

طراحی کنترل کننده برای موتور سنکرون آهن ربای دائم بدون یاتاقان با در نظر گرفتن تزویج بین سیم پیچ های گشتاور و تعلیق مغناطیسی

مهرداد جعفربلند^۱، دانشیار؛ علی شیرزادی^۲، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق و اویونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - اصفهان - ایران - j_mehrdad405@hotmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق و اویونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - اصفهان - ایران - shirzadi_a@yahoo.com

چکیده: موتور سنکرون آهن ربای دائم بدون یاتاقان نوع جدیدی از ماشین های الکتریکی است که حاصل ترکیب مشخصات موتور سنکرون آهن ربای دائم معمولی و یاتاقان مغناطیسی می باشد. در اغلب تحقیقاتی که پیرامون طراحی کنترل کننده این موتور گزارش شده، از مدل های ریاضی بدون در نظر گرفتن تزویج بین سیم پیچ های گشتاور و تعلیق مغناطیسی استفاده شده است. نتایج شبیه سازی در این مقاله نشان می دهد که اگر کنترل کننده بر مبنای مدل ریاضی بدون تزویج طراحی شده و سپس همین کنترل کننده برای مدل ریاضی با تزویج مغناطیسی که نشان دهنده مدل دقیق تر و واقعی تر موتور است، مورد استفاده قرار گیرد پاسخ سیستم همراه با خطا خواهد بود. بنابراین تزویج بین دو سیم پیچ قابل چشم پوشی نیست و برای اطمینان از صحت عملکرد سیستم کنترل باید طراحی کنترل کننده با در نظر گرفتن تزویج انجام شود. در این مقاله کنترل کننده ای برای موتور طراحی شده که در آن تزویج بین سیم پیچ های گشتاور و تعلیق مغناطیسی در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی با استفاده از نرم افزار سیمولینک متلب نشان می دهد که به هنگام تغییر ناگهانی سیگنال های مرجع مؤلفه های جابه جایی شعاعی روتور یا تغییر ناگهانی گشتاور بار، سیستم تعلیق مغناطیسی پایدار بوده و از عملکرد مطلوبی برخوردار است. بنابراین صحت روش کنترلی پیشنهادی تأیید می شود.

واژه های کلیدی: موتور سنکرون آهن ربای دائم بدون یاتاقان، مدل ریاضی، تزویج مغناطیسی، روش سیستم معکوس.

Controller Design for BPMSM with Consideration of Coupling between Torque and Magnetic Suspension Windings

M. Jafarboland¹, Associate Professor; A. Shirzadi², PhD Student

1- Faculty of Electrical and Avionics Engineering, Maleke-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran, Email: J_mehrdad405@hotmail.com

2- Faculty of Electrical and Avionics Engineering, Maleke-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran, Email: shirzadi_a@yahoo.com

Abstract: Bearingless permanent magnet synchronous motor (BPMSM) is a new electrical machine combining the characteristics of conventional PM synchronous motors and magnetic bearings. Most references about motor controller design have used mathematical models without considering the coupling between torque and magnetic suspension windings. Simulation results in this study have shown that response of system is unreasonable when these controllers are used in mathematical models with considering the coupling between two windings (more perfect model). Therefore, coupling consideration between two windings is an important aspect of controller design, in order to insure its proper performance. In this study, a new controller has been designed and proposed which considers the coupling between torque and magnetic suspension windings. Simulation results using Matlab/Simulink software have shown that magnetic suspension system remains stable when the reference signals from rotor radial displacements or the load torque suddenly change. Therefore, the simulation results show the effectiveness of proposed scheme.

Keywords: Bearingless permanent magnet synchronous motor, mathematic model, magnetic coupling, inverse system method.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۲۴ و ۱۳۹۵/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۸

نام نویسنده مسئول: مهرداد جعفربلند

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - شاهین شهر - انتهای خیابان فردوسی - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - دانشکده مهندسی برق و اویونیک.

۱- مقدمه

یاتاقان مغناطیسی ماشینی است که از نیروی تعلیق مغناطیسی برای معلق کردن روتور بدون هیچ گونه تماس مکانیکی استفاده می کند. عدم اصطکاک و فرسایش و بی نیازی به روغن کاری و آب بندی، همچنین سرعت، دقت و طول عمر زیاد از ویژگی های بارز یاتاقان مغناطیسی است [۱، ۲]. این ویژگی ها باعث شده تا یاتاقان های مغناطیسی در درایوهای با سرعت زیاد، پمپ های توربوملکولی، قلب های مصنوعی، سانتریفیوژها و دستگاه های ذخیره انرژی چرخ طیار مورد استفاده قرار گیرند [۳]. برای اینکه شافت روتور بچرخد، باید یک موتور الکتریکی در سیستم یاتاقان مغناطیسی نصب شود. در این صورت طول محوری شافت روتور و ابعاد مجموعه بزرگ تر شده و ساختار سیستم پیچیده می شود. یکی از راه حل های رفع این مشکل، استفاده از موتورهای بدون یاتاقان است. در این موتور هر دو عملکرد تولید گشتاور و تعلیق مغناطیسی به طور هم زمان وجود دارد [۴، ۵]. برای تولید هم زمان گشتاور و نیروی تعلیق شعاعی، یک سیم پیچ اضافی بنام سیم پیچ نیروی تعلیق همراه با سیم پیچ گشتاور موتور بر روی استاتور پیچیده می شوند. ساختار موتور بدون یاتاقان در مقایسه با سیستم موتور و یاتاقان مغناطیسی ساده تر و فشرده تر بوده و هزینه ساخت کمتری دارد [۶، ۷].

موتور سنکرون آهن ربای دائم بدون یاتاقان (*BPMSM*)^۱ در بین انواع موتورهای بدون یاتاقان به دلیل ساختار ساده، عملکرد قابل اطمینان، بازه زیاد، چگالی گشتاور و توان زیاد و هزینه مناسب از اهمیت بیش تری برخوردار است [۸، ۹]. ایجاد تحول در ساختار موتور و روش های کنترلی، روز به روز بر جدایی *BPMSM* می افزاید. این موتورها نشان داده اند که از پتانسیل خوبی برای استفاده در ماشین های سانتریفیوژ، پمپ های توربوملکولی، کمپرسورها، چرخ های طیار ذخیره انرژی و فرآیندهای مکانیکی دقیق با سرعت زیاد برخوردار هستند.

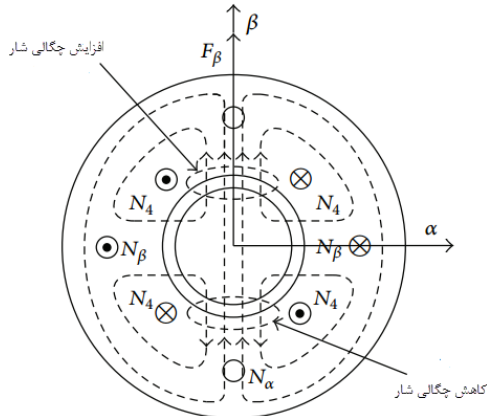
برای اینکه بتوان کنترل کننده ای مناسب برای *BPMSM* طراحی کرده و از عملکرد تعلیق مغناطیسی پایدار آن اطمینان حاصل نمود، باید مدل ریاضی با دقت کافی موتور را به دست آورده و کنترل کننده را بر اساس آن طراحی نمود. در مدل ریاضی که در بیش تر مراجع استفاده شده گشتاور و تعلیق مغناطیسی به عنوان دو زیرسیستم جداگانه در نظر گرفته شده اند و از تزویج الکترومغناطیسی بین دو سیم پیچ گشتاور و تعلیق مغناطیسی صرف نظر شده است. به همین دلیل کنترل گشتاور و تعلیق مغناطیسی به صورت مجزای از هم انجام می شود [۱۰-۱۶]. در عمل به دلیل اینکه دو مجموعه سیم پیچ در یک هسته قرار دارند، بین آن ها تزویج وجود دارد.

در حال حاضر بیش تر فعالیت های تحقیقاتی در زمینه کنترل *BPMSM* بر استفاده از روش های کنترلی پیشرفته متمرکز شده است. اگر بتوان به طریقی یک سیستم غیرخطی را با یک سیستم خطی معادل سازی نمود، آنگاه کنترل آن بسیار ساده می شود و در سیستم ساده شده می توان از همه نوع روش های کنترلی مرسوم برای طراحی

مناسب کنترل کننده های حلقه بسته استفاده کرد [۱۷]. یکی از روش های مرسوم که به طور گسترده در کنترل مجزا سازی^۲ سیستم های غیرخطی استفاده شده، روش سیستم معکوس^۳ است [۱۸، ۱۹]. این روش یک روش خطی سازی فیدبک مستقیم بوده [۲۰] و در سال های اخیر پیشنهاد شده است. بر اساس این روش می توان معکوس سیستم غیرخطی را به دست آورده و سپس با اتصال آشناری آن به سیستم اصلی، به کنترل مجزای متغیرهای سیستم غیرخطی دست پیدا نمود. در مرجع [۲۱] از روش سیستم معکوس برای کنترل مجزای متغیرهای سرعت و مؤلفه های جابه جایی شعاعی روتور یک *BPMSM* استفاده شده است. ورودی های سیستم، جریان های دو محور d و q سیم پیچ های گشتاور و تعلیق مغناطیسی می باشند. در مدل ریاضی مورد استفاده در این تحلیل، از تزویج بین دو سیم پیچ صرف نظر شده است. در مرجع [۲۲] از این روش برای کنترل مجزای سرعت و شار یک موتور القایی بدون یاتاقان استفاده شده و ادعا شده که جداسازی متغیرهای سرعت و شار موتور منجر به کنترل مجزای مؤلفه های جابه جایی شعاعی روتور نیز خواهد شد. در این تحلیل نیز تزویج بین دو سیم پیچ در نظر گرفته نشده است. در مرجع [۲۳] مدل ریاضی *BPMSM* با در نظر گرفتن تزویج الکترومغناطیسی بین دو سیم پیچ استخراج شده است. این مدل ریاضی نشان می دهد که *BPMSM* یک سیستم چندمتغیره، غیرخطی و به شدت تزویج شده است. نتایج شبیه سازی در این مرجع نشان می دهد که افزایش ناگهانی گشتاور بار و در نتیجه افزایش جریان سیم پیچ گشتاور، منجر به تغییر دامنه و فاز میدان فاصله هوایی شده و در نهایت باعث از بین رفتن شرایط تعلیق پایدار موتور می شود. به عبارت دیگر تزویج بین دو سیم پیچ باعث می شود که در لحظه افزایش گشتاور، جابه جایی روتور نیز افزایش یابد. افزایش جابه جایی روتور نیز به نوبه خود باعث افزایش گشتاور می شود. نویسندگان هیچ راه حلی برای برطرف نمودن این مشکل ارائه نکرده اند.

در این مقاله از عبارت «مدل ریاضی ساده شده» برای مدلی استفاده می شود که در آن از تزویج بین دو سیم پیچ صرف نظر شده و عبارت «مدل ریاضی کامل» برای مدلی به کار می رود که در آن تزویج بین سیم پیچ ها در نظر گرفته شده است. برای اینکه تأثیر تزویج بین دو سیم پیچ بر عملکرد موتور نشان داده شود، طراحی کنترل کننده بر اساس هر دو مدل ریاضی فوق انجام می شود. در شبیه سازی ها، سیگنال های مرجع مؤلفه های جابه جایی شعاعی روتور به طور ناگهانی تغییر داده می شوند و سپس رفتار سیستم تعلیق مغناطیسی مورد بررسی و مقایسه قرار می گیرد. نتایج شبیه سازی در این مقاله نشان می دهد که تزویج بین دو سیم پیچ بخشی از دینامیک تأثیرگذار سیستم است و کنترل کننده ای که با صرف نظر کردن از تزویج طراحی شود، قطعاً در عمل با مشکل مواجه شده و رفتار مطلوبی نخواهد داشت. بنابراین جهت اطمینان از صحت عملکرد سیستم کنترل، باید کنترل کننده با در نظر گرفتن تزویج بین دو سیم پیچ طراحی شود.

شکل ۱ اصول تولید نیروی تعلیق مغناطیسی را در موتور بدون یاتاقان نشان می‌دهد. هنگامی که جریان به سیم پیچ گشتاور چهار قطب و سیم پیچ تعلیق دو قطب تزریق شود (همانند شکل ۱)، نیروی تعلیق مغناطیسی در امتداد محور β تولید می‌شود. اگر جهت جریان سیم پیچ تعلیق معکوس شود، نیروی تعلیق مغناطیسی شعاعی در خلاف جهت محور β تولید خواهد شد. به روشی مشابه می‌توان نیروی تعلیق مغناطیسی را در امتداد محور α تولید نمود.



شکل ۱: تولید نیروی تعلیق مغناطیسی در موتور بدون یاتاقان

۲-۲- مدل ریاضی موتور سنکرون آهن ربای دائم بدون یاتاقان

در حالتی که روتور در مرکز استاتور قرار دارد، اندوکتانس متقابل بین دو سیم پیچ گشتاور و تعلیق مغناطیسی برابر با صفر است. اما در کاربردهای عملی با خارج شدن روتور از مرکز استاتور این اندوکتانس مقداری مخالف صفر خواهد داشت و بین دو سیم پیچ تزویج ایجاد می‌شود. همچنین اندوکتانس متقابل بین دو سیم پیچ با جابه جایی روتور تغییر می‌کند. در این قسمت مدل ریاضی کامل $BPMSM$ با در نظر گرفتن تزویج بین دو سیم پیچ نشان داده می‌شود [۲۳]. در این تحلیل فرضیه‌های زیر جهت سادگی در نظر گرفته خواهد شد:

(الف) دو مجموعه سیم پیچ سه فاز در استاتور کاملاً متقارن هستند.

(ب) توزیع نیروی محرکه مغناطیسی هر فاز در فاصله هوایی کاملاً سینوسی است.

(ج) از اشباع مغناطیسی و تلفات هسته صرف نظر می‌شود.

با در نظر گرفتن اندوکتانس متقابل بین دو سیم پیچ، رابطه شار سیم پیچ‌ها در دستگاه مختصات گردان سنکرون به صورت زیر است [۲۳]:

$$\begin{bmatrix} \psi_{md} \\ \psi_{mq} \\ \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_m & 0 & M'.x & -M'.y \\ 0 & L_m & M'.y & M'.x \\ M'.x & M'.y & L_s & 0 \\ -M'.y & M'.x & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{pm} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

که L_m اندوکتانس هر فاز سیم پیچ گشتاور، L_s اندوکتانس هر فاز سیم پیچ تعلیق، M' تغییرات اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ گشتاور و تعلیق نسبت به جابه جایی روتور، i_{md} و i_{mq} جریان‌های دومیوری سیم پیچ گشتاور، i_{sd} و i_{sq} جریان‌های دومیوری سیم پیچ تعلیق، ψ_{md}

این مقاله کنترل کننده‌ای با در نظر گرفتن تزویج بین سیم پیچ‌های گشتاور و تعلیق مغناطیسی (مدل ریاضی کامل موتور) طراحی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که به هنگام تغییر ناگهانی سیگنال‌های مرجع مؤلفه‌های جابه جایی شعاعی روتور یا تغییر ناگهانی گشتاور بار، سیستم تعلیق مغناطیسی پایدار بوده و از عملکرد مطلوبی برخوردار است. بنابراین صحت کنترل کننده پیشنهادی تأیید می‌شود.

۲- اصول عملکرد و مدل ریاضی BPMSM

۲-۱- اصول عملکرد موتور سنکرون آهن ربای دائم بدون یاتاقان

بر اساس نظریه الکترومغناطیس، در سطح واسط بین دو ماده با جنس متفاوت مانند هسته آهنی و هوا، یک نیروی الکترومغناطیسی بنام نیروی ماکسول وجود دارد. نیروی ماکسول عمود بر سطح واسط است. اگر چگالی شار فاصله هوایی در امتداد سطح روتور به طور متقارن توزیع شده باشد، نیروی منتهی برابر با صفر خواهد بود. خروج روتور از مرکز استاتور باعث نامتقارن شدن توزیع چگالی شار فاصله هوایی شده و به تبع آن نیروی منتهی دیگر معادل با صفر نخواهد بود. این نیروی شعاعی منتهی، کشش مغناطیسی یک جهته^۴ نامیده می‌شود. برای دستیابی به تعلیق پایدار روتور در یک موتور بدون یاتاقان، باید یک نیروی شعاعی کنترل شونده برای غلبه بر کشش مغناطیسی یک جهته تولید شود.

دو مجموعه سیم پیچ در شیارهای استاتور موتور بدون یاتاقان وجود دارد که شامل سیم پیچ گشتاور و سیم پیچ تعلیق است. هنگامی که جریان AC به سیم پیچ گشتاور تزریق می‌شود، میدان مغناطیسی گردان تولید شده برای کنترل تعلیق روتور بدون یاتاقان مورد استفاده قرار خواهد گرفت. میدان مغناطیسی تولید شده به وسیله سیم پیچ تعلیق، میدان مغناطیسی کنترل تعلیق نامیده می‌شود. جمع آثار میدان مغناطیسی کنترل تعلیق و میدان مغناطیسی موتور متعارف منجر به تقویت میدان مغناطیسی فاصله هوایی در برخی از نواحی فاصله هوایی و تضعیف آن در قسمت‌های دیگری از فاصله هوایی می‌شود. در نتیجه یک نیروی الکترومغناطیسی شعاعی به روتور اعمال خواهد شد. با فرض اینکه تعداد جفت قطب‌های سیم پیچ گشتاور p_1 و فرکانس زاویه‌ای الکتریکی جریان تغذیه آن ω_1 بوده و تعداد جفت قطب‌های سیم پیچ کنترل تعلیق p_2 و فرکانس زاویه‌ای الکتریکی جریان تغذیه آن ω_2 باشد، اگر تعداد جفت قطب‌ها و فرکانس زاویه‌ای الکتریکی سیم پیچ‌ها در معادله $p_2 = p_1 \pm 1$ و $\omega_2 = \omega_1$ صدق کنند، دامنه و جهت نیروی الکترومغناطیسی شعاعی به صورت پایدار قابل کنترل خواهد بود [۲]. نیروی الکترومغناطیسی شعاعی قابل کنترل، نیروی تعلیق مغناطیسی نامیده می‌شود و می‌تواند برای غلبه بر کشش مغناطیسی یک جهته داخلی و بار شعاعی بیرونی و در نتیجه دستیابی به تعلیق پایدار روتور بدون یاتاقان مورد استفاده قرار گیرد.

$$P_{in} = \frac{3}{2} (R_m i_{md}^2 + R_m i_{mq}^2 + R_s i_{sd}^2 + R_s i_{sq}^2) + \frac{3}{2} \left(i_{md} \frac{d\psi_{md}}{dt} + i_{mq} \frac{d\psi_{mq}}{dt} + i_{sd} \frac{d\psi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\psi_{sq}}{dt} \right) + \frac{3}{2} \omega (-i_{md} \psi_{mq} + i_{mq} \psi_{md} - i_{sd} \psi_{sq} + i_{sq} \psi_{sd}) \quad (4)$$

توان الکترومغناطیسی عبوری از فاصله هوایی به روتور برابر است

$$P_{em} = \frac{3}{2} \omega_e (-i_{md} \psi_{mq} + i_{mq} \psi_{md} - i_{sd} \psi_{sq} + i_{sq} \psi_{sd}) \quad (5)$$

گشتاور الکترومغناطیسی را می توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$T_e = \frac{P_{em}}{\omega_m} = \frac{3}{2} P_1 (-i_{md} \psi_{mq} + i_{mq} \psi_{md}) + \frac{3}{2} P_2 (-i_{sd} \psi_{sq} + i_{sq} \psi_{sd}) \quad (6)$$

با جایگذاری شارها بر حسب جریان (معادله ۱) و با توجه به اینکه

$$P_2 = P_1 \pm 1 \text{ است، رابطه گشتاور را می توان به صورت زیر نوشت [۲۳]:}$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_1 \psi_{pm} i_{mq} + \frac{3}{2} M' x (i_{mq} i_{sd} - i_{md} i_{sq}) - \frac{3}{2} M' y (i_{md} i_{sd} + i_{mq} i_{sq}) \quad (7)$$

معادله حرکت نیز به صورت زیر بیان می شود:

$$\left(\frac{1}{P_1} \right) J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_l \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{P_1}{J} \right) (T_e - T_l) \quad (8)$$

که T_l گشتاور بار و J ممان اینرسی روتور است. با جایگذاری رابطه (۷) در رابطه (۸) خواهیم داشت:

$$\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{P_1^2}{J} \right) \psi_{pm} i_{mq} + \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{P_1}{J} \right) M' x (i_{mq} i_{sd} - i_{md} i_{sq}) - \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{P_1}{J} \right) M' y (i_{md} i_{sd} + i_{mq} i_{sq}) - \left(\frac{P_1}{J} \right) T_l \quad (9)$$

معادله نیروی تعلیق مغناطیسی موتور سنکرون آهن ربای دائم

بدون یاتاقان را می توان به صورت زیر بیان نمود [۲۳، ۲۴]:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = M' \begin{bmatrix} i_{md} + I_f & i_{mq} \\ i_{mq} & -(i_{md} + I_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + K_s \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (10)$$

ضریب K_s ، ضریب نیروی کشش مغناطیسی نامیده می شود و رابطه بین نیروی مغناطیسی یک جهته و جابه جایی روتور را نشان می دهد [۲۵].

تحت تأثیر نیروهای تعلیق مغناطیسی، جابه جایی شعاعی روتور در

مختصات x و y به صورت زیر است:

$$\begin{cases} m \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) = F_x \\ m \frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dt} \right) = F_y - mg \end{cases} \quad (11)$$

که m جرم روتور است. از ترکیب روابط (۳)، (۹) و (۱۱)، مدل ریاضی کامل موتور سنکرون آهن ربای دائم بدون یاتاقان حاصل می شود [۲۳].

و ψ_{mq} شارهای دومحوری سیم پیچ گشتاور، ψ_{sd} و ψ_{sq} شارهای دومحوری سیم پیچ تعلیق، ψ_{pm} شار آهن ربای دائم و زیر نویس های m و s به ترتیب مربوط به سیم پیچ گشتاور و تعلیق مغناطیسی است. متغیرهای x و y نیز جابه جایی شعاعی روتور در راستای محورهای d و q می باشند. معادله ولتاژ را می توان به صورت رابطه (۲) بیان نمود [۲۳].

$$\begin{bmatrix} u_{md} \\ u_{mq} \\ u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{md} \\ \psi_{mq} \\ \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} -\psi_{mq} \\ \psi_{md} \\ -\psi_{sq} \\ \psi_{sd} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که u_{mq} و u_{md} ولتاژهای دومحوری سیم پیچ گشتاور، u_{sq} و u_{sd} ولتاژهای دومحوری سیم پیچ تعلیق و R_m و R_s به ترتیب مقاومت هر فاز سیم پیچ های گشتاور و تعلیق مغناطیسی است. معادلات دیفرانسیل جریان سیم پیچ های استاتور را می توان به صورت معادله (۳) بیان نمود.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_m}{L_m} & \omega & \frac{R_s M' x}{L_m L_s} & -\frac{R_s M' y}{L_m L_s} \\ -\omega & -\frac{R_m}{L_m} & \frac{R_s M' y}{L_m L_s} & \frac{R_s M' x}{L_m L_s} \\ \frac{R_m M' x}{L_m L_s} & \frac{R_m M' y}{L_m L_s} & -\frac{R_s}{L_s} & \omega \\ -\frac{R_m M' y}{L_m L_s} & \frac{R_m M' x}{L_m L_s} & \omega & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{M' i_{sd}}{L_m} & \frac{M' i_{sq}}{L_m} \\ \frac{M' i_{sq}}{L_m} & -\frac{M' i_{sd}}{L_m} \\ -\frac{M' i_{md}}{L_s} & -\frac{M' i_{mq}}{L_s} \\ -\frac{M' i_{mq}}{L_s} & \frac{M' i_{md}}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\omega}{L_m} \psi_{pm} \\ \frac{\omega M' y}{L_m L_s} \psi_{pm} \\ \frac{\omega M' x}{L_m L_s} \psi_{pm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{1}{L_m} & 0 & -\frac{M' x}{L_m L_s} & \frac{M' y}{L_m L_s} \\ 0 & \frac{1}{L_m} & -\frac{M' y}{L_m L_s} & -\frac{M' x}{L_m L_s} \\ -\frac{M' x}{L_m L_s} & -\frac{M' y}{L_m L_s} & \frac{1}{L_s} & 0 \\ -\frac{M' y}{L_m L_s} & -\frac{M' x}{L_m L_s} & 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{md} \\ u_{mq} \\ u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix}$$

توان لحظه ای موتور عبارت است از:

۳- کنترل موقعیت شعاعی BPMSM با استفاده از روش سیستم معکوس [۱۸، ۱۹]

رابطه (۱۱) را می توان به صورت زیر نوشت:

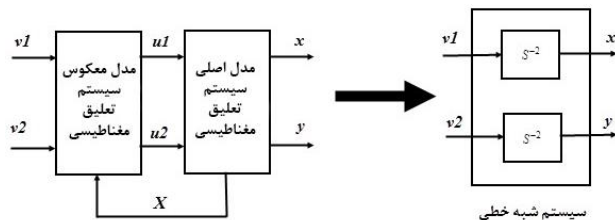
$$\begin{cases} u_1 = k \cdot \left[(i_{md} + I_f) \left(v_1 + \frac{K_s}{m} x_1 \right) + i_{mq} \left(v_2 + \frac{K_s}{m} x_2 + g \right) \right] \\ u_2 = k \cdot \left[i_{mq} \left(v_1 + \frac{K_s}{m} x_1 \right) - (i_{md} + I_f) \left(v_2 + \frac{K_s}{m} x_2 + g \right) \right] \end{cases} \quad (19)$$

که ضریب k برابر است با: $k = m \sqrt{\left(M' \left[(i_{md} + I_f)^2 + i_{mq}^2 \right] \right)}$

سیستم توصیف شده با رابطه (۱۲) را می توان با استفاده از فیدبک حالت (۱۹) خطی سازی کرده و از هم مجزا نمود. سیستم فوق بعد از مجزاسازی و خطی سازی به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{cases} \dot{x} = v_1 \\ \dot{y} = v_2 \end{cases} \quad (20)$$

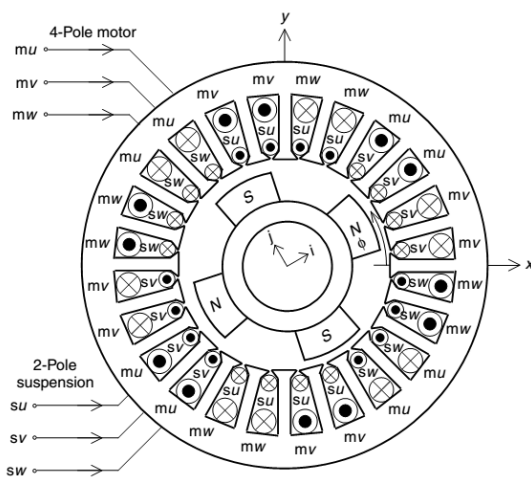
از کنار هم قرار دادن سیستم معکوس و سیستم اصلی، سیستمی شبه خطی حاصل می شود که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: سیستم شبه خطی شامل نیروهای تعلیق شعاعی موتور سنکرون آهن ربای دائم بدون یاتاقان و سیستم معکوس آن

۴- نتایج شبیه سازی

یک موتور سنکرون آهن ربای دائم بدون یاتاقان از نوع مغناطیس دائم سطحی جهت طراحی کنترل کننده انتخاب شده است. سیم پیچ های گشتاور و تعلیق مغناطیسی هر دو از نوع توزیع شده بوده و در شیارهای استاتور قرار می گیرند و به ترتیب دارای تعداد قطب های ۴ و ۲ می باشند. شکل ۳ آرایش سیم بندی موتور را نشان می دهد. استاتور دارای ۲۴ شیار است. کلاف های سیم پیچ گشتاور با حرف m و کلاف های سیم پیچ تعلیق مغناطیسی با حرف s نشان داده شده اند.



شکل ۳: آرایش سیم بندی استاتور BPMSM

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{M'}{m} \left[(i_{md} + I_f) i_{sd} + i_{mq} i_{sq} \right] - \frac{K_s}{m} x \\ \ddot{y} = \frac{M'}{m} \left[i_{mq} i_{sd} - (i_{md} + I_f) i_{sq} \right] - \frac{K_s}{m} y - g \end{cases} \quad (12)$$

در معادله (۱۲)، متغیرهای حالت عبارتند از:

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [x \ y \ \dot{x} \ \dot{y}]^T \quad (13)$$

متغیرهای ورودی برابرند با:

$$U = [u_1 \ u_2]^T = [i_{sd} \ i_{sq}]^T \quad (14)$$

تابع خروجی نیز عبارت است از:

$$Y = [y_1 \ y_2]^T = [x \ y]^T \quad (15)$$

بنابراین معادلات حالت سیستم به صورت زیر نوشته می شوند:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3 \\ \dot{x}_2 = x_4 \\ \dot{x}_3 = \frac{M'}{m} \left[(i_{md} + I_f) u_1 + i_{mq} u_2 \right] - \frac{K_s}{m} x_1 \\ \dot{x}_4 = \frac{M'}{m} \left[i_{mq} u_1 - (i_{md} + I_f) u_2 \right] - \frac{K_s}{m} x_2 - g \end{cases} \quad (16)$$

برای بررسی معکوس پذیری سیستم ابتدا از تابع خروجی مشتق گرفته می شود تا زمانی که متغیرهای ورودی در تابع خروجی ظاهر شوند. از رابطه (۱۶) خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = x_3 \\ \dot{y}_2 = \dot{x}_3 = \frac{M'}{m} \left[(i_{md} + I_f) u_1 + i_{mq} u_2 \right] - \frac{K_s}{m} x_1 \\ \dot{y}_3 = x_4 \\ \dot{y}_4 = \dot{x}_4 = \frac{M'}{m} \left[i_{mq} u_1 - (i_{md} + I_f) u_2 \right] - \frac{K_s}{m} x_2 - g \end{cases} \quad (17)$$

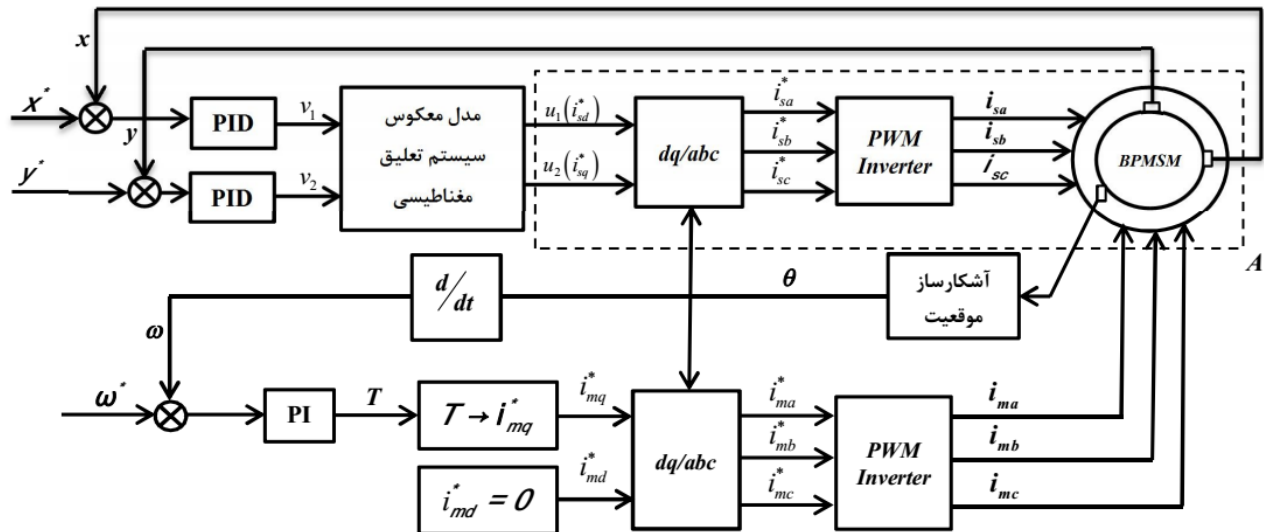
بنابراین ماتریس ژاکوبین برابر است با:

$$A(X, U) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{y}_1}{\partial u_1} & \frac{\partial \dot{y}_1}{\partial u_2} \\ \frac{\partial \dot{y}_2}{\partial u_1} & \frac{\partial \dot{y}_2}{\partial u_2} \end{bmatrix} = \frac{M'}{m} \begin{bmatrix} i_{md} + I_f & i_{mq} \\ i_{mq} & -(i_{md} + I_f) \end{bmatrix} \quad (18)$$

چون $\det(A) = -\left(\frac{M'}{m}\right)^2 \left[(i_{md} + I_f)^2 + i_{mq}^2 \right] \neq 0$ پس سیستم

معکوس پذیر است. مرتبه نسبی سیستم برابر با $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2) = (2, 2)$ است. باید کوچک تر یا برابر با مرتبه سیستم تعریف شده با معادلات (۱۶) باشد که این شرط نیز برقرار است، یعنی $\alpha_1 + \alpha_2 = 4 \leq n$ که n مرتبه سیستم و برابر با ۴ است.

با تعریف $\ddot{Y} = [\ddot{y}_1 \ \ddot{y}_2]^T = [v_1 \ v_2]^T$ ، سیستم معکوس رابطه (۱۲) را می توان به صورت زیر نوشت:



شکل ۴: بلوک دیاگرام سیستم کنترل موتور سنکرون آهنربای دائم بدون یاتاقان

و ۵-د نیز منحنی‌های پاسخ مؤلفه‌های جابه‌جایی شعاعی روتور را نشان می‌دهند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که وقتی موتور با گشتاور بار صفر راه‌اندازی می‌شود، سرعت در لحظه ۰/۰۷ ثانیه به مقدار مرجع خود می‌رسد و بالازدگی آن از ۱٪ تجاوز نمی‌کند. مؤلفه‌های جابه‌جایی شعاعی x و y در زمان ۰/۱۵ ثانیه به مقادیر پایدار خود می‌رسند و بالازدگی آن‌ها در حدود $25 \mu m$ است. اما هنگامی که مؤلفه جابه‌جایی شعاعی x به‌طور ناگهانی در لحظه ۰/۲ ثانیه به 0.4 mm تغییر می‌کند و مجدداً در لحظه ۰/۴ ثانیه به صفر باز می‌گردد، مطابق با شکل ۵-ج نوساناتی با دامنه کم در مؤلفه جابه‌جایی شعاعی y دیده می‌شود که پس از مدت کوتاهی پایدار می‌شوند. همچنین زمانی که مؤلفه جابه‌جایی شعاعی y به‌طور ناگهانی در لحظه ۰/۶ ثانیه به 0.4 mm تغییر می‌کند و دوباره در لحظه ۰/۸ ثانیه به صفر باز می‌گردد، مطابق با شکل ۵-د نوساناتی با دامنه کم در مؤلفه جابه‌جایی شعاعی x دیده می‌شود. علت وجود این نوسان‌ها تزویج بین مؤلفه‌های جابه‌جایی شعاعی روتور می‌باشد که در رابطه (۱۰) نیز قابل مشاهده است. هر دو مؤلفه جابه‌جایی پس از گذشت ۰/۱ ثانیه مقدار مرجع خود را با خطای ناچیزی دنبال می‌کنند.

در اینجا به‌منظور نمایش ضرورت مدل‌سازی اثر تزویج سیم‌پیچ‌های گشتاور و تعلیق، نتایج شبیه‌سازی یک موتور سنکرون آهنربای دائم بدون یاتاقان از مرجع [۱۰] نشان داده می‌شود. در این شبیه‌سازی از مدل ساده‌شده استفاده شده است. در شکل ۶ منحنی‌های پاسخ مؤلفه‌های جابه‌جایی شعاعی روتور در پاسخ به تغییر ناگهانی سیگنال‌های مرجع محورهای x و y از همان مرجع نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در لحظه تغییر ناگهانی سیگنال مرجع محور x تغییری در مؤلفه جابه‌جایی شعاعی محور y مشاهده نمی‌شود. همچنین تغییر ناگهانی سیگنال مرجع محور y تغییری در مؤلفه جابه‌جایی شعاعی محور x ایجاد نمی‌کند.

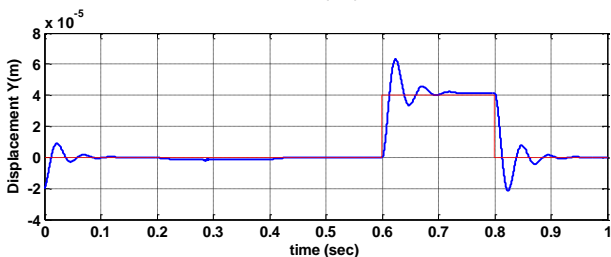
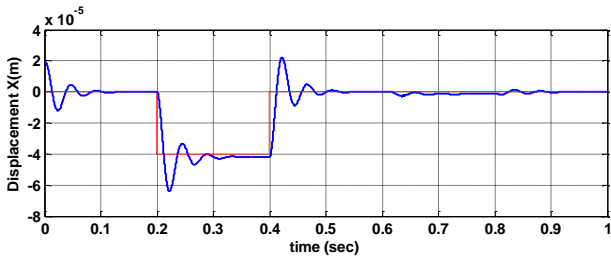
جدول ۱ پارامترهای این موتور را نشان می‌دهد [۲۳]. در شکل ۴ بلوک دیاگرام کنترل موتور نشان داده شده است [۲۳، ۲]. در سیستم کنترل سرعت موتور از روش کنترل برداری با $i_{md}^* = 0$ و در سیستم کنترل تعلیق مغناطیسی از روش سیستم معکوس برای جداسازی مؤلفه‌های دو محوری جریان مرجع سیم‌پیچ تعلیق استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات موتور سنکرون آهنربای دائم بدون

یاتاقان			
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۰/۰۰۶۵	$L_m (H)$	۵۰	فرکانس نامی (Hz)
۰/۰۰۴۲	$L_s (H)$	۳۸۰	ولتاژ نامی (V)
۰/۱۶۰۲	$\psi_{pm} (Wb)$	۱/۶	جریان نامی (A)
۴۱/۰۸	$I_f (A)$	۹۵۰	توان نامی (W)
۲	P_1	۱۵۰۰	سرعت نامی (rpm)
۱	P_2	۶/۰۴	گشتاور نامی (Nm)
۰/۰۰۰۲۴۴	$J (Kg \cdot m^2)$	۱/۹۱	$R_m (\Omega)$
۰/۶۷	$m (Kg)$	۱/۸۰	$R_s (\Omega)$
۴۰۲	$k_s (N/mm)$	۰/۶۴۴	$M' (H/m)$

برای اینکه اهمیت در نظر گرفتن تزویج بین دو سیم‌پیچ در طراحی کنترل کننده نشان داده شود ابتدا شبیه‌سازی‌ها بر اساس مدل ریاضی ساده شده و در ادامه بر مبنای مدل ریاضی کامل موتور انجام می‌شود. جابه‌جایی شعاعی اولیه روتور $x_0 = 0.2 \text{ mm}$ و $y_0 = -0.2 \text{ mm}$ ، مقدار اولیه سرعت مرجع $\omega^* = 1500 \text{ rpm}$ و مقدار اولیه جابه‌جایی شعاعی مرجع $x^* = y^* = 0$ است و موتور بدون بار راه‌اندازی می‌شود. در شکل ۵ منحنی‌های پاسخ حاصل از شبیه‌سازی مدل ریاضی ساده‌شده موتور با استفاده از نرم‌افزار Matlab/Simulink نشان داده شده است. شکل ۵-الف منحنی پاسخ سرعت و شکل ۵-ب منحنی گشتاور را نشان می‌دهد. شکل‌های ۵-ج

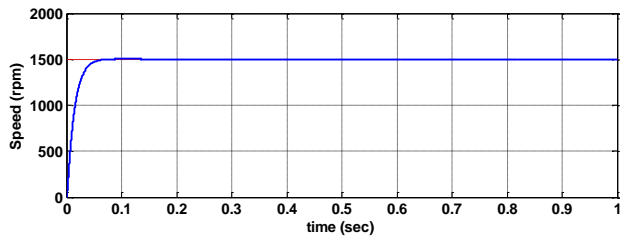
از آنجا که بین سیم پیچ ها توزیع وجود دارد بنابراین رفتار موتور در کاربردهای عملی با آنچه به عنوان مدل در شبیه سازی جایگزین آن شده متفاوت خواهد بود. در حقیقت کنترل کننده طراحی شده بر اساس مدل ریاضی ساده شده سیستمی غیر واقعی را کنترل می کند و در صورتی که در عمل برای موتور واقعی استفاده شود از دقت کافی برخوردار نیست. به منظور اثبات این موضوع در ادامه و در شکل های ۷ الی ۱۰ نشان داده می شود که با اضافه نمودن اثر توزیع سیم پیچ ها که معادل جایگزینی موتور واقعی است این کنترل کننده ناکارآمد است. شکل ۷ منحنی های پاسخ مؤلفه های جابه جایی شعاعی روتور را که بر اساس مدل ریاضی کامل موتور به دست آمده نشان می دهد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که هرگاه یکی از مؤلفه های جابه جایی شعاعی x یا y به طور ناگهانی تغییر کنند، هیچ کدام از مؤلفه ها پس از این تغییر مقادیر مرجع خود را دنبال نمی کنند و روتور در نقطه تعادل جدیدی پایدار می شود. شکل ۸ فاصله زمانی بین $0/3$ تا $0/4$ ثانیه از منحنی های جابه جایی شعاعی روتور را برای مشاهده بهتر خطای این مؤلفه ها نشان می دهد. در ادامه فرض می شود که با همان شرایط قبل، ضریب اندوکتانس متقابل بین دو سیم پیچ به دو برابر مقدار نامی خود افزایش یابد. در شکل ۹ منحنی های پاسخ حاصل از شبیه سازی مدل ریاضی کامل موتور با $M' = 1/288 H/m$ نشان داده شده است. شکل ۱۰ نیز فاصله زمانی بین $0/3$ تا $0/4$ ثانیه از منحنی های جابه جایی شعاعی روتور را نشان می دهد. در این حالت مقدار خطای مؤلفه های جابه جایی شعاعی بیش تر از حالت قبل می باشد.



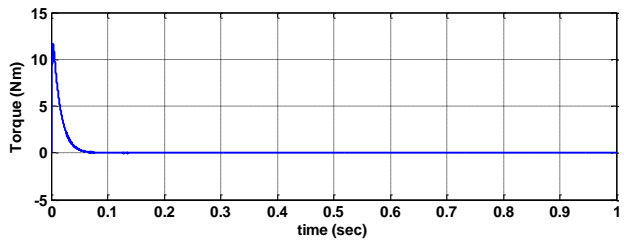
شکل ۷: منحنی های پاسخ سیستم کنترل BPMSM بر اساس مدل

ریاضی کامل موتور و $M' = 0/644 H/m$

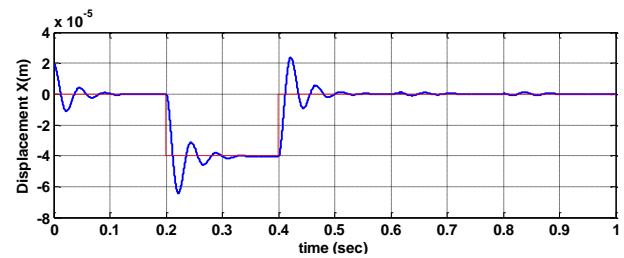
شبیه سازی دیگری بر اساس مدل ریاضی کامل موتور در [۲۳] انجام شده و نتایج آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۱ و همچنین ادعای نویسندگان مقاله، افزایش ناگهانی گشتاور بار و در نتیجه افزایش جریان سیم پیچ گشتاور، منجر به تغییر دامنه و فاز میدان فاصله هوایی شده و در نهایت باعث از بین رفتن شرایط تعلیق پایدار موتور می شود. به عبارت دیگر، توزیع بین دو سیم پیچ باعث می شود که در لحظه افزایش گشتاور، جابه جایی روتور نیز افزایش یابد.



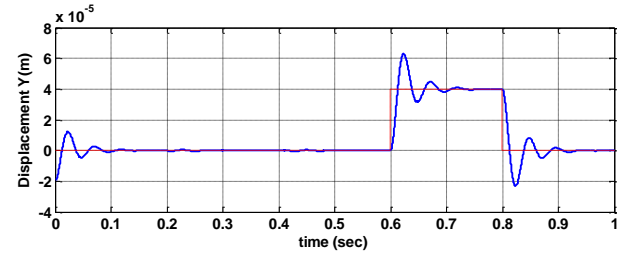
(الف)



(ب)



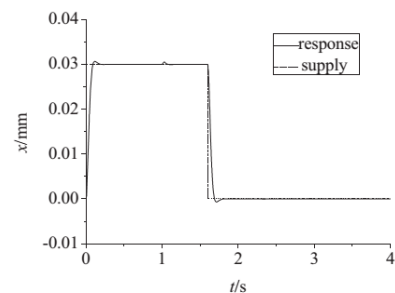
(ج)



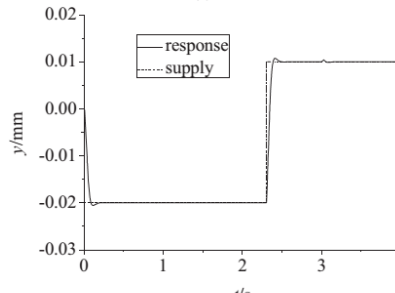
(د)

شکل ۵: منحنی های پاسخ سیستم کنترل BPMSM بر اساس مدل

ریاضی ساده شده موتور

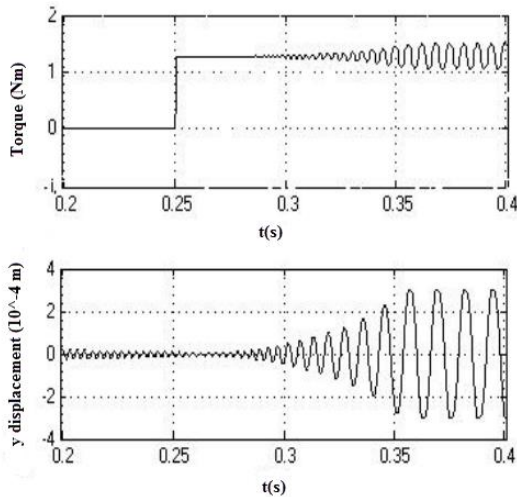


(ا)



(ب)

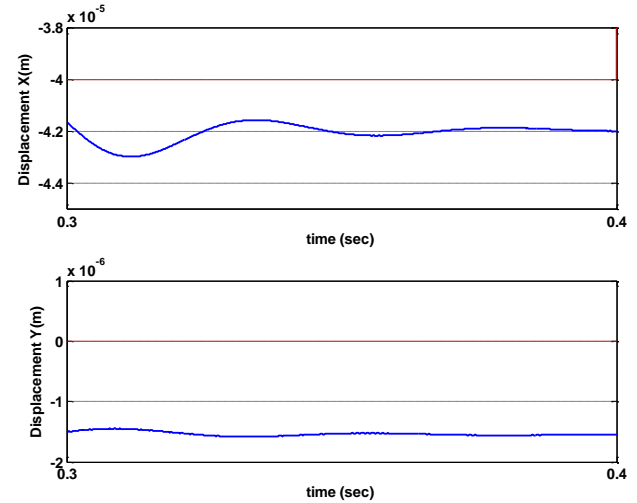
شکل ۶: منحنی های پاسخ سیستم کنترل BPMSM [۱۰]



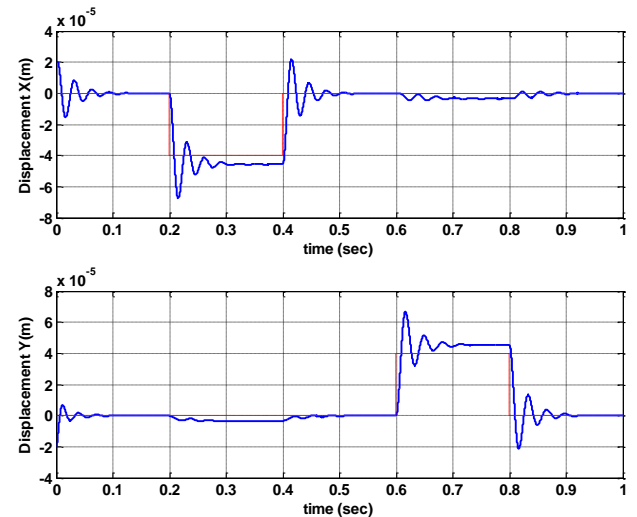
شکل ۱۱: منحنی‌های پاسخ سیستم کنترل BPMSM [۲۳]

در این مقاله نشان دادیم که با تنظیم برخی از پارامترهای کنترل کننده، توانستیم مطابق شکل‌های ۷ و ۹ سیستم را پایدار کنیم اما خطای ماندگار وجود داشته و سیستم رفتار دینامیکی مطلوبی ندارد. ولی این یک مورد خاص نمی‌تواند تضمین کند که برای هر سیستم موتور الکتریکی بدون یاتاقان، امکان پایدار شدن وجود داشته باشد. ضمن اینکه پاسخ سیستم پایدار شده هم قابل قبول نیست. پس صرف نظر نمودن از بخشی از دینامیک تأثیرگذار سیستم یعنی تزویج بین سیم‌پیچ‌های گشتاور و تعلیق مغناطیسی منطقی نیست و باید تمام دینامیک‌های تأثیرگذار سیستم در طراحی سیستم کنترل در نظر گرفته شود. ضمناً امکان طراحی کنترل کننده جدید که بتواند مدل کامل را کنترل کند وجود دارد. در این مقاله نشان داده می‌شود که با انجام اصلاحاتی در سیستم کنترل تعلیق مغناطیسی BPMSM می‌توان از عملکرد پایدار و مطلوب این سیستم اطمینان حاصل نمود. در شکل ۱۲ جریان‌های دو محور d و q سیم‌پیچ تعلیق مغناطیسی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در لحظه 0.2 ثانیه که سیگنال مرجع مؤلفه جابه‌جایی شعاعی x به‌طور ناگهانی به 0.4 mm تغییر می‌کند، دامنه جریان محورهای d و q سیم‌پیچ تعلیق افزایش می‌یابد تا نیروی شعاعی تولید شده بتواند روتور را در راستای محور افقی در موقیت جدید قرار دهد. اما تغییر دامنه جریان‌ها منجر به تغییر موقعیت روتور در راستای محور عمودی نیز می‌شود. با استفاده از دو کنترل کننده PI در مسیر جریان‌های دو محوری سیم‌پیچ تعلیق مغناطیسی و کنترل این جریان‌ها به‌صورت حلقه بسته می‌توان این مشکل را برطرف نموده و خطای مؤلفه‌های جابه‌جایی شعاعی روتور را کاهش داد. شکل ۱۳ جایگزین جعبه A (نشان داده شده با خط چین) در شکل ۴ شده و بلوک دیاگرام اصلاح شده سیستم کنترل BPMSM به‌دست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی بر اساس این بلوک دیاگرام نیز در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود هرگاه یکی از مؤلفه‌های جابه‌جایی شعاعی x یا y به‌طور ناگهانی تغییر کنند، هر دو مؤلفه جابه‌جایی پس از این تغییر مقادیر مرجع خود را دنبال می‌کنند.

افزایش جابه‌جایی روتور نیز به‌نوبه خود باعث افزایش گشتاور می‌شود. نویسندگان هیچ راه‌حلی برای برطرف نمودن این مشکل ارائه نکرده‌اند.

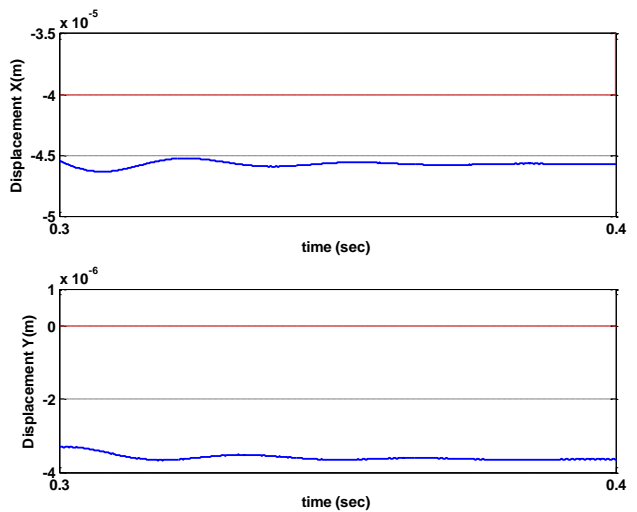


شکل ۸: فاصله زمانی بین $0.3/0.4$ تا $0.4/0.4$ ثانیه از منحنی‌های شکل ۸

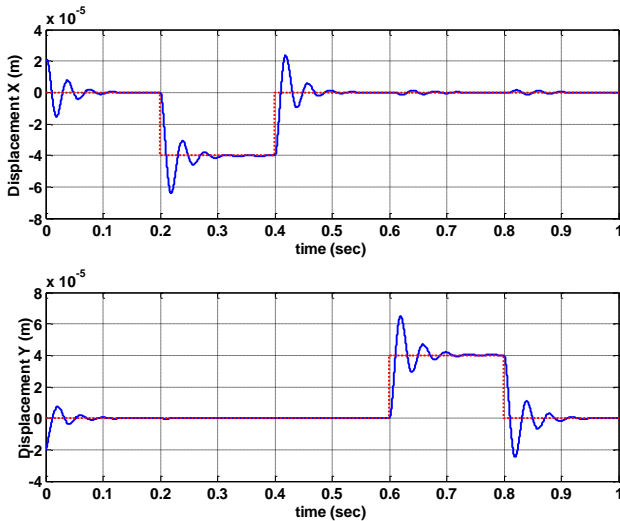


شکل ۹: منحنی‌های پاسخ سیستم کنترل BPMSM بر اساس مدل

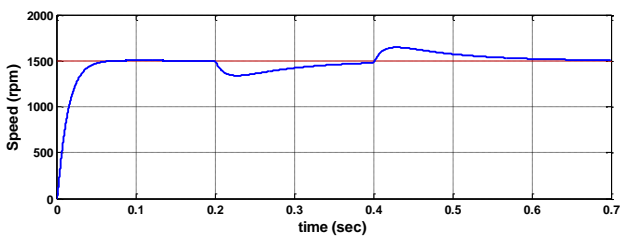
$$M' = 1/288 \text{ H / m}$$



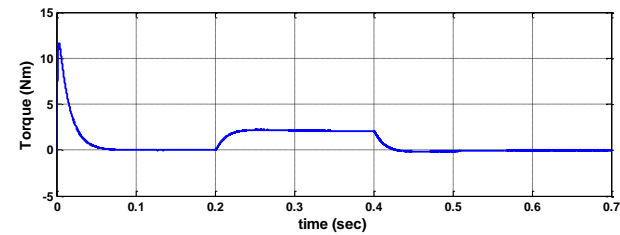
شکل ۱۰: فاصله زمانی بین $0.3/0.4$ تا $0.4/0.4$ ثانیه از منحنی‌های شکل ۱۰



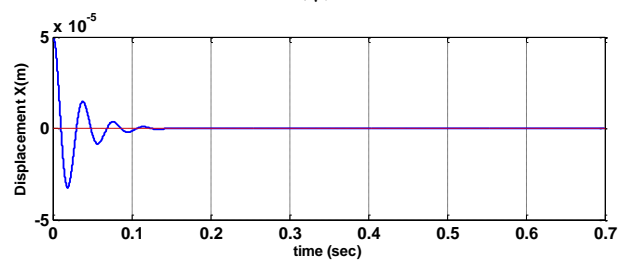
شکل ۱۵: منحنی‌های پاسخ سیستم کنترل اصلاح شده *BPMSM* با $M' = 1/288 \text{ H/m}$



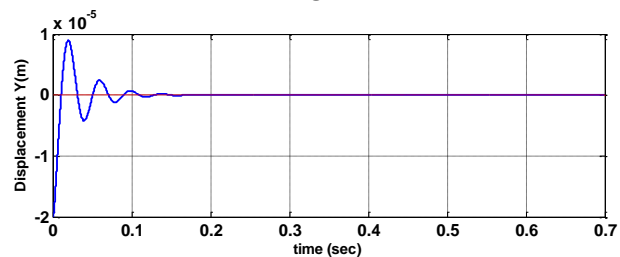
(الف)



(ب)

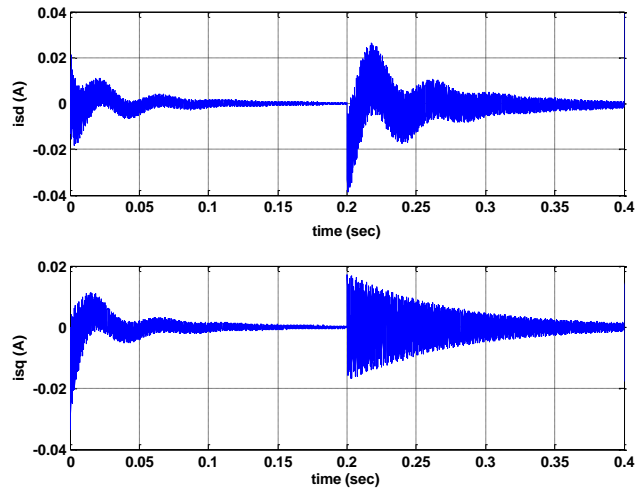


(ج)

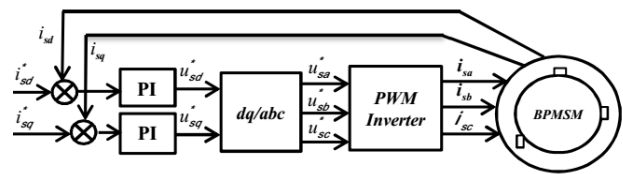


(د)

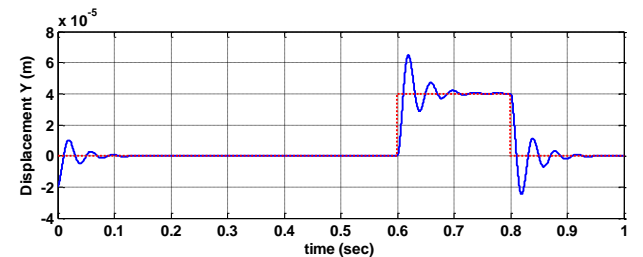
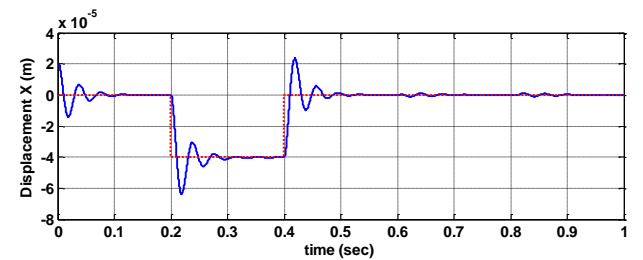
شکل ۱۶: منحنی‌های پاسخ سیستم کنترل اصلاح شده *BPMSM* با تغییر ناگهانی گشتاور بار



شکل ۱۷: منحنی‌های جریان دو محور *d* و *q* سیم پیچ تعلیق *BPMSM* بر اساس مدل ریاضی کامل موتور



شکل ۱۸: بلوک جایگزین جعبه *A* در شکل ۴



شکل ۱۹: منحنی‌های پاسخ سیستم کنترل اصلاح شده *BPMSM* با $M' = 0.644 \text{ H/m}$

در شکل ۱۶ تغییر پله‌ای گشتاور بار نشان داده شده است. گشتاور بار در لحظه 0.2 ثانیه به طور ناگهانی از صفر به 2 Nm تغییر می‌کند و در زمان 0.4 ثانیه دوباره صفر می‌شود. با تغییر گشتاور بار، مؤلفه‌های جابه‌جایی شعاعی روتور تغییری نکرده و به نوسان خود حول نقطه تعادل روتور ادامه می‌دهند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با پیاده‌سازی بلوک دیاگرام کنترلی نشان داده شده در شکل ۱۳، سیستم تعلیق موتور در برابر تغییرات ناگهانی نیروهای شعاعی وارد بر محور یا تغییر ناگهانی گشتاور بار از عملکرد مطلوبی برخوردار خواهد بود.

۵- نتیجه

در موتور سنکرون آهن ربای دائم بدون یاتاقان هر دو سیم پیچ موتور در شیارهای استاتور جاسازی می شوند لذا با خارج شدن روتور از مرکز استاتور بین گشتاور و نیروی تعلیق مغناطیسی تزویج به وجود می آید. از طرفی رابطه نیروی تعلیق مغناطیسی نشان می دهد که بین مؤلفه های جابه جایی شعاعی روتور نیز تزویج وجود دارد. در این مقاله عملکرد *BPMSM* بر اساس مدل ریاضی ساده شده و مدل ریاضی کامل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد که اگر کنترل کننده ها بر اساس مدل ریاضی ساده شده طراحی شده و سپس این کنترل کننده ها برای مدل ریاضی کامل (که نشان دهنده مدل واقعی تر موتور است) استفاده شوند، خطای آشکاری در مؤلفه های جابه جایی شعاعی روتور در لحظه تغییر ناگهانی سیگنال های مرجع این مؤلفه ها مشاهده می شود. بنابراین اگر کنترل کننده بدون در نظر گرفتن تزویج بین سیم پیچ های گشتاور و تعلیق مغناطیسی طراحی شود، در عمل دستیابی به نتایج مطلوب و رضایت بخش غیرممکن خواهد بود. در ادامه نشان داده شد که با اصلاح سیستم کنترل موتور می توان ضمن در نظر گرفتن تزویج بین دو سیم پیچ، به نتایج مورد نظر دست یافت. نتایج شبیه سازی نشان داد که با کنترل حلقه بسته جریان های دو محوری سیم پیچ تعلیق مغناطیسی، موتور در برابر اختلال هایی مانند تغییر ناگهانی سیگنال های مرجع مؤلفه های جابه جایی شعاعی روتور و یا تغییر ناگهانی گشتاور بار از عملکرد مطلوبی برخوردار است.

مراجع

- pharmaceutical mixing,” *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 5, pp. 2236-2247, May 2012.
- [8] T. Schneider, J. Petersen and A. Binder, “Influence of pole pair combinations on high-speed bearingless permanent magnet motor performance,” *The 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, pp. 707-711, April 2008.
- [9] M. Ooshima, S. Miyazawa, T. Deido, A. Chiba, F. Nakamura and T. Fukao, “Characteristics of a permanent magnet type bearingless motor,” *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 32, no. 2, pp. 363-370, March-April 1996.
- [10] X. Sun, H. Zhu and T. Zhang, “Sliding mode variable structure control for radial suspension forces of bearingless permanent magnet synchronous motor based on inverse system method,” *IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 1844-1847, May 2009.
- [11] H. Grabner, W. Amrhein, S. Silber and W. Gruber, “Nonlinear feedback control of a bearingless brushless DC motor,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 15, no. 1, pp. 40-47, February 2010.
- [12] K. Inagaki, A. Chiba, M. A. Rahman and T. Fukao, “Performance characteristics of inset-type permanent magnet bearingless motor drives,” *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 1, pp. 202-207, January 2000.
- [13] M. Ooshima, A. Chiba, A. Rahman and T. Fukao, “An improved control method of buried-type IPM bearingless motors considering magnetic saturation and magnetic pull variation,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 3, pp. 569-575, September 2004.
- [14] P. Li, X. Yan and J. Liu, “PDF control of bearingless permanent magnet synchronous motors based on inverse system method,” *IEEE International conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*, vol. 3, pp. 177-182, August 2010.
- [15] X. sun, L. Chen, Z. yang and H. Zhu, “Speed sensorless vector control of a bearingless induction motor with artificial neural network inverse speed observer,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 4, pp. 1357-1386, August 2013.
- [16] S. Zhang and F.L. Luo, “Direct control of radial displacement for bearingless permanent magnet type synchronous motor,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 2, pp. 542-552, February 2009.
- [۱۷] سارا صابریان بروجنی و غلامرضا عرب مارکده، «کنترل سرعت و شار موتور سنکرون رلوکتانسی با استفاده از کنترل لغزشی مرتبه دوم به روش فوق پیشگی و قانون توصیفی تغییرات»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۵، شماره ۲، صفحه ۸۵-۹۷، ۱۳۹۴.
- [18] X. Dai, D. He and T. Zhang, “MIMO system invisibility and decoupling control strategies based on ANN α -order inversion,” *IEEE Proceedings- Control Theory and Applications*, vol. 148, no. 2, pp. 125-136, March 2001.
- [19] J. Fang and Y. Ren, “Decoupling control of magnetically suspended rotor system in control moment gyros based on an inverse system method,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 17, no. 6, pp. 1133-1144, December 2012.
- [۲۰] محسن کربعلی زاده، نویدرضا ابجدی، غلامرضا عرب مارکده و جعفر سلطانی، «کنترل تطبیقی با خطی سازی فیدبک ورودی-خروجی یک مبدل تشدید سری-موازی dc-dc»، *مجله*
- [1] T. Schuhmann, W. Hofmann and R. Werner, “Improving operational performance of active magnetic bearings using Kalman filter and state feedback control,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 821-829, February 2012.
- [2] X. Sun, L. Chen and Z. Yang, “Overview of bearingless permanent magnet synchronous motors,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 12, pp. 5528-5538, December 2013.
- [3] A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa, M. Ooshima, M. Takemoto and D. Dorrell, *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*, Newnes Press (An imprint of Elsevier), UK, May 2005.
- [4] T. Reichert, T. Nussbaumer and J. Kolar, “Bearingless 300 W PMSM for bioreactor mixing,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 3, pp.1376-1388, March 2012.
- [5] J. Asama, Y. Hamasaki, T. Oiwa and A. Chiba, “Proposal and analysis of a novel single drive bearingless motor,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 129-138, January 2013.
- [6] X. Wang, Q. Zhong, Z. Deng and S. Yue, “Current controlled multiphase slice permanent magnetic bearingless motors with open circuited phases: Fault tolerant controllability and its verification,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 5, pp. 2059-2072, May 2012.
- [7] B. Warberger, R. Kaelin, T. Nussbaumer and J.W. Kolar, “50Nm/2500W bearingless motor for high purity

- [23] Y. Zhou, Y. He and H. Nian, "The integrated mathematic model of a permanent magnet type bearingless motor," *IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems*, vol. 2, pp. 898–902, September 2005.
- [24] W. Amrhein, S. Silber and K. Nenninger, "Levitation forces in bearingless permanent magnet motors," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, no. 5, pp. 4052–4054, September 1999.
- [25] H. Zhu and H. Li, "Magnetic field equivalent current analysis-based radial force control for bearingless permanent magnet synchronous motors," *Energies*, vol. 8, no. 6, pp. 4920-4942, May 2015.
- مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۴، شماره ۱، صفحه ۴۲-۳۳، ۱۳۹۳.
- [21] X. Sun, L. Chen, H. Jiang and Z. Yang, "High-performance control for a bearingless permanent magnet synchronous motor using neural network inverse system scheme plus internal model controllers," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 6, pp. 3479-3488, June 2016.
- [22] W.S. Bu, C.L. Zhu and C.X. Lu, "Inverse system analysis and modeling of bearingless induction motor and its combined control strategy," Hindawi Publication Corporation, *Mathematical Problems in Engineering*, volume 2014, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/698171>.

زیر نویس ها

¹ Bearingless Permanent Magnet Synchronous Motor(BPMSM)

² Decoupling control

³ Inverse system method

⁴ Unilateral magnetic pull