که باعث به تعلیق درآمدن قطعه آهن‌ربا به صورت متعادل می‌گردد.

۲-۴. روابط حاکم بر نیروی مغناطیسی

همانطور که در شکل ۲ مشخص است، جریان الکتریکی در یک رسانا منجر به تولید میدان مغناطیسی می‌شود. این پدیده را الکترومغناطیس گویند[۴]. این میدان طبق قانون آمپر به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$\oint_c H \cdot dl = Ni \qquad (۱)$$



شکل ۲- میدان ایجاد شده در اطرف سیم حامل جریان[۴]

رابطه ۱ نشان می‌دهد که انتگرال شدت میدان مغناطیسی H روی هر مسیر بسته برابر است با کل جریان گذرانده شده از حلقه مذکور یا به تعبیری دیگر نیروی محرکه مغناطیسی (MMF) می‌باشد.

بردار چگالی شار مغناطیسی B به صورت زیر با میدان مغناطیسی H رابطه مستقیم دارد:

$$B = \mu H \qquad (۲)$$

که در آن μ برای هوا برابر است با $4\pi \times 10^{-7}$.

شار مغناطیسی نیز با فرض چگالی شار مغناطیسی B و سطح عبوری A از رابطه زیر حاصل می‌گردد.

$$\emptyset = BA \qquad (۳)$$

همچنین مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس) هرماده در یک مدار مغناطیسی از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

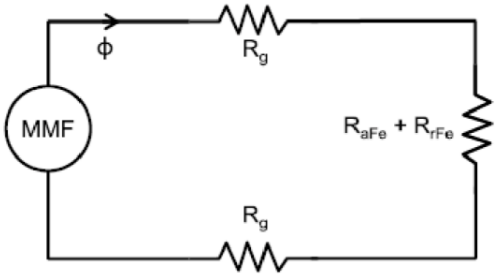
$$R = \frac{L}{\mu A} \qquad (۴)$$

که در آن L طول مسیر و A سطح مقطع آن است.

معمولاً برای رسیدن به یک مدل تحلیلی برای سیستم‌های الکترومغناطیسی چند فرض را باید در نظر داشت:

✓ صرف نظر از شار نشتی
✓ یکسان بودن سطح مقطع هسته سیم‌پیچ در تمام طول آن
✓ کوچک بودن فاصله هوایی در مقایسه با سطح مقطع

اگر این شروط برقرار باشد، برای مدارهای مغناطیسی معمول می‌توان مدار معادل مغناطیسی شکل ۳ را جهت محاسبه پارامترهای مغناطیسی در نظر گرفت.



شکل ۳- مدار معادل سیم پیچ با هسته آهن و فاصله هوایی[۴]

باتوجه به مدار معادل فوق φ طبق رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$\varphi = \frac{MMF}{R_t} \quad (۵)$$

که در آن R_t مجموع مقاومت‌های مغناطیسی، R_{aFe} مقاومت مغناطیسی بخش ثابت هسته، R_{rfe} مقاومت مغناطیسی بخش متحرک هسته و R_g مقاومت مغناطیسی فاصله هوایی است. در این صورت خواهیم داشت:

$$R_t = \frac{2g}{\mu.S} + \frac{Lfe}{\mu S} \quad (۶)$$

با استفاده از روابط فوق می‌توان شار تولید شده در مدار را محاسبه نمود:

$$\varphi = \frac{Ni\mu.S}{2g + \frac{Lfe}{\mu_r}} \quad (۷)$$

چگالی شار نیز با استفاده از رابطه ۷ و ۵ به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$B = \frac{Ni\mu.}{2g + \frac{Lfe}{\mu_r}} \quad (۸)$$

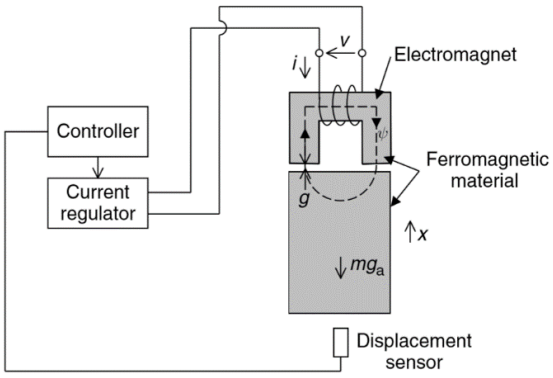
باتوجه به معادلات مطرح شده می‌توان نیروی ایجاد شده را با مشتق‌گیری از انرژی ذخیره شده در فاصله هوایی نسبت به طول فاصله هوایی با فرض صرف‌نظر کردن از انرژی ذخیره شده در هسته که ناچیز است، محاسبه نمود.

$$F = \frac{\partial W}{\partial g} = \frac{\partial\left(\frac{B^2 S \times 2g}{2\mu.}\right)}{\partial g} = \frac{\mu.N^2 i^2 S\left(\frac{Lfe}{\mu_r} - 2g\right)}{\left(\frac{Lfe}{\mu_r} + 2g\right)^3} \quad (۹)$$

۲-۵. اصول عملکرد یاتاقان‌های مغناطیس

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شد و ازاسمشان پیداست یاتاقان‌های مغناطیسی با استفاده از نیروی مغناطیسی تولید شده در اطراف هر قطب باعث ایجاد یک بالشتک مغناطیسی می‌گردند، که در صورت مجاورت با آهن ربا آن را دفع و یا جذب می-نماید، که بااستفاده ازاین خاصیت می‌توان آهن ربا را در یک فاصله مشخص به تعلیق درآورد، به گونه‌ای که با استفاده از یک سنسور موقعیت می‌توان فاصله آهن‌ربا را نسبت به قطب‌های یاتاقان مغناطیسی را تخمین زد تا در صورت دورشدن بیش از

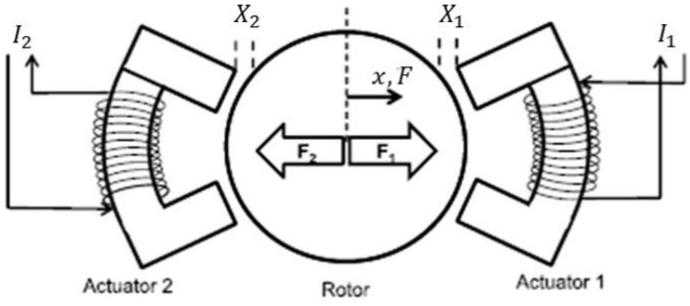
حد آهن‌ربا، جریان تزریقی درون هر قطب طوری تنظیم گردد تا میدان‌های تولیدی باعث جذب آهن ربا گردد و در صورت جذب بیش از حد به گونه‌ای جهت تزریق جریان به قطب ها تعیین گردد که باعث دفع آهن‌ربا نسبت به قطب‌ها شود[۱].



شکل ۴- اصول عملکرد یاتاقان مغناطیس[۱]

۲-۶. چگونگی تعلیق در یاتاقان‌های مغناطیسی

همانطور که در شکل ۵ آمده یاتاقان‌های مغناطیسی با استفاده از خاصیت شناوری مغناطیسی جهت تعلیق اجسام فلزی و یا آهن‌ربا مورد استفاده قرار می گیرند.شناوری مغناطیسی به گونه‌ای می‌باشد که با ایجاد میدان‌های مغناطیسی در اطراف هر قطب توانایی ایجاد یک نیروی کششی و یا دافعه را برروی جسم در حال تعلیق ایجاد می‌نمایند[۴].



شکل ۵- نیروهای تولید جهت ایجاد تعلیق[۴]

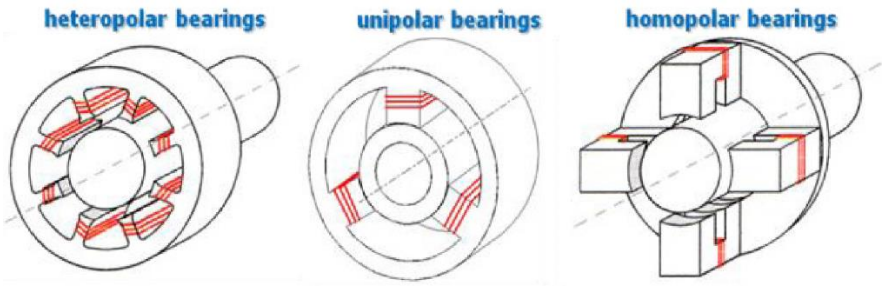
۲-7. نیروهای اعمالی در یاتاقان مغناطیسی

همانطور که بیان شد برای تعلیق در هرراستا یک جفت قطب در هر یک از راستاهای z/y/x باید طراحی گردد[۴].

(تعلیق در راستای محور x و y بر عهده یاتاقان‌های شعاعی می‌باشد چرا که اگر شفت تعلیق شده را در این دو راستا حرکت دهیم به صورت شعاعی در اطراف یاتاقان شروع به حرکت خواهد نمود ولی اگر شفت تعلیق شده را در راستای محور z که همان محور شفت است حرکت دهیم تعلیق در این حال برعهده یاتاقان‌های محوری خواهد بود).

۳. ساختارهای اصلی مغناطیسی یاتاقان مغناطیسی

در اینجا سه ساختار اصلی همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است در یاتاقان‌های مغناطیسی ارائه شده که در ذیل به تفکیک بیان می‌گردند [۵]:

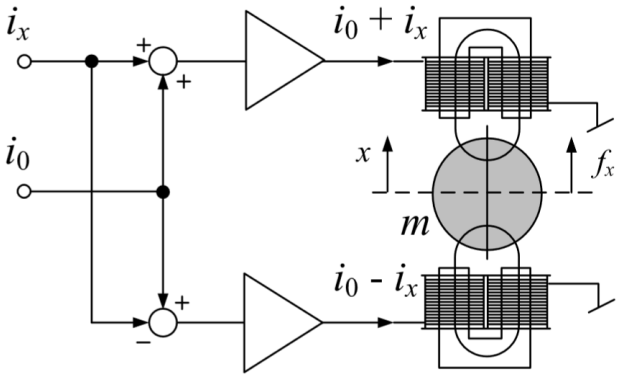


شکل ۶- ساختارهای مغناطیس در یاتاقان مغناطیسی[۵]

در دو ساختار هتروپلار و یونی‌پلار یک یوغ یکپارچه قرار داشته، که باعث تداخل شارها با یکدیگر شده که افزایش حرارت و برخورد میدان‌ها را در بر خواهد داشت. همچنین در این دو ساختار به دلیل استفاده از یوغ یکپارچه، پیچیدگی‌هایی در ساخت آن وجود خواهد داشت ولی در مقابل در ساختار هوموپلار به دلیل عدم وجود یوغ یکپارچه تمامی شار تولیدی در هر قطب به صورت موازی با شفت قرار گرفته که از اتلاف میدان‌های تولیدی جلوگیری می‌گردد و همچنین به دلیل نبود یوغ از ساختار بسیار ساده‌ای برخوردار می‌باشد.

۳-۱. تعلیق شعاعی با استفاده از قطب‌های شعاعی

همانطور که در شکل ۷ آورده شده تعلیق در راستای شعاعی با استفاده از قطب‌هایی که در اطراف شفت قرار می‌گیرند صورت می‌پذیرد و این قطب‌ها هرکدام به طور مجزا به شفت نیرو وارد خواهند نمود که در نتیجه برای متعادل نگاه داشتن شفت در مرکز سیستم برآیند این نیروها برابر صفر خواهد شد.



شکل ۷- تعلیق شعاعی و براید نیروها[۶]

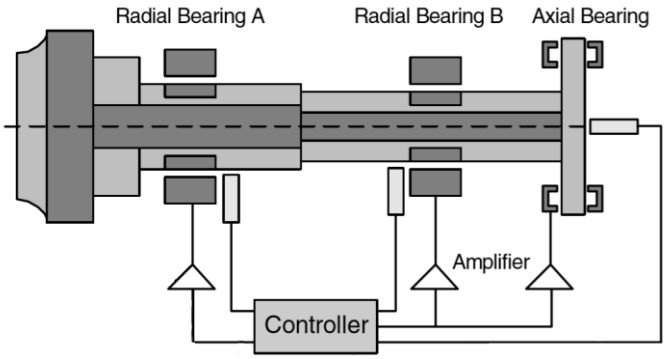
۳-۲. تعلیق محوری با استفاده از قطب‌های محوری

در این نوع از یاتاقان‌ها دو روش جهت ایجاد تعلیق وجود دارد که هر یک به صورت جداگانه مطرح می‌گردد.

حالت اول

در این حالت همانطور که در شکل ۸ ارائه شده در انتهای شفت در حال تعلیق یک دیسک محوری قرار داده می‌شود که در اطراف این دیسک (صفحه) یاتاقان‌هایی تعبیه شده که از حرکت محوری دیسک جلوگیری می‌نمایند.

این سیستم نیز از معایبی نیز برخوردار بوده که می‌توان به ایجاد نیروی گریز از مرکز توسط دیسک اشاره نمود و همچنین وزنی که خود دیسک به سیستم تحمیل میکند[۱].

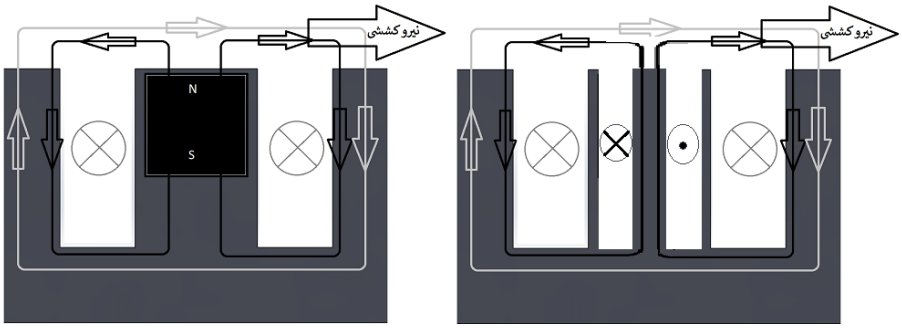


شکل ۸- تعلیق محوری با استفاده از دیسک محوری[۱]

حالت دوم

در این حالت می‌توان طراحی سیستم را به گونه‌ای انجام داد که در یک قطب از دوسیم‌پیچ استفاده شود، به گونه‌ای که یکی از سیم‌پیچ‌ها به صورت سیم لوله پیچیده شده و سیم‌پیچ دیگر به صورت دیسکی در جای خود قرار گیرد، در این حالت سیم-پیچی که به صورت سیم‌لوله پیچیده شده است درون هسته یک مسیر میدان ایجاد می‌نماید که به صورت یک حلقه به چرخش درمی‌آید ولی در سیم‌پیچ دیگر که به صورت دیسکی قرار گرفته شده جهت جریان و جهت پیچش سیم لوله باهم در یک راستا بوده که در این صورت با برقراری جریان درون سیم پیچ یک میدان درون هسته ایجاد می‌گردد که جهت این میدان در یک ساق با جهت میدان سیم پیچ اول برابر نبوده که باعث تضعیف شار در آن ناحیه می‌گردد در صورتی که در ساق دیگر دو میدان باهم در یک راستا بوده که باعث تقویت شار در آن ناحیه می‌گردد[۷].

همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده با ایجاد عدم تعادل در میدان‌های ایجاد شده درون هسته در راستایی که تقویت شار را شاهد بودیم نیروی کششی حاصل می‌گردد که می‌توان از این نیرو جهت تعلیق محوری استفاده نمود.



شکل ۹- تعلیق محوری بدون استفاده از دیسک محوری[۷]

۳. نتیجه‌گیری

باتوجه به مطالب یاد شده مطالب اولیه‌ای برای سیستم‌های تعلیق مغناطیسی ارائه گردید که باتوجه به مطالب مذکور الزاماتی برای سیستم فوق مطرح گردید و در نهایت یاتاقان‌های مغناطیسی که از تعلیق مغناطیسی برای عملکرد خود استفاده میکنند بیان شد که در ادامه به انواع آن و همچنین اصول عملکرد آن اشاره شد.

با ارائه مطالب فوق و آشنایی با این سیستم و همچنین باتوجه به نیاز روز افزون صنعت به این نوع تعلیق می‌توان به مطالعه بیشتر در مورد این سیستم‌ها پرداخت.

مراجع

[۱] Schweitzer, G., Maslen, E.H. and Bearings, M., 2009. Theory, Design, and Application to Rotating Machinery. Magnetic Bearings, pp.127-145.

[۲] T Zhang, " Control of Magnetic Bearings in Wind Turbines ", University TU Delft, April 2010,

[۳]Moon,F.andChang,P., “Superconductinglevitation-Applicationstobearingsandmag netictransportation(Book)”, NewYork,WileyInterscience,1994.

[۴] Chiba, Akira, Tadashi Fukao, Osamu Ichikawa, Masahide Oshima, Masatugu Takemoto, and David G. Dorrell. Magnetic bearings and bearingless drives. Elsevier, 2005.

[۵] Özgüven, H.N. and Houser, D.R., 1988. Mathematical models used in gear dynamics—a review. Journal of sound and vibration, 121(3), pp.383-411.

[۶] Budig, P.K., 2012, June. Article to the theory and application of magnetic bearings. In International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (pp. 1526-1534). IEEE.

[۷] Yu, Y., Xiang, Q.W., Zhang, X. and Zhang, W., 2018. Analytical Model of the Magnetic Field Distribution of a Generator Combined with Magnetic Bearing in Wind Turbines. Progress In Electromagnetics Research, 81, pp.25-44.