

بررسی تأثیر خطا در تخمین موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی بر روی پارامترهای سرعت، جریان و گشتاور راه‌اندازی

حمیدرضا پیرو دین نبی و فرزاد بداعی سرور

استفاده از سنسور (انکدر) می‌باشد. استفاده از انکدر دارای معایبی مانند افزایش هزینه ساخت، ابعاد دستگاه، عدم قابلیت اطمینان و نویز می‌باشد. روش‌های دیگر جهت تخمین موقعیت روتور، استفاده از روش‌های بدون سنسور^۴ جهت تخمین موقعیت روتور موتور سنکرون رلوکتانسی می‌باشد. چندین روش برای تخمین موقعیت روتور موتور سنکرون رلوکتانسی در سال‌های اخیر پیشنهاد شده که همه روش‌ها را می‌توان به تزریق پالس به استاتور موتور بیان کرد [۶] تا [۱۰].

به طور کلی روش‌های تخمین موقعیت اولیه را می‌توان به سه گروه مبتنی بر شکل موج سیگنال تزریقی تقسیم‌بندی کرد: روش تزریق سیگنال سینوسی فرکانس بالا^۵ [۱۱] تا [۱۴]، روش تزریق سیگنال موج مربعی^۶ [۱۵] تا [۱۷] و روش تزریق ولتاژ پالسی متقارن^۷ [۱۸] و [۱۹]. روش تزریق سیگنال ولتاژ سینوسی فرکانس بالا به این صورت است که یک موج سینوسی فرکانس بالا به ولتاژ محور d (به دست آمده از تبدیل پارک^۸) اعمال می‌شود و با دریافت پاسخ جریان استاتور موتور سنکرون رلوکتانسی، زاویه اولیه روتور را می‌توان محاسبه کرد. از مشکلات استفاده از این روش برای تخمین موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی می‌توان به این مورد اشاره کرد که به دلیل استفاده از یک فیلتر دیجیتال که منجر به تأخیر در پاسخ می‌شود، قابلیت اطمینان این روش برای تخمین موقعیت اولیه روتور کاهش می‌یابد. از طرفی به دلیل وجود یک کنترل‌کننده خطی اضافی^۹ PI، روند تنظیم ضرایب این کنترل‌کننده زمان‌بر و دشوار می‌گردد [۲۰].

روش تزریق سیگنال ولتاژ موج مربعی فرکانس بالا به صورت کلی همانند روش تزریق سیگنال ولتاژ موج سینوسی فرکانس بالا است. در مقایسه با روش تزریق موج سینوسی، عدم استفاده از فیلتر پایین‌گذر از مزیت‌های روش تزریق سیگنال موج مربعی فرکانس بالا محسوب می‌شود. در این روش نیز همچنان به یک کنترل‌کننده PI اضافی نیاز است که از مشکلات این روش می‌باشد. در روش تزریق سیگنال موج مربعی، فرکانس سیگنال تزریقی موج مربعی نصف فرکانس کلیدزنی بوده و دامنه ولتاژ پالسی به ولتاژ لینک^{۱۰} DC محدود می‌گردد [۴] و [۵]. در روش تزریق ولتاژ پالسی متقارن، یک ولتاژ پالس به سیم‌پیچی‌های استاتور تزریق می‌گردد. در این روش پس از اعمال پالس ولتاژ به

چکیده: عدم تخمین دقیق موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی می‌تواند منجر به کاهش گشتاور راه‌اندازی و کند شدن پاسخ سرعت روتور در لحظه راه‌اندازی گردد. روش‌های متعددی برای تخمین موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی ارائه شده که از نقطه نظر پیچیدگی، پیاده‌سازی و دقت تخمین موقعیت اولیه روتور قابل تقسیم‌بندی می‌باشند. برخی از این روش‌ها با وجود پیچیدگی پیاده‌سازی بالا، خطای تخمین موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی را کاهش می‌دهند. در مقابل برخی روش‌ها دارای مزیت حجم محاسبات کم و سادگی در پیاده‌سازی می‌باشند، اما خطای بیشتری در تخمین موقعیت اولیه روتور وجود دارد که در برخی روش‌ها تا ۳۰ درجه خطا در تخمین موقعیت اولیه روتور وجود دارد. در این مقاله به بررسی تأثیر خطای تخمین موقعیت اولیه روتور بر روی عملکرد موتور سنکرون رلوکتانسی از جنبه‌های مختلف پرداخته می‌شود. به منظور بررسی تأثیر خطا در تخمین موقعیت اولیه روتور بر پارامترهای موتور سنکرون رلوکتانسی، خطای موقعیت اولیه با زاویه‌های مختلف ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه بر روی پارامترهای مختلف موتور از جمله گشتاور الکترومغناطیسی راه‌اندازی و همچنین زمان رسیدن سرعت مکانیکی روتور به سرعت مرجع مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار MATLAB/Simulink ارائه شده است.

کلیدواژه: تخمین موقعیت اولیه روتور، موتور سنکرون رلوکتانسی، درایو موتورهای الکتریکی، تزریق سیگنال فرکانس بالا.

۱- مقدمه

موتور سنکرون رلوکتانسی^۱ به دلیل مزایای زیاد از جمله بازده بالا، مقاومت^۲ بالا در برابر نیروی گریز از مرکز، ساختار مناسب و ارزان برای کاربرد با سرعت‌های زیاد، راه‌اندازی پایدار و گشتاور^۳ راه‌اندازی بالا و ... به طور وسیع در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱] تا [۳]. تخمین دقیق موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی در زمان راه‌اندازی موتور با هدف دستیابی به بیشترین گشتاور راه‌اندازی به‌ازای یک جریان مشخص از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است [۴] و [۵]. یکی از روش‌ها جهت تخمین موقعیت روتور موتور سنکرون رلوکتانسی،

این مقاله در تاریخ ۲۰ شهریور ماه ۱۴۰۳ دریافت و در تاریخ ۱۲ دی ماه ۱۴۰۳ بازنگری شد.

حمیدرضا پیرو دین نبی (نویسنده مسئول)، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، (email: Hpairst@nri.ac.ir)

فرزاد بداعی سرور، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، (email: f_bodaghi@alumni.iust.ac.ir)

4. Sensorless

5. High-Frequency Injection Pulse Sinusoidal

6. High-Frequency Square Wave Signal Injection

7. Symmetrical Signal Pulse Injection

8. Park

9. Proportional Integrator

10. Direct Current

1. Synchronous Reluctance Motor

2. Resistance

3. Electromagnetic Torque

ارائه می‌گردد.

۲-۱ معادلات دینامیکی موتور سنکرون رلوکتانسی

معادلات ولتاژ محورهای d و q موتور سنکرون رلوکتانسی در قاب مرجع سنکرون به صورت زیر است

$$V_d = R_s I_d + \frac{d}{dt} \lambda_d - \omega_e \lambda_q \quad (۱)$$

$$V_q = R_s I_q + \frac{d}{dt} \lambda_q + \omega_e \lambda_d \quad (۲)$$

که V_d و V_q به ترتیب ولتاژ محور d و q ، I_d و I_q به ترتیب جریان محورهای d و q ، ω_e سرعت زاویه الکتریکی موتور سنکرون رلوکتانس و λ_d و λ_q به ترتیب شار پیوندی محور d و q هستند که به صورت زیر بیان می‌گردند

$$\lambda_d = L_d I_d \quad (۳)$$

$$\lambda_q = L_q I_q \quad (۴)$$

که در آن L_d و L_q به ترتیب اندوکتانس محور d و q هستند. گشتاور الکترومغناطیسی نیز با رابطه زیر بیان می‌گردد

$$T_e = \frac{3}{2} P (L_d - L_q) I_d I_q \quad (۵)$$

در این رابطه P تعداد زوج قطب‌های موتور سنکرون رلوکتانسی است و رابطه گشتاور الکترومغناطیسی با معادله دینامیکی ماشین به صورت زیر نشان داده می‌شود

$$T_e - T_l = B_m \omega_e + j_m P \omega_e \quad (۶)$$

$$\omega_m = P \theta_s \quad (۷)$$

در این رابطه T_e گشتاور بار، B_m ضرب کوپلاژ، ω_m سرعت زاویه‌ای مکانیکی، j_m اینرسی روتور و θ_s موقعیت الکتریکی روتور است.

۲-۲ اصول عملکرد روش حداکثر نسبت گشتاور

به جریان

به منظور افزایش راندمان موتور سنکرون رلوکتانسی، الگوریتم کنترل سرعت موتور سنکرون رلوکتانسی بر اساس روش حداکثر نسبت گشتاور به جریان تعیین می‌گردد. بر این اساس بردار جریان استاتور به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که تلفات مسی در پایین‌ترین مقدار خود باشد. رویکرد اعمال $MTPA^3$ به این صورت است که در رابطه گشتاور، مشتق T_e نسبت به I_d برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. با جایگذاری (۸) در (۵)، رابطه گشتاور برحسب I_d به صورت (۹) به دست می‌آید

$$I_q = \sqrt{I_s^* - I_d^*} \quad (۸)$$

برای رسیدن به بیشترین گشتاور به ازای یک جریان مشخص استاتور، I_d به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) I_d \sqrt{I_s^* - I_d^*} \quad (۹)$$

سیم‌پیچ‌های استاتور، با استفاده از پیک جریان سه‌فاز اندازه‌گیری شده، تخمین موقعیت اولیه انجام می‌شود. تزریق ولتاژ پالسی با اندازه مثبت، یک جریان در فاز مورد نظر ایجاد کرده و با تزریق پالس منفی عملاً جریان به سرعت کاهش پیدا می‌کند که در این شرایط، روتور فرصت حرکت پیدا نمی‌کند. مدت زمان اعمال این پالس باید به اندازه‌ای کوچک باشد که توانایی راه‌اندازی و یا جابه‌جایی را به روتور موتور سنکرون رلوکتانسی ندهد. از جمله مشکلات این روش به افزایش خطای نسبی در روش‌های پایه مبتنی بر تزریق پالس می‌توان اشاره نمود که با افزودن پیچیدگی در روش‌های پیشرفته‌تر، دقت بالایی حاصل می‌شود [۴] و [۵]. در [۱۷]، یک سیگنال DC متقارن سه‌بخشی به سیم‌پیچ‌های استاتور تزریق می‌شود و برای دستیابی به تخمین دقیق موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی و کاهش خطا نیاز است که این سیگنال در دو مرحله تزریق شود. خطای تخمین موقعیت اولیه در این روش حدود ۱۰ درجه الکتریکی است.

در [۱۸] موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی با استفاده از یک روش مبتنی بر تکرار تخمین زده می‌شود. در این مقاله، ابتدا یک پالس متقارن به فاز a موتور تزریق شده و پاسخ جریان اندازه‌گیری شده به قاب مرجع ساکن انتقال داده می‌شود. مقادیر پیک جریان‌ها و شار موتور در قاب مرجع ساکن به الگوریتم تکرار اعمال شده و با استفاده از یک الگوریتم تکرار، موقعیت اولیه روتور تخمین زده می‌شود. خطای تخمین موقعیت اولیه این روش در حدود ۵ درجه الکتریکی است.

به صورت کلی خطای تخمین موقعیت اولیه در [۲۱] حدود ۳۰ درجه الکتریکی و همچنین در [۲۲] حدود ۱۵ درجه الکتریکی است.

در این مقاله به بررسی خطاهای ایجاد شده در تخمین موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی بر روی عملکرد موتور پرداخته می‌شود. در صورت استفاده از آنکدر افزایشی^۱ (که رایج‌ترین نوع آنکدر در صنعت است)، موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی در هر بار راه‌اندازی پس از روشن شدن درایو مشخص نیست. بر همین اساس در زمان راه‌اندازی موتور، در تخمین موقعیت اولیه روتور خطا وجود دارد و این خطا تا زمانی که روتور به پالس شاخص^۲ آنکدر برسد، ادامه دارد. بنابراین در مدت زمان چرخش روتور و رسیدن به پالس شاخص، تأثیر خطاهای مختلف در تخمین موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی بر پارامترهای مختلف موتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. خطای ایجاد شده در تخمین موقعیت اولیه روتور بر گشتاور راه‌اندازی و همچنین بر زمان رسیدن سرعت مکانیکی به سرعت مرجع تأثیر خواهد گذاشت. بنابراین هدف این مقاله به بررسی عملکرد موتور به ازای خطاهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه که در تخمین موقعیت اولیه موتور سنکرون رلوکتانسی ایجاد می‌شود، بررسی خواهد شد و عملکرد موتور با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ ارزیابی می‌گردد.

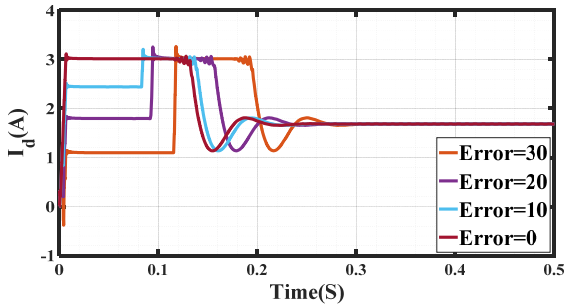
در بخش ۲ به توصیف سیستم و مفاهیم مقدماتی پرداخته می‌شود. در بخش ۳ بررسی خطای موقعیت اولیه روتور بر عملکرد موتور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش ۴ نتیجه‌گیری مقاله ارائه می‌گردد.

۲- توصیف سیستم و مفاهیم مقدماتی

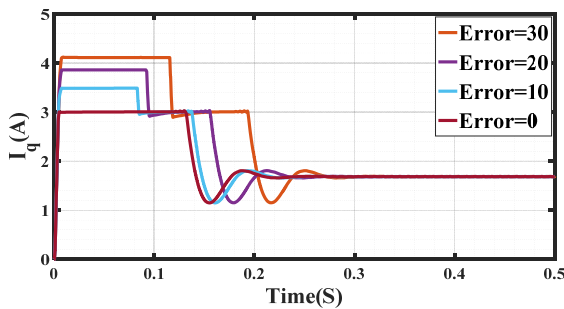
این بخش ابتدا به بیان مسئله می‌پردازد و در آن خلاصه‌ای از مفاهیم مورد نیاز بر تأثیر خطا بر روی پارامترهای موتور سنکرون رلوکتانسی

1. Incremental

2. Index



شکل ۲: جریان محور d استاتور در سرعت ۱۲۰۰ rpm به‌ازای خطای زاویه اولیه ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه الکتریکی در قاب dq .



شکل ۳: جریان محور q استاتور در سرعت ۱۲۰۰ rpm به‌ازای خطای زاویه اولیه ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه الکتریکی در قاب dq .

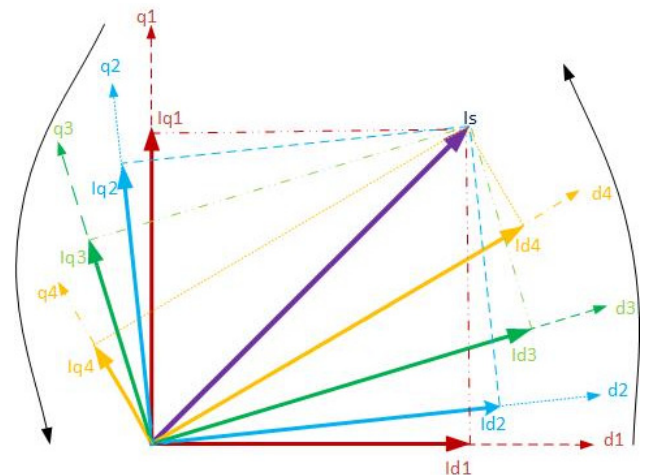
۳-۱ تأثیر خطای موقعیت اولیه بر جریان استاتور موتور

بر اساس الگوریتم بیشترین نسبت گشتاور به جریان استاتور طبق (۱۱)، جریان‌های محور d و q باید برابر شوند. وجود خطا در موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی در هنگام راه‌اندازی موتور موجب می‌شود که جریان محورهای I_d و I_q طبق تبدیل پارک (۱۲) مقادیر متفاوتی حاصل شود. همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، با افزایش خطا در موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی، جریان محور d افزایش و جریان محور q کاهش پیدا می‌کند. با توجه به اینکه جریان I_d در شبیه‌سازی به مقدار ۳- و ۰/۲- آمپر محدود شده و همچنین حلقه‌های داخلی کنترل دارای پاسخ سریع هستند، بنابراین خطای ایجادشده در موقعیت اولیه روتور باعث افزایش جریان استاتور نمی‌گردد

$$[T_{dq}(\theta_s)] = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta_s & \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

در ابتدا که موتور در حالت سکون قرار دارد، با ایجاد خطاهای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه الکتریکی در موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی، سرعت موتور در این شرایط افزایش یافته تا به سرعت ۱۲۰۰ rpm برسد. همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ ملاحظه می‌گردد، جریان محورهای d و q استاتور به‌ازای خطاهای ایجادشده در سرعت ۱۲۰۰ rpm به دست آمده است.

در ابتدا با فرض اینکه هیچ خطایی در تخمین موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی وجود نداشته باشد، جریان‌های I_d و I_q طبق الگوریتم MTPA با یکدیگر برابر هستند. حال زمانی که خطا در تشخیص موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی وجود داشته باشد، مقادیر



شکل ۱: تصویر بردار جریان I_s بر روی محورهای d و q به‌ازای خطای زاویه اولیه ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه الکتریکی در قاب dq .

جدول ۱: مشخصات درایو موتور سنکرون رلوکتانسی مورد مطالعه.

۵۰	فرکانس نامی (Hz)
۴	مقاومت استاتور (Ω)
۳۱۱	ولتاژ لینک DC (V)
۱۰	فرکانس سوئیچینگ (kHz)
۰/۵	توان نامی (hp)
۲/۴	جریان نامی (A)
۰/۳۴	اندوکتانس محور d (H)
۰/۰۹۸	اندوکتانس محور q (H)

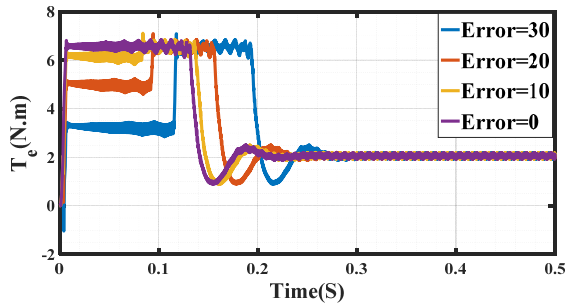
$$\frac{\delta T_e}{I_d} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) (\sqrt{I_s^2 - I_d^2} - \frac{I_d^2}{\sqrt{I_s^2 - I_d^2}}) = 0 \quad (10)$$

با ساده‌سازی (۱۰)، نسبت جریان‌های محور d و q به صورت زیر به دست می‌آید

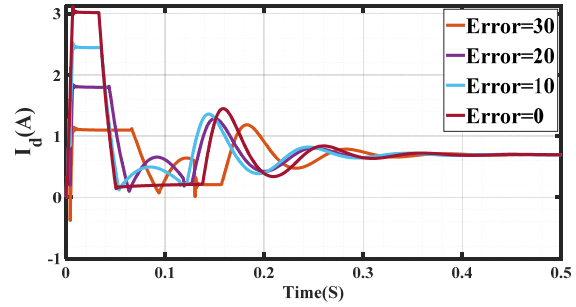
$$I_d = I_q \quad (11)$$

۳-۲ بررسی خطای موقعیت اولیه بر عملکرد موتور سنکرون رلوکتانسی

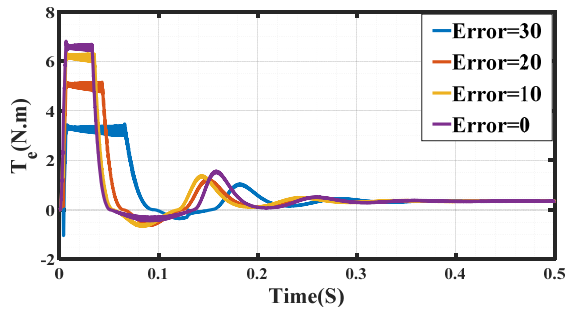
یکی از روش‌های رایج در کنترل موتور سنکرون رلوکتانسی، استفاده از انکدر افزایشی برای تشخیص موقعیت الکتریکی روتور و همچنین اندازه‌گیری سرعت روتور است. انکدر دارای ۳ پالس A، B و Index می‌باشد. پالس‌های A و B برای تشخیص موقعیت الکتریکی و سرعت روتور موتور سنکرون رلوکتانسی استفاده می‌شود. پالس شاخص نیز در هر دور مکانیکی، تنها یک مرتبه در یک نقطه مشخص برای صفر کردن خطای به‌وجودآمده در تشخیص موقعیت روتور ارسال می‌شود. بر این اساس در ابتدای کار، اطلاع دقیقی از موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی وجود ندارد. بنابراین خطا در موقعیت اولیه روتور وجود دارد تا زمانی که روتور به پالس شاخص برسد و خطای ایجادشده در موقعیت اولیه روتور صفر گردد. زمانی که روتور از نقطه پالس شاخص انکدر عبور کرد، موقعیت دقیق روتور به‌درستی توسط انکدر تخمین زده می‌شود. بنابراین به‌ازای خطاهای مختلف در مقدار موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی در هنگام راه‌اندازی، عملکرد موتور ارزیابی می‌شود.



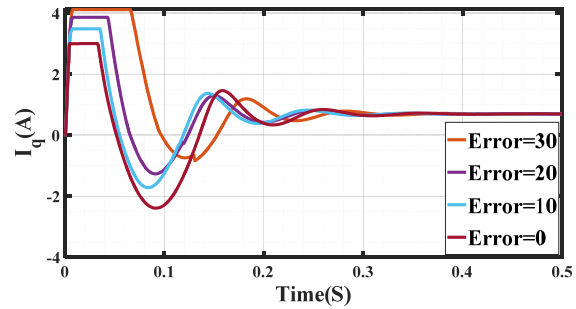
شکل ۷: گشتاور موتور در سرعت ۳۰۰۰ rpm به‌ازای خطای زاویه اولیه ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه الکتریکی در قاب dq.



شکل ۴: جریان محور d استاتور در سرعت ۳۰۰۰ rpm به‌ازای خطای زاویه اولیه ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه الکتریکی در قاب dq.



شکل ۸: گشتاور موتور در سرعت ۳۰۰۰ rpm به‌ازای خطای زاویه اولیه ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه الکتریکی در قاب dq.



شکل ۵: جریان محور q استاتور در سرعت ۳۰۰۰ rpm به‌ازای خطای زاویه اولیه ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه الکتریکی در قاب dq.

جدول ۲ مقادیر مؤلفه‌های جریان I_q و I_d به‌ازای خطاهای ایجادشده در موقعیت اولیه روتور.

خطای موقعیت اولیه	۰	۱۰	۲۰	۳۰
I_q	۳	۳,۴۸۱۲	۳,۸۵۵۴	۴,۱۰۸۶
I_d	۳	۲,۴۴۲۲	۱,۷۹۴۷	۱,۰۹۶۹۴

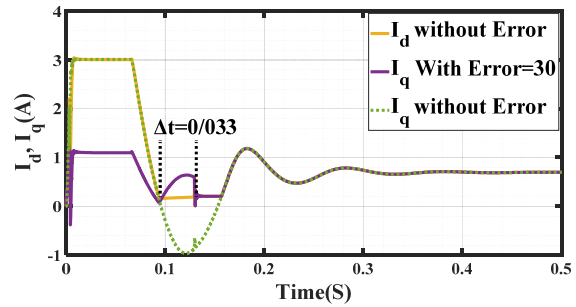
جدول ۳: مقادیر گشتاور خروجی به‌ازای خطاهای ایجادشده در موقعیت اولیه روتور.

خطای موقعیت اولیه	۰	۱۰	۲۰	۳۰
T_e (N.m)	۶,۸	۶,۶۱	۵,۶	۳,۸

همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، در مدت زمان $\Delta t = 0.033$ برای داشتن حداقل گشتاور در جهت مناسب، لازم است جریان محور d بر روی یک مقدار حداقل (در حدود ۰/۲ برای موتور مورد بررسی) محدود شود و با جریان محور q گشتاور و سرعت موتور را در این بازه زمانی کنترل گردد؛ بنابراین می‌توان مشاهده کرد که تغییرات جریان محور q بر روی جریان محور d (جریان محور d با خطای ۳۰ درجه در موقعیت روتور) با توجه به شرط روش MTPA تأثیر خواهد گذاشت. این تأثیر تا زمان رسیدن روتور به پالس شاخص ادامه خواهد یافت.

۳-۲ تأثیر خطا بر گشتاور موتور

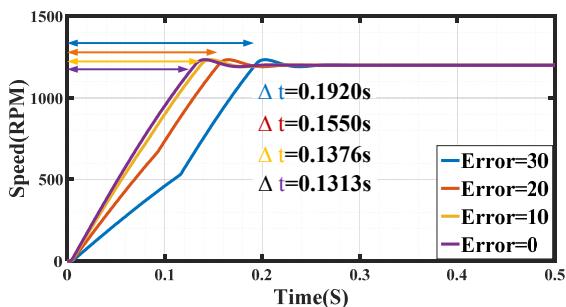
همان‌طور که بیان شد، خطا در موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی، پارامترهای جریان I_d و I_q را تحت تأثیر قرار می‌دهد و مقادیر به‌دست‌آمده برخلاف مقادیر مورد انتظار توسط الگوریتم MTPA می‌باشد. بر اساس (۵) می‌توان بیان کرد تغییر در مقادیر جریان I_d و I_q که ناشی از وجود خطا در تخمین موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی است، باعث کاهش گشتاور موتور سنکرون رلوکتانسی می‌گردد؛ بنابراین تأثیر خطاهای مختلف بر مقادیر گشتاور موتور در جدول ۳ نشان شده است.



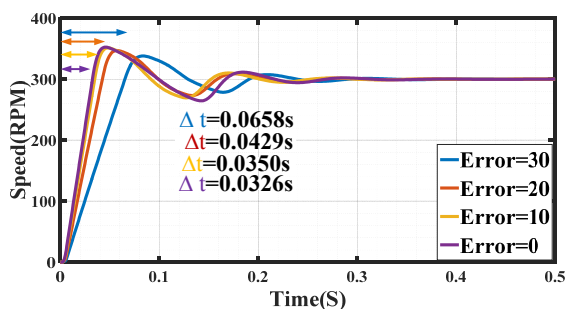
شکل ۶: جریان محور q بدون خطا، جریان محور d بدون خطا و جریان محور q خطای ۳۰ درجه الکتریکی در قاب dq در سرعت ۳۰۰۰ rpm.

جریان محورهای d و q به‌دست‌آمده از تبدیل پارک متفاوت هستند. به‌طور مثال به‌ازای خطای ۱۰ درجه در تخمین موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی بر اساس الگوریتم MTPA، انتظار می‌رود که I_d و I_q مقدار ۳+ به دست آید. جدول ۲ از مقادیر I_d و I_q به‌ازای خطاهای ایجادشده در موقعیت اولیه روتور به دست آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار I_d و I_q به‌ترتیب ۲,۴۴۲۲+ و ۳,۴۸۱۲+ به دست آمده که این مقادیر برخلاف الگوریتم MTPA است.

جریان محورهای d و q به‌ازای سرعت ۳۰۰۰ rpm در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند که با افزایش خطا در موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی، مقادیر جریان محورهای d و q برخلاف مقادیر مورد انتظار روش MTPA به دست آمده است. نکته‌ای که قابل ملاحظه است، زمان رسیدن جریان محورهای d و q به حالت نامی خود می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید با افزایش خطا این زمان افزایش پیدا کرده و یک تأخیر در پاسخ جریان محورهای d و q مشاهده می‌شود. همچنین می‌توان بیان کرد که با کاهش سرعت روتور موتور سنکرون رلوکتانسی، مدت زمان تأخیر در پاسخ جریان افزایش پیدا کرده است. علت این تأخیر به کاهش گشتاور راه‌اندازی ناشی از خطا در موقعیت اولیه است که در بخش ۳-۲ توضیح داده خواهد شد.



شکل ۱۰: سرعت موتور در سرعت ۱۲۰۰ rpm به ازای خطای زاویه اولیه ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه الکتریکی در قاب dq.



شکل ۱۱: سرعت موتور در سرعت ۳۰۰ rpm به ازای خطای زاویه اولیه ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه الکتریکی در قاب dq.

خطاهای مختلف در شکل ۹ با رنگ آبی مشخص شده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش خطا مساحت گشتاور الکترومغناطیس کاهش پیدا کرده است.

۳-۳ تأثیر خطا بر سرعت موتور

خطای ایجاد شده در تخمین موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی بر مدت زمان رسیدن سرعت روتور به سرعت مرجع تأثیرگذار است و منجر به تأخیر در مدت زمان رسیدن سرعت روتور به سرعت مرجع می‌گردد. دلیل این تأخیر مربوط به کاهش گشتاور الکترومغناطیسی موتور است. معادله دینامیکی گشتاور الکترومغناطیسی طبق (۱۳) می‌باشد

$$T_e - T_l = j \frac{d\omega}{dt} \quad (13)$$

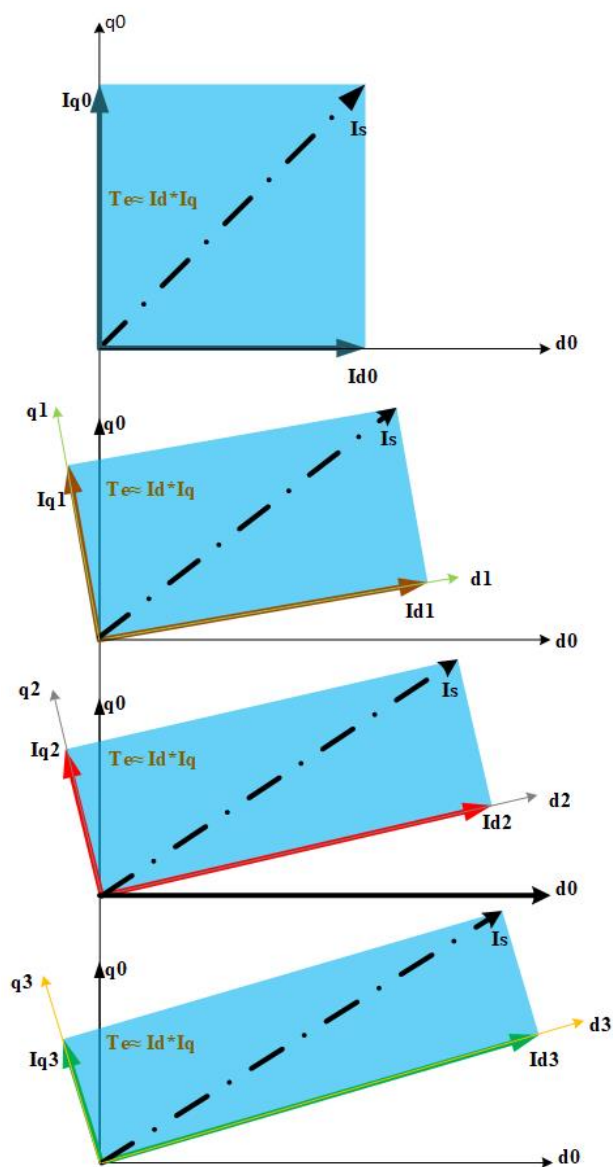
با این فرض که موتور بدون بار باشد ($T_l = 0$) خواهیم داشت

$$T_e = j \frac{d\omega}{dt} \quad (14)$$

با جایگذاری (۵) در معادله فوق و با انتگرال گیری، سرعت بر حسب مقادیر ثابت I_d و I_q (در لحظات ابتدایی که جریان‌ها بر روی مقادیر حداکثری محدود شده‌اند) به دست خواهد آمد

$$\omega = \frac{3}{j} \frac{P}{j} (L_d - L_q) I_d I_q t \quad (15)$$

خطا در تخمین موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی منجر به تغییر در مقادیر I_d و I_q می‌شود که این خطا موجب می‌شود تا شرط روش MTPA محقق نگردد. در هنگام راه‌اندازی در لحظات ابتدایی که جریان‌ها بر روی مقادیر حداکثری محدود شده‌اند، طبق (۱۵) سرعت برحسب جریان‌های I_d و I_q به دست آمده است. بنابراین تغییر در مقادیر I_d و I_q که ناشی از وجود خطا در تخمین موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی است، باعث افزایش زمان رسیدن سرعت روتور به سرعت مرجع می‌گردد.



شکل ۹: گشتاور موتور سنکرون رلوکتانسی به ازای خطای زاویه اولیه ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه الکتریکی در قاب dq.

جدول ۴: تأخیر ایجاد شده در سرعت روتور نسبت به سرعت مرجع به ازای خطاهای ایجاد شده در موقعیت اولیه روتور.

خطای موقعیت اولیه	۰	۱۰	۲۰	۳۰
مدت زمان تأخیر در پاسخ سرعت	۰٫۱۵۸	۰٫۱۶۶	۰٫۱۸۳	۰٫۲۲
درصد مدت زمان تأخیر در پاسخ سرعت	۰	۵	۱۵٫۸	۴۰٫۵

بر اساس الگوریتم کنترل سرعت موتور سنکرون رلوکتانسی MTPA، ماکسیمم گشتاور در صورتی به دست می‌آید که جریان محورهای d و q با یکدیگر برابر گردند. زمانی که در موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی خطا وجود داشته باشد، دیگر این تساوی برقرار نیست و جریان‌های I_d و I_q مقادیر متفاوتی را خواهند داشت.

با توجه به منحنی گشتاور به دست آمده از شبیه‌سازی در سرعت نامی ۱۲۰۰ rpm و سرعت پایین ۳۰۰ rpm به ترتیب طبق شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌گردد که با افزایش خطا، گشتاور الکترومغناطیسی موتور کاهش یافته که موجب افزایش زمان رسیدن سرعت موتور به سرعت مرجع می‌شود.

با توجه به رابطه گشتاور که از حاصل ضرب جریان محور d و جریان محور q به دست می‌آید، مساحت تقریبی گشتاور الکترومغناطیسی به ازای

- motor by symmetric pulse voltage injection," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 59998-60007, 2020.
- [10] D. Kim, J. Kim, H. Lim, J. Park, J. Han, and G. Lee, "A study on accurate initial rotor position offset detection for a permanent magnet synchronous motor under a no-load condition," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 73662-73670, 2021.
- [11] X. Zhang, H. Li, S. Yang, and M. Ma, "Improved initial rotor position estimation for PMSM drives based on HF pulsating voltage signal injection," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 6, pp. 4702-4713, Jun. 2018.
- [12] X. Fu, Y. Xu, H. He, and X. Fu, "Initial rotor position estimation by detecting vibration of permanent magnet synchronous machine," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 8, pp. 6595-6606, Aug. 2021.
- [13] J. Wei, H. Xu, B. Zhou, Z. Zhang, and C. Gerada, "An integrated method for three-phase AC excitation and high-frequency voltage signal injection for sensorless starting of aircraft starter/generator," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 7, pp. 5611-5622, Jul. 2019.
- [14] H. Li, X. Zhang, S. Yang, F. Li, and M. Ma, "Improved initial rotor position estimation of IPMSM using amplitude modulation method based on HF carrier signal injection," in *Proc. 43rd Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'07*, pp. 1996-2001, Beijing, China, 29 Oct-1 Nov. 2017.
- [15] T. Wu, *et al.*, "A fast estimation of initial rotor position for low-speed free-running IPMSM," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 7, pp. 7664-7673, Jul. 2020.
- [16] S. C. Yang, S. M. Yang, and J. H. Hu, "Robust initial position estimation of permanent magnet machine with low saliency ratio," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 2685-2695, 2017.
- [17] X. Wu, *et al.*, "Initial rotor position detection for sensorless interior PMSM with square-wave voltage injection," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 53, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2017.
- [18] H. Pairo and B. Nikmaram, "Initial rotor position estimation of SynRM based on pulsating voltage injection combined with finite position set algorithm," *IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 11, no. 4, pp. 4321-4331, Aug. 2023.
- [19] H. Pairo, B. Nikmaram, and S. Mohamadian, "Adaptive-based accurate rotor initial position estimation in synchronous reluctance motors," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 71, no. 11, pp. 13812-13821, Nov. 2024.
- [20] B. Xia, *et al.*, "An improved high-frequency voltage signal injection-based sensorless control of IPMSM drives with current observer," *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 10, no. 3, pp. 5155-5167, Sept. 2024.
- [21] X. Wu, Z. Q. Zhu, and Z. Wu, "A novel rotor initial position detection method utilizing DC-link voltage sensor," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 56, no. 6, pp. 6486-6495, Nov./Dec. 2020.
- [22] Y. Wang, *et al.*, "Initial rotor position and magnetic polarity identification of PM synchronous machine based on nonlinear machine model and finite element analysis," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 46, no. 6, pp. 2016-2019, Jun. 2010.

حمیدرضا پیرو دین نبی در سال ۱۳۹۶ مدرک دکترای مهندسی برق خود را از دانشگاه علم و صنعت تهران دریافت نمود. از سال ۱۳۹۲ الی ۱۳۹۸ نامبرده به تحقیق و پژوهش در زمینه مگادرایهای ولتاژ متوسط در پژوهشگاه برق جهاد دانشگاهی مشغول بوده است. از سال ۱۳۹۸ تا کنون استادیار پژوهشگاه نیرو می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی و ساخت درایوهای ولتاژ متوسط، درایو موتورهای چندفاز، درایو موتورهای سنکرون رلوکتانسی، درایو موتورهای آهنربای دائم و انواع کانورترهای صنعتی.

فرزاد بدایغی سرور در سال ۱۳۹۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه ملی ملایر و در سال ۱۴۰۱ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه علم و صنعت تهران دریافت نمود. از سال ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۳ نامبرده به تحقیق و پژوهش مشغول بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: درایو موتورهای الکتریکی، منابع تغذیه سویچینگ، مبدل های رزونانسی، اینورترهای چندسطحی و انرژی.

منحنی سرعت به دست آمده از شبیه سازی در سرعت های ۱۲۰۰ rpm و ۳۰۰ rpm به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده است. با افزایش خطا در تخمین موقعیت اولیه روتور، مدت زمان رسیدن سرعت مکانیکی روتور به سرعت مرجع افزایش می یابد که این مدت زمان Δt در منحنی های سرعت نشان داده شده است. همان طور که در جدول ۴ مشاهده می گردد، زمانی که خطای تخمین موقعیت اولیه روتور ۱۰ درجه باشد، تأخیر در سرعت روتور نسبت به سرعت مرجع حدود ۵ درصد است. همچنین در شرایطی که خطا ۲۰ درجه باشد، تأخیر در سرعت روتور نسبت به سرعت مرجع در حدود ۱۵/۸ درصد و در خطای ۳۰ درجه، تأخیر در سرعت روتور نسبت به سرعت مرجع در حدود ۴۵/۵ درصد خواهد بود.

۴- نتیجه گیری

وجود خطا در تخمین موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی بر پارامترهای موتور نظیر گشتاور راه اندازی و نیز بر زمان پاسخ سرعت روتور تأثیرگذار خواهد بود. وجود خطا در موقعیت اولیه روتور موتور سنکرون رلوکتانسی باعث می شود مقادیر جریان های I_q و I_d برخلاف مقادیر مورد انتظار در روش MTPA گردد و با توجه به بررسی انجام شده ملاحظه می گردد که گشتاور راه اندازی موتور کاهش پیدا می کند. در نتیجه، این امر باعث ایجاد تأخیر در پاسخ سرعت موتور سنکرون رلوکتانس می گردد. به عنوان مثال با وجود خطای ۳۰ درجه در موقعیت اولیه روتور ملاحظه می شود تأخیر در پاسخ سرعت ۴۰/۵ درصد بیشتر از حالت بدون خطا در موقعیت اولیه روتور است.

مراجع

- [1] K. B. Tawfiq, M. N. Ibrahim, E. E. El-Kholy, and P. Sergeant, "Performance analysis of a rewound multiphase synchronous reluctance machine," *IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 1, pp. 297-309, Feb. 2022.
- [2] Y. Bao, *et al.*, "A novel concept of ribless synchronous reluctance motor for enhanced torque capability," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 4, pp. 2553-2563, Apr. 2020.
- [3] Q. Chen, Y. Yan, G. Xu, M. Xu, and G. Liu, "Principle of torque ripple reduction in synchronous reluctance motors with shifted asymmetrical poles," *IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 3, pp. 2611-2622, Sep. 2020.
- [4] W. Chen, S. Dong, X. Li, Y. Cao, and G. Zhang, "Initial rotor position detection for brushless DC motors based on coupling injection of high-frequency signal," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 133433-133441, 2019.
- [5] G. Bi, G. Wang, G. Zhang, N. Zhao, and D. Xu, "Low-noise initial position detection method for sensorless permanent magnet synchronous motor drives," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 12, pp. 13333-13344, Dec. 2020.
- [6] D. Pasqualotto, S. Rigon, and M. Zigliotto, "Sensorless speed control of synchronous reluctance motor drives based on extended Kalman filter and neural magnetic model," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 2, pp. 1321-1330, Feb. 2023.
- [7] X. Huang, J. Liang, Z. Qian, and J. Li, "An iterative estimation algorithm of prepositioning focusing on the detent force in the permanent magnet linear synchronous motor system," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 10, pp. 8252-8261, Oct. 2020.
- [8] T. Wu, *et al.*, "A fast estimation of initial rotor position for low-speed free-running IPMSM," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 7, pp. 7664-7673, Jul. 2020.
- [9] Z. Wang, Z. Cao, and Z. He, "Improved fast method of initial rotor position estimation for interior permanent magnet synchronous