



طراحی و شبیه سازی به منظور ساخت اینورتر سه فاز

استاد راهنما: دکتر احسان ادیب
دانشجو: محمدمهدی فاتحی

تیرماه ۱۳۹۸

قدردانی

همیشه برای انجام یک کار مطابق اهداف تعیین شده نیاز به استفاده از راهنمایی و مساعدت دیگران وجود دارد. این پروژه نیز از این قاعده مستثنی نبوده است. لذا قدردانی از این افراد کمترین کاری است که می توان انجام داد.

در این بخش ابتدایی از گزارش پروژه کارشناسی ، لازم می دانم از استاد عزیزم، آقای دکتر احسان ادیب که در طول این ۹ ماه با راهنمایی علمی و برقرار کردن امکان دسترسی به آزمایشگاه الکترونیک صنعتی کمک بسیار بزرگی در راستای به ثمر نشستن این پروژه داشتند تشکر کنم. همچنین از دوست عزیزم، مجید عمومی که از ابتدای انجام این پروژه به بنده کمک کرده اند و در پایان از کلیه دوستانی که کمک رسان اینجانب بوده اند نیز تشکر می کنم.

فهرست مطالب

قدردانی

۱

فصل ۱.۱ اینورترهای سوئیچینگ

۳

- ۱-۱. تعریف اینورتر و کاربردهای آن..... ۳
- ۱-۲. طبقه بندی اینورترها..... ۳
- ۱-۳. اینورتر تک فاز نیم پل..... ۴
- ۱-۴. اینورتر تک فاز تمام پل..... ۴
- ۱-۵. اینورتر سه فاز..... ۵
- ۱-۶. تحلیل فوریه اینورتر سه فاز شش پله ای..... ۷
- ۱-۷. اینورتر سه فاز PWM..... ۸
- ۱-۸. کاربرد اینورتر سه فاز - کنترل سرعت موتورهای AC..... ۱۱
- ۱-۹. اینورترهای سه فاز چندسطحی..... ۱۱
- ۱-۱۰. خلاصه ۱۲

فصل ۲. طراحی اینورتر سه فاز

۱۳

- ۲-۱. تعریف پروژه و مشخصات آن..... ۱۳
- ۲-۲. بلوک دیاگرام پروژه..... ۱۳
- ۲-۳. معرفی بخش های مختلف پروژه..... ۱۴
- ۲-۴. مروری مختصر بر طراحی PWM..... ۲۰
- ۲-۵. مدار فیلتر خروجی..... ۲۲

فصل ۳. شبیه سازی اینورتر سه فاز

۲۵

- ۳-۱. شبیه سازی مدار تولید پالس های مربعی سه فاز با DFF..... ۲۵
- ۳-۲. شبیه سازی مدار قدرت اینورتر سه فاز شش پله ای و نتایج حاصل از آن..... ۲۶
- ۳-۳. شبیه سازی مدار قدرت اینورتر سه فاز PWM و نتایج حاصل از آن..... ۳۱
- ۳-۴. مقایسه بین عملکرد اینورتر شش پله ای با اینورتر PWM..... ۳۳

۳۵

فصل ۴. محدود کننده جریان و ولتاژ خروجی

۳۵.....	محدود کننده جریان خروجی.....	۴-۱.
۳۷.....	محدود کننده ولتاژ خروجی.....	۴-۲.
۳۷.....	طراحی محدود کننده جریان.....	۴-۳.

۳۹

فصل ۵. ساخت اینورتر سه فاز شش پله ای

۳۹.....	معرفی بخش های مختلف PCB.....	۵-۱.
۳۹.....	برد سیگنال.....	۵-۲.
۴۲.....	برد قدرت.....	۵-۳.
۴۳.....	دسترسی به فایل های پروژه.....	۵-۴.

۴۵

مراجع

فصل ۱. اینورترهای سوئیچینگ^۱

در این فصل ابتدا به معرفی و تشریح کاربرد اینورترهای سوئیچینگ و توپولوژی‌های مورد استفاده در صنعت پرداخته و سپس در فصول بعدی به تشریح بخش‌های مختلف این پروژه می‌پردازیم.

۱-۱ تعریف اینورتر و کاربردهای آن

اینورترها در ساده‌ترین حالت، مدارهایی هستند که سیگنال DC را به سیگنال AC تبدیل می‌کنند. لزوم انجام این کار از آن جهت است که معمولاً علاقه داریم بتوانیم یک میزان مشخصی توان را از یک منبع DC دریافت کرده و به یک بار AC تحویل دهیم. در کاربردهایی نظیر کنترل سرعت موتورهای AC، منابع تغذیه اضطراری^۲، نیروگاه‌های خورشیدی، تغذیه لوازم AC از باتری خودرو و دیگر کاربردها از اینورترها استفاده می‌شود.

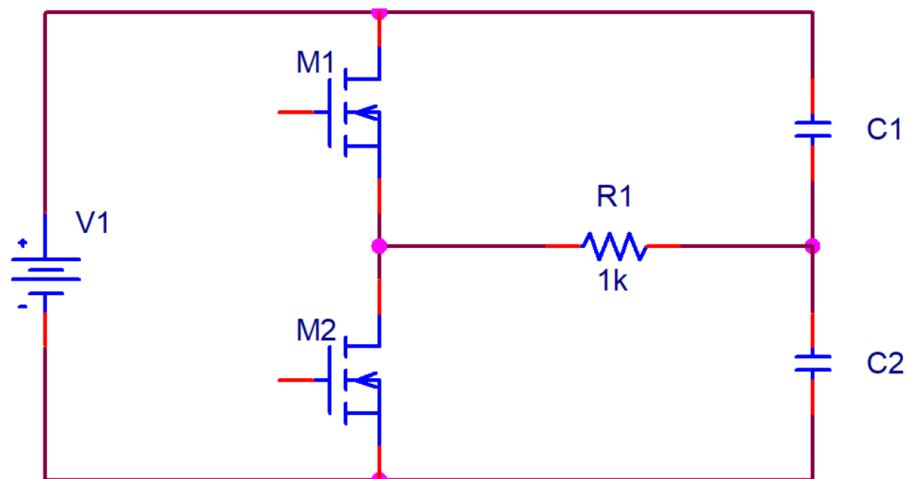
۱-۲ طبقه‌بندی اینورترها

اینورترهای سوئیچینگ از جنبه‌های مختلفی قابل طبقه‌بندی هستند. از حیث تعداد فاز، نحوه کلیدزنی، کمیتی که از حالت DC به AC تبدیل می‌شود و دیگر موارد. وابسته به آن که چه میزان هزینه‌ای برای ما مقدور است و در چه کاربردی نیاز به اینورتر داریم، اینورتر مناسب انتخاب می‌شود. اینورترهای تک فاز در دو نوع نیم پل و تمام پل بسیار مورد استفاده هستند. از حیث کلیدزنی، اینورترهای موج مربعی با اینورترهای موج سینوسی متفاوت هستند.

^۱Switching Inverters

^۲Speed Control

^۳UPS



شکل ۱-۱. یک اینورتر تک فاز نیم پل

اینورترهای نوع جریان در برابر اینورترهای نوع ولتاژ هم دیگر دسته بندی است که می توان انجام داد. در این پروژه هدف ساخت یک اینورتر ولتاژ، سه فاز با خروجی موج مربعی (شش پله ای)^۱ است.

۱-۳ اینورتر تک فاز نیم پل^۲

در ابتدا از ساختار تک فاز نیم پل به عنوان یکی از پایه ای ترین ساختارهای اینورتری شروع می کنیم. در این ساختار که در شکل (۱-۱) نمایش داده شده است ۲ خازن داریم که ولتاژ آنها با یکدیگر برابر بوده و برابر با نصف ولتاژ منبع تغذیه V_1 است. این دو خازن توسط دو کلید دو سمت بار AC سوئیچ می شوند. ابتدا کلید S_1 بسته می شود تا ولتاژی برابر با $-V_1/2$ روی بار قرار گیرد. سپس کلید دیگر بسته و کلید قبلی باز می شود تا ولتاژی برابر با $+V_1/2$ دو سر بار R_1 قرار گیرد. به این ترتیب با ادامه دادن این روند، یک ولتاژ مربعی با سطوح مثبت و منفی دوسر بار قرار می گیرد.

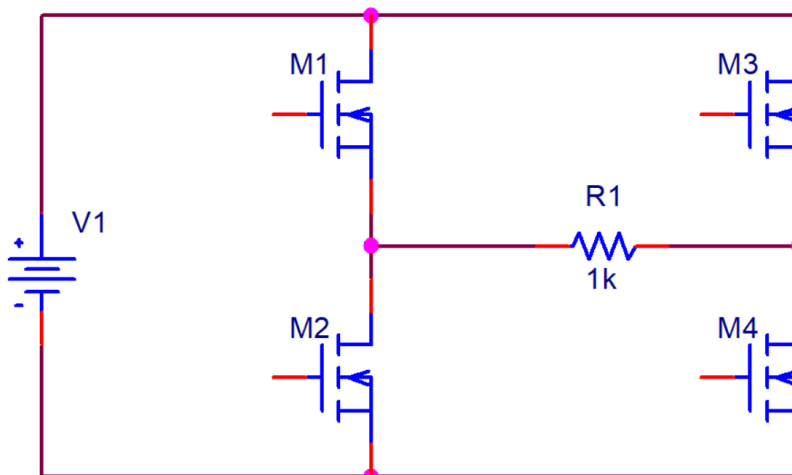
۱-۴ اینورتر تک فاز تمام پل^۳

در ساختار قبلی ولتاژی که روی بار قرار می گیرد دارای دو سطح بیشتر نیست. اگر بخواهیم سطح صفر ولت را نیز به این سطوح اضافه کنیم باید از ساختار تمام پل استفاده کنیم. این ساختار دو کلید بیشتر داشته و مدار گیت درایو به مراتب پیچیده تری نسبت به اینورتر نیم پل خواهد داشت. همچنین عدم همپوشانی الگوی کلیدزنی در این اینورتر اهمیت دارد. این ساختار در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. در این ساختار ابتدا کلیدهای M_1 و M_4 بسته شده و ولتاژ مثبت V_1 روی بار قرار می گیرد. سپس کلیدهای M_1 و M_3 بسته شده و ولتاژ صفر روی بار قرار می گیرد.

^۱Six Step

^۲Half Bridge Single Phase Inverter

^۳Full Bridge Single Phase Inverter



شکل ۱-۲. یک اینورتر تک فاز تمام پل

سپس نوبت به بسته شدن کلیدهای M3 و M2 می‌رسد تا ولتاژ منفی V_1 روی بار قرار گیرد. در نهایت M2 و M4 بسته می‌شوند و مجدداً ولتاژ صفر روی بار قرار می‌گیرد. این روند ادامه پیدا می‌کند تا یک شکل موج با ۳ سطح در خروجی داشته باشیم. اثبات می‌شود این خروجی، نسبت به حالت نیم پل مقدار THD^1 کمتری دارد و به شکل موج سینوسی موردنظر نزدیک تر است. وجود یک فیلتر دقیق در خروجی می‌تواند مولفه سینوسی نسبتاً خالصی را از این شکل موج استخراج کند.

هر دو اینورتر یاد شده دارای محاسبات ریاضی مفصلی در حوزه فوریه بوده که چون به موضوع این پروژه مرتبط نیستند به آنها پرداخته نمی‌شود. در بخش بعدی به اینورتر سه فاز پرداخته و در ادامه این فصل محاسبات ریاضی مربوط به این نوع اینورتر را مطرح می‌کنیم. همچنین ذکر این نکته لازم است که ساختار اینورتر تک فاز به دو نوع مذکور ختم نمی‌شود و انواع دیگری نیز دارد. همچنین در روش سوئیچزنی اینورتر PWM نیز کاربرد فراوانی که این نوع اینورتر در این فصل برای اینورتر سه فاز شرح داده می‌شود.

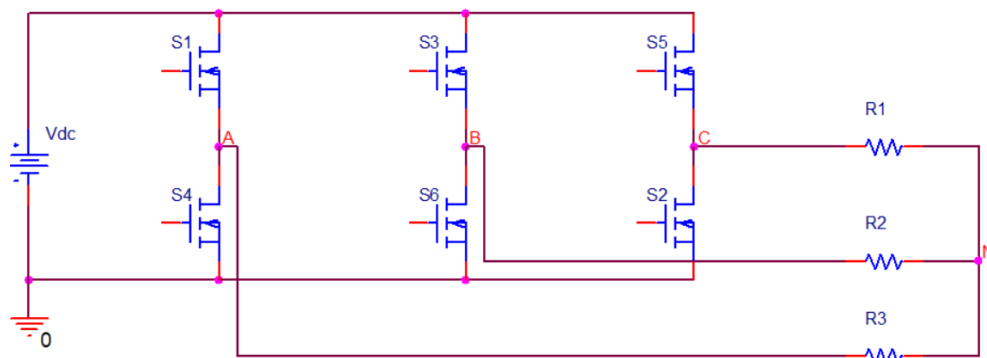
۱-۵ اینورتر سه فاز

این نوع اینورتر می‌تواند از یک ولتاژ DC، ۳ ولتاژ AC با دامنه یکسان و اختلاف فاز ۱۲۰ درجه‌ای ایجاد کند. به طور کلی اینورتر سه فاز در مواردی کاربرد دارد که خواهان پردازش توان برای بارهای سه فاز AC هستیم. این بارها شامل انواع موتورهای سنکرون و آسنکرون (القایی) بوده و کاربردهای بسیاری دارد. در این نوع اینورتر یک شاخه شامل دو کلید به ساختار تمام پل تک فاز افزوده می‌شود و با پیروی از الگوی کلیدزنی مشخصی یک خروجی سه فاز تولید می‌گردد. ساختار این اینورتر به صورت شکل (۳-۱) است. در این شکل فازهای A، B و C مشخص شده اند و یک بار ستاره سه فاز به این فازها متصل شده است. نقطه N یک نقطه فرضی اتصال ستاره بوده و زمین مدار مطابق شکل جدا می‌باشد. مطابق این شکل هر سوئیچ از هر شاخه اگر روشن باشد سوئیچ جفت آن باید خاموش باشد

¹Total Harmonic Distortion

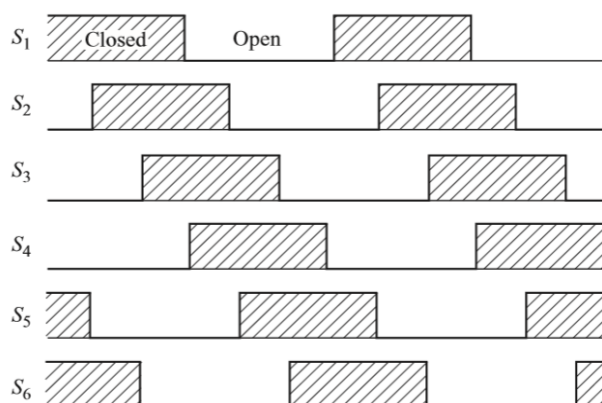
فصل ۱. اینورترهای سوئیچینگ ■ ۶

تا از اتصال کوتاه شدن منبع DC جلوگیری شود. همچنین هر عمل کلید زنی در هر $T/6$ زمان یک بار اتفاق می افتد (به عبارتی هر 60° درجه). مطابق این ساختار ولتاژهای V_{A0} ، V_{B0} ، V_{C0} که ولتاژهای وسط هر شاخه نسبت به زمین مدار است دارای دو سطح $+V_{DC}$ و صفر خواهند بود. ولتاژهای V_{AB} ، V_{BC} ، V_{CA} ولتاژهای خط بوده و



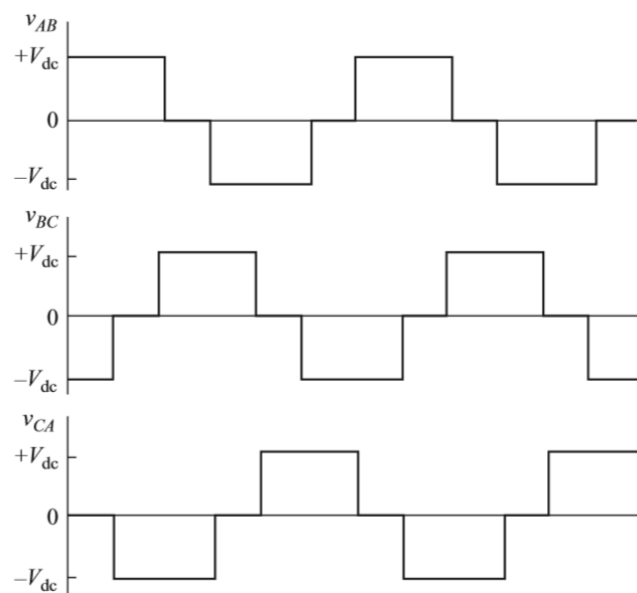
شکل ۱-۳. یک اینورتر سه فاز

دارای سطوح $+V_{DC}$ ، $-V_{DC}$ و صفر می باشند. الگوی کلید زنی در شکل (۱-۴) نشان داده شده است.

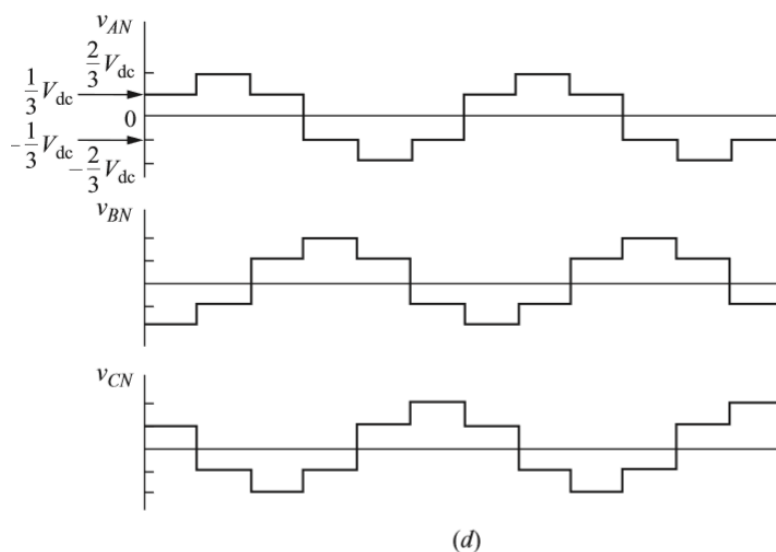


شکل ۱-۴. الگوی کلیدزنی اینورتر سه فاز

چنین الگویی شکل موج هایی مطابق شکل (۱-۵) ایجاد می کند. مشاهده می شود که ولتاژهایی شبیه به سینوسی در خروجی داریم که توسط فیلتر می توان مولفه سینوسی آنها را جدا نمود. شکل (۱-۶) ولتاژ هر فاز را نشان می دهد. ملاحظه می شود که این ولتاژها دارای سطوح $+1/3 V_{DC}$ ، $+2/3 V_{DC}$ ، $-1/3 V_{DC}$ ، $-2/3 V_{DC}$ می باشد. ملاحظه می شود که در یک پریود کلیدزنی، ولتاژهای فاز ۶ حالت مختلف را طی می کنند. به این خاطر به این اینورتر شش پله نیز گفته می شود.



شکل ۱-۵. ولتاژهای خط اینورتر سه فاز



شکل ۱-۶. ولتاژهای فاز اینورتر سه فاز

۱-۶ تحلیل فوریه اینورتر سه فاز شش پله ای

در این بخش به محاسبات مربوط به اینورتر سه فاز شش پله ای می پردازیم. سری فوریه مربوط به شکل موج خروجی (ولتاژ فاز یا ولتاژ خط) دارای یک مولفه پایه با فرکانس برابر با فرکانس کلیدزنی است. هارمونیک های مربوطه از مرتبه فرکانسی $6k \pm 1$ (به ازای $k = 1, 2, \dots$) هستند. هارمونیک مرتبه ۳ و مضارب آن وجود ندارند. همچنین

فصل ۱. اینورترهای سوئیچینگ ■ ۸

هارمونیک زوج نیز ندارد. به ازای بار ستاره که نقطه خنثی آن به زمین مدار متصل نشده باشد، ضرایب سری فوریه ولتاژ خروجی خط و فاز به صورت زیر هستند:

$$V_{n.L-L} = \left| \frac{4V_{DC}}{n\pi} \cos\left(n\frac{\pi}{6}\right) \right|, n = 1, 5, 7, 11, 13, \dots \quad (1-1)$$

$$V_{n.L-N} = \left| \frac{2V_{DC}}{3n\pi} \left[2 + \cos\left(n\frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(n\frac{2\pi}{3}\right) \right] \right|, n = 1, 5, 7, 11, 13, \dots \quad (1-2)$$

میزان THD مربوط به هر دو ولتاژ خط و فاز خروجی اینورتر در حدود ۳۱ درصد می باشد. این میزان برای جریان بار بخصوص بار RL به میزان قابل توجهی کمتر خواهد بود. همچنین فرکانس شکل موج خروجی توسط فرکانس سوئیچینگ قابل تغییر است. دامنه شکل موج خروجی توسط تغییر ولتاژ منبع تغذیه قابل تغییر می باشد.

۱-۷ اینورتر سه فاز PWM^۱

تا کنون به معرفی ساختارهای پایه ای اینورترها پرداخته ایم. در این بخش با استفاده از ساختار بخش (۱-۶) به معرفی روشی به نام PWM می پردازیم که کاملاً مربوط به نحوه کلیدزنی می شود. این روش مزایا و معایبی دارد. مزایایی مانند فیلترینگ ساده تر برای حذف هارمونیک ها و همچنین قابلیت کنترل دامنه خروجی. عیب این روش پیچیدگی مدارات گیت درایو و همچنین بالاتر رفتن ناگهانی فرکانس سوئیچینگ و ایجاد مشکلات مربوط به آن می شود. در این بخش ابتدا تعاریف مربوط به این روش کلیدزنی که در اینورتر تک فاز نیز مورد استفاده است بیان شده و سپس به ارائه محاسبات انجام گرفته برای اینورتر سه فاز می پردازیم.

در این روش یک موج سینوسی مرجع با یک موج حامل مثالی مقایسه می شود. فرکانس پایه خروجی برابر با فرکانس موج مرجع می باشد و دامنه خروجی متناسب با نسبت دامنه موج مرجع و موج حامل است. بدین ترتیب با تغییر فرکانس موج مرجع و تغییر دامنه آن می توان یک شکل موج با دامنه و فرکانس دلخواه در خروجی داشت. البته مطابق قبل هارمونیک هایی نیز در خروجی وجود دارند.

دو تعریف مهم در بحث PWM تعاریف زیر هستند:

۱) نرخ مدولاسیون فرکانسی (m_f): به صورت نسبت فرکانس موج حامل به موج مرجع تعریف می شود.

افزایش این کمیت، بدان معنا است که فرکانسی که در آن هارمونیک ها اتفاق می افتند به فرکانسهای

بالاتری منتقل می شود. پس مقادیر زیاد مطلوب هستند. به این ترتیب چون هارمونیک ها نسبت به فرکانس

اصلی (که برابر فرکانس موج مرجع است) بسیار دور هستند، فیلتر کردن آنها نیز ساده تر می شود. مشکل در

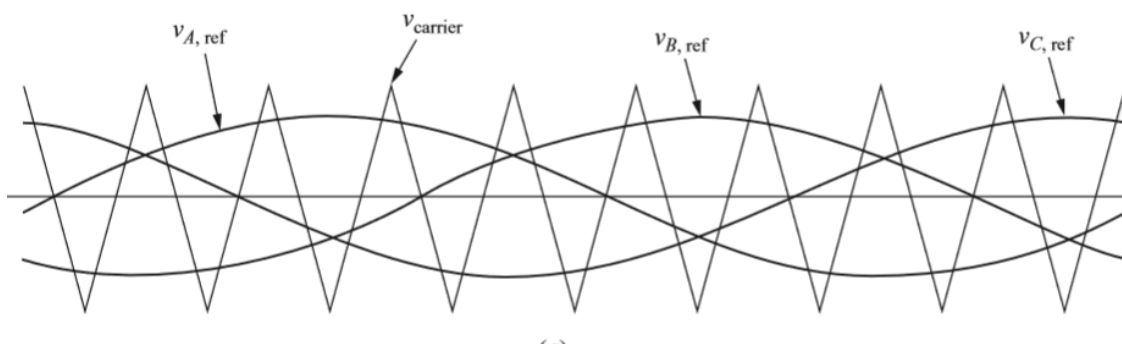
اینجا بوجود می آید که بالا بردن m_f یعنی بالا بردن فرکانس کلیدزنی که خود مسائلی مانند تلفات

فصل ۱. اینورترهای سوئیچینگ ■ ۹

سوئیچینگ، زمان روشن و خاموش شدن و... را دربر دارد و باعث افزایش هزینه و پیچیدگی طراحی می شود.

(۲) نرخ مدولاسیون دامنه (m_a): به صورت نسبت دامنه موج مرجع به دامنه موج حامل تعریف می شود. به ازای m_a کوچک تر از یک، دامنه هارمونیک اصلی به صورت خطی با اندازه ولتاژ منبع تغذیه متناسب می شود. اهمیت تغییر دامنه در روش PWM از آن جهت است که بخصوص در جایی که منبع تغذیه از رگولاسیون خوبی برخوردار نیست می توان با تغییر نرخ مدولاسیون دامنه نوعی از رگولاسیون در خروجی را بوجود آورد. به ازای نرخ مدولاسیون دامنه بزرگتر از یک حالت فرامدولاسیون پیش آمده و دامنه به صورت غیرخطی تغییر می کند.

اکنون به توضیح روش PWM و شکل موج های مربوطه می پردازیم. در این روش جفت کلیدهای ($S1, S4$) و ($S2, S5$) و ($S3, S6$) با یکدیگر کنترل می شوند. به آن معنا که در هر جفت اگر یک کلید وصل باشد دیگری قطع است. هر جفت کلید نیازمند یک موج مرجع سینوسی مختص به خود می باشد. یعنی در این روش برای اینورتر سه فاز ۳ موج مرجع که هم دامنه و هم فرکانس اند و با یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند نیاز است. در شکل (۷-۱) یک شکل موج حامل مثلثی و این ۳ شکل موج سینوسی مرجع را نمایش می دهد. شکل موج بالا به صورت خلاصه نتایجی به صورت زیر دارد:



شکل ۷-۱. موج حامل و امواج مرجع

کلید $S1$ روشن است وقتی که $V_A > V_{TRIG}$

کلید $S2$ روشن است وقتی که $V_C > V_{TRIG}$

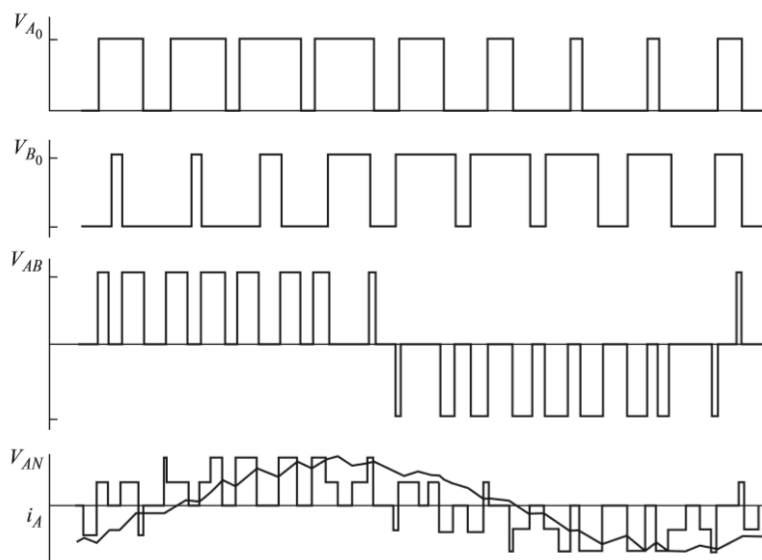
کلید $S3$ روشن است وقتی که $V_B > V_{TRIG}$

کلید $S4$ روشن است وقتی که $V_A < V_{TRIG}$

کلید $S5$ روشن است وقتی که $V_C < V_{TRIG}$

کلید $S6$ روشن است وقتی که $V_B < V_{TRIG}$

در این روش اگر فرکانس موج حامل به صورت یک عدد صحیح فرد و مضرب ۳ فرکانس مرجع (مانند ۳، ۹، ۱۵، ...) برابر فرکانس مرجع) باشد هارمونیک ها کاهش می یابند. در شکل (۸-۱) شکل موج های خروجی نمایش داده شده است.



شکل ۸-۱. ولتاژهای خروجی اینورتر سه فاز PWM

به دلیل پیچیدگی محاسبات سری فوریه در کتب مختلف جداولی ارائه شده است که دامنه هر ضریب سری فوریه به صورت نرمالیزه شده برحسب دامنه منبع تغذیه ورودی داده شده است. برای اینورتر سه فاز جدولی به صورت زیر وجود دارد:

Table 8-8 Normalized Amplitudes V_{n3}/V_{dc} for Line-to-Line Three-Phase PWM Voltages

	$m_a=1$	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
$n = 1$	0.866	0.779	0.693	0.606	0.520	0.433	0.346	0.260	0.173	0.087
$m_f = 2$	0.275	0.232	0.190	0.150	0.114	0.081	0.053	0.030	0.013	0.003
$2m_f = 1$	0.157	0.221	0.272	0.307	0.321	0.313	0.282	0.232	0.165	0.086

شکل ۹-۱. دامنه نرمالیزه V_{n3}/V_{DC} برای ولتاژهای خط به خط

مشاهده می شود که به ازای m_a موردنظر ما، دامنه ضرایب فوریه مشخص شده اند. در مرجع دوم این پروژه روابط و جداول دیگری نیز آورده شده است که برحسب نیاز می تواند استفاده شود. در این پروژه هدف طراحی، شبیه سازی و ساخت یک اینورتر شش پله ای ساده است و به طراحی نوع PWM پرداخته نمی شود.

۱-۸ کاربرد اینورتر سه فاز - کنترل سرعت موتورهای AC

یکی از کاربردهای مهم اینورترها در بحث کنترل سرعت موتور القایی است. در این موتورها سرعت سنکرون توسط رابطه زیر

$$\omega_s = \frac{2\omega}{p} \quad (1-3)$$

با تغییر فرکانس اعمالی به موتور می توان مستقیماً بر سرعت چرخش حوزه دوار (سرعت سنکرون) اثر گذاشت. در این موتورها

عدد لغزش به صورت زیر تعریف می شود:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (1-4)$$

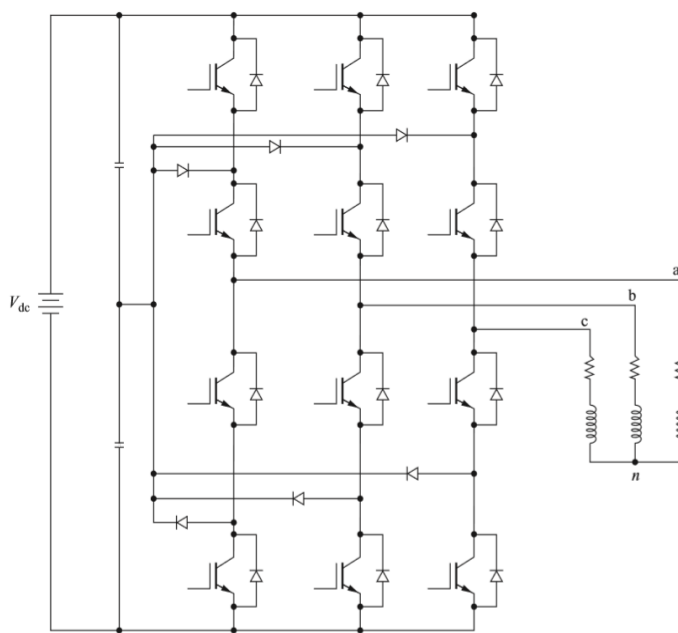
ملاحظه می شود که این عدد برحسب سرعت روتور بوده و با گشتار هم متناسب است. بدین ترتیب با تغییر فرکانس اعمالی سرعت موتور تغییر کرده ولی اگر فرکانس کاهش یابد و ولتاژ اعمالی به موتور از لحاظ دامنه ثابت بماند، شار فاصله هوایی آنقدر زیاد شده که اشباع می شود و مطلوب است که شار فاصله هوایی در مقدار نامی خود ثابت بماند و همزمان با تغییر فرکانس، ولتاژ اعمالی هم به همانصورت تغییر کند به عبارتی نسبت ولتاژ به فرکانس ثابت بماند. به این روش کنترل سرعت موتور القایی، روش V/f ثابت گویند.

اینورتر سه فاز PWM یک مدار مناسب برای کنترل سرعت به روش یاد شده می باشد زیرا هم قابلیت تغییر فرکانس دارد و هم قابلیت تغییر دامنه. لذا استفاده از اینورتر غیر PWM مثلاً اینورتر شش پله ای به دلیل عدم امکان تغییر دامنه خروجی، کنترل به این روش را ناممکن می کند و مشکلات روش تغییر فرکانس مثل اشباع شدن شار مغناطیسی بوجود می آید. البته می توان به کمک یک مبدل DC-DC منبع تغذیه را تنظیم کرد و از اینورتر شش پله ای صرفاً برای تغییر فرکانس استفاده نمود. استفاده از مبدلهای AC-AC به لینک DC نیز یکی دیگر از راههای کنترل سرعت به روش مذکور به کمک اینورتر شش پله ای است.

۱-۹ اینورترهای سه فاز چندسطحی^۱

چه در روش PWM و چه در روشهای دیگر کلیدزنی اینورتر، میزان THD خروجی بنا بر کاربرد می تواند اهمیت فراوانی داشته باشد. هرچه THD کوچک تر باشد خروجی ما به یک سینوسی واقعی نزدیک تر است. با اینحال اینورترهای چندسطحی نیز وجود دارند که خروجی از تعداد سطوح ولتاژ بیشتری برخوردار بوده و در نتیجه اثبات می شود که میزان THD کمتری خواهد داشت. یک نمونه از اینورتر سه فاز چندسطحی در شکل (۱-۱۰) نشان داده شده است.

^۱Multi-Level Diode-Clamped Three Phase Inverters



شکل ۱-۱۰. یک اینورتر سه فاز چندسطحی Diode-Clamped

۱-۱۰ خلاصه

- مبدل‌های تمام پل و نیم پل می‌توانند برای تولید خروجی AC از ورودی DC استفاده شوند.
- اینورترها به انواع تک فاز و سه فاز تقسیم بندی می‌شوند که بستگی به بار موردنظر مورد استفاده قرار می‌گیرند
- اینورتر سه فاز شش پله‌ای پایه‌ای ترین ساختار اینورتر سه فاز است.
- میزان THD در روش PWM نسبت به ساختار شش پله‌ای بسیار کمتر است.
- روش PWM دارای مدارات گیت درایو پیچیده تر است و هزینه بالاتری در برخواهد داشت.
- در روش PWM علاوه بر کنترل فرکانس بر دامنه خروجی نیز کنترل داریم.
- کنترل سرعت موتور القایی یکی از کاربردهای عمده اینورتر سه فاز است که با اینورتر PWM و به روش ولتاژ فرکانس ثابت می‌توان کنترل مناسبی بر سرعت داشت.

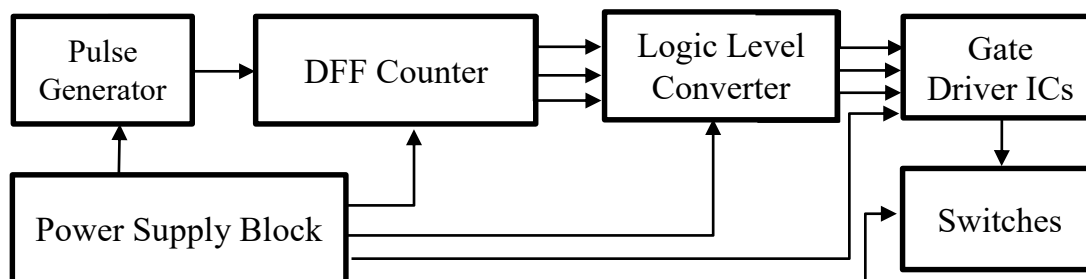
فصل ۲. طراحی اینورتر سه فاز

۲-۱. تعریف پروژه و مشخصات آن

هدف این پروژه طراحی یک اینورتر سه فاز شش پله ای به صورت ماژولار است که قبلاً در بخش (۵-۱) معرفی شد. این اینورتر به منظور کاربردهای ولتاژ پایین مانند درایور موتورهای^۱ BLDC که نیاز به جریان بالایی در هنگام راه اندازی و زیر بار دارند طراحی، شبیه سازی و ساخته می شود. این اینورتر قابلیت تغییر فرکانس با استفاده از بلوتوث را نیز دارا بوده و می تواند ولتاژهای مربعی سه فاز تا دامنه ۲۰ ولت خط به خط و جریان دهی ۲۰ آمپر را فراهم آورد. بازه تغییر فرکانس از حدود ۳۰ هرتز تا ۳ کیلوهرتز خواهد بود. توان نامی این اینورتر در حدود ۴۰۰ وات است.

۲-۲. بلوک دیاگرام پروژه

این پروژه از بخش های مختلفی تشکیل شده است که طبق بلوک دیاگرام زیر با یکدیگر ارتباط دارند. این بلوک دیاگرام کامل نبوده و بخش به مربوط به بلوتوث در آن وجود ندارد.



^۱Brushless DC

۲-۳. معرفی بخش های مختلف پروژه

مدار این پروژه به دو مدار کوچک تر تقسیم شده است. یک مدار که برای گیت درایو و مدار دیگر مدار قدرت که فقط شامل سوئیچ ها و سنسورهاست. این مدار در فصل ۵ آورده شده است و در بخش های بعدی بر اساس همین مدار به توضیح بخش های مختلف آن می پردازیم. مهمترین بخش مدار این پروژه، کلیدهای قدرت بوده که باید بتوانند ولتاژ و جریان خواسته شده را پشتیبانی کنند. به طور کلی بخش های مختلف این پروژه شامل موارد زیر است:

(۱) کلیدهای قدرت^۱ و توپولوژی اینورتر سه فاز

(۲) مدار گیت درایو^۲ با آیسی IR2111

(۳) مدار مولد پالس با فرکانس متغیر

(۴) مدار تولید پالس های مربعی سه فاز با استفاده از DFF^۳

(۵) مدار مبدل سطوح منطقی

(۶) مازول بلوتوث به منظور کنترل فرکانس توسط کاربر

(۷) مدار فیلتر خروجی

لازم به ذکر است که طراحی صورت گرفته در نهایت در فصل بعدی وارد مراحل ساخته شده و همراه پروژه ارائه می گردد.

۲-۳،۱. کلیدهای قدرت و توپولوژی اینورتر

کلیدهای قدرت مورد استفاده در این پروژه باید بتوانند ولتاژهای معکوسی به اندازه ولتاژ خط به خط که نهایتاً ۲۰ ولت است را تحمل کنند. دقت شود که این ۲۰ ولت دامنه موج مربعی خروجی است. همچنین جریان گذرنده قابل تحمل نیز باید بیش از ۲۰ آمپر باشد. به منظور پایین آمدن تلفات ناشی از مقاومت درین سورس و عدم تاثیر گذاری آن بر راندمان کلی سیستم نیز از کلیدهایی باید استفاده کرد که مقاومت درین سورس کمی در جریان نامی سیستم داشته باشند تا تلفات $R_{DS}I^2$ حداقل شود. به دلیل آنکه در این پروژه از روش PWM استفاده نمی شود و نیاز به موج حامل با فرکانس بالا نداریم، تلفات سوئیچینگ بسیار ناچیز خواهد بود. علاوه بر نکات یاد شده کلیدی که سرعت خاموش و روشن شدن بالایی داشته باشد نیز در بهبود تلفات سوئیچینگ نقش عمده ای ایفا خواهد کرد. همچنین به دلیل ملاحظات مدار گیت درایو که در بخش بعدی توضیح داده می شود بهتر است کلیدی انتخاب کنیم که میزان بار الکتریکی گیت آن یا همان Q_g کوچکی داشته باشد. این باعث کاهش ساینز خازن بوت استرپ می شود.

^۱Power Switches

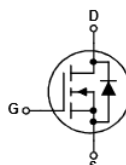
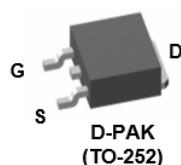
^۲Gate Drive Circuitry

^۳D Flip Flop

^۴Gate Charge

فصل ۲. طراحی اینورتر سه فاز ■ ۱۵

توپولوژی فصل قبل به عنوان توپولوژی این پروژه انتخاب شده است. این توپولوژی نیاز به شش کلید داشته که همگی از دیود بدنه معکوس برخوردار باشند زیرا در قبال بارهای سلفی جریان در لحظاتی نیاز به مسیری دارد که دقیقاً معکوس مسیر روشن بودن کلیدهاست.



Absolute Maximum Ratings

$T_A=25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Ratings	Units
V_{DS}	Drain-Source Voltage	30	V
V_{GS}	Gate-Source Voltage	± 20	V
I_D	Continuous Drain Current @ $T_C=25^{\circ}\text{C}$ (Note 3)	46	A
	@ $T_A=25^{\circ}\text{C}$ (Note 1a)	12	
	Pulsed (Note 1a)	100	
P_D	Power Dissipation @ $T_C=25^{\circ}\text{C}$ (Note 3)	56	W
	@ $T_A=25^{\circ}\text{C}$ (Note 1a)	3.3	
	@ $T_A=25^{\circ}\text{C}$ (Note 1b)	1.5	
T_J, T_{STG}	Operating and Storage Junction Temperature Range	-55 to +175	$^{\circ}\text{C}$

Thermal Characteristics

شکل ۲-۱. مشخصات کلید مورد استفاده

با توجه به نکات ذکر شده، در این پروژه کلیدهای FDD6690A مورد استفاده قرار می‌گیرد. این کلید دارای مشخصات دارای مشخصاتی مانند ولتاژ قابل تحمل ۳۰ ولت، جریان ۴۶ آمپر، سوئیچینگ سریع، مقاومت درین سورس بسیار کوچک به لطف تکنولوژی PowerTrench و بار گیت کم بوده و در عین حال قیمت بسیار کمی در بازار ایران دارد و بسیار مناسب توضیحات مذکور می‌باشد. این سوئیچ ها در پکیج TO-252 تهیه و در ساخت استفاده می‌شوند. مشخصات این سوئیچ در شکل (۲-۱) آورده شده است.

۲-۳/۲. مدار گیت درایو با استفاده از آیسی IR2111

مدار گیت درایو مهمترین مدار این پروژه می‌باشد. این مدار باید بتواند علاوه بر تامین جریان لازم برای روشن کردن سوئیچ سوئیچ‌هایی که سورس شناور دارند را نیز قطع و وصل کند. راههای مختلفی به این منظور وجود دارد که در این پروژه روش استفاده از آیسی مذکور که یک گیت درایو نسبتاً ارزان قیمت، مطمئن و غیرایزوله را فراهم می‌کند، توضیح داده می‌شود. این آیسی دارای مشخصات نشان داده شده در شکل (۲-۲) است. در دیتاشیت این قطعه، مدار پیشنهادی به منظور گیت درایو نیز آورده شده است که در این پروژه از همین مدار استفاده می‌کنیم. این مدار در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.

فصل ۲. طراحی اینورتر سه فاز ■ ۱۶

در اینورتر سه فاز چون سه شاخه داریم که هر شاخه دو کلید دارد نیاز به استفاده از ۳ عدد از این آیسی وجود دارد. پالس های مربوط به ورودی هر آیسی نسبت به آیسی مجاور خود ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند. همچنین سوئیچ های

HALF-BRIDGE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
Fully operational to +600V
Tolerant to negative transient voltage
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Matched propagation delay for both channels
- Internally set deadtime
- High side output in phase with input
- Also available LEAD-FREE

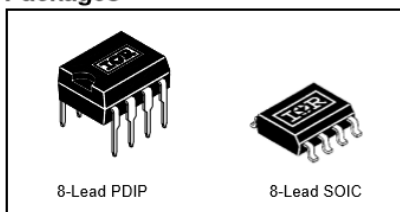
Product Summary

V _{OFFSET}	600V max.
I _{O+/-}	200 mA / 420 mA
V _{OUT}	10 - 20V
t _{on/off} (typ.)	750 & 150 ns
Deadtime (typ.)	650 ns

Description

The IR2111(S) is a high voltage, high speed power MOSFET and IGBT driver with dependent high and low side referenced output channels designed for half-bridge applications. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic input is compatible with standard CMOS outputs. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Internal deadtime is provided to avoid shoot-through in the output half-bridge. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 600 volts.

Packages



شکل ۲-۲. مشخصات آیسی گیت داربو مورد استفاده

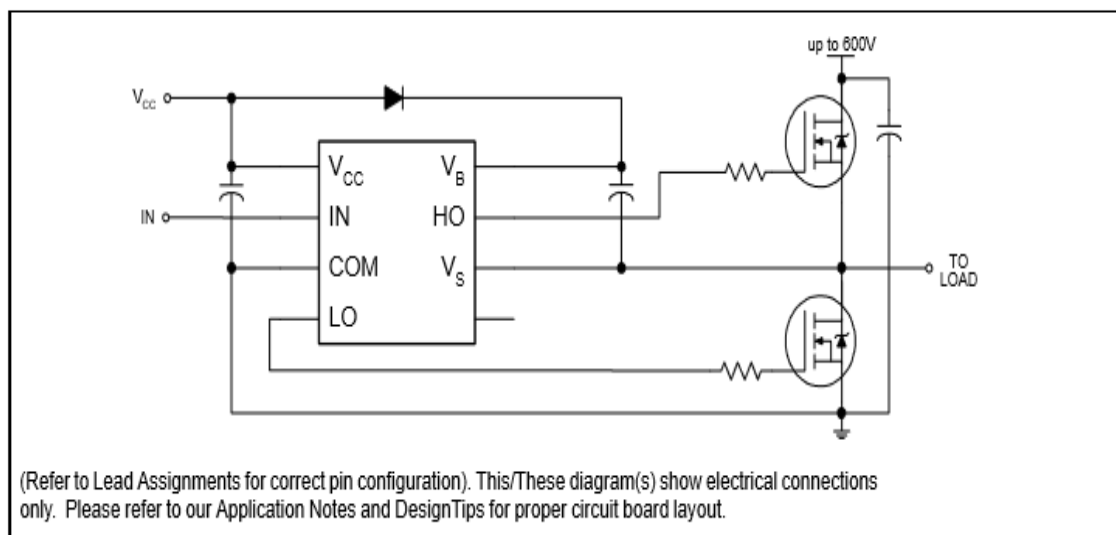
هر شاخه به نسبت ۱۸۰ درجه با یکدیگر اختلاف فاز دارند. به دلیل آنکه سرعت قطع و وصل کلیدها محدود است نباید دو سوئیچ همزمان با یکدیگر فرمان بگیرند و اختلاف فاز بیش از ۱۸۰ نیاز است. به عبارتی دیگر نباید همپوشانی بین روشن شدن یک کلید با قطع شدن کلید هم شاخه وجود داشته باشد در غیر این صورت منبع ورودی اتصال کوتاه شده و مدار آسیب می بیند. این آیسی با فراهم آوردن زمان مرده ۶۵۰ نانوثانیه بین پالس های اعمالی به هر جفت کلید هم شاخه از اتصال کوتاه منبع ورودی جلوگیری می کند. از دیگر امکانات این آیسی^۱ UVLO بوده که در صورت کاهش تغذیه آیسی به زیر مقدار مشخصی، عملیات کلیدزنی متوقف می شود. دلیل این کار آن است که اگر ولتاژ تغذیه کم شود و سوئیچ ها با پالس هایی با دامنه کم روشن شوند این روشن شدن مناسب نبوده و ممکن است سوئیچ در ناحیه خطی خود شروع به کار کند که به دلیل بالا بودن سطح جریان و ولتاژ دو سر آن آسیب خواهد دید. این آیسی ولتاژهای تغذیه تا حدوداً ۶۰۰ ولت را نیز تحمل می کند که بسیار بیشتر از آنچه در این پروژه نیاز است. تغذیه آیسی به صورت پیشنهادی بین ۱۰ تا ۲۰ ولت است که در این پروژه ما این تغذیه را به صورت مستقیم از منبع ورودی خود دریافت می کنیم لذا محدودیت دیگر این پروژه دامنه تغذیه ورودی بین ۱۰ تا ۲۰ ولت می باشد.

^۱Under Voltage Lockout

فصل ۲. طراحی اینورتر سه فاز ■ ۱۷

برای تغذیه مدارات دیگر از ولتاژهای ۵ ولت و ۳,۳ استفاده شده که در بخش های آینده توضیح داده می شوند. وضعیت پایه های این کلید همانطور که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است می باشد. یک پایه برای پالس ورودی نیاز است که این پالس ورودی به دو پالس یکی هم فاز و دیگری با ۱۸۰ درجه اختلاف فاز نسبت به ورودی به ترتیب به سوئیچ بالا و پایین هر شاخه اعمال می شود. این پالس ها همپوشانی نداشته و همچنین از لحاظ تاخیر انتشار جبران سازی شده اند. پالس سوئیچ بالایی هم فاز با پالس ورودی است. پالس ورودی باید دامنه ای به اندازه ۰ تا ولتاژ تغذیه آیزی داشته باشد که این یک ضعف است و در مدار تولید پالس به نحوی آن را برطرف می کنیم. همچنین یک دیود و خازن نیز برای انجام عملیات بوت استرپ نیاز است که طراحی مقدار خازن و ملاحظات انتخاب دیود در دیتاشیت

Typical Connection



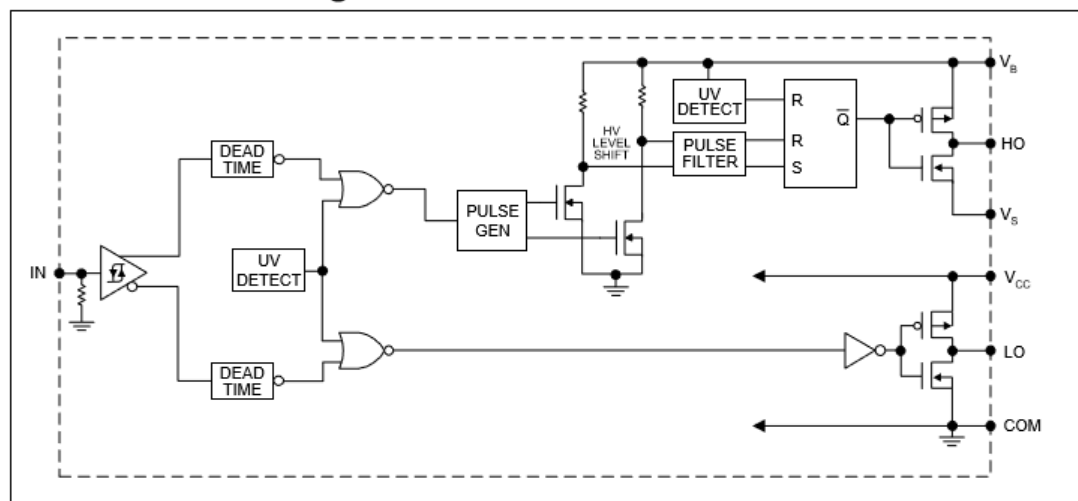
شکل ۲-۳. مدار پیشنهادی آیزی گیت داریو

قطعه توضیح داده شده است و در اینجا به آن نمی پردازیم. در این پروژه متناسب با توضیحات دیتاشیت خازن ۱۰ میکروفاراد انتخاب شد.

این آیزی دارای مدار داخلی مفصلی بوده که تا حدودی آن را توضیح دادیم. در ادامه مطابق شکل (۲-۴) به توضیح سایر بخش های آن و عملیات بوت استرپ می پردازیم. در این آیزی ابتدا ولتاژ ورودی توسط پایه IN وارد آیزی شده و باید دامنه بین ۰ تا VCC داشته باشد. پایه VCC پایه تغذیه آیزی بوده که بین ۱۰ تا ۲۰ ولت در این پروژه مطابق پیشنهاد دیتاشیت انتخاب می کنیم.

در ورودی آیسی یک مدار اشمیت تریگر وجود که به طور خلاصه وظیفه آن مقایسه سطوح ولتاژ ورودی IN با یک سطح آستانه است به این ترتیب پالس ورودی اگر پالس چندان خوبی از لحاظ زمان صعود و نزول، نویز و... نباشد در عبور از اشمیت تریگر یک پالس مناسب خواهیم داشت. این پالس مناسب و همچنین حالت اینورتر شده آن به سمت مدارات دو کانال خروجی آیسی یعنی پایه های HO و LO هدایت می شود. در این مسیر مدارهایی برای ایجاد Dead Time وجود دارد که مشکل همپوشانی را رفع کند. مشاهده می شود که یک گیت NOR نیز وجود دارد که وظیفه بر مقایسه خروجی های مدارات Dead Time با خروجی واحد UVLO را دارد. به این ترتیب اگر خروجی این واحد یک شود و ولتاژ تغذیه کم تشخیص داده شود خروجی این دو گیت صفر خواهد بود و عملاً هیچ پالسی برای سوئیچ ها ارسال نمی گردد. سپس در صورتی که شرایط UVLO تشخیص داده نشود پالسهای LOW

Functional Block Diagram



Lead Definitions

Symbol	Description
IN	Logic input for high side and low side gate driver outputs (HO & LO), in phase with HO
V _B	High side floating supply
HO	High side gate drive output
V _S	High side floating supply return
V _{CC}	Low side and logic fixed supply
LO	Low side gate drive output
COM	Low side return

شکل ۲-۴. مدار داخلی آیسی گیت داریو

Side به یک مدار پوش پول ارسال شده و پالس های HIGH Side نیز توسط مداراتی به علاوه مدار پوش پول و ترکیب شدن با خازن و دیود خارجی آیسی عملیات بوت استرپ که همان ساخت تغذیه شناور برای درایو سوئیچ هایی با سورس شناور است را انجام می دهد. در انتخاب خازن مشخصات سوئیچ مانند بار گیت و جریان نشتی علاوه بر مشخصات دیود لحاظ می گردد. خازن باید بتواند موقعی که سوئیچ پایین روشن می شود از طریق دیود متصل به

VCC شارژ شده و برای رویداد بعدی کلیدزنی آماده شود تا مثل یک منبع تغذیه شناور عمل کند. سر راه پالس های خروجی آیسی یک مقاومت سری در حد ۲۰ اهم برای میرا کردن نوسانات ناشی از رزونانس خازن گیت و سلف های مسیر قرار داده می شود. همچنین معمولاً یک مقاومت موازی گیت سورس قرار می گیرد تا هنگام قطع بودن سوئیچ گیت کاملاً تخلیه از بار شود و ناخواسته روشن نشود. در طراحی پی سی بی این آیسی مطابق با دستورالعمل سازنده مواردی باید در نظر گرفته شود تا به بهترین نحو ممکن عملیات کلیدزنی فراهم شود. به دلیل پایین بودن فرکانس مدار این پروژه خیلی از ملاحظات مربوطه ساده شده و مشکل ساز نمی شوند. علاوه بر نکات ذکر شده پایه COM آیسی با سورس سوئیچ های LOW Side یکی می شود و در این مدار ایزولا سیون بین گیت درایو و مدار قدرت نداریم. یک خازن بزرگ بین تغذیه تا پایه COM نیز برای بهبود جریان دهی به آیسی و تامین جریان های پالسی قرار داده شده است. این خازن در کنار یک خازن ۱۰۰ نانوفاراد عدد سی می تواند نویز های فرکانس بالا را نیز حذف کند و جریان دهی بهتر و تمیز تری در خروجی آیسی داشته باشیم.

۳-۲. مدار مولد پالس با فرکانس متغیر

پالس های مورد نیاز آیسی گیت درایو به روش های مختلفی می تواند تولید شود. قبل از آنکه بخواهیم راجع به تولید ۳ پالس مربعی با ۱۲۰ درجه اختلاف فاز به ۳ آیسی گیت درایو صحبت کنیم ابتدا نیاز به ساخت پالس مرجع داریم. این پالس که هم فرکانس با فرکانس خروجی اینورتر است در این پروژه توسط یک برد آردوینو^۱ ساخته می شود. از آنجا که این پروژه به صورت ماژول برای برد آردوینو است، بهترین روش تولید پالس همین روش است. برای تولید پالس به جای درگیر شدن با رجیسترهای میکروکنترلر AVR صرفاً از یک برد UNO استفاده کرده و با تابع tone روی یک پایه دلخواه فرکانس بین ۳۱ هرتز تا ۶۵ کیلوهرتز را می توانیم تولید کنیم. برای ما تا ۳ کیلوهرتز برای این پروژه کافی است. به این ترتیب با توجه به قابلیت اتصال انواع ماژول ها به برد آردوینو می توانیم به روش های مختلفی این پالس را کنترل کنیم. پالس خروجی را به یک مدار فلیپ فلاپ سه طبقه (شمارنده جانشون) داده و مراحل بعدی را پی می گیریم.

۴-۱-۲. مدار تولید پالس های مربعی سه فاز با استفاده از DFF

برای تولید سه موج مربعی با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه برای سه آیسی گیت درایو از روی پالس مربعی مرجع نیاز به یک مدار شمارنده جانشون داریم که با استفاده از سه عدد DFF پیاده سازی می شود. این مدار به آسانی سه پالس مربعی تولید کرده که هم دامنه با پالس مرجع بوده و این سه پالس با یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند. پالس اول هم فاز با پالس ورودی است. لازم به ذکر است که به دلیل ساختار مدار فرکانس این سه پالس یک ششم فرکانس پالس

^۱Arduino

فصل ۲. طراحی اینورتر سه فاز ■ ۲۰

ورودی است لذا در تابع tone در آردوینو باید فرکانس ماکزیمم که ۳ کیلوهرتز بود به صورت ۱۸ کیلوهرتز وارد کنیم تا پس از عبور از شمارنده جانسون فرکانس پالسها برابر ۳ کیلوهرتز شود.

۵-۱-۲. مدار مبدل سطوح منطقی

به منظور کارکرد صحیح مدار ما باید به ولتاژ بخش های مختلف توجه کنیم. پالس مرجع خروجی آردوینو دارای سطح صفر ولت و پنج ولت است. پالس های فلیپ فلاپ ها نیز همینطور خواهند بود. لذا تغذیه ۵ ولت فلیپ فلاپ ها را مستقیماً از آردوینو تامین می کنیم. سپس مدار گیت درایو که گفتیم باید پالسهای با پیک دامنه برابر با تغذیه خود آیسی داشته باشد لذا باید پالس های فلیپ فلاپ ها را از سطوح ۰ تا ۵ ولت به سطوح ۰ تا VCC آیسی گیت درایو ببریم. برای اینکار روش های مختلفی وجود دارد. در این پروژه از یک آپ امپ ارزان قیمت مانند LM324 استفاده می کنیم. تغذیه آپ امپ را دقیقاً همان تغذیه آیسی گیت درایو در نظر می گیریم و سیگنال های فلیپ فلاپ ها را با ولتاژ ۳,۳ ولت روی آردوینو مقایسه کرده (توسط آپ امپ بدون فیدبک) و خروجی حاصله که بین ۰ تا VCC آیسی گیت درایو است را به ورودی آیسی می دهیم. ذکر این نکته مهم است که آیسی ۷۴۱۷۵ که به عنوان DFF استفاده شده است سطح خروجی خروجی حدوداً ۳,۴ دارد. در صورت تست مدار اگر این مقدار کافی نباشد می توان توسط یک مقاومت و دیود سری یک ولتاژ در حدود ۰,۷ ولت از روی ۵ ولت آردوینو ساخته و به جای ولتاژ ۳,۳ به عنوان مرجع مقایسه به آپ امپ دهیم.

علاوه بر توضیحات فوق سطح ولتاژ تغذیه مدار یا همان تغذیه قدرت که در نهایت دامنه خروجی را می سازد نیز همان تغذیه آیسی گیت درایو را فراهم می آورد. آپ امپ طوری انتخاب شده است که به راحتی تحت تغذیه ۲۰ ولت نیز کار کند.

۶-۱-۲. کنترل فرکانس توسط بلوتوث

برای کنترل فرکانس یک راه تغییر فرکانس توسط کدنویسی و تابع tone است. یک راه دیگر به صورت ریموت از راه دور. برای این کار یک ماژول بلوتوث در نظر گرفته و با اتصال آن به برد درایور اینورتر مستقیماً از طریق تلفن همراه می توانیم دستوراتی مثل قطع و وصل و تغییر فرکانس خروجی اینورتر را صادر کنیم. تغذیه ماژول توسط برد آردوینو و ولتاژ ۵ ولت تامین می شود.

۴-۲. مروری مختصر بر طراحی PWM

در این بخش به توضیحاتی راجع به طراحی و مدارات اینورتر سه فاز به روش PWM می پردازیم. در این نوع کلیدزنی نیاز به مدارات زیر داریم:

(۱) مدار قدرت شامل سوئیچ ها

(۲) مدار تولید موج حامل مثلثی فرکانس بالا

(۳) مدار تولید پالس مربعی مرجع

(۴) مدار تبدیل موج مربعی مرجع به سه موج مربعی مرجع با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه

(۵) مدار تبدیل موج های مربعی سه فاز به موج مثلثی سه فاز

(۶) مدار تبدیل موج مثلثی سه فاز به موج مرجع سینوسی سه فاز

(۷) مدار مقایسه کننده موج مرجع سینوسی سه فاز با موج حامل مثلثی

(۸) مدار گیت درایو

(۹) مدار فیلتر خروجی

ملاحظه می شود که حجم مدارات در این روش بسیار بیشتر از روش قبلی است. البته می توان می توان به کمک کدزنی یک میکروکنترلر بخشی از این مدارات را به صورت دیجیتالی و نرم افزاری پیاده سازی کرد. در ادامه توضیحاتی راجع به مدارات فوق داده می شود.

مدار قدرت همان مدار روش قبلی است. شامل شش سوئیچ در سه شاخه مستقل از هم. مدار تولید موج مربعی مرجع نیز می تواند همان آردوینوی باشد که در روش قبل استفاده شد. مدار شماره چهار یعنی مدار تبدیل موج مربعی تک فاز به سه فاز نیست به کمک همان مدار DFF روش قبلی قابل انجام است. مدار قسمت پنج یک مدار تبدیل موج مربعی به موج مثلثی است که روشهای بسیاری برای این کار وجود دارد یک نمونه بسیار خوب از این مدار مدار انتگرال گیر است. مشکل این مدار آن است که با تغییر فرکانس علاوه بر فرکانس خروجی دامنه خروجی نیز تغییر می کند برای رفع این مشکل می توان از یک آپ امپ بهره قابل کنترل استفاده کرد و کاهش دامنه را جبران کرد. مدار شماره ۶ مدار ساده ای است که توسط تعدادی دیود این عمل اتفاق می افتد. این مدار حساسیتی به فرکانس ندارد ولی با تغییر دامنه ورودی عملکرد مدار مختل می شود. لذا دامنه ورودی باید همیشه ثابت بماند. در نهایت مدار مقایسه که عملاً سه عدد آپ امپ است که موج مثلثی ساخته شده فرکانس بالا را دریافت کرده و با سه موج سینوسی سه فاز مقایسه می کند. نتیجه مقایسه به مدار گیت درایو ارسال می شود. موج مثلثی فرکانس بالا می تواند توسط یک مدار مانند انتگرال گیر ساخته شود. این موج فرکانس بسیار بالاتر از امواج مرجع سینوسی داشته و دامنه آن ثابت است. در نهایت در خروجی اینورتر نیاز به یک فیلتر مناسب برای استخراج مولفه سینوسی مورد نظر است. این مدار به دلیل آنکه در نهایت در این پروژه ساخته نمی شود در همین حد به توضیح آن کفایت می کنیم. در فصل بعد در قسمت شبیه سازی این مدار از بلوک هایی که معادل رفتاری این مدار است استفاده کرده و نتایج را با روش شش پله ای مقایسه می کنیم.

۲-۵. مدار فیلتر خروجی

برای داشتن یک خروجی تک فرکانس می‌توان از یک فیلتر مناسب استفاده کرد. البته هارمونیک‌ها در نهایت تاثیر خود را بر خروجی می‌گذارند ولی در صورتی که هارمونیک‌ها در فرکانس‌های بالاتری باشند و دامنه کمی داشته باشند با استفاده از یک فیلتر از مرتبه مناسب می‌توان به خروجی مناسبی یافت. روش کلیدزنی شش پله‌ای اولین هارمونیک، هارمونیک مرتبه پنج است و در روش PWM اولین هارمونیک در m_f قرار دارد. لذا می‌توان گفت که در این دو نوع روش کلیدزنی، با یک فیلتر ساده باترورث مرتبه دوم نیز می‌توان به خروجی خوبی رسید. البته باید توجه داشت که فرکانس قطع فیلتر پایین گذر به صورت ثابت خواهد بود و لذا با تغییر فرکانس خروجی به فرکانس‌های بالاتر از مقدار طراحی شده مشکلی پیش نمی‌آید ولی با کم کردن فرکانس هارمونیک‌ها به فرکانس‌های پایین تر آمده و از فیلتر عبور می‌کنند.

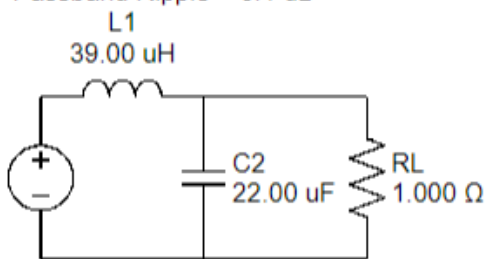
برای طراحی فیلتر نرم افزارها و وبسایت‌های بسیاری وجود دارند. در اینجا از وبسایت^۱ استفاده می‌کنیم که یک فیلتر خوب و مناسب را به سرعت طراحی کند. یک فیلتر مرتبه دوم چبی شو با فرکانس قطع ۳ کیلوهرتز انتخاب می‌کنیم. طبق این سایت مدار پیشنهادی به صورت یک فیلتر LC خواهد بود. تنظیمات در شکل (۲-۵)، مدار در شکل (۲-۶) و پاسخ فرکانسی در شکل (۲-۷) نشان داده شده است.

شکل ۲-۵. طراحی یک فیلتر برای استخراج فرکانس خروجی ۱ کیلوهرتز

2nd Order Chebyshev Lowpass

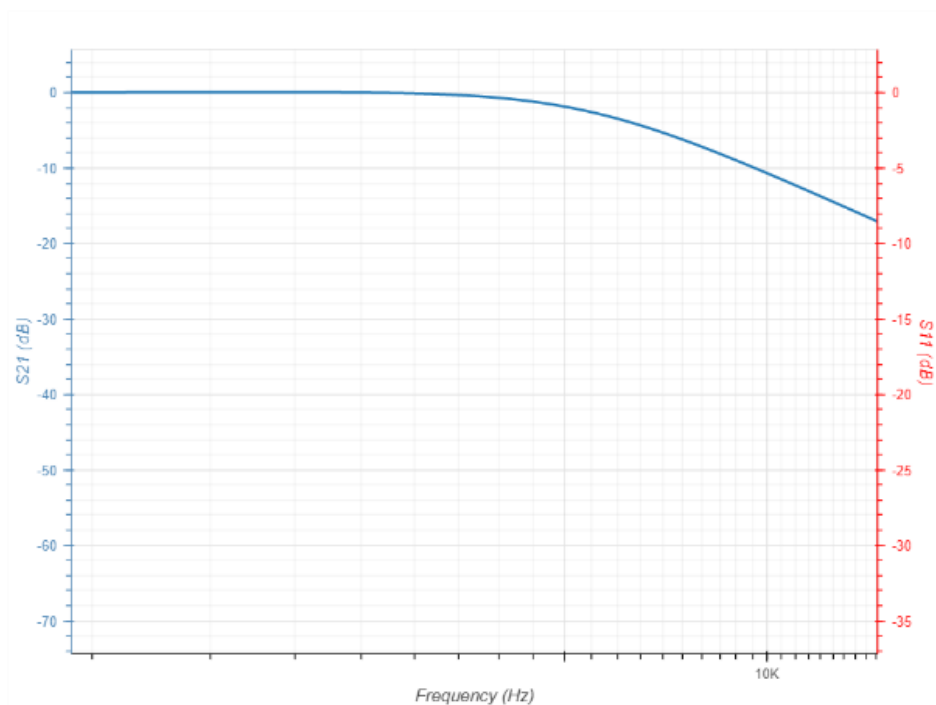
Cutoff Frequency = 3.000 kHz

Passband Ripple = 0.1 dB



شکل ۲-۶. مدار سنتز شده فیلتر موردنظر با مقادیر استاندارد

این فیلتر به دلیل وجود سلف ۳۹ میکروهنری به اندازه‌ی ۲۴۵ میلی اهم امپدانس سری خواهد داشت که به ازای ولتاژ نامی خط به خط ۲۰ ولت و جریان نامی ۲۰ آمپر این میزان امپدانس برابر با ۴,۹ ولت افت ولتاژ خواهد بود که مقدار نسبتاً زیادی است. می‌توان با تغییر مرتبه فیلتر یا نوع فیلتر این مشکل را برطرف نمود. به طور کلی این سایت یک راه خوب برای طراحی یک فیلتر مناسب است.



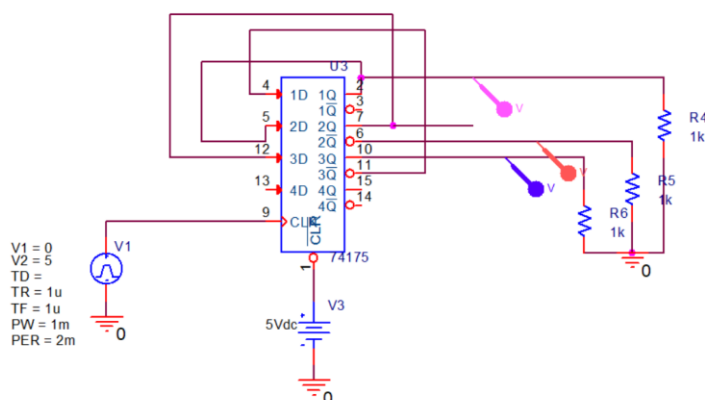
شکل ۲-۷. پاسخ فرکانسی فیلتر موردنظر

فصل ۳. شبیه سازی اینورتر سه فاز

در این فصل به کمک نرم افزار اورکد و پی سیم به شبیه سازی مدار توصیف شده در فصل قبل می پردازیم. در این شبیه سازی سعی بر آن است که شکل موج های مهم قسمت های مختلف مدار آورده و تحلیل شود. در نهایت مدل رفتاری اینورتر سه فاز PWM را نیز شبیه سازی و به مقایسه عملکرد مدار پروژه با نتایج مدار PWM می پردازیم.

۳-۱. شبیه سازی مدار تولید پالس های مربعی سه فاز با DFF

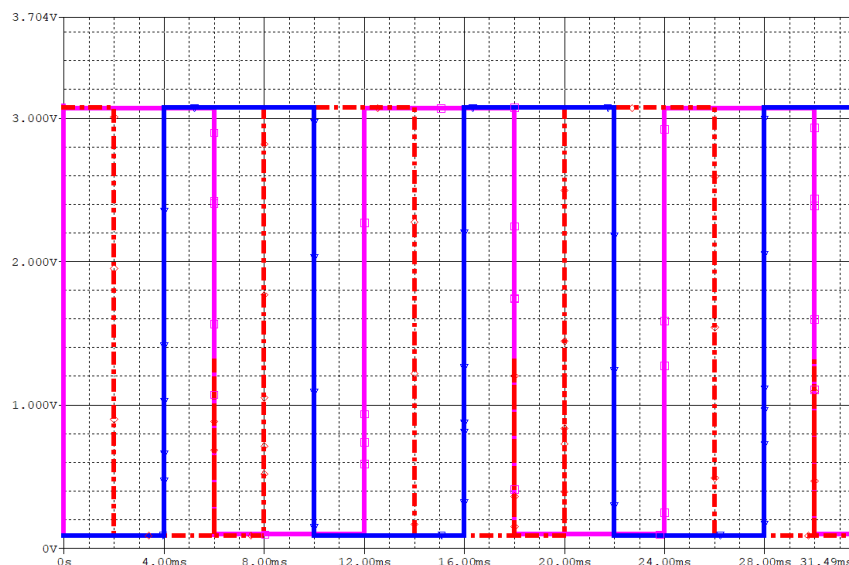
پس از تولید موج مربعی توسط برد آردوینو باید این موج مربعی به سه موج مربعی با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه تبدیل شود. برای اینکار از مدار شمارنده ای استفاده کردیم که در قسمت ۲-۳-۴ توضیح داده شد. برای شبیه سازی این مدار در اورکد از شماتیک شکل (۳-۱) استفاده شده است.



شکل ۳-۱. شبیه سازی مدار تولید پالس های مربعی سه فاز در اورکد

فصل ۳. شبیه سازی اینورتر سه فاز ■ ۲۶

مطابق شکل یک موج مربعی به عنوان مدل خروجی آردوینو به پایه CLK آیسی متصل شده است. سطوح بین صفر تا پنج ولت است. فرکانس این موج در اینجا ۵۰۰ هرتز است. پایه CLR به ولتاژ ۵ ولت وصل شده تا فلیپ فلاپ ها در حالت کلیر قرار نگیرند. اتصالات مطابق مدار فصل قبل است و یک بار سه فاز ستاره نیز برای نمایش بهتر عملکرد مدار به خروجی های موردنظر وصل شده است. خروجی سه فاز مدار در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.

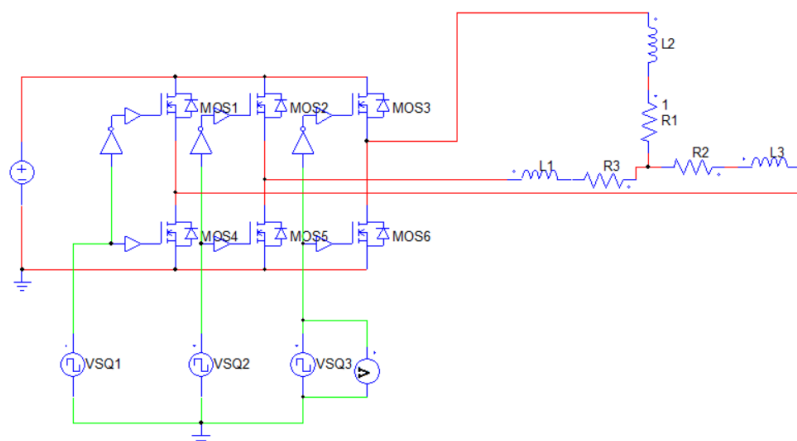


شکل ۳-۲. شبیه سازی مدار تولید پالس های مربعی سه فاز در اورکد

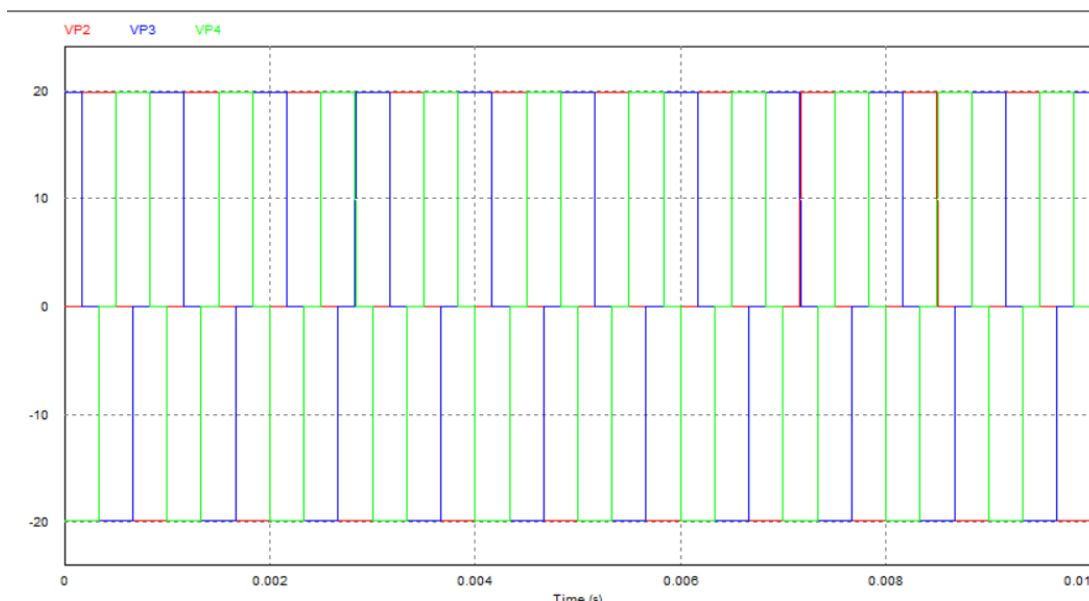
مشاهده می شود که اختلاف فاز ۱۲۰ درجه ای بین سه خروجی وجود دارد. با تغییر فرکانس ورودی این آیسی به خوبی به تولید شکل موج های مطلوب ما می پردازد. ملاحظه می شود که فرکانس شکل موج های خروجی یک ششم فرکانس کلاک ورودی است.

۳-۲. شبیه سازی مدار قدرت اینورتر سه فاز شش پله ای و نتایج حاصل از آن

با اعمال پالس های ساخته شده به مدار قدرت اینورتر به صورت شکل (۳-۳) نتایج شکل های (۳-۴)، (۳-۵) و (۳-۶) به ترتیب برای ولتاژ خط، جریان خط و ولتاژ فاز به ازای بار مقاومتی نامی بدست می آید. مقادیر فرکانس پالس ها برابر ۱ کیلوهرتز با ضریب وظیفه ۵۰ درصد با دامنه ۲۰ ولت پیک تا پیک است. تغذیه ورودی ۲۰ ولت در نظر گرفته شده است، میزان مقاومت ماسفت ها برابر ۱۰ میلی اهم در حالت روشن بودن و ولتاژ دیود بدنه حدود ۰,۷۶ ولت در نظر گرفته شده است. این مقادیر مستقیماً از دیتاشیت قطعات استفاده در ساخت پروژه استخراج شده است. بار ابتدا اهمی خالص با میزان یک اهم در نظر گرفته شده است.



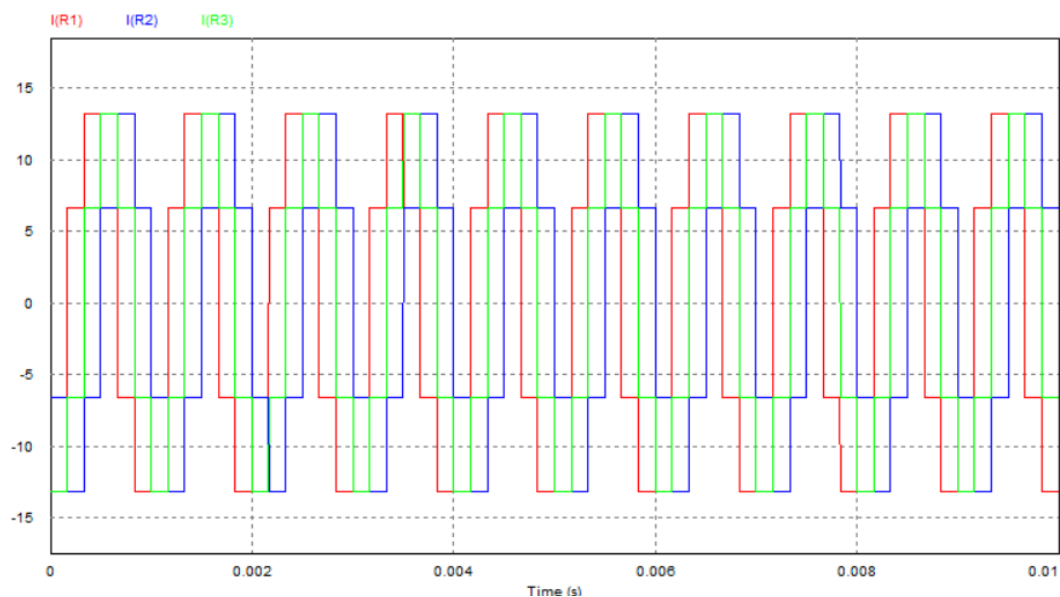
شکل ۳-۳. شبیه سازی مدار اینورتر سه فاز شش پله‌ای در پی سیم



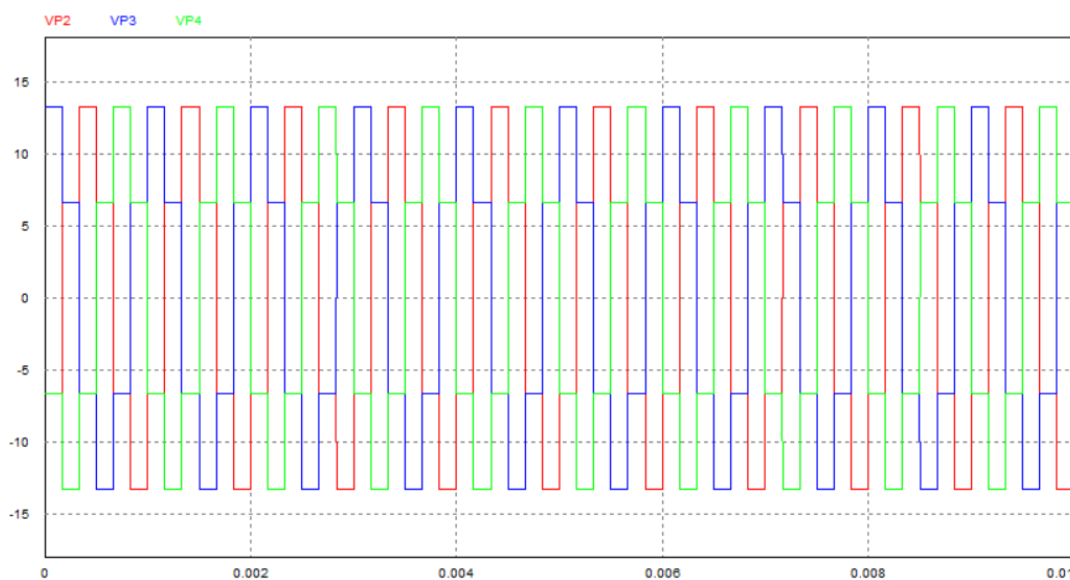
شکل ۳-۴. ولتاژهای خط بار مقاومتی

مشاهده می شود که طبق شکل (۳-۴) ولتاژ خط دارای دامنه ماکزیمم ۲۰ ولت است. و شکل موج کاملاً مطابق تئوری بیان شده در فصل اول است. میزان THD موجود در شکل موج ولتاژ خط برابر است با ۳۱ درصد. این میزان در جریان خط نیز برابر است با ۳۱ درصد. محاسبات به کمک اندازه گیری های موجود در نرم افزار PSIM صورت گرفته است. نکته قابل ذکر دیگر دامنه جریان خط است. چون ولتاژ فاز دارای سطوح دو سوم تغذیه و یک سوم تغذیه است، پیک جریان نهایتاً دو سوم پیک ولتاژ تقسیم بر مقاومت است. یعنی حدوداً ۱۳ آمپر که با شبیه سازی مطابقت دارد.

فصل ۳. شبیه سازی اینورتر سه فاز ■ ۲۸

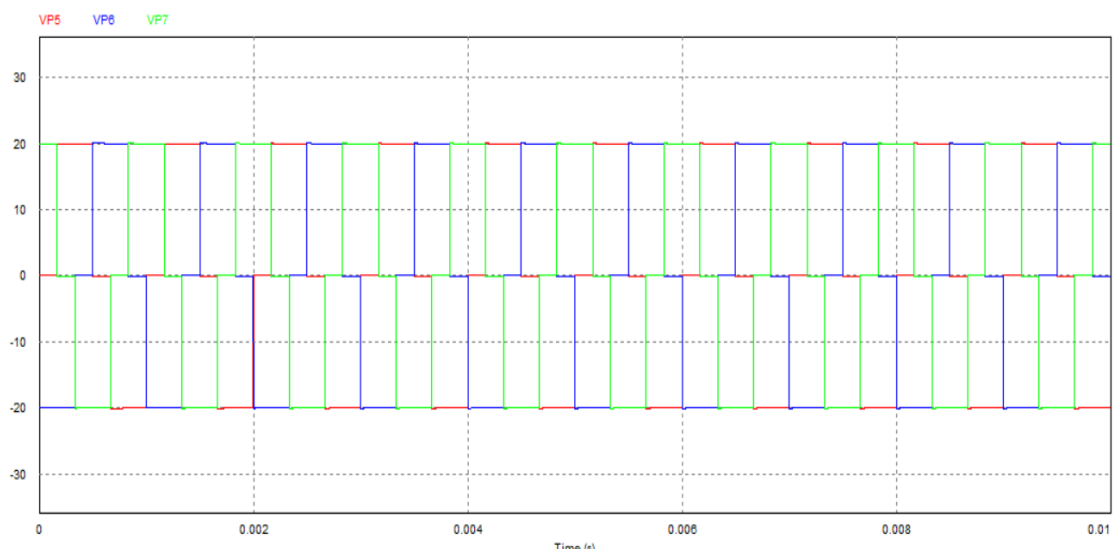


شکل ۳-۵. جریان های خط بار مقاومتی

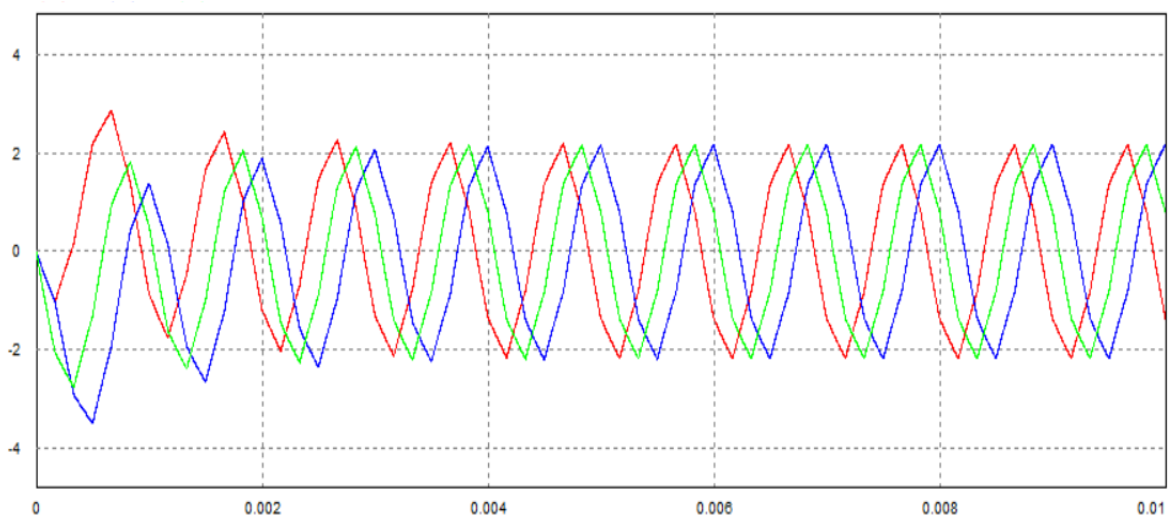


شکل ۳-۶. ولتاژهای فاز بار مقاومتی

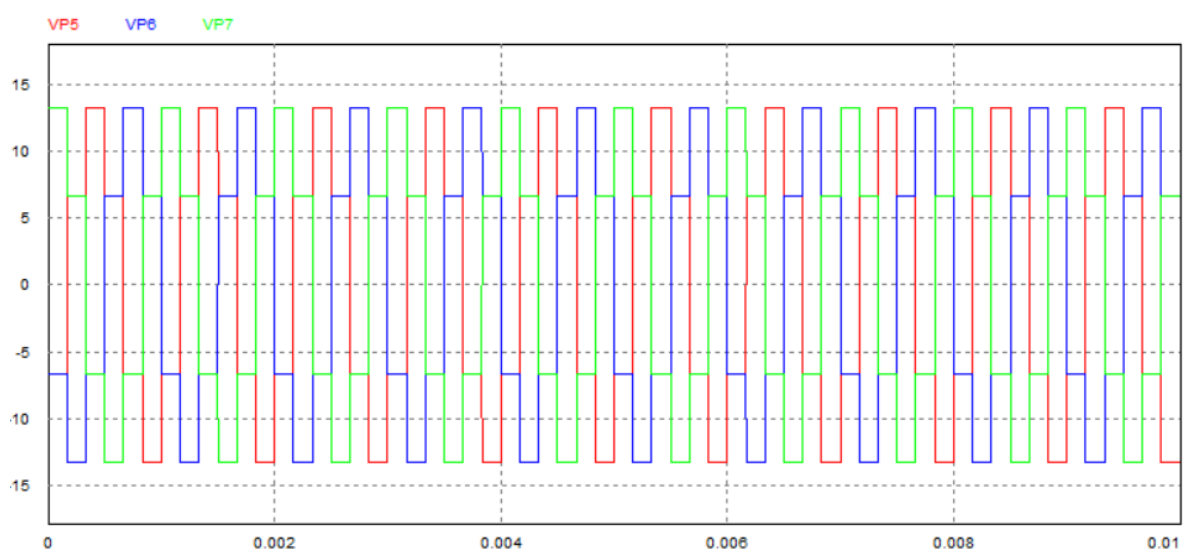
اکنون بار را به حالت سلفی اهمی درآورده و برای دیدن تاثیر سلف ، یک سلف ۱ میلی هانری قرار می دهیم. ملاحظه می شود هرچه سلف بزرگتر دامنه جریان کوچک تر ولی به سینوسی نزدیک تر می گردد و میزان THD جریان بار به طرز چشمگیری بهبود می یابد. شکل موجهای مشابه با حالت مقاومتی در شکل های (۳-۷) ، (۳-۸) و (۳-۹) نشان داده شده است. میزان THD ولتاژ خط در این حالت برابر با ۳۱ درصد است که فرقی با حالت اهمی خالص ندارد ولی این میزان برای جریان بار حدودا ۴,۷ درصد است و یعنی ۲۶,۳ بهبود داریم که بسیار قابل ملاحظه است.



شکل ۳-۷. ولتاژهای خط بار سلفی اهمی



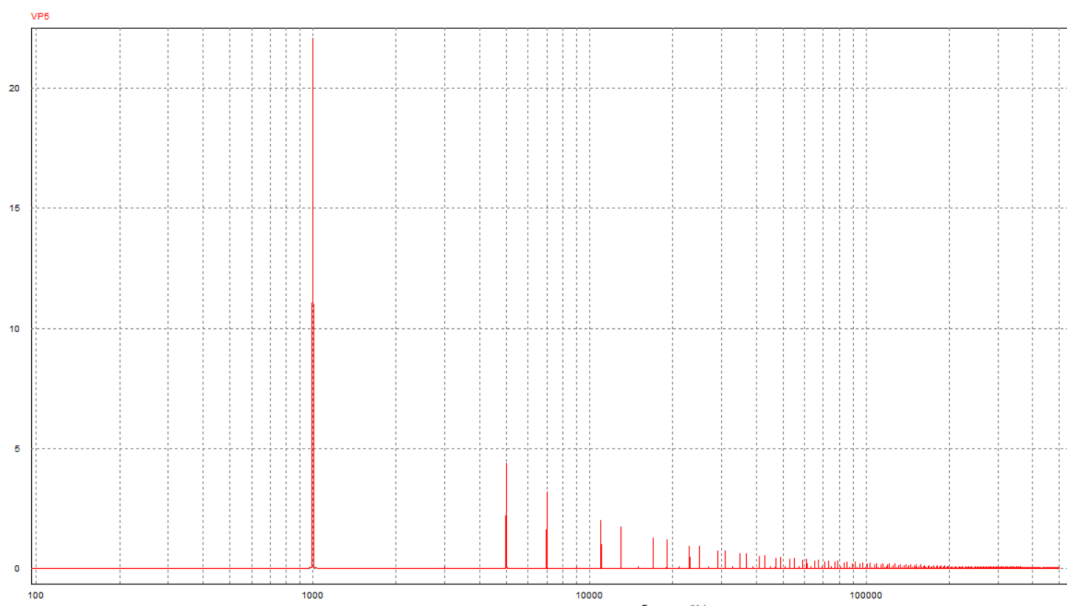
شکل ۳-۸. جریانهای خط بار سلفی اهمی



شکل ۳-۹. ولتاژهای فاز بار سلفی اهمی

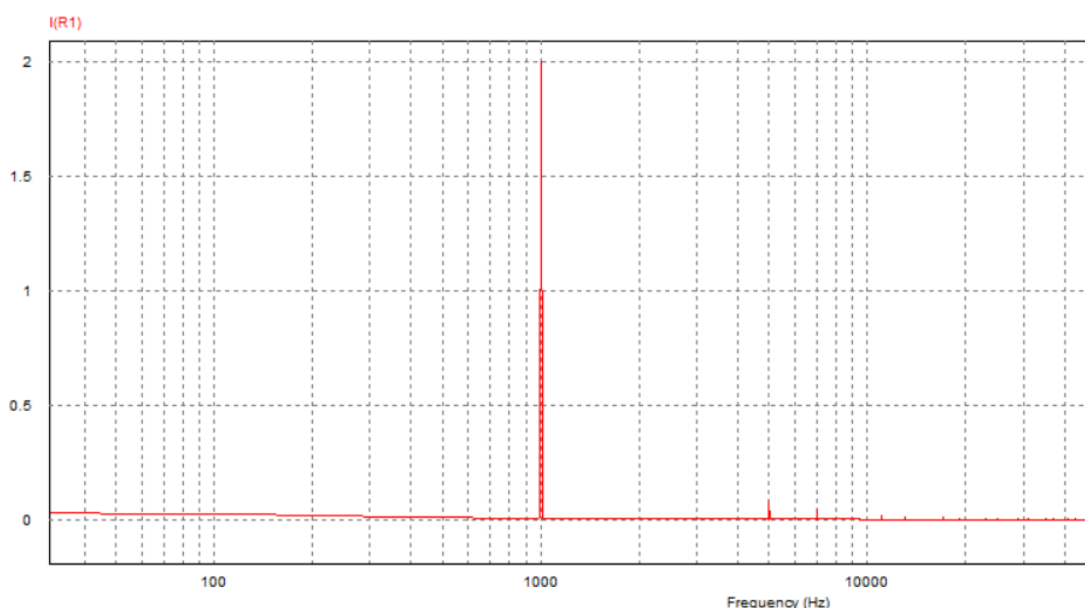
فصل ۳. شبیه سازی اینورتر سه فاز ■ ۳۰

اکنون به سراغ تحلیل فوریه شکل موج های ولتاژ خط یکی از دو حالت می رویم. در حالت اهمی سلفی تحلیل فوریه به صورت شکل (۳-۱۰) است. مشاهده می شود که بزرگترین موله ولتاژ در فرکانس حدود ۱۰۰۰ هرتز است که همان فرکانس مطلوب ما است. مولفه بعدی که دامنه ای به اندازه کمتر از یک چهارم دامنه مولفه اصلی دارد در فرکانس ۵ کیلوهرتز است. به این ترتیب صحت نتایج تئوری فصل اول مبنی بر وجود اولین هارمونیک در فرکانس ۵ برابر فرکانس هارمونیک اصلی تایید می شود. می توان برای حالت اهمی و یا برای جریان ها نیز چنین تحلیلی داشت.



شکل ۳-۱۰. تحلیل فوریه شکل موج ولتاژ خط

مثلا برای جریان خط در حالت اهمی سلفی تحلیل فوریه در شکل (۳-۱۱) آمده است. مطابق این شکل ملاحظه می گردد که مولفه اصلی در یک کیلوهرتز بوده و دامنه ای برابر با ۲ آمپر دارد درحالی که هارمونیک بعدی که در



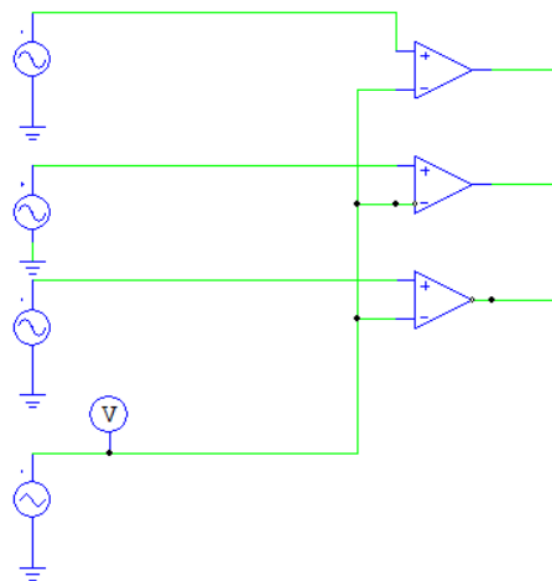
شکل ۳-۱۱. تحلیل فوریه شکل موج جریان خط

فصل ۳. شبیه سازی اینورتر سه فاز ■ ۳۱

فرکانس ۵ کیلوهرتز است دامنه‌ای به اندازه ۸۰ میلی آمپر دارد که بسیار ناچیز است و این همان دلیلی است که باعث شده THD جریان بار بسیار بهبود یابد.

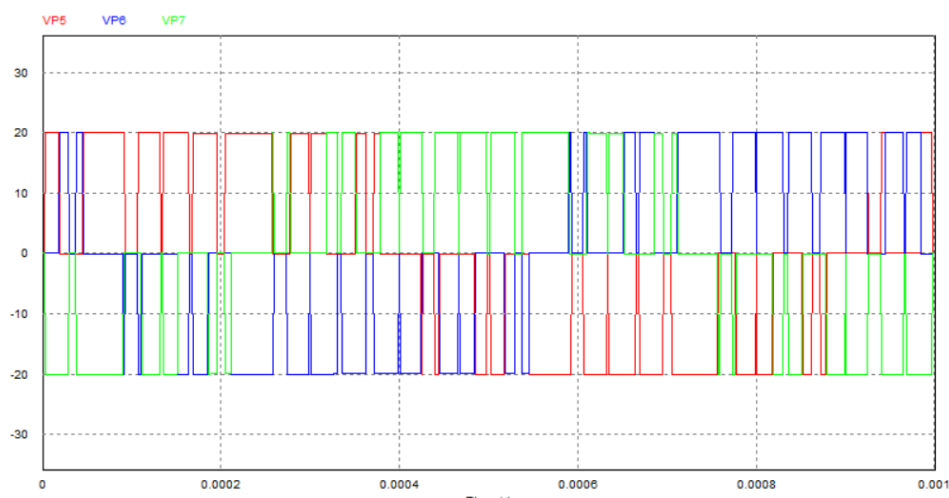
۳-۳. شبیه سازی مدار قدرت اینورتر سه فاز PWM و نتایج حاصل از آن

در این قسمت به شبیه سازی مدار PWM می‌پردازیم. برای سهولت کار این شبیه سازی در محیط PSIM و به صورت رفتاری انجام می‌دهیم. مدار شبیه سازی در شکل (۱۲-۳) نشان داده شده است. دامنه موج های سینوسی ۵



شکل ۳-۱۲. مدولاسیون PWM

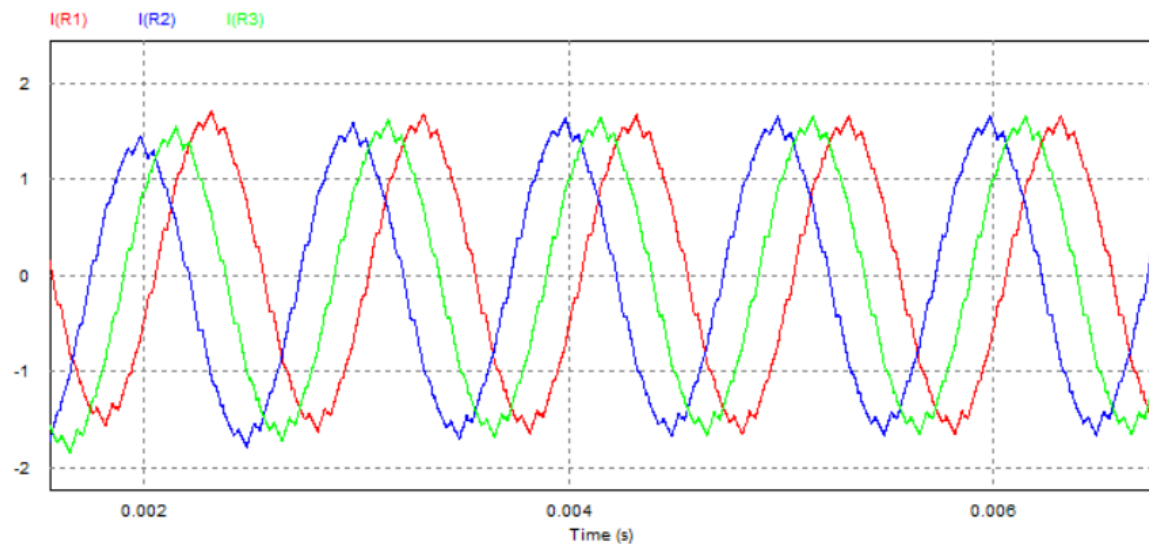
ولت و دامنه موج مثلی نیز همین مقدار است. به این ترتیب نرخ مدولاسیون دامنه که در فصل اول تعریف شد در اینجا برابر یک است. اگر بار سلفی اهمی باشد و دقیقاً همان مقادیر روش شش پله‌ای را تست کنیم و فرکانس



شکل ۳-۱۳. مدولاسیون PWM - ولتاژ خط

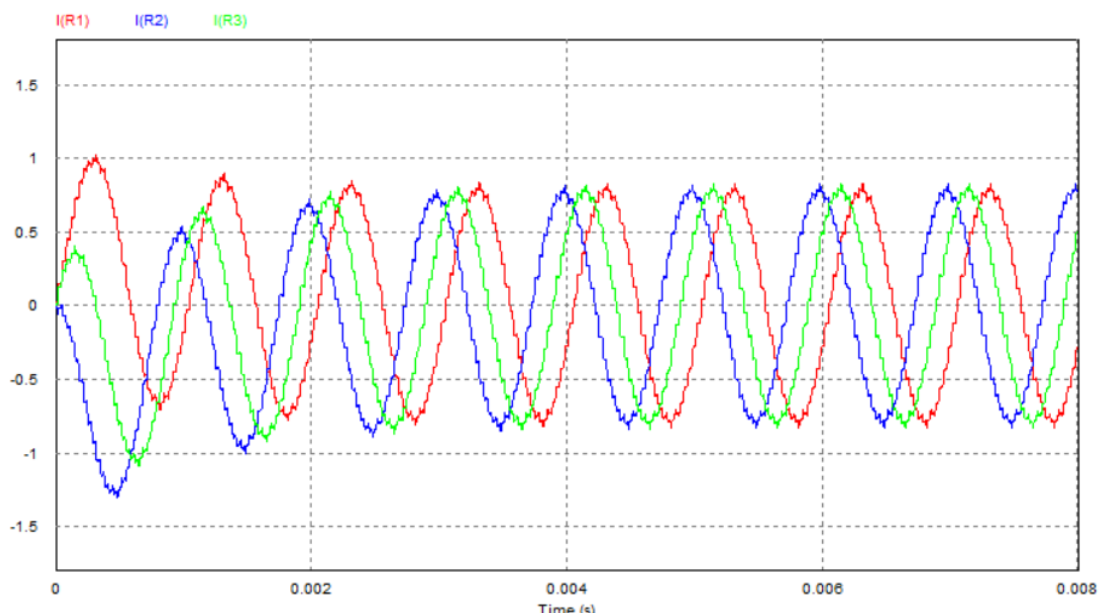
فصل ۳. شبیه سازی اینورتر سه فاز ■ ۳۲

سینوسی ها برابر ۱ کیلوهرتز و فرکانس مثلثی برابر ۱۸ کیلوهرتز باشد (مطابق فصل اول مضرب ۳ از فرکانس مرجع) شکل موج ولتاژ خط ، جریان خط برای بار سلفی اهمی به ترتیب در شکل های (۱۳-۳) ، (۱۴-۳) آمده است. مشاهده



شکل ۳-۱۴. مدولاسیون PWM - جریان خط در حالت $m_a = 1$

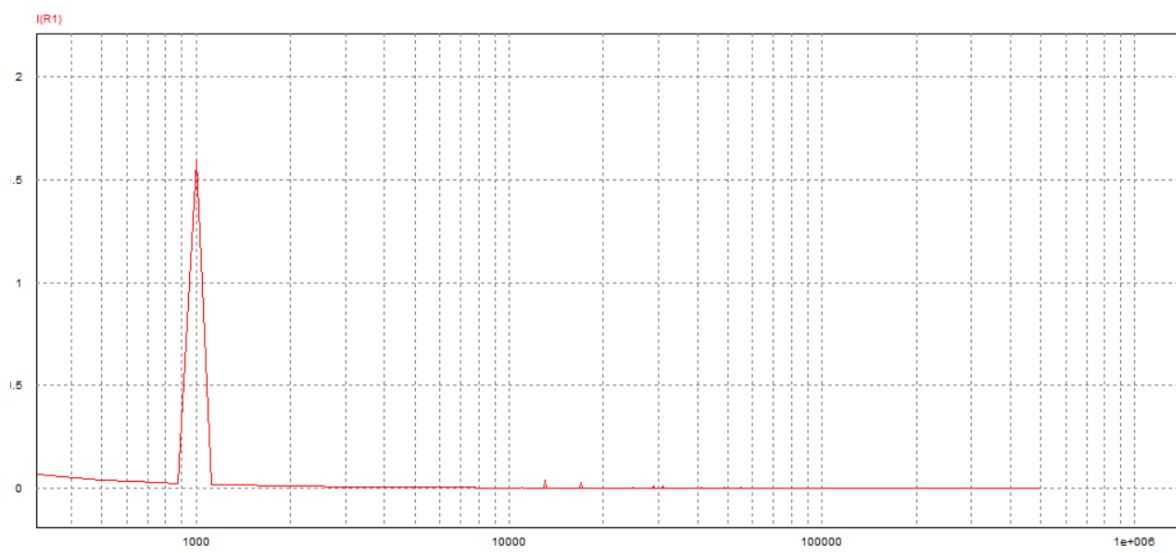
می شود که شکل موج جریان بسیار شبیه به یک سینوسی خالص است. این به دلیل نقش فیلترینگی است که بار سلفی روی شکل موج جریان دارد و هارمونیک اصلی را استخراج می کند. در این حالت THD جریان بار در حدود ۲ درصد است. برای دیدن عملکرد روش PWM در حالت تغییر دامنه ، دامنه موج سینوسی مرجع را نصف می کنیم. بدین ترتیب شکل (۱۵-۳) نشان دهنده شکل جریان خط هستند. ملاحظه می شود که که پارامتر m_a تاثیر خود را بر روی دامنه هارمونیک اصلی گذاشته است. دامنه جریان تقریباً نصف شده است. این قابلیت یک قابلیت کلیدی در روش PWM است.



شکل ۱-۱۵. مدولاسیون PWM - جریان خط در حالت $m_a = 0.5$

فصل ۳. شبیه سازی اینورتر سه فاز ■ ۳۳

اکنون به سراغ تحلیل فوریه جریان بار در حالت $m_a = 1$ می‌رویم. مطابق شکل (۱۶-۳) تحلیل فوریه شامل یک فرکانس اصلی در فرکانس یک کیلوهرتز با دامنه ۱,۵ آمپر و مولفه بعدی در فرکانس ۱۳ کیلوهرتز است! دامنه این مولفه ۴۰ میلی آمپر بوده و به وضوح برتری این روش بر روش مستقیم شش پله ای مشخص می‌شود. به این ترتیب در بخش بعدی این فصل مقایسه‌ای مختصر بین این دو روش انجام می‌دهیم.



شکل ۳-۱۶. مدولاسیون PWM - تحلیل فوریه جریان خط

۳-۴. مقایسه بین عملکرد اینورتر شش پله‌ای با اینورتر PWM

- (۱) هزینه : در این پارامتر هزینه تمام شده یک اینورتر شش پله‌ای به دلیل مدارات ساده تر و همچنین حجم کمتر مربوط به ساخت PCB کمتر از یک اینورتر شش پله‌ای خواهد بود. سوئیچ‌های فرکانس پایین تر نیز در کاهش هزینه نهایی موثر هستند.
- (۲) راندمان : در بحث راندمان پارامترهای زیادی می‌توانند دخیل باشند ولی به طور کلی با توجه به اینکه در روش شش پله‌ای فرکانس سوئیچینگ پایین تر است و تلفات سوئیچینگ کمتر است می‌توان گفت راندمان بالاتری در روش شش پله‌ای قابل حصول است.
- (۳) پیچیدگی مدارات : مدارات روش PWM به مراتب نیاز به طراحی دقیق تر و پیچیدگی‌های خاصی در زمینه پیاده سازی خواهند بود. چه به صورت آنالوگ و چه به صورت دیجیتال این پیچیدگی‌ها بسیار بیشتر از شش پله‌ای است. علاوه بر این در روش PWM پی‌سی‌بی مربوطه نیاز به دقت بیشتری در طراحی و ساخت دارد.

(۴) خلوص فرکانسی : خروجی روش PWM با استفاده از یک فیلتر مناسب بسیار به سینوسی خالص نزدیک تر است و دامنه هارمونیک های ولتاژ و جریان بسیار کمتر و فرکانس آنها دورتر از فرکانس اصلی است. به طور خلاصه THD بهتری خواهیم داشت که در بعضی از کاربردها یک نقطه قوت بزرگ است.

(۵) کنترل دامنه و فرکانس : در روش شش پله ای امکان کنترل فقط فرکانس وجود دارد. در روش PWM به سادگی دامنه با تغییر دامنه موج مرجع سینوسی تغییر می کند. این یک مزیت بزرگ بخصوص در بحث درایو موتورهای القایی است.

(۶) فیلتر خروجی : در روش PWM طراحی فیلتر ساده تر است زیرا مولفه های هارمونیکی خروجی در فرکانسهای دورتری نسبت به مولفه اصلی هستند نسبت به اینورتر شش پله ای. در نتیجه طراحی فیلتر ساده تر، ارزان تر و از درجه پایین تر امکان پذیر است.

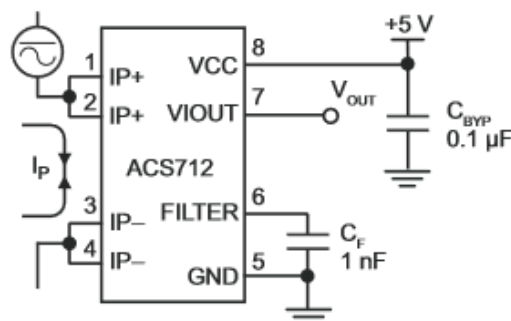
نتیجه : در کاربردهایی که هزینه ، ابعاد نهایی محصول و راندمان اهمیت دارد اینورتر شش پله ای انتخاب مناسبی است. در کاربردهایی که هدف داشتن یک سینوسی خالص با قابلیت کنترل دامنه و فرکانس است انتخاب یک اینورتر PWM مناسب به شمار می رود.

فصل ۴. محدود کننده جریان و ولتاژ

پس از توضیحاتی راجع به تئوری اینورترها، طراحی و شبیه سازی اکنون به مبحثی می پردازیم که در کیفیت نهایی یک اینورتر برای کاربر اهمیت زیادی دارد.

۴-۱. محدود کننده جریان خروجی

روشهای مختلفی برای محدود کردن جریان خروجی یک اینورتر سه فاز وجود دارد. در اینجا به توضیح روش استفاده از سنسور الکترونیکی می پردازیم. سنسور مورد بحث که متناسب با پروژه باید، سنسور جریان ACS712



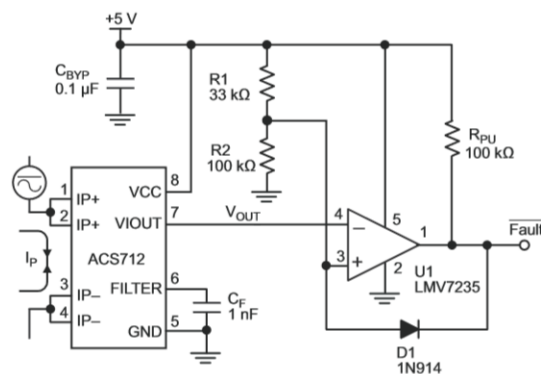
شکل ۴-۱. پایه های ACS712

است. این سنسور یک سنسور خطی اثر هال با ایزولاسیون ۲,۱ کیلوولت و مقاومت کم در مسیر عبور جریان است. به

دلیل کم نویز بودن مسیر عبور جریان و پهنای باند خوب، این سنسور در اندازه گیری دقیق جریانهای AC و DC بسیار عملکرد خوبی دارد. پایه های این سنسور در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.

این سنسور با خواندن جریان و تولید یک ولتاژ متناسب با آن در خروجی خود که به صورت خطی با افزایش و کاهش جریان تغییر می کند در بدست آوردن عدد جریان به ما کمک می کند. برای استفاده از این آیسی مداراتی در دیتاشیت پیشنهاد شده است که در برد قدرت این پروژه از همین مدارات استفاده می کنیم.

دو نوع مدار به صورت کلی داریم. مداری که پیک جریان را تشخیص دهد و عدد پیک را به ما بدهد. و دسته دومی مداراتی که علاوه بر تشخیص پیک آن را با یک مقدار آستانه نیز مقایسه کنند و علاوه بر Latch کردن خطای رخ داده، یک خروجی Fault را فعال سازی کنند. به کمک خواندن این خروجی می توانیم خطا را تشخیص داده و

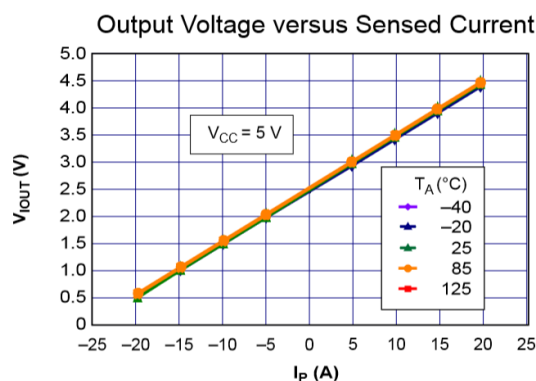


شکل ۴-۲. مدار تشخیص اضافه جریان

عملیات کلیدزنی را متوقف کنیم.

مدار مورد استفاده در این پروژه برای استفاده از این آیسی به صورت شکل (۴-۲) است. کارکرد مدار مطابق با منحنی های ارائه شده در دیتاشیت است که در شکل (۴-۳) نشان داده شده است. مطابق این منحنی در جریان ۲۰ آمپر ولتاژ خروجی در حدود ۴ ولت خواهد بود. در مدار مورد استفاده در حالت عادی ولتاژ پایه مثبت آپ امپ از تقسیم ولتاژ بین مقاومت ۳۳ کیلو اهم و ۱۰۰ کیلو اهم بدست می آید که حدود ۳,۷۵ ولت است و دیود خاموش است. به محض آنکه جریان از ۱۰ آمپر بیشتر شود، مطابق منحنی یک ولتاژ ۳,۱ ولت در خروجی سنسور خواهیم داشت. شتر از ۱۰ آمپر شود و این ولتاژ بیشتر از ۳,۷۵ شود خروجی آپ امپ به اشباع پایین یعنی صفر ولت رفته، دیود هم روشن شده و ولتاژی به اندازه ۰,۵ ولت روی پایه مثبت آپ امپ قرار می گیرد. به محض صفر شدن خروجی Fault باید آن را توسط آردوینو خوانده و عملیات کلیدزنی را قطع کنیم. این مدار به دلیل استفاده از دیود به شکل فوق مثل یک مدار لچ عمل کرده و تا زمانی که اضافه جریان برطرف نشود و تغذیه ۵ ولت هم قطع نشود خروجی تغییر نمی کند. حتی اگر پلاریته جریان عوض شود طبق منحنی ولتاژی کمتر از ۰,۵ عملاً قابل تولید نیست. و این مدار تا ابد لچ می ماند. استفاده از یک دیود با ولتاژ مستقیم کم در حد ۰,۴ ولت از الزامات طراحی این مدار است. همچنین بهتر است آپ

امپ بتواند ولتاژی نزدیک به صفر در خروجی تولید کند. با تغییر مقادیر R_1 و R_2 می توان سطح آستانه را برای این سنسور روی ۲۰ آمپر تنظیم کرد. با تشخیص Fault توسط آردوینو و صفر کردن فرکانس تولیدی مدار محافظت جریان عمل می کند.



شکل ۴-۳. منحنی ولتاژ جریان سنسور

۴-۲. محدود کننده ولتاژ خروجی

برای تنظیم ولتاژ خروجی نیز می توان از آیسی ها یا روش های دیگر استفاده کرد. یک مدار ساده آن است که در خروجی اینورتر یک آپ امپ قرار داده و خروجی اینورتر را توسط یک تقسیم مقاومتی نمونه برداری کرده و آن را به پایه مثبت آپ امپ وصل کنیم. بر روی پایه منفی یک ولتاژی برابر با آستانه موردنظر قرار دهیم. در صورت تجاوز کردن خروجی اینورتر از مقدار موردنظر، خروجی آپ امپ به اشباع بالا رفته و توسط میکروکنترلر ها قابل تشخیص و کنترل می شود.

۴-۳. طراحی محدود کننده جریان

به منظور داشتن محدود کننده جریان ۲۰ آمپری باید مقاومت های R_1 و R_2 را طوری انتخاب کنیم که ولتاژ حاصل از تقسیم مقاومتی حدودا ۴٫۵ ولت باشد. با انتخاب $R_1 = 12k$ و $R_2 = 100k$ این حالت نیز برآورده می شود. برای آپ امپ از یک مقایسه کننده LM311 استفاده می کنیم. دیود را نیز یک دیود شاتکی 1n914 انتخاب می کنیم. تغذیه آیسی نیز از طریق ۵ ولت برد آردوینو تامین می گردد. خازن بین پایه ۵ و ۶ نیز برای حذف نویز جریان ورودی است. با انتخاب مقدار مناسب می توان با توجه به پهنای باند موردنیاز اقدام به فیلتر کردن نویز جریان کرد. هایی در دیتاشیت آمده است که به عنوان مثال زمان صعود ولتاژ پایه خروجی سنسور نسبت به یک جریان پله ای با افزایش خازن، افزایش می یابد یا دامنه پیک تا پیک نویز با افزایش خازن کاهش می یابد. یک مقدار مناسب برای این خازن حدودا ۲٫۲ نانوفاراد است.

فصل ۵. ساخت اینورتر سه فاز شش پله ای

در این فصل به تشریح مراحل ساخت نمونه ای ساده از این پروژه که در فصل های دوم و سوم به طراحی و شبیه سازی آن پرداختیم ، می پردازیم. در پایان لینکی از سایت GitHub آورده شده که فایل های پی سی بی ، شماتیک و کد در آن وجود دارد و آن فایل ها را برای آنکه حجم گزارش زیاد نشود در اینجا نیاورده ایم. لازم به ذکر است که مدارات محدود کننده جریان و ولتاژ همچنین مدار فیلتر خروجی جزو اهداف ساخت این پروژه نبوده و توضیحات فصول گذشته در این باب در جهت طراحی کامل بوده است و نه استفاده از آن در ساخت.

۵-۱. معرفی بخش های مختلف PCB

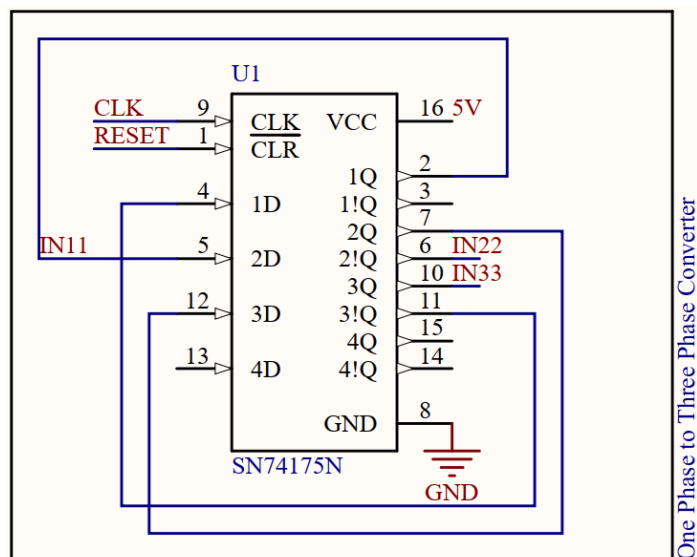
برای این پروژه یک هدف معین در ساخت ، ماژولار بودن به خصوص در ارتباط با برد آردوینو می باشد. به همین منظور دو برد با سایز مناسب یکی برای گیت درایو و تولید سیگنال که با نام برد درایور شناخته می شود و دیگری برای سوئیچ های قدرت با نام برد قدرت در نظر گرفته شده است. در طراحی این دو برد سعی بر آن بوده است که سایز کوچکی داشته باشند و همچنین پای های مربوط به تغذیه های برد ، پایه های کنترلی و... به صورت ساده و منظمی در آورده شوند. علاوه بر این در طراحی این PCB ها سعی شده است که اصول کلی درباره برد های سوئیچینگ رعایت شود.

۵-۲. برد سیگنال^۱

این برد دارای بخش های مختلفی است که در شکل های (۵-۱) ، (۵-۲) ، (۵-۳) ، (۵-۴) ، (۵-۵) و (۵-۶) آورده شده است. این بخش ها قبلا به طور مفصل در فصل دوم شرح داده شده اند. شکل (۵-۱) مدار تولید پالس های مربعی

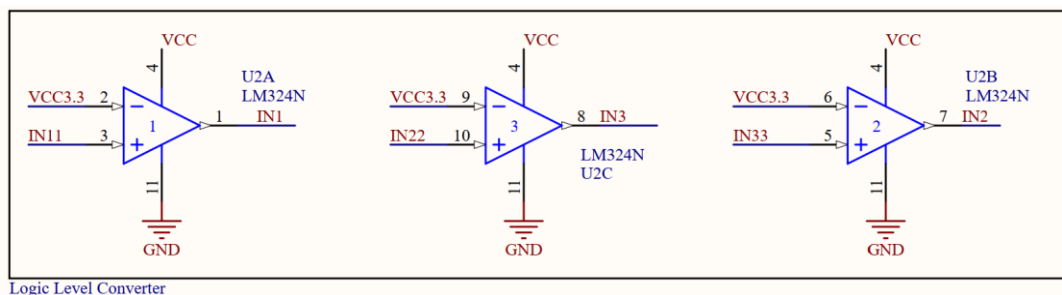
^۱Signal Board

سه فاز از روی یک پالس مرجع (آردوینو) را نشان می دهد. این مدار با آیسی ۷۴۱۷۵ ساخته شده است. تغذیه آیسی



شکل ۵-۱. مدار تولید پالس های مربعی سه فاز با DFF

توسط تغذیه ۵ ولتی برد آردوینو تامین می شود. دو پایه ۹ و ۱ آیسی نیز که به ترتیب پایه های کلاک و ریست آن هستند توسط به برد آردوینو متصل می شوند. خروجی های این بخش با نام های IN11، IN22 و IN33 مشخص



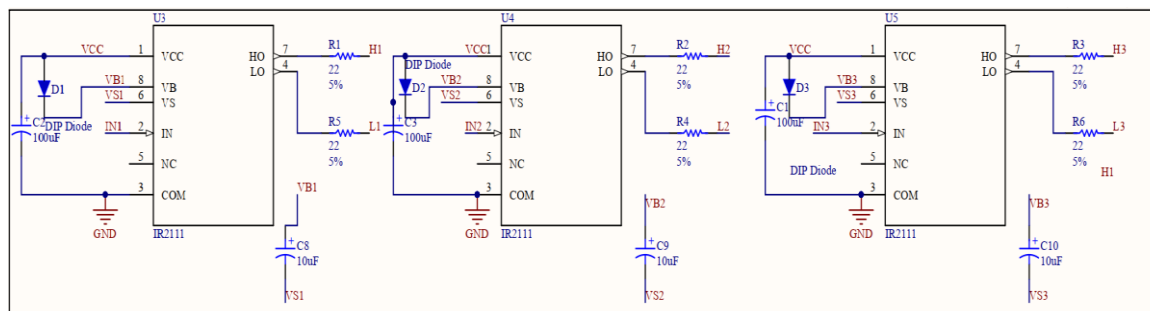
Logic Level Converter

شکل ۵-۲. مدار مبدل سطوح منطقی

شده اند که توسط مدار مبدل سطوح منطقی نشان داده شده در شکل (۲-۵) سطح منطقی این پالس ها از صفر تا پنج ولت به صفر تا مقدار VCC که همان تغذیه مدار گیت درایو و مدار قدرت است تبدیل می شود. آپ امپ های مورد استفاده از نوع LM324 بوده و تغذیه آنها با تغذیه گیت درایو مشترک هستند. لازم بذکر است که تغذیه گیت درایو و مدار قدرت می توانند از هم جدا باشند. ولتاژ مرجع ۳,۳ ولتی پایه های آپ امپ ها از طریق آردوینو تامین می گردد ولی به دلیل تفاوت هایی که در خروجی آیسی ۷۴۱۷۵ وجود دارد و ممکن است خروجی آن به سطح ۳,۳ ولت نرسد ، احتمالاً باید به جای تغذیه ۳,۳ که از بیرون برای کاربر امکان تغییر آن وجود دارد ، یک مرجع ولتاژ با مقدار حدوداً ۱ ولت بسازیم.

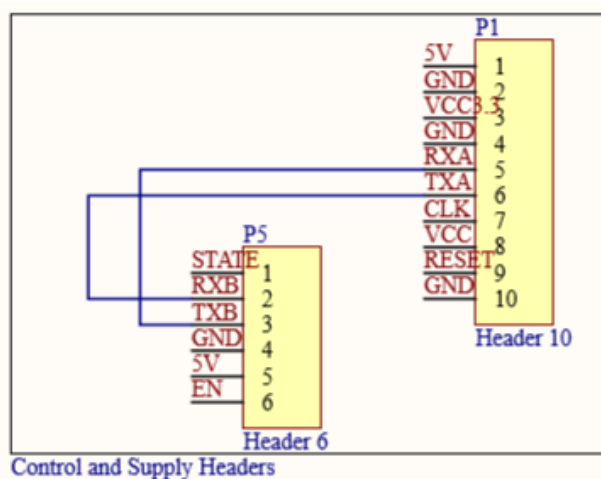
فصل ۵. ساخت اینورتر سه فاز شش پله ای ■ ۴۱

سیس خروجی آپ امپ ها به پایه های گیت درایو نشان داده شده در شکل (۵-۳) متصل می شوند. مدار گیت درایو شامل یک سری اتصالات ، دیود و خازنهایی می شود که در شکل مربوطه نمایش داده شده است. این مدار همان مدار دیتاشیت آیسی است. ملاحظه می شود که خازن های ۱۰ میکروفاراد به منظور بوت استرپ استفاده شده اند. همچنین



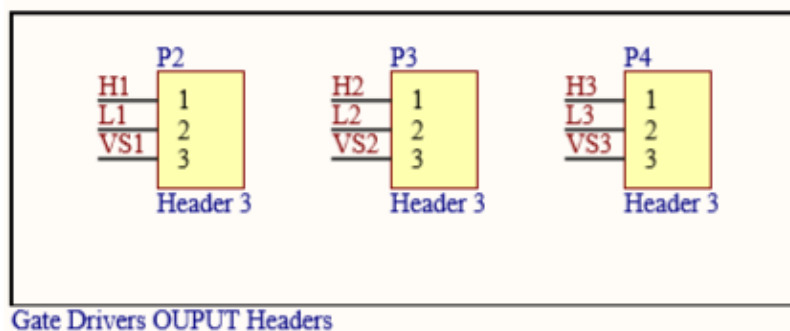
شکل ۵-۳. مدار گیت درایو با آیسی IR2111

هر آیسی یک خازن روی تغذیه خود دارد. علاوه بر این مقاومت های ۲۲ اهمی در هر دو خروجی آیسی وجود دارد. در انتخاب خازن ، خازنهایی با ولتاژ پایین در حدود ۲۵ ولت و در انتخاب مقاومت مقاومت های یک چهارم وات انتخاب شده اند. علاوه بر این در برد نهایی خازنهای عدسی ۱۰۰ نانوفاراد موازی خازن های ۱۰۰ میکروفارادی تغذیه آیسی وجود دارد.



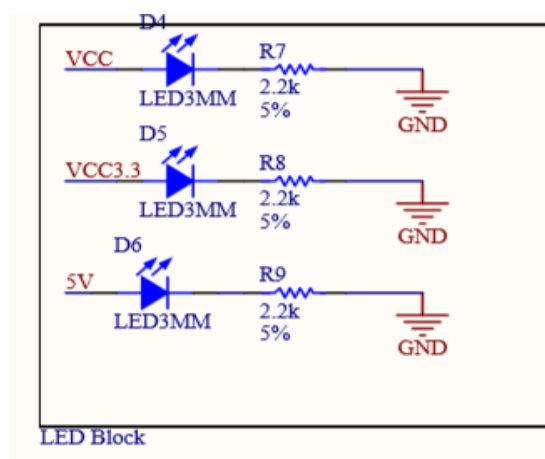
شکل ۵-۴. هدرهای کنترل ، تغذیه و بلوتوث

در شکل (۵-۴) نیز پایه های تغذیه شامل تغذیه ۵ ولت ، ولتاژ مرجع (تغذیه ۳٫۳ ولت) ، تغذیه گیت درایو (با نام VCC) و تعدادی پایه زمین (GND)، پایه های مربوط به پورت سریال آردوینو ، پایه های مربوط به کلاک و ریست آیسی ۷۴۱۷۵ آورده شده اند. در شکل (۵-۴) یک هدر مخصوص بلوتوث قرار هم وجود دارد. این هدر مخصوص بلوتوث مدل HC-05 بوده که در سمت چپ شکل مذکور قرار گرفته است.



شکل ۵-۵. هدرهای خروجی گیت درایو

در شکل (۵-۵) هدر مربوط به خروجی های گیت درایو وجود دارد که مستقیماً به برد قدرت متصل می‌شود. در شکل (۵-۶) نیز تعدادی LED برای نمایش وجود یا عدم وجود تغذیه بخش های مختلف و تست مدار قرار دارد.

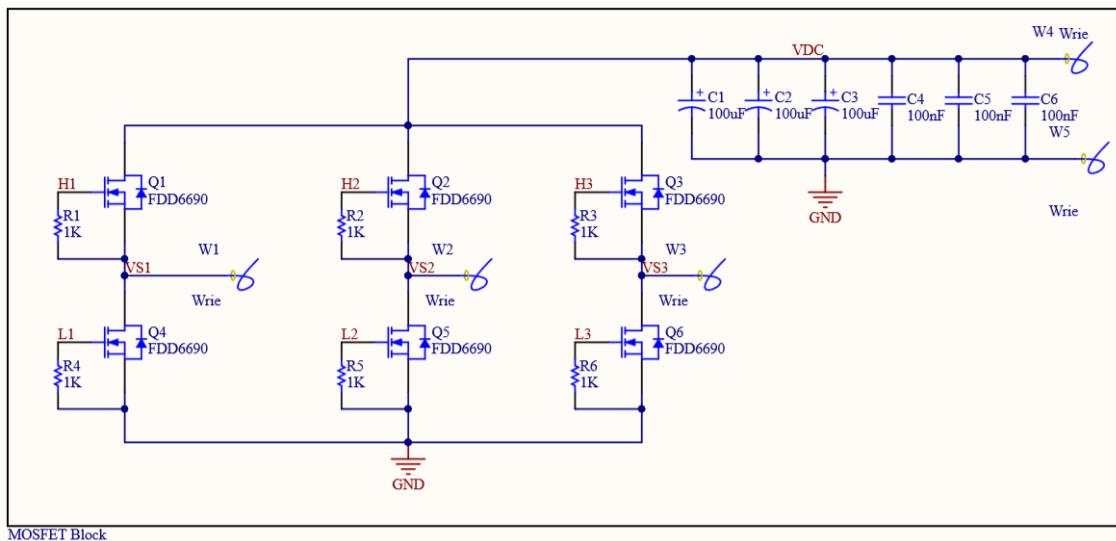


شکل ۵-۶. ال ای دی های نشانگر

نحوه دسترسی به پی سی بی مربوطه در بخش ۴-۵ شرح داده شده است. این پی سی بی یک پی سی بی دو رو بوده و سعی شده است در چیدمان پی سی بی، عرض مسیرها و فاصله بین مسیرها نکات مربوطه رعایت گردد تا میزان نویز، تاخیر و دیگر اشکالات به حداقل برسد و پالس های مناسبی به برد قدرت ارسال شود. این پی سی بی سعی شده است تا حد امکان کوچک باشد و توسط هدرهای کناری به راحتی توسط کاربر راه اندازی شود.

۵-۳. برد قدرت

این برد شامل سوئیچ ها، خازن های مربوط به هر شاخه، هدر تغذیه و زمین و مقاومت بین گیت سورس می‌باشد. مدار طراحی شده در شماتیک آلثیوم به صورت شکل (۵-۷) است. ملاحظه می‌شود که تعداد سه عدد خازن الکترولیتی قرار داده شده است که در عمل ۱۰۰ میکروفاراد هستند و برای هر شاخه یک خازن. همچنین موازی خازن هر شاخه یک خازن عدسی ۱۰۰ نانوفاراد هم قرار داد که بتواند جریان دهی بهتری داشته باشد و نویزهای فرکانس

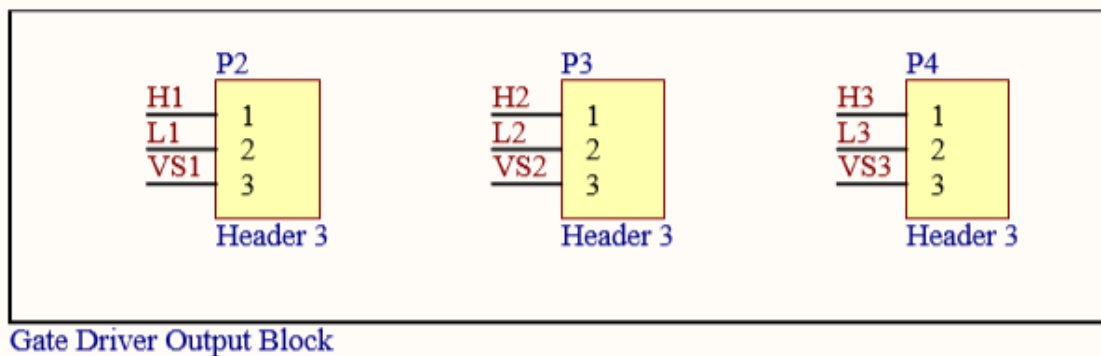


شکل ۵-۷. بلوک ماسفت

بالا نیز با این ترکیب کاهش پیدا کند. در شکل (۵-۸) نیز هدرهایی را می بینیم که از برد درایور به این برد قدرت متصل می شوند. نحوه دسترسی به پی سی بی مربوطه در بخش ۴-۵ توضیح داده شده است. این پی سی بی طراحی نسبتاً پیچیده تری دارد. مسیرهای این پی سی بی باید عرض بسیار زیادی داشته باشند که بتوانند جریان دهی بیشتری انجام دهند. همچنین فاصله بین مسیرها نیز مهم تر از پی سی بی سیگنال است. سعی شده است المان ها بسیار نزدیک به یکدیگر باشند و طول مسیرها بسیار کوتاه باشد به این ترتیب مقاومت و سلف مسیرها کم شده و در بهبود کلیدزنی نقش مهمی ایفا می کنند. ترک های مربوط به VCC و زمین مدار نیز عرض بسیار بیشتری داشته و سطح بزرگتری از پی سی بی را اشغال کرده اند. همچنین سعی شده تا جای ممکن از VIA استفاده نشود.

۴-۵. دسترسی به فایل های پروژه

به منظور تحقق هدف متن باز بودن پروژه به عنوان یک ماژول برای آردوینو و برای دسترسی به فایل های پروژه اعم از کد، شماتیک آلتیوم و فایل پی سی بی، عکسهایی از نمونه ساخته شده مدار و نسخه پی دی اف همین گزارش می توانید به سایت GitHub مراجعه کنید. لینک مربوطه در زیر آورده شده است.



شکل ۵-۸. هدرهای خروجی گیت درایور

مراجع

1. Millman.j and Taub.H, "*Pulse, Digital And Switching Waveforms*" McGraw-Hill Education 1985
2. Daniel.W.Hart, "*Power Electronics*" 1st ed., McGraw-Hill Education, 2010
3. R.W.Erickson and D.Maksimovi'c, "*Fundamentals of Power Electronics*", 2nd ed., Kluwer Academic, 2001