

طراحی و ساخت مدار DSP کشف موقعیت روتور بدون سنسور یک موتور - ژنراتور رلوکتانس سوئیچی با استفاده از روش مدولاسیون دامنه در حالت موتوری

علیرضا سیادتان^۱، استادیار؛ شورانگیز شمس شمسآباد فراهانی^۲، استادیار؛ سیدابراهیم افجه^۳، استاد

۱- گروه برق - دانشکده فنی و مهندسی - واحد تهران غرب - دانشگاه آزاد اسلامی - تهران - ایران siadatan@wtiau.ac.ir

۲- گروه برق - واحد اسلامشهر - دانشگاه آزاد اسلامی - اسلامشهر - ایران shams@iiiau.ac.ir

۳- گروه برق - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران e-afjei@sbu.ac.ir

چکیده: در این مقاله برای راه اندازی و کنترل بدون سنسور موتور - ژنراتور رلوکتانس سوئیچی با میدان کمکی در حالت موتوری روش جدیدی ارائه شده است. موتور و ژنراتور جدید ارائه شده از نوع ۴ به ۲ است که روتورهای آن از نظر شکل هندسی متفاوت و دارای دولایه جداگانه است و در هر لایه از یک استاتور و روتور استفاده شده است. ایده اصلی این گونه است که یک پالس سینوسی دامنه کم با فرکانس بالا به فاز تزریق می گردد و سپس از جریان فاز فیدبک گرفته می شود و با استفاده از دموولاسیون AM شکل موج جریان فاز به دست می آید و به این ترتیب می توان موقعیت روتور را کشف نمود. در ابتدا توسط پردازنده سیگنال دیجیتال (DSP) یک سیگنال سینوسی به صورت دیجیتال تولید و به مبدل دیجیتال به آنالوگ (D/A) داده می شود، سپس به میدان کمکی موتور اعمال می شود و از تأثیر آن روی فازهای موتور توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال (A/D) نمونه برداری شده و به DSP داده می شود که پس از پردازش، فرامین آتش لازم توسط DSP به گیت ترانزیستور فازها ارسال می گردد. در ضمن تأخیرات جبران شده و عمل پیش فازسازی نیز بررسی می شود.

واژه های کلیدی: موتور و ژنراتور هیبرید رلوکتانس سوئیچی، پردازنده سیگنال دیجیتال (DSP)، روش مدولاسیون دامنه (AM)، روش بدون سنسور.

DSP circuit design and manufacturing for rotor position discovering of sensorless motor - generator switched reluctance motor using amplitude modulation in motor mode

Alireza Siadatan¹, Assistant professor; Shoorangiz Shams Shamsabad Farahani², Assistant professor; SeyedEbrahim Afjei³,
Professor

1- Department of Electrical Eng., Faculty of Technical & Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: siadatan@wtiau.ac.ir

2- Department of Electrical Eng., Islamshahr branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran, Email: shams@iiiau.ac.ir

3- Department of Electrical Eng., Shahid Beheshti University G.C., Tehran, Iran, Email: e-afjei@sbu.ac.ir

Abstract- this paper presents a new scheme for the start up and control of a sensorless switched reluctance motor- generator using an auxillary field in motor mode. The proposed motor-generator is 4 to 2 with rotors of different geometric shapes and has two separate layers with a stator and rotor used in each layer. The main idea is that a high-frequency low amplitude sinusoidal pulse is injected to phase and a phase current feedback is achieved. Using AM demodulation, phase current waveform is obtained and thus rotor position is discovered. A sinusoidal digital signal is generated by digital signal processor (DSP) which is then given to digital to analog converter (D / A). Then it is applied to the auxiliary motor and its effect on motor phases is sampled by the analog to digital converter (A / D) where after processing by the DSP, commands necessary to fire are sent to phase transistor gate. In addition, delays are compensated and lagging is also investigated.

Keywords: Hybrid motor-generator switched reluctance motor, digital signal processor (DSP), amplitude modulation (AM), sensorless scheme.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۴ و ۱۳۹۶/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۸

نام نویسنده مسئول: دکتر علیرضا سیادتان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران غرب - دانشکده فنی و مهندسی، تلفن: ۴۴۲۲۰۸۵۸، تلفن همراه: ۰۹۱۲۱۱۶۸۶۰۶

۱- مقدمه

موتورهای الکتریکی دارای گونه‌های متفاوتی می‌باشند و به این دلیل، ویژگی‌های آن‌ها در نوع و کاربردشان می‌باشد که محققین این حوزه را بر آن داشته است که پیوسته در پی نوعی موتور با بازده بالا، هزینه کم و نگهداری آسان باشند و از سوی دیگر دارای سرعت و قدرت مناسب با چگالی توان بالا باشد. یکی از ابتدایی‌ترین موتورهایی که ابداع گردید موتور رلوکتانس سوئیچی بود که به دلیل نیاز به یک مدار مبدل قدرت و کنترل متناوب آن برای چرخش موتور، تا به وجود آمدن قطعات نیمه‌هادی قدرت تا سال‌های اخیر از آن استفاده نگردید. اصل اولیه در استفاده از موتور رلوکتانس سوئیچی آن است که زاویه و موقعیت روتور باید موجود باشد تا بتوان موتور را راه‌اندازی و کنترل کرد. برای این منظور روش‌های مستقیم (کنترل موتور رلوکتانس سوئیچی با استفاده از سنسور) و غیرمستقیم (کنترل موتور رلوکتانس سوئیچی بدون استفاده از سنسور) وجود دارد که با استفاده از آن‌ها موقعیت روتور را می‌توان تشخیص داد [۱].

در روش‌های مستقیم جهت تعیین زاویه روتور نسبت به استاتور، از سنسور استفاده می‌شود. در این خصوص می‌توان به استفاده از اپتوکوپلر [۲]، سنسور اثر هال [۳] و الگوی استاتور- روتور برای سنجش موقعیت روتور [۴] اشاره نمود. (س ۱-۶) یکی از روش‌های مستقیم پرکاربرد، روشی است که یک انکودر یا سنسور هال به شفت موتور بسته می‌شود. این روش به‌طور معمول برای تعیین موقعیت روتور استفاده می‌شود، اما استفاده از این سنسورها می‌تواند باعث کاهش قابلیت اطمینان عملکرد موتور، افزایش هزینه‌ها و تعداد سیم‌های ارتباطی شود. وجود سنسور در این موتورها از قابلیت‌های ذکرشده موتور می‌کاهد و مشکلاتی را نیز به وجود می‌آورد [۵].

جهت تشخیص موقعیت روتور می‌توان از بسیاری از روش‌های بدون سنسور استفاده نمود [۷-۶]، با این تفاوت که تشخیص موقعیت در محیطی بدون حضور نویزهای ناشی از سوئیچینگ به‌سادگی انجام‌پذیر است. در مرجع [۸] برای تعیین موقعیت روتور یک سیگنال سینوسی با دامنه کم و فرکانس بالا به یکی از سیم‌پیچ‌های یک فاز غیرفعال اعمال می‌گردد و سپس دامنه ولتاژ القایی حاصله از این سیگنال در سیم‌پیچ مقابل همان فاز اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به مسیر لازم برای بسته‌شدن مدار شار، این ولتاژ القایی وابستگی زیادی به موقعیت روتور دارد و از همین مسئله برای یافتن موقعیت روتور هم در زمانی که موتور بی‌حرکت است و هم در زمان چرخش استفاده می‌شود. از آنجایی که تعیین موقعیت روتور بسیار حائز اهمیت است، مطالعات بسیاری در این خصوص انجام‌شده که می‌توان به مواردی همچون کنترل موقعیت روتور به‌صورت تطبیقی برای موتور رلوکتانس سوئیچی آسنکرون با استفاده از روش تخمین شیب جریان [۹]، تخمین موقعیت روتور در سرعت‌های کم براساس مدل اندوکتانس دینامیکی [۱۰]، تخمین سرعت و موقعیت

روتور با استفاده از ریت‌گر کنترل مود لغزشی [۱۱]، تخمین موقعیت در لحظه شروع و در سرعت‌های کم به‌صورتی که تخمین موقعیت روتور با تزریق پالس جریانی که دامنه آن با دو آستانه مختلف مقایسه می‌شود [۱۲]، تخمین موقعیت روتور برای موتور ۱۲ به ۸ با به‌کارگیری جستجوی سیم‌پیچی [۱۳]، تخمین موقعیت روتور و سرعت موتور رلوکتانس سوئیچی کم ولتاژ با استفاده از روش کنترل شار پیوندی در موتور دو لایه [۱۴]، طراحی کنترل‌کننده مقاوم سرعت روتور براساس ریت‌گر تعمیم‌یافته تناسبی انتگرالی [۱۵]، کنترل سرعت موتور با استفاده از کنترل هوشمند مبتنی بر یادگیری احساسی مغز [۱۶]، تحلیل، طراحی و ساخت تخمین‌گر موقعیت روتور برای کنترل ژنراتور سوئیچ رلوکتانس با سرعت متغیر با استفاده از شبکه‌های عصبی و شیب جریان [۱۷]، اشاره نمود.

با توجه به موارد فوق می‌توان دریافت که در روش‌های بدون سنسور، تشخیص موقعیت روتور بر مبنای استفاده از پارامترهایی همچون شار، جریان، اندوکتانس و ولتاژ ضد محرکه استوار است که براساس موقعیت روتور در آن‌ها تغییراتی ایجاد می‌شود. در این مقاله در بخش‌های بعد عناوین زیر مطرح می‌شود:

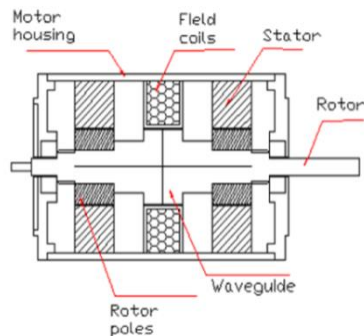
در بخش ۲ ویژگی‌ها و ساختار موتور - ژنراتور جدید ۴ به ۲ با میدان کمکی مورد بررسی قرار می‌گیرد و تجزیه و تحلیل عددی این ساختار صورت می‌پذیرد. در بخش ۳ طراحی و ساخت مدار کنترل بدون سنسور این موتور - ژنراتور با استفاده از روش مدولاسیون دامنه و به کمک DSP بررسی خواهد شد. در بخش ۴ نیز نحوه تعیین موقعیت روتور و سوئیچ زنی فازها آورده خواهد شد. در بخش ۵ مقایسه روش پیشنهادی با دیگر روش‌های موجود صورت می‌پذیرد و در پایان نیز نتیجه‌گیری صورت خواهد گرفت.

۲- ویژگی‌های موتور-ژنراتور (هیبرید) رلوکتانس سوئیچی جدید ۴ به ۲ با میدان کمکی

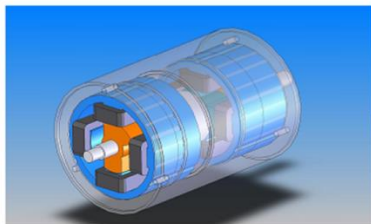
در این قسمت ابتدا ساختار موتور-ژنراتور (هیبرید) رلوکتانس سوئیچی جدید بررسی خواهد شد و سپس تجزیه و تحلیل عددی ارائه خواهد گردید.

۲-۱ بررسی ساختار موتور - ژنراتور (هیبرید) رلوکتانس سوئیچی جدید

این موتور- ژنراتور (هیبرید) اولین بار در مرجع [۱۸] مطرح شد. موتور- ژنراتور استفاده‌شده، شامل دو مجموعه استاتور و روتور (دولایه) وابسته از نظر مغناطیسی است که هر مجموعه استاتور شامل ۴ قطب برجسته با سیم‌پیچ‌هایی که دور آن‌ها پیچیده شده است. روتور آن ۲ قطب برجسته بدون سیم‌پیچ دارد که کمان‌های آن‌ها در قسمت ابتدایی روتور با انتهای آن متفاوت است و در شکل ۱ نشان داده شده است. کمان‌های هر قطب استاتور و روتور تقریباً ۴۵ درجه است و روتورهای دولایه نسبت به هم ۹۰ درجه اختلاف دارند. لازم به ذکر

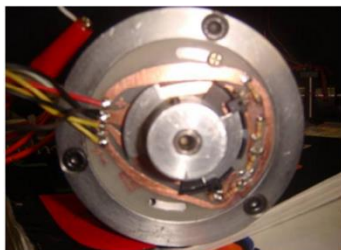


شکل ۲: برشی از موتور-ژنراتور ارائه شده



شکل ۳: موتور-ژنراتور به صورت کامل

میدان تحریک در سیم پیچ وسطی، امکان کار در حالت ژنراتوری را به ماشین می دهد. بنابراین این ماشین در بسیاری از کاربردها از جمله خودروهای هیبریدی و توربین های بادی (توان پایین) مناسب می باشد. همچنین با توجه به تغییر زاویه بین روتورها، ریل گشتاور پایین و گشتاور بالا در ماشین حاصل می گردد. مشخصات این موتور در جدول ۱ آمده است. در شکل ۵ موتور-ژنراتور ساخته شده نشان داده شده است.



شکل ۴: نمایی از چگونگی قرار گرفتن برد و حسگرهای نوری در پشت موتور

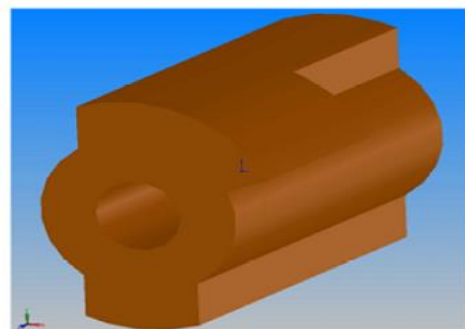
جدول ۱: مشخصات موتور جدید

۷۲ میلی متر	قطر خارجی هسته استاتور
۶۲ میلی متر	قطر داخلی هسته استاتور
۴۵ درجه	کمان استاتور
۰/۲۵ میلی متر	فاصله هوایی
۳۹/۵ میلی متر	قطر خارجی هسته روتور
۱۰ میلی متر	قطر شفت روتور
۹۰ درجه	کمان بزرگ تر روتور
۴۵ درجه	کمان کوچک تر روتور
۳۵ میلی متر	ضخامت هر لایه
۱۲۰ دور	تعداد دور در هر قطب
۴۰۰ دور	تعداد دور سیم پیچ میدان

است که دولایه، نسبت به یک صفحه عمودی در وسط محور موتور کاملاً متقارن هستند و فقط روتورها نسبت به هم ۹۰ درجه اختلاف دارند.



(الف)



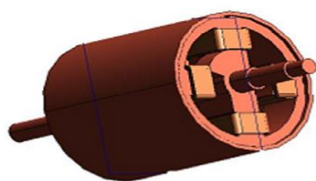
(ب)

شکل ۱: الف - روتور موتور-ژنراتور (هیبرید) جدید ساخته شده
ب- روتور موتور-ژنراتور (هیبرید) جدید در نرم افزار

این ساختار یک موتور-ژنراتور دو فاز است، در این ساختار از یک قرقره ثابت برای حالت ژنراتوری بین دو مجموعه استاتور استفاده شده است و سیم پیچ های میدان، دور آن حدود ۴۰۰ دور پیچیده شده است. این قرقره دارای یک هسته استوانه ای شکل است که میدان مغناطیسی را هدایت می کند. در حالت ژنراتوری شار مغناطیسی تولید شده توسط سیم پیچ ها، از طریق رسانای سطح آهنی موتور-ژنراتور و محور به قطب های روتور و سپس به قطب های استاتور منتقل می شود و در نهایت در بدنه موتور-ژنراتور سیکل کامل شار را طی می کند. در حالت ژنراتوری یکی از مجموعه ها شمال مغناطیسی (N) و در مجموعه دیگر جنوب مغناطیسی (S) به وجود می آید. بنابراین، یک مجموعه از قطب های روتور، شمال مغناطیسی و مجموعه دیگر جنوب مغناطیسی می شود. در این موتور، میدان مغناطیسی بدون استفاده از هیچ جاروبکی به روتور القاء می شود. باید توجه داشت که در این ساختار از آهن با خلوص بالا برای رسانایی بهتر استفاده شده است. برشی از موتور-ژنراتور ارائه شده در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۳ این موتور-ژنراتور به صورت کامل نشان داده شده است. مکان این روتور-ژنراتور، مجموعه هایی از حسگرهای نوری (photo-Interrupter) با یک برد الکترونیکی در پشت موتور قرار گرفته اند که در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲-۲ تجزیه و تحلیل عددی

دو شکل ۹ و ۱۰ نمایش دهنده سه بعدی از موتور-ژنراتور با و بدون پوسته از بدنه می باشد، که این دو شکل به صورت سه بعدی با روش اجزای محدود در نرم افزار مورد تحلیل قرار گرفته است. تغییرات رلوکتانس موتور، نقش مهمی در عملکرد آن برعهده دارد، از این رو اطلاع دقیق از توزیع شار داخل موتور برای جریان های تحریک متفاوت و موقعیت های مختلف روتور جهت پیش بینی عملکرد موتور، حیاتی می باشد. موتور می تواند در شرایط عملیاتی عادی به صورت عالی اشباع شود. برای ارزیابی صحیح طراحی و عملکرد موتور، تکنیک اجزای محدود به راحتی می تواند برای به دست آوردن مقادیر مغناطیسی در سراسر موتور مورد استفاده قرار گیرد.

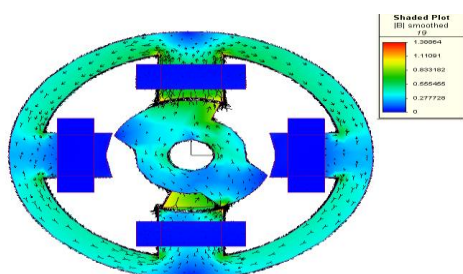


شکل ۹: موتور - ژنراتور ارائه شده با پوسته



شکل ۱۰: موتور - ژنراتور ارائه شده بدون پوسته

تجزیه و تحلیل این موتور در وضعیت سه بعدی، فقط برای یک طرف موتور که در تقارن با سیم پیچ میدان است، انجام می شود. این تحلیل به وسیله نرم افزار Magnet CAD [۱۹] انجام شده است. تجزیه و تحلیل میدان با استفاده از بسته نرم افزاری ذکر شده برای یافتن پتانسیل بردار صورت گرفته است. اساس این روش کمینه سازی انرژی نوسان مغناطیسی است. برای تجزیه و تحلیل موتور در حالت سه بعدی، شرایط مرزی عادی میدان روی لبه های درونی و بیرونی موتور اعمال شده است. شکل های ۱۱ و ۱۲ شار مغناطیسی و چگالی میدان مغناطیسی را هنگام فعالیت ماشین به

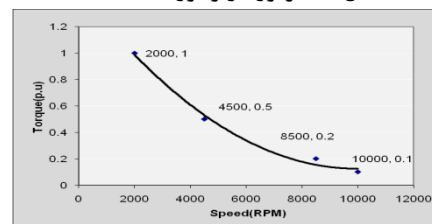


شکل ۱۱: شار مغناطیسی و چگالی میدان مغناطیسی برای حالت غیرهم راستایی استاتور و روتور

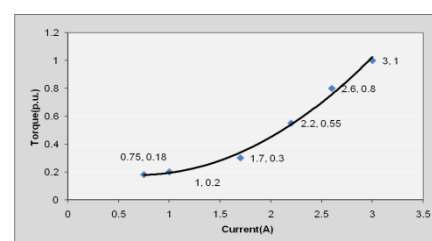
با بارگذاری های مختلف موتور، مشخصه گشتاور دینامیک در سرعت های مختلف موتور اندازه گیری شده است که در شکل ۶ نمایش داده شده است. در شکل ۶ از برازش منحنی به منظور نمایش داده های بدست آمده استفاده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، مشخصه گشتاور-سرعت در این نوع موتور همانند موتور جریان مسقیم می باشد. شکل ۷ گشتاور را برحسب جریان در بارهای مختلف نشان می دهد. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود، گشتاور متناسب است با مربع جریان موتور که رفتار موتور جریان مسقیم سری را به خاطر می آورد. هم چنین شار پیوندی براساس موقعیت روتور به وسیله شبیه سازی برای یک سیم پیچ قطب استاتور به دست می آید که در شکل ۸ نشان داده شده است.



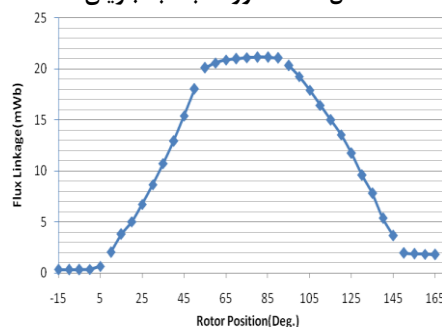
شکل ۵: موتور - ژنراتور ساخته شده



شکل ۶: گشتاور نسبت به سرعت



شکل ۷: گشتاور نسبت به جریان



شکل ۸: شار پیوندی نسبت به موقعیت روتور

۳-۲ بلوک دیاگرام کلی نحوه عملکرد

شکل ۱۴ بیان ساده‌ای از نحوه کارکرد و اجرای این مدار سخت‌افزاری می‌باشد.



شکل ۱۴: بلوک دیاگرام نحوه اجرای پروژه

همان‌گونه که مشخص است در ابتدا یک سیگنال فرکانس بالا با دامنه کم تولید و پس از تقویت به سیم‌پیچی میدان کمکی در موتور داده می‌شود. به دلیل اعمال این سیگنال به میدان کمکی یک شار در روتور ایجاد می‌شود که از طریق استاتور و پوسته موتور مسیر آن بسته می‌شود و این امر موجب ایجاد ولتاژ القایی در فازهای موتور می‌شود. مقدار ولتاژ القاء شده در فازهای موتور توسط پردازشگر اندازه‌گیری می‌شود. این ولتاژ القاء شده در هر فاز موتور، اطلاعات مفیدی از موقعیت و وضعیت روتور نسبت به فازهای استاتور آن دارد. با استخراج این اطلاعات، می‌توان فرامین صحیح برای چرخیدن موتور را به آن صادر کرد [۲۰]. این اطلاعات موجود در ولتاژهای القایی در هر فاز با استفاده از یک تکنیک دمدولاسیون استخراج می‌گردد که در این مقاله تکنیک دمدولاسیون AM استفاده شده است و با استفاده از آن موقعیت روتور استخراج و فرمان مناسب صادر می‌شود و سپس با توالی این عمل، موتور به چرخش خود ادامه می‌دهد.

۳-۳ بلوک دیاگرام مدار راه‌انداز

همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشخص است مدار راه‌انداز به‌طور کلی از چند قسمت عمده تشکیل شده است:

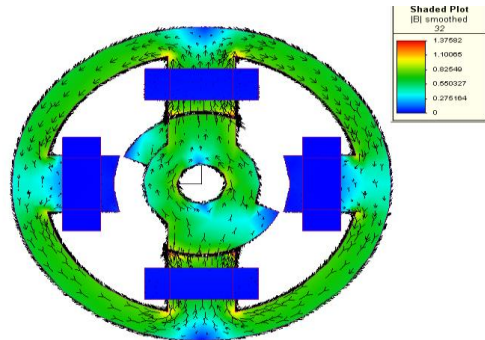
الف- بخش مدار قدرت

ب- بخش ایزوله کننده مدار قدرت و دیجیتال

ج- بخش نمونه‌گیری و تولید نمونه‌های سیگنال فرکانس بالا (D/A و A/D)

د- بخش پردازش

در اینجا توضیح مختصری از هر بخش ارائه می‌گردد و توضیحات تکمیلی در قسمت مربوط به هر بخش آورده شده است.



شکل ۱۲: شار مغناطیسی و چگالی میدان مغناطیسی برای حالت هم‌راستایی استاتور و روتور

عنوان یک موتور، به ترتیب در حالتی که استاتور و روتور هم‌راستا و غیرهم‌راستا هستند نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که هسته‌های استاتور و روتور از یک سیلیکون با پوشش فولاد ساخته شده‌اند.

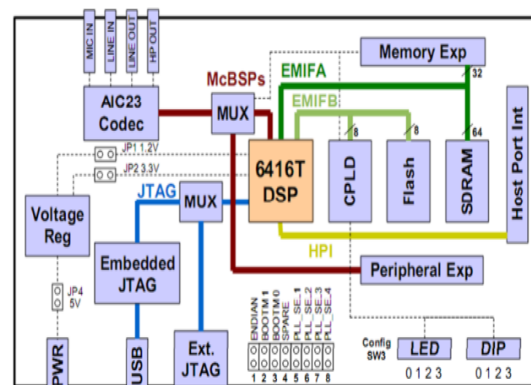
۳- طراحی و ساخت مدار کنترل بدون سنسور موتور

SRM با میدان کمکی با استفاده از DSP

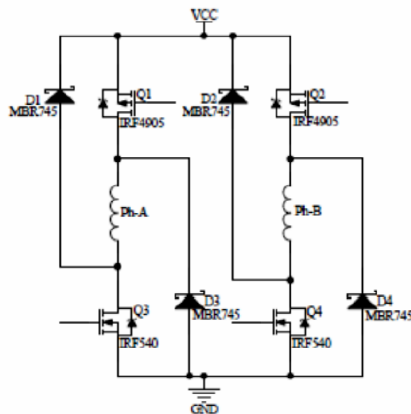
در این قسمت طراحی و ساخت مدار کنترل بدون سنسور این موتور-ژنراتور با استفاده از روش دمدولاسیون دامنه و به کمک DSP بررسی خواهد شد.

۳-۱ شرح مختصری از پردازنده و برد پردازشی مورد استفاده

شرح مختصری از پردازنده و برد پردازشی مورد استفاده در این قسمت بیان شده است. قبل از بررسی نحوه اجرای مراحل طراحی، لازم است که در مورد پردازنده DSP مورد استفاده توضیح مختصری داده شود. جهت اجرا و انجام این مدار از یک برد آموزشی استفاده شده است. این برد با نام TMS320C6416 TDSK شناخته می‌شود که محصولی از شرکت Texas Instruments می‌باشد. این برد دارای یک پردازنده ۳۲ بیتی می‌باشد که قابلیت کارکرد با پالس ساعتی با سرعت 1 GHz را دارد. بلوک دیاگرام برد مورد استفاده در شکل ۱۳ آورده شده است. مقدار حافظه فلش روی برد برابر ۵۱۲ کیلوبایت است که می‌تواند به عنوان حافظه برنامه استفاده شود.



شکل ۱۳: بلوک دیاگرام برد پردازشی مورد استفاده

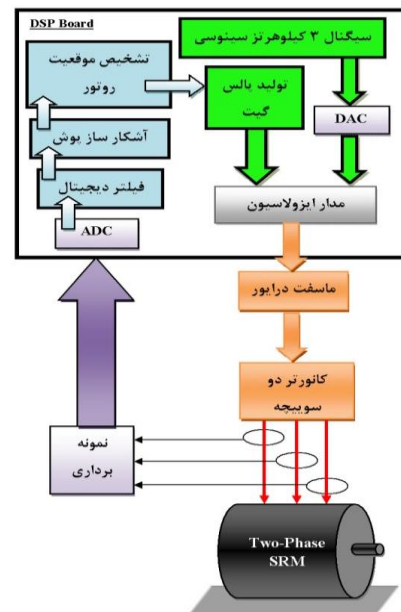


شکل ۱۶: مدار راهانداز استفاده شده

در هر فاز از یک ماسفت قدرت P و N استفاده شده است که ماسفت P با شماره IRF4905 و ماسفت N از نوع IRF540 انتخاب شده است. باتوجه به این که موتور استفاده شده در این مقاله دوفاز می باشد، بنابراین جمعاً در این مدار از ۴ ماسفت قدرت استفاده شده است، که دوتای آن ها N و دوتای دیگر P می باشند. با توجه به شکل می توان دریافت که ماسفت های P در طبقه بالای مدار قدرت قرار گرفته اند به گونه ای که سورس آن ها به منبع تغذیه متصل است و درین آن ها به یک سر فاز موتور وصل شده است و در طبقه پایین تر ماسفت های N به گونه ای قرار گرفته اند که سورس آن ها متصل به قطب منفی منبع و درین آن ها به سر دیگر همان فاز قبلی موتور متصل شده است. در این مدار در هر فاز از دو دیود (دیود هرز گرد) سریع شاتکی جهت تخلیه انرژی فازهای موتور در هنگام خاموش شدن استفاده شده است که شماره این دیودها MBR745 می باشد. لازم به ذکر است که جهت آن ها به گونه ای است که در هنگام خاموش شدن فاز بتوانند انرژی باقی مانده در فاز را به منبع بازگردانند. به منظور درایو و راه اندازی سوئیچ های قدرت استفاده شده، از درایورهای ماسفت قدرت با شماره های TSC426 و TSC427 استفاده شده است. این درایورهای قدرت قادرند تا جریانی حدود ۱/۵ آمپر به گیت ماسفت ها جهت روشن شدن اعمال کنند. بنابراین ماسفت ها با سرعت بالا قادر به روشن شدن خواهند بود.

۳-۴-۲ بخش ایزوله کننده مدار قدرت و دیجیتال

قبلاً این بخش به صورت مختصر توضیح داده شد و در اینجا به توضیحات تکمیلی و مدارات استفاده شده پرداخته می شود. این بخش به منظور جلوگیری از آسیب دیدن بخش دیجیتال و پردازش گر از نوسانات و یا اختلالات دیگر مدار قدرت در نظر گرفته شده است. در این بخش برای جدا کردن سیگنال های ولتاژ القاء شده در هر فاز از بخش قدرت و انتقال آن به بخش دیجیتال جهت نمونه گیری از آن ها، از دو ترانس ایزوله به نحوی که در شکل ۱۷ نشان داده شده است استفاده شده است. همچنین به منظور جلوگیری از انتقال ولتاژ القایی بالا به بخش دیجیتال و مدار نمونه گیر در دو سر ثانویه ترانس ها از



شکل ۱۵: بلوک دیگرام مدار راه انداز

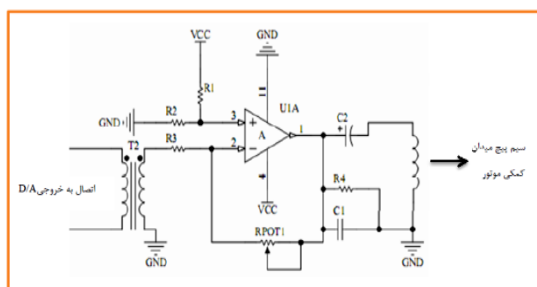
بخش مدار قدرت وظیفه اعمال و قطع ولتاژ و جریان هر فاز را عهده دار می باشد و این عمل را به کمک فرمانی که از پردازنده صادر و به درایورهای ماسفت داده می شود، انجام می دهد. بخش ایزوله کننده برای جلوگیری از آسیب رسیدن به قطعات بخش دیجیتال به دلیل نوسانات در بخش قدرت تعبیه و پیاده سازی شده است و به کمک این بخش قسمت های دیجیتال و قدرت به طور کامل از هم مجزا شده اند. بخش D/A جهت تولید موج سینوسی و اعمال آن به میدان کمکی موتور می باشد و بخش A/D به منظور نمونه گیری از ولتاژ القایی و انجام پردازش بر روی آن می باشد. پردازنده نیز وظیفه تولید موج سینوسی با فرکانس بالا و همچنین هماهنگی بخش های مختلف از جمله A/D و D/A و فرامین ارسالی به فازها را برعهده دارد. کلیه بخش ها در قسمت های بعد به تفصیل توضیح داده خواهند شد.

۳-۴-۳ شرح بخش های مختلف مدار راه انداز

در این قسمت بخش های مختلف مدار راه انداز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۴-۱ بخش قدرت

همان گونه که در قسمت قبل گفته شد این بخش جهت روشن و خاموش کردن فازها استفاده شده است. مدار راه انداز قدرت استفاده شده در این مقاله از نوع مبدل دو کلیدی در هر فاز می باشد که فازهای موتور به صورت سری در بین این کلیدها قرار گرفته اند. شکل ۱۶ نحوه قرارگیری این کلیدها و فازهای موتور را نشان می دهد.



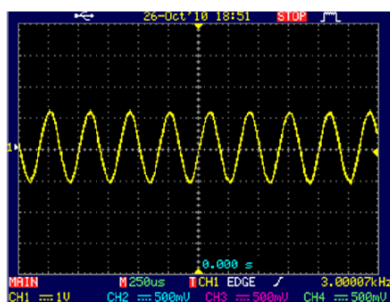
شکل ۱۹: مدار ایزوله و تقویت کننده سیگنال اعمالی به میدان کمکی

۳-۴-۳ بخش نمونه‌گیری و تولید نمونه سیگنال فرکانس بالا

این دو بخش در حقیقت قسمتی از برد آموزشی مورد استفاده می‌باشند. این بخش‌ها رابط قسمت آنالوگ با پردازنده و بالعکس می‌باشند. درواقع تولیدکننده سیگنال آنالوگ و نیز دریافت‌کننده سیگنال آنالوگ جهت تبدیل آن به دیتای دیجیتال هستند.

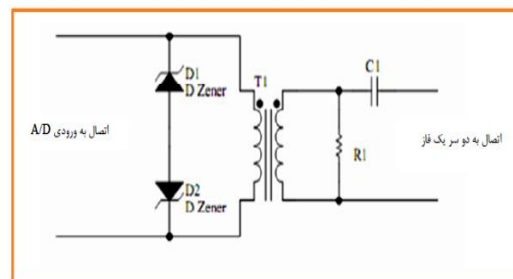
۳-۴-۳-۱ بخش D/A

از قسمت D/A جهت تبدیل نمونه‌های دیجیتال موج سینوسی با فرکانس ۳ کیلوهرتز به سیگنال آنالوگ استفاده شده است (این سیگنال در بخش‌های بعدی بررسی خواهد شد). این موج سینوسی جهت اعمال به سیم‌پیچ میدان کمکی موتور و به دنبال آن تشخیص موقعیت روتور از روی ولتاژ القایی روی هر فاز استفاده و بهره‌برداری می‌شود و فرکانس آن باید به مقدار کافی از فرکانس کاری موتور بالاتر باشد. بر همین اساس فرکانس ۳ کیلوهرتز انتخاب شد که حدوداً ۱۰ برابر بالاترین فرکانس کاری موتور می‌باشد. D/A استفاده شده در این مقاله یک D/A ۱۶ بیتی می‌باشد و همان‌گونه که مشخص است هر چه بیت‌های یک D/A بالاتر باشد، محدوده ولتاژی موردنظر را به قسمت‌های کوچک‌تری تقسیم می‌کند و این به معنای آن است که در سیگنال خروجی حالت پله‌های بسیار کوچک بوده و دقت بالاتر می‌رود. نمونه‌های این سیگنال ۳ کیلوهرتز با فرکانس ۴۸ کیلوهرتز تولید و در ورودی D/A گذاشته می‌شود. فرکانس نمونه‌برداری برابر فرکانسی است که نمونه‌ها قرار است با آن تولید شوند که در این مقاله ۴۸ کیلوهرتز می‌باشد. شکل موج سیگنال تولیدشده در شکل ۲۰ آورده شده است.



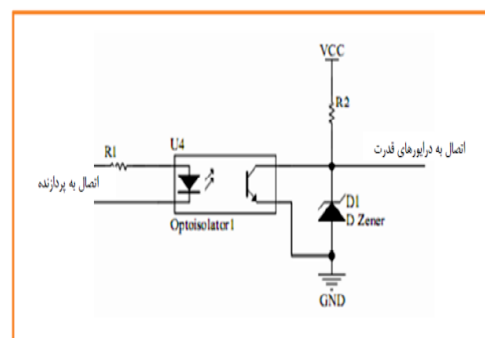
شکل ۲۰: سیگنال ۳ کیلوهرتز تولیدشده

دیودهای زنر به صورت پشت‌به‌پشت استفاده گردیده که در شکل نیز نشان داده شده است. عملکرد آن‌ها به این صورت است که در صورت القاء ولتاژ بالا در خروجی ترانس ولتاژ خروجی بریده شده و به مدار نمونه‌گیر که همان A/D است، آسیبی وارد نمی‌شود. درضمن به دلیل دوفازی بودن موتور مورد استفاده در این قسمت دو مدار مشابه به دست می‌آید.



شکل ۱۷: مدار ایزوله کننده ولتاژ القایی

برای ایزوله نمودن فرمان‌هایی که توسط پردازنده تولید می‌شود از مدار شکل ۱۸ استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است از یک اپتوکوپلر استفاده شده است که سمت ورودی آن به منظور اینکه جریان زیادی از پردازنده کشیده نشود با یک مقاومت به آن وصل شده و سمت خروجی آن به درایورهای ماسفت قدرت متصل شده است. دیود زنی که در خروجی قرار گرفته است به منظور تأمین ولتاژ مناسب جهت اتصال به درایورها استفاده شده است.



شکل ۱۸: مدار ایزوله کننده فرامین

به منظور ایزوله نمودن سیگنال فرکانس بالا از بخش قدرت و تقویت آن از مدار شکل ۱۹ استفاده شده است. با نگاهی به شکل مشخص است که برای ایزوله نمودن از یک ترانس استفاده شده است که بلافاصله بعد از خروجی D/A قرار گرفته است و سر ثانویه ترانس به ورودی تقویت کننده متصل شده است. این تقویت کننده بیشتر یک تقویت کننده جریان است تا ولتاژ، چراکه دامنه سیگنال اعمالی به میدان کمکی حدود ۴ ولت است که D/A توانایی تولید این دامنه را دارد، ولی جریان موردنظر را نمی‌تواند تأمین کند، به همین دلیل از تقویت کننده استفاده شده است.

۳-۴-۲ بخش A/D

از این قسمت جهت نمونه‌برداری از ولتاژهای القاء شده در هر فاز استفاده می‌شود و با توجه به این‌که ولتاژهای القاء شده دارای دامنه بسیار کمی می‌باشند (حدود ۰/۲ ولت پیک تا پیک) بنابراین این قسمت باید دارای دقت بالایی در نمونه‌برداری باشد و برای این منظور در این قسمت نیز از یک A/D ۱۶ بیتی استفاده شده است که دارای دقت کافی برای مقادیر کوچک باشد. در این قسمت قبل از نمونه‌برداری، در درون خود A/D سیگنال موردنظر تا حدودی تقویت شده و سپس عمل نمونه‌گیری انجام می‌شود. در ورودی این A/D می‌توان تا حدود ۵ ولت پیک تا پیک قرارداد که با توجه به ۱۶ بیتی بودن آن مشخص است که دقت آن چقدر بالاست و در نمونه‌برداری از تغییرات کوچک ورودی تا چه حد توانا می‌باشد. طبق تئوری نایکوئیست حداقل سرعت نمونه‌برداری از یک سیگنال برای این‌که بتوان آن سیگنال را دوباره بازسازی کرد معادل دو برابر بالاترین مؤلفه فرکانسی موجود در آن سیگنال می‌باشد و به همین دلیل جهت دقت بالاتر در این مقاله سرعت نمونه‌برداری این A/D برابر ۴۸ کیلوهرتز انتخاب شده است که در مقایسه با فرکانس موج اعمالی به میدان و ولتاژ القاء شده در فازها سرعت مناسب و قابل قبولی است.

۳-۴-۴ بخش پردازش

بخش اصلی و مرکزی در مدار راهانداز بخش DSP و پردازش سیگنال‌ها می‌باشد. در این قسمت ابتدا نمونه‌های دیجیتال سیگنال ۳ کیلوهرتز تولید و به D/A داده می‌شود تا سیگنال موردنظر با فرکانس ثابت و ایده‌آل تولید شود. سپس با فرمان به مدار A/D مقادیر ولتاژهای القایی از روی هر یک از فازها خوانده شده و به صورت دیجیتال وارد پردازش‌گر می‌شود و پس از عبور از فیلتر و دمدولاسیون و کشف موقعیت روتور فرامین مربوط به فازها صادر می‌گردد. با توجه به مطالب گفته شده می‌توان این بخش را به دو قسمت اصلی به صورت زیر تقسیم کرد:

الف - بخش پیاده‌سازی فیلتر میان‌گذر دیجیتال

ب - بخش دمدولاسیون دامنه

۳-۴-۱ بخش پیاده‌سازی فیلتر میان‌گذر دیجیتال

با توجه به این‌که در هنگام سوئیچ‌زنی و چرخش موتور نویزهای زیادی تولید و سوار بر ولتاژ القایی در فازها می‌شود، بنابراین برای درک درست و قابل‌فهم از سیگنال نمونه‌برداری شده، لازم است که در ابتدا آن سیگنال به صورت تک فرکانس اولیه یعنی همان فرکانسی که به میدان کمکی اعمال شده، ایجاد شود. برای این منظور ابتدا باید این سیگنال را فیلتر و نویزها را از آن حذف کرد. در این مقاله از یک فیلتر مرتبه دو با تابع تبدیل گسسته زمان رابطه (۱) استفاده شده است:

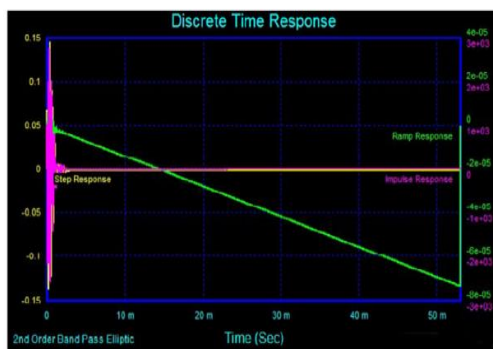
$$\frac{1.426e(-2) * Z^3 - 2.859e(-2) * Z^2 + 1.43e(-2) * Z}{Z^4 - 3.528 * Z^3 + 4.937 * Z^2 - 3.221 * Z + 0.8339} \quad (1)$$

مشخصات این فیلتر به صورت آورده شده در جدول ۲ می‌باشد.

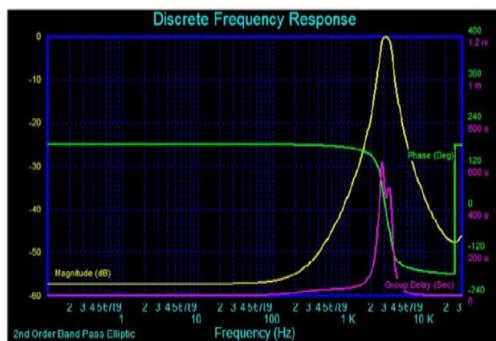
جدول ۲: مشخصات فیلتر میان‌گذر دیجیتال

فرکانس مرکزی	۳ کیلوهرتز
پهنای باند عبور	۷۰۰ هرتز
پهنای باند قطع	۸۰۰ هرتز
تضعیف در باند قطع	۸/۱۲ دی بی
تعداد دور سیم‌پیچ میدان	۴۰۰ دور

در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ پاسخ فرکانسی و پاسخ زمانی تابع ضربه، پله و شیب این فیلتر آورده شده است. همان‌گونه که از روی شکل پاسخ فرکانسی این فیلتر مشخص است، این فیلتر فرکانس موردنظر را به خوبی عبور داده و نویزها را در حد قابل قبولی حذف می‌کند.



شکل ۲۱: پاسخ فرکانسی فیلتر پیاده‌سازی شده

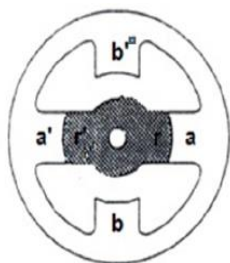


شکل ۲۲: پاسخ زمانی فیلتر پیاده‌سازی شده برای توابع ضربه، پله و شیب

با توجه به این‌که طراحی فیلتر دیجیتال با توجه به فرکانس نمونه‌برداری انجام می‌شود و این‌که در این مقاله سیگنالی که قرار است فیلتر شود، نیز توسط همین پردازنده تولید و نمونه‌برداری می‌شود، بنابراین فرکانس مرکزی این فیلتر دقیقاً برابر فرکانس سیگنال موردنظر می‌باشد. در شکل ۲۳ ورودی و خروجی فیلتر در

قبلاً گفته شد نمونه‌برداری در این مدار با فرکانس ۴۸ کیلوهرتز انجام می‌شود. لذا با کمی دقت معلوم می‌شود که سرعت نمونه‌برداری ۱۶ برابر فرکانس موج حامل می‌باشد و این بدین معنی است که از هر یک سیکل موج حامل ۱۶ نمونه دیجیتال (عدد) در دسترس می‌باشد. برای آشکارسازی دامنه کافی است که نقاط بیشینه موج حامل پیدا و آشکارسازی شود. بنابراین کافی است که از بین این ۱۶ نمونه، بزرگ‌ترین نمونه را پیدا و با ادامه این روند و تکرار آن آشکارسازی پوش را به‌صورت دیجیتالی انجام داد.

در این قسمت لازم است که در مورد زمان سوئیچ کردن فازها با در نظر گرفتن موقعیت روتور اشاره‌ای شود. همان‌طور که در شکل ۲۵ نشان داده شده‌است، قطب‌های r و r' روتور با a و a' هم‌راستا هستند و بنابراین برای شروع حرکت لازم است که به فاز b و b' یک جریان اعمال گردد. با این عمل یک شار در قطب‌های b و b' ایجاد می‌شود و چون خطوط میدان میل به حرکت در کوتاه‌ترین مسیر با کم‌ترین مقاومت مغناطیسی را دارند، لذا روتور را به سمت قطب‌های b و b' حرکت داده تا اینکه کاملاً در راستای این قطب‌ها قرار گیرد و کمترین مقاومت و کوتاه‌ترین مسیر را داشته باشد. این همان لحظه‌ای است که باید جریان این فاز قطع گردد و جریان به فاز دیگر اعمال شود تا اعمال فوق دوباره تکرار و روند چرخش ادامه پیدا کند. بنابراین با دو بار تحریک متوالی، روتور به اندازه ۱۸۰ درجه خواهد چرخید. لازم به ذکر است که در هر لحظه تنها یکی از فازها روشن و فاز دیگر خاموش است.

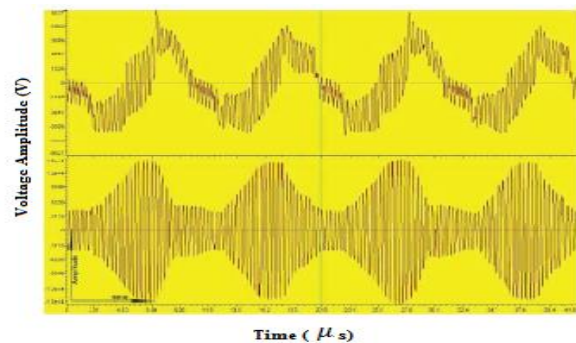


شکل ۲۵: نمایی از یک موتور دو فاز

۴- تشخیص موقعیت روتور نسبت به استاتور در DSP و تعیین زمان سوئیچ کردن فازها

همان‌گونه که در قسمت قبل نیز بیان شد زمان خاموش شدن یک فاز و روشن کردن فاز بعد هنگامی است که قطب‌های روتور در همپوشانی کامل با قطب‌های استاتور قرار گیرد. همپوشانی کامل یعنی بیشینه شدن ولتاژ در فازی که فعال است و جریان به آن اعمال شده‌است و در هنگام بیشینه شدن ولتاژ القایی باید عمل سوئیچ‌زنی صورت گیرد و فاز فعال خاموش شود. به این دلیل که در هنگامی که فاز فعال است و به منبع متصل شده، ممکن است دامنه سیگنال القایی تحت تأثیر منبع قرار گیرد، بنابراین از فاز غیرفعال برای تشخیص موقعیت روتور استفاده می‌شود. به‌طور کلی، برای

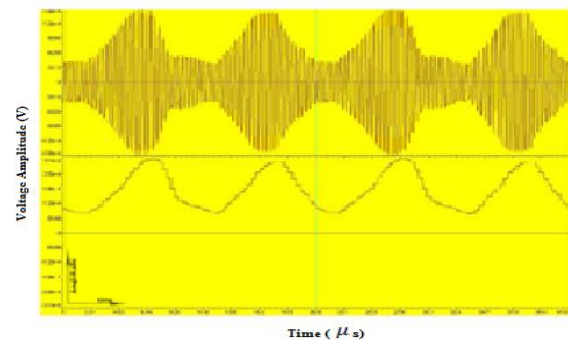
شرایط کارکرد واقعی و در هنگام چرخش موتور نشان داده شده‌است و از روی شکل می‌توان پی برد که کیفیت فیلتر طراحی و پیاده‌سازی شده برای این مدار قابل قبول می‌باشد.



شکل ۲۳: نمونه‌ای از ورودی و خروجی فیلتر پیاده‌سازی شده

۳-۴-۲ بخش دمدولاسیون دامنه

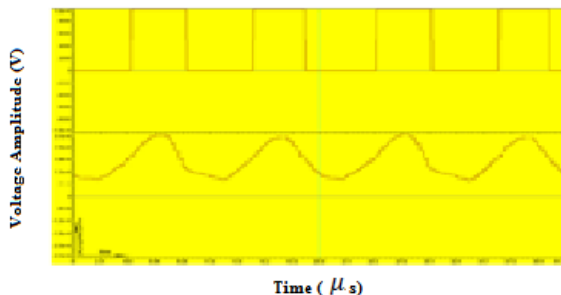
با توجه به آن‌چه در مورد موتور رلوکتانس سوئیچی بیان شد، بدیهی است که در حالت هم‌پوشانی کامل قطب‌های روتور و استاتور، بیشترین دامنه در ولتاژ القایی و در حالت عدم همپوشانی کمترین دامنه وجود خواهد داشت. بنابراین در هنگام چرخش روتور دامنه ولتاژ القایی در فازها دائماً تغییر می‌کند و این تغییرات دامنه حاوی اطلاعات مفید و مهمی از وضعیت و موقعیت روتور می‌باشد. در شکل ۲۴ سیگنال القایی نمونه‌گیری شده بعد از فیلتر شدن و آشکارسازی پوش که توسط DSP در حین چرخش موتور ذخیره شده نشان داده شده‌است.



شکل ۲۴: ورودی و خروجی آشکارساز دامنه

در این بخش در حقیقت سعی بر آن است که این تغییرات دامنه که به‌صورت یک شکل موج متناوب است، آشکارسازی شود که این نوع آشکارسازی به نام آشکارسازی دامنه معروف است و در این مدار به این صورت پیاده‌سازی شده‌است که سیگنال موردنظر پس از عبور از فیلتر و حذف بخش‌های ناخواسته موجود در آن وارد این قسمت جهت آشکارسازی می‌شود. نحوه آشکارسازی به این صورت است که با توجه به این که فرکانس موج حامل که از نوع همان سیگنال اعمالی به میدان کمکی می‌باشد برابر با ۳ کیلوهرتز است و همان‌گونه که

روش نوینی برای کنترل سرعت بدون استفاده از روش‌های معمول ارائه شده‌است. همان‌گونه‌که در بخش قبل بیان شد، برای جبران سازی تأخیرها و یا پیش‌فازسازی نیاز به اندازه‌گیری سرعت چرخش روتور می‌باشد، تا مقدار جبران‌سازی و یا پیش‌فاز سازی را بتوان تعیین کرد. با توجه به ساختار موتور و این‌که موتور-ژنراتور مورد استفاده در این مقاله یک موتور دوفاز است، لذا در هر دور کامل روتور به هر فاز دو بار فرمان می‌دهد. چون زمان فرمان‌ها از روی مقدار کمینه ولتاژ القایی در هر فاز تعیین می‌شود که نمونه‌های آن را در پردازنده می‌توان یافت، بنابراین کمینه ولتاژ القایی متناسب با سرعت چرخش می‌باشد. یعنی در هر دور، دو بار کمینه سیگنال آشکار سازی شده ولتاژ القایی دیده می‌شود و این بدان معنی است که فرکانس سیگنال پوش به‌دست آمده دو برابر سرعت چرخش روتور می‌باشد. از همین امر می‌توان برای اندازه‌گیری سرعت و کنترل آن با استفاده از پیش یا پس آوردن زوایای آتش استفاده کرد.



شکل ۲۶: سیگنال فرمان (بالایی) و موج آشکار سازی شده (پایینی)

۴-۳ نتایج و شکل موج‌های حاصله از پیاده‌سازی مدار مربوطه

هدف نهایی از انجام مواردی که تاکنون ذکر شد، صدور فرمان‌های مناسب با توجه به موقعیت روتور به گیت‌های ماسفت‌های قدرت جهت اعمال ولتاژ به فازها و در نتیجه چرخش مناسب و سریع روتور می‌باشد و همان‌طور که دیده می‌شود زمان‌بندی این فرمان‌ها بسیار مهم می‌باشد و باید دقیقاً در محل و زمان مناسب با توجه به موقعیت روتور حاصل شود. لذا اگر چنین نباشد چرخشی نخواهیم داشت و یا چرخش با ریپل بسیار بالا و کند خواهد بود.

در شکل ۲۷ مدار طراحی شده که به بخش DSP و موتور متصل است، در حالت کار موتور نشان داده شده‌است و در هنگام کار شکل موج‌های بخش‌های مختلف آن اندازه‌گیری شده که در شکل‌های بعد آورده شده‌است. در شکل ۲۸ نیز شکل موج‌های مربوط به گیت‌های ماسفت‌ها در هنگام چرخش موتور نشان داده شده‌است. همان‌گونه‌که از روی شکل موج‌ها مشخص است، در هر لحظه تنها یک فاز از موتور روشن است. در شکل‌های ۲۹ و ۳۰ شکل موج‌های ولتاژ و جریان فازها در هنگام چرخش موتور نشان داده شده‌است.

راه‌اندازی این موتور دو الگوریتم وجود دارد. الگوریتم استارت که ابتدا موقعیت استاتور و روتور را از طریق سیگنال‌های دریافتی از فازها به‌دست آورده و فازی را که موقعیت استاتور و روتور در حالت غیرهم‌راستایی باشد روشن کرده و در این حالت موتور استارت می‌خورد. پس از آن الگوریتم دوم که چرخش منظم روتور است توسط فازی که قبلاً در حالت روشن انتخاب نشده عمل می‌کند. هم‌چنین، چون موتور-ژنراتور استفاده شده در این مقاله دو فاز می‌باشد، بنابراین زمانی که یک فاز در هم‌پوشانی کامل قرار می‌گیرد فاز دیگر در حالت عدم هم‌پوشانی قرار دارد و این به آن معنی است که وقتی ولتاژ القایی در یک فاز بیشینه است، در فاز دیگر این ولتاژ در کمینه مقدار خود می‌باشد.

با توجه به این‌که در این مقاله به دلیل استفاده از DSP به مقادیر دیجیتالی و عددی نیاز می‌شود، لذا می‌توان این بیشینه و کمینه‌ها را با مقایسه با اعداد متناسب با مقادیر بیشینه و کمینه یافته و فرامین لازم را صادر کرد. بنابراین برای جلوگیری از بروز خطا و اشتباه و رفتار غیرخطی موتور به دلیل خطاهای موجود در هنگام ساخت، هم‌زمان با این مقایسه از سیگنال موردنظر مشتق‌گیری نیز انجام می‌شود و زمانی که هر دو شرط مشتق و مقایسه برقرار باشد فرمان مربوطه صادر می‌شود.

۴-۱ پیش‌فازسازی و جبران تأخیرها

همان‌طور که به نظر می‌رسد، در پروسه گفته شده در بخش‌های قبل، یک سری تاخیرات مشاهده می‌شود، که اصلی‌ترین آن‌ها تأخیر مربوط به فیلترهای استفاده شده می‌باشد و به هیچ‌وجه قابل چشم‌پوشی نمی‌باشند و اگر برای جبران آن راه‌کاری اتخاذ نگردد، موتور با سرعت خیلی پایین و با ریپل زیاد خواهد چرخید. این تأخیر به معنی آن است که مقدار بیشینه و یا کمینه‌ای که هم‌اکنون مشاهده می‌شود، بازمانی که آن‌ها واقعاً اتفاق افتاده‌اند متفاوت است و این مقادیر زودتر از مشاهده اتفاق افتاده‌اند. بنابراین فرمان خاموش و یا روشن شدن فاز در حقیقت باید در مقداری قبل از مقادیر بیشینه و یا کمینه داده شود تا موتور بتواند به‌صورت صحیح بچرخد.

شکل موج سیگنال آشکار شده و زمان فرمان به فاز در شکل ۲۶ نشان داده شده‌است. در شکل ۲۶ مقدار یک به معنی خاموش بودن فاز و مقدار صفر به معنای روشن بودن فاز است که این به دلیل مدار استفاده شده می‌باشد.

همان‌گونه‌که مشخص است فرمان در نقطه‌ای غیر از مقدار کمینه به فاز اعمال شده‌است که این امر به دلیل همان جبران‌سازی می‌باشد.

۴-۲ کنترل سرعت

در همه موتورهای الکتریکی کنترل سرعت یکی از مهم‌ترین مواردی است که باید مدنظر قرار گیرد. اکثراً از یک فیدبک تاکومتری برای این منظور استفاده می‌شود که به دلیل استفاده از یک سیستم خارجی می‌تواند دارای خطا باشد و یا ایراداتی پیدا کند. در این مقاله

۵- مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های موجود

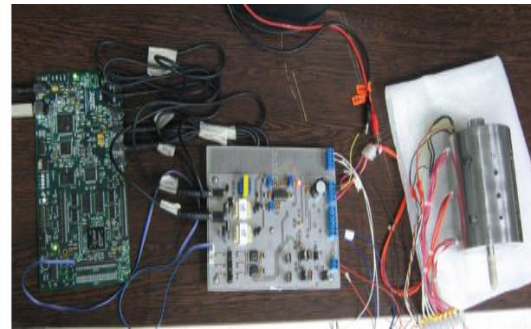
در روش استفاده شده به دلیل استفاده از کنترلر DSP دقت کار و محاسبات حتی در سرعت‌های بالا حفظ می‌شود. البته این قطعه کنترلی نسبت به دیگر اقسام کنترلر قیمت بالاتری دارد. در دیگر روش‌هایی که از کنترلرهای ارزان‌تر از جمله AVR استفاده می‌شود دقت و سرعت کنترل پایین‌تر بوده و عموماً موتور قادر به دستیابی به سرعت بسیار بالایی نخواهد بود. البته در این موارد قیمت به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. در کل انتخاب نوع کنترلر بستگی به نوع کاربرد مدار خواهد داشت. عموماً برای کاربردهای معمول دقت بالایی مدنظر نیست و بنابراین می‌توان از کنترلرهای ساده‌تر و ارزان‌تر استفاده نمود. اما در کاربردهای با دقت بالا بهتر است از کنترلر DSP پیشنهادی استفاده نمود. همچنین این سیستم نسبت به سیستم‌های درایو مبتنی بر سنسور موقعیت مزیت‌هایی دارد که می‌توان به توانایی کارکرد موتور در دماهای بالا و محیط‌های همراه با گرد و خاک و آلودگی و همچنین عدم وجود نویز کوانتیزاسیون اشاره نمود.

۶- نتیجه‌گیری

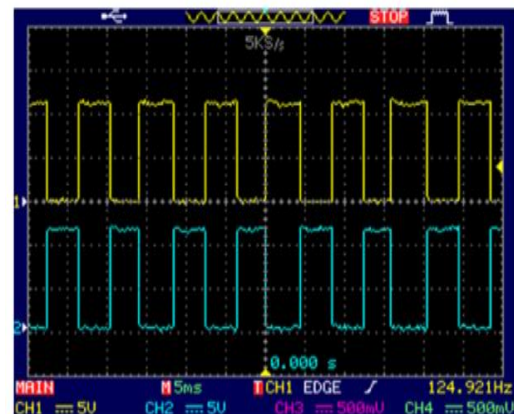
در این مقاله روش جدیدی برای درایو موتور- ژنراتور رلوکتانس سوییچی با میدان کمکی به وسیله DSP معرفی شد که در آن تعیین موقعیت روتور بدون استفاده از سنسور موقعیت است. این امر موجب کاهش در هزینه ساخت و تعداد سیم‌های متصل به موتور و در نتیجه افزایش طول عمر آن شده و استفاده از آن را در مکانی پر گردوغبار مهیا می‌سازد. به دلیل استفاده از پردازنده DSP سرعت پردازش بسیار بالا می‌باشد و این امر باعث کاهش تاخیرات پردازشی و در نتیجه کنترل بهتر موتور می‌شود. مزیت دیگر استفاده از DSP و نمونه‌گیری از سیگنال‌ها در آن است که می‌توان فیلترهای دیجیتال مرتبه بالا را به راحتی پیاده‌سازی کرد و سیگنال را به خوبی فیلتر و از آن استفاده نمود و چون نمونه‌ها در دسترس می‌باشند می‌توان جبران سازی و پیش‌فاز سازی را به خوبی انجام داد. مزیت دیگر نمونه‌گیری از سیگنال به صورت دیجیتال این است که می‌توان با ذخیره سازی آن، هر نوع اطلاعاتی از آن را دوباره بازنگری کرد.

مراجع

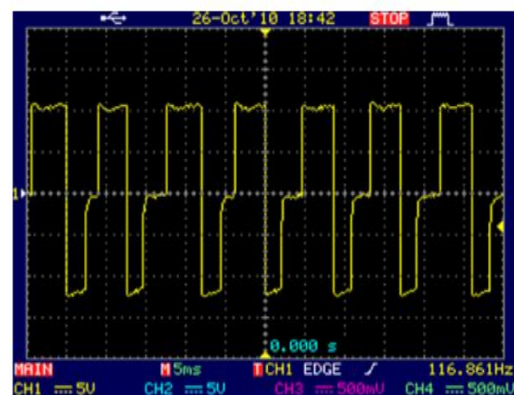
- [1] R. Krishnan, *Switched reluctance motor Drives, Modeling, Simulation, Analysis, Design, And Applications*, CRC Press, 2001.
- [2] P.J. Lawrenson, "Variable-Speed Switched Reluctance Motors," *IEE Proceedings B - Electric Power Applications*, vol.127, no. 4, pp. 253-265, 1980.
- [3] Jin-Xiao Lu, D. Ebiara, K. Hamatsu and H. Arima, "A movable angle control strategy of switched reluctance motor with Hall-effect position sensor," *The Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2000)*, vol.3, pp. 1279 - 1284, 2000.
- [4] E. Afjei, M.M. Nezamabadi, A. Saati, "A New Shaft Position Control for Switched Reluctance Motor in Harsh Environment," *WSEAS Transactions*, vol. 2, no. 4, pp. 228 - 232, 2005.
- [5] M. Ehsani, I. Husain, "Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motor Drives by Measuring Mutually Induced



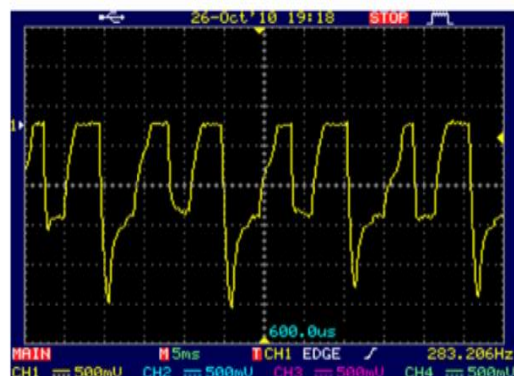
شکل ۲۷: مدار طراحی شده به همراه برد DSP و موتور در حین کار



شکل ۲۸: فرامین ارسالی به گیت سوئیچ‌های قدرت (5 V/div)



شکل ۲۹: شکل موج ولتاژ دو سر فاز (5 V/div)



شکل ۳۰: شکل موج جریان فاز برای بار یک اهمی (500 mA/div)

- pulse injection and two thresholds,” IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 2660 – 2666, 2010.
- [13] C.Wang, Z. Deng, J.Cai, R.Hu, “Indirect position estimation method for switched reluctance motor using searching windings,” 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 3553 – 3557, 2014.
- [14] T.Koblara, C. Sorandaru, S. Musuroi and M. Svoboda, “A low voltage sensorless Switched Reluctance Motor drive using flux linkage method,” 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), pp. 665 – 672, 2010.
- [15] A. De La Guerra, M. A. Arteaga-Pérez, A. Gutiérrez-Giles, P. Maya-Ortiz, “Speed-sensorless control of SR motors based on GPI observers,” Control Engineering Practice, vol. 46, pp. 115–128, 2016.
- [16] B. Mirzaeian Dehkordi, A.Parsapoor, M. Moallem, C. Lucas, “Sensorless speed control of switched reluctance motor using brain emotional learning based intelligent controller,” Energy Conversion and Management, vol. 52, no. 1, pp. 85–96, 2011.
- [17] E. Echenique, J. Dixon, R. Cárdenas and R. Peña, “Sensorless Control for a Switched Reluctance Wind Generator, Based on Current Slopes and Neural Networks,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.56, no.3, 2009.
- [18] E. Afjei, E., A.R. Siadatan, “A novel two phase hybrid switched eluctance motor /field-assisted generator: concept, simulation, and experimental confirmation,” IJE TRANSACTIONS B: Applications, vol. 22, no. 4, pp. 357-368, 2009.
- [19] Magnet CAD Package: User Manual, Infolytica Corporation Ltd., Montreal, Canada, 2006.
- [20] W.S. Baik, M.H. Kim, N.H. Kim, D.H. Kim, “Position Sensorless Control System of SRM using Neural Network,” 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol.5, pp. 3471 – 3475, 2004.
- Voltages,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol.30, no.3, pp.665-672, 1994.
- [۶] ابوالفضل حلوائی نیاسر، علیرضا فرجی، « کنترل بدون حسگر موتور بدون جاروبک آهنربای دائم غیرسینوسی بر مبنای روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی و با استفاده از رؤیت گر مود لغزشی مرتبه کامل»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۱، صفحه ۵۵–۶۸، بهار ۱۳۹۶.
- [۷] داود عرب خابوری، علی سراجیان، علیرضا عباسزاده، « کنترل پیش‌بین گشتاور بدون حسگر ماشین سنکرون رلوکتانسی مجهز شده با آهنربای دائم»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۱، صفحه ۱۷۱–۱۸۲، بهار ۱۳۹۶.
- [8] E. Afjei, M.M. Nezamabadi and A. Javah “A Complete and Novel Sensorless Method for Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motor Drives,” WSEAS Transactions, vol.2, no.4, pp. 223-227, 2005.
- [9] M.Y. Wei, T.H. Liu, “A High-Performance Sensorless Position Control System of a Synchronous Reluctance Motor Using Dual Current-Slope Estimating Technique,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.59, no.9, pp. 3411 – 3426, 2011.
- [10] X. Zhang, F. Wang, X. Wu, “Low-speed direct-driven sensorless control including zero-speed for switched reluctance motor based on dynamic inductance model,” 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 763 – 767, 2014.
- [11] P.Brandstetter, P. Krna, “Sensorless control of switched reluctance motor using sliding mode observer,” International Conference on Applied Electronics (AE), pp.1-4, 2013.
- [12] G. Pasquesoone, I. Husain, “Position estimation at starting and lower speed in three-phase switched reluctance machines using