

بررسی تأثیر تزویج سیم‌پیچ‌های گشتاور و تعلیق بر عملکرد سامانه کنترل تعلیق مغناطیسی *BPMSM*

مهرداد جعفربلند^{۱*}، علی شیرزادی^۲

۱- دانشیار، ۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و اویونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

(دریافت: ۹۵/۰۱/۲۳، پذیرش: ۹۵/۱۰/۰۵)

چکیده: در موتور سنکرون آهنربای دائم بدون یاتاقان، سیم‌پیچ‌های گشتاور و تعلیق مغناطیسی به‌طور مشترک در شیارهای استاتور قرار دارند. زمانی که رتور در مرکز استاتور نباشد بین دو سیم‌پیچ تزویج ایجاد می‌شود. در اغلب تحقیقاتی که پیرامون کنترل‌کننده این موتور گزارش شده از تزویج بین سیم‌پیچ‌ها صرف‌نظر شده است. در این مقاله اثر تزویج بین این دو سیم‌پیچ بر عملکرد سامانه کنترل تعلیق مغناطیسی بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد تزویج بین دو سیم‌پیچ قابل چشم‌پوشی نیست و اختلال‌هایی نظیر تغییر ناگهانی سیگنال‌های مرجع مؤلفه‌های جابجایی شعاعی رتور و نیروهای شعاعی خارجی وارد بر محور موتور می‌توانند نقطه تعادل رتور را جابجا نمایند. همچنین در این مقاله کنترل‌کننده مناسبی جهت دست‌یابی به عملکرد مطلوب موتور در برابر تغییر ناگهانی سیگنال‌های مرجع مؤلفه‌های جابجایی شعاعی رتور با لحاظ تزویج سیم‌پیچ‌ها طراحی شده است. نتایج شبیه‌سازی ضرورت مدل‌سازی اثر تزویج و صحت روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: موتور سنکرون آهنربای دائم بدون یاتاقان، سیم‌پیچ گشتاور، سیم‌پیچ تعلیق مغناطیسی، تزویج، مدل ریاضی.

۱- مقدمه

سامانه موتور و یاتاقان مغناطیسی ساده‌تر و فشرده‌تر بوده و هزینه ساخت کمتری دارد [۶-۷].

موتور سنکرون آهنربای دائم بدون یاتاقان (*BPMSM*)^۱ در بین انواع موتورهای بدون یاتاقان به دلیل ساختار ساده، عملکرد قابل اطمینان، بازده زیاد، چگالی گشتاور و توان زیاد و هزینه مناسب از اهمیت بیشتری برخوردار است [۸-۹]. ایجاد تحول در ساختار موتور و روش‌های کنترلی، روزه‌روز بر جذابیت *BPMSM* می‌افزاید. این موتورها نشان داده‌اند که از پتانسیل خوبی برای استفاده در ماشین‌های سانتریفیوژ، پمپ‌های توربوملکولی، کمپرسورها، چرخ‌های طیار ذخیره انرژی و فرآیندهای مکانیکی دقیق با سرعت زیاد برخوردارند. این موتور در دهه ۹۰ معرفی شده و تاکنون اکثر فعالیت‌ها در مرحله تحقیقاتی است. البته نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی و موارد نادر صنعتی نیز گزارش شده‌اند.

برای این که بتوان کنترل‌کننده‌ای مناسب برای *BPMSM* طراحی کرده و از عملکرد پایدار سامانه تعلیق آن اطمینان حاصل نمود، بایستی مدل ریاضی با دقت کافی موتور را به دست آورده و

یاتاقان مغناطیسی ماشینی است که از نیروی تعلیق مغناطیسی برای معلق کردن رتور بدون هیچ‌گونه تماس مکانیکی استفاده می‌کند. عدم اصطکاک و فرسایش و بی‌نیازی به روغن‌کاری و آب‌بندی، همچنین سرعت، دقت و طول عمر زیاد از ویژگی‌های بارز یاتاقان مغناطیسی است [۱-۲]. این ویژگی‌ها باعث شده تا یاتاقان‌های مغناطیسی در درایوهای با سرعت زیاد، پمپ‌های توربوملکولی، قلب‌های مصنوعی، سانتریفیوژها و دستگاه‌های ذخیره انرژی چرخ طیار مورد استفاده قرار گیرند [۳]. برای این که شافت رتور بچرخد، باید یک موتور الکتریکی در سامانه یاتاقان مغناطیسی نصب شود. در این صورت طول محوری شافت رتور و ابعاد مجموعه بزرگ‌تر شده و ساختار سامانه پیچیده می‌شود. یکی از راه‌حل‌های رفع این مشکل، استفاده از موتورهای بدون یاتاقان است. در این موتور هر دو عملکرد تولید گشتاور و تعلیق مغناطیسی به‌طور هم‌زمان وجود دارد [۴-۵]. برای تولید هم‌زمان گشتاور و نیروی تعلیق شعاعی، یک سیم‌پیچ اضافی به نام سیم‌پیچ نیروی تعلیق همراه با سیم‌پیچ گشتاور موتور بر روی استاتور پیچیده می‌شوند. ساختار موتور بدون یاتاقان در مقایسه با

$$P_1 = P_2 \pm 1, \quad \omega_1 = \omega_2 \quad (1)$$

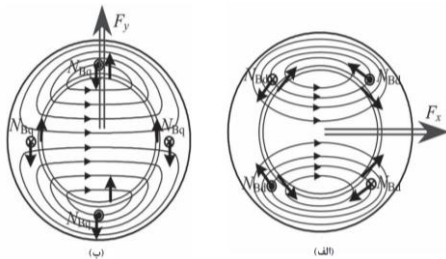
در اینجا P_1 و ω_1 به ترتیب تعداد جفت قطب‌ها و فرکانس جریان سیم‌پیچ گشتاور همچنین P_2 و ω_2 به ترتیب تعداد جفت قطب‌ها و فرکانس جریان سیم‌پیچ نیروی تعلیق مغناطیسی است.

وقتی دو مجموعه سیم‌پیچ با جریان‌های سینوسی سه فاز تغذیه می‌شوند، بر اساس تئوری میدان الکترومغناطیسی، دو نوع نیرو به نام نیروی لورنتس و نیروی ماکسول در موتور وجود دارد. در موتور سنکرون آهنربای دائم نیروی لورنتس گشتاور الکترومغناطیسی تولید می‌کند. همچنین می‌تواند نیروی تعلیق شعاعی نیز تولید نماید. شکل (۱) اصول تولید نیروی تعلیق شعاعی لورنتس در $BPMSM$ را در راستای x و y نشان می‌دهد. شارهای دوقطبی توسط سیم‌پیچ گشتاور تولید می‌شوند. سیم‌پیچ‌های N_{Bq} و N_{Bd} سیم‌پیچ‌های نیروی تعلیق در مختصات $d-q$ می‌باشند. در شکل (۱-الف) سیم‌پیچ‌های N_{Bd} در معرض نیروی لورنتس می‌باشند که جهت آن‌ها در استاتور مطابق با قانون دست چپ نشان داده شده است. همچنین نیروهای مخالف در رتور بر اساس قانون سوم نیوتن ظاهر می‌شوند که منتهی به این نیروها در همان شکل در راستای محور x نشان داده شده است. به‌طور مشابه و مطابق با آنچه شکل (۱-ب) نشان داده مشخص است نیروی منتجه در راستای محور y نیز می‌تواند تولید شود.

نیروی ماکسول یا نیروی مقاومت مغناطیسی در مدارهای مغناطیسی در سطوح مرزی مواد با ضریب نفوذپذیری مغناطیسی متفاوت مانند هوا و هسته وجود دارد. رابطه جزء نیروی ماکسول را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$dF = (B^2/2\mu_0)ds \quad (2)$$

که B چگالی شار فاصله هوایی، μ_0 ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلأ و ds جزء سطح بینهایت کوچک رتور است. مطابق رابطه (۲) نیروی ماکسول با توان دوم چگالی شار متناسب است. نیروی ماکسول شامل دو بخش نیروی مغناطیسی یک جهته^۱ و نیروی مغناطیسی قابل کنترل^۲ [۲] است.



شکل (۱): اصول تولید نیروهای تعلیق شعاعی لورنتس، الف) جهت x ، ب) جهت y

کنترل‌کننده را بر اساس آن طراحی نمود. در مدل ریاضی که در بیشتر مراجع استفاده شده گشتاور و تعلیق مغناطیسی به‌عنوان دو زیرسامانه جداگانه در نظر گرفته شده‌اند و از تزویج الکترومغناطیسی بین دو سیم‌پیچ گشتاور و تعلیق صرف‌نظر شده است. به همین دلیل کنترل گشتاور و تعلیق مغناطیسی به‌صورت مجزای از هم انجام می‌شود [۱۹-۱۰]. در عمل به دلیل این‌که دو مجموعه سیم‌پیچ در یک هسته قرار دارند، بین آن‌ها تزویج وجود دارد. در مرجع [۲۰] مدل ریاضی $BPMSM$ با در نظر گرفتن تزویج بین دو سیم‌پیچ استخراج شده و مدل ریاضی مجتمع نامیده شده است. مدل ریاضی مجتمع نشان می‌دهد که $BPMSM$ یک سامانه چند متغیره، غیرخطی و بشدت تزویج شده است.

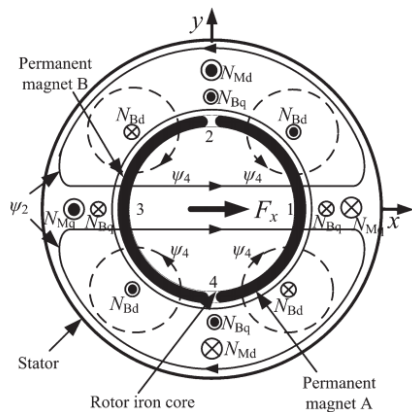
در این مقاله از عبارت «مدل ریاضی ساده‌شده» برای مدلی استفاده می‌شود که در آن از تزویج بین دو سیم‌پیچ صرف‌نظر شده و عبارت «مدل ریاضی کامل» برای مدلی به کار می‌رود که در آن تزویج بین سیم‌پیچ‌ها در نظر گرفته شده است. هدف از انجام این تحقیق یافتن جواب این سؤال است که آیا استفاده از مدل ریاضی ساده‌شده برای طراحی سامانه کنترل از دقت کافی برخوردار است یا به‌ناچار باید از مدل ریاضی کامل موتور استفاده نمود؟ با توجه به پیچیدگی مدل ریاضی کامل، طراحی کنترل‌کننده‌های پیشرفته بر اساس این مدل نسبت به مدل ساده‌شده مشکل‌تر است. در صورتی‌که بتوان از تزویج بین دو سیم‌پیچ چشم‌پوشی نمود، طراحی روش‌های کنترلی پیشرفته مانند کنترل مد لغزشی و ... برای این موتور ساده‌تر خواهد شد. همه این‌ها مستلزم آن است که نقش و تأثیر تزویج بین دو سیم‌پیچ بر عملکرد سامانه کنترل تعلیق مغناطیسی بررسی شود. به همین منظور در این مقاله، کنترل سرعت و جابجایی شعاعی رتور با استفاده از هر دو مدل ریاضی ساده‌شده و کامل موتور انجام می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها، سیگنال‌های مرجع مؤلفه‌های جابجایی شعاعی رتور و نیروهای شعاعی خارجی وارد بر رتور به‌طور ناگهانی تغییر داده می‌شوند و سپس رفتار سامانه تعلیق مغناطیسی بر اساس دو مدل فوق مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان خواهد داد که تزویج بین دو سیم‌پیچ بخشی از دینامیک تأثیرگذار سامانه است و کنترل‌کننده-ای که با صرف‌نظر کردن از تزویج طراحی شود، قطعاً در عمل با مشکل مواجه شده و رفتار مطلوبی نخواهد داشت.

۲- اصول عملکرد موتور سنکرون آهنربای دائم

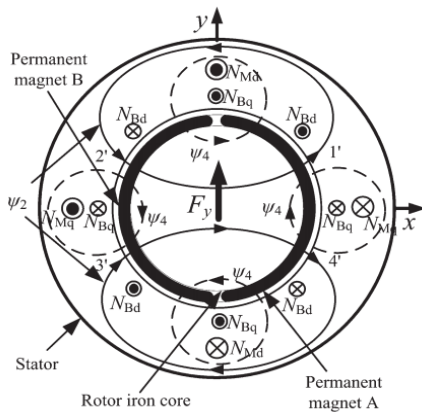
بدون یاتاقان

دو مجموعه سیم‌پیچ در شیارهای استاتور موتور بدون یاتاقان وجود دارد که شامل سیم‌پیچ گشتاور و سیم‌پیچ تعلیق مغناطیسی است. به شرط تحقق رابطه زیر، می‌توان در $BPMSM$ نیروی تعلیق شعاعی قابل کنترل تولید نمود [۲]:

1. Unilateral magnetic force
2. Controllable magnetic force



(الف)



(ب)

شکل (۳): اصول تولید نیروی مغناطیسی قابل کنترل، الف) نیروی

تعلیق شعاعی F_x ، ب) نیروی تعلیق شعاعی F_y

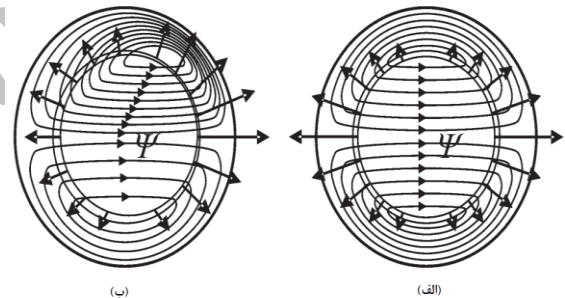
۳- مدل ریاضی BPMSM

هدف از تحقیق درباره مدل ریاضی به دست آوردن روابط ریاضی دقیق برای گشتاور الکترومغناطیسی و نیروی تعلیق شعاعی به منظور تحقق پایداری سامانه تعلیق مغناطیسی BPMSM است. روش‌های مختلفی برای استخراج روابط ریاضی گشتاور و نیروی تعلیق شعاعی وجود دارد. در روشی موسوم به روش جابجایی مجازی^۱، ابتدا ماتریس اندوکتانس دو مجموعه سیم پیچ مطابق با اصل مدار معادل مغناطیسی استخراج می‌شود و سپس رابطه انرژی مغناطیسی بر اساس ماتریس اندوکتانس به دست می‌آید. در نهایت، رابطه گشتاور الکترومغناطیسی و نیروی تعلیق شعاعی به صورت زیر حاصل می‌شود [۳]:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial W_m}{\partial x} \\ \frac{\partial W_m}{\partial y} \\ \frac{\partial W_m}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(۱) نیروی مغناطیسی یک جهته: اگر رتور به صورتی که در شکل (۲-الف) نشان داده شده در مرکز استاتور قرار گیرد و توزیع شار مغناطیسی متقارن باشد، نیروی ماکسول صفر است. اما اگر رتور از مرکز استاتور منحرف شود، تقارن توزیع شار در فاصله هوایی شکسته می‌شود. پس بر اساس تئوری میدان الکترومغناطیسی، نیروی ماکسول مطابق با شکل (۲-ب) تولید می‌شود که جهت آن همان جهت خروج رتور از مرکز است. این نیرو، نیروی مغناطیسی یک جهته نامیده می‌شود و با وجود آن خروج رتور از مرکز افزایش می‌یابد.

(۲) نیروی مغناطیسی قابل کنترل: اگر رتور در مرکز استاتور قرار گرفته باشد و سیم پیچ نیروی تعلیق تحریک شود، تعادل میدان مغناطیسی سیم پیچ گشتاور توسط شار جریان سیم پیچ تعلیق از بین می‌رود و توزیع شار در فاصله هوایی نامتقارن می‌شود. شکل (۳) اصول تولید نیروی مغناطیسی قابل کنترل را نشان می‌دهد. وقتی رتور در مرکز قرار گرفته است، شار دو قطب متقارن ψ_2 توسط آهنرباها تولید می‌شود.



شکل (۲): نیروی ماکسول، الف) بدون خروج رتور از مرکز، ب) خروج رتور از مرکز

هنگامی که موتور به صورت بی‌بار راه‌اندازی شود، شار دو قطب تولید شده به وسیله جریان‌های سیم پیچ گشتاور N_{Mq} و N_{Md} به قدری کوچک است که می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. مطابق با شکل (۳-الف) اگر سیم پیچ تعلیق N_{Bd} با جریان i_{Bd} تحریک شود، شار سیم پیچ تعلیق چهار قطب ψ_4 تولید می‌شود. در نتیجه چگالی شار در فاصله هوایی ناحیه ۱ افزایش و در فاصله هوایی ناحیه ۳ کاهش می‌یابد. پس همان‌طور که در شکل (۳-الف) نشان داده شده، نیروی تعلیق شعاعی F_x در جهت مثبت محور x تولید می‌شود. البته با جریان منفی i_{Bd} می‌توان یک نیروی تعلیق شعاعی در جهت منفی محور x تولید نمود. همچنین نیروی تعلیق شعاعی F_y در محور y را می‌توان با جریان i_{Bq} در سیم پیچ تعلیق N_{Bq} تولید نمود (شکل ۳-ب). به این طریق نیروی تعلیق شعاعی F را می‌توان در هر جهت دلخواه از جمع برداری F_x و F_y تولید نمود.

اندوکتانس مقداری مخالف صفر خواهد داشت و بین دو سیم پیچ تزویج ایجاد می‌شود. همچنین اندوکتانس متقابل بین دو سیم پیچ با جابجایی رتور تغییر می‌کند. در این قسمت مدل ریاضی کامل BPMSM با در نظر گرفتن تزویج بین دو سیم پیچ ارائه می‌شود. در این تحلیل، فرضیه‌های زیر جهت سادگی در نظر گرفته خواهد شد [۲۰]:

(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:

$$\begin{bmatrix} \psi_{md} \\ \psi_{mq} \\ \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_m & 0 & M'x & -M'y \\ 0 & L_m & M'y & M'x \\ M'x & M'y & L_s & 0 \\ -M'y & M'x & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{pm} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

در اینجا، L اندوکتانس سیم پیچ استاتور هر فاز، M' تغییرات اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ گشتاور و تعلیق مغناطیسی نسبت به جابجایی رتور، i مقدار لحظه‌ای جریان سیم پیچ استاتور، ψ_m و ψ_s شار سیم پیچ‌های استاتور، ψ_{pm} شار آهنربای دائم و زیر نویس‌های m و s به ترتیب مربوط به سیم پیچ گشتاور و تعلیق مغناطیسی است. متغیرهای x و y نیز جابجایی شعاعی رتور در راستای محورهای d و q می‌باشند. معادله ولتاژ را می‌توان به صورت رابطه (۷) بیان نمود:

$$\begin{bmatrix} u_{md} \\ u_{mq} \\ u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{md} \\ \psi_{mq} \\ \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} -\psi_{mq} \\ \psi_{md} \\ -\psi_{sq} \\ \psi_{sd} \end{bmatrix} \quad (7)$$

که در آن، u مقدار لحظه‌ای ولتاژ سیم پیچ‌های استاتور و R مقاومت هر فاز سیم پیچ‌های استاتور است. با استفاده از روابط (۶) و (۷) معادله ولتاژ به صورت رابطه (۸) بازنویسی می‌شود و معادلات دیفرانسیل جریان سیم پیچ‌های استاتور را می‌توان به صورت معادله (۹) بیان نمود.

در اینجا، W_m انرژی الکترومغناطیسی، x و y جابجایی شعاعی در راستای محورهای x و y و θ موقعیت زاویه‌ای می‌باشند.

روش تنسور تنش ماکسول^۱ روش دیگر برای محاسبه گشتاور الکترومغناطیسی و نیروهای تعلیق شعاعی است. در این روش با انتگرال گیری از توزیع جریان $A(\theta)$ و مؤلفه عمودی چگالی شار $B_n(\theta)$ نیروهای تعلیق شعاعی و گشتاور الکترومغناطیسی به دست می‌آیند و معادلات آن‌ها را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۷]:

$$F = r l \int_0^{2\pi} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{B_n^2(\theta)}{2\mu_0} \\ A(\theta) B_n(\theta) \end{bmatrix} d\theta \quad (4)$$

$$T = r^2 l \int_0^{2\pi} A(\theta) B_n(\theta) d\theta \quad (5)$$

که l طول هسته آهنی رتور و r شعاع سطح داخلی استاتور است. این دو روش در حال حاضر اصلی‌ترین روش‌های استنباط نیروهای تعلیق شعاعی و گشتاور الکترومغناطیسی در موتور بدون یاناقان می‌باشند.

مدل ریاضی BPMSM با آهنربای سطحی، حالت‌های فرورفته و داخلی به ترتیب در مراجع [۱۲، ۹] و [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل‌های ریاضی با شرط این که رتور در مرکز استاتور قرار گرفته باشد، به دست آمده‌اند. اما به دلیل خطاهای آشکار در فرآیند ساخت ماشین و نصب سنسورها همچنین اغتشاش‌های بار در حین کارکرد ماشین، خروج رتور از مرکز اجتناب‌ناپذیر است لذا تحلیل و محاسبه نیروی تعلیق شعاعی و گشتاور الکترومغناطیسی پیچیده خواهد شد. مدل ریاضی دقیق‌تر BPMSM با استفاده از روش جابجایی مجازی در مرجع [۲۰] به دست آمده و پارامترهای اصلی مربوط به مدل جدید با تحلیل اجزاء محدود تعیین شده‌اند. چون در مدل ریاضی پیشنهادی تزویج الکترومغناطیسی غیرخطی بین دو مجموعه سیم پیچ و همچنین خروج رتور از مرکز در نظر گرفته شده است این مدل می‌تواند با دقت زیادی عملکرد BPMSM را شبیه‌سازی نماید.

۳-۱- مدل ریاضی کامل BPMSM

در حالتی که رتور 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 رتور از مرکز استاتور، این

1-Maxwell stress tensor

$$\begin{bmatrix} u_{md} \\ u_{mq} \\ u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 & Mx & -My \\ 0 & L_m & My & Mx \\ Mx & My & L_s & 0 \\ -My & Mx & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + M' \begin{bmatrix} i_{sd} & -i_{sq} \\ i_{sq} & i_{sd} \\ i_{md} & i_{mq} \\ i_{mq} & -i_{md} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} -L_m i_{mq} - M y i_{sd} - M x i_{sq} \\ L_m i_{md} + M x i_{sd} - M y i_{sq} + \psi_{pm} \\ -L_s i_{sq} + M y i_{md} - M x i_{mq} \\ L_s i_{sd} + M x i_{md} + M y i_{mq} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_m}{L_m} & \omega & \frac{R_s M x}{L_m L_s} & -\frac{R_s M y}{L_m L_s} \\ -\omega & -\frac{R_m}{L_m} & \frac{R_s M y}{L_m L_s} & \frac{R_s M x}{L_m L_s} \\ \frac{R_m M x}{L_m L_s} & \frac{R_m M y}{L_m L_s} & -\frac{R_s}{L_s} & \omega \\ -\frac{R_m M y}{L_m L_s} & \frac{R_m M x}{L_m L_s} & -\omega & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{M i_{sd}}{L_m} & \frac{M i_{sq}}{L_m} \\ -\frac{M i_{sq}}{L_m} & -\frac{M i_{sd}}{L_m} \\ \frac{M i_{md}}{L_s} & -\frac{M i_{mq}}{L_s} \\ -\frac{M i_{mq}}{L_s} & \frac{M i_{md}}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{bmatrix} \quad (9)$$

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

در رابطه (۱۲)، ω_m سرعت زاویه‌ای مکانیکی رتور است. با توجه به این که $P_2 = P_1 \pm 1$ است رابطه (۱۲) را می‌توان به صورت زیر ساده نمود:

$$T_e = \frac{3}{2} P_1 \psi_{pm} i_{mq} + \frac{3}{2} M x (i_{mq} i_{sd} - i_{md} i_{sq}) - \frac{3}{2} M y (i_{md} i_{sd} + i_{mq} i_{sq}) \quad (13)$$

در سمت راست رابطه (۱۳) از سمت راست، جمله اول معادله گشتاور الکترومغناطیسی ماشین سنکرون آهنربای دائم است که از عکس‌العمل جریان سیم‌پیچ گشتاور و شار آهنربای دائم به وجود می‌آید. دو جمله بعدی از عکس‌العمل بین میدان سیم‌پیچ گشتاور و میدان سیم‌پیچ نیروی تعلیق ناشی شده و به جابجایی رتور در راستای x و y وابسته می‌باشند. معادله حرکت را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\left(\frac{1}{P_1} \right) J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_l \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{P_1}{J} \right) (T_e - T_l) \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، T_l گشتاور بار و J ممان اینرسی رتور است. با جایگذاری رابطه (۱۳) در رابطه (۱۴) خواهیم داشت:

$$\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{P_1^2}{J} \right) \psi_{pm} i_{mq} + \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{P_1}{J} \right) M x (i_{mq} i_{sd} - i_{md} i_{sq}) - \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{P_1}{J} \right) M y (i_{md} i_{sd} + i_{mq} i_{sq}) - \left(\frac{P_1}{J} \right) T_l \quad (15)$$

معادله نیروی تعلیق مغناطیسی موتور سنکرون آهنربای دائم

توان لحظه‌ای موتور عبارت است از:

$$P_{in} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} i_{md} & i_{mq} & i_{sd} & i_{sq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{md} \\ u_{mq} \\ u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} (R_m i_{md}^2 + R_m i_{mq}^2 + R_s i_{sd}^2 + R_s i_{sq}^2) + \frac{3}{2} \left(i_{md} \frac{d\psi_{md}}{dt} + i_{mq} \frac{d\psi_{mq}}{dt} + i_{sd} \frac{d\psi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\psi_{sq}}{dt} \right) + \frac{3}{2} \omega (-i_{md} \psi_{mq} + i_{mq} \psi_{md} - i_{sd} \psi_{sq} + i_{sq} \psi_{sd}) \quad (10)$$

در طرف راست رابطه (۱۰) از سمت راست، جمله اول نشان‌دهنده تلفات اهمی سیم‌پیچ استاتور است. جمله دوم حاصل ضرب جریان در نرخ تغییر شار بوده و نشان‌دهنده نرخ تغییرات انرژی شار استاتور است و جمله سوم نیز توان الکترومغناطیسی (P_{em}) عبوری از فاصله هوایی به رتور است:

$$P_{em} = \frac{3}{2} \omega_e (-i_{md} \psi_{mq} + i_{mq} \psi_{md} - i_{sd} \psi_{sq} + i_{sq} \psi_{sd}) \quad (11)$$

گشتاور الکترومغناطیسی را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

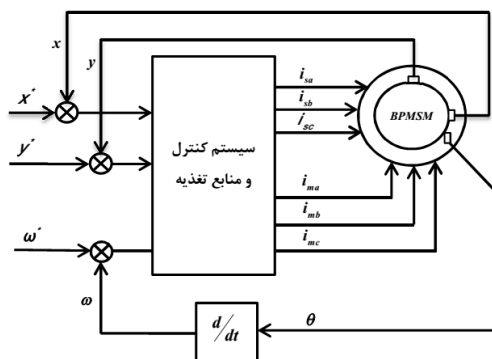
$$T_e = \frac{P_{em}}{\omega_m} = \frac{3}{2} P_1 (-i_{md} \psi_{mq} + i_{mq} \psi_{md}) + \frac{3}{2} P_2 (-i_{sd} \psi_{sq} + i_{sq} \psi_{sd}) = \frac{3}{2} P_1 \{-i_{md} (L_m i_{mq} + M y i_{sd} + M x i_{sq}) + i_{mq} (L_m i_{md} + M x i_{sd} - M y i_{sq} + \psi_{pm})\} + \frac{3}{2} P_2 \{-i_{sd} (L_s i_{sq} - M y i_{md} + M x i_{mq}) + i_{sq} (L_s i_{sd} + M x i_{md} + M y i_{mq})\} \quad (12)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی اثر تزویج بین سیم‌پیچ‌های گشتاور و نیروی تعلیق بر عملکرد سامانه کنترل تعلیق مغناطیسی، یک موتور سنکرون آهنربای دائم بدون یاتاقان چهار قطب با سیم‌پیچ تعلیق دو قطب بر اساس روش کنترلی نشان داده شده در شکل (۴) شبیه‌سازی شده است. برای کنترل سرعت موتور از روش کنترل برداری با $i_{md}^* = 0$ و در سامانه کنترل تعلیق مغناطیسی از معکوس رابطه (۱۶) برای محاسبه مؤلفه‌های دوجوری جریان مرجع سیم‌پیچ تعلیق استفاده شده است [۲ و ۲۰]. جدول (۱) پارامترهای موتور سنکرون آهنربای دائم بدون یاتاقان نمونه را نشان می‌دهد. مقدار اولیه سرعت مرجع $\omega^* = 1500 \text{ rpm}$ و مقدار اولیه جابجایی شعاعی مرجع $x^* = y^* = 0$ است و موتور بدون بار راه‌اندازی می‌شود.

جدول (۱): مشخصات BPMSM [۲۰]

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	$J (Kg.m^2)$	۱/۹۱	$R_m (\Omega)$
۰/۶۷	$m (Kg)$	۱/۸۰	$R_s (\Omega)$
۴۰۲	$K_s (N/mm)$	۰/۶۴۴	$M' (H/m)$



شکل (۴): بلوک دیاگرام سامانه کنترل BPMSM

شکل‌های (۵ و ۶) منحنی‌های پاسخ حاصل از شبیه‌سازی مدل ریاضی ساده شده موتور را نشان می‌دهند. جهت بررسی صحت روش کنترل موتور، سیگنال مرجع جابجایی شعاعی رتور در محور y به‌طور ناگهانی تغییر داده می‌شود. همچنین نیروی شعاعی F_{ext} به‌طور ناگهانی در راستای محور x به رتور وارد می‌شود. در شکل (۵-الف) منحنی پاسخ سرعت و در شکل (۵-ب) منحنی گشتاور نشان داده شده است. شکل‌های (۵-ج) و (۵-د) نیز

بدون یاتاقان را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود [۲۱]:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = M' \begin{bmatrix} i_{md} + I_f & i_{mq} \\ i_{mq} & -(i_{md} + I_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + K_s \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (16)$$

رابطه (۱۶) از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول نیروی تعلیق مغناطیسی قابل کنترل و قسمت دوم نیروی مغناطیسی یک‌جهته یا نیروی خروج از مرکز رتور است. M' همان تغییرات اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ گشتاور و تعلیق مغناطیسی نسبت به جابجایی رتور بوده و مقدار آن به پارامترهای طراحی موتور وابسته است. M' را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد [۳]:

$$M' = \frac{\mu_0 \pi n_1 n_2 l}{8} \frac{r - (l_m + l_g)}{(l_m + l_g)^2} \quad (17)$$

ضریب K_s ، ضریب نیروی کشش مغناطیسی نامیده می‌شود و رابطه بین نیروی مغناطیسی یک‌جهته و جابجایی رتور را نشان می‌دهد. رابطه بین نیروی مغناطیسی یک‌جهته و جابجایی رتور به‌صورت خطی است. بنابراین، K_s یک پارامتر ثابت است و مقدار آن را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد [۲۲]:

$$K_s = \frac{9}{2} \frac{\mu_0 l r n_1^2 k_w^2 I_m^2}{\pi p_1^2 \delta_0^3} \quad (18)$$

در روابط (۱۷) و (۱۸)، n_1 و n_2 به ترتیب تعداد دورهای سیم‌پیچ‌های گشتاور و نیروی تعلیق مغناطیسی، l طول محوری موتور، r شعاع داخلی استاتور، l_m ضخامت آهنربای دائم، l_g طول فاصله هوایی، δ_0 طول مؤثر فاصله هوایی $(l_m + l_g)$ ، k_w ضریب سیم‌پیچ گشتاور و I_m مقدار مؤثر جریان سیم‌پیچ گشتاور است.

تحت تأثیر نیروهای تعلیق مغناطیسی، جابجایی شعاعی رتور در مختصات x و y به‌صورت زیر است:

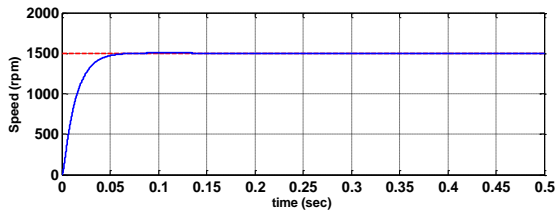
$$\begin{cases} m \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) = F_x \\ m \frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dt} \right) = F_y - mg \end{cases} \quad (19)$$

که m جرم رتور است. رابطه (۱۹) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

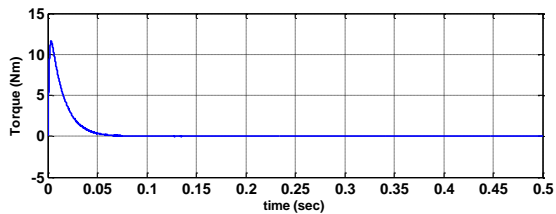
$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{F_x}{m} \\ \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{F_y}{m} - g \end{cases} \quad (20)$$

مجموع روابط (۹)، (۱۵) و (۲۰)، مدل ریاضی کامل موتور سنکرون آهنربای دائم بدون یاتاقان را تشکیل می‌دهند. در این مدل، تزویج الکترومغناطیسی بین دو سیم‌پیچ و اثر خروج از مرکز رتور به‌طور کامل در نظر گرفته شده است.

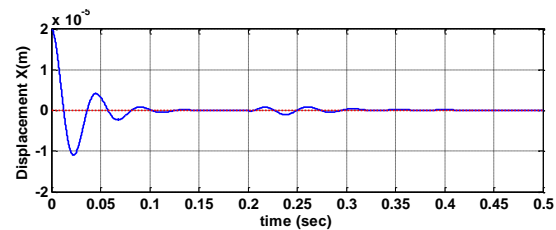
می‌شود که با اضافه نمودن اثر تزویج سیم‌پیچ‌ها که معادل جایگزینی موتور واقعی است این کنترل‌کننده ناکارآمد است.



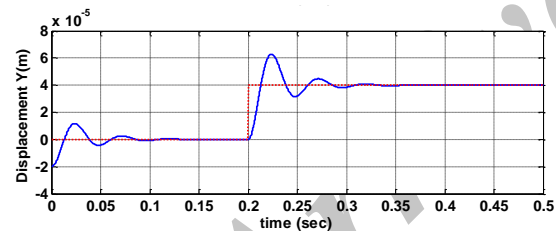
(الف)



(ب)

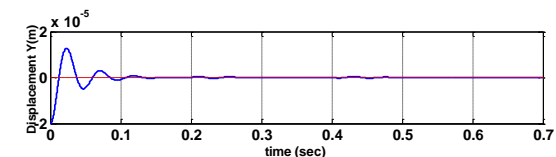
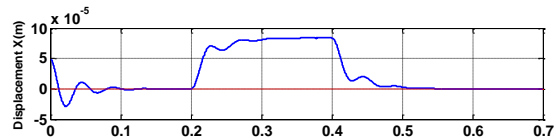
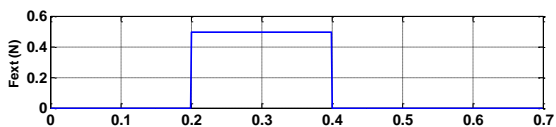


(ج)



(د)

شکل (۵): منحنی‌های پاسخ سامانه کنترل BPMSM به تغییر ناگهانی سیگنال مرجع جابجایی شعاعی بر اساس مدل ریاضی ساده شده

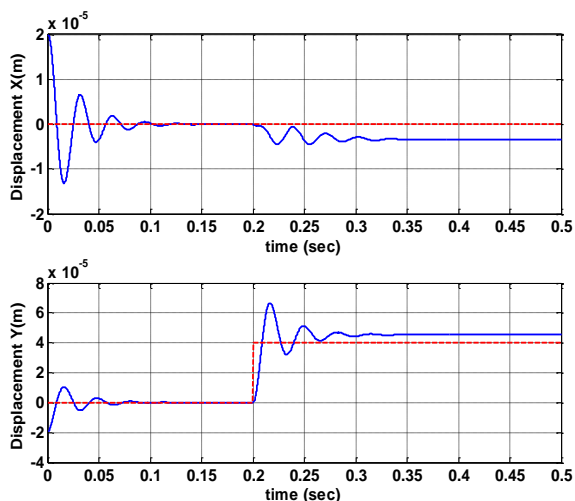


شکل (۶): منحنی‌های پاسخ سامانه کنترل BPMSM به اعمال ناگهانی نیروی شعاعی بر اساس مدل ریاضی ساده شده

منحنی‌های پاسخ مؤلفه‌های جابجایی شعاعی رتور در پاسخ به تغییر ناگهانی سیگنال مرجع جابجایی شعاعی رتور در محور y را نشان می‌دهند. موقعیت شعاعی اولیه رتور $x_0 = 0.02 \text{ mm}$ و $y_0 = -0.02 \text{ mm}$ است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که وقتی موتور با گشتاور بار صفر راه‌اندازی می‌شود، سرعت در لحظه 0.07 ثانیه به مقدار مرجع خود می‌رسد و بالادگی آن از $1/15$ تجاوز نمی‌کند. مؤلفه‌های جابجایی شعاعی x و y در زمان 0.15 ثانیه به مقادیر پایدار خود می‌رسند و بالادگی آن‌ها در حدود $25 \mu\text{m}$ است. اما هنگامی که مؤلفه جابجایی شعاعی y به‌طور ناگهانی در لحظه 0.2 ثانیه به 0.04 mm تغییر می‌کند، مطابق با شکل ۵-ج، نوساناتی با دامنه کم در مؤلفه جابجایی شعاعی x دیده می‌شود که پس از مدت کوتاهی پایدار می‌شوند. علت وجود این نوسان‌ها تزویج بین مؤلفه‌های جابجایی شعاعی رتور می‌باشد که در رابطه (۱۶) نیز قابل مشاهده است. هر دو مؤلفه جابجایی پس از گذشت 0.15 ثانیه مقدار مرجع خود را با خطای ناچیزی دنبال می‌کنند. شکل (۶) نیز منحنی‌های پاسخ مؤلفه‌های جابجایی شعاعی رتور را در پاسخ به اعمال ناگهانی نیروی شعاعی F_{ext} نشان می‌دهد. موقعیت شعاعی اولیه رتور $x_0 = 0.05 \text{ mm}$ و $y_0 = -0.02 \text{ mm}$ است. این اغتشاش در زمان 0.2 ثانیه و در راستای محور x به رتور وارد شده است. پس از اعمال این نیرو، موقعیت رتور در راستای محور x تغییر می‌کند اما موقعیت رتور در راستای محور y پس از چند نوسان با دامنه بسیار کم، در مقدار قبلی خود تثبیت می‌شود.

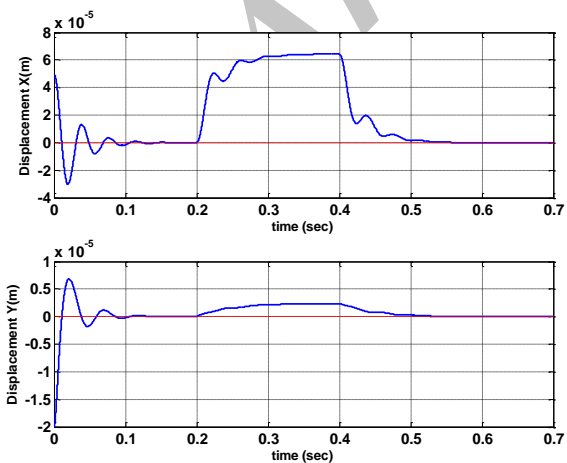
در اینجا به منظور نمایش ضرورت مدل‌سازی اثر تزویج سیم‌پیچ‌های گشتاور و تعلیق، نتایج شبیه‌سازی یک موتور سنکرون آهنربای دائم بدون یاتاقان از مرجع [۱۰] نشان داده می‌شود. در این شبیه‌سازی از مدل ساده‌شده استفاده شده است. در شکل (۷) منحنی‌های پاسخ مؤلفه‌های جابجایی شعاعی رتور در پاسخ به تغییر ناگهانی سیگنال‌های مرجع محورهای x و y از همان مرجع نشان داده شده است. در لحظه $1/6$ ثانیه سیگنال مرجع محور x به‌طور ناگهانی از 0.03 mm به صفر تغییر می‌کند. در این لحظه تغییری در مؤلفه جابجایی شعاعی محور y مشاهده نمی‌شود. همچنین سیگنال مرجع محور y در زمان $2/3$ ثانیه به‌طور ناگهانی از مقدار -0.02 mm به 0.01 mm تغییر می‌کند و در این لحظه نیز تغییری در مؤلفه جابجایی شعاعی محور x مشاهده نمی‌شود. چون به‌واسطه وجود تزویج بین سیم‌پیچ‌ها در عمل رفتار موتور با آنچه به‌عنوان مدل در شبیه‌سازی جایگزینش شده متفاوت است در حقیقت این کنترل‌کننده سامانه‌ای غیرواقعی را کنترل نموده و در مواجهه با موتور واقعی قطعاً از دقت کافی برخوردار نیست و با مشکل روبرو می‌شود. به‌منظور اثبات این موضوع در ادامه در شکل‌های (۸-۱۱) نشان داده

حال فرض می‌شود که با همان شرایط قبل، مشتق اندوکتانس متقابل بین دو سیم‌پیچ نسبت به جابجایی رتور به دو برابر مقدار نامی خود افزایش یابد. در شکل (۹) منحنی‌های پاسخ حاصل از شبیه‌سازی مدل ریاضی کامل موتور با $M' = 1.288 H/m$ نشان داده شده است. در این حالت مقدار خطای مؤلفه‌های جابجایی شعاعی بیشتر از حالت قبل می‌باشد.



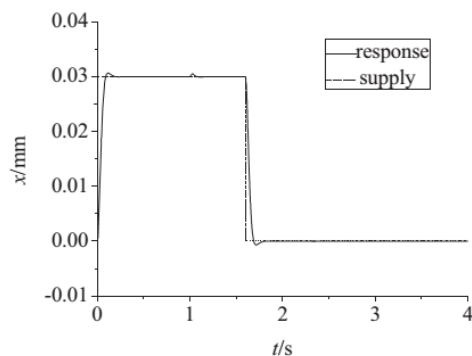
شکل (۹): منحنی‌های پاسخ سامانه کنترل BPMSM بر اساس مدل ریاضی کامل موتور و $M' = 1.288 H/m$

شکل (۱۰) نیز منحنی‌های پاسخ مؤلفه‌های جابجایی شعاعی رتور را در پاسخ به اعمال ناگهانی نیروی شعاعی F_{ext} نشان می‌دهد. این اغتشاش در زمان 0.2 ثانیه و در راستای محور x به رتور وارد شده است. پس از اعمال این نیرو، موقعیت رتور در راستای محور x تغییر می‌کند. همچنین موقعیت رتور در راستای محور y نیز تغییر کرده و در موقعیت جدیدی تثبیت می‌شود.

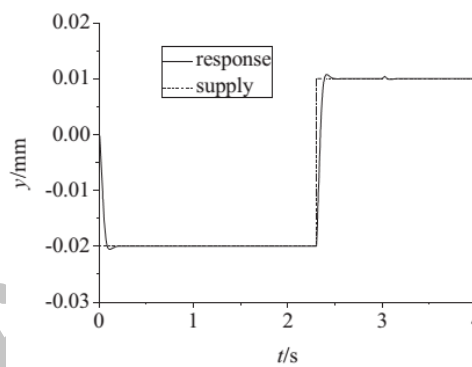


شکل (۱۰): منحنی‌های پاسخ سامانه کنترل BPMSM به اعمال ناگهانی نیروی شعاعی بر اساس مدل ریاضی کامل

شبیه‌سازی بر اساس مدل ریاضی کامل موتور در مرجع [۲۰] نیز انجام شده و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش



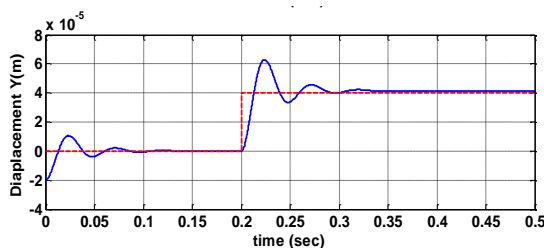
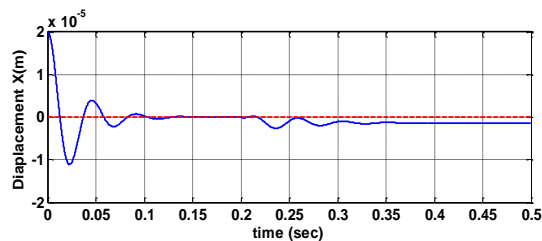
(a)



(b)

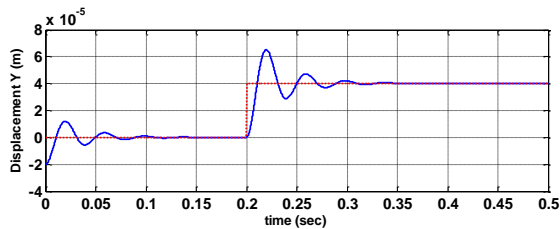
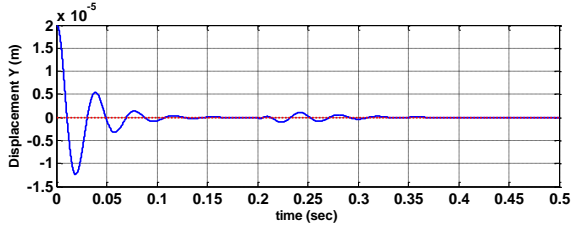
شکل (۷): منحنی‌های پاسخ سامانه کنترل BPMSM به تغییر ناگهانی سیگنال‌های مرجع جابجایی بر اساس مدل ریاضی ساده شده [۱۰]

در ادامه کنترل‌کننده بر اساس مدل ریاضی کامل موتور که نشان‌دهنده مدل دقیق‌تر و واقعی‌تر موتور می‌باشد، طراحی شده است. شکل (۸) منحنی‌های پاسخ مؤلفه‌های جابجایی شعاعی رتور به تغییر ناگهانی سیگنال مرجع محور y را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد هنگامی که مؤلفه جابجایی شعاعی y در لحظه 0.2 ثانیه به طور ناگهانی به $0.4 mm$ تغییر می‌کند، هیچ‌یک از مؤلفه‌های جابجایی شعاعی رتور مقادیر مرجع خود را دنبال نمی‌کنند و رتور در یک نقطه تعادل جدید پایدار می‌شود.



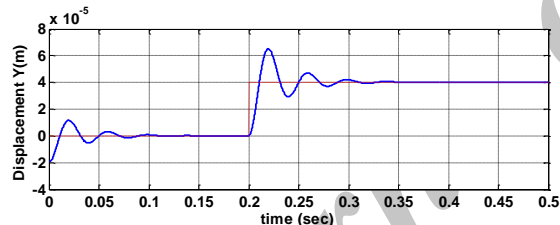
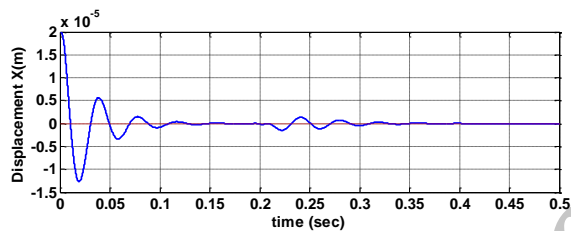
شکل (۸): منحنی‌های پاسخ سامانه کنترل BPMSM بر اساس مدل ریاضی کامل موتور و $M' = 0.644 H/m$

شعاعی به رتور در امتداد محور x ، موقعیت رتور در راستای محور x تغییر می‌کند اما موقعیت رتور در راستای محور y پس از چند نوسان با دامنه بسیار کم، در مقدار قبلی خود تثبیت می‌شود.



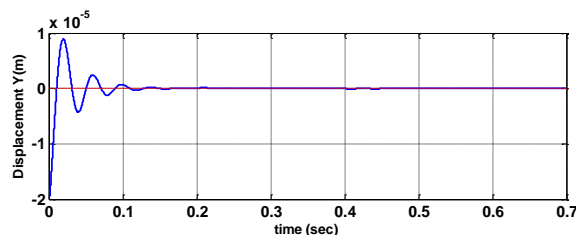
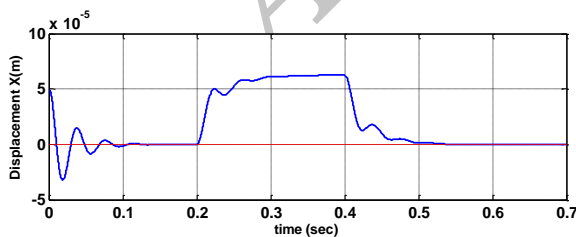
شکل (۱۲): منحنی‌های پاسخ سامانه کنترل اصلاح شده BPMSM با

$$M' = 0.644 H / m$$



شکل (۱۳): منحنی‌های پاسخ سامانه کنترل اصلاح شده BPMSM با

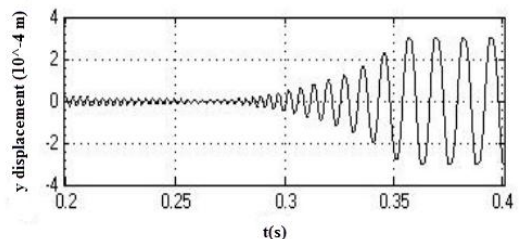
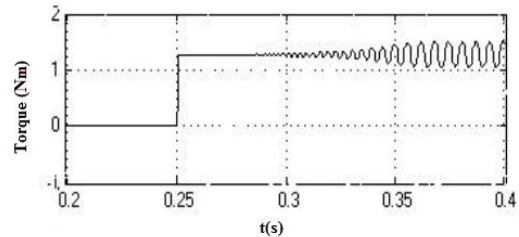
$$M' = 1.288 H / m$$



شکل (۱۴): منحنی‌های پاسخ سامانه کنترل اصلاح شده BPMSM به

اغتشاش ناگهانی نیروی شعاعی بر اساس مدل ریاضی کامل

ناگهانی گشتاور بار و در نتیجه افزایش جریان سیم‌پیچ گشتاور، دامنه و فاز میدان فاصله هوایی تغییر کرده و شرایط تعلیق پایدار از بین می‌رود (شکل ۱۱). به عبارت دیگر، تزویج بین دو سیم‌پیچ باعث می‌شود که در لحظه افزایش گشتاور، جابجایی رتور نیز افزایش یابد. افزایش جابجایی رتور نیز به نوبه خود باعث افزایش گشتاور می‌شود. در این مرجع راه‌حلی برای رفع این مشکل ارائه نشده است.



شکل (۱۱): منحنی‌های پاسخ سامانه کنترل BPMSM [۲۰]

در این مقاله نشان دادیم که با تنظیم برخی از پارامترهای کنترل‌کننده، توانستیم مطابق شکل‌های (۸) تا (۱۰) سامانه را پایدار کنیم اما خطای ماندگار وجود داشته و سامانه رفتار دینامیکی مطلوبی ندارد. ولی این یک مورد خاص نمی‌تواند تضمین کند که برای هر سامانه موتور الکتریکی بدون یاتاقان، امکان پایدار شدن وجود داشته باشد. ضمن اینکه پاسخ سامانه پایدار شده هم قابل قبول نیست. پس صرف‌نظر نمودن از بخشی از دینامیک تأثیرگذار سامانه یعنی تزویج بین سیم‌پیچ‌های گشتاور و تعلیق مغناطیسی منطقی نیست و باید تمام دینامیک‌های تأثیرگذار سامانه در طراحی سامانه کنترل در نظر گرفته شود. ضمناً امکان طراحی کنترل‌کننده جدید که بتواند مدل کامل را کنترل کند وجود دارد. نتایج به دست آمده در این مقاله نشان می‌دهد که با انجام اصلاحاتی در سامانه کنترل تعلیق مغناطیسی BPMSM می‌توان از عملکرد پایدار و مطلوب این سامانه اطمینان حاصل نمود. با استفاده از دو کنترل‌کننده PI در مسیر جریان‌های دومحوری سیم‌پیچ تعلیق مغناطیسی و کنترل این جریان‌ها به صورت حلقه بسته، می‌توان به نتایج مطلوب و رضایت‌بخشی دست یافت. نتایج شبیه‌سازی بر اساس بلوک دیاگرام اصلاح شده سامانه کنترل در شکل‌های (۱۲-۱۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۱۲-۱۳)، مشاهده می‌شود، پس از تغییر ناگهانی سیگنال مرجع مؤلفه جابجایی رتور در محور y ، هر دو مؤلفه جابجایی مقادیر مرجع مطلوب خود را دنبال می‌کنند. همچنین مطابق با شکل (۱۴)، پس از اعمال ناگهانی نیروی

- [7] B. Warberger, R. Kaelin, T. Nussbaumer, and J. W. Kolar, "50 Nm/2500 W bearingless motor for high purity pharmaceutical mixing," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 5, May 2012.
- [8] T. Schneider, J. Petersen, and A. Binder, "Influence of pole pair combinations on high-speed bearingless permanent magnet motor performance," *IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, pp. 707-711, 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 Application*, vol. 32, no. 2, Mar./Apr. 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, 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, Feb. 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*, pp. 202-207, 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, Sep. 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*, pp. 177-182, 2010.
- [15] X. sun, L. Chen, Z. yang, and H. Zhu, "Speed-sensorless vector control of a bearingless motor with artificial neural network inverse speed observer," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 4, Dec. 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, 2009.
- [17] 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, Dec. 2012.
- [18] 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*, This article has been accepted for publication in a future issue of this journal, 2016.

۵- نتیجه گیری

موتور سنکرون آهنربای دائم بدون یاتاقان یک سامانه چند متغیره، غیرخطی و تزویج شده است. چون هر دو سیم پیچ موتور در شیارهای استاتور جاسازی می‌شوند با خارج شدن رتور از مرکز استاتور بین سیم پیچ‌های گشتاور و نیروی تعلیق مغناطیسی تزویج به وجود می‌آید. در این مقاله عملکرد *BPMSM* بر اساس مدل ریاضی ساده شده و مدل ریاضی کامل موتور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد اگر کنترل کننده‌ها بر اساس مدل ریاضی ساده شده طراحی شوند، در ظاهر سامانه را کنترل می‌کنند اما اگر همین کنترل کننده‌ها به مدل ریاضی کامل که نشان دهنده مدل واقعی تر موتور است اعمال شوند، سامانه دقت لازم را ندارد و خطای آشکاری در مؤلفه‌های جابجایی شعاعی رتور مشاهده می‌شود. بنابراین اگر کنترل کننده‌ها بدون در نظر گرفتن تزویج بین سیم پیچ‌های گشتاور و تعلیق مغناطیسی (که بخشی از دینامیک تأثیرگذار سامانه است) طراحی شوند، در عمل دستیابی به نتایج مطلوب و رضایت بخش غیرممکن خواهد بود. در ادامه نشان داده شد که با انجام اصلاحاتی می‌توان ضمن در نظر گرفتن تزویج بین دو سیم پیچ، کنترل کننده مناسبی برای موتور طراحی نمود.

۶- مراجع

- [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, 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, 2013.
- [3] A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa, M. Ooshima, M. Takemoto, and D. Dorrell, "Magnetic bearings and bearingless drives," *The Netherlands, Elsevier*, 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, 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, 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, May 2012.

ب) پارامترهای سامانه کنترلی

کنترل کننده PI سرعت:

$$PI \quad k_p = 1.5 \quad k_i = 0.12$$

کنترل کننده‌های PI جریان سیم‌پیچ تعلیق مغناطیسی:

$$PI(i_{sd}) \quad k_p = 0.5 \quad k_i = 200$$

$$PI(i_{sq}) \quad k_p = 2 \quad k_i = 200$$

کنترل کننده‌های PID مؤلفه‌های جابجایی شعاعی رتور:

$$PID(x) \quad k_p = 8000 \quad k_i = 180 \quad k_d = 200$$

$$PID(y) \quad k_p = 8000 \quad k_i = 150 \quad k_d = 200$$

- [19] 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, vol. 2014, Article ID 698171.
- [20] 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, pp. 898–902, 2005.
- [21] 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, Sep. 1999.
- [22] H. Zhu and H. Li, "Magnetic field equivalent current analysis-based radial force control for bearingless permanent magnet synchronous motors," Energies, 2015. www.mdpi.com/journal/energies

ضمایم

الف) فهرست علائم و اختصارات

s و m	زیر نویس‌های مربوط به سیم‌پیچ گشتاور و تعلیق مغناطیسی
P_1	تعداد جفت قطب‌های سیم‌پیچ گشتاور
P_2	تعداد جفت قطب‌های سیم‌پیچ تعلیق مغناطیسی
R	مقاومت هر فاز سیم‌پیچ‌های استاتور (Ω)
L	اندوکتانس هر فاز سیم‌پیچ‌های استاتور (H)
M'	مشقت اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ گشتاور و تعلیق (H/m)
u	مقدار لحظه‌ای ولتاژ سیم‌پیچ‌های استاتور (V)
i	مقدار لحظه‌ای جریان سیم‌پیچ‌های استاتور (A)
ψ	شار سیم‌پیچ‌های استاتور (Web)
ψ_{pm}	شار آهنربای دائم (Web)
I_f	جریان معادل آهنربای دائم (A)
ω_m	سرعت زاویه‌ای مکانیکی رتور (rad/s)
P_{em}	توان الکترومغناطیسی (W)
T_e	گشتاور الکترومغناطیسی (Nm)
F	نیروی تعلیق شعاعی (N)
J	ممان اینرسی رتور ($kg.m^2$)
m	جرم رتور (kg)
K_s	ضریب نیروی کشش مغناطیسی (N/m)
x و y	مؤلفه‌های جابجایی شعاعی رتور (m)

Study on Impression of Coupling Between Torque and Maglev Windings on the Performance of BPMSM Suspension Control System

M. Jafarboland*, A. Shirzadi

Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 11/04/2016, Accepted: 25/12/2016)

Abstract

In bearingless permanent magnet synchronous motor, both torque winding and magnetic levitation winding are placed in common stator slots. When the rotor is not in the center of the stator, coupling is established between two windings. In most of the researches to be realized about control of this motor, coupling between two windings is neglected. In this paper, the impression of coupling between two windings on performance of suspension control system is studied. Simulation results show that coupling between two windings is not negligible and disturbances such as sudden changing of reference signals of radial displacement components and radial forces on shaft can displace the equilibrium point of rotor. Furthermore, in this paper with consideration of coupling between two windings, a proper controller has been designed in order to attain the desired performance of the motor against the sudden changing of reference signals of radial displacement components. Simulation results confirm the necessity of coupling effect modeling and correctness of the proposed method.

Keywords: Bearingless Permanent Magnet Synchronous Motor (BPMSM), Torque Winding, Magnetic Levitation Winding (Maglev winding), Coupling, Mathematic Model.

* Corresponding author E-mail: jmehrdad@mut-es.ac.ir