

2015

December 9-10

3rd

Dubai

International Conference

on New Approches in Sciences, Engineering & Technology

## Design And Implementation Of Three-Phase Motors Control System Using Vector Control Sterategy Based On Digital Signal Processors

Hossein Shabanloo<sup>\*1</sup>, AmirHossein Abolmasoumi<sup>2</sup>, AliAsghar Ghadimi<sup>3</sup>,

Mazdak Ebadi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> MSc Student of Arak University

Email: h.shabanloo@hotmail.com

<sup>2</sup> Assistant Professor of Arak University

Email: [a-abolmasoumi@araku.ac.ir](mailto:a-abolmasoumi@araku.ac.ir)

<sup>3</sup> MSc Student of Arak University

Email: [aa-ghadimi@araku.ac.ir](mailto:aa-ghadimi@araku.ac.ir)

<sup>4</sup> Assistant Professor of Arak University

Email: m-ebadi@araku.ac.ir.

### Abstract

In this article, three-phase motors driver controlled based on digital signal processor board, are designed and implementation. Three-phase drive which designed based on hardware circuits, is able to used in all speed control and position control processes of most motors, as sensorless or with sensor. To test and related experiments, speed control of a permanent magnet synchronous motor (PMSM) based on space vector pulse width modulation (SVPWM), using optical encoder in the vector control sterategy is considered. Also presented structures and functions of the processor TMS320F2812, which used to implement speed control system. Simulink/MATLAB software has been used for simulation of speed control PMSM and programming TMS320F2812 processor.

**Keywords:** Digital Signal Processor, Drive, PMSM, Space Vector Modulation, Speed Control, Simulink/MATLAB Software.

## طراحی و پیاده سازی سیستم کنترل موتورهای سه فاز با استفاده از استراتژی کنترل برداری بر اساس پردازنده های سیگنال دیجیتال

حسین شعبانلو<sup>1\*</sup>، امیر حسین ابوالمعصومی<sup>2</sup>، علی اصغر قدیمی<sup>3</sup>، مزدک عبادی<sup>4</sup>

پست الکترونیکی: [h.shabanloo@hotmail.com](mailto:h.shabanloo@hotmail.com)  
 پست الکترونیکی: [a-abolmasoumi@araku.ac.ir](mailto:a-abolmasoumi@araku.ac.ir)  
 پست الکترونیکی: [aaghadimi@araku.ac.ir](mailto:aaghadimi@araku.ac.ir)  
 پست الکترونیکی: [m-ebadi@araku.ac.ir](mailto:m-ebadi@araku.ac.ir)

<sup>1</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه اراک.  
<sup>2</sup> هیأت علمی دانشگاه اراک.  
<sup>2</sup> هیأت علمی دانشگاه اراک.  
<sup>2</sup> هیأت علمی دانشگاه اراک.

### چکیده

در این مقاله درایو موتورهای سه فاز که بر اساس برد پردازنده ی سیگنال دیجیتال کنترل می شوند، طراحی و ساخته شده است. درایو سه فاز بر اساس مدارات سخت افزار طراحی شده، توانایی دارد تا در کلیه ی پروسه های کنترل سرعت و یا کنترل موقعیت انواع موتورها به صورت بدون سنسور و یا با سنسور مورد استفاده قرار گیرد. جهت تست و آزمایشات مربوطه، کنترل سرعت یک موتور سنکرون مغناطیس دائم بر اساس مدولاسیون بردار فضایی با استفاده از انکودر نوری در استراتژی کنترل برداری در نظر گرفته شده است. همچنین ساختار و توابعی از پردازنده ی **TMS320F2812** که جهت پیاده سازی سیستم کنترل سرعت مورد استفاده قرار گرفته اند، به صورت مختصر شرح داده شده اند. محیط **Simulink** نرم افزار **MATLAB** به منظور شبیه سازی کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم و برنامه ریزی پردازنده ی **TMS320F2812** استفاده شده است.

**کلمات کلیدی:** پردازنده سیگنال دیجیتال، درایو، موتور سنکرون مغناطیس دائم، مدولاسیون بردار فضایی، کنترل سرعت، نرم افزار Simulink/MATLAB.

**1- مقدمه:**

در سال های اخیر با توجه به پیشرفت های روز افزون در زمینه ی الکترونیک قدرت و تکنولوژی ساخت ادوات الکترونیک قدرت، استفاده از تکنولوژی های الکترونیک قدرت رو به افزایش بوده است. یکی از مهم ترین کاربردهای تکنولوژی الکترونیک قدرت ساخت مبدل های قدرت از جمله مبدل های DC/DC, AC/DC, DC/AC می باشد که برای تبدیل و انتقال انرژی مورد استفاده قرار می گیرند (Hart, 2011). مبدل های DC/AC به دو دسته ی کلی اینورترها و درایوها تقسیم بندی شوند. درایوها و اینورترها از یکسانی برخوردار می باشند؛ با این تفاوت که درایوها به منظور کنترل سرعت موتورهای الکتریکی با تغییر فرکانس و دامنه ی ولتاژ خروجی، به کار گرفته می شوند.

کیفیت بالا، توان بالا، استحکام بالا، اینرسی کم و کشف مواد مغناطیسی جدید در ساخت موتورهای سنکرون مغناطیس دائم، از سویی موجب شده تا ساخت درایو موتورهای سنکرون مغناطیس دائم افزایش یابند تا به صورت گسترده در صنایع مختلفی همچون صنعت برق، گاز، نظامی و ... استفاده شوند. به همین منظور در (Xu, Xu, & Tang, 2001) سیستم کنترل سرعت یک موتور سنکرون مغناطیس دائم در خودروهای برقی مبتنی بر پردازنده ی TMS320F240 طراحی شده که پردازنده ی انتخابی از قابلیت و کارایی پایینی برخوردار می باشد. در (Shihua, Mingming, & Xinghuo, 2013) یک کنترلر غیرخطی مد لغزشی ترمینال، سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم را کنترل می کند. در (Hu & Nan, 2008) نیز از یک ماژول مدار قدرت PM30CSJ060، که در آن تنها به جزئیات مدار آشکارساز جریان اشاره شده، ساخته شده است. در (Jun, Wankui, & Lili, 2013) مدارات تشکیل دهنده ی درایو موتور سنکرون مغناطیس دائم طراحی و ساخته شده که جزئیات طراحی کلیه ی مدارات شرح داده شده اند؛ مدارات و تراشه های متعدد درایو (Jun et al., 2013)، افزایش حجم و هزینه درایو را در پی داشته است.

در این مقاله درایو سه فاز ی که قادر به راه اندازی انواع موتورهای الکتریکی تا قدرت 2.6 کیلووات می باشد، طراحی و ساخته شده است. جزئیات تمامی مدارات درایو، جهت عملکرد سازگار با پردازنده های سیگنال دیجیتال که از ولتاژ کاری 3.3 ولت برخوردار هستند، به صورت شماتیک ارائه شده اند. تست و راه اندازی، توسط پروسه ی کنترل سرعت یک موتور سنکرون مغناطیس دائم بر اساس روش کنترل برداری اجرا شده است. به منظور صحت عملکرد تئوری کنترل برداری و برنامه ریزی پردازنده ی TMS320F2812، از محیط Simulink نرم افزار MATLAB استفاده شده است. همچنین در این مقاله ساختار و توابعی از برد پردازنده ی TMS320F2812 که به منظور کنترل سرعت به کار گرفته می شوند، به صورت مختصر شرح داده شده اند.

**2- مدل سازی موتور سنکرون مغناطیس دائم مبتنی بر روش کنترل برداری:****2-1- مدل ریاضیاتی موتور سنکرون مغناطیس دائم:**

معادلات موتورهای سنکرون مغناطیس دائم در قاب مرجع گردان جهت اجرای پروسه ی کنترل سرعت، از دو معادله ی ولتاژ و یک معادله ی دینامیکی تشکیل می شود. معادلات ولتاژ در رابطه ی (1) مشاهده می شوند:

(1)

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_s + sL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_q & r_s + sL_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \left\{ (L_d - L_q)(\omega_e i_d - \dot{i}_q) + \omega_e \lambda_f \right\} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

معادله ی دینامیکی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به منظور محاسبه ی سرعت روتور به فرم رابطه های (2) و (3) تعریف می شود:

(2)

$$s\omega_e = \frac{1}{j} [n_p T_e - n_p T_l - B\omega_e]$$

(3)

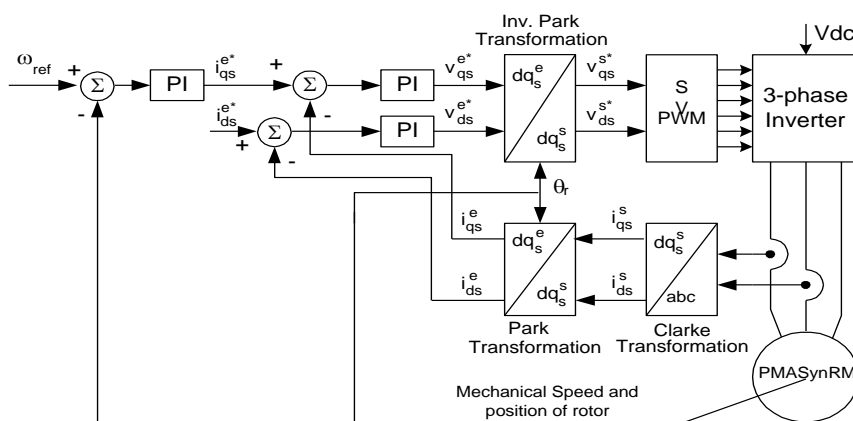
$$T_e = 1.5n_p (\lambda_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q)$$

در روابط فوق،  $i_q, i_d$  و  $v_q, v_d$  به ترتیب جریان و ولتاژهای محورهای d و q در قاب مرجع گردان، S عملگر مشتق،  $\omega_e$  سرعت چرخش روتور،  $\theta_e$  موقعیت زاویه‌ای روتور،  $L_d, L_q$  به ترتیب اندوکتانس محورهای d و q که در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم سطحی  $L_q = L_d = L$  می‌باشد،  $\lambda_f$  شارپیوند مغناطیس دائم و  $r_s$  مقاومت استاتور، B ضریب استحکاک، J ممان اینرسی،  $n_p$  تعداد جفت قطب،  $T_l$  گشتاور بار و  $T_e$  گشتاور الکترومغناطیسی در معادلات موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به شمار می‌روند.

## 2-2- قاعده‌ی کنترل برداری در موتور سنکرون مغناطیس دائم:

در کنترل جهت‌دهی میدان به روش کنترل برداری، موتور سنکرون مغناطیس دائم همانند پروسه‌ی کنترل گشتاور یک موتور DC در نظر گرفته می‌شود؛ بدین صورت که بردارهای جریان به دو جز اصلی جریان تحریک و جریان گشتاور تقسیم می‌شود. جریان تحریک نقش تولید شارمغناطیسی در موتور و جریان گشتاور نقش تولید گشتاور در موتور را برعهده دارند. در واقع پروسه‌ی کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم بر عهده‌ی این دو جز جریان می‌باشد و دقیقاً همانند کنترل یک موتور DC می‌باشد (Jun et al., 2013).

با توجه به جداسازی انجام شده در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم، از دو مولفه‌ی جریان  $i_d$  و  $i_q$  برخوردار می‌شویم که در موتورهای سنکرون مغناطیس سطحی، به دلیل تولید میدان مغناطیسی به صورت پیوسته توسط آهنرباهای روتور، مقدار جریان  $i_d$  در مقدار صفر تنظیم می‌شود و مقدار جریان  $i_q$  با استفاده از خروجی کنترلر سرعت و یا کنترلر موقعیت قابل محاسبه می‌باشد. از اینرو، بلوک دیاگرام کنترل برداری یک موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی را می‌توان به صورت شکل (1) در زیر به نمایش گذاشت (Akin & Bhardwaj, 2013). در شکل (1) مشخص است جهت پیاده‌سازی تئوری کنترل برداری در موتور سنکرون مغناطیس دائم، نیاز به کارگیری تبدیلات پارک و کلارک در معادلات هستیم تا معادلات مربوطه را به فرم مورد نیاز کنترل برداری تبدیل کنند. همچنین از دو کنترلر PI جهت کنترل جریان در حلقه‌های درونی و یک کنترلر PI جهت کنترل سرعت در حلقه‌ی بیرونی بلوک دیاگرام استفاده شده که پارامتر کنترلرها به روش (Ahmed, 1997) بدست آمده‌اند.



شکل (1): بلوک دیاگرام موتور سنکرون مغناطیس دائم با استفاده از سنسور

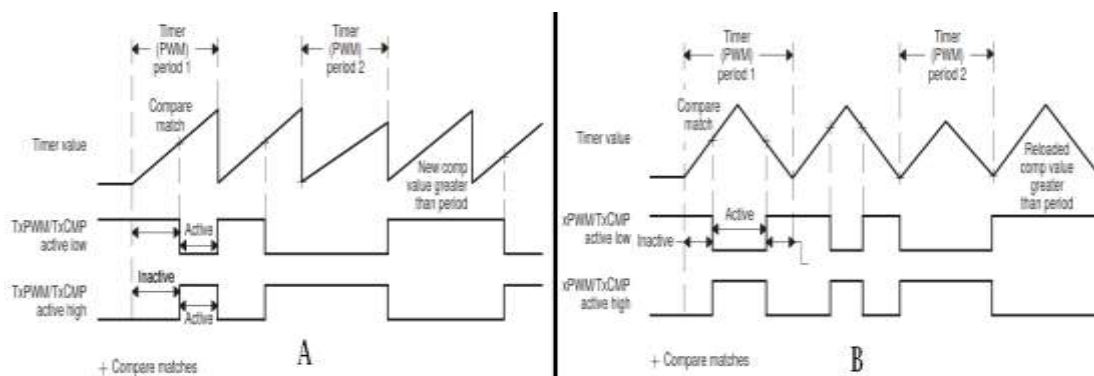
### 3- پردازنده های سیگنال دیجیتال:

یک پردازنده ی سیگنال دیجیتال در واقع سخت افزار خاصی که بر اساس عملیات ریاضی جهت مدیریت داده های دیجیتال طراحی شده است. هدف اصلی از تولید پردازنده های دیجیتال، پردازش داده ها با بیشترین سرعت ممکن و تولید یک جریان خروجی از داده های جدید در زمان واقعی می باشد. تولید خروجی از داده ها در زمان واقعی، یکی از الزامات مهم در مبدل های الکترونیک قدرت به شمار می رود؛ چراکه پردازش زمان واقعی اطلاعات در پردازنده های سیگنال دیجیتال باعث شده تا سیگنال های خروجی در هنگام تولید شدن آنها بر اساس سیگنال های ورودی محاسبه شده و در خروجی ها بدست آیند. به همین منظور پردازنده های سیگنال دیجیتال یک انتخاب طبیعی برای محققانی است که نیازمند انجام محاسبات ریاضی با سرعت بالا در الکترونیک قدرت هستند. همچنین کاهش هزینه و افزایش عملکرد بیش از طرح های کلاسیک، در پردازنده های سیگنال دیجیتال از دیگر مزایای آنها به شمار می رود.

در این پروژه از یک برد پردازنده ی TMS320F2812 که دارای قابلیت های مختلفی بوده و از جمله ویژگی های آن می توان به ماژول های تبدیل آنالوگ به دیجیتال 12 بیتی به تعداد 16 کانال، بیش از 56 کانال آدرس دهی ورودی/خروجی، هسته ی پردازنده ی 32 بیتی و ماژول های Event Manager (EV) که جهت کنترل موتورهای الکتریکی قابل بهره برداری می باشند، اشاره نمود.

در برد پردازنده ماژول های EV جهت اجرای پروسه ی کنترل سرعت و یا موقعیت با نام های EVA و EVB در برد مشخص شده اند؛ ماژول های EV دارای توابع و ویژگی های منحصر به فردی هستند که باعث شده کاربرد این پردازنده ها در تحقیقات رو به فزونی باشد. از جمله ویژگی های شاخص این ماژول ها، امکان کنترل حلقه بسته ی موتورهای الکتریکی می باشد. امکانات و قابلیت های هر دو ماژول EVA و EVB کاملاً شبیه یکدیگر بوده و این ویژگی ها برای ماژول EVA عبارتند از: پورت های خروجی PWM1 تا PWM6، دو تایمر General Purpose که به صورت GP1 و GP2 نامگذاری می شوند، ورودی های QEP1، QEP2 و QEP3 که با اعمال پالس های خروجی انکودرها به این سه ورودی، موقعیت و سرعت موتورها قابل محاسبه می باشد؛ همچنین سه ورودی نامبرده به ترتیب با عناوین CAP1، CAP2 و CAP3 نیز معرفی می شوند (Instruments, 2007). هدف اصلی از به کارگیری GP تایمرها به عنوان مقایسه کننده تولید زمان مرده در پالس های PWM می باشد. زمان مرده در مبدل های الکترونیک قدرت از الزامات راه اندازی برد اینورترها به شمار می رود که در پردازنده ی TMS320F2812 تحقق این امر با استفاده از GP1 به راحتی امکان پذیر می باشد. با تنظیم زمان مرده ی کافی در یک مبدل الکترونیک قدرت قادر خواهیم بود تا از روشن شدن همزمان کلیدهای یک بازو در اینورتر جلوگیری کنیم و تا زمانیکه کلید بالا/پایین در یک بازو کاملاً خاموش نشده، کلید دیگر در همان بازو روشن نشود.

ماژول EV در مجموع دارای 8 خروجی PWM می باشد که 6 عدد از آنها توسط سه مقایسه کننده ی کامل و 2 تای دیگر آنها توسط تایمرهای GP کنترل و تولید می شوند. در پردازنده ی مورد بحث، جهت تولید فرکانس حامل دو حالت up و down وجود دارد که در حالت up فرکانس حامل به صورت یک شکل موج دندانه ازّه ای و یا مثلثی غیرممتقارن، و در حالت up/down فرکانس حامل به صورت یک شکل موج مثلثی متقارن، فرکانس کلیدزنی را در مدولاسیون پهنای پالس تولید می کند. شکل (2) تولید پالس های PWM توسط فرکانس های حامل به حالت های up و down برای یک بازوی اینورتر به نمایش گذاشته شده است (Instruments, 2007).



شکل (2): تولید PWM با استفاده از فرکانس کلیدزنی نامتقارن (A) و متقارن (B)

برنامه‌ریزی پردازنده‌های سیگنال دیجیتال شرکت Texas Instrument، توسط نرم‌افزار خاصی تحت عنوان Code (CCS) Composer Studio صورت می‌پذیرد. کدهای پردازنده‌های سیگنال دیجیتال سری F2812 و F28335 به دو روش زیر بر روی پردازنده بارگذاری می‌شوند:

1 - روش مستقیم (برنامه نویسی زبان C و یا اسمبلی از طریق نرم‌افزار CCS)،

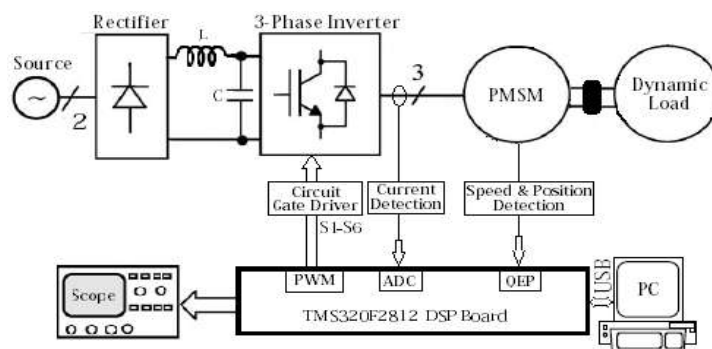
2 - روش غیر مستقیم (شبیه‌سازی در نرم‌افزار PSIM و یا نرم‌افزار MATLAB/Simulink)،

این مقاله جهت تولید کدهای سیستم کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم مبتنی بر کنترل برداری، از محیط Simulink نرم‌افزار MATLAB استفاده کرده است.

#### 4- طراحی و پیاده‌سازی مدارات سخت‌افزار سیستم کنترل:

##### 4-1- ساختار کلی سیستم کنترل:

در شکل (3) بلوک دیاگرام کلیه بخش‌های تشکیل دهنده سیستم کنترل سرعت یک موتور سنکرون مغناطیس دائم مشاهده می‌شود. با دقت در شکل (3) مشخص است که بخش سخت‌افزار سیستم کنترل شامل، یکسوساز تک‌فاز کنترل نشده، فیلتر LC جهت برخورداری از یک ولتاژ DC صاف در اینورتر، مدارات آشکار ساز، برد پردازنده سیگنال دیجیتال و مدار قدرت اینورتر که نقش تولید ولتاژهای سه‌فاز را بر عهده دارد.



شکل (3): بلوک دیاگرام بخش‌های مختلف سیستم کنترل

همانطور که در شکل (3) مشخص شده، جریان های سه فاز جهت اعمال به ماژول آنالوگ/دیجیتال، توسط مدار آشکارساز جریان با سنسور اثر هال صورت می پذیرد. همچنین سرعت و موقعیت در موتور سنکرون مغناطیس دائم، توسط یک مدار آشکارساز، پالس-های انکودر را از پردازنده ایزوله کرده و به پورت های QEP در ماژول EV متصل می گردند. علاوه بر این در دیاگرام شکل (3)، برد گیت درایو نقش اصلی در راه اندازی سیستم کنترل را بر عهده دارد. عمل سوئیچینگ کلیدهای قدرت و ایزولاسیون بین مدار قدرت و پردازنده، از وظایف اصلی برد گیت درایو به شمار می روند.

#### 2-4- طراحی مدار قدرت:

مدار قدرت سیستم کنترل متشکل از ماژول یکسوساز کنترل نشده، فیلتر LC، مدار کلیدهای قدرت و مدارات حفاظت کلیدهای قدرت می باشد. در سیستم کنترل ساخته شده یک ماژول یکسوساز غیرقابل کنترل D25XD80 با ولتاژ نامی 800 ولت نقش تولید ولتاژ یکسو با دامنه ی حدود 300 ولت (به دلیل تک فاز بودن) در مدار را بر عهده دارد. به همین منظور، عمل صافی جهت برخوردار شدن از یک ولتاژ DC صاف در مدار قدرت سیستم کنترل، توسط 6 خازن 680 میکرو فارادی با ولتاژ نامی 450 ولت و یک سلف 5 میلی هائری با جریان نامی 15 آمپر که به صورت تجربی انتخاب شده اند، انجام می شود.

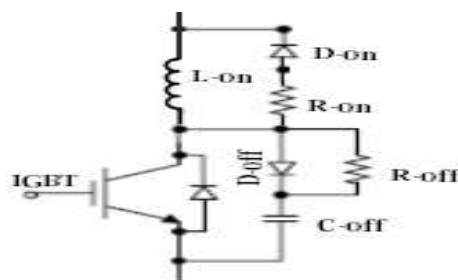
برد مدار قدرت که شامل کلیدهای قدرت و مدارات حفاظت آنها می باشد توسط نرم افزار Altium Designer طراحی و چاپ شده است. بر اساس استانداردهای رعایت شده در طراحی برد قدرت، ولتاژ نامی 600 ولت و جریان خروجی 15 آمپر برای برد قدرت قابل بهره برداری می باشد که بر اساس رابطه ی (4) در زیر قادر به محاسبه ی توان خروجی در درایو طراحی شده می باشیم:

$$P_{Out} = \sqrt{3} V_{Out} I_{Out} \cos \varphi \quad (4)$$

در رابطه ی (4)،  $V_{Out}$  رنج ولتاژ خروجی،  $I_{Out}$  مقدار موثر جریان خروجی،  $P_{Out}$  توان خروجی اینورتر و  $\cos \varphi$  کیفیت توان در اینورتر به شمار می روند. هنگام عملکرد اینورتر، با در نظر گرفتن الزامات اضافه بار در موتور، رنج قدرت 1.5 برابر شده و کیفیت توان برابر 0.7 در نظر گرفته می شود (Jun et al., 2013). به همین منظور، مقدار قدرت خروجی از طریق رابطه ی (5) به صورت زیر قابل محاسبه می باشد:

$$P_{Out} = (\sqrt{3} * 220 * 15 * 0.7) / 1.5 = 2.6 \text{ KW} \quad (5)$$

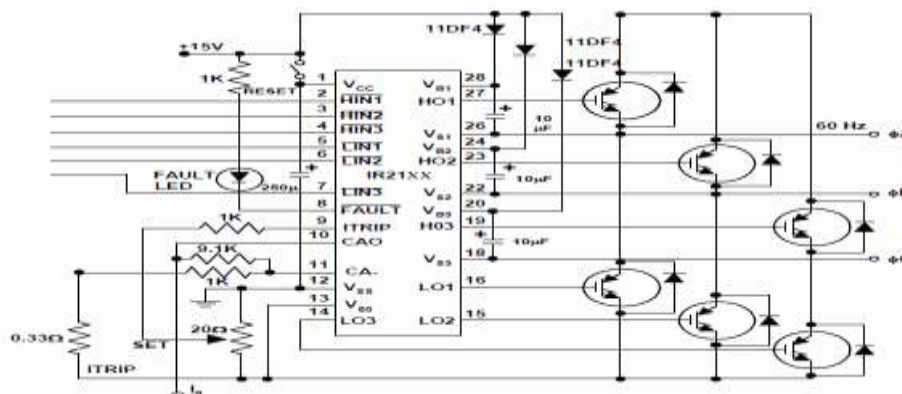
با توجه به توان خروجی 2.6 کیلووات در برد طراحی شده، برد قدرت به راحتی قادر به کنترل موتور یک کیلوواتی می باشد. در مدار قدرت اینورتر از شش کلید IGBT مدل SGH80N60UFD با جریان نامی 80 آمپر در دمای 25 درجه ی سانتی گراد، استفاده شده است. جهت حفاظت کلیدها در هنگام روشن/خاموش شدن و همچنین جهت کاهش تلفات کلیدزنی در پروسه ی کنترل سرعت، از دو مدار اسنابر روشن/خاموش که به ترتیب به صورت سری و موازی با هر یک کلیدها قرار می گیرند، در نظر گرفته شده است. شکل (4) نحوه ی اتصال مدارات اسنابر تنها برای یک کلید IGBT را نمایش می دهد.



شکل (4): نحوه ی اتصال مدارات اسنابر روشن (on) و خاموش (off)

## 3-4- طراحی مدار گیت درایو:

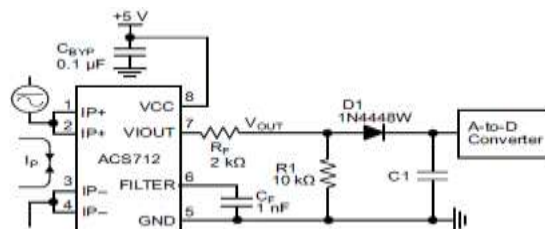
جهت ایجاد ایزولاسیون بین پردازنده سیگنال دیجیتال و مدار قدرت، اپتوکوپلر سرعت بالای 6N137، به همراه تراشه گیت درایو IR-2132 که نقش منبع تغذیه سوئیچینگ را در مدار ایفا می کند، استفاده شده است. مدار شماتیک گیت درایو که دارای شش پالس ورودی/ خروجی با زمان مرده ی 0.8 میکرو ثانیه و ولتاژ نامی 600 ولت می باشد در شکل (5) دیده می شود.



شکل (5): مدار شماتیک گیت درایو IR-2132

## 4-4- مدار آشکارساز جریان:

در مدار آشکارساز جریان از سنسورهای اثر هال ACS712-20A تحت مدار شماتیک شکل (6)، جهت اندازه گیری جریان های AC و DC در نظر گرفته شده است.



شکل (6): مدار شماتیک سنسور اثر هال ACS712-5A

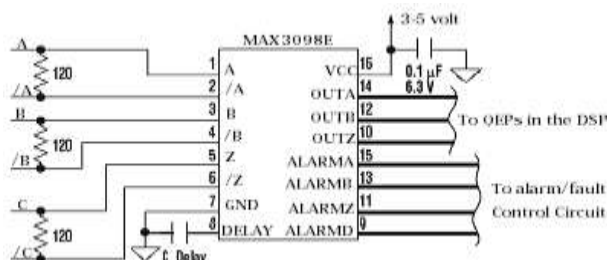
ویژگی بارز سنسورهای ACS712 شیف 2.5 ولتی در خروجی سنسور جریان می باشد. این ویژگی باعث شده تا به صورت چشمگیری از اضافه شدن مدارات جانبی به سیستم کنترل خودداری و تنها با اعمال یک مدار مقسّم ولتاژ معمولی در خروجی سنسور، که در شکل (6) نیز قابل مشاهده است، خروجی سنسور را از دامنه ی 3.3 ولت، که ولتاژ کاری در پردازنده های سیگنال دیجیتال می باشد، برخوردار کرد.

## 4-5- مدار آشکارساز سرعت و موقعیت:

بر خلاف (Jun et al., 2013) که از دو مدار مجزا به عنوان مدارات آشکار ساز سرعت و موقعیت استفاده شده و پیاده سازی این مدارات سبب افزایش حجم سیستم کنترل، افزایش خطا و افزایش هزینه در ساخت سیستم کنترل می شود. در این پروژه تنها از



یک تراشه ی MAX3098E جهت ایفای نقش مدارات آشکارساز سرعت و موقعیت در نظر گرفته شده است. شکل (7) مدار شماتیک آشکار ساز سرعت و موقعیت را نشان می دهد.

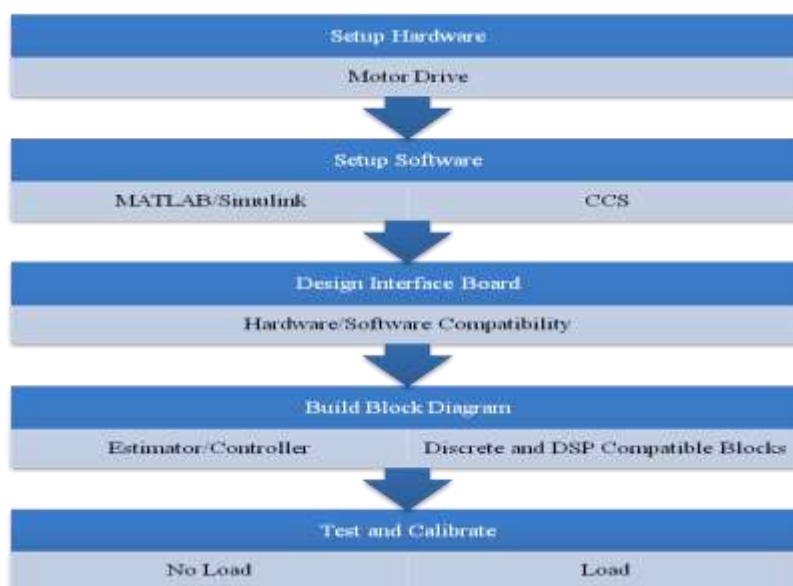


شکل (7): مدار شماتیک تراشه ی MAX3098E

همچنین ویژگی مهم MAX3098E ولتاژ کاری 3 الی 5 ولت در تراشه بوده که با تامین یک ولتاژ 3.3 ولت در تغذیه ی این تراشه دیگر نیازی به مدارات جانبی، جهت اعمال خروجی ها به پردازنده های سیگنال دیجیتال نمی باشیم. استفاده از تراشه ی نامبرده باعث شده تا به صورت چشمگیری حجم مدارات سیستم کنترل، کاهش یابند.

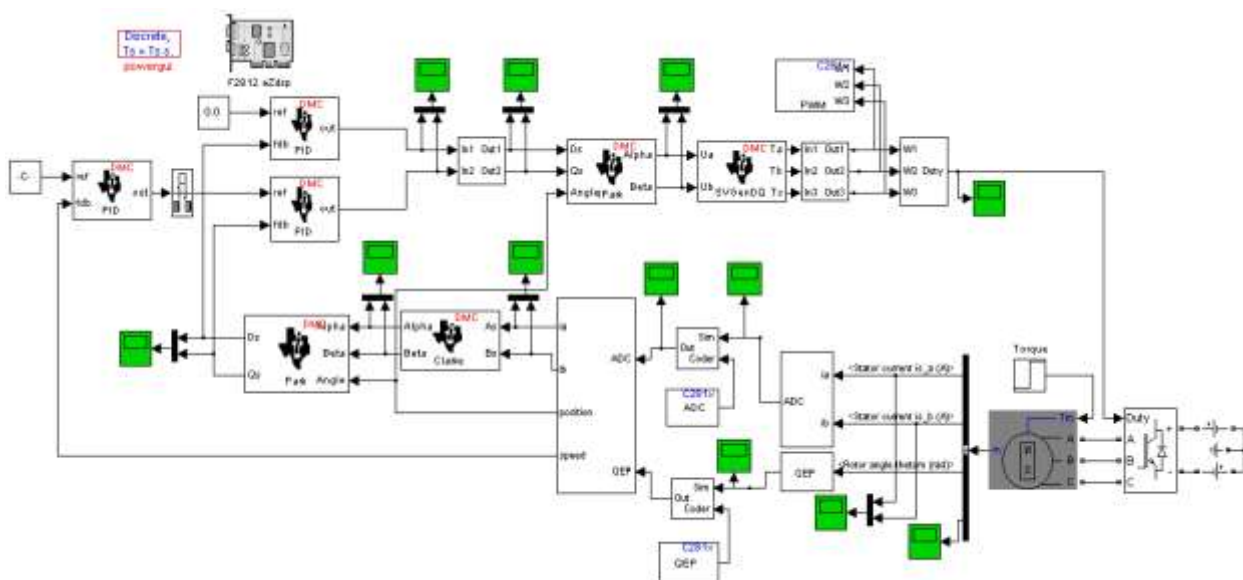
##### 5- شبیه سازی و برنامه ریزی:

محیط Simulink نرم افزار MATLAB قادر است با تا دقت بالایی سیستم کنترل برداری یک موتور سنکرون مغناطیس دائم را شبیه سازی کند. همچنین این نرم افزار با لینک شدن نرم افزار CCS، بارگذاری کدهای پردازنده ی TMS320F2812 را به منظور اجرای سیستم کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم ایفا می کند. شکل (8) مراحل تولید کدهای پردازنده ی TMS320F2812 با لینک شدن نرم افزارهای CCS و MATLAB را نشان می دهد.



شکل (8): مراحل پیاده سازی کنترل سرعت با لینک شدن نرم افزارهای CCS و MATLAB

در شکل (9) شبیه سازی سیستم کنترل برداری موتور سنکرون مغناطیس دائم در محیط Simulink، مبتنی بر بلوک دیاگرام شکل (1) دیده می شود. به جهت ممیز ثابت بودن پردازنده ی TMS320F2812 زمان شبیه سازی، بی نهایت (inf) در نظر گرفته شده و تنها بلوک های گسسته جهت پیاده سازی سیستم کنترل سرعت استفاده شده اند.



شکل (9): شبیه سازی سیستم کنترل سرعت در نرم افزار MATLAB/Simulink بر اساس پردازنده ی TMS320F2812

جهت اجرای مراحل شکل (8) در محیط Simulink، کافی است کلید Incremental Build در نوار ابزار انتخاب شود. همچنین با فشردن همزمان کلیدهای Ctrl و B در صفحه کلید، کدهای پردازنده ی TMS320F2812 توسط نرم افزار MATLAB بارگذاری می شوند.

با توجه به شبیه سازی کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم بر اساس پردازنده ی TMS320F2812، یک موتور سنکرون مغناطیس دائم 8 قطب، 1000 دور بر دقیقه، 10 آمپر، یک کیلووات که با یک موتور القایی به عنوان بار کوپل شده، در نظر گرفته شده است. پارامترهای  $K_p$  و  $K_i$  در کنترلرهای جریان به ترتیب در مقادیر 2 و 0.2 و پارامترهای  $K_p$  و  $K_i$  در کنترلر سرعت در مقادیر 5 و 0.3 بر اساس (Ahmed, 1997) محاسبه شده اند تا موتور سنکرون مغناطیس دائم با سرعت مرجع 400 دور بر دقیقه، در برابر تغییرات ناخواسته ی گشتاور به خوبی کنترل شود. زمان مرده در مدولاسیون بردار فضایی 1 میکروثانیه و زمان شبیه سازی 12 ثانیه در نظر گرفته شده است.

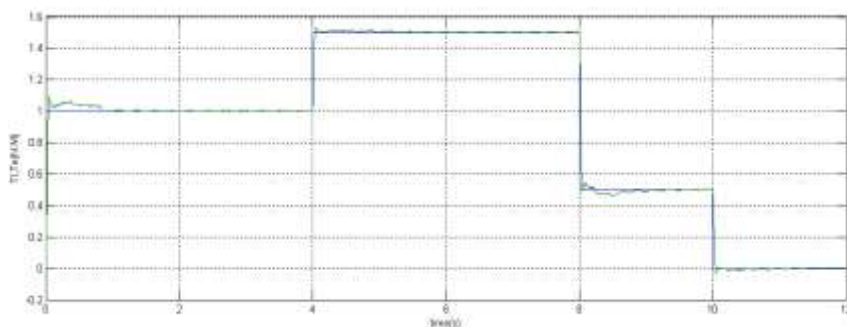
در زمان های 4، 8 و 10 ثانیه از تغییرات گشتاور بار برخوردار بوده ایم. در شکل (10) مشاهده می شود که موتور با گشتاور بار یک نیوتون متر راه اندازی و در زمان 4 ثانیه با افزایش بار به 1.5 نیوتون متر، گشتاور الکترومغناطیسی متناسب با آن افزایش می یابد و سپس در زمان های 8 و 10 ثانیه به ترتیب گشتاور بار به مقادیر 0.5 و صفر کاهش پیدا کرده و گشتاور الکترومغناطیسی متناسب با آن کاهش می یابد. تغییرات سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم نسبت به سرعت مرجع 50 رادیان بر ثانیه، در اثر تغییرات گشتاور بار در شکل (11) ارائه شده است.

با افزایش و کاهش گشتاور بار، جریان های عبوری از سه فاز موتور سنکرون نیز از تغییرات چشمگیری برخوردار می باشند که در شکل (12) و شکل (13) به ترتیب منحنی جریان های سه فاز و جریان محورهای d و q موتور سنکرون مغناطیس دائم نمایش داده شده است. شکل (12) و شکل (13) نشان می دهند که جریان های جاری در موتور سنکرون مغناطیس دائم با تغییرات گشتاور بار

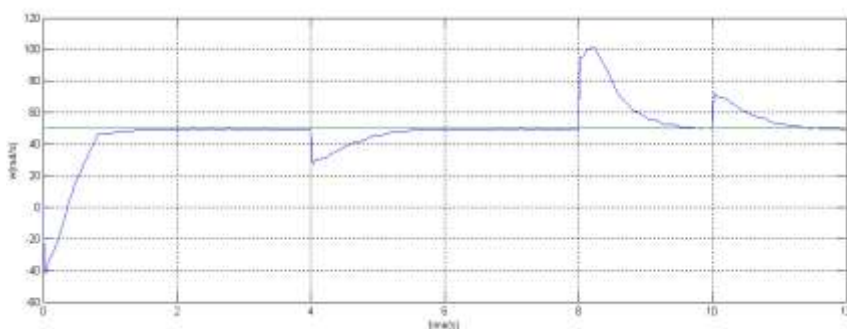
از تغییرات محسوسی برخوردار می‌باشند، که با عملکرد مناسب کنترلرهای جریان، از جریان‌های مطلوبی جهت اعمال به موتور برخوردار شده‌ایم.

علاوه بر نتایج ارائه شده در خصوص شبیه‌سازی، توسط یک اسیلوسکوپ دو کاناله‌ی دیجیتال، نتایج آزمایشگاهی حاصل از پروسه-ی کنترل سرعت در این مقاله ارائه شده‌اند. از اینرو به دلیل محدودیت‌های اندازه‌گیری پارامترهای آزمایشگاهی، شکل موج پالس-های PWM کلیدهای IGBT در فاز a و شکل موج ولتاژ فازهای ab و ac به ترتیب در شکل (14) و شکل (15) به نمایش گذاشته شده‌اند.

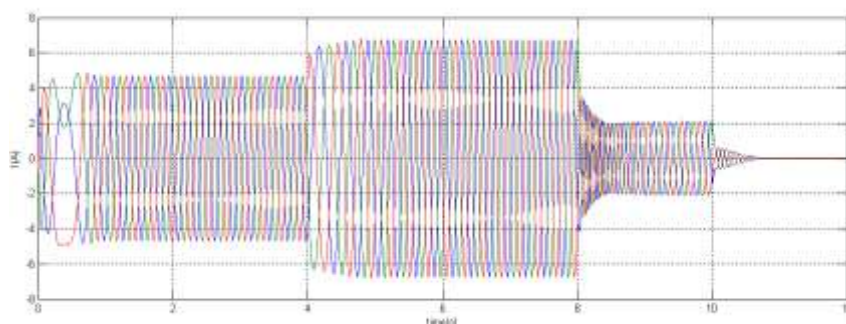
در شکل (15) به دلیل محدودیت‌های اندازه‌گیری، مقادیر اندازه‌گیری توسط اسیلوسکوپ برای شکل موج ولتاژ فازهای ab و ac نبوده‌اند اما با دقت در شکل (14) مشخص است در زمان اندازه‌گیری از فرکانس 10 هرتز برخوردار بوده‌ایم. همچنین در شکل (15) زمان اندازه‌گیری، فرکانس کلیدزنی دو کیلوهرتز و زمان مرده‌ی یک میکروثانیه می‌باشند. شکل (16) بخش‌های تشکیل دهنده‌ی بلوک دیاگرام شکل (3) را نشان می‌دهد.



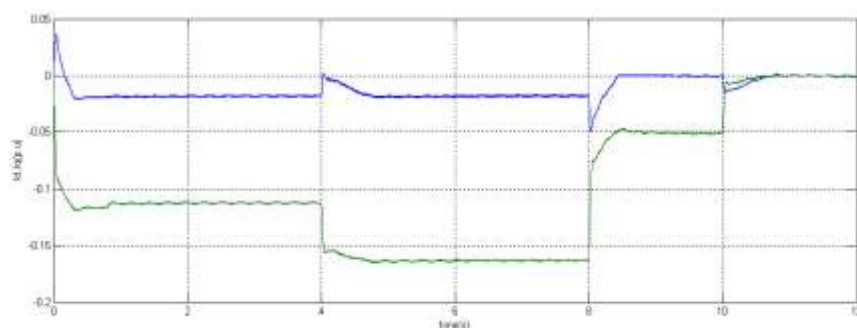
شکل (10): گشتاور بار و گشتاور الکترومغناطیسی در موتور سنکرون مغناطیس دائم



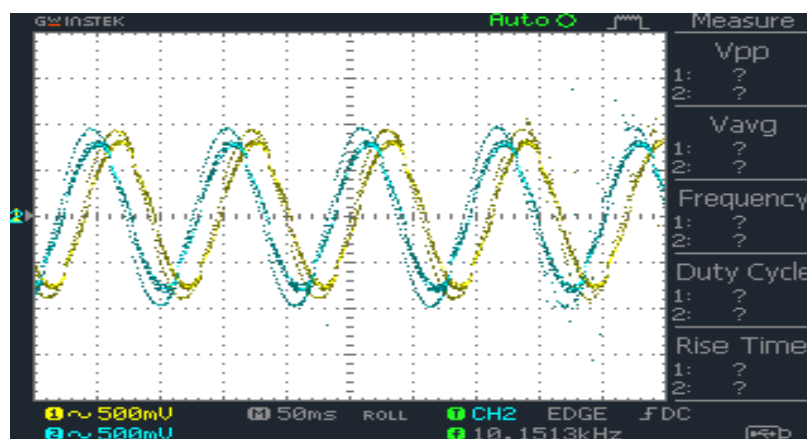
شکل (11): سرعت مرجع و سرعت واقعی موتور سنکرون مغناطیس دائم



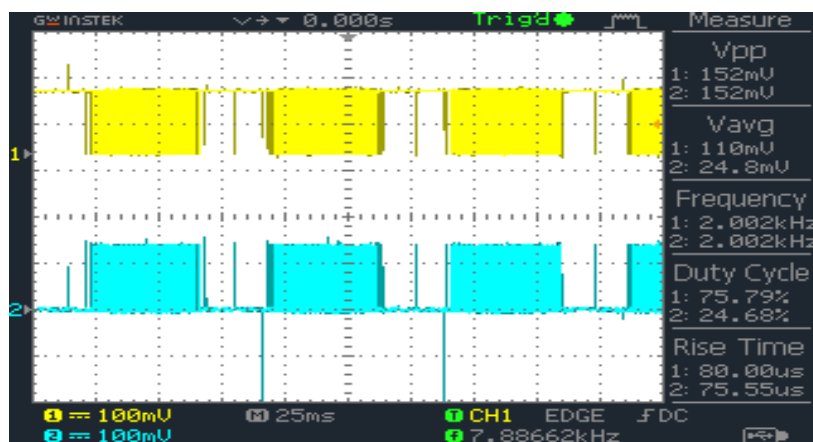
شکل (12): جریان های سه فاز موتور سنکرون مغناطیس دائم



شکل (13): جریان محورهای d و q موتور سنکرون مغناطیس دائم



شکل (14): ولتاژ فازهای ab و ac در خروجی اینورتر



شکل (15): پالس‌های PWM کلیدهای قدرت فاز a در اینورتر



شکل (16): سیستم کنترل طراحی شده

**6- نتیجه گیری:**

بر اساس ساختار درایوهای کنترل سرعت و بهره گیری از قطعات کم حجم و ارزان قیمت، مدل جدیدی از سخت افزار درایو سه فاز طراحی و ساخته شده که قادر است با دقت بالایی موتورهای یک کیلووات را کنترل و موتورهای 2.6 کیلووات را به صورت حلقه باز راه اندازی کند. با استفاده از محیط Simulink نرم افزار MATLAB که از کارایی بالایی در تحلیل سیستم کنترل سرعت موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به روش کنترل برداری برخوردار می باشد، برنامه ریزی پردازنده TMS320F2812 صورت پذیرفته است. نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی ارائه شده در خصوص سیستم کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم حاکی از صحت عملکرد شبیه سازی و سخت افزار طراحی شده می باشد. از اینرو، سخت افزار طراحی شده قادر است تا در پروسه های کنترل سرعت انواع موتورها مورد تحلیل و آزمایش واقع شود.

## 7- تشکر و قدردانی

از آزمایشگاه ماشین های الکتریکی دانشگاه اراک، زمینه ساز بستر مناسب انجام آزمایشات و راهنمایی های بی چشم داشت جناب آقای دکتر امیر حیدری مدیر تولید و فنی شرکت سپید گچ، تشکر و قدردانی می گردد.

## 8- فهرست منابع

- Ahmed, I. (1997). Implementation of PID and Deadbeat Controllers with the TMS320 Family (pp. 42-59): Texas Instruments Company.
- Akin, B., & Bhardwaj, M. (2013). Sensorless Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors: Texas Instruments Company.
- Hart, D. W. (2011). Power Electronics. United States: McGraw-Hill.
- Hu, X., & Nan, G. (2008). Research of Vector Variable Frequency System Based on TMS320F2812. IEEE Computer Society Washington, 2, 34-38 .
- Instruments, T. (2007). TMS320x281x DSP Event Manager (EV) Reference Guide .
- Jun, Z., Wankui, L., & Lili, H. (2013). PMSM Control System Based on Digital Signal Processor. Journal of Networks, 8(4), 924-931. doi: 10.4304/jnw.8.4.924-931
- Shihua, L., Mingming, Z., & Xinghuo, Y. (2013). Design and Implementation of Terminal Sliding Mode Control Method for PMSM Speed Regulation System. Industrial Informatics, IEEE Transactions on, 9(4), 1879-1891. doi: 10.1109/TII.2012.2226896
- Xu, J., Xu, Y., & Tang, R. (2001, 2001). Development of full digital control system for permanent magnet synchronous motor used in electric vehicle. Paper presented at the Electrical Machines and Systems, 2001. ICEMS 2001. Proceedings of the Fifth International Conference on.