

# الگوریتم تشخیص موقعیت با قابلیت تعیین هم‌زمان خطای بار مکانیکی نامتقارن در موتورهای سوئیچ رلوکتانسی

احسان خیابانی و حسن مرادی چشمه‌یگی

تقسیم می‌شوند: ۱) تشخیص نوع و موقعیت خطا و ۲) امکان ادامه عملکرد برای مدت زمان مشخص پس از رخداد خطا. این موضوع در کاربردهای هوافضا و خودروی الکتریکی که ادامه عملکرد موتور پس از رخداد خطا حیاتی می‌باشد از اهمیت بالایی برخوردار است. عمده تحقیقات اخیر، معطوف به معرفی روش‌ها و الگوریتم‌هایی می‌باشد که علاوه بر تشخیص موقعیت و راه‌اندازی موتورهای سوئیچ رلوکتانسی، ابتدا خطا را تشخیص و اقدامات لازم را در جهت کاهش صدمات وارد بر بار یا موتور انجام دهند.

از آنجا که داشتن موقعیت روتور در این خانواده از موتورها در راه‌اندازی و کنترل بسیار مهم است، در دهه‌های اخیر تحقیقات بسیاری پیرامون روش‌های تشخیص موقعیت موتورهای سوئیچ رلوکتانسی انجام شده که آنها را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود:

۱) روش‌های مبتنی بر سخت‌افزار خارجی (سخت‌افزارهای افزون بر سخت‌افزار درایو) نظیر روش‌های تزریق پالس [۲] تا [۵].

۲) روش‌های مبتنی بر اطلاعات نظیر تکنیک‌های تجمیع شار که نیازمند فضای بزرگی برای ذخیره اطلاعات مغناطیس موتور است [۶] و [۷].

۳) روش مبتنی بر مدل ماشین نظیر روش مشاهده‌گرها حالت [۸] و [۹]، روش‌های اندازه‌گیری سیگنال [۱۰]، تکنیک‌های اندوکتانس محور [۱۱] و [۱۲] و شبکه‌های عصبی و منطق فازی [۱۳] و [۱۴] که همگی نیازمند پروسسورهای بسیار سریع همانند DSPها با توان میلیون‌ها دستور در ثانیه است.

رخداد خطا در موتور سوئیچ رلوکتانسی از نقطه نظرهای مختلف بررسی شده است. در [۱۵] الگوریتمی جهت تشخیص خطای سیگنال موقعیت معرفی شده که در این الگوریتم اطلاعات روش بدون سنسور به وسیله سنسور نصب‌شده ارزیابی می‌شود. همچنین تحقیقات زیادی به خطاهای ناشی از خرابی یا عملکرد اشتباه مبدل قدرت پرداخته‌اند. الگوریتم‌های معرفی‌شده، خطاهای ناشی از خرابی ترانزیستورها و دیودهای قدرت که منجر به خطای اتصال کوتاه و یا مدار باز می‌شوند را تشخیص می‌دهند و موقعیت خطا را مشخص می‌کند [۱۶] تا [۱۸]. در [۱۹] روش تشخیص خطاهای مکانیکی عدم هم‌محوری شفت در حالت‌های استاتیک، دینامیک و تلفیقی معرفی شده است. در این الگوریتم، ولتاژ سینوسی با بهره‌گیری از سخت‌افزار اضافی به هر یک از فازها که قطب متناظر با آن هم‌راستا است اعمال می‌شود. دامنه جریان حاصل از ولتاژ تزریقی، شاخص تشخیص وجود و شدت خطا عدم هم‌محوری است. بعضی از مقالات دیگر علاوه بر ارائه روش‌هایی در جهت مقاوم‌سازی موتور سوئیچ رلوکتانسی در مواجهه با خطاهای پرداخته است. در [۲۰] برای مقاوم‌سازی موتور در موارد خاص از تلفیق دو موتور سه‌فاز و دو مبدل قدرت به صورت موازی استفاده شده است. در این روش یک دسته سه‌فاز از سیم‌پیچ‌ها به عنوان

چکیده: در این مقاله، یک الگوریتم نوین برای تشخیص موقعیت روتور با قابلیت تعیین هم‌زمان خطا از نوع عدم تقارن بار مکانیکی در موتورهای سوئیچ رلوکتانسی معرفی شده است. این الگوریتم با بهره‌گیری از روش تزریق پالس و الهام از مدلاسیون موقعیت پالس دیجیتال، موقعیت روتور را تشخیص داده و با بهره‌گیری از این اطلاعات مکانی روتور، دوران موتور را کنترل می‌نماید. در این روش در حین چرخش روتور، با تزریق پالس به فاز غیر فعال، اندوکتانس فاز که با موقعیت روتور متناسب می‌باشد، اندازه‌گیری شده و با کمک یک مدار مبدل اطلاعات جریان فازها به پالس دیجیتال و یا به عبارتی به یک رشته بیت تبدیل می‌گردد. از آنجا که تعداد پالس‌های تزریقی ثابت است، در شرایط عملکرد صحیح موتور رشته بیت خروجی دارای طول ثابت و متناسب با گشتاور بار مکانیکی است. در صورت بروز خطای مکانیکی در نتیجه نوسان در بار مکانیکی، تعداد بیت‌ها متناسب با میزان خطا تغییر خواهد کرد که با شمارش تعداد بیت‌های خروجی مورد تشخیص وجود خطا در بار مکانیکی تعیین می‌شود. چنین الگوریتمی صدمات ناشی از عدم تقارن در بار مکانیکی را که می‌تواند منجر به از بین رفتن موتور و بار متصل به شفت شود کاهش می‌دهد. از مزایای این روش می‌توان به تجمیع روش تشخیص موقعیت و تشخیص خطا در سرعت‌های پایین و متوسط اشاره کرد. الگوریتم در ابتدا توسط نرم‌افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی و سپس روی یک موتور ۵۰ وات سوئیچ رلوکتانسی ۸/۱۲ پیاده‌سازی شده است. مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و تست عملی، عملکرد صحیح روش پیشنهادی را تصدیق می‌نماید.

کلیدواژه: موتور سوئیچ رلوکتانسی، تشخیص موقعیت روتور، تشخیص خطای عدم تقارن، تزریق پالس، مدلاسیون موقعیت پالس دیجیتال.

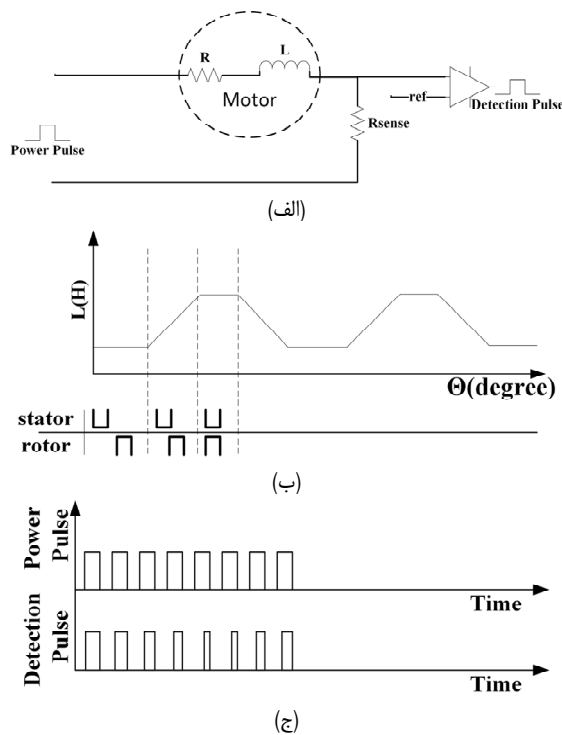
## ۱- مقدمه

در چند دهه اخیر با پیشرفت الکترونیک قدرت و میکروکنترلرها تکنولوژی مدارات راه‌انداز در موتورهای سوئیچ رلوکتانسی به سرعت توسعه یافته و این خانواده از موتورهای الکتریکی را به عنوان یک گزینه مطرح در صنایع مختلف نظیر صنایع خودروسازی، هوافضا و انرژی‌های تجدیدپذیر در کنار موتورهای القایی و سنکرون مغناطیس ثابت قرار داده است. موتورهای سوئیچ رلوکتانسی دارای ساختمان و طراحی ساده‌ای هستند که منجر به کاهش هزینه نسبت به ماشین‌های دیگر با توان مشابه می‌شود [۱]. از دیگر مزایای برجسته این ماشین‌ها مقاوم بودن در برابر خطاست. نتایج به دست آمده از تحقیقات پژوهشگران نشان می‌دهد روش‌های تشخیص خطا در موتور سوئیچ رلوکتانسی به دو بخش کلی

این مقاله در تاریخ ۹ خرداد ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۸ مرداد ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

احسان خیابانی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه، باغ ابریشم کرمانشاه، (email: e.khiabani15@gmail.com).

حسن مرادی چشمه‌یگی، استادیار گروه مهندس برق دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، (email: ha.moradi@razi.ac.ir).



شکل ۲: (الف) شماتیک مدار تشخیص، (ب) اندوکتانس فاز و (ج) پالس تزریقی و تشخیص.

تشخیص اندوکتانس، قطاری از پالس‌های ولتاژ در فرکانس بالا و پهنای کم به سیم‌پیچ‌های آزاد اعمال می‌شود. این پالس‌ها باعث ایجاد جریانی کم-نسبت به جریان نامی- در سیم‌پیچ می‌شود. این جریان توسط یک مقاومت تبدیل به ولتاژ و ولتاژ حاصل توسط یک مقایسه‌گر تبدیل به پالس دیجیتال می‌شود. معادله (۱) رابطه بین جریان و ولتاژ ماشین را مدل می‌کند

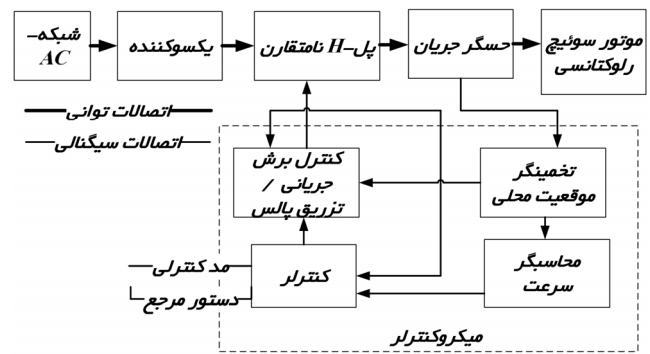
$$V_{DC} = Ri + i \frac{dL(\theta, i)}{dt} + L(\theta, i) \frac{di}{dt} \quad (1)$$

در معادله فوق  $R$  مقاومت،  $L$  اندوکتانس سیم‌پیچ، ولتاژ لینک  $V_{DC}$  و  $i$  جریان سیم‌پیچ است. پالس تزریقی، فرکانسی بالا و پهنایی در حد ۱۰ درصد دارد و در این صورت، جریان بسیار جزئی از سیم‌پیچ‌ها عبور می‌کند. بنابراین  $Ri$  و  $i \frac{dL}{dt}$  قابل چشم‌پوشی هستند و در نتیجه (۱) به صورت (۲) و (۳) ساده می‌شود

$$V_{DC} = L \frac{\Delta I}{\Delta T} \quad (2)$$

$$L = V_{DC} \frac{\Delta T}{\Delta I} \quad (3)$$

در روابط فوق  $\Delta I$  تغییرات جریان در ازای تزریق پالس ولتاژ است و پس از اعمال پالس ولتاژ به سیم‌پیچ جریان افزایش می‌یابد. این جریان پس از عبور از یک مقاومت به ولتاژ تبدیل می‌شود. ولتاژ به عنوان ورودی به یک مقایسه‌گر آنالوگ وارد شده و تبدیل به پهنای پالس می‌شود. مقایسه‌گر پس از عبور ولتاژ از سطحی مشخص شده خروجی خود را از صفر به یک تبدیل می‌کند و بنابراین پهنای پالس می‌تواند متناسب با خیزش جریان از صفر تا مقداری مشخص در نظر گرفته شود. این مقدار مشخص وابسته به مشخصات نامی موتور است. از آنجا که مقدار تغییرات جریان برای یک‌شدن پالس مقایسه‌گر ثابت است، اندوکتانس سیم‌پیچ، متناسب با پهنای پالس دیجیتال خروجی مقایسه‌گر در نظر گرفته شده است.



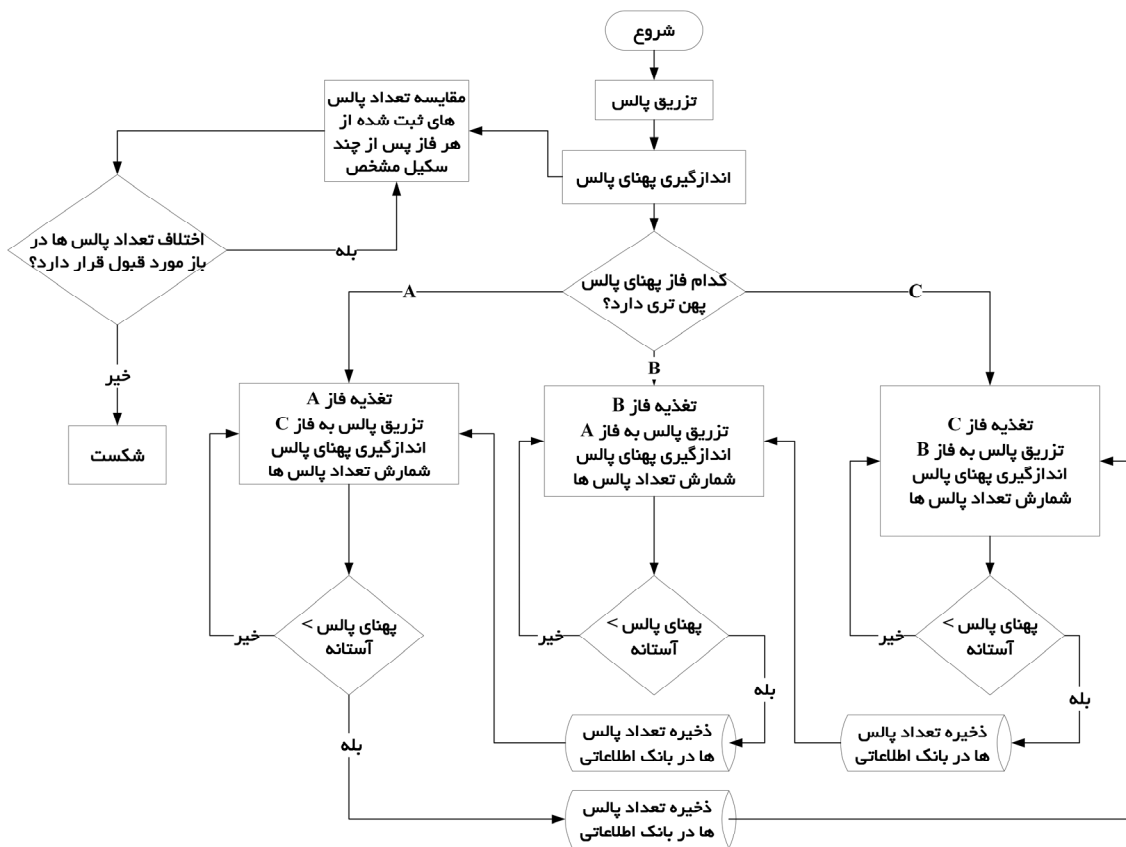
پشتیبان با مبدل جدا برای پوشش خطاها در کاربردهای حساس استفاده می‌شود. در [۲۱] برای افزایش قابلیت اطمینان موتور و عدم نیاز به جداکردن بار از موتور، کفشک‌ها و سیم‌پیچ‌ها به صورت ماژولی طراحی شده تا در صورت بروز مشکل بدون نیاز به توقف کامل، بخش عامل مشکل تعویض گردد. در [۲۲] تأثیر هندسه‌های مختلف روتور ماشین سوئیچ رلوکتانسی بر نشانگرهای مختلف تشخیص خطا بررسی شده است. برخی مقالات نیز به دنبال تلفیق روش‌های تشخیص خطا و تشخیص موقعیت هستند تا در صورت بروز مشکل علاوه بر حفظ عملکرد مطلوب موتور، موقعیت و خطای رخداد را نیز تعیین کند [۲۳].

یکی از انواع خطا در موتورهای الکتریکی عدم تقارن در بار مکانیکی متصل به شفت و در نتیجه تشدید نوسان در سرعت موتور است. در این مقاله الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص خطای ناشی از عدم تقارن بار مکانیکی متصل به شفت ارائه شده است. همچنین از دیگر قابلیت‌های روش پیشنهادی در این مقاله، تشخیص هر نوع خطای دیگری در ماشین که باعث تشدید نوسان در سرعت شود است. الگوریتم حاضر علاوه بر تشخیص موقعیت روتور، با شمارش تعداد بیت‌های پالس تشخیص در هر توالی روشن‌شدن یک فاز وجود عدم تقارن در بار را تشخیص می‌دهد. در بخش کنترلی برای پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی از کنترلر STM32F4XX که برای مصارف صنعتی و به خصوص درایو موتور معرفی شده، استفاده گردیده است. در بخش‌های بعدی به ترتیب جزئیات تئوری و نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی ارائه می‌گردد. در این مقاله در بخش دوم، تئوری الگوریتم، در بخش سوم شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی و در بخش چهارم نتیجه‌گیری و جمع‌بندی ارائه شده است.

## ۲- تئوری الگوریتم

### ۱-۲ تشخیص موقعیت

در بهره‌برداری از موتور سوئیچ رلوکتانسی مهم‌ترین موضوع، الگوریتم تشخیص موقعیت است و لذا گام نخست معرفی الگوریتم تشخیص موقعیت است. الگوریتم ایده‌آل تشخیص موقعیت به الگوریتمی گفته می‌شود که بدون نیاز به سخت‌افزار اضافی، وظیفه خود را انجام دهد. در روش معرفی شده از حداقل المان‌های الکتریکی برای آماده‌سازی و پردازش سیگنال استفاده شده است. شکل ۱ توپولوژی کلی درایور را نشان می‌دهد. این الگوریتم مبتنی بر رابطه بین قطب استاتور و برجستگی روتور است. همان‌طور که در شکل ۲ آمده است هرچه فاصله قطب استاتور از برجستگی روتور بیشتر باشد رلوکتانس بزرگ‌تر است. رلوکتانس با اندوکتانس نسبت عکس دارد و بنابراین هرچه فاصله محور قطب روتور و استاتور افزایش یابد، اندوکتانس کوچک‌تر می‌شود و بالعکس. برای



شکل ۳: الگوریتم تشخیص هم‌زمان موقعیت و خطا.

مدارات الکتریک نوری نیز برای رفع آثار مخرب نویزهای محیطی بهره گرفت. شکل ۳ الگوریتم تشخیص موقعیت و سوئیچ‌زنی را نشان می‌دهد.

## ۲-۲ بار مکانیکی نامتقارن

برای مدل‌سازی یک بار با گشتاور نوسانی از یک آونگ استفاده شده است. مجموعه موتور و بار متصل به شفت به گونه‌ای نصب شده که آونگ تحت تأثیر گرانش باشد. جرمی قابل تعویض به انتهای آونگ متصل شده تا به واسطه آن بتوان میزان عدم تقارن را نیز تغییر داد. آونگ متصل شده به شفت موتور باعث می‌شود تا گشتاور وارده به دلیل اثر گرانش، نوسانی شبه‌سینوسی داشته باشد. معادله (۶) رابطه حاکم بر گشتاور در زوایای مختلف روتور را مدل می‌کند

$$T_L = T_f + mgl \sin \theta \quad (۶)$$

در معادله فوق  $m$  جرم وزنه متصل به انتهای آونگ،  $g$  ثابت گرانش،  $l$  طول آونگ،  $\theta$  زاویه محور آونگ و  $T_f$  گشتاور بادخوری موتور است. شکل ۴ دیاگرام آزاد گشتاور آونگ را نشان می‌دهد.

## ۳-۲ الگوریتم تشخیص خطا

الگوریتم تشخیص خطای پیشنهادی بر مبنای تغییر سرعت چرخشی است که به دلیل تغییر گشتاور رخ می‌دهد. این الگوریتم قابلیت تشخیص سرعت روتور را دارد و همچنین در صورت وجود سیگنال در خروجی برد تشخیص، صحت عملکرد ادوات سوئیچ‌زنی تأیید می‌شود. برخی از بارها ذاتاً نامتقارن هستند که در بخشی از سیکل کاری، گشتاور قابل توجه و در بخش دیگر گشتاور نسبتاً ناچیزی به روتور اعمال می‌کنند. در چنین کاربردی، فاز کاری بار متصل می‌تواند بسیار مهم باشد. این الگوریتم نیازی به سخت‌افزاری افزون بر سخت‌افزار تشخیص ندارد و صرفاً به صورت نرم‌افزاری طراحی شده است.

مشخصات پالس تزریق‌شده (فرکانس و پهنای پالس) به گونه‌ای انتخاب می‌شود که کمترین تأثیر منفی را بر عملکرد موتور تحمیل کند. بنابراین می‌توان مشخصات پالس را به گونه‌ای تنظیم کرد که منجر به تولید گشتاوری کمتر از گشتاور در حالت بی‌باری گردد. معادله (۴) حداکثر پهنای پالس را مشخص می‌کند

$$\Delta t_{\max} < \frac{L_{\min}}{V_{DC}} \sqrt{2T_f \frac{\beta_s}{L_{\max} - L_{\min}}} \quad (۴)$$

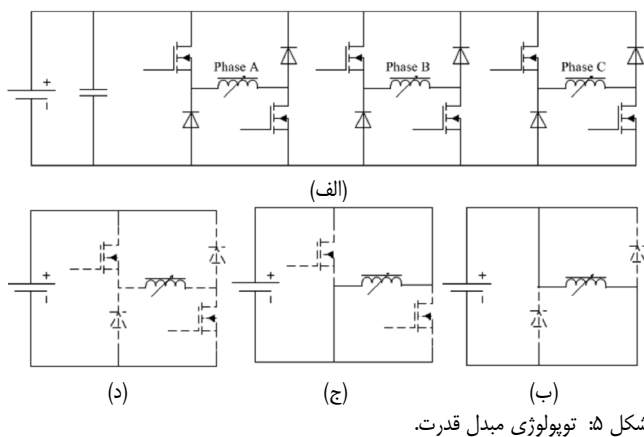
در معادله فوق  $T_f$  گشتاور بادخوری،  $L_{\max}$  و  $L_{\min}$  به ترتیب اندوکتانس کمینه و بیشینه و  $\beta_s$  کمان قطب استاتور است.

با توجه به توضیحات داده‌شده می‌توان مدار معادل سیم‌پیچ موتور را همانند یک مدار  $RL$  در نظر گرفت که یک ولتاژ پله به آن اعمال شده است. بنابراین با استفاده از معادلات حاکم بر مدار  $RL$ ، رابطه بین ولتاژ-حسگر (دو سر مقاومت) به صورت (۵) بازنویسی می‌شود

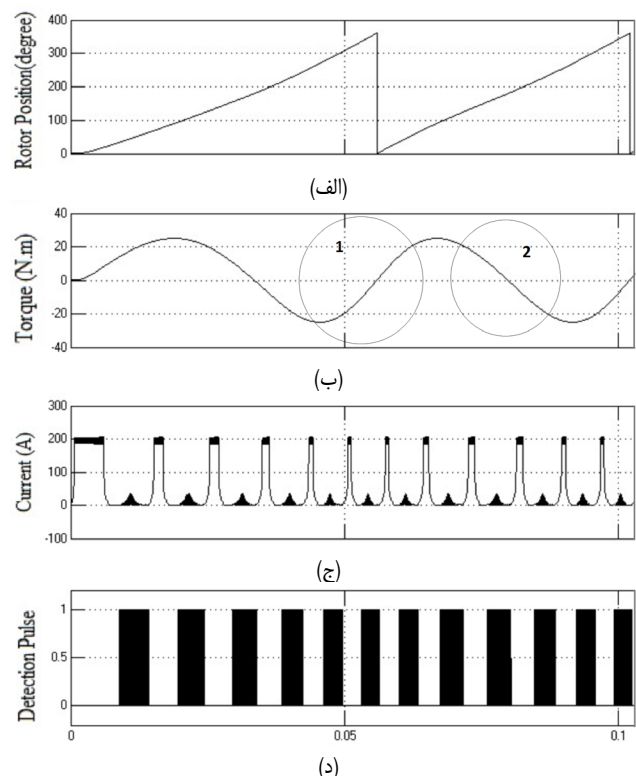
$$V_{Rsen} = V_{DC} (1 - \exp \frac{-t}{\tau}), \quad \tau = \frac{L}{R} \quad (۵)$$

در معادله فوق  $L$  اندوکتانس سیم‌پیچ،  $R$  مقاومت سیم‌پیچ و  $\tau$  ثابت زمانی مدار است. با توجه به (۵) هرچه مقدار اندوکتانس بزرگ‌تر باشد ولتاژ حسگر، زمان بیشتری برای رسیدن به ولتاژ مشخص شده نیاز دارد. شکل ۲ تغییرات پهنای پالس برای حالت‌های مختلف قطب روتور و استاتور را نشان می‌دهد. از ثابت زمانی مدار معادل می‌توان فرکانس مناسب برای پالس تشخیص را تعیین کرد. هرچه فرکانس پالس دیجیتال از این فرکانس کمتر باشد، جریان مدار کمتر خواهد بود. پس فرکانس و پهنای پالس با در نظر گرفتن (۴) و (۵) تعیین می‌شود.

خروجی مدار مقایسه‌گر به صورت پالس دیجیتال است که ایزولاسیون مدارات کنترل و قدرت از یکدیگر را در عمل محقق می‌سازد. می‌توان از



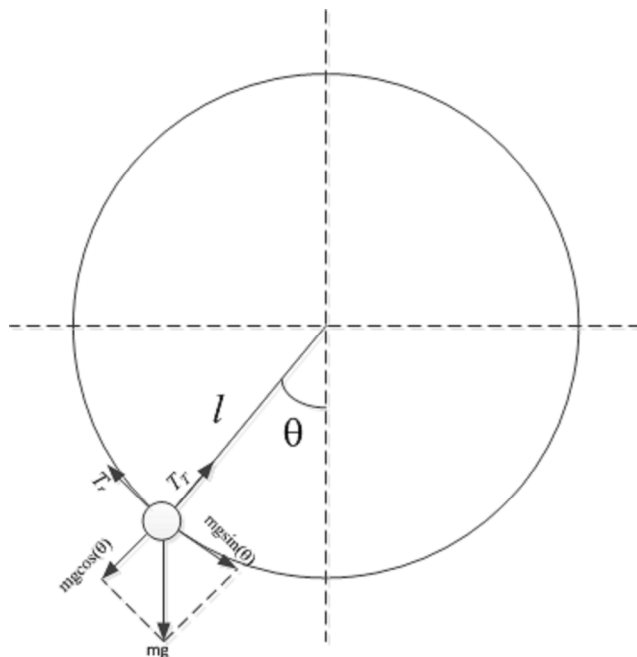
شکل ۵: توپولوژی مبدل قدرت.



شکل ۶: (الف) منحنی زاویه روتور، (ب) منحنی گشتاور بار، (ج) منحنی جریان فاز و (د) خروجی برد تشخیص.

این درایور از یک مبدل قدرت کلاسیک پل - H استفاده می‌کند. این مبدل برای هر فاز دو ماسفت و دو دیود دارد و در هر سیکل کاری، سه فاز مختلف را طی می‌کند. در فاز اول سوئیچ‌ها باز بوده و دیودها هدایت می‌کنند، در فاز دوم سوئیچ‌ها قطع و دیودها هدایت می‌کنند و در فاز نهایی سوئیچ‌ها و دیودها خاموش هستند (شکل ۵). مبدل استفاده شده در بسیاری از مقالات برای درایو این موتور استفاده شده است.

در شبیه‌سازی برای مدل کردن نوسان گشتاور از (۶) کمک گرفته شده است. گشتاور سینوسی به صورت تابعی از زاویه روتور به موتور اعمال می‌شود که در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود. همان طور که در شکل ۶-ج دیده می‌شود، پهنای جریان فاز وابسته به گشتاور در حال تغییر کردن است. دو ناحیه ۱ و ۲ در شکل ۶-ب که با دایره محصور شده در شکل ۷ و ۸ بزرگ‌نمایی شده‌اند. شکل ۷ گشتاور در حال افزایش و تعداد پالس‌های خروجی برد تشخیص را به تصویر کشیده است. شکل ۸ گشتاور در حال کاهش و پالس‌های تشخیص را نشان می‌دهد. مقایسه شکل ۷-ج و ۸-ج نشان می‌دهند که به ازای اعمال دو گشتاور متفاوت



شکل ۴: دیاگرام آزاد آونگ متصل به شفت.

در این روش تشخیص، تعداد پالس‌های خروجی برد تشخیص متناسب با سرعت روتور است و از آنجا که فرکانس تشخیص ثابت است تعداد پالس‌ها متناسب با زمان است. با فرض مشخص بودن شروع و پایان تزریق از لحاظ زاویه بین قطب استاتور و برجستگی روتور، می‌توان تعداد پالس‌ها را متناسب با سرعت در نظر گرفت. معادله (۷) این تئوری را مدل می‌کند

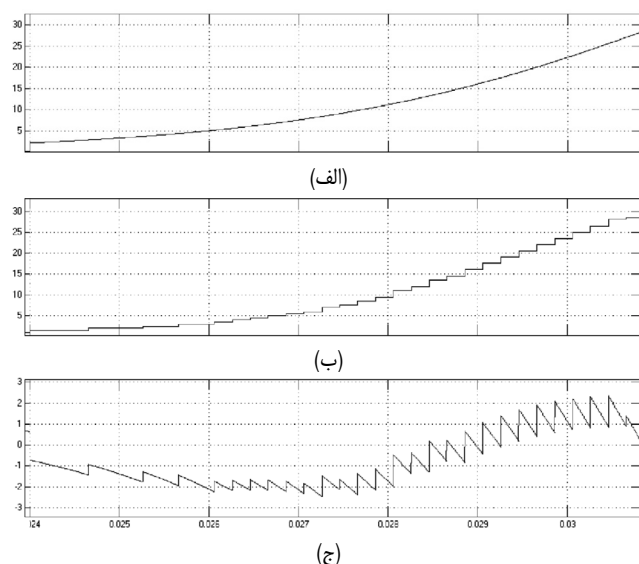
$$\omega = f \frac{\Delta\theta}{N} = \frac{k}{N} \quad (7)$$

در معادله فوق  $\omega$  سرعت روتور،  $\Delta\theta$  تغییرات در مدت تزریق،  $f$  فرکانس تزریق و  $N$  تعداد پالس‌ها است. پالس‌های تشخیص علاوه بر تعیین سرعت می‌توانند صحت عملکرد مجموعه سیم‌پیچ‌ها، ادوات قدرت و بخش قدرت برد تشخیص را بررسی کنند.

اگر بار ثابت باشد مدت زمان مورد نیاز برای تزریق یک فاز برابر با فاز دیگر است. در صورتی که بار متصل به شفت تغییر کند، سرعت روتور تغییر می‌کند. اگر این تغییر دائماً ادامه پیدا کند سرعت روتور نیز همواره در حال تغییر است و این رخداد را می‌توان با اندازه‌گیری تغییرات تعداد پالس‌های خروجی برد، تشخیص داد. همچنین تعداد پالس‌ها برای چندین سیکل ذخیره می‌شود و می‌توان برای تحلیل آن از روش‌های آماری بهره گرفت.

### ۳- شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی

در این بخش تئوری‌های بیان شده در بخش‌های پیشین شبیه‌سازی و پیاده‌سازی شده و همچنین نتایج به دست آمده نیز گزارش می‌شود. الگوریتم پیشنهادی توسط نرم‌افزار MATLAB/Simulink در گام نخست مدل‌سازی شده است. این شبیه‌سازی از یک مدل موتور سوئیچ رلوکتانسی با توپولوژی یکسان بهره می‌برد. برای بررسی صحت عملکرد این الگوریتم، یک نمونه آزمایشگاهی از درایور طراحی و ساخته شد. بخش قدرت، شامل مدارات سوئیچ‌زنی در آزمایشگاه پیاده‌سازی شد و برای بخش کنترل از یک برد آماده دیسک‌آوری ساخت شرکت ST استفاده گردید که این برد در قلب خود از یک میکروکنترلر قدرتمند به نام STM۳۲۴۴ بهره می‌برد.



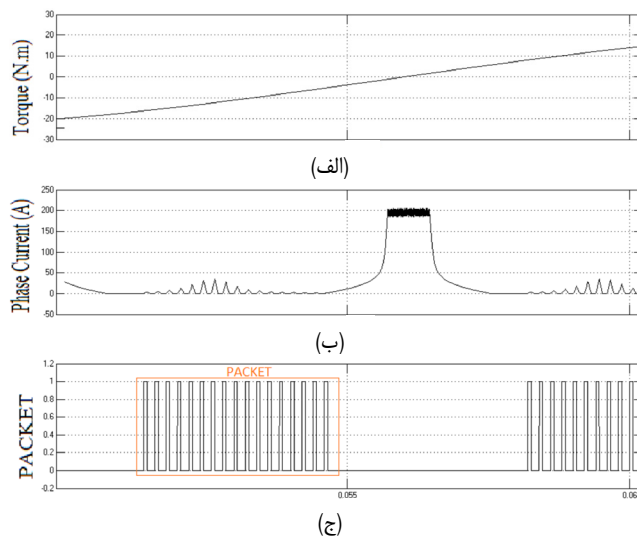
شکل ۹: منحنی موقعیت روتور، (الف) موقعیت واقعی، (ب) موقعیت تخمینی و (ج) خطای موقعیت.

مشخص است و برای امکان ثبت جریان حاصل، پهنای پالس بزرگ‌تری نسبت به حالت نرمال تشخیص اعمال شده است. قطار پالس‌های برد تشخیص به ازای بارهای متقارن و نامتقارن به ترتیب در ۱۰-د و ۱۰-و آمده است. در این شکل‌ها به وضوح تغییرات تعداد پالس‌ها مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۱۰-ز و ۱۰-ح به ترتیب بزرگ‌نمایی دو مجموعه از قطار پالس‌ها از شکل ۱۰-و است که متفاوت بودن تعداد پالس‌ها را نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی رفتار بار نامتقارن، یک آونگ به شفت موتور متصل شد و موتور از وجه کناری روی میز آزمایش بسته شد. شکل ۱۱ مجموعه آزمایش را نشان می‌دهد. پین نشانگر تشخیص خطا پس از دو سیکل عدم تقارن در بار، یک می‌شود که شکل ۱۲ این موضوع را نشان می‌دهد.

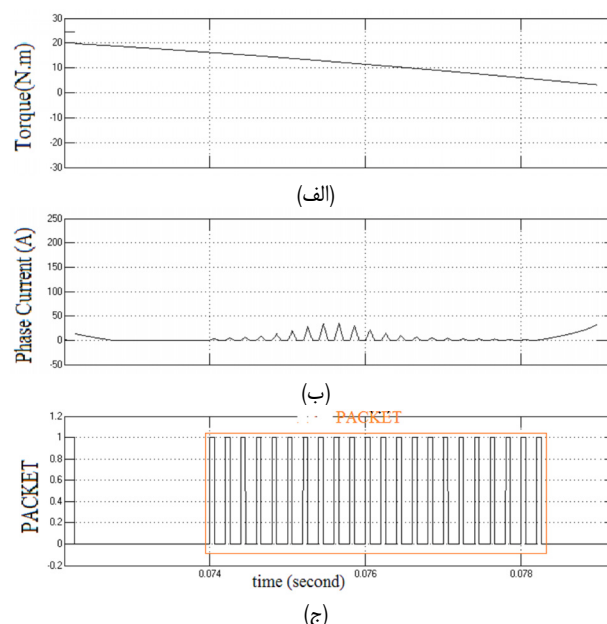
با دقت در پهنای پالس‌های موجود در شکل ۱۰-ز و ۱۰-ح، تغییر پهنای پالس‌ها که شاخصی برای موقعیت است به وضوح دیده می‌شود. این شکل موج‌ها در حالت چرخش موتور گرفته شده است.

#### ۴- جمع بندی

در این مقاله، یک روش جدید در تشخیص موقعیت روتور با قابلیت تعیین هم‌زمان خطا از نوع عدم تقارن بار مکانیکی در موتورهای سوئیچ رلوکتانسی ارائه شده است. این الگوریتم با بهره‌گیری از روش تزریق پالس و مدلاسیون موقعیت پالس دیجیتال، موقعیت مکانی روتور را تشخیص داده و با بهره‌مندی از این اطلاعات مکانی روتور، دوران موتور را کنترل می‌نماید. این الگوریتم با توجه به منطبق بودن روش‌های تشخیص موقعیت و خطا بر هم تجهیز اضافی را به سیستم تحمیل نمی‌کند. روش معرفی شده در این مقاله برای هر خطایی که موجب نوسان گشتاوری و به تبع آن سرعت روتور شود مناسب است. از آنجا که تعداد پالس‌های تشخیص تزریقی ثابت می‌باشد در شرایط عملکرد صحیح موتور رشته بیت خروجی دارای طول ثابت و متناسب با گشتاور بار مکانیکی است. در صورت بروز خطای مکانیکی در نتیجه نوسان در بار مکانیکی، تعداد بیت‌ها متناسب با میزان خطا تغییر خواهد کرد که با شمارش تعداد بیت‌های خروجی مورد تشخیص وجود خطا در بار مکانیکی تعیین می‌شود. از معایب این روش نصب برد اضافی در سیستم را می‌توان نام برد که با توجه به گسترش توان ساخت درایورهای موتورهای بدون جاروبک فضای



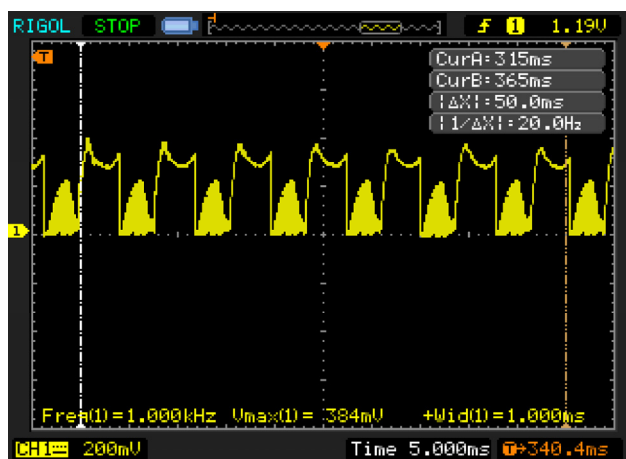
شکل ۷: بزرگ‌نمایی منحنی‌ها در ناحیه ۱، (الف) منحنی گشتاور بار، (ب) منحنی جریان فاز و (ج) خروجی برد تشخیص.



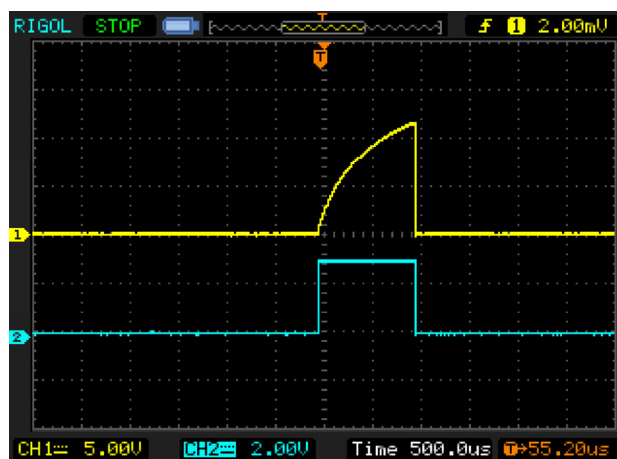
شکل ۸: بزرگ‌نمایی منحنی‌ها در ناحیه ۲، (الف) منحنی گشتاور بار، (ب) منحنی جریان فاز و (ج) خروجی برد تشخیص.

تعداد پالس‌ها متفاوت است. شکل ۶-ج پالس‌های برد تشخیص را برای دو سیکل کاری و گشتاور متناوب نشان می‌دهد که به وضوح تغییر تعداد پالس‌ها قابل مشاهده است. شکل ۹ عملکرد الگوریتم را در تشخیص موقعیت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود الگوریتم با خطای کمتر از یک درجه موقعیت را تشخیص می‌دهد. موقعیت واقعی، موقعیت تخمینی و خطای تشخیص به ترتیب در شکل ۹-الف، ۹-ب و ۹-ج تصویر شده است.

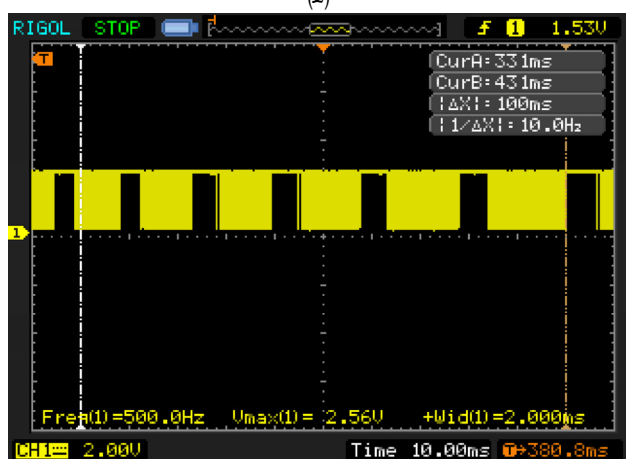
در پیاده‌سازی ابتدا یک پالس ولتاژ با پهنای یک میلی‌ثانیه به یکی از فازها اعمال شد و جریان عبوری از مقاومت حسگر اندازه‌گیری شد. شکل موج‌ها در هر دو حالت هم‌راستایی و عدم هم‌راستایی در شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب آمده است. در شکل ۱۰-ج دو فاز موتور به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که یکی در حالت هم‌راستایی و دیگر عدم هم‌راستایی باشد. سپس پالس به هر دو تزریق شده که در این شکل خروجی پالس تشخیص دوفاز آمده است. شکل ۱۰-ه جریان فاز را نشان می‌دهد. در این شکل موج جریان ناشی از تزریق پالس ولتاژ تشخیص در بین پالس‌های توان به وضوح



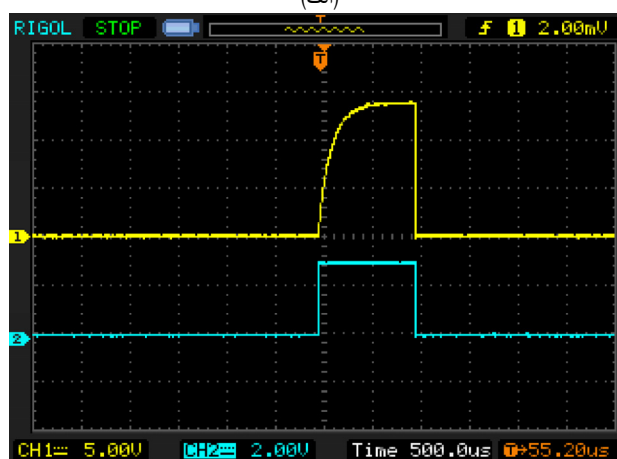
(ا)



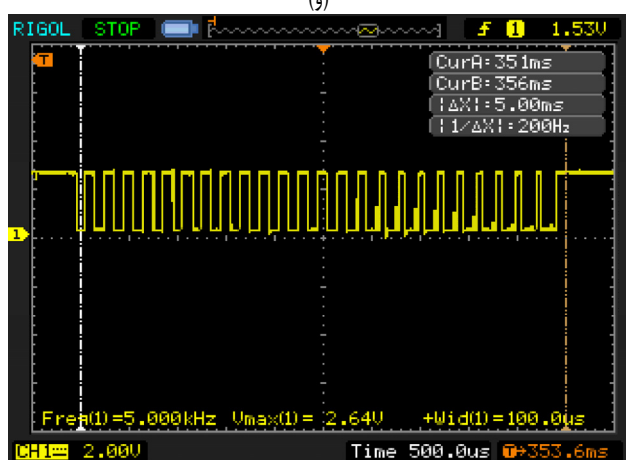
(الف)



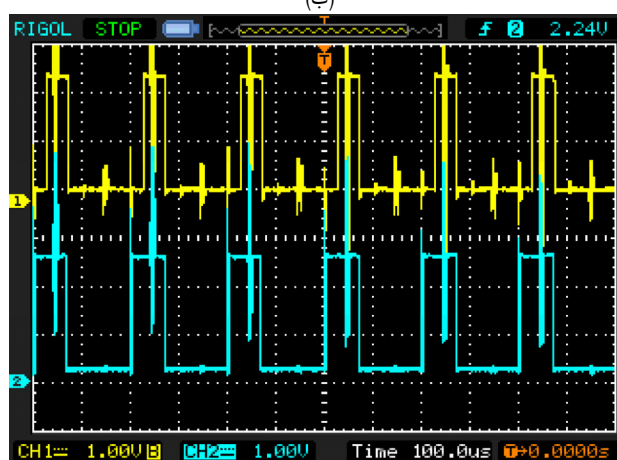
(ب)



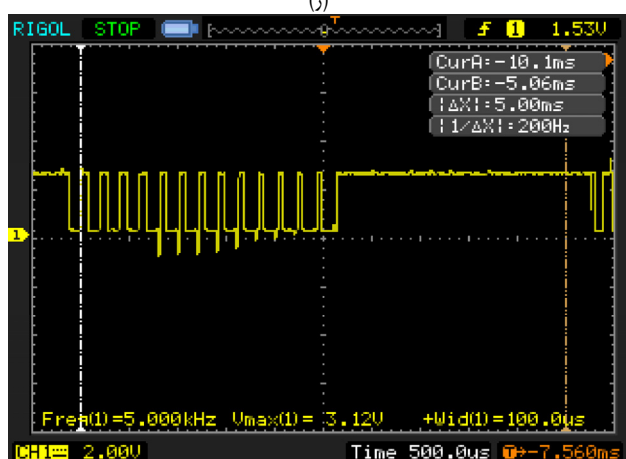
(ب)



(ج)



(ج)



(د)



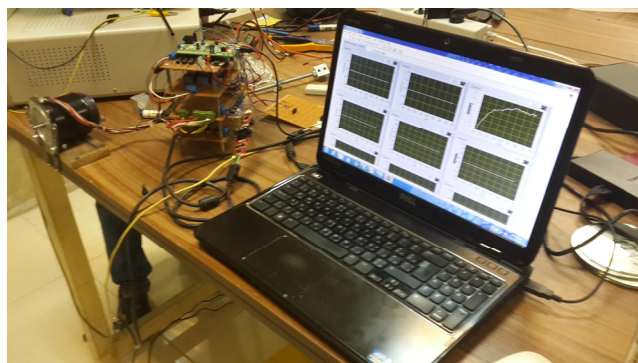
(د)



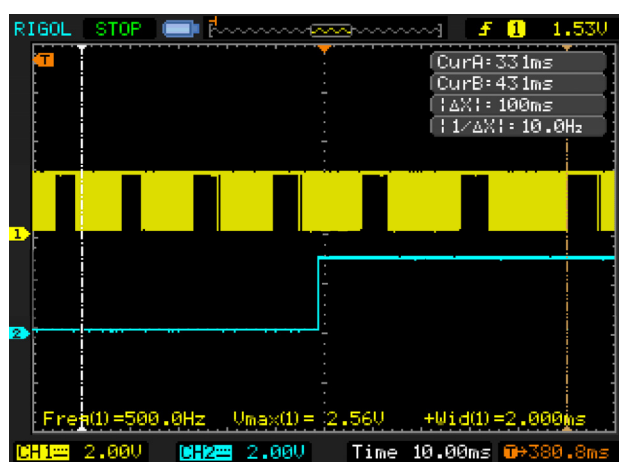
شکل ۱۰: شکل موج جریان و پالس‌های برد تشخیص در این تصاویر ارائه شده است. (الف) جریان عبوری از مقاومت حسگر در حالت هم‌راستایی قطب استاتور و برجستگی روتور، (ب) جریان عبوری از مقاومت حسگر در حالت عدم هم‌راستایی قطب استاتور و برجستگی روتور، (ج) خروجی برد تشخیص برای دو فاز مختلف (هم‌راستا و غیر هم‌راستا) به صورت هم‌زمان نمایش داده شده، (د) قطار پالس‌ها برای چند سیکل تشخیص تحت بار متقارن، (ه) شکل موج جریان توانی و جریان ناشی از پالس‌های تشخیص، (و) قطار پالس‌ها برای چند سیکل تشخیص تحت بار نامتقارن، (ز) یک قطار از پالس‌ها در فاز تشخیص و گشتاور افزایشدهنده، (ح) یک قطار از پالس‌ها در فاز تشخیص و گشتاور کاهشدهنده.

- [7] J. P. Lyons, S. R. MacMinn, and M. A. Preston, "Flux-current methods for SRM rotor position estimation," in *Proc. of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 482-487, 28 Sept.-4 Oct. 1991.
- [8] A. Lumsdaine and J. H. Lang, "State observers for variable-reluctance motors," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 37, no. 2, pp. 133-142, Apr. 1990.
- [9] W. D. Harris and J. H. Lang, "A simple motion estimator for variable-reluctance motors," *IEEE Trans. on Ind. Applicat*, vol. 26, no. 2, pp. 237-243, Mar./Apr. 1990.
- [10] A. Brosse, G. Henneberger, M. Schiedermeier, R. D. Lorenz, and N. Nagel, "Sensorless control of a SRM at low speeds and standstill based on signal power evaluation," in *Proc. of 24th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'98*, vol. 3, pp. 1538-1543, 31 Aug.-4 Sept. 1998.
- [11] S. Saha, K. Ochiai, T. Kosaka, N. Matsui, and Y. Takeda, "Developing a sensorless approach for switched reluctance motors from a new analytical model," in *Proc. of 34th Annual Meeting of the IEEE Industry Applications*, pp. 525-532, 3-7 Oct. 1999.
- [12] G. Suresh, B. Fahimi, K. M. Rahman, and M. Ehsani, "Inductance based position encoding for sensorless SRM drives," in *Proc. of 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, vol. 2, pp. 832-837, 1-1 Jul. 1999.
- [13] A. Cheok and N. Ertugrul, "A model free fuzzy logic based rotor position sensorless switched reluctance motor drives," in *Proc. of the IEEE Industry Applications Conf. 31st IAS Annual Meeting, IAS'96*, vol. 1, pp. 76-83, 6-10 Oct. 1996.
- [14] D. S. Reay and B. W. Williams, "Sensorless position detection using neural networks for the control of switched reluctance motors," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Control Applications*, vol. 2, pp. 1073-1077, 22-27 Aug. 1999.
- [15] J. Cai, Z. Deng, and R. Hu, "Position signal faults diagnosis and control for switched reluctance motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 9, pp. 1-11, Sept. 2014.
- [16] N. S. Gameiro and A. J. Marques Cardoso, "A new method for power converter fault diagnosis in SRM drives," *IEEE Trans. on Ind. Applicat*, vol. 48, no. 2, pp. 653-662, Mar./Apr. 2012.
- [17] J. F. Marques, J. O. Estima, N. S. Gameiro, and A. J. Marques Cardoso, "A new diagnostic technique for real-time diagnosis of power converter faults in switched reluctance motor drives," *IEEE Trans. on Ind. Applicat*, vol. 50, no. 3, pp. 1854-1860, May/Jun. 2014.
- [18] H. Chen and S. Lu, "Fault diagnosis digital method for power transistors in power converters of switched reluctance motors," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 60, no. 2, pp. 749-763, Feb. 2013.
- [19] H. Torkaman, E. Afjei, and P. Yadegari, "Static, dynamic, and mixed eccentricity faults diagnosis in switched reluctance motors using transient finite element method and experiments," *IEEE Trans. Magn*, vol. 48, no. 8, pp. 2254-2264, Aug. 2012.
- [20] Y. Hu, Y. Liu, and W. Ding, "Performance evaluation of a fault-tolerant decoupled dual-channel switched reluctance motor drive under open-circuits," *IET Electric Power Applications*, vol. 8, no. 4, pp. 117-130, Apt. 2014.
- [21] M. Ruba, L. Szabo, and I. A. Viorel, "Modular stator switched reluctance motor for fault tolerant drive systems," *IET Electric Power Applications*, vol. 7, no. 3, pp. 159-169, Mar. 2013.
- [22] H. Torkaman, N. Faraji, and M. S. Toulabi, "Influence of rotor structure on fault diagnosis indices in two-phase switched reluctance motors," *IEEE Trans. Magn*, vol. 50, no. 3, pp. 136-143, Mar. 2014.
- [23] W. Wang and B. Fahimi, "Fault resilient strategies for position sensorless methods of switched reluctance motors under single and multiphase fault," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron*, vol. 2, no. 2, pp. 190-200, Jun. 2014.

**احسان خیابانی** در سال ۱۳۹۱ تحصیلات دوره کارشناسی در رشته مهندسی برق را در دانشگاه صنعتی کرمانشاه به اتمام رسانیده و در سال ۱۳۹۴ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه رازی دریافت نمود. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه نامبرده مدارات درایو و راه‌انداز ماشین‌های الکتریکی، مبدل‌های الکترونیک قدرت می‌باشد.



شکل ۱۱: مجموعه تست آزمایشگاهی.



شکل ۱۲: خروجی برد تشخیص و بین نشانگر خطا.

اضافی و محدودیتی را به سیستم در کاربرد صنعتی تحمیل نمی‌کند. در این مقاله الگوریتم در ابتدا توسط نرم‌افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی و سپس بر روی یک موتور ۵۰ وات سوئیچ رلوکتانسی ۸/۱۲ پیاده‌سازی شده است. مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و تست عملی، عملکرد صحیح روش پیشنهادی را تصدیق می‌نماید.

## مراجع

- [1] R. Krishnan, "Whither motor drives: a case study in switched reluctance motor drives," in *Proc. Int. Conf. on Electrical Machines and Systems, ICEMS'07*, vol. 1, pp. 472-480, Oct. 2007.
- [2] P. Laurent, M. Gabsi, and B. Multon, "Sensorless rotor position detection using resonant method for switched reluctance motors," in *IEEE Conf. on Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 1, pp. 687-694, 2-8 Oct. 1993.
- [3] G. Suresh, B. Fahimi, and M. Ehsani, "Improvement of the accuracy and speed range in sensorless control of switched reluctance motors," in *Proc. 13th Annual Applied Power Electronics Conf. and Exposition, APEC'98*, vol. 2, pp. 771-777, 15-19 Feb. 1998.
- [4] M. Ehsani, I. Husain, S. Mahajan, and K. R. Ramani, "New modulation encoding techniques for indirect rotor position sensing in switched reluctance motors," *IEEE Trans. on Ind. Applicat*, vol. 30, no. 1, pp. 85-91, Jan./Feb. 1994.
- [5] M. Ehsani, I. Husain, and A. B. Kulkarni, "Elimination of discrete position sensor and current sensor in switched reluctance motor drives," *IEEE Trans. on Ind. Applicat*, vol. 28, no. 1, pp. 128-135, Jan./Feb. 1992.
- [6] G. Gallegos-Lopez, P. C. Kjaer, and T. J. E. Miller, "High-grade position estimation for SRM drives using flux linkage/current correction model-industry applications," *IEEE Trans. on Ind. Applicat*, vol. 35, no. 4, pp. 859-869, Jul./Aug. 1999.

**حسن مرادی چشمه بیگی** در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید بهشتی دریافت نمود و پس از آن در همان سال به دوره دکترای مهندسی برق در دانشگاه شهید بهشتی وارد گردید و در سال ۱۳۹۰ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. دکتر مرادی از سال ۱۳۹۱ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه رازی در کرمانشاه مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می باشد. زمینه های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ایده های نو در ماشینهای الکتریکی، مدارات درایو و راه انداز ماشین های الکتریکی، مبدل های الکترونیک قدرت و آنالیز الکترومغناطیس در ماشین های الکتریکی می باشد.