

طراحی و ساخت راه‌انداز بدون سنسور موتور رلوکتانس سوییچی تحت خطای ناهم‌محوری

ملیکا نیکوئی *

دانش‌آموخته‌ی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران غرب، تهران

سیدابراهیم افجه‌ای

استاد گروه الکترونیک، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده برق و کامپیوتر، تهران

علیرضا سیادتان

استادیار گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران غرب، تهران

تاریخ پذیرش نهایی: ۹۲/۱۲/۶

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۸/۲۵

چکیده

در این مقاله، چگونگی طراحی و ساخت راه‌انداز بدون سنسور یک موتور رلوکتانس سوییچی سه فاز ۱۲/۸ تحت خطای ناهم‌محوری، با به‌کارگیری پالس‌های تشخیص شرح داده شده است. در ابتدا به بررسی انواع خطاهای خروج از مرکز پرداخته و سپس یک روش جدید و کامل در راه‌اندازی بدون سنسور موتور رلوکتانس سوییچی تحت خطای ناهم‌محوری ارائه شده است. موقعیت روتور با پردازش نتایج حاصل از تزریق پالس‌هایی با عرض کم به سیم‌پیچ فازها به‌دست می‌آید. در مرحله‌ی راه‌اندازی، پالس‌های تشخیص به سیم‌پیچ هر سه فاز اعمال شده و مقایسه‌ی نتایج حاصله، فاز مناسب جهت تحریک را مشخص می‌کند. پس از راه‌اندازی، اندازه‌گیری متوالی و پردازش جریان حاصل از اعمال پالس‌های تشخیص به یک فاز غیرفعال، تعیین‌کننده‌ی زمان تحریک فاز بعدی است. در پایان، پالس‌های تحریک ساخته شده توسط سیستم کنترل بدون سنسور با سیگنال سنسورهای تشخیص موقعیت نصب شده بر روی موتور مورد مقایسه قرار گرفته که صحت عملکرد و دقت راه‌انداز ساخته شده را نشان می‌دهد. این راه‌انداز ابزاری مناسب و قابل اطمینان برای انواع موتورهای رلوکتانس سوییچی می‌باشد.

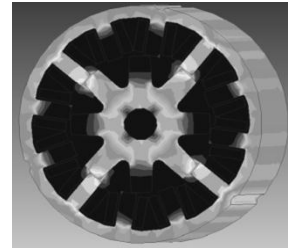
واژه‌های کلیدی

موتور رلوکتانس سوییچی، کنترل بدون سنسور، پالس تشخیص و خطای ناهم‌محوری.

* نویسنده مسوول مکاتبات: melinik2003@yahoo.com

۱. مقدمه

موتور رلوکتانس سوییچی دارای قطب‌های روتور و استاتور نابرابر می‌باشد و سیم‌پیچ‌های تشکیل‌دهنده‌ی یک فاز استاتور به‌صورت سری یا موازی به یکدیگر متصل می‌شوند. شکل ۱ نمایی از یک موتور سه فاز را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موتور رلوکتانس سوییچی سه فاز ۱۲/۸

به‌طور کلی دو روش برای کنترل موتور رلوکتانسی وجود دارد: (Krishnan, 2001)

- الف. کنترل موتور رلوکتانس سوییچی با استفاده از سنسور؛
 - ب. کنترل موتور رلوکتانس سوییچی بدون استفاده از سنسور.
- در روش کنترل موتور رلوکتانس سوییچی با استفاده از سنسور، به‌کارگیری سنسور، علاوه بر افزایش هزینه‌ها، به بروز مسایلی از

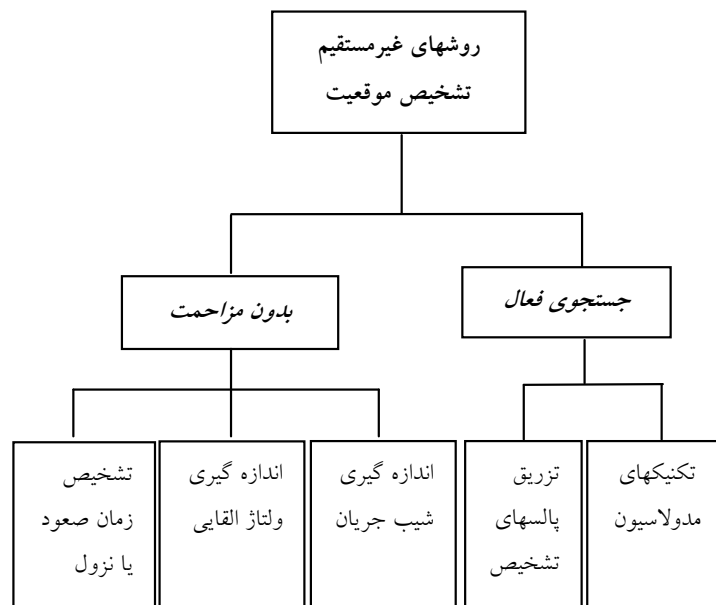
قبیل کاهش قابلیت اطمینان منجر گردیده و نیاز به نگهداری و تنظیمات مجدد را ایجاد می‌کند.

همچنین ورود موتورهای رلوکتانس سوییچی به کاربردهای حساس از قبیل صنایع، خودروسازی و... نیاز به روش‌های کنترل هوشمند را به‌وجود آورده است. از این رو در سال‌های اخیر تحقیقات بیشتر بر روی روش‌های غیرمستقیم متمرکز گردیده است (Ehsani, 2002, 67; Krishnamtury, 2006, 51).

در روش کنترل موتور رلوکتانس سوییچی بدون استفاده از سنسور (روش غیرمستقیم)، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، به‌طور کلی می‌توان روش‌های غیرمستقیم تشخیص موقعیت روتور را به دو گروه تقسیم کرد (Husain, 1996, 94).

در روش‌های بدون مزاحمت، موقعیت روتور با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان فاز فعال و محاسبات مربوط به آن‌ها حین کارکرد موتور مشخص می‌گردد.

در روش‌های جست‌وجوی فعال، سیگنال‌هایی با دامنه‌ی کم و فرکانس بالا به یک فاز غیرفعال تزریق می‌شوند تا تغییرات اندوکتانس فاز و در نتیجه موقعیت روتور به‌دست آید.



شکل ۲. تقسیم‌بندی روش‌های غیرمستقیم تشخیص موقعیت

رایج‌ترین راه‌های تشخیص که در مقالات بررسی شده است عبارت است از: در (Benbouzid, 2012, 14) ساخت راه‌انداز با استفاده از آنالیز سیگنال جریان، در (Afjei, 2005, 223) ساخت راه‌انداز با استفاده از مانیتورینگ میزان لرزش موتور، در (Roux, 2010, 322) ساخت راه‌انداز با استفاده از اندازه‌گیری ولتاژ القایی و در (Kia,

ناهم‌محوری یکی از مشکلات رایج روتور می‌باشد که به‌دلیل وجود فاصله هوایی بین روتور و استاتور رخ می‌دهد. ناهم‌محوری سبب مشکلات فراوانی در موتور می‌شود. بنابراین ضروری است که این مشکل در سریع‌ترین مرحله تشخیص داده شود (Dorrel, 2010, 2675).

تقارن روتور، استاتور و مرکز چرخش روتور نسبت به یکدیگر جابه‌جا می‌گردند.

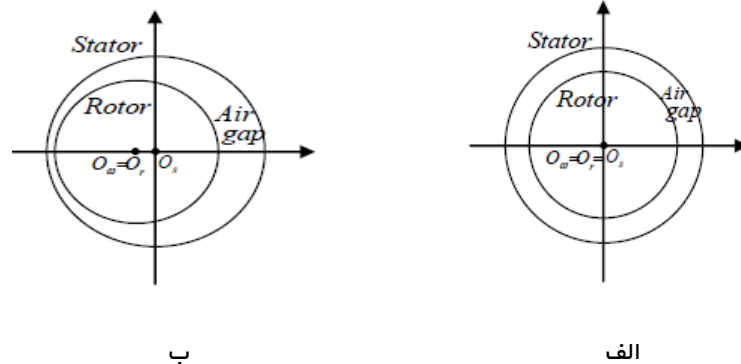
این خطا را می‌توان به صورت کلی در دو نوع تعریف نمود: الف. خروج از مرکز استاتیک^۲، ب. خروج از مرکز دینامیک^۳.

در حالت خروج از مرکز استاتیک، توزیع فاصله‌ی هوایی در فضای بین روتور و استاتور ثابت می‌باشد. خروج از مرکز استاتیک ممکن است به علت بیضوی شدن هسته‌ی استاتور یا به وسیله‌ی موقعیت نادرست روتور یا استاتور در مرحله‌ی نصب رخ دهد.

با توجه به شکل ۳، درصد خطای خروج از مرکز استاتیک (شدت، سطح، میزان و یا درجه خطا) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\mathcal{E}_S = \left(\frac{|\overline{O_s O_w}|}{g} \right) \times 100(\%) \quad ۱$$

در این رابطه \mathcal{E}_S درصد سطح خطای خروج از مرکز استاتیک، g کمینه طول فاصله‌ی هوایی شعاعی در موتور سالم و $|\overline{O_s O_w}|$ میزان جابه‌جایی مرکز روتور و چرخش نسبت به مرکز استاتور می‌باشد که به آن بردار جابه‌جایی استاتیک گویند.



شکل ۳. شماتیکی از موقعیت روتور و استاتور در: الف. موتور سالم، ب. خطای خروج از مرکز استاتیک

در این رابطه \mathcal{E}_D ، درصد خطای خروج از مرکز دینامیک میان محور استاتور و محور روتور و g کمینه طول فاصله‌ی هوایی شعاعی در موتور سالم می‌باشد. همچنین O_w ، O_r و O_s به ترتیب مرکز روتور، مرکز چرخش و مرکز استاتور می‌باشند. β_D زاویه‌ی داخلی خطای دینامیک را نشان می‌دهد و $|\overline{O_w O_r}|$ بردار انتقال دینامیک است.

(2012, 4689) ساخت راه‌انداز با استفاده از اندازه‌گیری گشتاور فاصله هوایی.

در این مقاله طراحی راه‌انداز ساخته شده براساس تزریق پالس‌های تشخیص به سیم‌پیچ‌ها در مرحله سکون صورت گرفته است تا فاز مناسب جهت تحریک و راه‌اندازی انتخاب گردد. سپس در مرحله راه‌اندازی با پردازش میزان جریان حاصل از اعمال پالس‌ها، زمان تحریک فاز بعدی مشخص می‌گردد.

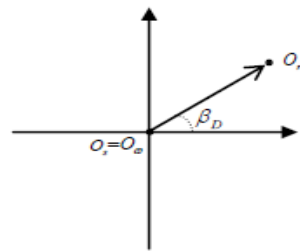
۲. انواع خطاها در موتور رلوکتانس سویچی

خطاهای موجود در موتور رلوکتانس سویچی را می‌توان به طور کلی به دو دسته خطاهای مکانیکی و الکتریکی تقسیم نمود.

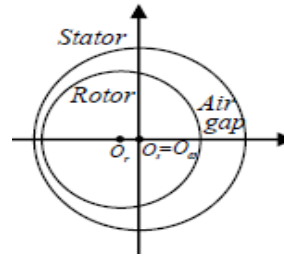
خطای الکتریکی در روتور موتور رلوکتانس سویچی وجود ندارد چون در این بخش هیچ‌گونه مغناطیس، جاروبک و سیم‌پیچی موجود نمی‌باشد. خطاهایی که به علت نقص مکانیکی موتور همانند بلبرینگ‌ها، شفت، روتور و چرخ‌دنده‌ها رخ می‌دهد را خطاهای مکانیکی می‌نامند. در خطای خروج از مرکز^۱ یا به عبارتی دیگر ناهم‌محوری، به دلایل متفاوتی که اکثراً مکانیکی هستند، مرکز

در حالت خروج از مرکز دینامیک، مرکز روتور در مرکز چرخش نبوده و کمینه فاصله‌ی هوایی با گردش روتور تغییر می‌نماید. این غیرهم‌محور بودن ممکن است به وسیله‌ی فاکتورهای مختلفی همچون خمیدگی شفت روتور، ساییدگی یاتاقان، رزونانس مکانیکی در سرعت بحرانی و... رخ دهد. با توجه به شکل ۴، درصد خطای خروج از مرکز دینامیک را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\mathcal{E}_D = \left(\frac{|\overline{O_w O_r}|}{g} \right) \times 100(\%) \quad ۲$$



ب



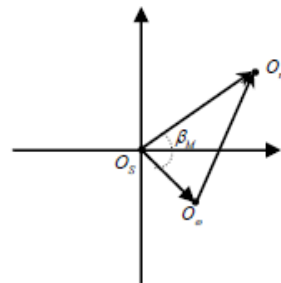
الف

شکل ۴. شماتیک خطای خروج از مرکز دینامیک: الف. موقعیت روتور و استاتور، ب. تعریف زاویه خطای دینامیک

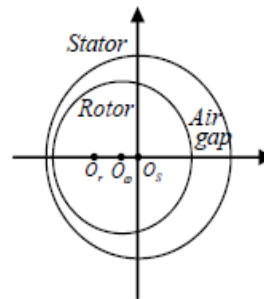
$$\mathcal{E}_M = \left(\frac{|O_s O_r|}{g} \right) \times 100(\%) \quad ۳$$

که در این رابطه \mathcal{E}_M ، درصد خطای خروج از مرکز مرکب می‌باشد و $|O_s O_r|$ بردار انتقال مرکب است.

هنگامی که هر دو خطای خروج از مرکز در یک ماشین همزمان رخ دهد، می‌توان نوع دیگری از خطای خروج از مرکز را به نام خروج از مرکز مرکب^۴ تعریف نمود. با توجه به شکل ۵، O_s و O_r ، O_w به ترتیب معرف مرکز هندسی چرخش روتور، مرکز روتور و مرکز استاتور می‌باشند. درصد خطای خروج از مرکز مرکب به صورت زیر تعریف می‌شود:



ب



الف

شکل ۵. شماتیک خطای خروج از مرکز مرکب: الف. نمایی از موقعیت روتور و استاتور، ب. تعریف زاویه خطای خروج از مرکز مرکب

چنانچه پالس اعمالی به اندازه‌ی کافی کوچک باشد، جریان نیز اندک خواهد بود و می‌توان از ولتاژ ضد محرکه و اثرات اشباع چشم‌پوشی نمود و (۴) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$v \cong L \frac{di}{dt} \quad ۵$$

تشخیص موقعیت روتور شامل دو مرحله است:

مرحله‌ی اول: مرحله‌ی سکون

در این مرحله، در حالت ایستا، هر یک از فازهای موتور با یک پالس ولتاژ کوچک تحریک شده و دامنه‌ی جریان حاصل از آن اندازه‌گیری می‌شود. با مقایسه‌ی جریان‌های هر سه فاز با یکدیگر و با در نظر گرفتن جهت چرخش، فاز مناسب جهت تحریک اولیه مشخص می‌شود.

۳. معرفی روش ارایه شده

۳-۱. تشخیص موقعیت روتور در راه‌انداز ساخته شده

در روش ارایه شده از تشخیص امپدانس با پالس‌های تشخیص استفاده شده است که تغییرات امپدانس سیم‌پیچ‌ها، بر اثر تغییر موقعیت روتور می‌باشد. در موتور رلوکتانسی، ولتاژ فاز از معادله‌ی (۴) به دست می‌آید:

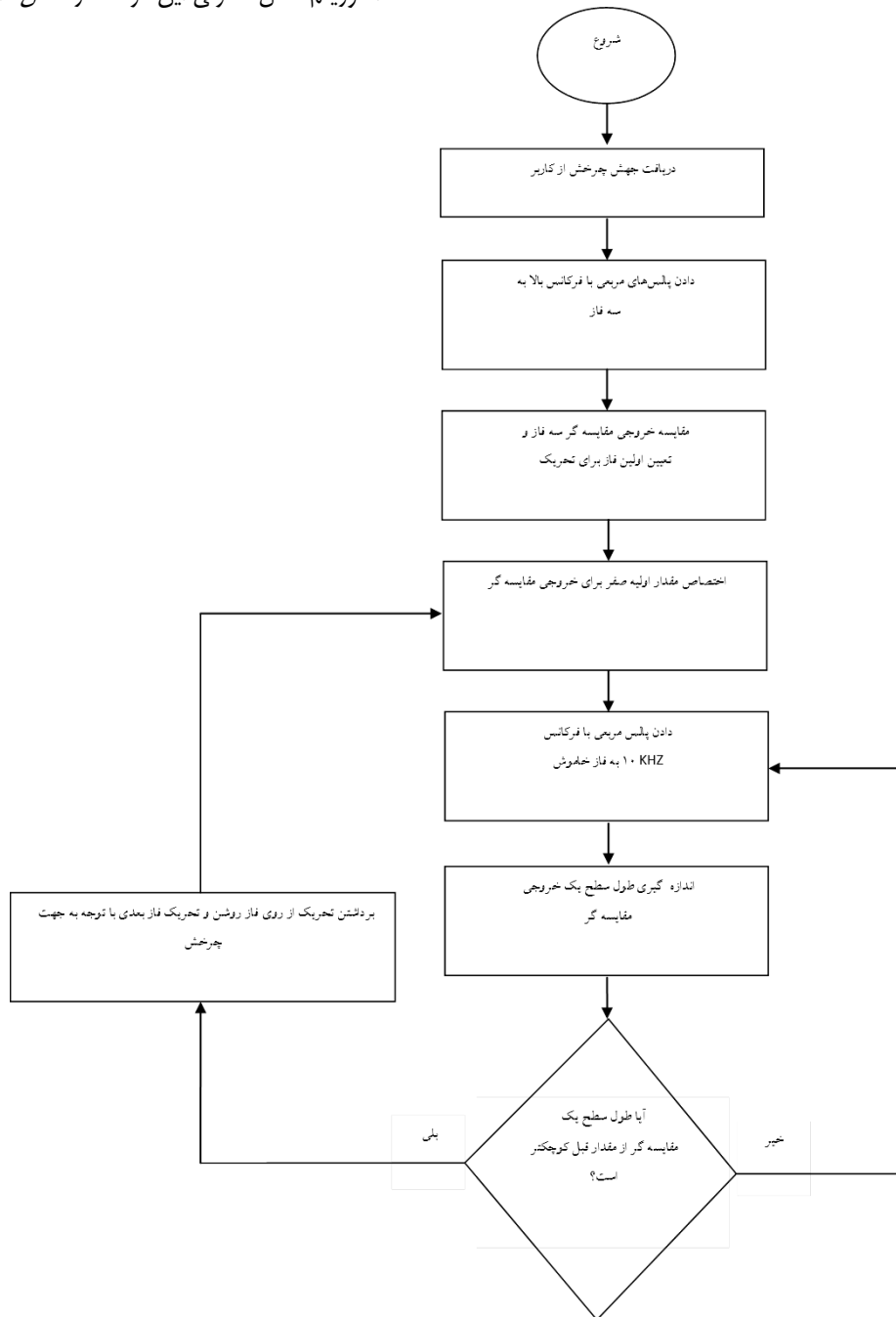
$$v = Ri + \frac{d(Li)}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{\partial L}{\partial i} \frac{di}{dt} + i \omega \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad ۴$$

که در آن L اندوکتانس فاز، R مقاومت فاز، i جریان فاز، ω سرعت زاویه‌ای و θ موقعیت روتور است. با اعمال پالس‌هایی با عرض کم و اندازه‌گیری جریان حاصله می‌توان اندوکتانس فاز را تشخیص داد و

مرحله‌ی دوم: مرحله‌ی چرخش

در این مرحله از آن جایی که یکی از فازها همواره روشن است دیگر نمی‌توان از الگوریتم کنترلی مرحله‌ی قبلی استفاده کرد. در حالت چرخش، فرض بر این است که در هر زمان فقط یک فاز فعال است. به‌عنوان مثال زمانی که فاز A فعال است پالس‌های تشخیص به فاز B تزریق می‌شوند (اگر ترتیب تحریک فازها A، B و C باشد) و جریان فاز B با مقدار قبلی‌اش مقایسه می‌شود. به‌محض کمتر شدن I_B از مقدار قبلی، مشخص می‌شود که اندوکتانس فاز B در حال افزایش است. بنابراین فاز A خاموش شده و فاز B روشن می‌شود. الگوریتم کامل کنترلی این مرحله در شکل ۶ نشان داده شده است.

جهت چرخش، عاملی است که از قبل توسط کاربر تعیین می‌گردد. هرگاه قطب‌های روتور و استاتور هم‌پوشانی بیشتری داشته باشند، فاصله‌ی هوایی کاهش یافته و در نتیجه اندوکتانس آن فاز افزایش می‌یابد و مقدار جریان کمتری از آن فاز خواهد گذشت. می‌توان نتیجه گرفت فازی که کمترین جریان را دارد بیشترین هم‌پوشانی را با قطب‌های روتور دارد. پس این فاز از گزینه‌های انتخاب حذف گردیده و با توجه به جهت چرخش، یکی از دو فاز دیگر انتخاب می‌شود.



شکل ۶. فلوجارت کامل تشخیص موقعیت روتور

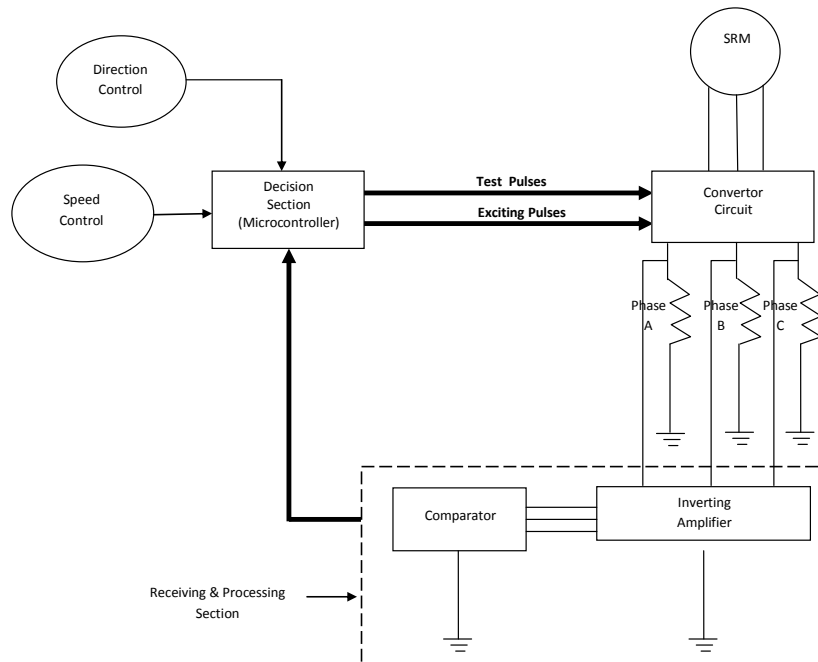
جریان سیم‌پیچ‌ها را از موتور بگیرد و بر روی آن‌ها عملیات لازم همچون مقایسه و تقویت را انجام دهد و سپس اطلاعات را به صورت سیگنال‌های قابل پردازش برای بخش تصمیم درآورد. بخش تصمیم شامل یک میکروکنترلر است که اطلاعات پردازش شده را دریافت نموده و با آنالیز این اطلاعات موقعیت روتور را شناسایی می‌کند و پالس‌های تحریک مناسب را بر روی فازهای موتور می‌فرستد.

۲-۳. بررسی ساختار مدار راه‌انداز ساخته شده در روش

پیشنهادی

به منظور پیاده‌سازی مراحل فوق در این پروژه از مدار راه‌انداز نشان داده شده در شکل ۷ استفاده شده است. همان‌گونه که از شکل پیداست این مدار راه‌انداز شامل دو قسمت یعنی مدار مبدل قدرت موتور و مدار کنترلی می‌باشد.

مدار کنترلی خود شامل دو بخش دریافت و پردازش و بخش تصمیم است. وظیفه‌ی بخش دریافت و پردازش این است که اطلاعات



شکل ۷. بخش سخت‌افزاری راه‌انداز ساخته شده

در نخستین گام راه‌اندازی، به تعیین عرض پالس‌های تشخیص می‌پردازیم. بدین منظور پالس‌هایی با عرض کم به سیم‌پیچ‌های موتور اعمال می‌شود و ولتاژ ناشی از اعمال این پالس‌ها بر روی مقاومت سری با سیم‌پیچ فازها اندازه‌گیری می‌شود. اگر کوچکترین ولتاژ اندازه‌گیری شده از ده برابر ولتاژ معتبر مبدل آنالوگ به دیجیتال کمتر باشد، عرض پالس اضافه می‌شود. این عمل تا جایی ادامه می‌یابد که کوچکترین ولتاژ اندازه‌گیری شده از ده برابر ولتاژ معتبر مبدل بیشتر باشد. بعد از تعیین عرض پالس، پالس‌های تشخیص به دست آمده سه بار به فازهای موتور اعمال می‌شوند و بعد از هر بار، ولتاژ حاصله روی مقاومت سری با فازها اندازه‌گیری می‌شود. اگر این مقادیر متوالی مربوط به هر فاز با یکدیگر مساوی باشند، می‌توان دریافت که عرض پالس به دست آمده، شرایط به کارگیری را داراست. حال پالس‌های تشخیص با عرض تعیین شده در مرحله‌ی قبل به هر سه فاز موتور اعمال می‌شود و با مقایسه‌ی جریان‌های هر سه فاز با

۴. نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی

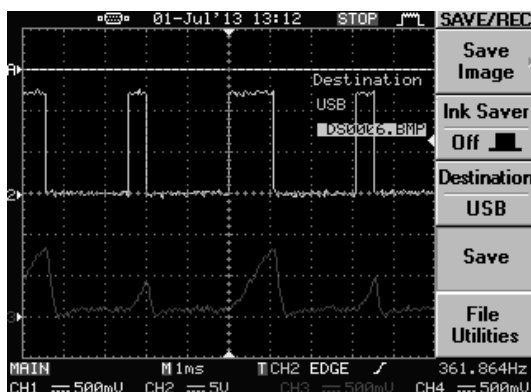
همان‌طور که در ابتدا گفته شد روش پیشنهادی بر روی یک موتور رلوتکناسی سه فاز تحت خطای ناهم‌محوری پیاده‌سازی شده است که مشخصات موتور تست شده عبارتند از:

جدول ۱. ابعاد موتور رلوتکناس سوئیچی سه فاز پیاده‌سازی شده

پارامتر	مقدار
تعداد فازها	۳
تعداد دندان‌های استاتور به روتور	۱۲ به ۸
قطر خارجی استاتور	۷۲ میلی‌متر
قطر داخلی استاتور	۶۲ میلی‌متر
قطر خارجی روتور	۴۰ میلی‌متر
طول پشته	۳۰ میلی‌متر
طول فاصله هوایی	۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر
قطر محور روتور	۱۰ میلی‌متر
تعداد دور سیم‌پیچی	۱۱۰ دور

و جریان حاصل از آن در یک فاز را نشان می‌دهد.

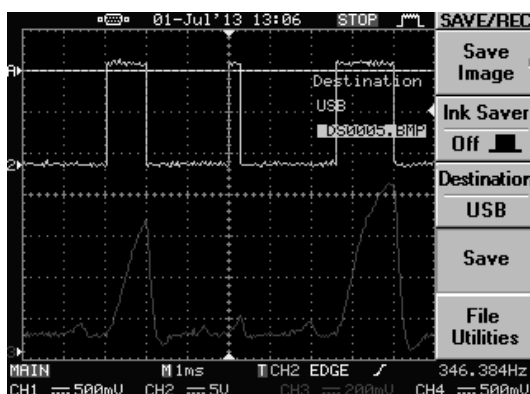
یکدیگر و با در نظر گرفتن جهت چرخش، فاز مناسب جهت تحریک انتخاب می‌شود. شکل ۸ پالس‌های تشخیص اعمال شده به یک فاز



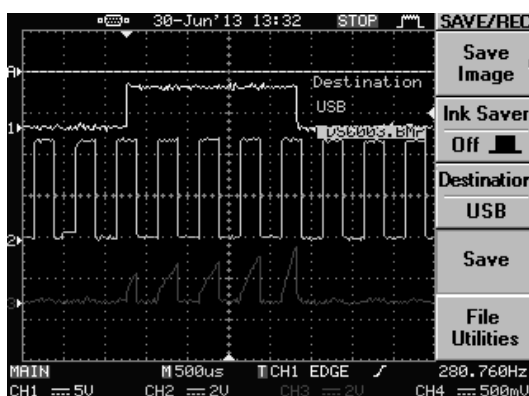
شکل ۸. جریان حاصل از اعمال پالس به هر سه فاز و پالس اعمالی به یکی از فازها در حال سکون

جریان در سیم‌پیچ هر فاز شامل دو بخش است: یک بخش از جریان مربوط به تحریک اصلی آن فاز است و بخش دیگر ناشی از تزریق پالس‌های آزمون می‌باشد که همانگونه که از شکل پیداست جریان پالس‌های آزمون در مقابل جریان تحریک اصلی هر فاز ناچیز است. همچنین در شکل ۱۰ جریان سیم‌پیچ فاز خاموش (ناشی از تزریق پالس‌های آزمون) از لحظه‌ی شروع تا پایان تحریک فاز فعال آورده شده است.

در مرحله‌ی بعدی که در واقع مرحله‌ی چرخش می‌باشد، پالس‌های تشخیص به فاز مورد مطالعه که در واقع با توجه به جهت چرخش، فاز بعدی جهت تحریک می‌باشد، اعمال می‌گردد و جریان آن فاز مرتباً با مقدار قبلی‌اش مقایسه می‌شود و به محض این که از مقدار قبلی‌اش کمتر شد فاز فعال خاموش شده و فرمان تحریک فاز بعدی صادر می‌گردد. شکل ۹ جریان سیم‌پیچ یک فاز را در هنگام چرخش نمایش می‌دهد.



شکل ۹. پالس‌های تشخیص و فرمان اعمال شده به یک فاز و جریان حاصله بعد از تقویت در حال چرخش

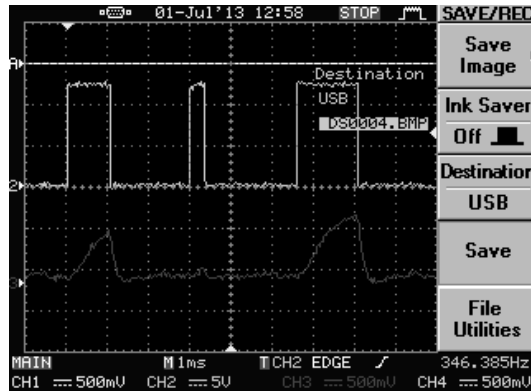


شکل ۱۰. جریان فاز خاموش ناشی از تزریق پالس‌های آزمون

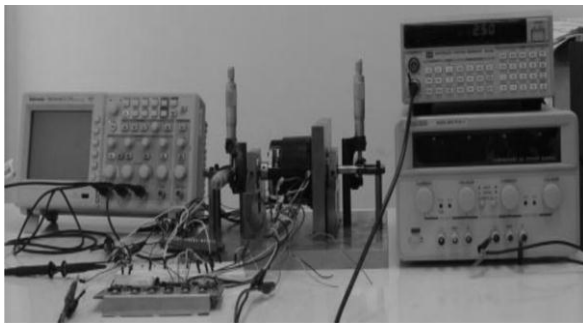
۵. آزمایش صحت عملکرد

نتایج حاصله در شکل ۱۱ می‌توان نشان داد که تشخیص موقعیت و صدور فرمان‌های تحریک توسط سیستم راه‌انداز به‌درستی صورت گرفته است. در شکل ۱۲، ساختار کلی موتور به‌همراه تجهیزات آزمایشگاهی و راه‌انداز ساخته شده، آمده است.

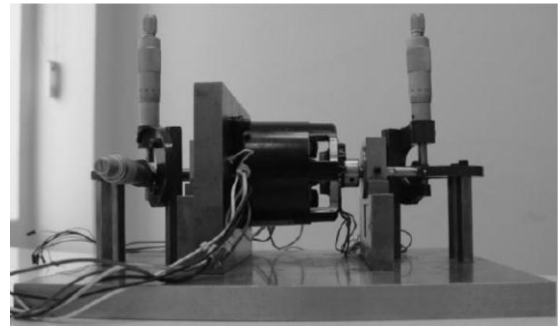
برای اطمینان از صحت عملکرد مدار راه‌انداز، مداری شامل یک سنسور نوری تشخیص موقعیت که برای کنترل با سنسور موتور، ساخته شده بود در پشت موتور نصب گردید و همزمان سیگنال‌های تولید شده توسط سنسور موقعیت نیز اندازه‌گیری شد. از مقایسه‌ی



شکل ۱۱. فرمان‌های تحریک گیت حاصل از سنسور تشخیص موقعیت و جریان حاصل



ب



الف

شکل ۱۲. الف. موتور رلوکتانس سویچی، ب. موتور همراه با تجهیزات آزمایشگاهی و راه‌انداز ساخته شده

۶. نتایج

این روش، برای تعیین موقعیت روتور دیگر نیازی به سنسور نمی‌باشد که سبب شده مشکلات و هزینه‌ی ناشی از نصب سنسور مرتفع گردد. الگوریتم معرفی شده از امتیاز توانایی راه‌اندازی موتور از حالت ایستا، تصحیح مداوم پالس‌های تشخیص اعمالی به موتور و گشتاور منفی بسیار ناچیز بر اثر اعمال پالس‌های تشخیص، بهره‌مند است.

در این مقاله، هدف ساخت راه‌انداز بدون سنسور موتور رلوکتانس سویچی تحت خطای ناهم‌محوری مطرح شد و نتایج حاصل از راه‌اندازی موتور جهت کارکرد آن تحت شرایط خطا ارایه گردید. در روش ارایه شده، تعیین موقعیت روتور با تزریق پالس‌هایی با فرکانس بالا به یک فاز غیرفعال صورت می‌گیرد. با راه‌اندازی موتور به کمک

9. Roux, W.; Harley, R.G. & Habetler, T.G. (2010), "Detecting rotor faults in low power permanent magnet synchronous machines," IEEE transactions on power electronics, Vol. 22, No. 1, pp. 322-328.

پی‌نوشت‌ها

1. Eccentricity
2. Static
3. Dynamic
4. Mixed

منابع

1. Afjei, E.; Nezamabadi, M.M. & Javeh, A. (2005), "A complete and novel sensorless method for rotor position sensing in switched reluctance motor drives," WSEAS transactions, Issue 4, Vol. 2, pp. 223-227.
2. Benbouzid, M.; Vieira, M. & Theys, C. (2012), "Induction motors' faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques," IEEE transactions on power electronics, Vol. 14, No. 1, pp. 14-22.
3. Dorrell, D.; Popescu, M. & Ionel, D. (2010), "Unbalanced magnetic pull due to asymmetry and low-level static rotor eccentricity in fractional-slot brushless permanent-magnet motors with surface-magnet and consequent-pole rotors," IEEE Transactions on magnetics, Vol. 46, No. 7, pp. 2675-2685.
4. Ehsani, M. & Fahimi, B. (2002), "Elimination of position sensors in switched reluctance motor drives: state of the art and future trends," IEEE transactions on industrial electronics, Vol.49, No. 1, pp. 67-72.
5. Husain, I. (1996), "Indirect rotor-position estimation techniques for switched reluctance motors- A review," Electromotion, department of electrical engineering, the university of Akron, pp. 94-102.
6. Krishnan, R. (2001), "Switched reluctance motor drives," Modeling, simulation, analysis, design and applications by CRC Press.
7. Krishnamurty, M.; Emadi, A.; Asadi, P. & Ehsani, M. (2006), "Making the case for applications of switched reluctance motor technology in automotive products," IEEE transactions on power electronics, Vol. 21, No. 3, pp. 51-57.
8. Kia, S.; Henao, H. & Capolino, G. (2012) "Torsional vibration effects on induction machine current and torque signatures in gearbox-based electromechanical system," IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 56, No. 11, pp. 4689-4699.