

بررسی پارامترهای مؤثر سامانه یاتاقان مغناطیسی فعال به صورت تجربی و عددی

یوسف حجت^{۱*}، مجید محمدی مقدم^۲، محمدمراد شیخی^۳، حسین موسوی هندی^۴

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۴- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

yhojjat@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: شهریور ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۷)

چکیده- یک سامانه یاتاقان مغناطیسی فعال طراحی و ساخته شده که در آن، با اعمال جریان کنترل شده به سیم پیچ‌ها، توسط یک کنترل کننده ID، نیروی جاذبه الکترومغناطیسی ایجاد و فاصله بین میله و آهنرباها کنترل می‌شود. سپس تأثیر پارامترهایی مانند فرکانس نمونه برداری، الگوی تحریک آهنرباها و فاصله هوایی بین رتور و استاتور بر پایداری سامانه یاتاقان مغناطیسی به صورت آماری با استفاده از نتایج آزمایشی تجربی تحلیل و بررسی شده است. همچنین تحلیل دینامیکی و تأثیر میدان مغناطیسی و تحلیل نیرو و با استفاده از تحلیل عددی ارائه شده است. با توجه به غیرخطی بودن سامانه تعلیق یاتاقان مغناطیسی، از نتایج این آزمایش برای بررسی اثر غیرخطی و کنترل مناسبتر سامانه استفاده شده است. در تحلیل عددی نحوه و شکل خطوط میدان مغناطیسی، پراکندگی و توزیع چگالی شار مغناطیسی و نیروی مغناطیسی اعمال شده بر میله آهنی به دو روش کار مجازی و تنسور تنش ماکسول بررسی شده است. در تحلیل آماری، نتایج تجربی مربوط به تأثیر تغییرات فرکانس و فاصله هوایی بین رتور و استاتور برای تعیین نقاط پایدار کاری استفاده شده است.

کلیدواژه‌گان: یاتاقان مغناطیسی، کنترل پیش فاز، تعلیق مغناطیسی، تحلیل آماری، فرکانس و شکل موج تحریک کننده، فاصله هوایی.

نداشتن به روغن کاری (کم شدن آلودگی و خطر آتش سوزی)، قابلیت کنترل بهتر روی دینامیک رتور و نیاز کمتر به تعمیر و نگهداری است.

۱- مقدمه

مهمترین مزیت‌های یاتاقان مغناطیسی، حذف تماس فیزیکی و اصطکاک، امکان حرکت با سرعت بالا، نیاز

$I_1 + \delta_i$ را عبور داده و از دیگری جریان $I_1 - \delta_i$ عبور می‌کند.

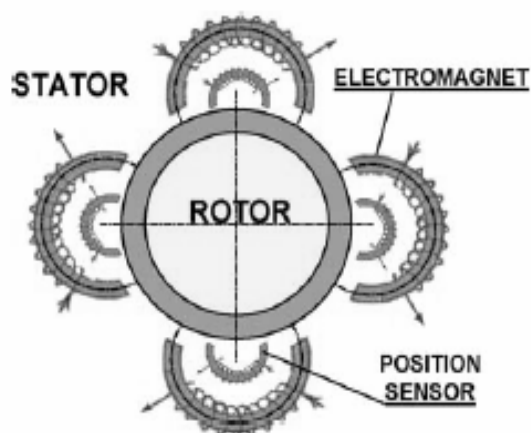
یاتاقان‌های مغناطیسی فعال برای کنترل موقعیت رتور در جهت‌های محوری و شعاعی به‌کار می‌روند. یاتاقان‌های مغناطیسی مرکب که در آن هم مغناطیس دائم و هم الکترومغناطیس به‌کار می‌رود، برای افزایش ظرفیت بار و تقویت استحکام استفاده می‌شوند.

اساس کار یاتاقان مغناطیسی، نیروی جاذبه بین آهنربا و ماده فرومغناطیس است. با این شیوه می‌توان نیروهای بزرگی را ایجاد کرد که مشابه آن در موتورهای الکتریکی استفاده می‌شود. اما این نوع تعلیق دارای طبیعت ناپایدار است، بنابراین مدار کنترل بسیار سریع و دقیق برای پایدار سازی حالت تعلیق نیاز است. در یاتاقان‌های مغناطیسی، موقعیت محور توسط سنسورهای موقعیت اندازه‌گیری شده و نتایج به مدار کنترل فرستاده می‌شود. مدار کنترل نیز با توجه به اختلاف موقعیت محور از محل مورد نظر، جریان الکتریکی آهنرباها را تنظیم می‌کند. از آنجا که در سرعت‌های بالا، جابه‌جایی‌های جزئی نیز سبب عدم تعادل نسبتاً بزرگی می‌شود، سرعت، دقت و پایداری سامانه کنترلی، اهمیت بالایی دارد [۱ و ۲ و ۳].

اولین سامانه تعلیق مغناطیسی فعال در سال ۱۹۶۶ توسط بیمز^۱ ساخته شد. وی گلوله‌های فولادی را در محفظه‌ای از خلأ معلق کرد.

برای کنترل سامانه یاتاقان مغناطیسی که شامل میله‌ای معلق و دوار است، دینامیک و ارتعاش‌های میله باید مطالعه شود. تأخیرهای زمانی اجتناب‌ناپذیر است

در یاتاقان‌های مغناطیسی ارتعاشات ناشی از عدم تعادل رتور، بدون نیاز به وسیله و تجهیزات اضافی، پایش و کنترل قرار می‌شود. از این اطلاعات می‌توان برای تشخیص عملکرد مناسب سامانه و تخمین زمان تعمیر و نگهداری استفاده کرد. در یاتاقان مغناطیسی فعال (AMB)، کنترل رتور با تغییر نیروهای جاذبه ناشی از شار مغناطیسی تولید شده توسط محرک‌های الکترومغناطیسی انجام می‌شود. طرحواره یاتاقان مغناطیسی شعاعی فعال در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل، چهار الکترومغناطیس C شکل وجود دارد که به صورت N,S,S,N,N,S مرتب شده‌اند، به طوری که قطب‌های همنام مجاور همدیگر قرار گرفته و چهار قطب مغناطیسی برآیند به وجود آمده است.

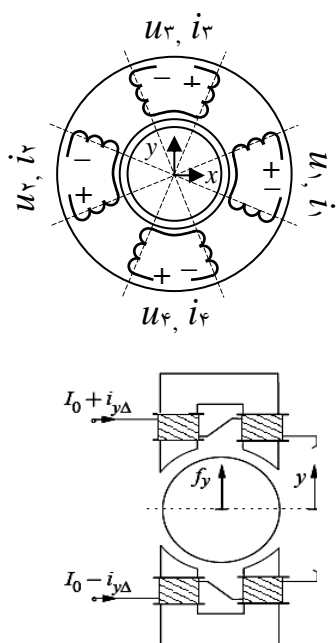


شکل ۱ یاتاقان مغناطیسی شعاعی فعال [۱]

در این شکل سیم‌پیچ سنسورها نیز نشان داده شده است. الکترومغناطیس‌ها در هر انتهای دو محور عمود بر هم، قائم و افقی قرار می‌گیرند. سیم‌پیچ‌های روبه‌رو با یکدیگر کنترل می‌شوند چنان که یکی جریان

۲- معادلات دینامیکی رتور

مدل ریاضی دینامیکی یاتاقان مغناطیسی شعاعی شکل (۲) با یک محور صلب توسط معادلات زیر توصیف می شود [۳ و ۲].



شکل ۲ آهنرباهای الکتریکی و مدل مدار و مختصات

$$u = I_0 R + J i_{\Delta} R + 2 \frac{\partial \psi}{\partial i_{\Delta}} \frac{d i_{\Delta}}{d t} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{d x}{d t}$$

$$M \frac{d^2 x}{d t^2} + \Omega G \frac{d x}{d t} = B f(i_{\Delta}, x_b) + f_g + \Omega^2 d_u(\Omega t)$$

که در آن u ولتاژ دو سر آهنربای الکتریکی، I جریان مینا، R مقاومت الکتریکی سیم پیچ آهنربای الکتریکی و J ضریب ماتریس جریان کنترل است.

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} I_0 + i_{\Delta x} \\ I_0 - i_{\Delta x} \\ I_0 + i_{\Delta y} \\ I_0 - i_{\Delta y} \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

به ویژه تأخیر ناشی از نرم افزارهای کامپیوتری مانند متلب^۱. اما این نرم افزارها به دلیل انعطاف پذیری بالا جایگزین روش ها و ابزارهای قدیمی شده اند. محققانی که در این زمینه فعالیت کرده اند، معمولاً تأخیرهای کوچک را در محاسبات منظور نکرده اند که این مشکلی را ایجاد کرده است. تحقیقات مذکور توسط افراد مختلفی در فاصله سال های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۱ انجام شده است [۶ تا ۴].

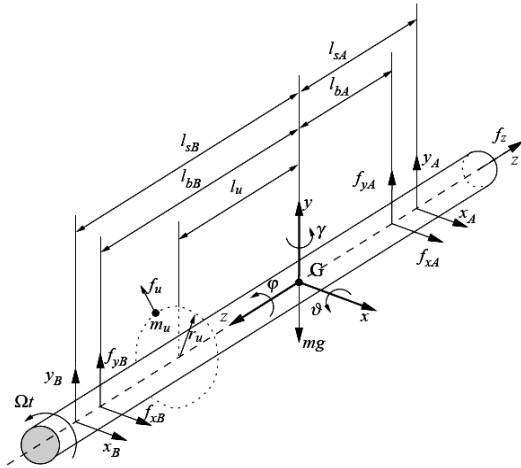
تحقیقات دیگری که توسط هال^۲ در سال ۱۹۹۷ و کانگ^۳ در سال ۱۹۹۳ انجام شده بیانگر این است که تأخیرهای زمانی و فاصله نامناسب رتور و استاتور - هر چند کوچک - می توانند موجب بروز ناپایداری در سامانه شوند [۸ و ۷].

برخی تحقیقات جدیدتر به سمت استفاده از الگوریتم های جدیدی مانند منطق فازی و روش های مشابه رفته و محققان سعی در مقایسه این روش ها با روش های پیشین نظیر PID داشته اند. از میان این تحقیقات می توان فعالیت های دانشگاه تگزاس توسط پالازولو را نام برد؛ در [۹] کنترل حرکت محوری رتور یاتاقان مغناطیسی به سه روش PID، منطق فازی و کنترل حالت لغزشی انجام شده است. همچنین در [۱۰] اثر اعمال کنترل حالت لغزشی بر سامانه یاتاقان مغناطیسی با رتور جفکات در دانشگاه تاینان توسط جانگ^۴ در سال ۲۰۰۵ انجام شده که نتایج تحلیلی - عددی به دست آمده، نشان دهنده کارآمدی این روش است [۱۱ و ۱۲].

1. MATLAB
2. Hale
3. Kuang
4. Janga

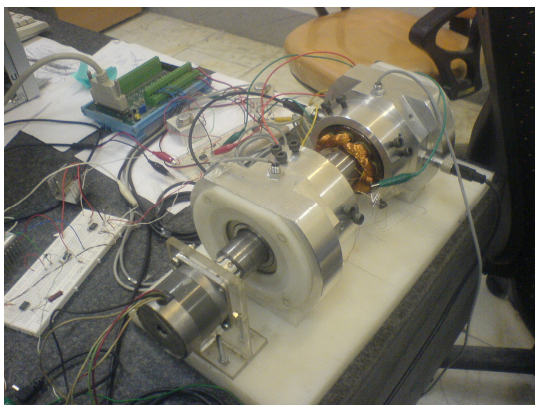
d_u بردار تحریک هارمونیک ناشی از نابالانسی است.

$$d_u = \begin{bmatrix} K_s \cos \Omega t \\ K_d \cos(\Omega t + \beta) \\ K_s \sin \Omega t \\ -K_d \sin(\Omega t + \beta) \end{bmatrix}$$



شکل ۳ رتور همراه با پارامترهای مربوط

با توجه به طراحی انجام شده مطابق شکل ۴، معادلات بالا به صورت تحلیلی با صرف نظر کردن از اثرهای ژيروسکوپی و اثرهای غیرخطی مغناطیسی، به صورت زیر است:



شکل ۴ طرح ساخته شده همراه با تجهیزات مربوط

$$i_{\Delta} = \begin{bmatrix} i_{\Delta x} \\ i_{\Delta y} \end{bmatrix}$$

آهنرباهای الکتریکی است و داریم:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_r}{\partial x} & \frac{\partial \psi_r}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi_r}{\partial x} & \frac{\partial \psi_r}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi_r}{\partial x} & \frac{\partial \psi_r}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi_r}{\partial x} & \frac{\partial \psi_r}{\partial y} \end{bmatrix}, \frac{\partial \psi}{\partial i_{\Delta}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_r}{\partial i_{\Delta x}} & \frac{\partial \psi_r}{\partial i_{\Delta y}} \\ \frac{\partial \psi_r}{\partial i_{\Delta x}} & \frac{\partial \psi_r}{\partial i_{\Delta y}} \\ \frac{\partial \psi_r}{\partial i_{\Delta x}} & \frac{\partial \psi_r}{\partial i_{\Delta y}} \\ \frac{\partial \psi_r}{\partial i_{\Delta x}} & \frac{\partial \psi_r}{\partial i_{\Delta y}} \end{bmatrix}$$

x موقعیت رتور، M ماتریس متقارن جرم و G

ماتریس مربوط به اثر ژيروسکوپی عبارت است از:

$$M = \begin{bmatrix} m & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & J_r & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & m & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & J_r \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & -J_e \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & -J_e & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

Ω فاز حرکت دورانی رتور، θ زاویه لحظه‌ای

چرخش و T دوره تناوب چرخش و B ماتریس انتقال ورودی، به صورت زیر مربوطند:

$$\Omega = \frac{\gamma \pi}{T} \theta, B = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -l_{bA} & \cdot & l_{bA} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & l_{bA} & \cdot & -l_{bA} \end{bmatrix}$$

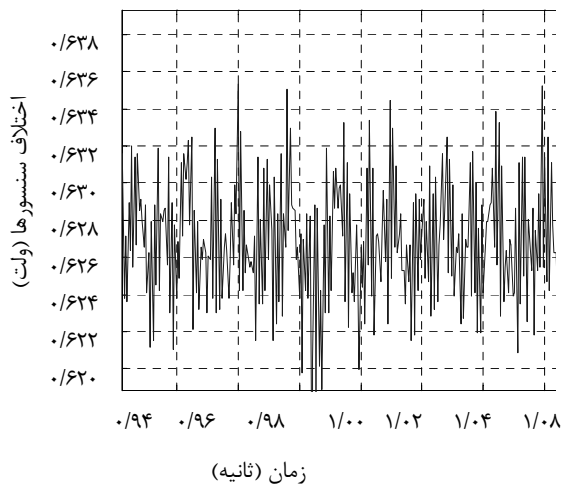
f بردار نیروی باتاقان‌های شعاعی است که به صورت

تابعی از جریان کنترل و موقعیت رتور توصیف می‌شود و

f_g بردار نیروی جاذبه است و:

$$f = \begin{bmatrix} f_{xA}(i_{\Delta xA}, x_{bA}) \\ f_{yA}(i_{\Delta yA}, y_{bA}) \\ f_{xB}(i_{\Delta xB}, x_{bB}) \\ f_{yB}(i_{\Delta yB}, y_{bB}) \end{bmatrix}, f_g = \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ -mg \\ \cdot \end{bmatrix}$$

کنترلی، رتور در نقطه تعادل به صورت پایدار و فقط با حداکثر نوسان چند میکرون کنترل می شود. که خروجی سنسور سیستم در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ خروجی سنسورها در وضعیت تعلیق

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود اختلاف ولتاژ سنسورها بین ۰/۶۱۱ تا ۰/۶۳۶ ولت نوسان می کند و در نتیجه دامنه نوسان حدود ۰/۰۲۵ ولت است. با توجه به اینکه هر ۱۰ ولت خروجی سنسورها معادل ۴mm است، در حالت تعلیق، مقدار نوسان میله از مرکز حداکثر برابر ۵ میکرون است.

۳- تحلیل عددی سامانه

در طرح مورد نظر از هشت سیم پیچ استفاده شده است. برای تشکیل هر آهنربای الکتریکی C شکل، حداقل دو سیم پیچ مجاور باید تغذیه شود تا دو دندان مربوط به این سیم پیچ ها تشکیل یک آهنربای الکتریکی داده و نیرویی مؤثر را بر میله وارد کند؛ یعنی این هشت سیم پیچ، تشکیل چهار قطب الکترومغناطیسی می دهند. در این طرح برای اعمال جریان به سیم پیچ ها، الگوهای

اگر I_0 و I_{max} جریان تحریک برای ایجاد شار مغناطیسی در سیم پیچ ها باشد، در صورت تغییر موقعیت رتور از مرکز، مقدار جریان مورد نیاز برای کنترل و برگشت به نقطه تعادل برابر، $i_{x\Delta}$ و $i_{y\Delta}$ است، در این صورت مقدار نیرو از رابطه های زیر به دست می آید:

$$f_x = \frac{1}{4} \nu \mu_0 N^2 A \cos \alpha \left(\left(\frac{I_0 + i_{x\Delta}}{\delta_0 - x} \right)^2 - \left(\frac{I_0 - i_{x\Delta}}{\delta_0 + x} \right)^2 \right)$$

$$f_y = \frac{1}{4} \nu \mu_0 N^2 A \cos \alpha \left(\left(\frac{I_0 + i_{y\Delta}}{\delta_0 - y} \right)^2 - \left(\frac{I_0 - i_{y\Delta}}{\delta_0 + y} \right)^2 \right)$$

معادلات بالا برای تعیین نیرو به صورت خطی در نزدیکی نقطه تعادل مورد استفاده قرار می گیرند، به طوری که:

$$i_{x\Delta op} = 0, x_{op} = 0 \quad \text{and} \quad i_{y\Delta op} = 0, y_{op} = 0$$

در صورتی که نیروها غیرخطی باشند، نیرو را از معادلات زیر می توان به دست آورد:

$$f_x = k_i i_{x\Delta} + k_\delta x$$

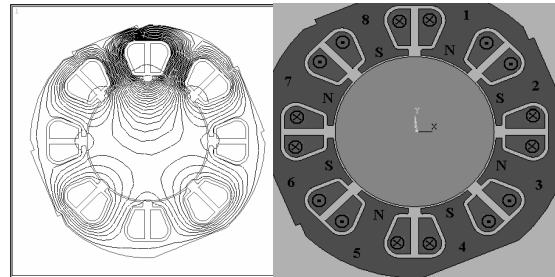
$$f_y = k_i i_{y\Delta} + k_\delta y$$

$$k_i = \left. \frac{\partial f_x}{\partial i_{x\Delta}} \right|_{op} = \left. \frac{\partial f_y}{\partial i_{y\Delta}} \right|_{op} = \nu \mu_0 N^2 A \cos \alpha \frac{I_0}{\delta_0^2}$$

$$k_\delta = \left. \frac{\partial f_x}{\partial x} \right|_{op} = \left. \frac{\partial f_y}{\partial y} \right|_{op} = \nu \mu_0 N^2 A \cos \alpha \frac{I_0^2}{\delta_0^3}$$

که k_i بهره جریان، و k_δ ضریب سفتی است. با جایگذاری نیروی مربوط به آهنربا در معادله حالت سامانه، ورودی سامانه از F تغییر داده شده و به i تبدیل می شود. علت این تغییر متغیر، ناتوانایی سامانه در اندازه گیری نیرو است. در معادلات حالت اخیر، بردار خروجی سامانه در برگیرنده جابه جایی ها است. این در حالی است که اندازه گیری جابه جایی از طریق اندازه گیری خروجی سنسورها انجام می شود و با توجه به مدار

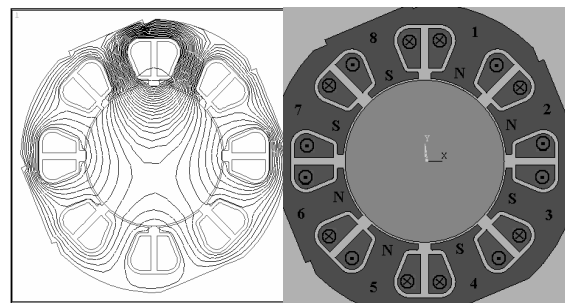
مختلفی را به صورت NSNS و NNSS می توان در نظر گرفت که باعث اعمال نیرو در جهت های مختلف می شود، (شکل ۶ الف، ب و ج).



شکل ۶ الف الگوی اعمال جریان به صورت NSNS و توزیع

شار مغناطیسی با تحریک سیم پیچ ها به صورت

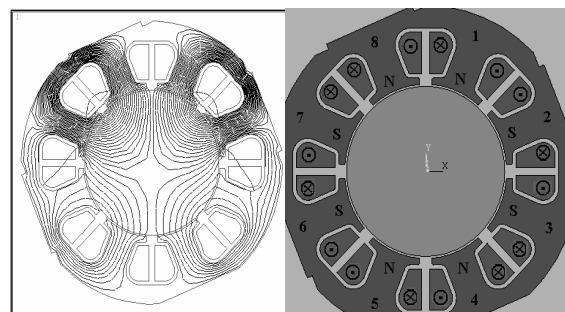
$$I_1=I_8=0/5A, \quad I_2=I_3=I_4=I_5=I_6=I_7=0/1A$$



شکل ۶ ب الگوی اعمال جریان به صورت NNSS و توزیع

شار مغناطیسی با تحریک سیم پیچها به صورت

$$I_1=I_8=0/5A, \quad I_2=I_3=I_4=I_5=I_6=I_7=0/1A$$



شکل ۶ ج الگوی اعمال جریان به صورت NSNS و توزیع

شار مغناطیسی با تحریک سیم پیچها به صورت

$$I_1=I_2=I_3=I_4=0/5A, \quad I_5=I_6=I_7=I_8=0/1A$$

در الگوی ۶ الف، همان طور که در شکل مشخص شده قطبیت دندانها به صورتی است که قطبها به طور متوالی تعویض می شوند و قطبهای مجاور آهنرباهای الکتریکی مختلف ناهمنام هستند. خطوط شار در این طرح نشان می دهد که در این حالت خطوط شار از قطبهای هر آهنربا به آهنربای مجاور آن نیز سرایت می کند. در الگوی ۶ ب، حالت قطبهای مجاور آهنرباهای الکتریکی مختلف همنام بوده و در نتیجه خطوط شار آهنرباها از یکدیگر مستقل خواهد بود. با مقایسه نتایج دو الگوی ۶- الف و ۶- ب به نظر می رسد که این دو الگو از نظر نیروی مغناطیسی ایجاد شده و نحوه توزیع چگالی شار مغناطیسی، تفاوت چندانی ندارند اما توالی قطبها در ۶- الف به گونه ای است که در صورت دوران میله، فرکانس معکوس شدن قطبها نسبت به الگوی ۶- ب دو برابر بوده و این موجب افزایش قابل ملاحظه اتلاف انرژی به صورت هیستریزس و جریان گردابی می شود.

در الگوی ۶- ج با توجه به نحوه تغذیه سیم پیچ های استاتور و نوع و ترتیب قطبها آهنرباهای الکتریکی عمود بر هم - که خط مرکزی آنها با راستای نیروی جاذبه زاویه ۴۵ درجه می سازد - وظیفه حمل میله و غلبه بر نیروی وزن را بر عهده دارند.

تحلیل عددی انجام شده در خصوص چگالی شار مغناطیسی ایجاد شده در الگوهای بالا نشان دهنده وجود نقاط بحرانی برای اشباع مغناطیسی قسمت هایی از استاتور باتاقان بوده و چگالی شار مغناطیسی ایجاد شده در میله آهنی، معمولاً کمتر از مقادیر استاتور است. هسته استاتور باتاقان در چگالی شار بیش از ۱/۶ تسلا و میله فولادی استفاده شده نیز برای چگالی شار مغناطیسی بیش از ۱/۷ به حالت اشباع مغناطیسی در می آیند.

نیرو در جهت x (N/m) $-۳/۰۹۸۳$
 نیرو در جهت y (N/m) $+۳۱۰۳/۰$

نتایج برای الگوی ۶- ج به صورت زیر است:

نیرو در جهت x (N/m) $+۷/۸۲۲۰$
 نیرو در جهت y (N/m) $+۳۲۱۵/۸$

در روش محاسبه نیرو به روش کار مجازی، نیروها با استفاده از مشتقات جزئی از توابع هم انرژی با توجه به جابه‌جایی مجازی انجام می‌شود.

$$W_c = \int_V \left(\int_C B dH \right) dV \quad (۲۴)$$

$$F = \frac{\partial W_c}{\partial p} = \left[\frac{\partial W_c}{\partial x} \quad \frac{\partial W_c}{\partial y} \right]^T$$

که W_c توابع انرژی و F بردار نیرو است. نیرو در جهت x از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_x = \sum_e \int_{\Omega_e} \left[-B_x B_y \right] G_j^{-1} \frac{\partial G_j}{\partial x} \left[H_x \quad H_y \right]^T + \int_V B dH \left| G_j \right|^{-1} \frac{\partial G_j}{\partial x} d\Omega \quad (۲۵)$$

این جمع‌بندی در فاصله انجام شده و G_j ماتریس ژاکوبی است که مختصات محلی و کلی را به هم تزویج می‌کند. نتایج محاسبه نیرو با توجه به حل عددی برای الگوی ۶- ب به صورت زیر است:

نیرو در جهت x (N/m) $-۰/۵۶۲۲$
 نیرو در جهت y (N/m) $+۳۱۰۵/۸$

برای تحلیل و پیش‌بینی نیروی مغناطیسی وارد شده به میله از طرف آهنربای الکتریکی و رابطه نیرو بر حسب جریان سیم‌پیچ آهنربا، از دو روش تنسور تنش ماکسول و کار مجازی استفاده شده است. در روش تنسور تنش ماکسول، نیروی الکترومغناطیسی با استفاده از انتگرال سطح محاسبه می‌شود.

$$F = \oint_S \sigma \cdot ds \quad (۲۱)$$

$$F = \oint_S \left[\frac{1}{\mu} (B \cdot n) B - \frac{1}{2\mu} B^2 n \right] ds$$

که σ تنسور تنش ماکسول و n برداری که عمود بر سطح انتگرال S و B چگالی شار مغناطیسی است. در مدل دوبعدی، انتگرال سطح به انتگرال خطی در فاصله فاصله هوایی تبدیل می‌شود. اگر شعاع r_i دایره مسیر انتگرال‌گیری باشد، نیرو از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F = \int_{r_1}^{r_2} \left[\frac{1}{\mu} B_r B_\phi e_\phi + \frac{1}{2\mu} (B_r^2 - B_\phi^2) e_r \right] r d\theta \quad (۲۲)$$

که B_r, B_ϕ به ترتیب مؤلفه شعاعی و مماسی از چگالی شار است. تنسور تنش ماکسول از روی مؤلفه شعاعی چگالی شار و در فاصله هوایی x و زمان t از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\sigma(x, t) = \frac{1}{2\mu} (B_r(x, t))^2 \quad (۲۳)$$

در این روش معادلات با توجه به این که نفوذپذیری هسته زیاد و خطوط شار روی سطح آهنربا و میله عمود بر هم هستند، حل شده و نیروها برای الگوی ۶- ب به قرار زیر به دست آمده است:

نتایج برای الگوی ۶- ج به صورت زیر می‌باشد:

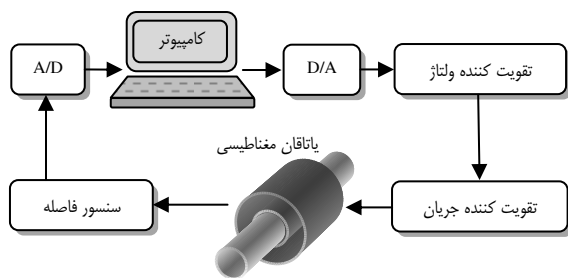
$$\text{نیرو در جهت } x \quad (N/m) \quad 2/1822+$$

$$\text{نیرو در جهت } y \quad (N/m) \quad 3221/1+$$

۶- ب است، اما باید توجه داشت که در الگوی ۶- ج توان مصرفی نیز دو برابر است.

۴- حساسیت‌سنجی تجربی پارامترهای مؤثر در پایداری سامانه

با توجه به طرح ساخته شده (شکل ۴)، آزمایش‌های متعددی با توجه به تحلیل عددی برای تعیین بهترین فاصله، فرکانس پالس تحریک‌کننده و همچنین شکل هندسی آهنرباها انجام شد. با توجه به ناپایداری سامانه باتاقان‌های مغناطیسی، برای پایداری این سامانه از کنترل‌کننده پیش‌فاز استفاده شد، که طرح کلی سامانه کنترل در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸ ارتباط قسمت‌های مختلف سامانه

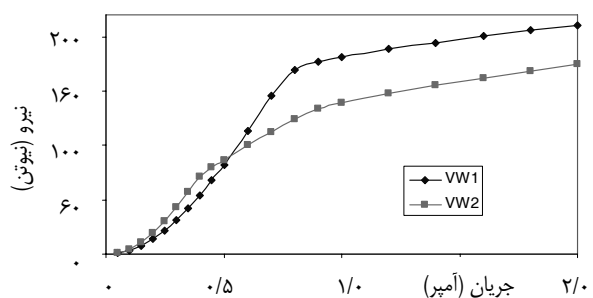
کنترل‌کننده پیش‌فاز با اضافه کردن فاز در فرکانس مورد نظر، سامانه را پایدار می‌کند. رابطه کلی این کنترل‌گر به صورت زیر است:

$$C = k \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1}$$

k طوری تعیین می‌شود که $|kG(s)|$ در $s = 0$ بزرگتر از واحد شود. با توجه به روابطی که در کنترل کلاسیک وجود دارد، با توجه به مقدار فازی که برای پایدار سازی سامانه باید به آن اضافه شود، α را به دست

مقادیر نیروی ناچیز به دست آمده در راستای محور X ناشی از تقارن ناکامل و ایدئال نبودن مش‌بندی مدل و قابل صرف‌نظر است.

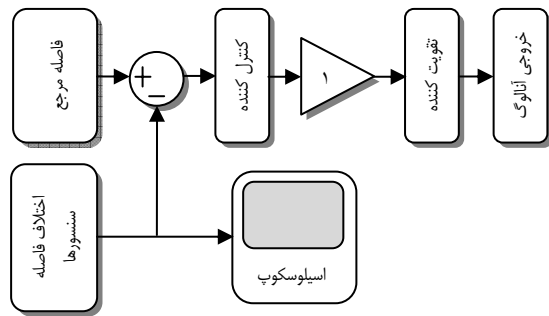
برای مقایسه دو الگوی پیشنهادی نمودار نیروهای حاصل از روش کار مجازی برای الگوهای ۶- ب و ۶- ج در نمودار شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷ مقایسه نیروی الکترومغناطیسی حاصل در دو الگوی ۶- ب و ۶- ج، بر حسب جریان

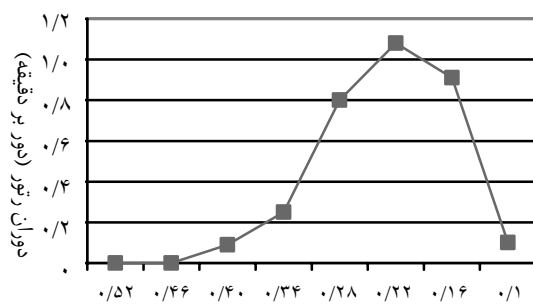
در شکل ۷ منحنی با علامت VW1 مربوط به شکل ۶- ب و منحنی با علامت VW2 مربوط به الگوی شکل ۶- ج است. ملاحظه می‌شود که تا جریان حدود ۰/۵ آمپر نیروی حاصل از الگوی ۶- ج بیشتر از نیروی مغناطیسی الگوی ۶- ب است. اما با افزایش جریان و پدیدار شدن حالت اشباع، نیروی حاصل از الگوی ۶- ب بیشتر از الگوی ۶- ج می‌شود. برای جریان‌های کمتر از ۰/۵ آمپر، نیروی ایجاد شده در الگوی ۶- ج همواره بیشتر از الگوی

آورده و با توجه به α و فرکانسی که می‌خواهیم در آن فاز را اضافه کنیم، می‌توان T را به دست آورد. در این سامانه از نمودار "بود" کنترلگر با تابع تبدیل $C_p = \frac{41.25s + 55.01}{41.25s + 80.50}$ که در شکل ۹ نشان داده شده و نسبت به سایر کنترلگرها پاسخ بهتری دارد، برای پایداری سامانه استفاده شده است.



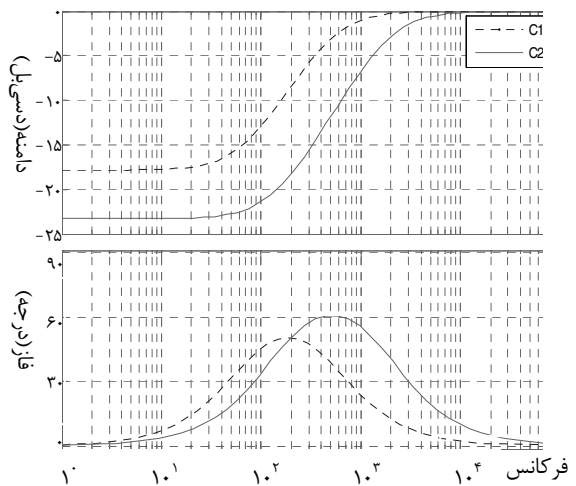
شکل ۱۰ ساختار نرم‌افزاری سامانه کنترل

وقتی بلوک مرجع در عدد $1/0.5$ تعیین شود، یعنی فاصله میله تا سنسور بالایی برابر 0.1 میلی‌متر و وقتی بلوک مرجع در عدد $-2/65$ تعیین شود، یعنی فاصله میله تا سنسور بالایی برابر 0.52 میلی‌متر است. تأثیر تغییر فاصله هوایی به صورت آزمایشی و با استفاده از سامانه ساخته شده بررسی شده و نتایج آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج تغییرات فرکانس نمونه‌برداری در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



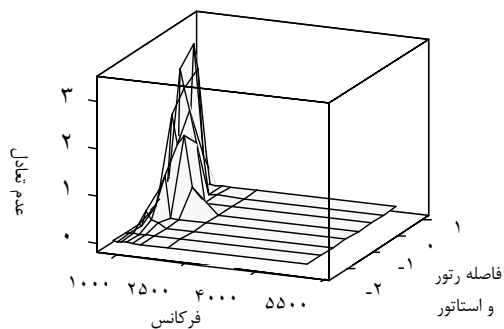
شکل ۱۱ تأثیر تغییر فاصله هوایی بر سامانه

شکل ۹ نمودار بود کنترلگر پیش‌فاز با توابع تبدیل C_1 و C_2

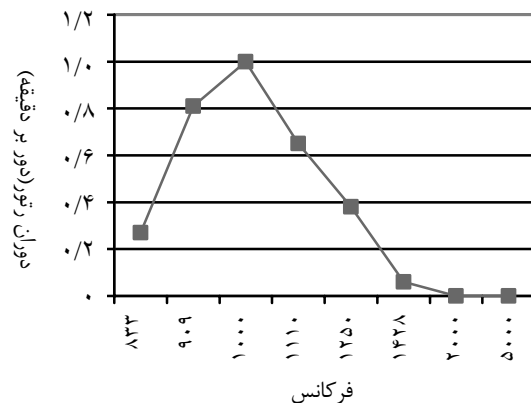


شکل ۹ نمودار بود کنترلگر پیش‌فاز با توابع تبدیل C_1 و C_2

خروجی کنترلگر پیش‌فاز طراحی شده، توسط مبدل D/A به خارج از کامپیوتر فرستاد می‌شود. بیشینه سیگنال خروجی کامپیوتر با توجه به محدودیت‌های مبدل‌های A/D ، برابر 10 ولت است. به همین دلیل این ولتاژ باید ابتدا تقویت و سپس به تقویت کننده جریان وارد شود. در این طرح، سامانه کنترل با استفاده از نرم‌افزار متلب طوری طراحی شده که می‌توان با تغییرات نرم‌افزاری، تغییرات سخت‌افزاری مانند تغییر فاصله رتور و استاتور و تغییر فرکانس در سامانه را شبیه‌سازی کرد. برای اعمال تغییرات در فاصله رتور و استاتور می‌توان با تغییر در بلوک مرجع نرم افزار در شکل ۱۰، تغییر فاصله‌ای



شکل ۱۳ منحنی سه بعدی تأثیر فرکانس و فاصله



شکل ۱۲ تأثیر تغییر فرکانس بر سامانه

همان طور که در این دو شکل مشخص است، در فرکانس بالا و فاصله مناسب رتور و استاتور، پایداری بهتری داریم. بیشترین ناپایداری در فاصله ۰/۲۵ میلیمتر و نزدیک به آن و در فرکانس کمتر از ۲۰۰۰ اتفاق می افتد.

نتایج آزمایش در شکل ۱۱، نشان می دهد که سامانه در فاصله کم و زمانی که محور رتور و محور استاتور کمترین خروج از مرکز را دارند، پایدارتر است. در این آزمایش مشخص شد که هم مرکز نبودن رتور و استاتور در هنگام تعلیق باعث ناپایداری در سامانه و به بیان دیگر باعث ایجاد گشتاور در رتور شده، که این گشتاور باعث دوران رتور و ناپایداری خواهد شد. همچنین، شکل ۱۲، نشان می دهد که پایداری سامانه در فرکانس های بالا بهتر است. البته منظور از فرکانس، فرکانس نمونه برداری است که به سامانه فرصت کنترل می دهد و البته با فرکانس پالس تحریک در فرکانس های پایین یکی است. تغییر فرکانس باعث تغییر شکل پالس تحریک در آهنرباها می شود و نوع پالس نیز باعث تأثیر در پایداری سامانه می شود. تأثیر فرکانس و فاصله به صورت آزمایشی و با استفاده از تحلیل آماری به صورت مدل سه بعدی در شکل ۱۳ آورده شده است. این شکل تأثیر دو پارامتر فرکانس و فاصله را بر پایداری نشان می دهد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله رفتار دینامیکی یاتاقان مغناطیسی به روش های تجربی، عددی و نظری بررسی شده و سپس نتایج بررسی های نظری در تحلیل آماری پایداری سامانه به کار گرفته شده و از این نتایج برای کنترل بهینه یاتاقان استفاده شده است. نتایج تحلیل عددی نشان می دهد که چیدمان NNSS (الگوی شکل ۶ - ب) از نظر پایداری، مناسب ترین حالت است. تحلیل آماری نتایج آزمایش نشان می دهد که سامانه در زمانی که رتور و محور استاتور کمترین خروج از مرکز را نسبت به هم دارند، پایدارتر است. در این آزمایش ها مشخص شد که هم مرکز نبودن رتور و استاتور در وضعیت تعلیق، باعث ناپایداری سامانه، ایجاد گشتاور در رتور و در نتیجه، دوران رتور می شود.

- rotor” By Ming-Jyi Janga. Journal of the Franklin Institute 342 (2005) 401–419
- [5] “Predictive functional control based on fuzzy model: magnetic suspension system case study” By Marko LepetiWa. Engineering Applications of Artificial Intelligence 16 (2003) 425–430
- [7] “High Speed Drive System for Medical Respiration” M. Sc. Thesis, By Matthias Glauser Daniel Schrag, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, March 2002
- [8] “General Theory of Electrical Machines” by Bimbahara.
- [9] “Electrical Machines” by Choppman. Optimal – Efficiency Constant – Speed Control of Nonlinear Variable
- [10] Reluctance Motor Drives by David Allan Torry, Massachusetts Institute of Technology PhD Thesis. 1988
- [11] Integrated Design of High-Speed Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives by Kamashi Srinivasan, Massachusetts Institute of Technology PhD Thesis. 1996
- سامانه در فرکانس‌های کنترلی (PWM) بالاتر از ۱۰۰۰۰ هرتز و فاصله زیاد رتور و استاتور (در حدود ۰/۵ میلی‌متر) پایداری بهتری دارد و بیشترین ناپایداری در فاصله حدود ۰/۲۵ میلی‌متر و در فرکانس کمتر ۲۰۰۰ هرتز است.
- با استفاده از نتایج به‌دست آمده می‌توان حالت بهینه کنترل یاتاقان مغناطیسی فعال را به‌دست آورد.

۶- منابع

- [1] “Magnetic Bearings- A Review of Their Design, Performance and Applications” By D G Waterston Published By ERA TECHNOLOGY. 1993
- [2] BoStjan Polajier, Drago Dolinar, Gorazd Sturnberger and Bojan GrEar , Modeling and Control of Horizontal-Shaft Magnetic Bearing System, Smetanova 17, SI-2000 Maribor, Slovenia bostjan.polajzer@uni-b.si
- [3] Bostjan Polajzer, Gorazd Stumberger and Drago Dolinar, Determination of a dynamic radial active magnetic bearing model using the finite element method, vol. 23 no. 3, 2004
- [4] “Sliding mode control for active magnetic bearing system with flexible

- [12] Parameter Estimation of Induction Motors using PWM Inverters by Dennis J. Evangelistam, Massachusetts Institute of Technology MSc Thesis. 1999