

ارائه مدل جدید پنج قطب بیرینگ مغناطیسی و مقایسه با مدل سه قطب

پدرام وکیلی^(۱) - مهرداد جعفریلند^(۲) - حمیدرضا مومنی^(۳)

(۱) کارشناس ارشد - طراحی سیستم‌های برق، شرکت مهندسی بین‌المللی فولاد تکنیک، اصفهان

(۲) دانشیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(۳) دانشیار - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: بهار ۱۳۸۹ تاریخ پذیرش: تابستان ۱۳۹۰

خلاصه: در سال‌های اخیر به علت ویژگی‌های خاص بیرینگ‌های مغناطیسی فعال از جمله، نگهداری کم، مناسب بودن برای محیط‌های تمیز و سرعت‌های بسیار زیاد توجه بیشتری به آن شده است. یکی از انواع متداول بیرینگ مغناطیسی نوع سه قطب با هسته‌های یکپارچه و مجزا است. بعضی از کاستی‌های این نوع بیرینگ عبارت است از نوسانات زیاد، پایداری و راندمان کم. در این مقاله دو مدل بیرینگ مغناطیسی سه قطب بررسی شده و کاستی‌های آنها بیان شده است سپس مدل جدیدی با پنج قطب برای بیرینگ مغناطیسی ارائه و تحلیل شده است. مدل پیشنهادی دارای نوسانات کمتر، پایداری و راندمان بیشتر است. مدل بیرینگ مغناطیسی پنج قطب همراه با کنترل‌کننده و در حضور اغتشاش شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد لرزش و نوسانات روتور مدل پنج قطب نسبت به مدل سه قطب کمتر است.

کلمات کلیدی: بیرینگ مغناطیسی، نیروی تعلیق مغناطیسی، ارتعاش، هسته نرم، هسته جدا، راندمان

۱- مقدمه

بیشترین کاربرد بیرینگ‌های مغناطیسی در ماشین‌های الکتریکی است. AMB‌ها دارای ویژگی‌های بسیار زیادی نسبت به نمونه‌های هیدرواستاتیکی و مکانیکی خود هستند که از جمله می‌توان به اصطکاک صفر و کارکرد مؤثر در سرعت‌های بسیار زیاد اشاره کرد [۱]. علاوه بر آن به علت عدم نیاز به روغن کاری، برای محیط‌های تمیز بسیار مناسب هستند. از سوی دیگر داشتن قطعات مکانیکی کم و تلفات بسیار کم باعث می‌شود هزینه نگهداری به میزان قابل توجهی کاهش یابد. AMB‌ها در مواردی مانند چرخ‌های طیار ذخیره‌کننده انرژی، توربین‌های پر سرعت، کمپرسورها، پمپ‌ها و موتورهای جت [۲-۴] کاربرد دارند.

این نوع از بیرینگ‌ها به طور ذاتی ناپایدار بوده و کنترل‌کننده‌های حلقه بسته لازم دارند [۵ و ۶]. از ارکان حیاتی آن می‌توان به حسگرهای موقعیت و سیستم کنترل جریان سیم پیچ‌های بیرینگ اشاره کرد که موقعیت روتور را در نقطه تعادل حفظ می‌کند.

ساختار طراحی بیرینگ مغناطیسی، نحوه و چگونگی پخش شار در فضای بیرینگ را مشخص می‌کند که در عملکرد سیستم اثر گذار است. لذا جهت طراحی یک بیرینگ مغناطیسی مناسب باید ساختار طراحی

شده در کنار الگوریتم کنترلی اهداف مورد نظر را تأمین کند. از این رو با توجه به مدل‌های مختلف ارائه شده جهت طراحی یک بیرینگ مغناطیسی به بررسی مدل بیرینگ مغناطیسی سه قطب متعادل با هسته یکپارچه [۷] و مدل بیرینگ مغناطیسی سه قطب متعادل با هسته‌های مجزا [۸] می‌پردازیم. با توجه به اهمیت مبحث راندمان در تجهیزات الکتریکی این نوع از بیرینگ‌ها را از این منظر مورد بررسی قرار داده‌ایم. مورد دیگری که در خصوص این نوع بیرینگ‌های مغناطیسی بررسی شده است، میزان پایداری و در نتیجه کاهش نوسانات در شرایط یکسان است. بر همین اساس معایب بیرینگ مغناطیسی سه قطب متعادل با هسته یک پارچه و مجزا که ناشی از راندمان کم، نوسانات زیاد روتور و سیستم کنترلی پیچیده آنها است در نمونه پیشنهادی پنج قطب رفع شده است.

از آنجا که بیرینگ مغناطیسی به طور ذاتی ناپایدار است، به کارگیری یک کنترل‌کننده سریع جهت کنترل رفتار دینامیکی سیستم ضروری است. در این مقاله ضمن ارائه مدل پنج قطب برای بیرینگ مغناطیسی و کنترل آن به وسیله کنترل‌کننده PID به بررسی رفتار دینامیکی آن در حضور اغتشاش خواهیم پرداخت.

در این حالت جهت ایجاد نیروی الکترومغناطیسی در راستای مثبت محور Y فقط از سیم پیچ A جریان i' را عبور می‌دهیم. شار و نیروی الکترومغناطیسی بر حسب ϕ_1 در راستای هر قطب و محور Y مطابق با روابط (۳) و (۴) است.

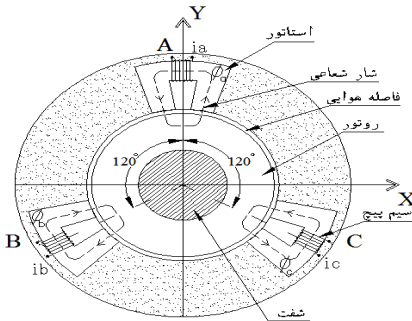
$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{2Ni'}{3R} \\ \phi_2 = \phi_3 = \frac{1}{2}\phi_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_1 = \frac{\phi_1^2}{2\mu\mu} \\ F_2 = F_3 = \frac{\phi_1^2}{8\mu\mu} \\ F_y = F_1 - \sin 30^\circ (F_2 + F_3) = \frac{3\phi_1^2}{8\mu\mu} \end{cases} \quad (4)$$

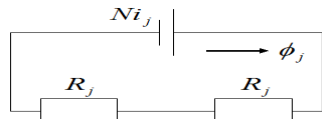
با جایگذاری روابط (۱) و (۳) در رابطه (۲)، F_y ر حسب جریان i' به صورت زیر به دست خواهد آمد.

$$F_y = \frac{N^2\mu S}{6L^2} i'^2 \quad (5)$$

در شکل (۳) یک بیرینگ مغناطیسی با سه قطب a,b,c با هسته مجزا دیده می‌شود که مسیر شار هر سیم پیچ مستقل است. این مطلب را می‌توان به وسیله رسم مدار معادل مغناطیسی شکل (۴) برای هر قطب بررسی کرد.



شکل (۳): ساختار AMB سه قطب با هسته‌های مجزا
Fig. (3): Three-pole AMB with separate cores



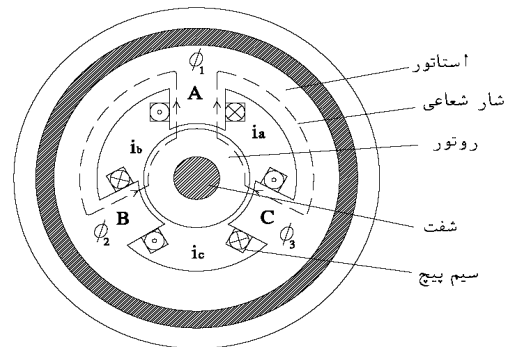
شکل (۴): مدار معادل AMB سه قطب با هسته‌های مجزا
Fig. (4): Equivalent magnetic circuit of three-pole AMB with separate cores

با توجه به استقلال مسیر شار سیم پیچ‌ها مدار معادل هر قطب نیز مستقل است. نیروی تعلیق مغناطیسی در هر قطب را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد.

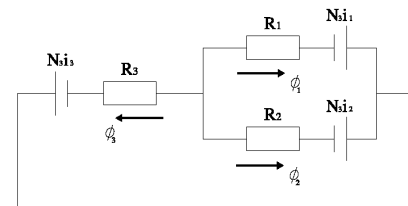
۲- ساختار بیرینگ‌های مغناطیسی سه قطب

بیرینگ مغناطیسی فعال (AMB) که در شکل (۱) نشان داده شده است دارای سه قطب a,b,c با هسته یکپارچه است. این بیرینگ مغناطیسی به گونه‌ای طراحی شده است که سیم پیچ‌های هر قطب مستقل از یکدیگر بوده اما مسیر شار هر سیم پیچ به سیم پیچ‌های دیگر مرتبط است. این مطلب را می‌توان به وسیله رسم مدار معادل مغناطیسی شکل (۲) بررسی کرد که در آن شار مغناطیسی فاصله هوایی، R_j رلوکتانس فاصله هوایی، N تعداد دور هر یک سیم پیچی‌ها و i_j جریان سیم پیچ‌ها و $j=1,2,3$ است.

همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است رلوکتانس هر یک از قطب‌ها پارامتری وابسته به فاصله هوایی بین محور و قطب نظیر به آن است و به علت تنش‌هایی که بر روی محور وجود دارد این فاصله هوایی در حال نوسان است و اثر خود را بر روی رلوکتانس نشان می‌دهد، رلوکتانس را می‌توان از رابطه (۱) محاسبه نمود.



شکل (۱): ساختار AMB سه قطب با هسته یکپارچه
Fig. (1): Three-pole AMB with solid cores



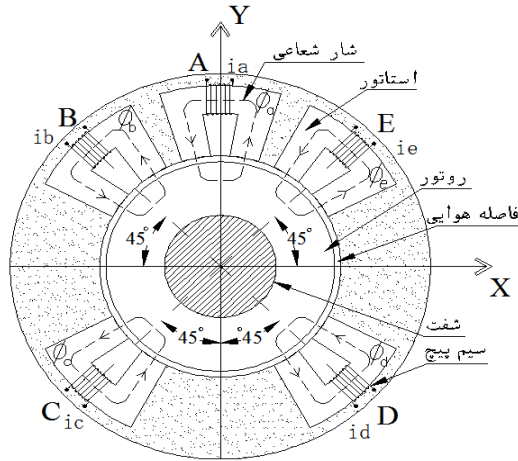
شکل (۲): مدار معادل AMB سه قطب با هسته یکپارچه

Fig. (2): Equivalent magnetic circuit of three-pole AMB with solid cores

$$R_j = \frac{L_j}{\mu S} \quad (1)$$

که در آن μ ضریب نفوذ پذیری هوا، S مساحت زیر قطب و L_j اندازه فاصله هوایی است. نیروی تعلیق مغناطیسی در هر قطب را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$F_j = \frac{\phi_j^2}{2\mu S} \quad (j=1,2,3) \quad (2)$$



شکل (۵): ساختار AMB پنج قطب با هسته های مجزا
Fig. (5): Five-pole AMB with separate cores

کنترل جریان هر یک از سیم پیچ ها توسط یک کنترل کننده PWM فرکانس ثابت با فیدبک از جریان سیم پیچ مورد نظر صورت می گیرد. ساختار بیرینگ مغناطیسی به گونه ای طراحی شده است که سیم پیچ های هر قطب و مسیر شار هر سیم پیچ مستقل از یکدیگر باشد. در مدل ریاضی ارائه شده، جهت ساده سازی محاسبات از تلفات آهن و جریان های گردابی صرف نظر شده است. بنابراین مدار معادل مغناطیسی برای هر قطب را می توان به صورت شکل (۴) در نظر گرفت که در آن ϕ_j (j=1,2,3,4,5) شار مغناطیسی فاصله هوایی، R_j رلوکتانس فاصله هوایی، N تعداد دور هر یک سیم پیچی ها و i_j (j=1,2,3,4,5) جریان سیم پیچ ها است. رلوکتانس و شار مغناطیسی را می توان از روابط ۱۰ و ۱۱ به دست آورد.

$$R_j = \frac{L_j}{\mu_s} \quad (10)$$

$$\phi_j = \frac{N i_j}{2R} \quad (11)$$

که در آن μ ضریب نفوذ پذیری هوا، S مساحت زیر قطب و L_j اندازه فاصله هوایی است. اگر جابجایی رتور در جهات X و Y کوچک در نظر گرفته شود L_j را می توان به صورت زیر در نظر گرفت.

$$\begin{cases} L_1 = L_o - y \\ L_2 = L_o + \frac{\sqrt{2}}{2}x - \frac{\sqrt{2}}{2}y \\ L_3 = L_o + \frac{\sqrt{2}}{2}x + \frac{\sqrt{2}}{2}y \\ L_4 = L_o - \frac{\sqrt{2}}{2}x + \frac{\sqrt{2}}{2}y \\ L_5 = L_o - \frac{\sqrt{2}}{2}x - \frac{\sqrt{2}}{2}y \end{cases} \quad (12)$$

(11)

$$F_j = \frac{\phi_j^2}{\mu S} \quad (j=1,2,3) \quad (6)$$

روابط شار و نیروی الکترومغناطیسی برای هر قطب عبارتند از:

$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{N i_1'}{2R} \\ \phi_2 = \phi_3 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} F_1 = \frac{\phi_1^2}{\mu S} \\ F_2 = F_3 = 0 \\ F_y = F_1 = \frac{\phi_1^2}{\mu S} \end{cases} \quad (8)$$

با جایگذاری روابط (۱) و (۷) در رابطه (۸)، F_y بر حسب جریان i_1' مطابق با رابطه (۹) به دست خواهد آمد.

$$F_y = \frac{N^2 \mu S}{4L^2} i_1'^2 \quad (9)$$

به خاطر تقارن دو بیرینگ مغناطیسی نتیجه به دست آمده برای قطب A را می توان برای دیگر قطب ها تعمیم داد. با مقایسه رابطه (۵) با (۹) مشخص می شود که نیروی الکترومغناطیسی که با عبور جریان مساوی از سیم پیچ های بیرینگ مغناطیسی با هسته های مجزا تولید می شود ۳.۲ نیروی الکترومغناطیسی بیرینگ مغناطیسی با هسته یکپارچه است. لذا استفاده از AMB با هسته های جداگانه باعث مصرف کمتر انرژی و راندمان بالاتر خواهد شد. از آنجا که در AMB های سه قطب جهت ایجاد نیروی الکترومغناطیسی در راستای مثبت یا منفی محور X می باید از سیم پیچ B یا C با جریان متناسب با نیروی الکترومغناطیسی مورد نیاز عبور کند، اما با عبور جریان از این سیم پیچ ها مؤلفه ناخواسته نیرو در راستای منفی محور Y به وجود خواهد آمد، این نیرو خود باعث انحراف بیشتر روتور از نقطه تعادل گشته و جهت جبران لازم است از سیم پیچ A جریان مورد نیاز عبور کند تا نیروی الکترومغناطیسی جبران کننده تولید شود. از این رو در این مدل از بیرینگ مغناطیسی، نوسانات بر روی روتور بیشتر بوده و در نتیجه حساسیت و پیچیدگی در طراحی سیستم کنترل کننده جهت کاهش این نوسانات، افزایش می یابد. لذا باید چاره ای اندیشید تا در حد امکان از تولید مؤلفه های ناخواسته در نیروی الکترومغناطیسی کاسته شود. بنابراین در ادامه به معرفی مدل پیشنهادی بیرینگ مغناطیسی پنج قطب با هسته های مجزا خواهیم پرداخت.

۳- مدل بیرینگ مغناطیسی پنج قطب

بیرینگ مغناطیسی فعال (AMB) که در شکل (۵) نشان داده شده است دارای پنج قطب a,b,c,d,e است. هر یک از این قطب ها دارای کنترل کننده جریان جداگانه ای هستند و بر اساس فیدبکی که از موقعیت محور با استفاده از حسگرهای اثر هال گرفته می شود جریان قطب ها به گونه ای تغییر خواهد کرد که برآیند نیروهای الکترومغناطیسی وارد بر محور، تغییر مکان ایجاد شده را جبران کند.

$$\begin{cases} F_1 = mg + k_{i1} i_1 + k_{s1} y \\ F_2 = k_b + k_{i2} i_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} k_s x + \frac{\sqrt{2}}{2} k_s y \\ F_3 = k_b + k_{i3} i_3 - \frac{\sqrt{2}}{2} k_s x - \frac{\sqrt{2}}{2} k_s y \\ F_4 = k_b + k_{i4} i_4 + \frac{\sqrt{2}}{2} k_s x - \frac{\sqrt{2}}{2} k_s y \\ F_5 = k_b + k_{i5} i_5 + \frac{\sqrt{2}}{2} k_s x + \frac{\sqrt{2}}{2} k_s y \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} mg = \frac{\mu SN}{4l_0^2} i_{01}^2 \\ k_{i1} = \frac{\mu SN}{2l_0^2} i_{01} \\ k_{s1} = \frac{\mu SN}{2l_0^3} i_{01}^2 \\ k_b = \frac{\mu SN}{4l_0^2} i_0^2 \\ k_{i2} = \frac{\mu SN}{2l_0^2} i_0 \\ k_{i3} = \frac{\mu SN}{2l_0^2} i_0 \\ k_{i4} = \frac{\mu SN}{2l_0^2} i_0 \\ k_{i5} = \frac{\mu SN}{2l_0^3} i_0^2 \end{cases} \quad (16)$$

به منظور برقراری ارتباط بین پارامترهای الکتریکی و مکانیکی AMB در مدل مذکور از رابطه کوپل مکانیکی استفاده شده که مطابق رابطه (۱۷) است.

$$\begin{cases} m \frac{\partial x^2}{\partial t^2} = F_x - F_{xext} \\ m \frac{\partial y^2}{\partial t^2} = F_y - mg - F_{yext} \end{cases} \quad (17)$$

m جرم روتور، F_x نیروی مغناطیسی تولید شده در راستای X، F_y نیروی مغناطیسی تولید شده در راستای Y، mg نیروی وزن روتور، F_{xext} و F_{yext} نیروهای اغتشاش در جهت‌های X و Y هستند. برآیند نیروهای مغناطیسی تولید شده در راستای X و Y از رابطه (۱۸) به دست خواهد آمد.

$$\begin{cases} F_x = (F_2 + F_3 - F_4 - F_5) \cos 45^\circ \\ F_y = F_1 + (F_2 - F_3 - F_4 + F_5) \sin 45^\circ \end{cases} \quad (18)$$

که در آن L_j (j=1,2,3,4,5) فاصله روتور از قطب نظیر خود و L_0 فاصله هوایی نامی است. نیروی تعلیق مغناطیسی در هر قطب را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد.

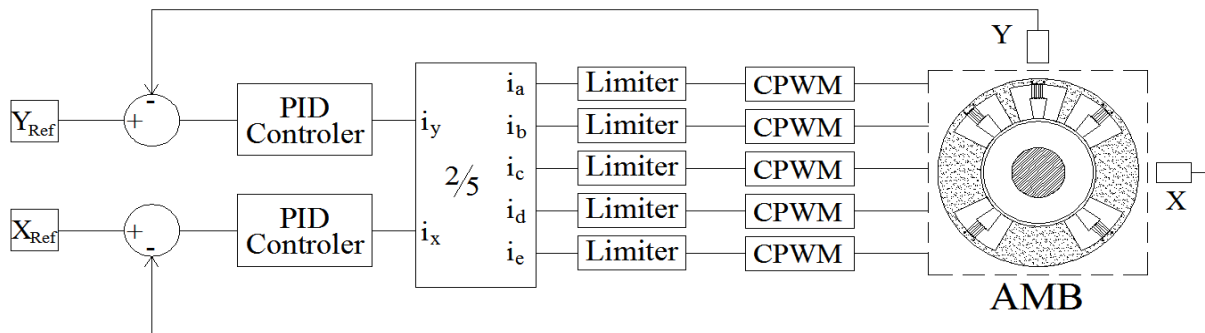
$$F_j = \frac{\phi_j^2}{\mu S} \quad (j=1,2,3) \quad (13)$$

با فرض آنکه فاصله جابجایی روتور از نقطه تعادل بسیار کوچک است می‌توان رابطه خطی شده نیروی مغناطیسی تعلیق را در راستای هر قطب به صورت رابطه (۱۴) به دست آورد.

$$F_k = F_k \left| \frac{\partial F_k}{\partial x} \right|_{\substack{i_1=i_{01} \\ i_2=i_0 \\ i_3=i_0 \\ i_4=i_0 \\ i_5=i_0 \\ x=y=0}} + \frac{\partial F_k}{\partial x} \bigg|_{\substack{i_1=i_{01} \\ i_2=i_0 \\ i_3=i_0 \\ i_4=i_0 \\ i_5=i_0 \\ x=y=0}} \cdot X + \frac{\partial F_k}{\partial y} \bigg|_{\substack{i_1=i_{01} \\ i_2=i_0 \\ i_3=i_0 \\ i_4=i_0 \\ i_5=i_0 \\ x=y=0}} \cdot Y + \frac{\partial F_k}{\partial i_1} \bigg|_{\substack{i_1=i_{01} \\ i_2=i_0 \\ i_3=i_0 \\ i_4=i_0 \\ i_5=i_0 \\ x=y=0}} \cdot (i_1 - i_{01}) + \frac{\partial F_k}{\partial i_2} \bigg|_{\substack{i_1=i_{01} \\ i_2=i_0 \\ i_3=i_0 \\ i_4=i_0 \\ i_5=i_0 \\ x=y=0}} \cdot (i_2 - i_0) + \dots + \frac{\partial F_k}{\partial i_5} \bigg|_{\substack{i_1=i_{01} \\ i_2=i_0 \\ i_3=i_0 \\ i_4=i_0 \\ i_5=i_0 \\ x=y=0}} \cdot (i_5 - i_0)$$

$$k = 1, 2, 3, 4, 5$$

با جایگذاری روابط (۱۰) تا (۱۳) در رابطه (۱۴)، رابطه (۱۵) به دست می‌آید که در آن S مساحت قطب مغناطیسی، N تعداد دور سیم پیچ‌ها، i_{01} جریان بایاس سیم پیچ A، i_0 جریان بایاس سیم پیچ‌های B تا E و i_1 تا i_5 جریان‌های الکتریکی قابل کنترل است. مقدار i_0 بسیار کمتر از i_{01} است، علت تزریق جریان i_0 در سیم پیچ‌های B تا E ایجاد پایداری هرچه بیشتر محور در نقطه تعادل است. در حالت تعادل نیروی الکترومغناطیسی تولید شده در سیم پیچ A باید برابر با نیروی جاذبه وارد به جرم روتور باشد تا روتور در حالت تعادل قرار گیرد، بدین منظور i_{01} مقداری تعیین می‌شود تا نیروی الکترومغناطیسی موردنیاز تولید گردد.



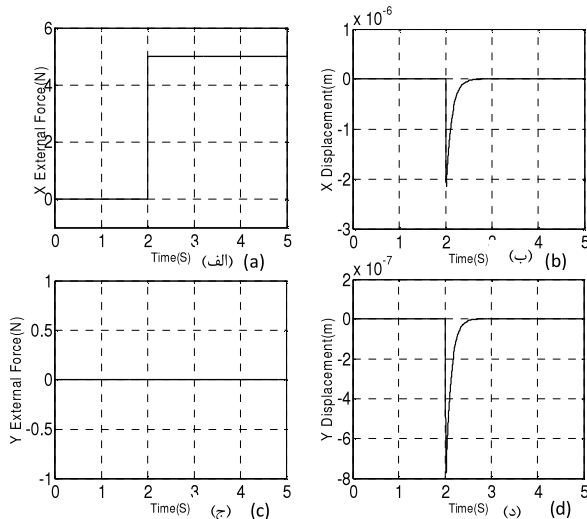
شکل (۶): الگوریتم کنترل بیرینگ مغناطیسی فعال پنج قطب

Fig. (6): Five-pole AMB control algorithm

Table (1): PID Controller Coefficients
جدول (۱): ضرایب کنترل کننده PID

پارامتر	مقدار
KI	8
KD	50000
KP	5500

در بیرینگ مغناطیسی سه قطب مطابق شکل (۷) جابه جایی محور در راستای محور X در اثر نیروی خارجی F_{ext} ، 2×10^{-6} متر است. جهت برگرداندن محور به نقطه تعادل می‌باید جریان مورد نیاز جهت تولید نیروی الکترومغناطیسی در راستای مثبت محور X، به سیم پیچ C تزریق شود. از آنجا که در بیرینگ مغناطیسی سه قطب با عبور جریان از سیم پیچ C دو مولفه نیروی الکترومغناطیسی در راستای مثبت محور X و منفی محور Y تولید می‌شود، مولفه تولید شده در راستای محور Y همانند یک اغتشاش منجر به جابه جایی محور در راستای محور Y می‌شود که این موضوع باعث خواهد شد تا ارتعاشات بر روی روتور بیشتر شود و از سوی دیگر پایداری سیستم کاهش یابد. جابه جایی در راستای محور Y همان طور که در شکل (د-۷) نشان داده شده 7×10^{-7} متر است. حال جهت برگرداندن محور به نقطه تعادل می‌باید جریان مورد نیاز جهت تولید نیروی الکترومغناطیسی در راستای مثبت محور Y، به سیم پیچ A تزریق شود که منجر به افزایش تلفات خواهد شد.



شکل (۷): بیرینگ مغناطیسی سه قطب (الف): نیروی تنش در راستای محور X (ب): موقعیت محور در راستای X (ج): نیروی تنش در راستای Y (د): موقعیت محور در راستای Y

Fig. (7): Three-pole AMB: (a): External force along the X axis, (b): position of the rotor axis along X axis, (c): External force along Y axis, (d): Position of the rotor axis along Y axis

در بیرینگ مغناطیسی پنج قطب مطابق شکل (۸) جابه جایی محور در راستای محور X در اثر نیروی خارجی F_{ext} در حدود 1.3×10^{-6} متر است که در مقایسه با بیرینگ مغناطیسی سه قطب در حدود 35% کمتر است. لذا امکان کاهش فاصله هوایی در بیرینگ مغناطیسی پنج

۴- بررسی نحوه کنترل بیرینگ مغناطیسی

به طور کلی نحوه عملکرد یک بیرینگ مغناطیسی فعال بر اساس نیروهای الکترومغناطیسی تولید شده از سوی قطب‌های بیرینگ و اثر مغناطیسی آنها بر روی محور و در نتیجه جذب آن است. مهمترین موضوعی که در خصوص سیستم کنترل AMB باید در نظر گرفته شود قابلیت آنها در دفع تنش‌های خارجی بر روی محور بوده تا باعث نگهداشتن محور در نقطه تعادل شود. لذا پاسخ زمانی سیستم‌های کنترلی مذکور بایستی سریع باشد. الگوریتم کنترل بیرینگ مغناطیسی در شکل (۶) نشان داده شده است که در آن جابه جایی شعاعی محور از مرکز، توسط سنسورهای نصب شده در راستای محوره‌های X و Y اندازه‌گیری و با مرجع موقعیت مقایسه می‌شود سپس کنترل کننده PID مقدار خطا یا همان جا به جایی را به سیگنال جریان تبدیل کرده و سیگنال‌های جریانی i_x و i_y با گذشتن از تبدیل 2.5 به سیگنال‌های جریانی ۵ قطب تبدیل می‌شوند، رابطه تبدیل به صورت زیر است.

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{2}{\sqrt{2}} & -\frac{2}{\sqrt{2}} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{2}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (19)$$

سیگنال‌های جریانی از یک محدود کننده عبور کرده و در صورت منفی بودن حذف می‌شوند. سیگنال‌های جریانی ۵ قطب به عنوان مرجع جریان در مبدل‌ها استفاده می‌شود و جریان مورد نیاز جهت تولید نیروی تعلیق مغناطیسی توسط کنترل کننده PWM تولید و روتور را به موقعیت تعادل خود برمی‌گرداند.

۵- نتایج شبیه سازی

به منظور ارزیابی و نحوه عملکرد مدل از نرم‌افزار مطلب استفاده شده است. کلیه شبیه سازی‌های صورت گرفته به صورت پیوسته زمان است و حداکثر گام‌های محاسباتی $10e-6$ در نظر گرفته شده است تا دقت محاسبات تا حد امکان افزایش یابد.

با توجه دینامیک شدید سیستم نیاز به جبران کننده‌های پیش فاز دارد، لذا در شبیه سازی صورت گرفته به وسیله کنترل کننده PID معمولی ضریب انتگرال گیر در مقابل ضریب مشتق گیر بسیار کوچک بوده به گونه‌ای که می‌توان گفت کنترل کننده استفاده شده در این روش یک کنترل کننده PD خواهد بود و ضرایب آن در جدول (۱) نمایش داده شده است.

با توجه به آنکه هدف شبیه‌سازی شرایط واقعی سیستم و آزمایش توانایی در مقابله با تنش‌های خارجی است، به هر دو بیرینگ مغناطیسی سه قطب و پنج قطب نیرو F_{ext} خارجی در راستای محور X وارد می‌شود و F_{ext} در لحظه ۲ از صفر نیوتن به ۵ نیوتن تغییر می‌کند. در راستای محور Y نیروی خارجی وارد نمی‌شود.

Table (2): Values of model parameters
جدول (۲): مقادیر پارامترهای مدل

واحد	مقدار	پارامتر
m	5e-4	L0
turn	200	N
N	22.5	mg
mm ²	589	S

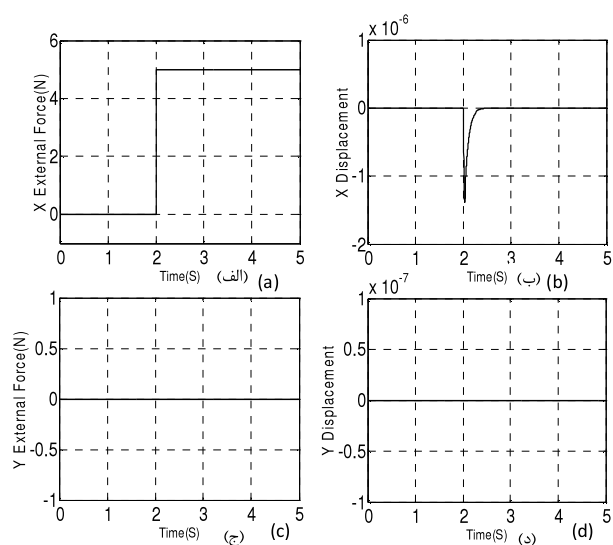
۶- نتیجه گیری

در بیرینگ مغناطیسی پنج قطب نوسانات روتور کمتر از نمونه مشابه با سه قطب است که این مورد موید پایداری بیشتر و امکان کاهش فاصله هوایی در بیرینگ مغناطیسی پنج قطب است از سوی دیگر به علت ساختاری که در بیرینگ مغناطیسی پنج قطب لحاظ شده است راندمان سیستم قابل قبول بوده و تولید مولفه‌های نیروی الکترومغناطیسی ناخواسته که باعث هدر رفتن انرژی می‌شود، به حداقل رسیده است. این موضوع باعث پایداری بیشتر سیستم شده و در نتیجه سیستم مذکور حساسیت کمتری نسبت به تغییر ضرایب کنترل کننده خواهد داشت. با این حال مطلبی که در خصوص عیب این سیستم می‌توان مطرح کرد افزایش حجم ادوات الکترونیک قدرت در اینورتر جریان و در نتیجه افزایش هزینه در این بخش است.

پی نوشت:

۱- بیرینگ مغناطیسی فعال

قطب خواهد بود و این موضوع خود منجر به کاهش تلفات می‌شود. جهت برگرداندن محور به نقطه تعادل می‌باید جریان مورد نیاز جهت تولید نیروی الکترومغناطیسی در راستای مثبت محور X، به سیم پیچ‌های D و E تزریق شود. با توجه به تقارن قطب‌های D و E نسبت به محور X مولفه‌های نیروی الکترومغناطیسی در راستای مثبت محور X با یکدیگر جمع شده و مولفه‌های نیروی الکترومغناطیسی در راستای محور Y یکدیگر را خنثی می‌کنند و لذا محور روتور در راستای محور Y همان طور که در شکل (د-۸) نشان داده شده است جا به جایی نخواهد داشت. پارامترهای طراحی هر دو بیرینگ مغناطیسی سه و پنج قطب به صورت یکسان در نظر گرفته شده که در جدول (۲)، نشان داده شده است.



شکل (۸): بیرینگ مغناطیسی پنج قطب (الف): نیروی تنش در راستای محور X (ب): موقعیت محور در راستای X (ج): نیروی تنش در راستای Y (د): موقعیت محور در راستای Y

Fig. (10): Five-pole AMB: (a): External force along the X axis, (b): Position of the rotor axis along X axis, (c): External force along Y axis, (d): Position of the rotor axis along Y axis.

References

- [1] P. Zwysig, C. Round, S.D. Kolar, "Combined radial-axial magnetic bearing for a 1KW,500000 RPM permanent magnetic machine, Pow. Elec. Conf. IEEE,2007 ,pp.1434-1440.
- [2] W.K.S. Khoo, S.D. Garvey, K. Kalita, "The specific load capacity of radial-flux radial magnetic bearings", IEEE Trans. Mag, Vol.43, pp.3293-3300, Jul. 2007.
- [3] X. Yanliang, D. Yueqin, W. Xiuhe, "Analysis of hybrid magnetic bearing with a permanent magnet in the rotor by FEM", IEEE Trans. Mag., Vol.42, pp.1363-1366, Apr. 2006.
- [4] E. Schmidt, M. Hofer, "Inductances and forces of a three phase permanent magnet biased radial active magnetic bearing in dependence on the rotor eccentricity", Proc. of the Int. Elec. Mach. and Dri. Conf., IEMDC 2009, pp.2152-2157, Miami, Florida, USA, Mai 2009.
- [5] R.D. Williams, F.J. Keith, P.E. Allaire, "Digital control of active magnetic bearing", IEEE Trans. Indus. Elec., Vol.37, No.1, pp.19-27, 2005.
- [6] H. Bleuler, C. Gahler, R. Herzog, R. Larsonnear, T. Mizuno, R. Siegart, "Application on digital signal processors for industrial magnetic bearings", IEEE Trans. on Con. Sys. Tech., Vol2, No.4, pp.280-289, 2007.
- [7] S.L. Chen, "Nonlinear smooth feedback control of a three-pole active magnetic bearing system", IEEE Trans., Vol.19, 2011.
- [8] A. Pilat, "Selected magnetostatic analysis of 3 coils active magnetic bearing", AGH Scie. and Tech., 2007.