

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی

کنترل دما در گرم کن القایی با استفاده از FPGA در اینورتر، طراحی و ساخت

نگارنده :

سعید بابوئی

استاد راهنما :

دکتر علی دستفان

استاد مشاور :

دکتر سید علی سلیمانی ایوری

بهمن ۱۳۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی برق و رباتیک

گروه : قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سعید بابویی

تحت عنوان: کنترل دما در گرم کن القایی با استفاده از FPGA در اینورتر،
طراحی و ساخت

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد
مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

| امضاء | استاد مشاور | امضاء | استاد راهنما |
|-------|--|-------|---|
| | نام و نام خانوادگی : دکتر سید علی سلیمانی ایوری | | نام و نام خانوادگی : دکتر علی دستفان |

| امضاء | نماینده تحصیلات تکمیلی | امضاء | اساتید داور |
|-------|---|-------|--|
| | نام و نام خانوادگی : دکتر یاسر دامچی | | نام و نام خانوادگی : دکتر مهدی بانژاد |
| | | | نام و نام خانوادگی : دکتر عماد ابراهیمی |
| | | | نام و نام خانوادگی : |
| | | | نام و نام خانوادگی : |

تقدیم بہ:

پدر و مادر

و خواہر عزیزم

پروردگارا!

نه می توانم موایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دست های پینه بسته شان که

شمره ی تلاش برای پیشرفت من است، مرهمی دارم. پس توفیقم ده تا قدر تک تک لحظه های

بودن در کنارشان را بدانم و بتوانم گوشه ای از فداکاری هایشان را جبران نمایم.

تقدیر و تشکر :

بی‌شک انجام این پایان‌نامه بدون حمایت‌های دلسوزانه و راهنمایی‌های راهبردی اساتید عزیزم جناب آقای دکتر دستفان و جناب دکتر سید علی سلیمانی ایوری ممکن نبود پس بر خود لازم می‌دانم تشکر صمیمانه‌ی خود را خدمت ایشان ابراز نمایم و برای ایشان سلامتی و موفقیت و سرفرازی‌های روزافزون را از پروردگار منان مسئلت نمایم .

همچنین از دوستان و تمام کسانی که در این دوره از محبت و حمایت آنها برخوردار شدم و لحظات بسیار خوشی را در کنار آنان سپری کردم تشکر ویژه می‌نمایم و امیدوار در هر جای گیتی که هستند شاد و سلامت باشند و مدارج ترقی را یک‌به‌یک پشت سر گذاشته و باعث شادی و سرفرازی برای خود و کشور عزیزمان شوند .

تعهدنامه

اینجانبسعید بابوئی..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشتهمهندسی برق / قدرت..... دانشکدهمهندسی برق و رباتیک..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کنترل دما در گرم کن القایی با استفاده از FPGA در اینورتر طراحی و ساخت.... تحت راهنمای...دکتر علی دستفان...متعهد می شوم .

- ♦ تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- ♦ در استفاده از نتایج پژوهش محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است .
- ♦ مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- ♦ حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- ♦ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

یکی از کاربردهای انرژی الکتریکی، تولید گرما به وسیله‌ی آن است. دلیل استفاده از انرژی الکتریکی برای تولید گرما دسترسی آسان، پاکیزگی، ایمنی بالا و سرعت بالا در تولید گرما برای کاربردهای پزشکی، خانگی و صنعتی می‌باشد. یکی از دلایلی که باعث می‌شود استفاده از انرژی الکتریکی برای تولید گرما مقرون به صرفه نباشد بازده پایین این سیستم‌ها است. روش تولید گرما به وسیله القایی الکترومغناطیسی علاوه بر مزایای فوق بازده بالاتری نسبت به روش‌های دیگر تولید گرما به وسیله الکتریسیته دارد. به مدد پیشرفت روزافزون ادوات الکترونیک قدرت و کاهش قیمت این وسایل استفاده از روش گرمایش القایی در صنعت و وسایل آشپزی نسبت به گذشته محبوب‌تر شده و در حال گسترش می‌باشد. در این پایان‌نامه یک سیستم گرمایش القایی با استفاده از FPGA طراحی و ساخته شده و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. در این سیستم از یک حسگر مادون قرمز برای اندازه‌گیری دمای جسم مورد نظر استفاده شده و الگوریتمی برای کنترل دمای آن ارائه شده است. همچنین یک مدولاتور برای انجام کلید زنی اینورتر در کاربردهای گرمایش القایی بر پایه FPGA ارائه شده است. برای کاستن از فشار کلید زنی به دلیل فرکانس بالای اینورتر، در این پایان‌نامه از روش کلید زنی ولتاژ صفر استفاده شده است. مدولاتور طراحی شده بر پایه FPGA قابلیت تنظیم زمان مرده و فرکانس مورد نیاز کلید زنی نرم برای کاربردهای گرمایش القایی را دارا می‌باشد. در پایان نتایج عملی از سیستم ساخته شده آورده شده و با نتایج شبیه‌سازی آن مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: گرمایش القایی، FPGA، اجاق القایی، طراحی مدولاتور، آردوینو، کنترل دما، روش هیستریزس در کنترل دما، اندازه‌گیری دما به روش مادون قرمز، مدولاتور بر پایه FPGA

فهرست مطالب

| | |
|---|----|
| فصل ۱ : مقدمه..... | ۱ |
| ۱-۱- هدف پژوهش..... | ۳ |
| ۲-۱- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه..... | ۴ |
| فصل ۲ : مروری بر گرمایش القایی..... | ۵ |
| ۱-۱- ساختار یک سیستم گرمایش القایی..... | ۶ |
| ۱-۱-۱- منبع تغذیه AC..... | ۶ |
| ۲-۱-۱- فیلتر EMC..... | ۷ |
| ۳-۱-۱- یکسوسازها و فیلتر..... | ۸ |
| ۴-۱-۱- اینورتر..... | ۹ |
| ۵-۱-۱- القاگر و بار..... | ۱۱ |
| ۲-۲- اینورترهای تشدیدی مورد استفاده در گرمایش القایی..... | ۱۳ |
| ۲-۲-۱- اینورترهای منبع جریان..... | ۱۴ |
| ۳-۲-۱- اینورترهای منبع ولتاژ..... | ۱۷ |
| ۴-۲-۱- کلید زنی نرم و کلید زنی سخت..... | ۲۱ |
| ۵-۲-۱- کلید زنی جریان صفر..... | ۲۴ |
| ۶-۲-۱- کلید زنی ولتاژ صفر..... | ۲۵ |
| ۳-۲- کنترل گرم‌کن القایی..... | ۲۸ |
| ۴-۲- اندازه‌گیری و کنترل دما..... | ۳۰ |
| ۵-۲- مزایای استفاده از گرمایش القایی..... | ۳۱ |
| ۱-۵-۲- سرعت بالا در ایجاد حرارت..... | ۳۲ |
| ۲-۵-۲- بازده بالا..... | ۳۲ |
| ۳-۵-۲- کنترل حرارت..... | ۳۲ |
| ۴-۵-۲- پاکیزگی و امنیت بالا..... | ۳۲ |
| ۶-۲- کاربردهای گرمایش القایی..... | ۳۳ |
| ۱-۶-۲- کاربردهای صنعتی..... | ۳۳ |
| ۲-۶-۲- کاربردهای خانگی..... | ۳۵ |
| ۳-۶-۲- کاربردهای پزشکی..... | ۳۶ |
| فصل ۳ : مروری بر تراشه‌های FPGA و کاربرد آن‌ها در الکترونیک قدرت..... | ۳۹ |
| ۱-۳- سخت‌افزارهای برنامه پذیر..... | ۴۰ |
| ۱-۱-۳- حافظه‌های فقط خواندنی قابل برنامه ریزی..... | ۴۱ |
| ۲-۱-۳- ادوات منطقی برنامه پذیر (PLD)..... | ۴۲ |
| ۳-۱-۳- آرایه منطقی برنامه میدانی (FPGA)..... | ۴۴ |
| ۲-۳- مروری بر کارهای انجام شده بر اساس FPGA در الکترونیک قدرت..... | ۴۸ |
| فصل ۴ : طراحی مبدل و مراحل ساخت..... | ۵۱ |

| | |
|----|-----------------------------|
| ۵۲ | ۱-۴- الفاگر و بار |
| ۵۸ | ۲-۴- مدار تشدید |
| ۶۱ | ۳-۴- اینورتر |
| ۶۳ | ۴-۴- حسگر و کنترل دما |
| ۶۳ | ۱-۴-۴- حسگر دما |
| ۶۸ | ۲-۴-۴- الگوریتم کنترل دما |
| ۷۰ | ۵-۴- مدولاتور و FPGA |
| ۷۵ | ۶-۴- بلوک دیاگرام کلی سیستم |

فصل ۵: نتایج شبیه‌سازی و ساخت..... ۷۹

| | |
|----|--|
| ۸۰ | ۱-۵- نتایج شبیه‌سازی و عملی مدولاتور |
| ۸۴ | ۲-۵- نتایج شبیه‌سازی و ساخت اینورتر |
| ۸۷ | ۲-۲-۵- بررسی حالت کلید زنی نرم |
| ۹۱ | ۳-۲-۵- نتایج آزمایشگاهی اینورتر |
| ۹۵ | ۳-۵- تغییرات دمای بار و نتایج عملکرد کنترل‌کننده |

فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۱۰۳

| | |
|-----|-----------------|
| ۱۰۴ | ۱-۶- نتیجه‌گیری |
| ۱۰۵ | ۲-۶- پیشنهادها |
| ۱۰۶ | مراجع |

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: بلوک دیاگرام کلی یک سیستم گرمایش القایی..... ۶
- شکل ۲-۲: یک نمونه فیلتر EMI با دو سلف تزویج شده..... ۸
- شکل ۳-۲: ساختار یک سیستم یکسو ساز PFC مناسب برای اجاق القایی..... ۹
- شکل ۴-۲: ساختار اینورتر های مورد استفاده در گرمایش القایی (الف) ساختار نیم پل، (ب) ساختار پل کامل، (ج) ساختار تک کلید، ساختار چند کویله..... ۱۰
- شکل ۵-۲: مسیر شار مغناطیسی در دو کویل با هندسه‌ی مختلف..... ۱۱
- شکل ۶-۲: مدار معادل سری القاگر - قطعه کار برای تحلیل گرمایش القایی..... ۱۱
- شکل ۷-۲: (الف) مدار تشدید سری، (ب) مدار تشدید موازی..... ۱۴
- شکل ۸-۲: آنالیز بود برای H_{pw} برای سه مقدار متفاوت Q و فرکانس طبیعی میرا نشده ۱۰۰ کیلوهرتز..... ۱۶
- شکل ۹-۲: اینورتر تشدید منبع جریان با بار تشدید موازی و سلف ورودی..... ۱۷
- شکل ۱۰-۲: نودار بود مدار RLC سری به ازای مقادیر مختلف ضریب کیفیت..... ۱۹
- شکل ۱۱-۲: اینورتر منبع ولتاژ با بار تشدید سری..... ۲۰
- شکل ۱۲-۲: جریان و ولتاژ کلیدها به ازای (الف) فرکانس کلیدزنی بالاتر از فرکانس تشدید، (ب) فرکانس کلیدزنی برابر فرکانس تشدید، (ج) فرکانس کلیدزنی پایین تر از فرکانس تشدید..... ۲۱
- شکل ۱۳-۲: تلفات کلیدزنی ایجاد شده در اثر کلیدزنی سخت..... ۲۲
- شکل ۱۴-۲: نواحی امن برای انجام عملیات کلیدزنی در سه حالت با کلیدزنی سخت - با اسنابر و کلیدزنی نرم..... ۲۳
- شکل ۱۵-۲: اینورتر تکفاز نیم پل با بار تشدید سری..... ۲۴
- شکل ۱۶-۲: شکل جریان در بار در حالت کلیدزنی جریان صفر..... ۲۴
- شکل ۱۷-۲: شکل جریان بار در حالت کلیدزنی ولتاژ صفر..... ۲۵
- شکل ۱۸-۲: حالت اول کلید S_0 روشن و S_1 خاموش است..... ۲۶
- شکل ۱۹-۲: حالت ۲ که دو کلید خاموش است و جریان از طریق دیود S_1 جاری است..... ۲۶
- شکل ۲۰-۲: حالت ۳ که S_0 خاموش و S_1 روشن است..... ۲۷
- شکل ۲۱-۲: حالت ۴ که در کلید خاموش است و جریان از طریق دیود S_0 جاری است..... ۲۷
- شکل ۲۲-۲: بازده روش های مختلف کلیدزنی در برابر توان [۳]..... ۲۹
- شکل ۲۳-۲: تغییرات مقدار اندوکتانس در برابر تغییرات دما..... ۳۰
- شکل ۲۴-۲: موارد استفاده از ادوات نیمه رسانا توان و فرکانس کاری..... ۳۴
- شکل ۲۵-۲: مقایسه بازده در ورش های مختلف تولد گرما برای آشپزی..... ۳۵
- شکل ۱-۳: ساختار یک افزاره‌ی منطقی برنامه پذیر ساده..... ۴۳
- شکل ۲-۳: ساختار یک ماکرو سل از CPLD های خانواده XC95XX شرکت Xilinx..... ۴۴
- شکل ۳-۳: ساختار کلی تراشه های FPGA..... ۴۵
- شکل ۴-۳: معماری CLB های سری Spartan3 شرکت Xilinx..... ۴۶
- شکل ۵-۳: مدولاتور پیاده سازی شده در مرجع..... ۴۸
- شکل ۱-۴: القاگر مورد استفاده برای گرم کن القایی..... ۵۴
- شکل ۲-۴: شکل هندسی مسئله پیاده سازی شده در نرم افزار اجزاء محدود..... ۵۴
- شکل ۳-۴: توان حرارتی منتقل شده به بار به ازای فرکانس و جریان های مختلف..... ۵۵
- شکل ۴-۴: مقدار مقاومت معادل به ازای فرکانس های مختلف..... ۵۶
- شکل ۵-۴: تغییر میزان اندوکتانس نسبت به تغییر فرکانس..... ۵۶
- شکل ۶-۴: بازده سیم پیچ به ازای بارهای مختلف در برابر فرکانس..... ۵۷
- شکل ۷-۴: مدار تشدید سری به کار رفته در مدار گرم کن القایی..... ۵۸

- شکل ۴-۸: بانک خازنی به کار رفته در پروژه..... ۶۱
- شکل ۴-۹: برد اینورتر استفاده شده در پروژه‌ی گرمایش القایی..... ۶۲
- شکل ۴-۱۰: مدار حفاظت اینورتر در برابر اضافه جریان..... ۶۳
- شکل ۴-۱۱: حسگر دمای MLX90614..... ۶۵
- شکل ۴-۱۲: شماتیک مدار حسگر و برد میکروکنترلر..... ۶۶
- شکل ۴-۱۳: فلوجارت برنامه نوشته شده برای خواندن اطلاعات حسگر..... ۶۷
- شکل ۴-۱۴: تغییرات دما با اعمال روش کنترلی هیستریزیسی..... ۶۹
- شکل ۴-۱۵: برنامه نوشته شده برای انجام الگوریتم کنترل دما..... ۷۰
- شکل ۴-۱۶: یک دوره کلید زنی با زمان‌های مرده برای استفاده در گرمایش القایی..... ۷۱
- شکل ۴-۱۷: بلوک مدولاتور طراحی شده برای کاربرد گرمایش القایی..... ۷۲
- شکل ۴-۱۸: شکل ۴-۱-۱ شماتیک مدولاتور پیشنهادی بر پایه FPGA..... ۷۴
- شکل ۴-۱۹: بلوک دیاگرام کلی سیستم..... ۷۶
- شکل ۴-۲۰: سیستم ساخته شده در آزمایشگاه..... ۷۷
- شکل ۵-۱: نتایج شبیه سازی مدولاتور طراح شده با FPGA (الف) فرکانس کلیدزنی ۲۰ کیلو هرتز و زمان مرده ۱ میکرو ثانیه، (ب) فرکانس کلیدزنی ۳۰ کیلو هرتز و زمان مرده ۱ میکرو ثانیه، (ج) فرکانس کلیدزنی ۴۰ کیلو هرتز و زمان مرده ۱ میکرو ثانیه، (د) فرکانس کلیدزنی ۴۰ کیلو هرتز و زمان مرده ۵ میکرو ثانیه، (ه) فرکانس کلیدزنی ۵۰ کیلو هرتز و زمان مرده ۱ میکرو ثانیه..... ۸۱
- شکل ۵-۲: نتایج آزمایشگاهی حاصل از پیاده سازی مدولاتور طراحی شده بر روی FPGA (الف) فرکانس کلیدزنی ۲۰ کیلوهرتز زمان مرده ۱ میکرو ثانیه، (ب) فرکانس کلیدزنی ۳۰ کیلوهرتز زمان مرده ۱ میکرو ثانیه، (ج) فرکانس کلیدزنی ۴۰ کیلوهرتز زمان مرده ۱ میکرو ثانیه، (د) فرکانس کلیدزنی ۴۰ کیلوهرتز زمان مرده ۵ میکرو ثانیه،..... ۸۳
- شکل ۵-۳: اینورتر شبیه سازی شده در نرم افزار ANSYS Simpler..... ۸۵
- شکل ۵-۴: شکل جریان بار و ولتاژ کولکتور امیتر به ازای فرکانس های مختلف..... ۸۶
- شکل ۵-۵: شبیه سازی اینورتر بدون در نظر گرفتن مدار تشدید..... ۸۸
- شکل ۵-۶: ولتاژ گیت IGBT در برابر ولتاژ کلکتور- امیتر آن..... ۸۹
- شکل ۵-۷: جریان کلید در برابر ولتاژ آن در حالت تشدید..... ۹۰
- شکل ۵-۸: جریان بار در برابر ولتاژ بار..... ۹۰
- شکل ۵-۹: جریان بار در برابر ولتاژ بار در فرکانس ۳۰ کیلو هرتز..... ۹۱
- شکل ۵-۱۰: ولتاژ گیت-امیتر (خط صاف) در برابر ولتاژ کلکتور امیتر (نقطه چین) در شبیه سازی با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز..... ۹۲
- شکل ۵-۱۱: ولتاژ کلکتور امیتر (VCE) در برابر ولتاژ گیت امیتر (VGE) کلید قدرت در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در آزمایشگاه..... ۹۳
- شکل ۵-۱۲: جریان بار در فرکانس ۴۰ کیلو هرتز در شبیه سازی..... ۹۳
- شکل ۵-۱۳: شکل جریان بار اینورتر در آزمایشگاه در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز..... ۹۴
- شکل ۵-۱۴: جریان بار در اینورتر با فرکانس ۵۰ کیلوهرتز..... ۹۴
- شکل ۵-۱۵: برش عرض سیستم که شامل بار، شیشه و القاگر است..... ۹۵
- شکل ۵-۱۶: محل قرار گیری حسگر دما..... ۹۶
- شکل ۵-۱۷: محل قرار گیری حسگر دما در آزمایشگاه..... ۹۷
- شکل ۵-۱۸: نمودارهای آزمایشگاهی تغییرات دما بر اساس فرکانس کلیدزنی در جریان ثابت ۲ آمپر. الف) ۳۰ کیلوهرتز - ب) ۴۰ کیلوهرتز - ج) ۵۰ کیلوهرتز - د) ۶۰ کیلوهرتز..... ۹۸
- شکل ۵-۱۹: تغییرات دمای بار در شرایط فرکانس کلیدزنی ۴۰ کیلوهرتز، جریان ۲ آمپر و در نظر گرفتن ۱ دجه سانتیگراد برای حد بالا و پایین تغییرات دما در کنترل کننده..... ۹۹
- شکل ۵-۲۰: تغییرات دمای بار با در نظر گرفتن مقدار ۰/۵ درجه سانتیگراد به عنوان حد بالا و پایین..... ۱۰۰

شکل ۵-۲۱ : تغییرات دمای بار با دو مقدار مرجع..... ۱۰۱

فهرست جداول

| | | | |
|----------|--|-------|----|
| جدول ۱-۳ | : مشخصات فنی CPLD های خانواده XC95XX شرکت Xilinx | | ۴۳ |
| جدول ۱-۴ | : پارامترهای القاگر مورد استفاده قرار گرفته | | ۵۳ |
| جدول ۲-۴ | : امکانات سخت افزاری استفاده شده بعد از سنتز طرح | | ۷۵ |
| جدول ۱-۵ | : مقادیر شبیه سازی شده برای فرکانس و زمان مرده | | ۸۰ |
| جدول ۲-۵ | : مشخصات سیستم مورد مطالعه برای شبیه سازی | | ۸۵ |

فصل ۱ : مقدمه

پس از کشف الکتریسیته و توسعه‌ی آن کاربردهای متنوعی برای استفاده از این انرژی ارائه گردید. یکی از کاربردهایی که از بدو ظهور الکتریسیته مورد توجه قرار گرفت تبدیل آن به گرما بود. عبور جریان الکتریکی از یک رسانای دارای مقاومت الکتریکی غیر صفر باعث ایجاد تلفات اهمی شده که به صورت گرما ظاهر می‌شود. از گرمای به وجود آمده می‌توان برای مصارف خانگی، صنعتی و پزشکی استفاده کرد. این ساده‌ترین روش تولید گرما به وسیله‌ی الکتریسیته است ولی دارای معایبی از جمله بازده پایین، ایمنی کم و مهم‌تر از همه نیاز به اتصال بین هادی و جسم مورد نظر می‌باشد. به دلیل ساختار ساده‌ی این گونه دستگاه‌ها و کنترل آسان بر روی خروجی، استفاده از آن‌ها مرسوم است. در نوامبر سال ۱۸۳۱ مایکل فارادی دو سیم‌پیچ را بر روی یک هسته‌ی آهنی پیچید و مشاهده کرد عبور جریان الکتریکی از یکی از سیم‌پیچ‌ها باعث القای ولتاژ بر روی دیگری می‌شود. این آغازی بر تحقیقات درباره‌ی القای الکترومغناطیسی بود. تا نیمه‌ی دوم قرن ۱۹ و استفاده از این فناوری در ذوب کردن فلزات، کاربرد عملی القا برای گرم کردن رساناهای الکتریکی کشف نشده بود. بعد از آن فرانتی، کلبی و کجلین کوره‌ی ذوب القایی با بوته‌ی غیر تماسی را توسعه دادند. در نیمه‌ی ابتدایی قرن بیستم از کوره‌های القایی جهت ذوب و نرم کردن فلزات استفاده می‌شد.

در سال‌های اخیر استفاده از روش گرم کردن به وسیله‌ی القای الکترومغناطیسی توسعه پیدا کرده و به یکی از محبوب‌ترین روش‌ها برای تبدیل انرژی الکتریکی به گرما در حوزه‌های خانگی، پزشکی و صنعتی تبدیل شده است. گرمایش القایی^۱ باعث گرم شدن سریع و غیر تماسی مواد رسانا با بازدهی بالا می‌شود. به دلیل مزایای ذکر شده اخیراً این فناوری بر روش‌های سنتی مانند گرم کردن به وسیله‌ی شعله، گرم کردن به روش مقاومتی و بقیه روش‌های قدیمی ترجیح داده می‌شود.

اصلی‌ترین قسمت یک گرم‌کن القایی را مبدل‌های الکترونیک قدرت تشکیل می‌دهند. این مبدل‌های جریان متناوب، شار مغناطیسی متناوب را که لازمه‌ی به وجود آمدن تلفات جریان فوکو و به تبع آن به وجود آمدن گرمایش القایی است، تولید می‌کنند. یکی از چالش‌های پیش رو در به کارگیری مبدل‌های الکترونیک قدرت تولید پالس مناسب برای کلیدها و کنترل صحیح بر کلیدانی است. با پیشرفت روزافزون فناوری ساخت ادوات نیمه‌رسانا گرایش به استفاده از کنترل‌کننده‌های دیجیتال گسترش پیدا کرده به طوری که این ادوات جزء لاینفک الکترونیک قدرت به شمار می‌روند. کنترل دیجیتالی ادوات الکترونیک قدرت می‌تواند با استفاده از میکروکنترلرها، میکروپروسورها،

¹ Induction Heating

پردازنده‌های سیگنال دیجیتال و یا ادوات منطقی برنامه پذیر پیاده‌سازی شود. در این میان تراشه‌های FPGA^۱ به دلیل سرعت بالا در انجام محاسبات، امکان استفاده از روش‌های پردازش موازی، انعطاف پذیر بودن در پیاده‌سازی الگوریتم‌های پیچیده و هزینه‌ی نسبتاً پایین، امروزه درزمینه‌ی الکترونیک قدرت بسیار مورد توجه قرار گرفته است. کنترل‌کننده‌هایی که توسط تراشه‌های FPGA پیاده‌سازی می‌شوند از سرعت و کارایی بالایی برخوردارند. از دیگر مزایای استفاده از FPGA قابلیت تبدیل معماری طراحی شده پس از انجام آزمون‌ها و ساخت نمونه اولیه و تبدیل آن به تراشه‌های با کاربرد خاص^۲ است.

در بسیار از موارد نیاز است همراه با گرم کردن یک شیء کنترل دما نیز بر روی آن انجام شود. به‌عنوان مثال در یک گرم کن القایی خانگی که برای پخت و پز استفاده می‌شود نباید دما از حد خاصی تجاوز کند که باعث سوختن غذا و یا به خطر انداختن ایمنی کاربر شود. همچنین اگر دما کم باشد ممکن است غذا نپزد، پس کنترل دما یکی از مهم‌ترین مواردی است که در یک سیستم گرم کن القایی باید مورد توجه قرار گیرد.

۱-۱- هدف پژوهش

هدف از انجام این پژوهش طراحی و ساخت یک سیستم گرم کن القایی کوچک با کنترل دما برای یک بار الکتریکی نمونه‌ی آزمایشگاهی می‌باشد. بار الکتریکی به‌وسیله‌ی یک اینورتر تک فاز تغذیه شده و فرمان کلیدهای آن به‌وسیله‌ی یک تراشه‌ی FPGA تولید می‌شود. دمای دلخواه توسط کاربر به‌صورت دستی تنظیم شده و سیستم به‌صورت خودکار دمای جسم را به دمای مورد نظر رسانده و بر روی آن ثابت نگه می‌دارد.

در این پایان‌نامه از یک اینورتر برای تغذیه بار استفاده می‌شود که می‌توان آن را به‌عنوان یک سیستم گرم کن القایی خانگی در نظر گرفت. بازخورد دما توسط یک حسگر دمای مادون قرمز به یک میکروکنترلر ارسال می‌شود. میکروکنترلر پس از کدگشایی اطلاعات حسگر و دریافت دمای مطلوب به FPGA فرمان انتقال توان به بار را می‌دهد.

¹ Field Programmable Gate Array

² Application Specific Integrated Circuit

در این پژوهش موارد زیر بررسی می‌شود: ساختار یک سیستم گرم‌کن القایی و مدل آن، طراحی یک سیستم گرم‌کن القایی، انواع اینورترها و روش‌های کلید زنی در گرم‌کن‌های القایی، روش‌های اندازه‌گیری دما، الگوریتم‌های ارائه‌شده برای کلید زنی و کنترل دما، طراحی یک مدولاتور بر پایه FPGA برای کاربردهای گرمایش القایی

۱-۲- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

فصل‌های بعدی پایان‌نامه به شرح ذیل است. در فصل دوم پیش‌درآمدی بر سیستم گرم‌کن القایی پرداخته می‌شود. در ابتدای این فصل به صورت خلاصه درباره ساختار یک سیستم گرمایش القایی سپس مزایای استفاده از این روش و برتری آن بر سایر روش‌های تولید حرارت پرداخته می‌شود. در ادامه کاربردهای گرمایش القایی در حوزه‌های مختلف بررسی می‌شود. در فصل سوم مروری بر ساختار ادوات منطقی قابل برنامه‌ریزی و FPGA ها ارائه می‌گردد. سپس سابقه‌ی استفاده از این ادوات در زمینه‌ی الکترونیک قدرت بررسی می‌شود. فصل چهارم به طراحی، شبیه‌سازی و کنترل مبدل مورد استفاده اختصاص دارد. در این فصل به بررسی مجموعه‌ی ساخته‌شده و شرح بخش‌های مختلف آن پرداخته می‌شود. در فصل پنجم نتایج عملی حاصل از ساخت سیستم بررسی و با شبیه‌سازی‌ها مقایسه می‌گردد. در فصل آخر به صورت مختصر مروری بر پایان‌نامه صورت گرفته و نتایج به دست آمده جمع‌بندی می‌شود. در انتهای این فصل پیشنهادهایی برای ادامه‌ی این پژوهش ارائه می‌گردد.

فصل ۲ : مروری بر گرمایش القایی

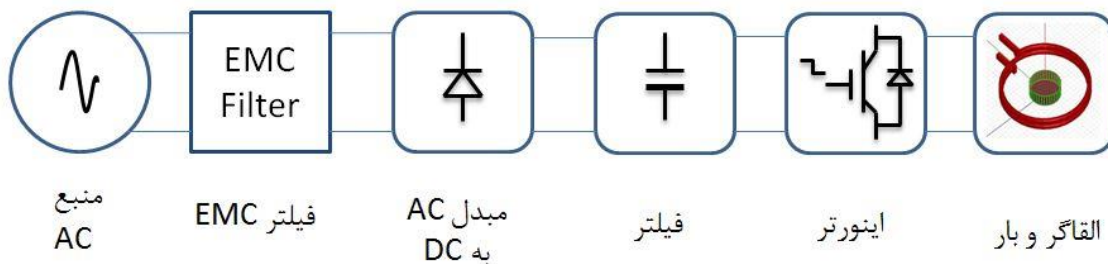
گرمایش القایی نوعی تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی از نوع حرارتی است که به واسطه‌ی میدان مغناطیسی و القای جریان الکتریکی در یک جسم رسانا به وجود می‌آید. جریان الکتریکی به وجود آمده در جسم رسانا باعث ایجاد تلفات اهمی در رسانا شده که به صورت تغییر دمای جسم خود را نمایان می‌کند. این فناوری به یکی از روش‌های پیش‌تاز تولید گرما تبدیل شده و کاربرد وسیعی در لوازم خانگی، صنعت و پزشکی پیدا کرده است [۱-۳].

۱-۲- ساختار یک سیستم گرمایش القایی

سیستم های گرمایش القایی مانند هر سیستم دیگری از بخش های مختلفی تشکیل شده است. این سیستم وظیفه‌ی تبدیل انرژی الکتریکی ورودی به یک میدان مغناطیسی فرکانس بالا را دارا می باشد. در شکل ۱-۲ بلوک دیاگرام یک سیستم گرمایش القایی به نمایش درآمده است. در ادامه بخش‌های مختلف یک سیستم گرمایش القایی بررسی می‌شود.

۱-۱-۲- منبع تغذیه AC

معمولاً توان مورد نیاز برای یک سیستم گرمایش القایی از طریق منبع AC برق شهر و شبکه تامین می‌شود. در کاربردهای صنعتی به خصوص در کوره‌های ذوب القایی از یک ترانسفورماتور افزایش ولتاژ ورودی استفاده می‌شود.



شکل ۱-۲ بلوک دیاگرام کلی یک سیستم گرمایش القایی

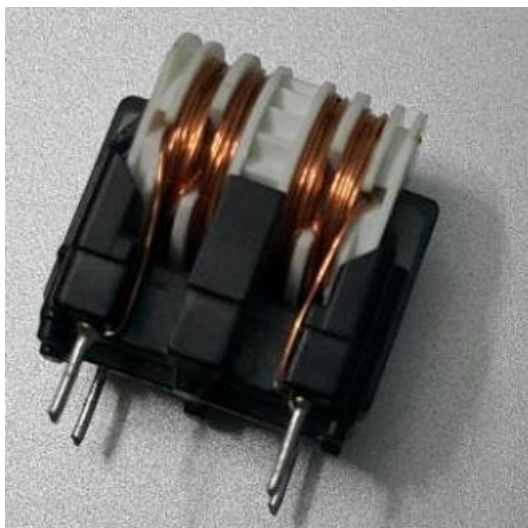
در مرجع [۴] یک منبع تغذیه برای کاربردهای گرمایش القایی با حلقه‌ی قفل فاز که بر پایه تراشه‌های FPGA است معرفی شده است. یکی از بخش‌های یک گرم کن القایی منبع تغذیه آن است که وظیفه‌ی تأمین ولتاژ DC برای تغذیه اینورتر را دارد. در این مرجع از یک منبع تغذیه کاهنده سه فاز استفاده شده که با روش مدولاسیون بردار فضایی^۱ ولتاژ AC ورودی را یکسو کرده و به ولتاژ DC مورد نیاز برای اینورتر تبدیل می‌کند. همچنین در این مرجع از روش کلیدزنی نرم در حالت ولتاژ صفر استفاده شده که باعث می‌شود تلفات کلیدزنی به طور چشمگیری کاهش یابد. مزیت استفاده از این روش بالا بودن ضریب توان دقت بالا در قفل کردن بر روی فاز است.

۲-۱-۲- فیلتر EMC

در الکترونیک قدرت به دلیل وجود کلیدزنی و میدان‌های مغناطیسی فرکانس بالا همواره با پدیده تداخل الکترومغناطیسی روبه‌رو هستیم. در سیستم‌های گرمایش القایی به دلیل فرکانس بالای کلیدزنی و میدان‌های مغناطیسی قوی ایجاد شده توسط آن، این پدیده هر چه بیشتر خود را نمایان می‌کند. در کاربردهای صنعتی به دلیل توان بالا و میدان‌های مغناطیسی قوی، تداخل الکترومغناطیسی به وجود آمده توسط این سیستم‌ها بسیار قوی بوده و بر روی کیفیت توان شبکه اثر منفی می‌گذارد. برای کاستن از میزان تداخل الکترومغناطیسی تولید شده توسط این سیستم از فیلترهای EMI^۲ استفاده می‌شود. این فیلترها ساختارهای مختلفی دارند که پرکاربردترین این ساختارها استفاده از دو سلف تزویج شده به همراه دو خازن است. در شکل ۲-۲ یک نمونه فیلتر EMI با دو سلف تزویج شده به نمایش درآمده است. معمولاً جهت حرکت نويز حاصل از مبدل‌ها، از طرف بار به سمت فیلتر است.

^۱ Space Vector Modulation

^۲ Electro Magnetic Interference

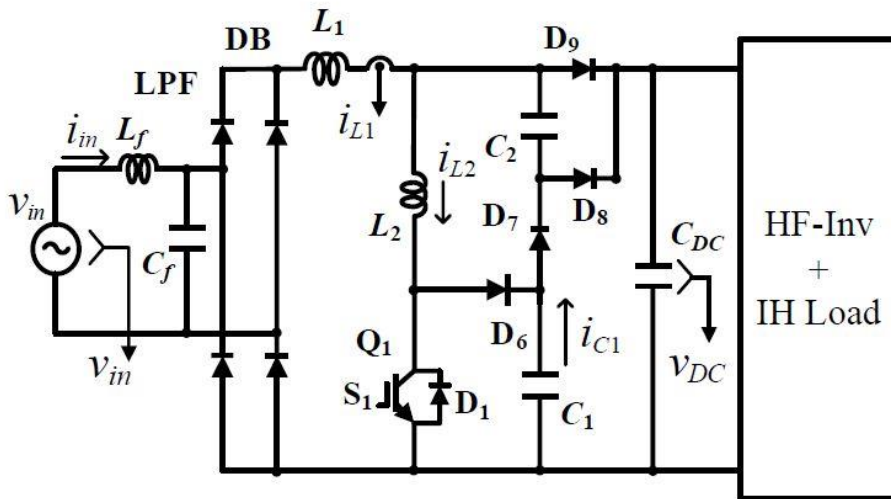


شکل ۲-۲ یک نمونه فیلتر EMI با دو سلف توزیع شده

۲-۱-۳- یکسوسازها و فیلتر

این بخش وظیفه‌ی تبدیل ولتاژ متناوب ورودی به ولتاژ مستقیم موردنیاز اینورتر را دارد. برای ایجاد میدان مغناطیسی فرکانس بالا نیاز به یک جریان متناوب فرکانس بالا داریم. برای تبدیل برق شهر با فرکانس ۵۰ هرتز به فرکانس‌های بالاتر نیاز به یک واسطه‌ی DC است. این واسطه DC توسط یکسوساز و فیلترهای مربوط ایجاد می‌شود. با تبدیل مستقیم ولتاژ متناوب ورودی به DC با دیودهای مرسوم شاهد جریان هارمونیکی زیادی هستیم. این جریان هارمونیکی ایجاد شده می‌تواند اثر منفی بر روی کیفیت توان شبکه بگذارد. برای رفع این مشکل می‌توان از اصلاح‌کننده‌های ضریب توان به‌عنوان تأمین‌کننده ولتاژ DC استفاده کرد. این مبدل‌ها جریان ورودی سینوسی و هم فاز با شبکه دارند. در شکل ۲-۳ ساختار یک PFC^۱ برای یک اجاق القایی طراحی شده به نمایش در آمده است [۵]. مبدل به نمایش درآمده از روش های کلید زنی نرم استفاده می‌کند که قابلیت کار در فرکانس‌های بالاتر را به آن می‌دهد.

¹ Power Factor Correction



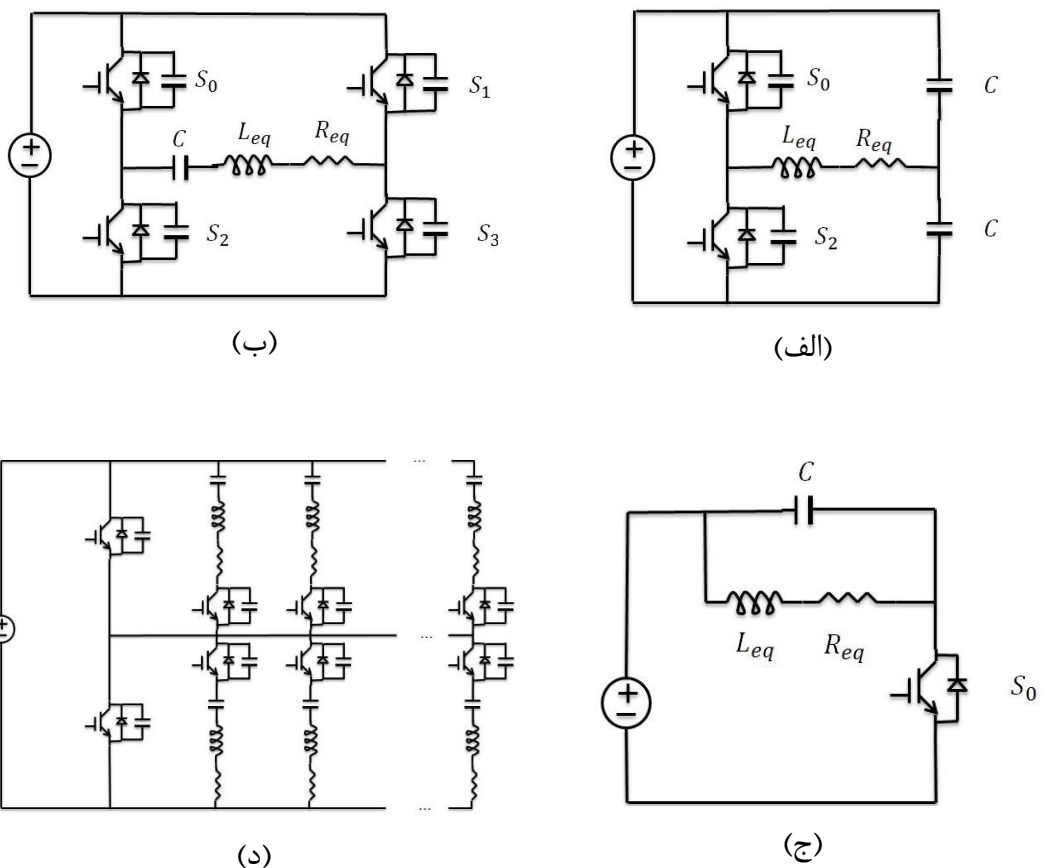
شکل ۲-۳ ساختار یک سیستم یکسو ساز برای اجاق القایی [۵]

۲-۱-۴-اینورتر

یکی از اصلی ترین قسمت های یک سیستم گرمایش القایی اینورتر آن می باشد که وظیفه ی تبدیل ولتاژ DC به جریان فرکانس بالا را دارد. به دلیل فرکانس بالا و افزایش تلفات کلیدانی، در کاربردهای گرمایش القایی، از اینورترهای تشدیدی استفاده می شود. همچنین در این اینورترها از مدارات اسنابر برای کاستن از فشار کلید زنی بر روی کلیدها استفاده می شود. معمولاً در اینورترهای گرمایش القایی روش های کلید زنی نرم مانند کلید زنی ولتاژ صفر و جریان صفر به کار می رود. به کار بردن این روش ها علاوه بر بالا بردن بازده و کاهش فشار کلید زنی باعث می شود مبدل بتواند در فرکانس های بالاتر نیز کار کند.

اینورترهایی که به صورت معمول در گرمایش القایی استفاده می شود دارای ساختارهای مختلفی هستند که این ساختارها شامل نیم پل (شکل ۲-۴ الف)، تمام پل (شکل ۲-۴ ب) ساختار تک کلید (شکل ۲-۴ ج) و ساختار چند کویله برای سیستم های گرمایش القایی با چند سیم پیچ مجزا (شکل ۲-۴ د) هستند که کلید زنی ولتاژ صفر و جریان صفر در آنها اتفاق می افتد. استفاده از اینورتر پل کامل برای توان های بالای ۵ کیلووات استفاده می شود. این اینورتر ها به دلیل تعداد زیاد کلیدها در برخی کاربردها مقرون به صرفه نمی باشد. ساختار نیم پل به دلیل تعادل

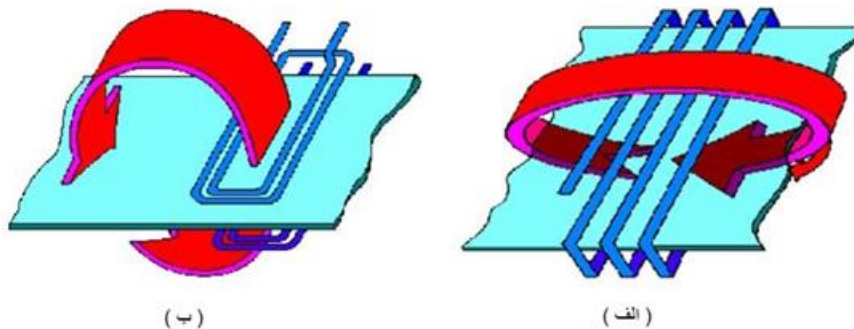
خوبی که بین قیمت و کارایی دارد بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند. در توان‌های تا حدود ۳/۵ کیلووات از ساختار نیم پل استفاده می‌شود. در کاربرد های کمتر از ۱/۸ کیلووات از اینورترهای با ساختار تک کلید استفاده می‌شود [۶]. مرجع [۷] به بررسی توپولوژی‌های مختلف اینورترهای تشدیدی پرداخته و موارد استفاده از هر کدام بررسی شده است. مرجع [۸] به بررسی ساختار نوعی از اینورتر می پردازد که سه سیم‌پیچ هم مرکز را تغذیه می‌کند. در این مرجع به جای اختصاص دادن یک اینورتر به هر سیم‌پیچ از یک اینورتر برای هر سه سیم‌پیچ استفاده شده و یک اینورتر با ساختاری خاص برای تغذیه تمام سیم‌پیچ ها معرفی شده است. استفاده از این اینورتر به دلیل کاهش تعداد کلید از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است.



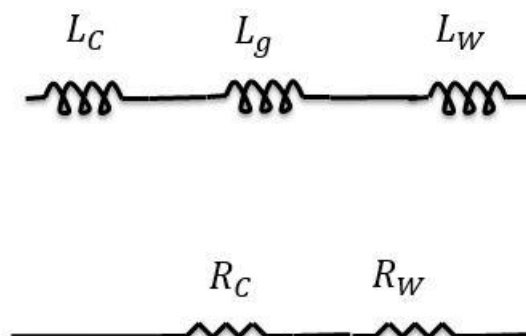
شکل ۲-۴ ساختار اینورترهای مورد استفاده در گرمایش القایی (الف) ساختار نیم پل، (ب) ساختار تمام پل، (ج) ساختار تک کلید، (د) ساختار چند کویله

۲-۱-۵- القاگر و بار

اصلی‌ترین قسمت یک سیستم گرمایش القایی سیستم القاگر-بار می‌باشد. این قسمت وظیفه‌ی تبدیل جریان الکتریکی به میدان مغناطیسی را داراست. در کاربردهای صنعتی گرمایش القایی معمولاً دو نوع متفاوت سیم‌پیچ بسته به نوع چینش بار و سیم‌پیچ به کار می‌رود، شار متقاطع (شکل ۲-۵ الف)، شار طولی (شکل ۲-۵ ب). برای به دست آوردن دمای یکنواخت در فلزات می‌توان از سیستم‌های چندسیم‌پیچه استفاده کرد [۹]. القاگر و بار را می‌توان به صورت یک مدار مقاومتی سلفی مدل کرد. مدار معادل القاگر و بار به صورت شکل ۲-۶ در نظر گرفت می‌شود که در آن مقدار مقاومت بی‌باری القاگر، R_C مقدار مقاومت قطعه کار، L_a اندوکتانس فاصله‌ی هوایی، L_g اندوکتانس قطعه کار و L_C اندوکتانس بی‌باری القاگر می‌باشد.



شکل ۲-۵ مسیر شار مغناطیسی در دو کویل با هندسه‌ی مختلف [۹].



شکل ۲-۶ مدار معادل سری القاگر - قطعه کار برای تحلیل گرمایش القایی

مقادیر هریک از اندوکتانس‌ها و مقاومت‌ها طبق روابط زیر قابل محاسبه است. [۱۰]

$$R_W = K(\mu_W p A_W) \quad (۱-۲)$$

$$R_C = K(k_r \pi r_c \delta_c) \quad (۲-۲)$$

$$L_W = K\left(\frac{\mu_W q A_W}{2\pi f}\right) \quad (۳-۲)$$

$$L_a = K\left(\frac{A_a}{2\pi f}\right) \quad (۴-۲)$$

$$L_C = \frac{R_C}{2\pi f} \quad (۵-۲)$$

μ_W : ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی قطعه کار

p : ضریب ابعادی برای محاسبه‌ی مدار معادل القاگر - قطعه کار

k_r : ضریب اصلاح برای در نظر گرفتن فاصله بین دورها

r_c : شعاع داخلی کویل

δ_c : عمق نفوذ کویل

q : ضریب ابعادی برای محاسبه مدار معادل القاگر - قطعه کار

A_W : سطح مقطع قطعه کار

f : فرکانس

A_a : سطح مقطع فاصله هوایی

که در آن ثابت K از معادله (۲-۶) به دست می آید.

$$K = \left(\frac{2\pi f \mu_0 N_C^2}{2\pi f}\right) \quad (۶-۲)$$

μ_0 : ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی خلاء

N_C : تعداد دور القاگر

طبق روابط داده شده می توان میزان اندوکتانس القاگر را تعیین و طراحی را بر اساس آن

انجام داد.

مراجع [۱۱-۱۴] به طراحی القاگر پرداخته‌اند. دو روش طراحی القاگر در حوزه‌ی گرمایش القایی، روش تحلیلی و روش اجزاء محدود می‌باشد. امروزه با پیشرفت و توسعه‌ی نرم‌افزارهای تحلیل اجزاء محدود و بالا رفتن سرعت محاسبات کامپیوترها و تحلیل‌های دقیق‌گرایش به استفاده از این نرم‌افزارها بسیار بیشتر از روش‌های تحلیلی است. در مرجع [۱۵] طراحی یک القاگر مناسب برای گرمایش القایی ارائه شده که بر روی برد مدار چاپی^۱ پیاده‌سازی شده است. معمولاً در کاربردهای گرمایش القایی برای کاستن از تلفاتی که به دلیل اثر پوستی ایجاد شده در اثر جریان فرکانس بالا، از هادی‌های به هم تابیده شده یا هادی‌های لیتز^۲ استفاده می‌شود. در مرجع فوق از فناوری ساخت چندلایه مدارهای چاپی استفاده شده تا سیم‌پیچ مسطح مناسب برای استفاده در گرمایش القایی ساخته شود.

با قرار گرفتن بارهای مختلف در یک سیستم گرمایش القایی مشخصات مدار تشدید آن تغییر می‌کند مثلاً در یک سیستم گرمایش القایی خانگی با قرار گرفتن ظروف مختلف بر روی اجاق مقدار اندوکتانس معادل القاگر تغییر می‌کند. برای کنترل یک سیستم که پارامترهای آن متغیر با زمان است باید روش‌های کنترلی مخصوصی به کار برده شود. در مرجع [۱۶] از روش کنترلی الگوریتم تطبیقی بار برای یک اینورتر نیم پل تشدید با کاربرد اجاق القایی استفاده شده است. همچنین در این مرجع دو الگوریتم حد فرکانس^۳ و حد توان^۴ ارائه شده بررسی گردیده است. در پایان نتایج آزمایشگاهی با مقایسه مدولاسیون‌های مختلف و دو الگوریتم معرفی شده به بررسی نقاط قوت و ضعف هر کدام از آن‌ها پرداخته است.

۲-۲- اینورترهای تشدیدي مورد استفاده در گرمایش القایی

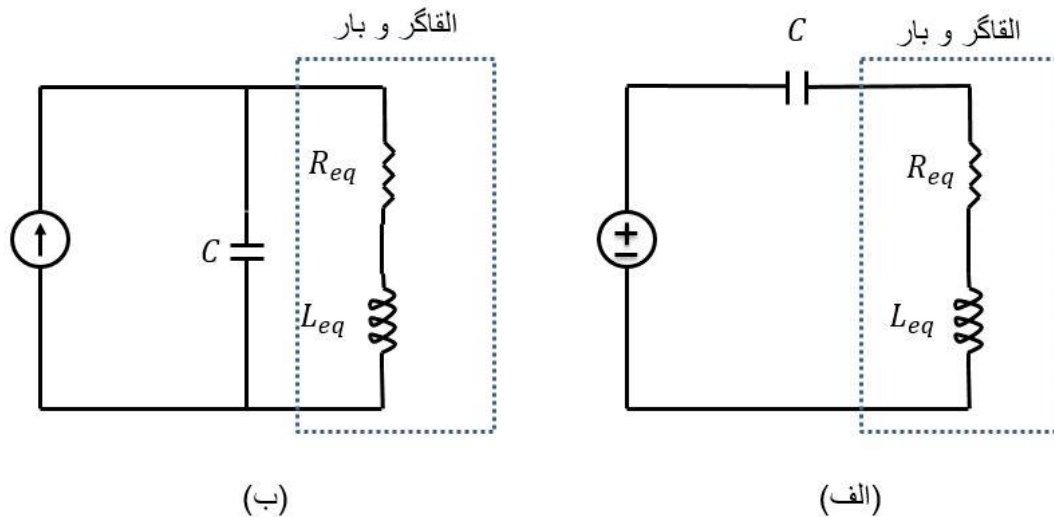
اینورترهای تشدیدي نوعی از اینورترها هستند که از نوسان بین سلف و خازن برای کاستن از فشار کلید زنی بر روی کلیدهای قدرت استفاده می‌کنند. این مبدل‌ها را بنا به اینکه مدار تشدید

^۱ PCB

^۲ Litz-Conductor

^۳ Frequency Limit

^۴ Power Limit



شکل ۷-۲ (الف) مدار تشدید سری، (ب) مدار تشدید موازی

در کجای آن واقع شود می‌توان به سه دسته‌ی اتصال تشدید، انتقال تشدید و بار تشدید تقسیم‌بندی کرد. معیارهای زیادی برای دسته‌بندی انواع مبدل‌های مورد استفاده در کاربردهای گرمایش القایی وجود دارد. در این کاربردها معمولاً از اینورترهای بار تشدید استفاده می‌شود. براین اساس بنا بر نوع بار تشدید استفاده‌شده در مبدل می‌توان آنها را در دودسته‌ی اینورترهای منبع ولتاژ و منبع جریان تقسیم‌بندی کرد. مدار تشدید این اینورترها بنا بر نوع کاربرد طور کلی به دودسته‌ی سری و موازی دسته‌بندی می‌شوند. در شکل ۷-۲ انواع ساختارهای مدار تشدید استفاده‌شده در کاربردهای گرمایش القایی به نمایش درآمده است. برای اینورترهای منبع جریان از بار تشدید موازی و در اینورترهای منبع ولتاژ از بار تشدید سری استفاده می‌شود.

۲-۲-۲-۲-۱ اینورترهای منبع جریان

در این حالت بار اینورتر به صورت یک مدار مقاومتی سلفی با خازن موازی به صورت شکل ۷-۲ (ب) است. در این حالت داریم:

$$I_{tank} = I_c(s) + I_L(s) = sCU_{tank} + \frac{U_{tank}}{sL + R_{eq}} \quad (7-2)$$

$$H_p(s) = \frac{U_{tank}(s)}{I_{tank}(s)} = \frac{sL + R_{eq}}{s^2LC + sCR_{eq} + 1} = \frac{(sL + R_{eq})\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (۸-۲)$$

$$\omega_r = \frac{\sqrt{C\sqrt{2LCR_{eq}^2 + L^2} - C^2R_{eq}^2}}{LC} \quad (۹-۲)$$

I_{tank} : جریان مدار تانک

I_c : جریان خازن

I_L : جریان سلف

C : ظرفیت خازن

U_{tank} : ولتاژ مدار تانک

R_{eq} : مقاومت معادل القاگر

L : اندوکتانس سلف

ξ : ضریب میرایی

ω_n : فرکانس تشدید

$H_p(s)$: تابع تبدیل مدار تانک موازی

طبق معادلات (۷-۲) تا (۹-۲) می توان تابع امپدانس یک بار سلفی خازنی مورد استفاده در یک سیستم گرمایش القایی با اینورتر منبع جریان را به دست آورد. همان طور که مشاهده می شود فرکانس نوسان بین سلف و خازن از رابطه (۹-۲) به دست می آید [۱۰]. می توان در مدارت RLC نسبت میزان توان راکتیو به توان اکتیو را تحت عنوان ضریب کیفیت Q تعریف نمود. این ضریب را می توان طبق معادله (۱۰-۲) و (۱۱-۲) به دست آورد.

$$Q = \frac{|P_{rect}|}{P_{act}} = \frac{\omega_0 L_{eq}}{R_{eq}} = \frac{1}{\omega_0 C R_{eq}} \quad (۱۰-۲)$$

$$Q = \frac{1}{2\xi} \quad (۱۱-۲)$$

پس طبق (۹-۲) و (۱۰-۲) داریم:

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{\sqrt{\frac{2}{Q^2} + 1} - \frac{1}{Q^2}} \quad (۱۲-۲)$$

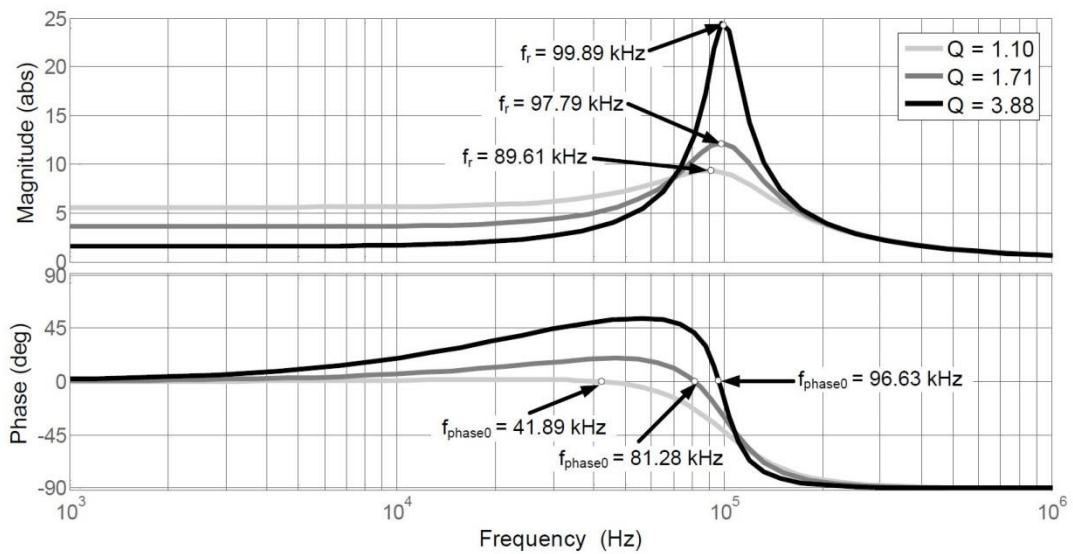
P_{rect} : توان راکتیو

P_{act} : توان اکتیو

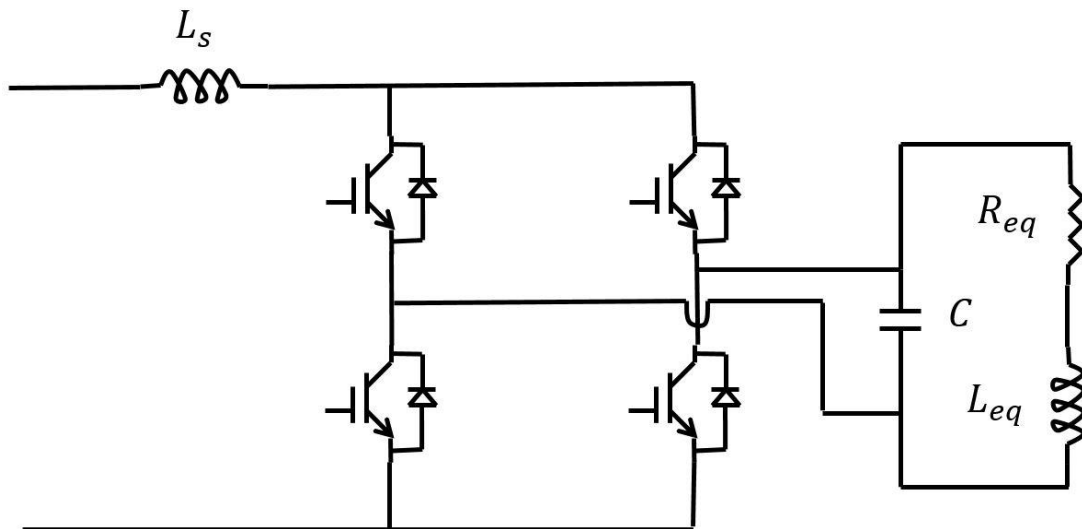
ω_0 : فرکانس زاویه‌ای تشدید

ω_r : فرکانسی که در آن میزان جریان حداکثر است

بر این اساس می‌توان آنالیز فرکانسی برای این معادلات بر اساس ضریب کیفیت انجام داد. طبق شکل ۸-۲ مشاهده می‌شود با انتخاب مقادیر بالاتر برای ضریب کیفیت میزان فرکانس تشدید مدار به مقدار فرکانس طبیعی میرا نشده نزدیک‌تر می‌شود.



شکل ۸-۲ آنالیز بود برای $H_p(\omega)$ برای سه مقدار متفاوت Q و فرکانس طبیعی میرا نشده ۱۰۰ کیلوهرتز [۱۰]



شکل ۲-۹ اینورتر تشدیدی منبع جریان با بار تشدیدی موازی و سلف ورودی

در اینورترهای منبع جریان برای تأمین جریان موردنیاز بار یک سلف بزرگ در ورودی اینورتر سری می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۹ مشاهده می‌شود به دلیل وجود سلف سری در ورودی اینورتر در صورت اتصال باز شدن خروجی ولتاژ زیادی بر روی L_s القا شده که می‌تواند باعث آسیب رسیدن به کلیدها شود. برای رفع این اشکال همواره بین روشن شدن کلیدها باید هم‌پوشانی^۱ وجود داشته باشد یعنی قبل از اینکه کلید در هر پایه اینورتر خاموش شود کلید دیگر همان پایه باید روشن شده باشد.

۲-۲-۳- اینورترهای منبع ولتاژ

در این اینورترها بار طبق شکل ۲-۷ به صورت مدار RLC سری در نظر گرفته می‌شود. طبق روابط حاکم برمدارت RLC سری داریم :

$$U_{tank}(s) = R_{eq}I_{tank}(s) + sLI_{tank}(s) + \frac{1}{sC} I_{tank}(s) \quad (2-13)$$

U_{tank} : ولتاژ مدار تانک

¹ Over lapping

R_{eq} : مقاومت معادل القاگر

I_{tank} : جریان مدار تانک

طبق رابطه (۲-۱۳) تابع تبدیل سیستم به صورت رابطه (۲-۱۴) به دست می آید.

$$H(s) = \frac{I_{tank}(s)}{U_{tank}(s)} = \frac{sC}{s^2LC + sCR_{eq} + 1} = sC \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2} \quad (2-14)$$

$H(s)$: تابع تبدیل مدار تشدید سری

ξ : ضریب میرایی

که در آن ω_n فرکانس طبیعی میرا نشده سیستم است که طبق رابطه (۲-۱۵) به دست می آید.

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2-15)$$

در بار RLC سری فرکانس طبیعی سیستم با فرکانس طبیعی نوسانات میرا شونده با فرکانس تشدید سیستم برابر است.

$$\omega_n = \omega_r \quad (2-16)$$

در رابطه (۲-۱۴)، ζ ضریب میرایی سیستم است که از رابطه (۲-۱۷) به دست می آید.

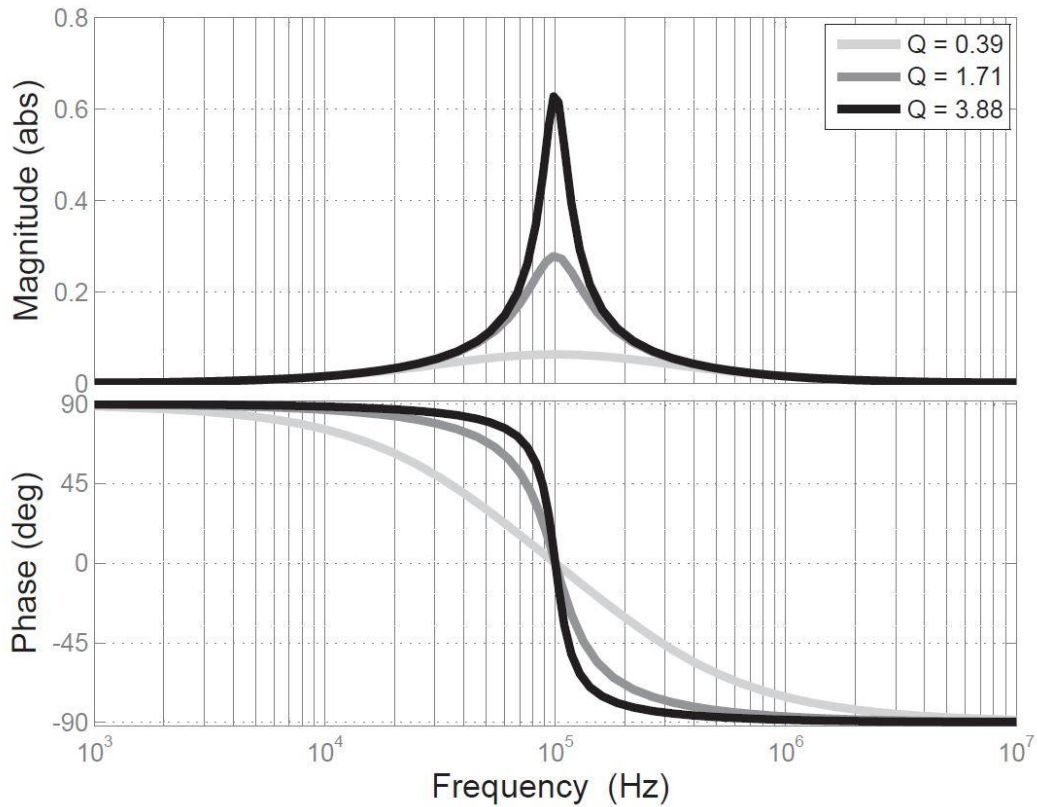
$$\zeta = \frac{R_{eq}}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2-17)$$

ضریب کیفیت را می توان مدار از (۲-۱۸) و (۲-۱۹) به دست آورد.

$$Q = \frac{|P_{rect}|}{P_{act}} = \frac{\omega_0 L_{eq}}{R_{eq}} = \frac{1}{\omega_0 C R_{eq}} \quad (2-18)$$

$$Q = \frac{1}{2\zeta} \quad (2-19)$$

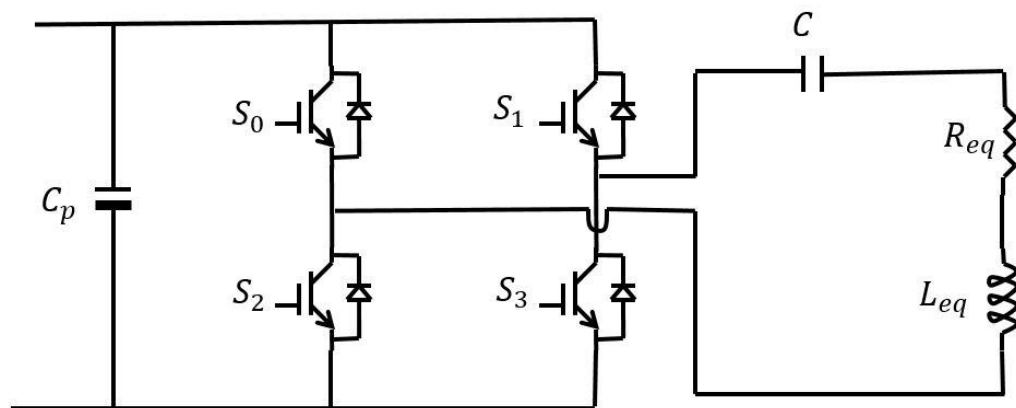
یک مدار RLC سری با مقادیر $L = 9.78\mu H$ و $C = 0.26\mu H$ به ازای مقادیر مختلف ضریب کیفیت شبیه سازی شده است. فرکانس تشدید ۹۹/۸ کیلوهرتز است [۱۰].



شکل ۱۰-۲ نمودار بود مدار RLC سری به ازای مقادیر مختلف ضریب کیفیت [۱۰]

نمودار بود مدار RLC سری با مقادیر سلف و خازن داده شده با مقادیر مختلف ضریب کیفیت در شکل ۱۰-۲ به نمایش درآمده است. در کاربردهای گرمایش القایی به دلیل هرچه نزدیک تر شدن خروجی سیستم به حالت سینوسی و کاهش هارمونیک‌ها مقادیر بالا برای Q انتخاب می‌شود.

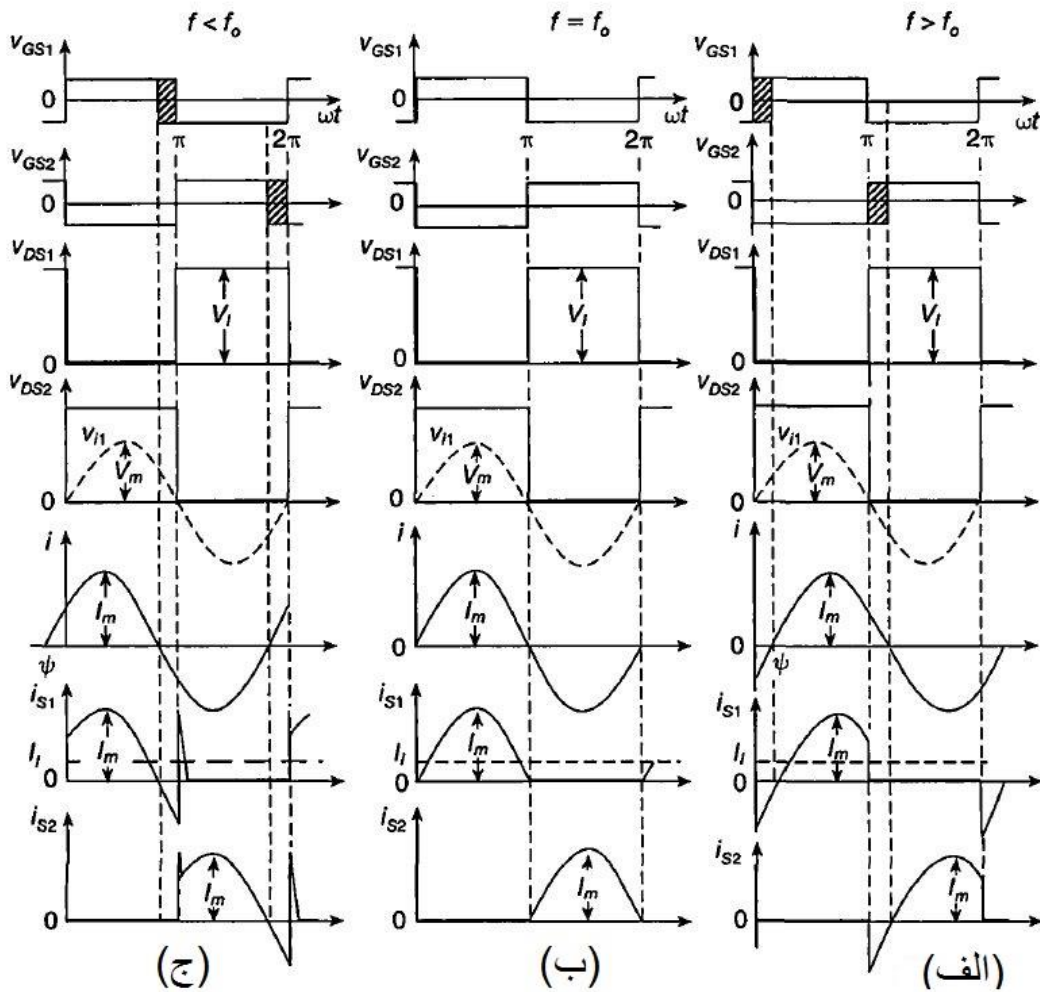
برای تأمین ولتاژ منبع ولتاژ، در ورودی اینورتر از یک خازن بزرگ در ورودی اینورتر استفاده می‌شود. شکل اینورتر منبع ولتاژ مورد استفاده در کاربردهای گرمایش القایی در شکل ۱۱-۲ به نمایش درآمده است.



شکل ۱۱-۲ اینورتر منبع ولتاژ با بار تشدید سری

همان‌طور که در شکل ۱۱-۲ در صورت روشن شدن دو کلید در یک شاخه اینورتر به صورت هم‌زمان موجب وقوع اتصال کوتاه در آن شاخه شده به دلیل وجود منبع ولتاژ در ورودی اینورتر جریان زیادی از آن شاخه اینورتر عبور می‌کند. این جریان زیاد ممکن است باعث سوختن کلیدهای اینورتر شود. برای جلوگیری از این اتفاق بین روشن شدن یک کلید در یک شاخه و روشن کلید دیگر در همان شاخه باید اختلاف زمانی وجود داشته باشد که به این اختلاف زمان مرده می‌گویند. وجود زمان مرده در کلید زنی اینورترهای تشدید منبع ولتاژ ضروری است و باید در طراحی لحاظ شود.

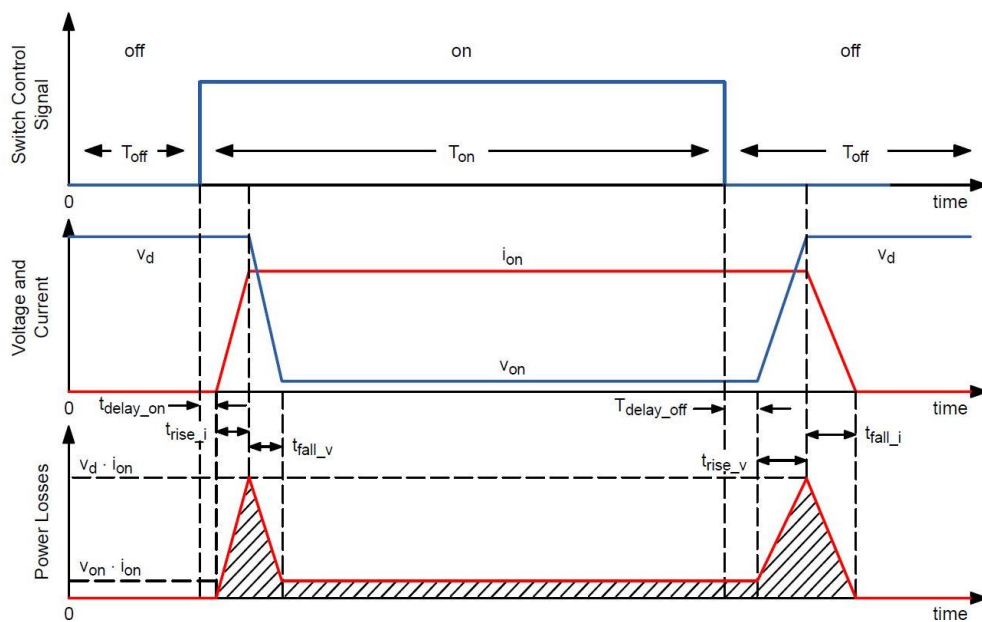
در شکل ۱۲-۲ میزان جریان و ولتاژ کلیدها به ازای فرکانس تشدید بالاتر از فرکانس کلید زنی، فرکانس تشدید پایین‌تر از فرکانس کلید زنی، و فرکانس تشدید برابر فرکانس کلید زنی به نمایش در آمده است. طبق شکل به نمایش درآمده در فرکانس پایین‌تر از فرکانس تشدید روشن شدن کلید S_2 در ولتاژ غیر صفر اتفاق می‌افتد ولی خاموش شدن آن در ولتاژ صفر است. در حالت دوم یعنی در فرکانس تشدید، روشن شدن و خاموش شدن کلیدها هر دو در ولتاژ صفر اتفاق می‌افتد. در فرکانس بالاتر از فرکانس تشدید روشن شدن کلید S_2 در ولتاژ صفر اتفاق می‌افتد. به دلیل بالاتر بودن تلفات روشن شدن از خاموش شدن آن بهتر است از این حالت استفاده شود.



شکل ۲-۱۲ جریان و ولتاژ کلیدها به ازای (الف) فرکانس کلید زنی بالاتر از فرکانس تشدید، (ب) فرکانس کلید زنی برابر فرکانس تشدید، (ج) فرکانس کلید زنی پایین تر از فرکانس تشدید [۱۷].

۲-۲-۴- کلید زنی نرم و کلید زنی سخت

معمولاً مبدل‌های الکترونیک قدرت در وضعیت کلید زنی سخت کار می‌کنند. این مبدل‌ها شامل انواع روش‌های مدولاسیون پهنای پالس (PWM) مبدل‌های DC-DC و انواع اینورترها هستند که در الکترونیک قدرت و سیستم‌های قدرت استفاده می‌شوند [۱۸]. کلید زنی سخت به معنی این است که کلید زنی فشار کلید زنی زائدی به کلید قدرت وارد می‌کند. در این نوع کلید زنی در زمان کلید زنی، کلید از حالت جریان بالا به حالت ولتاژ بالا در دوسر کلید می‌رود. این حالت می‌تواند باعث ایجاد فشار زیاد بر روی کلید و تلفات بالا در کلید زنی شود.



شکل ۲-۱۳ تلفات کلید زنی ایجادشده در اثر کلید زنی سخت [۱۹]

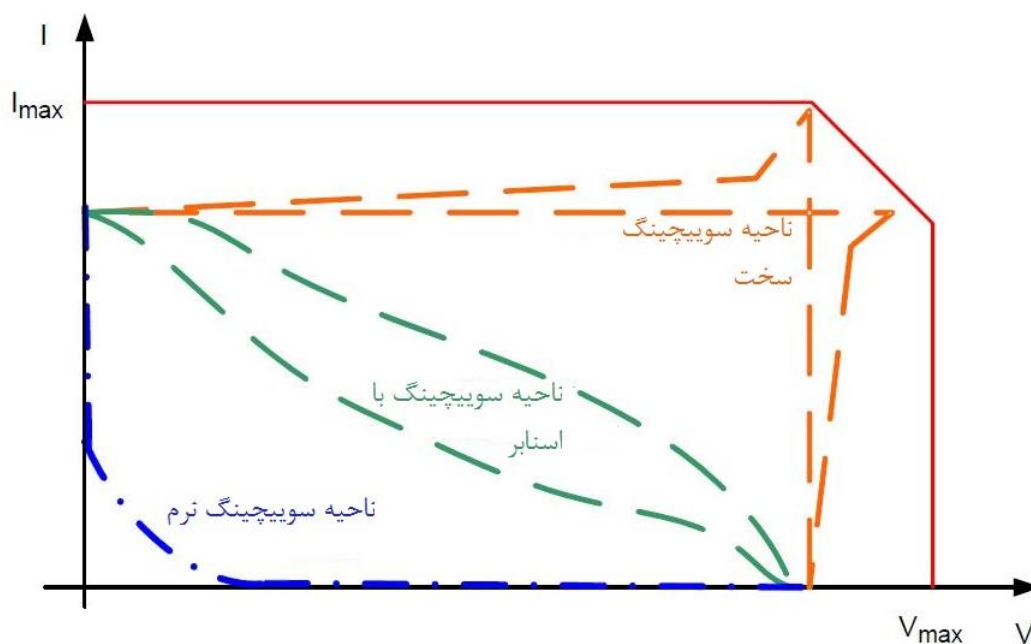
در این‌گونه موارد معمولاً از مدارات اسنابر برای کاهش فشارهای گذرای ولتاژ بر روی کلیدهای قدرت استفاده می‌شود. تلفات کلید زنی متناسب با افزایش فرکانس، به‌صورت خطی افزایش می‌یابند و باعث ایجاد محدودیت برای بالا بردن فرکانس کلید زنی می‌شود. در شکل ۲-۱۳ کلید زنی سخت به نمایش درآمده است [۱۹].

بالا رفتن فرکانس کلید زنی اجازه می‌دهد که مبدل با اندازه‌ی کوچک‌تر و ارزان‌تر طراحی شود. در کاربردهای گرمایش القایی به دلیل استفاده از فرکانس‌های بالا استفاده از این روش کلید زنی می‌تواند تلفات زیادی بر روی کلیدهای قدرت ایجاد کند. این تلفات به‌صورت حرارت بر روی کلید ظاهر شده و دفع آن نیازمند هیت‌سینک‌های بزرگ و فن‌های قدرتمند است. در بسیاری موارد حرارت تولیدشده توسط کلید قابل‌انتقال به محیط نبوده و تجمع آن در کلید می‌تواند حتی باعث ذوب شدن آن گردد. از طرفی استفاده از فرکانس کلید زنی پایین در این‌گونه مبدل‌ها باعث ایجاد جریان و به‌تبع آن شار با فرکانس پایین‌تر شود. در این صورت کارایی مبدل کاهش یافته و زمان بیشتری برای تولید گرمای موردنیاز لازم است.

راه‌حل ارائه‌شده برای این مشکل مبدل‌های تشدیدی‌اند. این مبدل‌ها از یک مدار تانک تشدید برای تولید موج متناوب ولتاژ یا جریان برای رسیدن به حالت‌های کلید زنی ولتاژ صفر

(ZVS) یا جریان صفر (ZCS) استفاده می‌کنند که این حالت‌ها می‌توانند اثر چشمگیری بر کاهش تلفات کلید زنی داشته باشند.

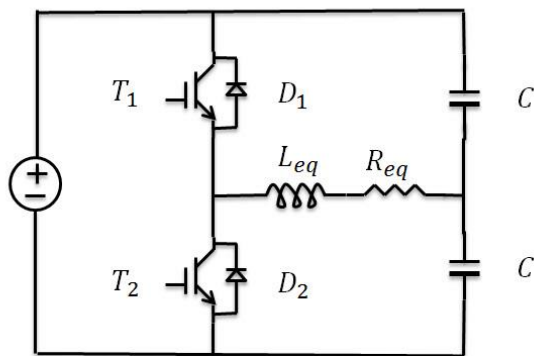
مزیت اصلی استفاده از مبدل‌های تشدید این است که می‌توانند در فرکانس کلید زنی بالا با تلفات توان بسیار کم کار کنند [۱۹]. شکل ۲-۱۴ فضای کلید زنی را برای حالت‌های کلید زنی سخت، کلید زنی با اتصال اسنابر و کلید زنی نرم نمایش می‌دهد [۳، ۱۷، ۱۹]. در طی روشن و خاموش شدن کلید در کلید زنی سخت کلید قدرت می‌بایست در برابر فشار تغییرات زیاد ولتاژ و جریان زیاد ایستادگی کند که این باعث تلفات زیاد و ایجاد استرس بر روی کلید قدرت می‌شود [۱۹]. همان‌طور که در شکل مشخص شده در حالت کلید زنی نرم، به دلیل نوسان بین سلف و خازن مدار تشدید، در لحظه‌ی کلید زنی فشار کمی بر کلید وارد شده و همچنین تلفات مدار به طرز قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۲-۱۴ نواحی امن برای انجام عملیات کلید زنی در سه حالت با کلید زنی سخت - با اسنابر و کلید زنی نرم [۱۹]

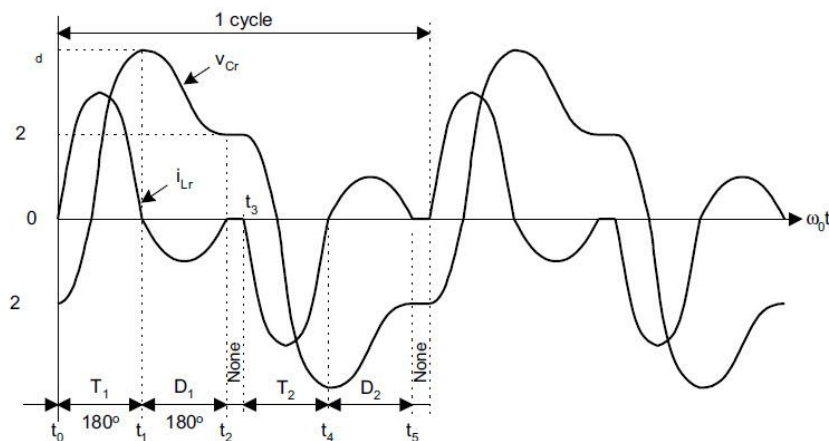
۵-۲-۲- کلید زنی جریان صفر

در این روش کلید زمانی خاموش می‌شود که جریان عبوری از آن صفر باشد. در این حالت فرکانس کلید زنی کمتر از نصف فرکانس تشدید بین سلف و خازن مدار تانک در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱۵-۲ اینورتر تک فاز نیم پل با بار تشدید سری

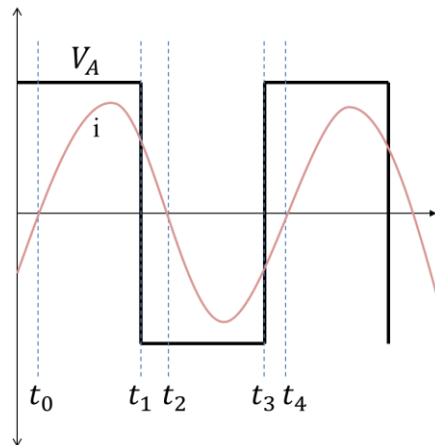
در اینورتر شکل ۱۶-۲ جریان سلف و ولتاژ خازن به صورت شکل ۱۶-۲ است [۲۰].



شکل ۱۶-۲ شکل جریان در بار در حالت کلید زنی جریان صفر [۲۰]

۲-۲-۶- کلید زنی ولتاژ صفر

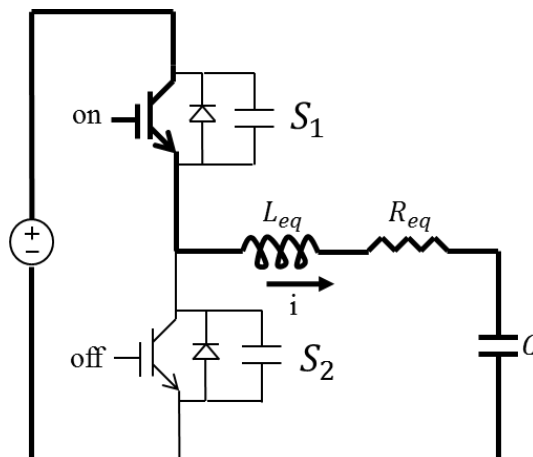
در این حالت روشن شدن کلید در زمانی اتفاق می‌افتد که ولتاژ دو سر کلید صفر است. در صورتی که جریان عبوری از کلید قدرت به صورت عکس مسیر هدایت آن باشد (جریان از دیودهای موازی با کلید عبور کند) می‌توان ولتاژ دو سر کلید را صفر در نظر گرفت. در صورتی که کلید زنی در این لحظه اتفاق بیفتد تلفات کلید زنی ناچیز بوده و می‌توان فرکانس کلید زنی بالاتری را برای مبدل در نظر گرفت. در این روش فرکانس کلید زنی بالاتر از فرکانس تشدید بین سلف و خازن مدار تانک در نظر گرفته می‌شود. عملکرد یک سیستم با کلید زنی ولتاژ صفر به شکل زیر است [۱۸]. شکل ۲-۱۷ شکل جریان و ولتاژ را در بازه‌های مختلف کلید زنی نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۷ شکل جریان بار در حالت کلید زنی ولتاژ صفر

□ حالت ۱: از t_0 تا t_1

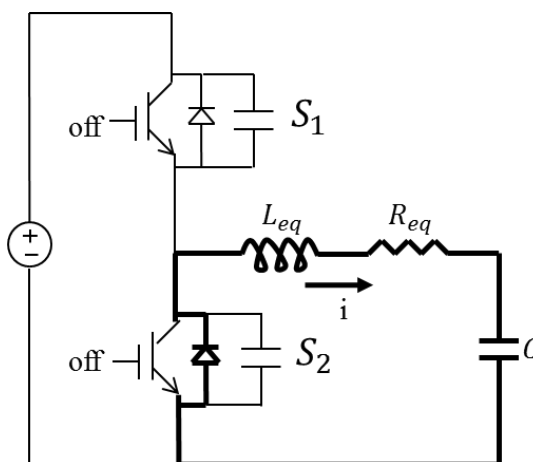
در این بازه در لحظه t_0 جهت جریان تشدید از حالت معکوس به مستقیم از طریق کلید S_1 تغییر جهت می‌دهد و جریان به صورت مستقیم از منبع ولتاژ DC جاری می‌شود.



شکل ۱۸-۲ حالت اول کلید S_0 روشن و S_1 خاموش است

□ حالت ۲: از t_1 تا t_2

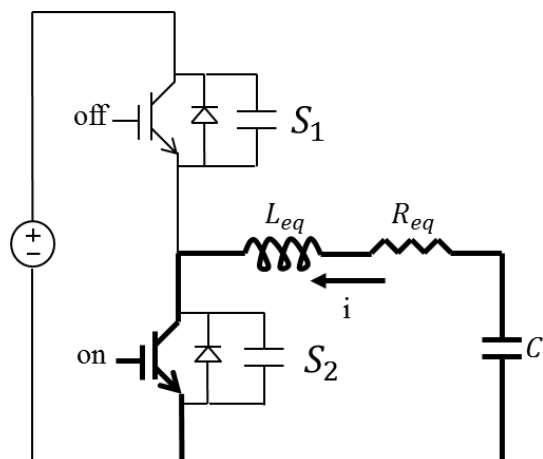
در لحظه‌ی t_1 کلید S_1 خاموش می‌شود و جریان به صورت هرز گرد از طریق دیود D_2 جاری می‌شود. در این لحظه به دلیل عبور جریان از دیود هرز گرد ولتاژ دو سر S_2 صفر است و S_2 در این بازه می‌تواند روشن شود.



شکل ۱۹-۲ حالت ۲ که دو کلید خاموش است و جریان از طریق دیود S_1 جاری است

□ حالت ۳: از t_2 تا t_3

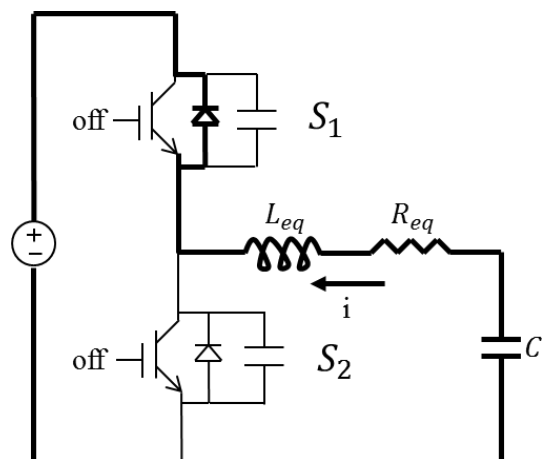
در لحظه t_2 جریان شروع به عبور از کلید S_2 می‌کند. در این بازه عبور جریان به صورت معکوس از کلید S_2 جاری می‌شود. در این بازه خازن، مدار تشدید نقش منبع ولتاژ را ایفا می‌کند.



شکل ۲-۲۰ حالت ۳ که S_0 خاموش و S_1 روشن است

□ حالت ۴: از t_3 تا t_4

در لحظه t_3 کلید S_2 خاموش می‌شود و جریان تشدید از طریق دیود هرز گرد D_1 جاری می‌شود. در این فرایند تلفات کلید زنی اندکی بر روی کلید به وجود می‌آید ولی به‌جای آن تلفاتی در هنگام روشن شدن نداریم. در این حالت نیاز به دیودهایی با زمان بازیابی سریع نداریم. بعد از زمان t_4 فرایند تکرار شده و به حالت ۱ برمی‌گردیم.



شکل ۲-۲۱ حالت ۴ که در کلید خاموش است و جریان از طریق دیود S_0 جاری است

۲-۳- کنترل گرم کن القایی

خروجی گرم کن القایی باید کنترل شود تا مقدار مطلوب ما را فراهم آورد. به عنوان مثال در یک اجاق القایی خانگی توان خروجی باید بین ۵۰ وات ۳/۵ کیلووات قابلیت کنترل داشته باشد. یکی از روش‌های کنترل خروجی در گرمایش القایی روش کنترل فرکانس [۲۱] است. در یک گرم کن القایی با بار سری با افزایش فرکانس بالاتر از فرکانس تشدید، توان انتقالی کاهش می‌یابد. با این روش می‌توان توان خروجی را کنترل نمود. در این روش از مدولاسیون موج مربعی با سیکل وظیفه^۱ ثابت و فرکانس متغیر برای کنترل خروجی اینورتر استفاده می‌شود. اشکال این روش این است که در فرکانس‌های خیلی بالا و خیلی پایین تر از فرکانس تشدید، تلفات افزایش می‌یابد. برای رفع این مشکل روش‌هایی مدولاسیون دیگری از جمله حذف ولتاژ نامتقارن^۲ (AVC) و مدولاسیون چگالی پالس^۳ (PDM) معرفی شده است.

در روش مدولاسیون چگالی پالس تنظیم خروجی به صورت تغییر در فواصل تأمین جریان بار انجام می‌شود به عبارت دیگر خروجی کلید زنی با یک پالس فرکانس پایین AND شده و به کلیدها اعمال می‌شود. مزیت این روش سادگی در پیاده‌سازی و تلفات پایین آن است. در این روش به دلیل قطع و وصل شدن جریان می‌تواند باعث ایجاد فلیکر در توان‌های بالا شود.

یکی دیگر از روش‌های کنترل در گرمایش القایی روش مد جریان ناپیوسته^۴ (DCM) است. در این روش کلید زنی بر روی کلید زمانی انجام می‌شود که جریان عبوری از آن صفر است. در این روش از تغییر زمان‌های مرده^۵ برای دستیابی به خروجی مطلوب استفاده می‌شود [۲۲]. این روش از بازده بالاتری نسبت به روش‌های دیگر برخوردار است ولی بیشتر در توان‌های پایین تر از ۰/۵ کیلووات از آن استفاده می‌شود. در شکل ۲-۲۲ بازده روش‌های کنترلی ارائه شده با هم مقایسه شده است [۳].

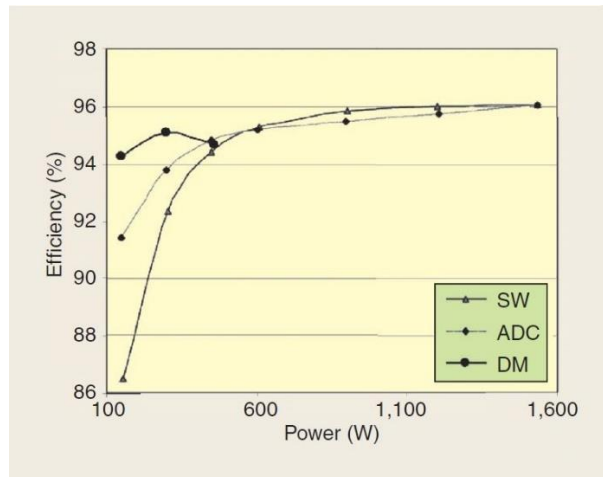
¹ Duty Cycle

² Asymmetrical Duty Cycle

³ Pulse Density Modulation

⁴ Discontinuous Mode Control

⁵ Dead Time



شکل ۲-۲۲ بازده روش‌های مختلف کلید زنی در برابر توان [۳]

در مرجع [۲۳] با استفاده از کنترل مستقیم فاز دیجیتال کلید زنی یک اینورتر تشدید را کنترل کرده است. در این مقاله با استفاده از بازخورد جریان خروجی اینورتر و به دست آوردن زاویه جریان، توان خروجی و کلید زنی اینورتر کنترل شده است. اطلاع از زاویه جریان برای توان‌های مختلف برای رسیدن به حالت کلید زنی نرم و حالت‌های کلید زنی جریان صفر و ولتاژ صفر می‌تواند بسیار کاربردی باشد. در این مرجع برای پیاده‌سازی مدولاتور و کنترل‌کننده از ادوات منطقی برنامه پذیر استفاده شده است.

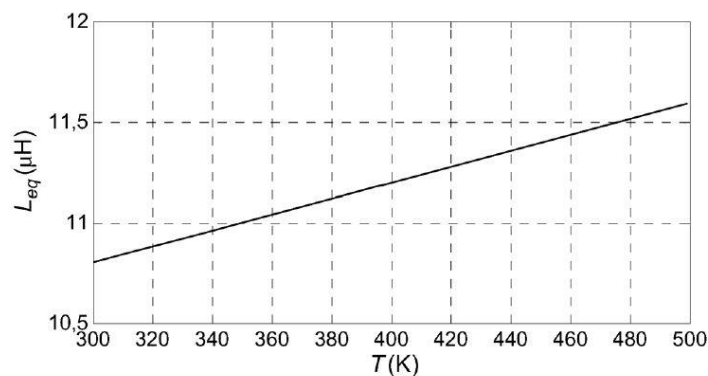
در مرجع [۲۴] یک مدولاتور با پالس غیرمتقارن معرفی و ادعا شده که این مدولاتور دارای بازده بهتری نسبت به مدولاتورهای با پالس متقارن برای ردیابی فرکانس کلید زنی و کنترل آن در گرم کن القایی است. در مرجع [۲۵] یک مدولاتور برای استفاده در اینورترهای نیم پل و پل کامل که بر پایه FPGA است معرفی شده، سپس کنترل‌های مربوط به آن بررسی شده است. از مدولاتور معرفی شده در این مقاله می‌توان برای اهداف گرمایش القایی استفاده نمود.

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در زمینه گرمایش القایی مطرح است کنترل توان حرارتی خروجی است. روش‌های مختلفی برای این کار وجود دارد. دو روش مرسوم برای تولید توان مطلوب خروجی روش فرکانس ثابت و روش تغییر فرکانس است. در مرجع [۲۶] از روش فرکانس ثابت استفاده شده است. فرکانس و سیکل وظیفه برای اینورتر کلاس E به صورتی که کلید زنی نرم در آن اتفاق بیفتد تنظیم شده سپس سیگنال کلید زنی با سیگنال کنترلی خروجی کنترلر است AND می‌شود به این ترتیب خروجی مطلوب به دست می‌آید. در مرجع [۲۱] سیگنال خروجی

کنترلر به یک واحد تولیدکننده سیگنال کلید زنی تبدیل می‌شود. خروجی این واحد به صورت فرکانس کلید زنی ظاهر می‌شود. این واحد در مرجع [۲۷] طراحی شده و جزئیات آن به طور کامل بررسی شده است. با بالا رفتن فرکانس کلید زنی و به تبع آن شار مغناطیسی، تلفات جریان ادی افزایش می‌یابد، در نتیجه با تغییر فرکانس کلید زنی می‌توان توان حرارتی جسم را تنظیم کرد.

۲-۴- اندازه‌گیری و کنترل دما

برای کنترل حرارت در هر سیستم تولید گرما، به اندازه‌گیری دما نیاز است. روش‌های بسیار متنوعی برای اندازه‌گیری دمای یک جسم وجود دارد. این روش‌ها را می‌توان به طور کلی به روش‌های تماسی و غیر تماسی تقسیم‌بندی کرد. روش‌های غیر تماسی به دلیل مزایایی چون اندازه‌گیری دماهای بسیار بالا و سرعت زیاد پاسخ گزینه‌های بهتری برای اندازه‌گیری دما در سیستم‌های گرمایش القایی هستند. همچنین استفاده از این روش‌ها در اجاق‌های القایی باعث ایجاد ساختاری شکل‌تر و کاربرپسند می‌گردد. از این رو بهتر است در این سیستم‌ها از روش اندازه‌گیری غیر تماسی استفاده شود. در مرجع [۲۸] یک حسگر دمای غیر تماسی برای اندازه‌گیری دما به صورت غیر تماسی برای کاربرد گرمایش القایی طراحی و معرفی شده است. در مرجع فوق از یک سیم‌پیچ به عنوان یک القاگر برای اندازه‌گیری دما استفاده شده است. این مرجع نشان می‌دهد که با افزایش دمای یک جسم رسانا که در داخل میدان مغناطیسی سیم‌پیچ قرار دارد اندوکتانس سیم‌پیچ به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۲-۲۳ تغییرات مقدار اندوکتانس در برابر تغییرات دما

در شکل ۲-۲۳ تغییرات اندازه اندوکتانس یک سیم‌پیچ نمونه در برابر افزایش دمای یک بار که روی آن قرار دارد، نشان داده شده است. در این مرجع از یک مدار نوسان‌ساز استفاده شده که سلف موردنظر یکی از اجزای آن می‌باشد. تغییر فرکانس تولیدشده توسط این مدار نوسان‌ساز نشان‌دهنده‌ی تغییرات اندوکتانس سلف موردنظر است. این روش خوبی برای اندازه‌گیری دمای یک جسم است، ولی دو اشکال بزرگ دارد. در این روش شیب‌خط تغییرات اندوکتانس به ماده و شکل جسم بستگی دارد و باید برای هر جسم به صورت جداگانه اندازه‌گیری شود. اشکال دوم روش ارائه شده این است که برای اندازه‌گیری تغییرات دمای هر جسم باید دمای اولیه آن با یکی دیگر از روش‌های تماسی یا غیر تماسی اندازه‌گیری شود.

روش دیگر اندازه‌گیری غیر تماسی دمای جسم، اندازه‌گیری میزان تابش فروسرخ جسم است. در مرجع [۲۹] اندازه‌گیری دما توسط تابش مادون‌قرمز بر روی یک گرم‌کن القایی انجام شده است. طبق قانون بولتزمن طول‌موج تابش الکترومغناطیسی یک جسم در اثر افزایش دما کاهش می‌یابد. با اندازه‌گیری طول‌موج تابیده شده از جسم می‌توان دمای آن را به دست آورد. در این مرجع از یک حسگر مادون‌قرمز برای اندازه‌گیری تابش مادون‌قرمز جسم استفاده شده است. این روش مناسب‌ترین روش اندازه‌گیری دما اجسام بدون اتصال فیزیکی است ولی نسبت به رنگ و ماده سازنده جسم حساس است و این می‌تواند باعث کاهش دقت اندازه‌گیری شود. در ادامه درباره‌ی این روش بیشتر بحث خواهد شد.

۲-۵- مزایای استفاده از گرمایش القایی

فناوری تولید گرما به وسیله القای الکترومغناطیسی به دلیل مزایای زیادی که نسبت به سایر روش‌های ایجاد حرارت دارد، بسیار محبوب شده و محبوبیت آن در حال گسترش است. از جمله این مزایا می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۹، ۳۰].

۲-۵-۱- سرعت بالا در ایجاد حرارت

گرمایش القایی به دلیل تولید گرمای مستقیم در قطعه باعث کاهش چشمگیر تلفات گرمایی می‌شود و همچنین در این حالت اینرسی گرمایی نیز از بین می‌رود و همین باعث سرعت بالا در تولید گرما می‌شود.

۲-۵-۲- بازده بالا

استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت جدید و طراحی بهینه‌ی القاگرها باعث شده که گرم‌کن‌های القایی مدرن بازده بسیار بالا حتی در مواردی بالای ۹۰٪ را داشته باشند و به دلیل عدم تماس بین القاگر و قطعه می‌توان به راحتی به دماهای بسیار بالادست یافت.

۲-۵-۳- کنترل حرارت

یک سیستم گرمایش القایی را می‌توان با طراحی یک مبدل، القاگر و کنترل کننده به صورت دقیق کنترل نمود و توان حرارتی موردنظر را از آن دریافت کرد. همچنین می‌توان با روش‌های نوین دمای جسم موردنظر را به حد مطلوب رساند.

۲-۵-۴- پاکیزگی و امنیت بالا

گرمایش القایی به دلیل تولید گرما به‌طور مستقیم در هدف و پایین بودن دما در اطراف جسم می‌تواند از آسیب دیدن مواد اطراف آن جلوگیری کند و به دلیل استفاده نکردن از سوخت‌های فسیلی می‌تواند بسیار پاک و تمیز باشد.

۲-۶- کاربردهای گرمایش القایی

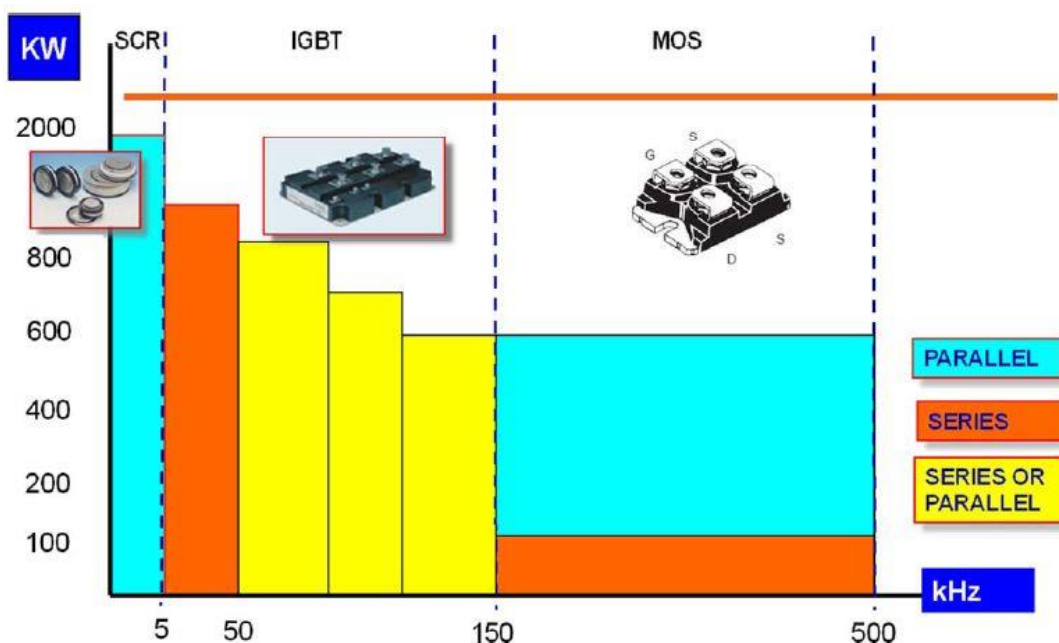
به دلیل بازده بسیار بالا و گرمایش کنترل شده، گرمایش القایی در بسیاری از موارد کاربردهای فراوانی پیدا کرده است. از جمله‌ی این موارد می‌توان به استفاده در وسایل خانگی [۳۱]، صنعت و پزشکی اشاره کرد.

۲-۶-۱- کاربردهای صنعتی

شاید بتوان گفت که اولین موارد استفاده از گرمایش القایی در صنعت بوده است. موارد صنعتی استفاده از گرمایش القایی بسیار زیاد و متنوع است ولی مهم‌ترین موارد آن‌ها شامل کوره‌های القایی، جوشکاری القایی، صنایع بسته‌بندی و... اشاره نمود.

قدیمی‌ترین کاربرد صنعتی گرمایش القایی، استفاده از آن برای ذوب کردن فلزات است. در اوایل قرن بیستم کوره‌های القایی برای ذوب کردن فلزات به وجود آمدند [۲]. بعد از آن سیستم‌های گرمایش القایی در صنایع هوافضا و اتومبیل‌سازی توسعه پیدا کردند. دلیل استفاده از گرمایش القایی در صنعت بازده بالا، سرعت بالا، گرمایش کنترل شده و بهبود کیفیت فرآیند تولید است.

بر اساس کاربرد، فرکانس کاری سیستم‌های گرمایش القایی صنعتی از چند هرتز تا صدها کیلوهرتز متغیر است. ادوات نیمه‌رسانای مورد استفاده در گرمایش القایی صنعتی به این صورت است: تریستور تا فرکانس ۳ کیلوهرتز و توان چندین مگاوات، IGBT تا فرکانس ۱۵۰ کیلوهرتز و توان ۳ مگاوات، ماسفت برای فرکانس‌های بالاتر تا صدها کیلوهرتز و توان حداکثر ۵۰۰ کیلووات. در شکل ۲-۲۴ موارد کاربرد ادوات نیمه‌رسانا بر اساس فرکانس و توان کاری نشان داده شده است [۹]. در مرجع [۳۲] از گرمایش القایی برای سخت‌سازی محیط خارجی فلزات استفاده شده است همچنین در این مرجع یک روش کنترل جامع برای استفاده از گرمایش القایی باهدف سخت‌سازی فلزات بر پایه مدولاسیون PDM معرفی شده است.



شکل ۲-۲۴ موارد استفاده از ادوات نیمه‌رسانا توان و فرکانس کاری [۹]

در مرجع [۳۳] یک اینورتر صنعتی ۱۰۰ کیلووات و فرکانس ۵۰ کیلوهرتز با بار تشدید سری باهدف تولید گرمایش القایی معرفی شده است. در این اینورتر برای تنظیم توان خروجی از روش کنترل شیفت فاز استفاده شده است. این روش کنترل که بر پایه تطبیق بار فرکانس متغیر استوار است به کنترل‌کننده اجازه می‌دهد که در تمام شرایط بار در حالت کلید زنی نرم و ولتاژ صفر باشد. در این مرجع از ساختار اینورتر تمام پل برای به وجود آوردن جریان فرکانس بالا استفاده شده است. معمولاً در کاربردهای توان بالا و صنعتی از ساختار اینورتر تمام پل استفاده می‌شود. با ترتیب اتخاذ شده در این مرجع و روش کنترلی ارائه شده قابلیت اطمینان سیستم فوق افزایش پیدا کرده. در انتها اعتبار روش ارائه شده توسط نتایج آزمایشگاه تأیید شده است.

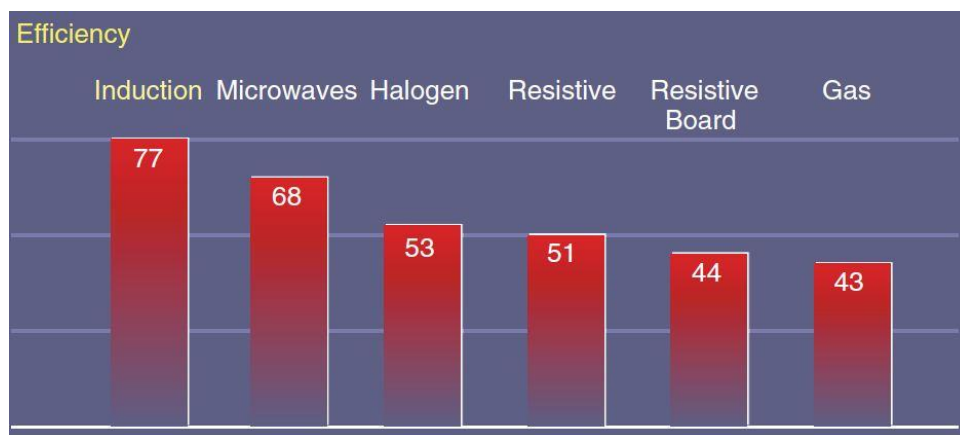
مرجع [۳۴] از یک روش کلید زنی متفاوت به نام روش کلید زنی خود نوسانی قابل تنظیم^۱ باهدف کنترل اینورتر تشدید موازی استفاده کرده است. در صورت وقوع اتصال کوتاه دربار جریان لحظه‌ای بسیار زیادی توسط اینورتر کشیده می‌شود. بدین منظور در این مرجع از یک اینورتر منبع جریان استفاده شده است. در صورت استفاده از اینورترهای تشدید به دلیل تغییرات

^۱ Tunable Self-Oscillating

میزان اندوکتانس سیم‌پیچ اصلی که در اثر تغییر شکل هندسی بار، دمای قطعه و وجود یا عدم وجود قطعه به وجود می‌آید باید دارای سیستم‌های تنظیم اینورتر تشدیدی^۱ باشند. روش‌های مختلفی برای این کار به وجود آمده که معروف‌ترین آن حلقه‌ی قفل فاز (PLL) است. مرجع فوق روشی را ارائه داده که در آن از تکنیک کلید زنی خود نوسانی استفاده شده است. سرانجام نتایج بر روی یک سیستم آزمایشگاهی پیاده‌سازی شده است.

۲-۶-۲- کاربردهای خانگی

از جمله کاربردهای گرمایش القایی استفاده از آن به‌عنوان اجاق القایی در منازل است. اجاق‌های القایی به دلایلی همچون زیبایی، ایمنی، نداشتن آلودگی، بازده بالا و همچنین سرعت زیاد در تولید گرما امروزه بسیار محبوب گشته‌اند و استفاده از آن‌ها در منازل رایج شده و در حال گسترش است [۲، ۳]. در شکل ۲-۲۵ بازده اجاق القایی با سایر روش‌های تولید گرما برای آشپزی مقایسه شده است [۳۵]. مطابق با مطالعات انجام‌شده مرجع [۳۱]، اولین مرجعی است که از گرمایش القایی درزمینه‌ی آشپزی بهره برده است. در این مقاله به یک سیستم گرمایش القایی خانگی اشاره شده و به چالش‌های پیش رو برای گسترش آن و مزایای استفاده از آن پرداخته شده است.



شکل ۲-۲۵ مقایسه بازده در روش‌های مختلف تولد گرما برای آشپزی [۹]

¹ Resonant Inverter Tuning

تا این تاریخ که ۴۳ سال از ارائه آن می‌گذرد اجاق‌ها القایی جای خود را در منازل باز کرده و کاربران زیادی دارند.

اجاق‌های القایی به دلیل کاربرد خاصی که دارند باید به نحوی طراحی شوند که ساختاری زیبا و شکیل داشته باشند و از طرفی از ایمنی بسیار بالایی برخوردار باشند. مسئله‌ی مهم دیگر در این ادوات قیمت مناسب و کاربرپسند بودن آن است. از این‌رو در این وسایل از القاگرهای تخت و از ساختار تک کلید یا نیم پل برای اینورتر آن استفاده می‌شود. فرکانس کاری اجاق‌های القایی به دلیل اینکه نباید نویز صوتی ایجاد کنند باید بالاتر از حد شنوایی انسان که ۲۰ کیلوهرتز است، باشد. در این کاربرد معمولاً فرکانس کلید زنی را در حدود ۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز انتخاب می‌کنند. توان اجاق‌های القایی از چند صد وات تا چند کیلووات متغیر است و معمولاً در آن‌ها از کلیدهای IGBT استفاده می‌شود. کنترل دما در این کاربرد ضروری به نظر می‌رسد. اخیراً ساختارهای جدید برای اجاق‌های القایی ارائه شده که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به ساختار چند سیم‌پیچ و اینورترهای چند شاخه برای اجاق‌های چند شعله اشاره کرد. برای تحقیقات در زمینه‌ی گرمایش القایی به یک مدل آزمایشگاهی برای پیاده‌سازی کنترل‌کننده، ساختار و بارهای مختلف نیاز است. در مرجع [۶] یک بستر آزمایش^۱ برای انجام آزمون‌های مربوط به گرمایش القایی طراحی و پیاده‌سازی شده است. این بستر آزمایش قابلیت پیاده‌سازی انواع ساختارهای اینورتر را دارا است و می‌توان انواع عملگرهای کنترلی را بروی آن انجام داد. به دلیل ساختار ماژولار این معماری و قابل تعویض بودن بخش‌های مختلف آن در صورت خرابی، از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار می‌باشد. همچنین در این مرجع برای آزمایش از یک FPGA استفاده شده و به جواب‌های مطلوب دست یافته است.

۲-۶-۳- کاربردهای پزشکی

امروزه از گرمایش القایی به دلیل سرعت بالا و پاکیزگی در پزشکی به صورت گسترده استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای گرمایش القایی در پزشکی تولید سریع گرما برای استریل کردن لوازم پزشکی و جراحی است که مهم‌ترین کاربرد گرمایش القایی در پزشکی و صنعت مهندسی پزشکی به شمار می‌رود.

¹ Test Bench

یکی از راه‌های درمان سرطان روش درمانی گرم‌زدگی^۱ یاخته‌های سرطانی است [۱, ۳۶]. در این روش با گرم کردن قسمت سرطانی تا دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد آن را دچار گرم‌زدگی کرده و از بین می‌برند. به دلیل گرمایش بدون اتصال^۲ و کنترل توان و دما، گرمایش القایی روش مناسبی برای تولید گرما در این درمان است. در این سیستم‌ها از اینوترهای تشدیدی موازی استفاده می‌شود. فرکانس کاری این سیستم‌ها از ۳۰۰ کیلوهرتز تا چند مگاهرتز می‌باشد. از این‌رو در اینوتر آن‌ها از کلیدهای ماسفت قدرت مخصوص با تحمل فرکانس کلید زنی بالا استفاده می‌شود. تحقیقات در این زمینه برای کنترل هرچه بهتر و دقیق‌تر دما بر روی قسمت سرطانی در حال انجام است.

¹ Hyperthermia

² Contact-less

فصل ۳ : مروری بر تراشه‌های FPGA و کاربرد آنها در الکترونیک قدرت

امروزه شاهد پیشرفت چشمگیری در مبدل‌های الکترونیک قدرت هستیم. مبدل‌های جدید توانایی انجام الگوریتم‌های کلید زنی پیچیده را دارند و می‌توانند از روش‌های کنترلی پیشرفته استفاده نمایند. تمام این پیشرفت‌ها بدون وجود ابزارهای برنامه پذیر^۱ ممکن نبود. این ابزارها می‌توانند برای کاربردهای مختلف پیکربندی شوند و الگوریتم‌های مختلفی را اجرا نمایند. در چند دهه‌ی اخیر قیمت این ادوات بسیار کاهش پیدا کرده و از سرعت بالایی در پردازش اطلاعات برخوردار شده‌اند. با استفاده از این ادوات پیاده‌سازی سیستم‌های بزرگ و پیچیده در مدت‌زمان کوتاه فراهم‌شده است.

ادوات برنامه پذیر به‌طور کلی شامل ریزپردازنده‌ها^۲، میکروکنترلرها^۳، پردازنده‌های سیگنال دیجیتال^۴ و تراشه‌های منطقی برنامه پذیر (FPGA) می‌باشند. امکان استفاده از این ادوات برای پیاده‌سازی در مبدل‌های الکترونیک قدرت وجود دارد. در این میان تراشه‌های FPGA به دلیل توانایی در انجام پردازش موازی، سرعت بالا در انجام عملیات، پشتیبانی قوی نرم‌افزاری، امکان پیاده‌سازی بر اساس سیستم بر روی تراشه^۵ و . . . در بین طراحان و مهندسان الکترونیک قدرت بسیار محبوب شده‌اند و هرروزه شاهد گسترش استفاده از آن‌ها هستیم. از این تراشه‌ها می‌توان به‌عنوان نمونه‌ی اولیه^۶ از کار استفاده کرد که بعد از رفع نقایص برای تولید انبوه طراحی را به مدارات مجتمع با کاربرد خاص^۷ تبدیل نمود. برای سهولت در طراحی سخت‌افزاری مدرن و به دلیل پیچیدگی زیاد در طراحی‌های بزرگ زبان‌های برنامه‌نویسی توصیف سخت‌افزار توسعه پیدا کرده‌اند که کار طراحی بر اساس FPGA را آسان نموده است.

۳-۱- سخت‌افزارهای برنامه پذیر

مدارات برنامه پذیر نقش مهمی را در طراحی‌های دیجیتال ایفا می‌کنند. این تراشه‌ها قابلیت این را دارند که برای کاربردهای مختلف برنامه‌ریزی شوند. این تراشه‌ها در ابتدا تنها قابلیت

1 Programmable Device
 2 Microprocessors
 3 Microcontrollers
 4 Digital Signal Processors (DSP)
 5 System On a Chip (SOC)
 6 Prototype
 7 Application Specified Integrated Circuit

پیاده‌سازی مدارات منطقی کوچک را داشتند ولی با پیشرفت فناوری ساخت ادوات نیمه‌رسانا امروزه حتی قابلیت پیاده‌سازی یک ریزپردازنده بر روی این ادوات میسر شده است. به‌طور کلی مدارات برنامه پذیر را می‌توان به سه دسته‌ی کلی به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد [۳۷]:

- حافظه‌های فقط خواندنی برنامه پذیر^۱ (PROM)
- افزاره‌های منطقی برنامه پذیر^۲ (PLD)
- آرایه‌های برنامه پذیر در میدان^۳ (FPGA)

هرکدام از این محصولات ظرفیت منطقی، سرعت، ساختار داخلی، کاربرد و قابلیت اطمینان منحصر به فردی دارند. در ادامه به بررسی این ادوات پرداخته خواهد شد.

۳-۱-۱- حافظه‌های فقط خواندنی قابل برنامه‌ریزی

این تراشه‌های برنامه پذیر شامل یک دیکدر و یک آرایه دوبعدی از سلول‌های حافظه‌ای‌اند. ورودی دیکدر آدرس یک سطر از داده قرار گرفته بر روی آرایه دوبعدی حافظه است. حافظه‌های PROM فقط یک‌بار قابل برنامه‌ریزی دارند و قابلیت پاک شدن ندارند. نوع دیگری از این حافظه‌ها پدید آمده‌اند که قابلیت پاک شدن اطلاعات و برنامه‌ریزی مجدد را دارند. این حافظه‌ها به نام حافظه فقط خواندنی قابل برنامه‌ریزی با قابلیت پاک شدن^۴ نام دارند که با نور فرابنفش می‌توان اطلاعات ذخیره‌شده بر روی آن را پاک کرده و برای برنامه‌ریزی مجدد آماده کرد. نوع دیگر این حافظه‌ها که EEPROM نام دارند را می‌توان با استفاده از سیگنال الکتریکی پاک کرد. کاربرد این ادوات بسیار متنوع است این حافظه‌ها مناسب‌ترین نوع حافظه برای پیاده‌سازی در سیستم‌های میکروپروسسوری‌اند چون اطلاعات ذخیره‌شده در آن‌ها با قطع برق از بین نمی‌رود. معمولاً برنامه‌ی میکروپروسسور بر روی این حافظه‌ها نگهداری می‌شوند.

¹ Programmable Read Only Memory

² Programmable Logic Devices

³ Field Programmable Gate Array

⁴ Erasable Programmable Read Only Memory

۳-۱-۲- ادوات منطقی برنامه پذیر (PLD)

ادوات منطقی برنامه پذیر مدارات مجتمعی شامل آرایه‌ای از گیت‌های منطقی‌اند که می‌توانند به صورت‌های مختلف پیکربندی شوند و توابع مختلف منطقی را با آن‌ها پیاده‌سازی کرد. مزیت این ادوات نسبت به حافظه فقط خواندنی قابل‌برنامه‌ریزی (PROM) این است که تعداد ورودی‌ها الزاماً برابر تعداد خطوط آدرس نیست و خروجی هم الزاماً برابر تعداد بیت‌های یک سطر نیست. در ضمن با این ادوات می‌توان مدارات منطقی ترتیبی را به‌آسانی پیاده‌سازی کرد. ادوات منطقی برنامه پذیر از لحاظ ظرفیت منطقی و سطح پیچیدگی مدار داخلی به دو دسته‌ی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۳۷].

- ادوات منطقی برنامه پذیر ساده^۱ (SPLD)

- ادوات منطقی برنامه پذیر پیچیده^۲ (CPLD)

ادوات منطقی برنامه پذیر ساده ارزان‌ترین و کوچک‌ترین قطعات برنامه پذیر هستند که می‌توانند معادل حداکثر ۲۰۰ گیت NAND را در خود جای دهند. این ادوات خود به دسته‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۳۷].

- PLA (Programmable Logic Array)

- PAL (Programmable Array Logic)

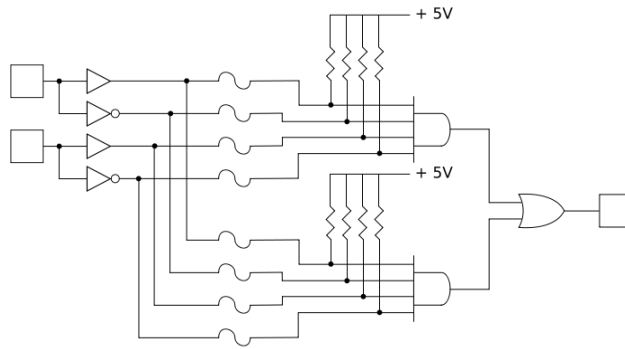
- GAL (Generic Array Logic)

- PLD (Programmable Logic Devices)

در شکل ۳-۱ ساختار یک بلوک افزاری منطقی برنامه پذیر ساده به نمایش درآمده است.

¹ Simple Programmable Logic Devices

² Complex Programmable Logic Devices



شکل ۱-۳ ساختار یک افزاره‌ی منطقی برنامه پذیر ساده [۳۷].

CPLD ها تراشه‌هایی با ظرفیت منطقی بالاتر نسبت به SPLD ها هستند. این تراشه‌ها را می‌توان در دسته‌ای بین FPGA ها و SPLD ها دسته‌بندی کرد. ظرفیت گیت‌های آن‌ها معمولاً بین ۲ تا ۶۴ برابر SPLD ها است. در جدول ۱-۳ مشخصات CPLD های خانواده XC95XX به نمایش درآمده است [۳۸].

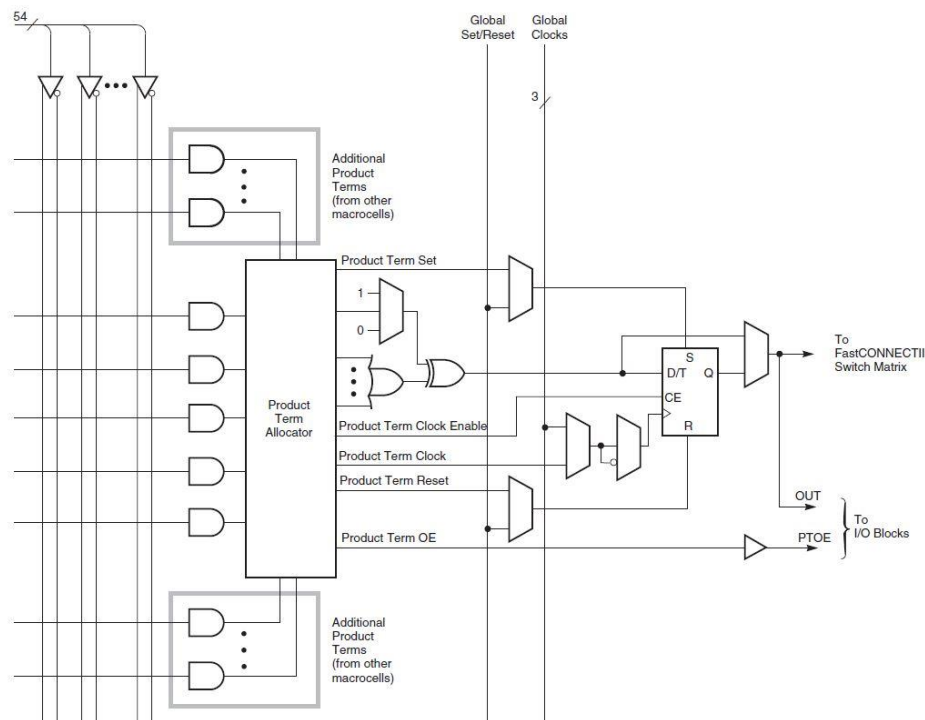
تراشه‌های CPLD از واحدهایی به نام ماکروسل^۱ تشکیل شده‌اند. این واحدها ساختاری مشابه با ساختار SPLD ها دارند و می‌توان معماری^۲ آن‌ها را مشابه با تراشه‌های GAL دانست. در شکل ۲-۳ یک ماکروسل از CPLD های شرکت Xilinx به نمایش درآمده است [۳۸].

جدول ۱-۳ مشخصات فنی CPLD های خانواده XC95XX شرکت Xilinx [۳۸]

| | XC9536XL | XC9572XL | XC95144XL | XC95288XL |
|---------------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| Macrocells | 36 | 72 | 144 | 288 |
| Usable Gates | 800 | 1,600 | 3,200 | 6,400 |
| Registers | 36 | 72 | 144 | 288 |
| T _{PD} (ns) | 5 | 5 | 5 | 6 |
| T _{SU} (ns) | 3.7 | 3.7 | 3.7 | 4.0 |
| T _{CO} (ns) | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.8 |
| f _{SYSTEM} (MHz) | 178 | 178 | 178 | 208 |

¹ Macrocell

² Architecture



شکل ۳-۲ ساختار یک ماکرو سل از خانواده XC95XX شرکت Xilinx [۳۸]

برخلاف تراشه‌های FPGA، CPLD نیازی به حافظه‌ی خارجی جهت نگهداری از برنامه ندارد و این می‌تواند به کاهش هزینه منجر شود. این تراشه‌ها به دلیل وجود ظرفیت منطقی مناسب و قیمت پایین گزینه‌ی خوبی برای کارهای کوچک محسوب می‌شوند.

۳-۱-۳- آرایه منطقی برنامه میدانی (FPGA)

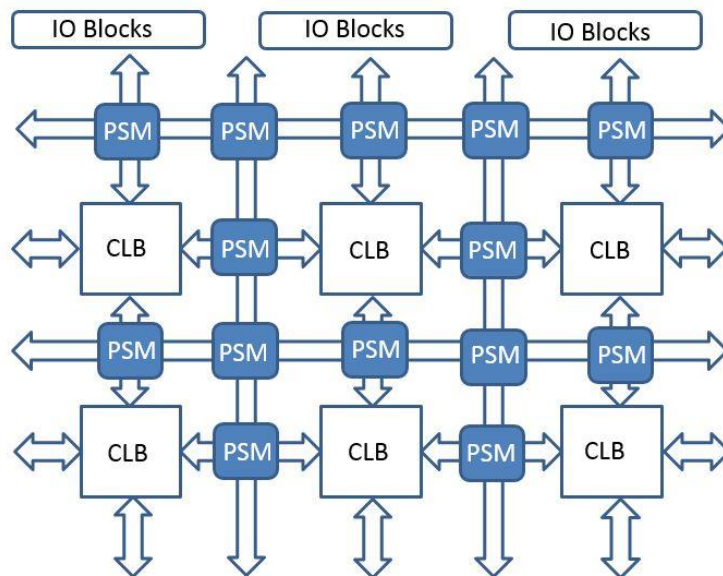
FPGA ها تراشه‌های منطقی برنامه پذیری هستند که بدون امکانات خاص قابل پیکربندی می‌باشند. این تراشه‌ها برای اولین بار توسط شرکت Xilinx در سال ۱۹۸۸ معرفی شدند [۳۷]. این مدارات مجتمع از ظرفیت منطقی بالایی برخوردار می‌باشند و می‌توانند برای کارهایی با مقیاس بزرگ استفاده شوند. استفاده از FPGA علاوه بر داشتن مزایای مدارات مجتمع سفارشی باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌شود. استفاده از FPGA با وجود زبان‌های توصیف سخت‌افزار بسیار ساده است به همین دلیل در حوزه‌های ماهواره، کنترل، کدگذاری و کدگشایی و الکترونیک قدرت کاربرد بسیار پیدا کرده است. در تراشه‌های FPGA امروزی بسیاری از بلوک‌های پرکاربرد

مانند بلوک‌های پردازنده سیگنال دیجیتال، حلقه قفل فاز، بلوک‌های ضرب کننده و . . . قرار داده شده است. به لطف پیشرفت نرم‌افزارهای ارائه شده توسط شرکت‌های سازنده FPGA و ظرفیت بالای منطقی این تراشه‌ها می‌توان یک یا چند پردازنده را به صورت هسته‌ی نرم^۱ به آسانی بر روی FPGA پیاده‌سازی کرد. معمولاً FPGAها بر اساس حافظه SRAM ساخته می‌شوند که این باعث از بین رفتن اطلاعات ذخیره شده بر روی آنها در اثر قطع برق می‌شود به این دلیل می‌بایست در کنار آنها از حافظه‌های ماندگار مانند Flash یا EEPROM استفاده کرد.

□ ساختار FPGA ها:

به صورت کلی تراشه‌های FPGA از سه بخش تشکیل شده‌اند .

- بلوک‌های منطقی قابل پیکربندی^۲ (CLB)
- بلوک‌های ورودی/ خروجی (I/O Blocks)
- ماتریس کلیدهای برنامه پذیر^۳ (PSM)



شکل ۳-۳ ساختار کلی تراشه‌های FPGA

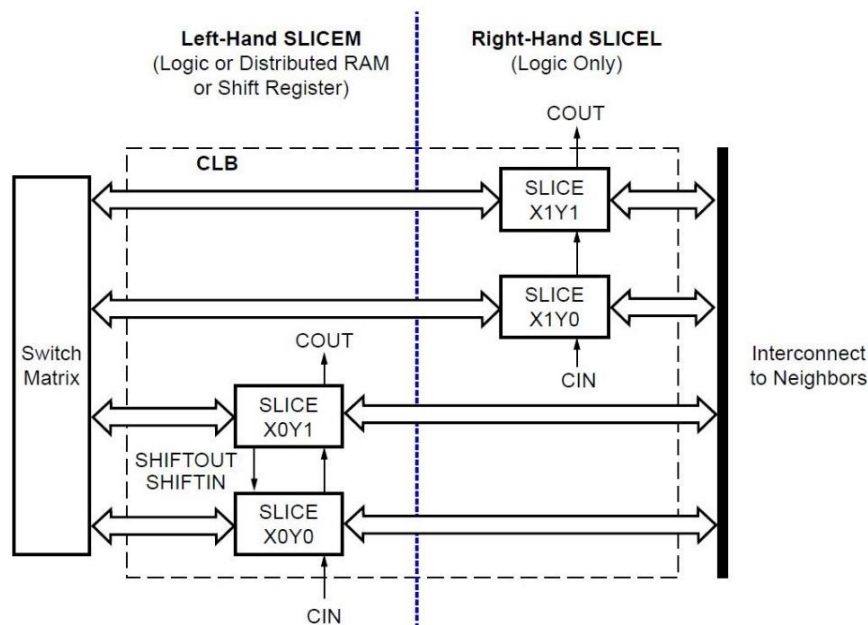
¹ Soft Core

² Configurable Logic Block

³ Programmable Switch Matrix

شکل ۳-۳ ساختار کلی FPGA را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود به‌صورت ساده تراشه‌های FPGA از تعدادی بلوک منطقی، بلوک‌های ورودی-خروجی و سیم‌کشی بین آن‌ها تشکیل شده است. بلوک‌های PSM ماتریسی از کلیدهای قابل‌برنامه‌ریزی‌اند که با روشن یا خاموش شدن آن‌ها می‌توان مسیرهای سیگنال بلوک‌های منطقی، حافظه‌ها، ورودی خروجی‌ها و ... را تعیین کرد. CLB‌ها بلوک‌های منطقی قابل‌برنامه‌ریزی هستند که معمولاً بر اساس جدول جست‌وجو^۱ (در FPGA های Xilinx) قابلیت پیاده‌سازی مدارات منطقی ترکیبی و ترتیبی را دارند. در شکل ۳-۴ ساختار یک CLB از خانواده Spartan3 به نمایش درآمده است [۳۹].

Slice‌ها واحدهای منطقی شامل جدول‌های جست‌وجو، گیت‌های منطقی، مالتی‌پلکسرها، حافظه‌ها و ... می‌باشند. این بلوک‌های منطقی به‌وسیله‌ی کاربر برنامه‌ریزی می‌شوند می‌توانند توابع منطقی مختلفی را پیاده‌سازی کنند. بیشتر FPGA های موجود در بازار بر اساس فناوری SRAM ساخته می‌شوند که این بدین معنی است که هر بار با قطع برق برنامه‌ی درون آن پاک‌شده و نیاز به برنامه‌ریزی دوباره دارند. برای رفع این مشکل در کنار FPGA ها حافظه‌هایی از نوع EEPROM قرار می‌دهند تا در صورت قطع برق به‌صورت خودکار برنامه‌ریزی شود.



شکل ۳-۴ معماری CLB های سری Spartan3 شرکت Xilinx [۳۹]

¹ Lookup Table

□ مزایای استفاده از FPGA در طراحی‌ها

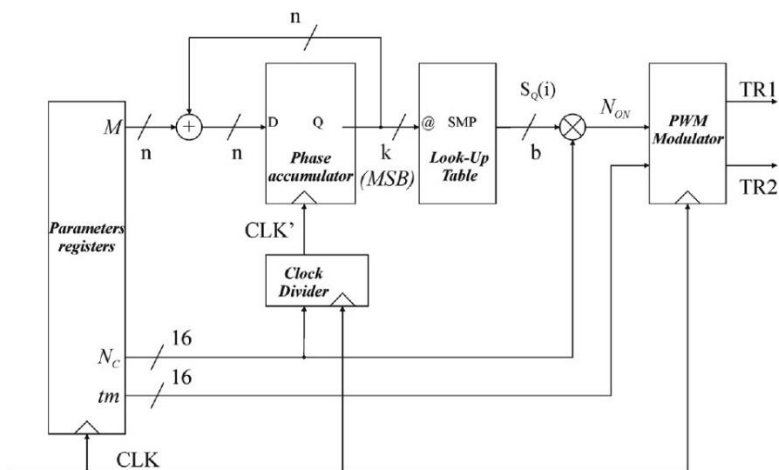
- طراحی بر اساس FPGA به دلیل ساختار خاص آن دارای مزایای زیر هست.
- ♦ طراحی بر اساس SoC که باعث کوچک شدن و فشردگی مدار می‌شود به این صورت که اجزاء یک سیستم به‌جای اینکه بر روی PCB قرار گیرند در فقط یک تراشه چیده و پیکربندی می‌شود. همچنین بر اساس این طراحی می‌توان به‌سادگی سیستم‌های چندپردازنده‌ای و چند هسته‌ای را پیاده‌سازی کرد.
- ♦ در داخل FPGA مدارات ضرب کننده سیگنال کلاک وجود دارد که باعث می‌شود بتوان فرکانس کلاک مورد نیاز را به میزان دلخواه بالا برد و این‌گونه سرعت پردازش را بیشتر نمود.
- ♦ استفاده از فناوری SRAM باعث می‌شود که بتوان FPGA را به تعداد نامحدود بار برنامه‌ریزی کرد و بعد از آزمایش‌ها طرح نهایی را بر روی EEPROM قرارداد. این قابلیت برای کارهای آزمایشگاهی نیاز به آزمون‌های زیاد و توسعه و اشکال‌زدایی برنامه دارد بسیار مناسب به نظر می‌رسد.
- ♦ در FPGA بلوک‌های زیادی تعبیه شده که می‌توان از آن‌ها به‌جای اختصاص دادن بخشی از سخت‌افزار به آن‌ها از این بلوک‌های آماده استفاده کرد.
- ♦ ساختار FPGA به‌گونه‌ای است که می‌توان پردازش را به‌صورت موازی انجام داد که سرعت عمل آن را بیشتر از سیستم‌هایی بر پایه DSP ها و ریزپردازنده‌ها است همچنین قیمت آن بسیار پایین‌تر از سیستم‌های گران‌قیمت بر پایه ریزپردازنده و DSP است.
- ♦ FPGA بستر بسیار خوبی برای ساخت نمونه‌ی اولیه و انجام آزمون‌های موردنیاز برای تولید انبوه یک محصول می‌باشد که در صورت به ثمر رسیدن آن هزینه‌ی تولید محصول چندین برابر کاهش می‌یابد.
- ♦ پایه‌های خروجی FPGA می‌توانند بر اساس استانداردهای مختلف پیکربندی شوند.

۳-۲- مروری بر کارهای انجام‌شده بر اساس FPGA در الکترونیک قدرت

در این بخش نگاهی گذرا به بخشی از کارهای انجام‌شده در زمینه‌ی استفاده از FPGA ها در مبدل‌های الکترونیک قدرت و گرمایش القایی پرداخته می‌شود.

در مرجع [۴۰] به ارتقا عملکرد یک اینوتر با لینک DC تشدید برای رسیدن عملکرد کلید زنی بر روی جریان صفر پرداخته‌شده است. از FPGA برای پیاده‌سازی الگوریتم کلید زنی استفاده‌شده است. الگوریتم کلید زنی به صورت ماشین حالت محدود^۱ که به راحتی بر روی FPGA قابل پیاده‌سازی است طراحی شده است. با استفاده از تراشه FPGA و به کار بردن مدار تشدید برای اتصال DC با فرکانس تشدید ۱۲۰ کیلوهرتز برای ایجاد موج سینوسی به THD نزدیک به ۰.۵٪ به دست آمده است. نتایج به صورت عملی اثبات‌کننده‌ی ادعا است.

مرجع [۲۵] به طراحی یک مدولاتور بر پایه FPGA برای انواع روش‌های مدولاسیون‌های مناسب در زمینه‌ی استفاده از مبدل‌های تشدید معرفی و مورد مطالعه قرار گرفته است. می‌توان از این مدولاتور جهت ساخت سریع نمونه‌ی اولیه و پیاده‌سازی انواع روش‌های مدولاسیون مورد استفاده در گرمایش القایی و مبدل‌های استفاده کرد. در شکل ۳-۵ شماتیک برنامه FPGA پیاده‌سازی شده در مرجع [۲۵] به نمایش درآمده است.



شکل ۳-۵ مدولاتور پیاده‌سازی شده در مرجع [22]

¹ Finite State Machine

معمولاً در پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ها نیاز به اندازه‌گیری سیگنال آنالوگ داریم برای اندازه‌گیری این سیگنال و تبدیل آن به مقادیر دیجیتالی برای پردازش نیاز به مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال داریم. روش‌های مختلفی برای پیاده‌سازی این مبدل‌ها ارائه شده. مرجع [۲۲] نوع خاصی از مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال را برای اندازه‌گیری توان در مبدل گرمایش القایی به کار برده است. این مبدل‌ها که مبدل‌های سیگما دلتا نام دارند سرعت بالایی در تبدیل دارند و در مراجع مختلف به تفضیل به تشریح ساختار آن پرداخته شده است. در مرجع فوق از FPGA برای پیاده‌سازی بخش دیجیتالی این مبدل استفاده شده است.

مرجع [۴۱] به طراحی یک کنترل‌کننده حلقه بسته برای استفاده در مبدل تشدیدی پرداخته است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای FPGA ها پیاده‌سازی کنترل‌کننده بر روی آنهاست. همچنین می‌توان حلقه‌های قفل فاز و مواردی که نیاز به پردازش بسیار سریع دارند را مستقل از بخش‌های دیگر و بدون صرف توان پردازشی پیاده‌سازی کرد.

مرجع [۲۷] یک مدولاتور بر پایه FPGA معرفی کرده که از بلوک کنترل‌کننده ساعت FPGA برای پیاده‌سازی انواع مدولاسیون پهنای پالس^۱ ارائه شده است. طبق مطالعات انجام شده بسیاری از مراجع از این مرجع برای پیاده‌سازی بلوک تولیدکننده PWM در طراحی‌ها استفاده شده است.

شاید بتوان گفت که مهم‌ترین کاربردی که مبدل‌های الکترونیک قدرت دارند در راه‌اندازی و درایو موتورهای الکتریکی است. الگوریتم‌های زیادی برای کلید زنی در این مبدل‌ها به وجود آمده‌اند که معروف‌ترین آن‌ها مدولاسیون فضای برداری^۲ می‌باشد. امروزه اینورترهای چند سطحی به دلیل مزایایی که دارند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند و پژوهش بر روی آن‌ها در حال انجام است. مرجع [۴۲] یک ماژول VHDL برای انجام کلید زنی با قابلیت انتخاب تعداد سطح و تعداد فاز طراحی نموده است. این طراحی به آسانی بر روی FPGA قابل پیاده‌سازی است. همچنین مرجع [۴۳] اینورتر چند سطحی منبع جریان بر اساس FPGA ارائه کرده است.

اخیراً شاهد استفاده از روش‌های کنترلی جدید در مبدل‌های الکترونیک قدرت هستیم. کنترل پیش‌بین یکی از جدیدترین روش‌های کنترلی ارائه شده می‌باشد. در مرجع [۴۴] کنترل

^۱ Pulse Width Modulation

^۲ Space Vector Modulation

مبدل ماتریسی به روش تبدیل مستقیم با استفاده از FPGA ارائه شده است. در مبدل ارائه شده تمامی محاسبات مربوط به تبدیل و کنترل به‌طور کامل در FPGA پیاده‌سازی شده است.

فصل ۴ : طراحی مبدل و مراحل ساخت

همان‌طور که در فصول گذشته بیان گردید هر سیستم گرمایش القایی از بخش‌های مختلفی تشکیل شده که وظایف مشخصی را بر عهده دارند. قسمت‌های قبلی این گزارش به صورت خلاصه به معرفی این بخش‌ها پرداخته است. در این فصل به‌طور مفصل به طراحی بخش‌های مختلف کار پرداخته می‌شود. در هر بخش مراحل ساخت و کارهای انجام‌شده توضیح داده شده و کارکرد هر قسمت به تفصیل بیان می‌گردد. نتایج ساخت و شبیه‌سازی در فصل بعد مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

۴-۱- القاگر و بار

همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد این بخش مهم‌ترین بخش یک سیستم گرمایش القایی است. این قسمت وظیفه‌ی القای جریان بر روی بار و تولید گرما را بر عهده دارد. سیم‌پیچ‌های استفاده‌شده در این بخش به‌طور کلی دو شکل استوانه‌ای و مسطح تقسیم می‌شوند. سیم‌پیچ مورد استفاده در این گزارش یک سیم‌پیچ مسطح است. تحلیل این سیم‌پیچ‌ها به دلیل شکل هندسی و معادلات الکترومغناطیس پیچیده کار دشواری است به این دلیل برای تحلیل این‌گونه مسائل از نرم‌افزارهای اجزا محدود^۱ استفاده می‌شود. در این بخش به‌طور خاص به تحلیل القاگر ساخته‌شده در آزمایشگاه و تأثیر بارهای مختلف بر آن پرداخته می‌شود.

می‌دانیم که با افزایش فرکانس چگالی جریان الکتریکی در سطح خارجی رسانا بیشتر می‌شود. این اثر به اثر پوستی معروف است عمق نفوذ در هادی‌ها طبق رابطه (۴-۱) به دست می‌آید [۱۰]. در کاربردهای گرمایش القایی به دلیل وجود جریان با فرکانس بالا عمق پوسته کاهش می‌یابد. کاهش عمق پوسته مقاومت الکتریکی القاگر را افزایش داده و باعث کاهش بازده و گرم شدن بیش از حد القاگر می‌شود.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r\omega}} \quad (۴-۱)$$

برای رفع این مشکل راه‌های مختلفی پیشنهاد شده است. از جمله این راه‌ها استفاده از

^۱ Finite Element

هادی‌های رشته‌رشته است. این هادی‌ها که به سیم لیتز^۱ معروف‌اند از به هم تابیده شدن تعداد زیادی رشته سیم به وجود می‌آیند. استفاده از سیم لیتز باعث کاهش چشمگیر تلفات در سیستم گرمایش القایی می‌شود به این دلیل در ساخت سیم‌پیچ از هادی رشته‌رشته استفاده شده است. در این پروژه از القاگر موجود در آزمایشگاه استفاده شده که به منظور اهداف گرمایش القایی تا جریان ۲۰ آمپر طراحی شده است. از آنجایی که معادلات حاکم بر این نوع اشکال هندسی پیچیده است برای این منظور به جای روش تحلیلی از روش اجزاء محدود استفاده می‌شود. مشخصات القاگر مورد استفاده در آزمایشگاه در جدول ۴-۱ آورده شده است. در شکل ۴-۱ تصویر القاگر استفاده شده در این پایان‌نامه نشان داده شده است.

جدول ۴-۱ پارامترهای القاگر مورد استفاده قرار گرفته

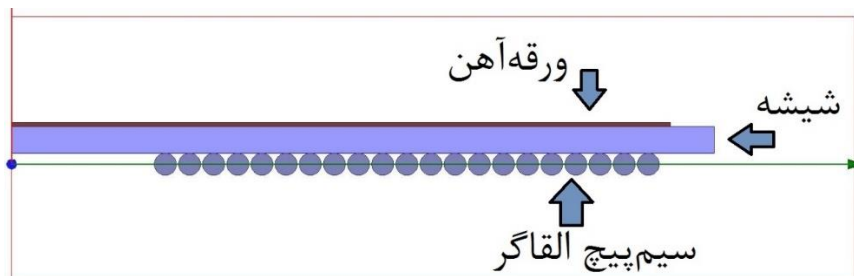
| پارامتر | مقدار |
|------------------------------|---------------------|
| تعداد دور (N) | ۲۱ |
| ضخامت شیشه | 6mm |
| قطر سیم مورد استفاده | 5mm |
| تعداد رشته‌های تابیده شده | ۷۰ رشته |
| اندوکتانس معادل (L_{eq}) | 85 – 25 μH |
| مقاومت معادل (R_{eq}) | 0.02 – 4.5 Ω |
| قطر داخلی spiral | 35mm |

¹ Litz wire

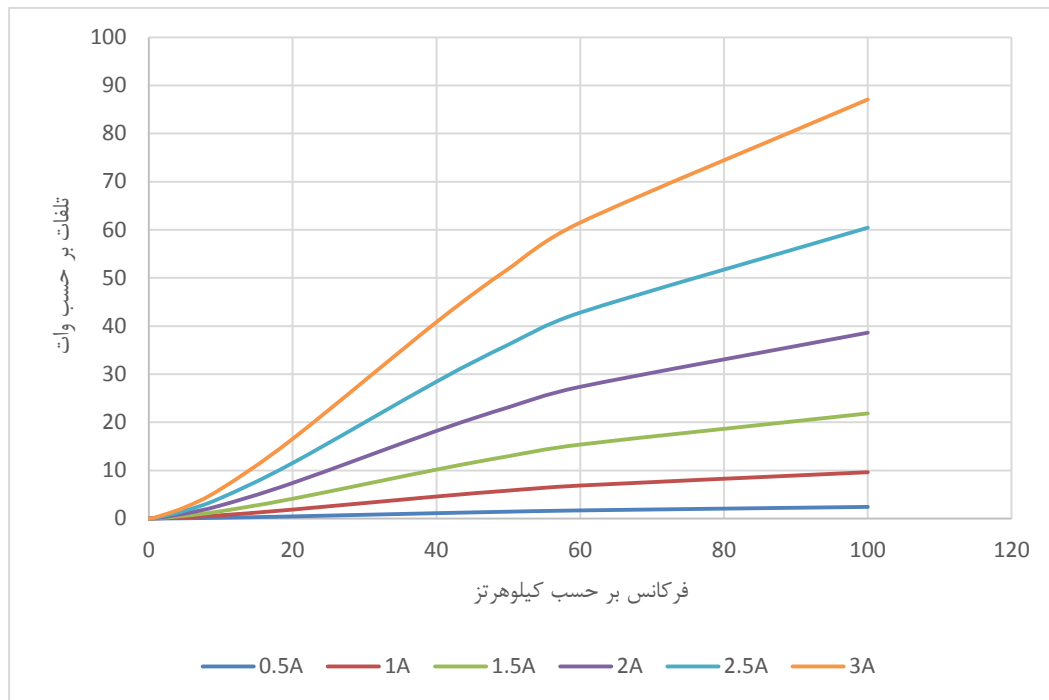


شکل ۴-۱ القاگر مورد استفاده برای گرم‌کن القایی

برای شبیه‌سازی توان انتقالی توسط القاگر به بار از نرم‌افزار اجزاء محدود Ansys Maxwell 16 استفاده شده است. باریک ورقه آهن به ضخامت 1mm و قطر 30cm در نظر گرفته شده. ضریب نفوذپذیری مغناطیسی آهن 4000 در نظر گرفته شده است. برای نزدیک‌تر شدن جواب به مقدار واقعی فرض شده که چگالی جریان در مقطع سیم به صورت یکنواخت توزیع شده است. در شکل 4-2 برش عرضی سیم پیچ و بار را برای شبیه‌سازی دوبعدی در Maxwell 16 نشان می‌دهد. توان حرارتی تولید شده توسط سیستم برای جریان‌های مختلف در فرکانس‌های مختلف شبیه‌سازی شده است.



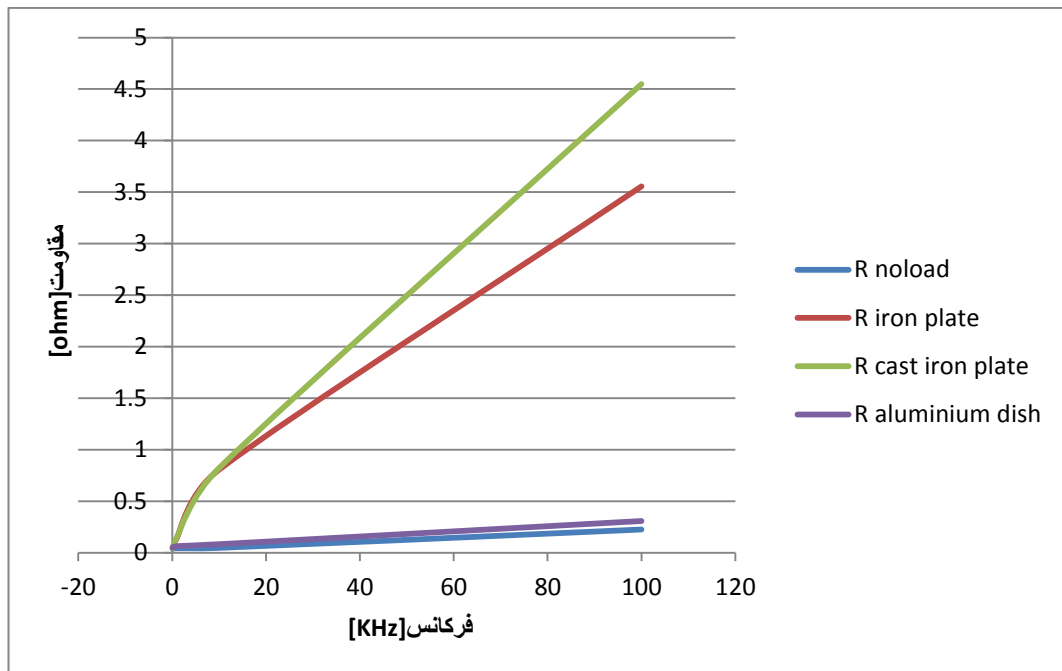
شکل 4-2 شکل هندسی مسئله پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار اجزاء محدود



شکل ۳-۴ توان حرارتی منتقل شده به بار به ازای فرکانس و جریان‌های مختلف

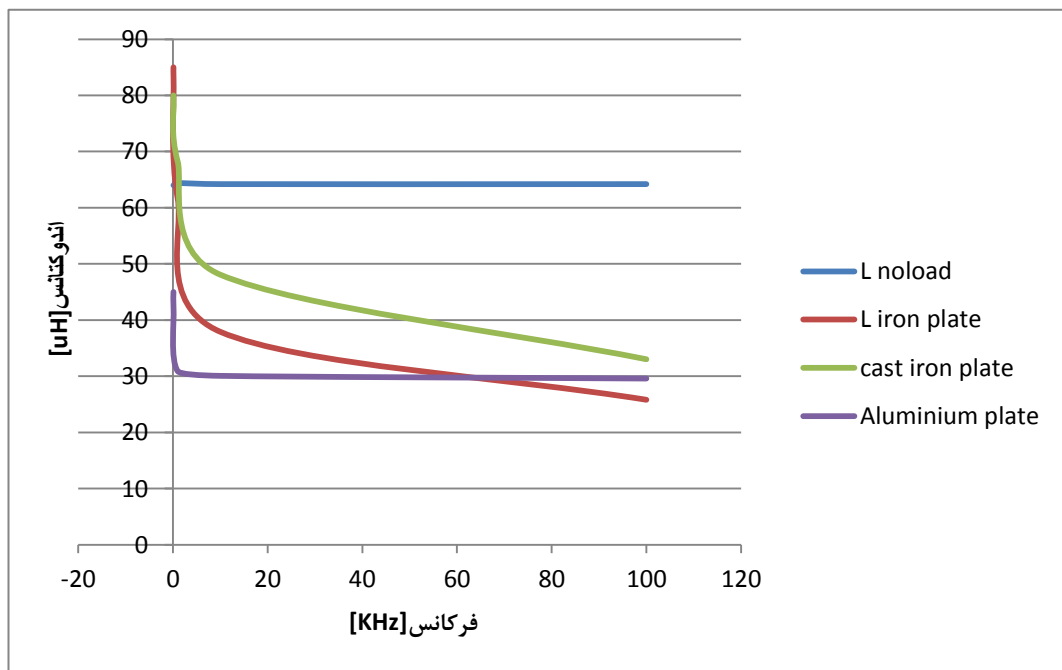
در شکل ۳-۴ توان خروجی بر روی بار ورقه آهنی با ضخامت 1mm در گستره فرکانسی ۱۰ هرتز تا ۱۰۰ کیلوهرتز به نمایش درآمده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس به دلیل کاهش عمق پوسته توان حرارتی تولیدی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش جریان القاگر سبب افزایش جریان گردابی القا شده بر روی القاگر می‌شود و باعث افزایش تلفات جریان ادی می‌گردد. به دلیل محدودیت‌های موجود در این پروژه حداکثر فرکانس کلید زنی ۶۰ کیلوهرتز انتخاب شده است.

مقادیر اندوکتانس و مقاومت سیم‌پیچ در حالت بی‌باری و انواع بار توسط RLC متر در گستره فرکانسی ۱۰۰ هرتز تا ۱۰۰ کیلوهرتز اندازه‌گیری شده است. بارهای مورد آزمایش در این بخش عبارت‌اند از ورقه آهنی با قطر 30cm، دیسک چدنی با قطر 22cm و ضخامت 4mm، قابلمه آلومینیومی. در شکل ۴-۴ مقدار تغییر مقاومت معادل در برابر تغییر فرکانس نشان داده شده است.



شکل ۴-۴ مقدار مقاومت معادل به ازای فرکانس‌های مختلف

در شکل ۴-۵ تغییر مقدار اندوکتانس در برابر تغییر فرکانس به ازای بارهای مختلف به نمایش درآمده‌است.



شکل ۴-۵ تغییر میزان اندوکتانس نسبت به تغییر فرکانس

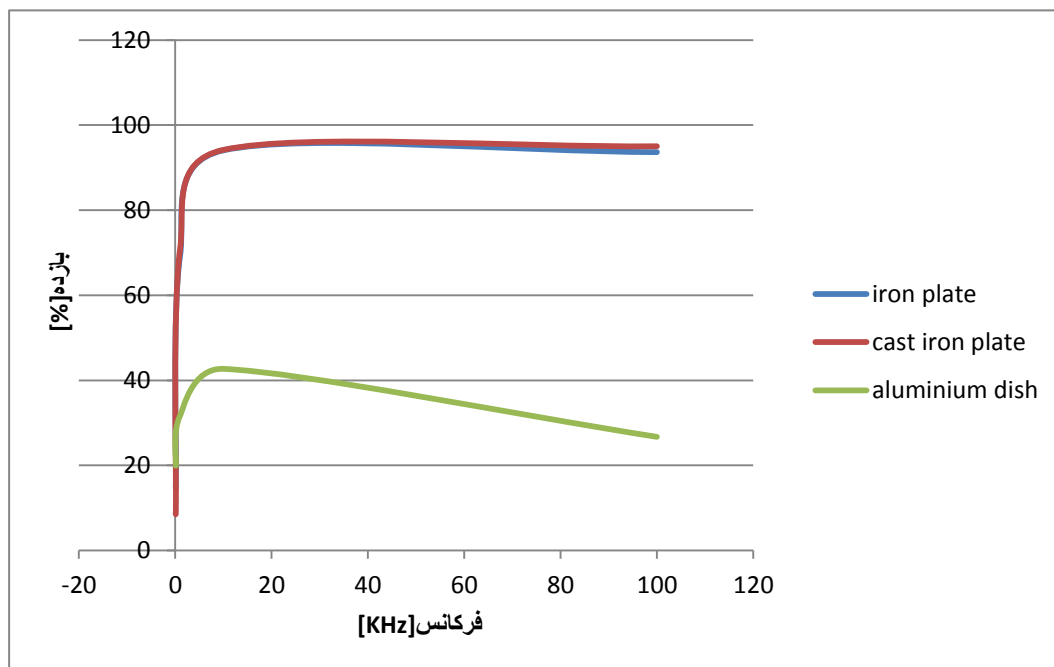
طبق نمودارهای آورده شده مشخص است که میزان اندوکتانس معادل در برابر زیاد شدن فرکانس افت می‌کند. می‌توان بازده القاگر را طبق رابطه (۲-۴) زیر به دست آورد.

$$\eta_{electrical} = \frac{R_W}{R_W + R_C} \quad (۲-۴)$$

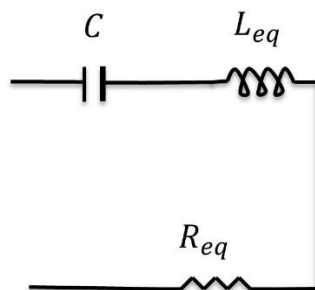
$\eta_{electrical}$: بازده الکتریکی کوئل

طبق رابطه‌ی (۲-۴) و شکل ۴-۴ می‌توان بازده الکتریکی القاگر را به ازای فرکانس‌های مختلف به دست آورد.

بر طبق شکل ۴-۶ بیشترین بازده ورقه آهنی در فرکانس ۳۰ کیلوهرتز اتفاق می‌افتد که مقدار آن حدود ۹۵٪ است. بیشترین بازده برای ظرف آلومینیومی حدود ۴۴٪ است که این نشان می‌دهد که آلومینیوم بار مناسبی برای سیم‌پیچ نیست و علت آن نفوذپذیری مغناطیسی کم آن است. بر اساس نمودار بهترین بار از نظر بازده دیسک چدنی است. بازده سیم‌پیچ در فرکانس کمتر از ۱ کیلوهرتز کم است و دلیل آن کم بودن R_W است.



شکل ۴-۶ بازده سیم‌پیچ به ازای بارهای مختلف در برابر فرکانس



شکل ۴-۷ مدار تشدید سری به‌کاررفته در مدار گرم‌کن القایی

۴-۲- مدار تشدید

به دلیل بالا بودن فرکانس کلید زنی توان تلف‌شده بر روی سیم‌پیچ‌ها بالا بوده و باعث داغ شدن بیش‌ازحد کلیدهای قدرت می‌شود. این مشکل را می‌توان با استفاده از مبدل‌های تشدید برطرف کرد به‌طوری‌که القاگر به‌عنوان سلف تشدید عمل کند. برای این پروژه از یک مبدل تشدید سری استفاده شده است.

به دلیل توان پایین مبدل و کنترل ساده‌تر بر روی فرکانس کلید زنی و همچنین پایداری بیشتر در این پایان‌نامه از مدار تشدید سری استفاده شده است. شکل ۴-۷ مدار تشدید سری به‌کاررفته در گذارش را نشان می‌دهد. L_{eq} سلف معادل و R_{eq} مقاومت معادل القاگر می‌باشد. فرکانس تشدید مدار RLC سری از رابطه (۴-۳) محاسبه می‌شود.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C}} \quad (۴-۳)$$

با توجه به شکل ۴-۵ می‌توان اندوکتانس القاگر را در فرکانس‌های مختلف تعیین کرد و بر اساس آن خازن تشدید را تعیین کرد. برای رسیدن به شرایط کلید زنی نرم ZVS، فرکانس کلید زنی باید بیشتر از فرکانس تشدید مدار تانک باشد. از طرفی به دلیل ایجاد نویز صوتی فرکانس سیستم باید بالاتر از حد شنوایی انسان یعنی ۲۰ کیلوهرتز انتخاب شود. در این پروژه فرض شده که فرکانس تشدید مدار تانک برابر ۲۵ کیلوهرتز است در این فرکانس اندوکتانس القاگر حدود 35 میکروهنری است. طبق آن خازن تشدید طبق رابطه (۴-۳) برابر ۱/۱۵۷۹ تعیین می‌شود که طبق استانداردهای مقدار خازن، آن را برابر ۱ میکرو فاراد در نظر می‌گیریم.

طبق تعریف ضریب کیفیت^۱ نسبت میزان توان راکتیو توان اکتیو در مدارات دارای القاگر است. مقدار Q را می‌توان از رابطه‌ی (۴-۴) تعیین کرد.

$$Q = \frac{|P_{rect}|}{P_{act}} = \frac{\omega_0 L_{eq}}{R_{eq}} = \frac{1}{\omega_0 C R_{eq}} \quad (۴-۴)$$

$$Q = \frac{1}{2\zeta} \quad (۵-۴)$$

همچنین مقدار Q میرایی مدار تشدید را تعیین می‌کند. طبق شکل ۴-۴ مقدار مقاومت معادل در فرکانس ۲۵ کیلوهرتز برابر ۱/۵ اهم است و با توجه به پایین بودن مقاومت معادل سری خازن^۲ که در حدود ۰/۰۱ است، فقط مقاومت معادل سیم‌پیچ در نظر گرفته شده است. طبق رابطه (۴-۴) و (۵-۴) می‌توان مقدار ضریب کیفیت مدار تشدید را تعیین کرد.

$$Q = 3.66 \quad (۶-۴)$$

بر اساس مقادیر تعیین شده می‌توان امپدانس ورودی مدار تشدید را تعیین کرد. امپدانس ورودی مدار تشدید بر اساس فرکانس کلید زنی طبق روابط (۴-۷) تا (۴-۱۱) به دست می‌آید. [۱۷]

$$Z = R \left(1 + jQ_L \left(\frac{\omega_0}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_0} \right) \right) \quad (۷-۴)$$

$$|Z| = R \sqrt{1 + Q_L^2 \left(\frac{\omega_0}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2} \quad (۸-۴)$$

$$\psi = \arctan \left\{ Q_L \left(\frac{\omega_0}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_0} \right) \right\} \quad (۹-۴)$$

^۱ Quality Factor

^۲ Equivalent Series Resistance

$$R = Z \cos \psi \quad (10-4)$$

$$X = Z \sin \psi \quad (11-4)$$

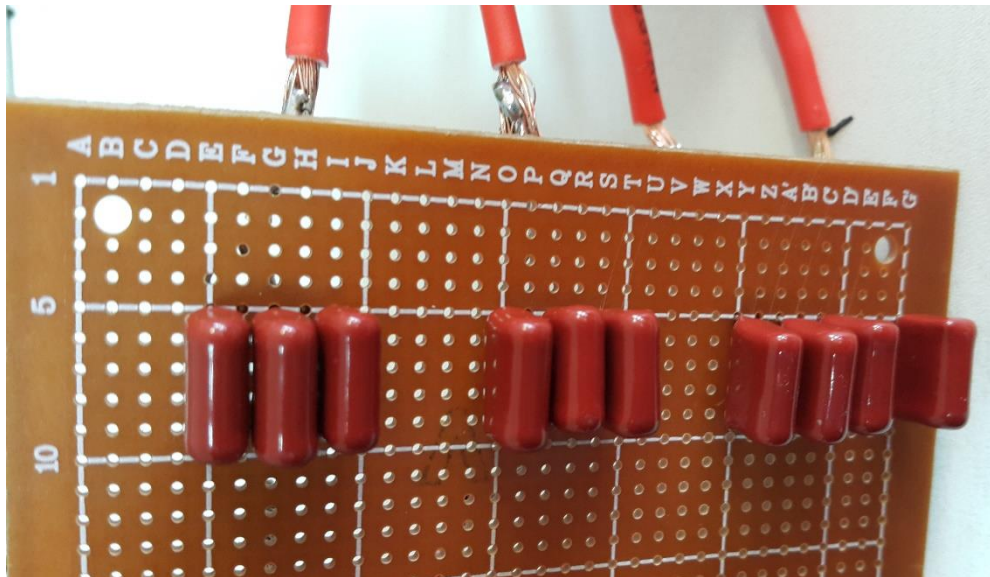
در معادلات (10-4) و (11-4)، ψ برابر زاویه امپدانس است.

طبق روابط و مقادیر به‌دست‌آمده برای مقاومت معادل، ضریب کیفیت و فرکانس تشدید می‌توان معادله‌ی امپدانس به ازای فرکانس کلید زنی را به دست آورد.

$$Z = (1/5 - j5/49 \left(\frac{2/4646 \times 10^{10} - \omega^2}{1/57 \times 10^5 \times \omega} \right)) \quad (12-4)$$

معادله‌ی امپدانس بر اساس فرکانس کلید زنی طبق رابطه‌ی (12-4) به دست می‌آید. خازن تشدید سری در نظر گرفته‌شده برای این پروژه، از نوع پلی‌استر با ولتاژ 400 ولت انتخاب شده است. بر اساس روابط ولتاژ دوسر خازن تشدید در مدارات تشدید سری Q برابر ولتاژ دو سر بار است بدین منظور خازن از نوع ولتاژ بالا در نظر گرفته‌شده است. دلیل دوم برای انتخاب این نوع خازن تحمل تغییر جهت ولتاژ است. سومین دلیل برای در نظر گرفتن خازن پلی‌استر تحمل ولتاژ بالاتر و قیمت پایین‌تر آن نسبت به خازن‌ها با کارایی یکسان در این نوع پروژه‌ها (از جمله خازن‌های MKT) است.

در شکل 4-8 بانک خازنی به‌کاررفته در مدار تشدید سری پروژه به نمایش درآمده. خازن معادل 1 میکرو فاراد به‌صورت 10 عدد خازن 0/1 میکرو فاراد موازی باهم ساخته‌شده است و دلیل آن کم کردن مقاومت معادل سری خازن و همچنین امکان تغییر خازن معادل برای تنظیم فرکانس تشدید برای فرکانس‌های کلید زنی مختلف است.



شکل ۴-۸ بانک خازنی به کاررفته در پروژه

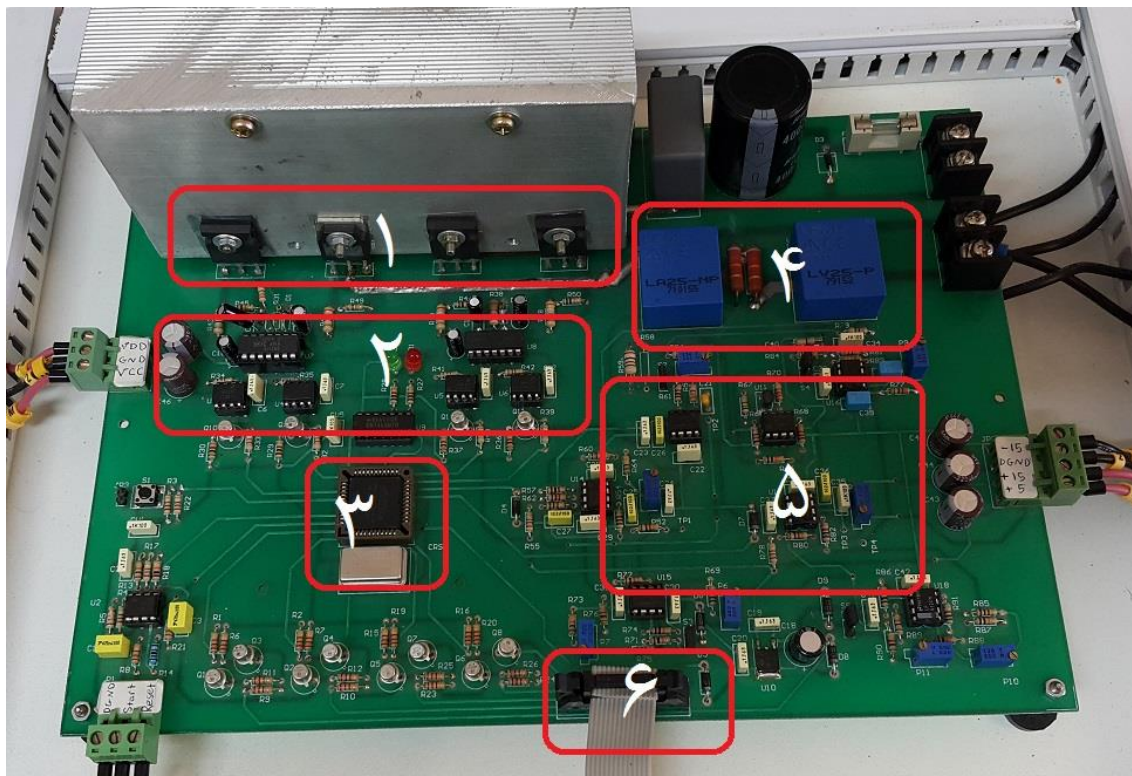
۴-۳-اینورتر

اینورتر استفاده شده در این پروژه یک اینورتر تک فاز تمام پل است. سنسورهای ولتاژ و جریان بر روی برد اینورتر تعبیه شده است. در شکل ۴-۹ برد اینورتر استفاده شده به نمایش درآمده است. اینورتر نشان داده شده شامل بخش‌های زیر است:

۱- **کلیدهای قدرت**: کلیدهای قدرت استفاده شده در این قسمت از نوع IGBT بوده و به صورت آرایش پل کامل چیده شده است. بخش تغذیه DC اینورتر پس از فیلتر شدن توسط خازن به لینک DC اینورتر متصل شده است.

۲- **مدارات ایزوله کننده و راه انداز**: در این بخش سیگنال ورودی از مدار قدرت ایزوله شده و جریان مورد نیاز IGBT توسط مدارات راه انداز تأمین می‌شود.

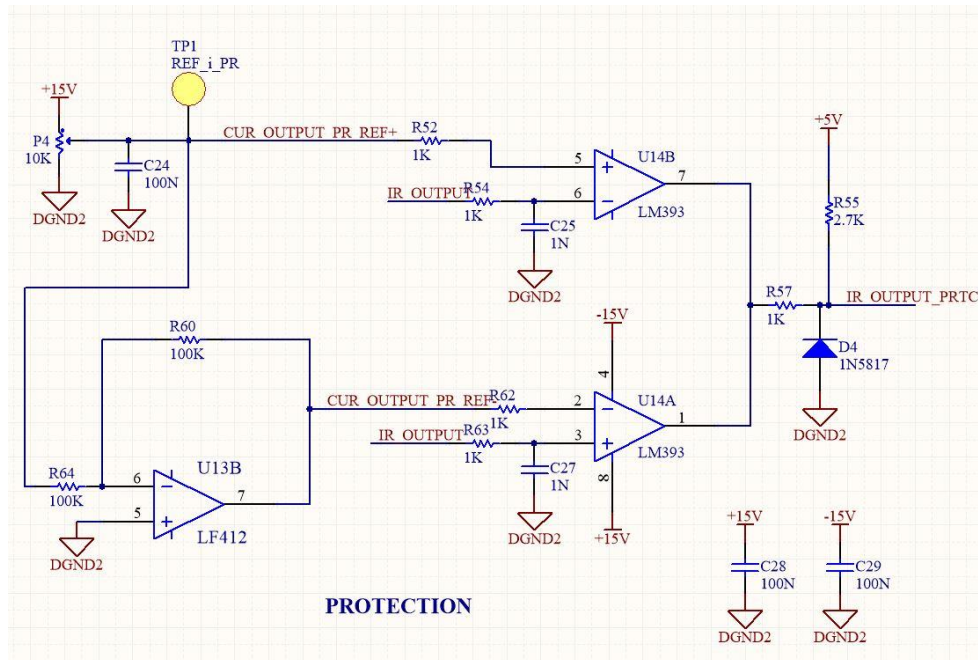
۳- **مدار منطقی برنامه پذیر**: مدار منطقی برنامه پذیر استفاده شده در این پروژه از نوع CPLD است. وظیفه‌ی این مدار حفاظت اینورتر در برابر اضافه ولتاژ و اضافه جریان است. وظیفه‌ی دیگر CPLD هم‌زمان‌سازی پالس‌ها و قرار دادن زمان مرده برای حفاظت اینورتر در برابر اتصال کوتاه در یک شاخه اینورتر است.



شکل ۴-۹: برد اینورتر استفاده‌شده در پروژه‌ی گرمایش القایی

۴- حسگر ولتاژ و جریان : حسگر ولتاژ و جریان در خروجی اینورتر قرار داده شده است. حسگرهای ولتاژ و جریان استفاده‌شده از نوع LA-25 و LV-25 است. خروجی این حسگرها برای تقویت و آشکارسازی به مدارات تقویت‌کننده عملیاتی منتقل می‌شود.

۵- مدارات تقویت‌کننده و حفاظت اینورتر: خروجی حسگرهای ولتاژ و جریان برای تقویت به مدارات تقویت‌کننده عملیاتی منتقل و به خروجی ارسال می‌گردد. هم‌چنین جریان و ولتاژ خروجی با یک مقدار مرجع مقایسه شده و در صورت تجاوز از این مقدار جریان یا ولتاژ خطا تلقی شده و خروجی به CPLD برای قطع فرمان کلید زنی از کلیدهای قدرت ارسال می‌گردد. در شکل ۴-۱۰ مدار مقایسه‌گر برای حفاظت در برابر اضافه جریان به نمایش درآمده است.



شکل ۴-۱۰ مدار حفاظت اینورتر در برابر اضافه جریان

۶- ورودی خروجی اینورتر : ورودی پالسها و همچنین خروجی سنسورها و سیگنالهای خطا توسط سوکت IDC می تواند به پردازنده یا FPGA متصل می شود.

۴-۴- حسگر و کنترل دما

معمولاً در کاربردهای تولید حرارت کنترل دمای قطعه کار اهمیت بالایی دارد. هدف اصلی این پروژه کنترل دما در یک گرم کن القایی است. کنترل دما شامل خواندن دما از حسگر، اجرای الگوریتم کنترل دما و اعمال فرمان کلید زنی است. در این بخش به قسمت کنترل دما و اعمال فرمان اجرای کلید زنی به FPGA پرداخته می شود.

۴-۴-۱- حسگر دما

حسگرهای دمای موجود معمولاً بر اساس دو روش دما را حس می کنند.

♦ **روش تماسی^۱** : در این روش حسگر به قطعه موردنظر چسبانده شده و مقدار دمای

حسگر به سیگنال الکتریکی تبدیل شده و به کنترل کننده ارسال می شود.

♦ **روش غیر تماسی^۲** : در این روش بدون اتصال حسگر به جسم، دمای جسم

اندازه گیری می شود.

در کاربردهای کنترل دما معمولاً از روش های تماسی برای اندازه گیری دما استفاده می شود. مزیت این روش ها قیمت پایین و سادگی در استفاده است. در این روش ها دمای حسگر با دمای قطعه کار برابر است و در دماهای بالا ممکن است به حسگر آسیب وارد شود. دومین اشکال استفاده از این روش ها این است که هر بار با تغییر قطعه کار، باید از جسم جدا شوند و در صورت استفاده از جسم واسط باعث ایجاد اینرسی حرارتی زیاد و عدم پاسخ گویی سریع و صحیح سیستم می شود. در کاربردهای گرمایشی القایی در اطراف قطعه کار شاهد میدان مغناطیسی قوی با فرکانس بالا هستیم که این می تواند بر عملکرد حسگر تماسی تأثیر گذاشته و عدم پاسخ گویی صحیح را به همراه داشته باشد.

برای رفع مشکلات ذکر شدم در این پروژه از روش غیر تماسی اندازه گیری دما استفاده شده است. روش های اندازه گیری غیر تماسی مختلفی وجود دارد از میان این روش ها اندازه گیری تابش فروسرخ تابیده شده از جسم به دلیل سادگی، سرعت بالا در اندازه گیری و دقت بالا محبوبیت بیشتری نسبت به روش های دیگر دارد.

می دانیم هر جسم با دمای بالاتر از صفر مطلق از خود تشعشع الکترومغناطیس تابش می کند. طبق قانون استفان – بولتزمن میزان انرژی تابش شده از جسم با توان چهارم دمای جسم رابطه مستقیم دارد و با توجه به میزان تابش از یک طول موج مشخص می توان دمای جسم را به دست آورد.

حسگر دمای استفاده شده در این پایان نامه از نوع MLX90614 است که دمای جسم را از طریق تابش مادون قرمز متصاعد شده از جسم اندازه گرفته و به صورت یک مقدار خام ۱۶ بیتی به صورت دیجیتال و از طریق ارتباط SM-Bus و یا PWM به میکروکنترلر منتقل می کند. در شکل ۴-۱۱ تصویر حسگر استفاده شده در پروژه به نمایش درآمده است.

¹ Contact method

² Non-Contact method

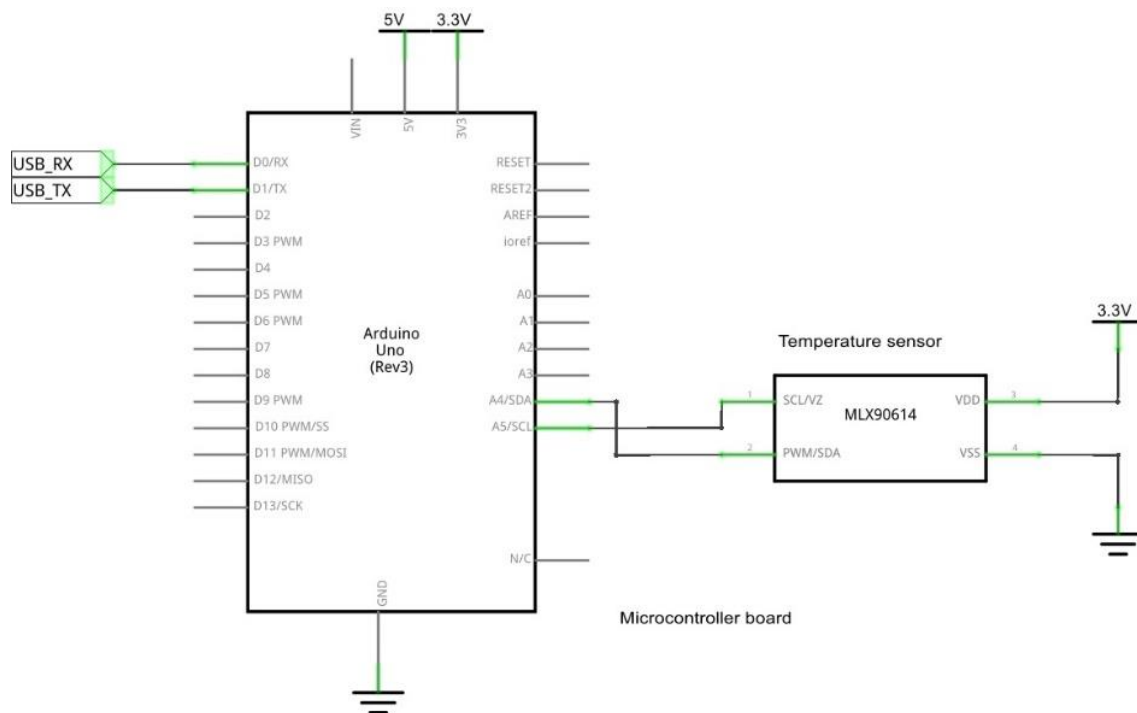


شکل ۴-۱۱ حسگر دمای MLX90614 [۴۵]

محدوده اندازه‌گیری دما از ۴۰- تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد برای اندازه‌گیری دمای خود حسگر و از دمای ۷۰- تا ۳۸۰ درجه برای شیء روبروی حسگر می‌باشد. دقت اندازه‌گیری دمای در حدود ۰/۵ درجه سانتی‌گراد با توجه به مشخصات ذکر شده در دیتاشیت محصول است [۴۵]. این حسگر انتخاب مناسبی برای استفاده در کاربردهای گرمایش القایی به‌خصوص در موارد استفاده خانگی است بدین منظور در این پروژه از این حسگر استفاده شده است. خروجی حسگر به‌صورت دیجیتال بوده و از ارتباط SW-Bus برای انتقال داده استفاده می‌کند. پروتکل SM-Bus نوع اصلاح شده ارتباط I2C است که توسط شرکت اینتل ارائه شده است. کدگشایی اطلاعات فرستاده شده توسط حسگر توسط برد میکرو واپایشگر Arduino UNO که یک برد بر پایه میکرو واپایشگر AVR است انجام می‌پذیرد. اطلاعات توسط واسط^۱ ارتباط دوسیمه^۲ خوانده شده و توسط برنامه نوشته شده برای میکروکنترلر کدگشایی می‌شود. شماتیک سخت‌افزار پیاده‌سازی شده به‌صورت شکل ۴-۱۲ است.

^۱ Interface

^۲ Two wire interface (TWI)

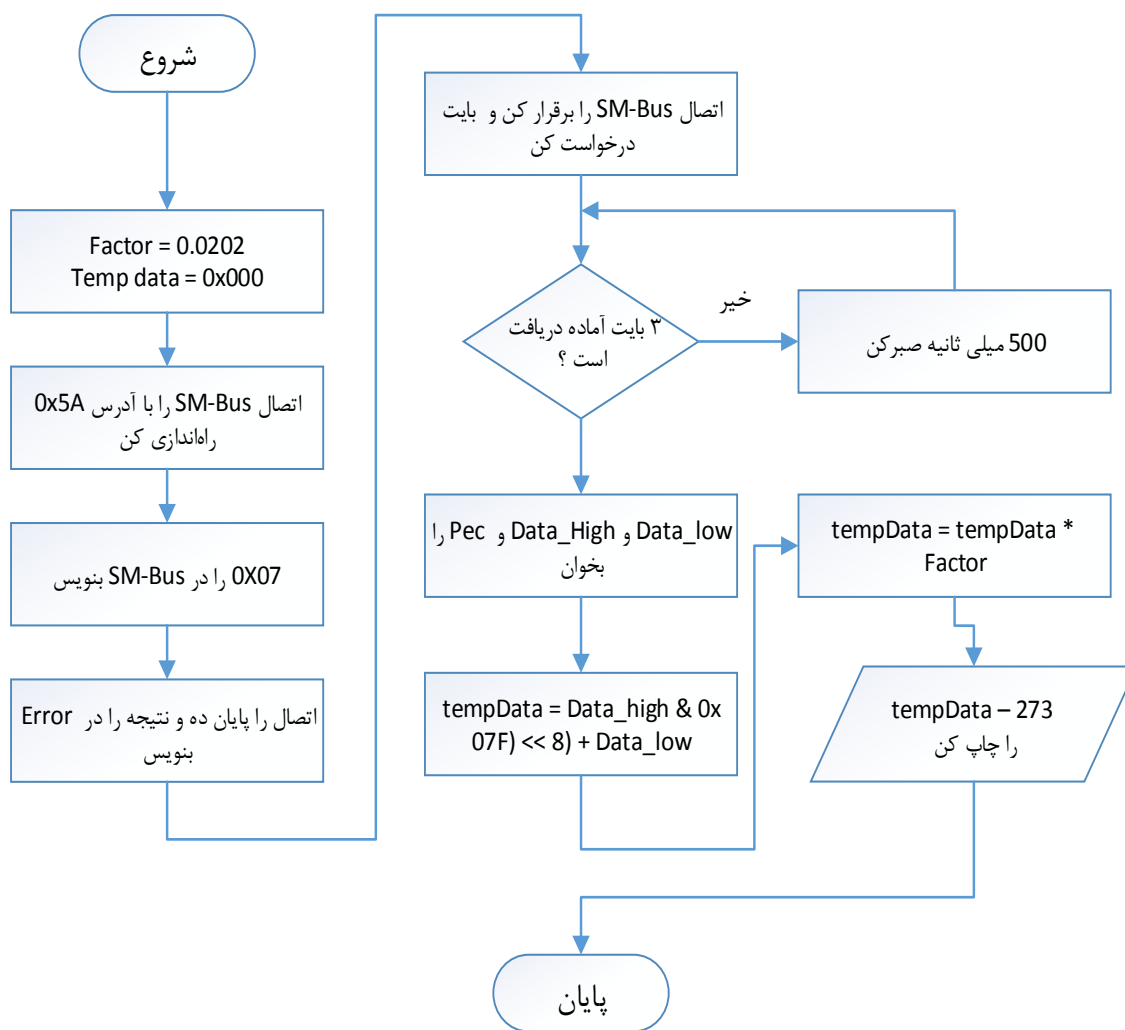


شکل ۴-۱۲ شماتیک مدار حسگر و برد میکروکنترلر

برای خواندن پیام حسگر باید ابتدا اطلاعات را از آدرس مشخص از گذرگاه اطلاعات SM-Bus خواند سپس آن را کدگشایی کرد. برای این منظور برنامه‌ای نوشته شده که گذرگاه را بررسی کرده و بعد از به دست آوردن آدرس حسگر بر روی گذرگاه و وضعیت سلامت حسگر آن را نمایش می‌دهد.

در این مورد حسگر در آدرس 0x5A قرار دارد. این حسگر دارای ثبات‌های^۱ متعددی درون خود است که می‌توانند برای اهداف مختلف پیکربندی شوند. MLX90614 می‌تواند دمای دو شیء در روبه‌روی خود را به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری کند و اطلاعات مربوط به آن‌ها را در دو ثبات با آدرس‌های 0x07 و 0x08 به‌صورت ۱۶ بیتی ذخیره کند پس با خواندن این دو ثبات می‌توان اطلاعات خام دمای شیء را به دست آورد. اطلاعات خام حسگر دو بایت است که طی فرآیندی می‌توان دمای شیء روبه‌روی حسگر را به دست آورد. فلوجارت خواندن دما از حسگر به‌صورت شکل ۴-۱۳ است.

¹ Register



شکل ۴-۱۳ فلوجارت برنامه نوشته شده برای خواندن اطلاعات حسگر

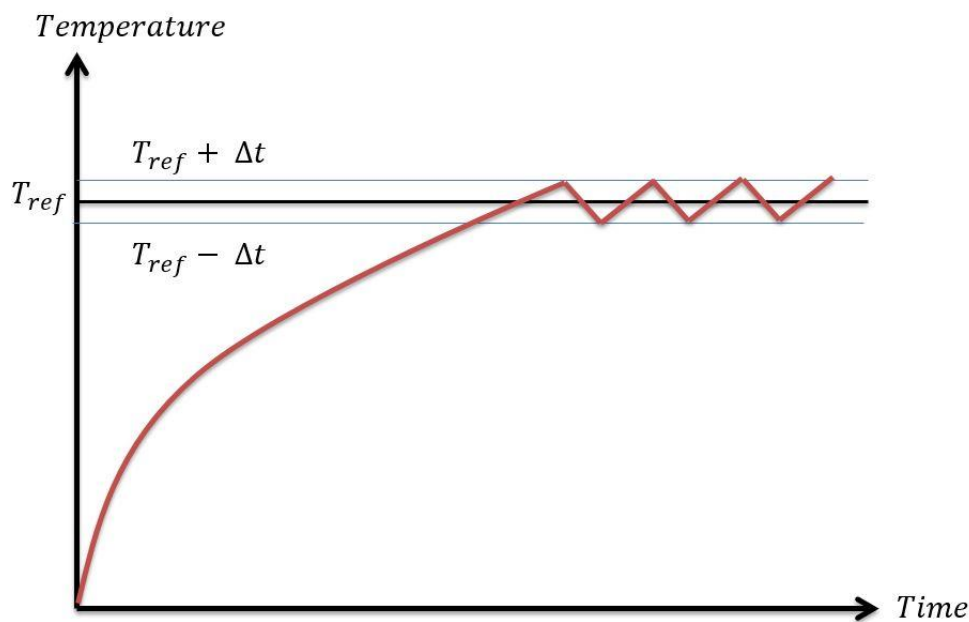
طبق فلوجارت شکل ۴-۱۳ می توان اطلاعات حسگر را خواند و آن را کد گشایی کرد. ابتدا یک ضریب برای ضرب کردن در خروجی خام حسگر برای مواد مختلف تعریف می شود. خروجی حسگر یک عدد ۱۶ بیتی است که توسط ۲ بایت دریافت می شود آدرس حسگر که با اسکن گذرگاه I2C به دست آمده برای حسگر ارسال می شود. حسگر که در این آدرس قرار دارد بر روی گذرگاه پیام تصدیق وجود^۱ خود را ارسال می کند. میکروکنترلر آدرس ثباتی که قرار است دمای خام از روی آن خوانده شود که در این مورد آدرس 0x07 است را ارسال می کند و منتظر دریافت ۳ بایت یا ۲۴ بیت می ماند. پس از دریافت ۳ بیت دو بیت دریافتی اول را به عنوان دیتای بالا و

¹ Acknowledgement

بایت دوم را به عنوان دیتای پایین به هم می‌چسباند و یک متغیر از نوع Double که می‌تواند اعشاری هم باشد ایجاد می‌کند. دمای به دست آمده دمای خام است و باید در ضریب Factor ضرب شود. حاصل به دست آمده از این فرآیند دما برحسب درجه کلوین است که با کم کردن عدد ۲۷۳ از آن درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید. خروجی شکل ۴-۱۳ دما برحسب درجه سانتی‌گراد را می‌دهد که به خروجی ارسال می‌شود. در صورت استفاده از فلوچارت به عنوان زیر برنامه خروجی به صورت عدد اعشاری با دو رقم اعشار است که از زیر برنامه برگردانده می‌شود.

۴-۴-۲- الگوریتم کنترل دما

الگوریتم کنترل دمای به کاررفته در این پروژه روش کنترلی هیستریزیس است. روش پیشنهاد شده بسیار ساده بود و در آزمایش نتایج خوبی از خود نشان داده است. این روش بر اساس نوسان دمای قطعه حول دمای مرجع تعریف شده کار می‌کند. عملکرد آن به این صورت است که دمای مرجع که قرار است دمای قطعه به آن برسد از کاربر دریافت می‌شود. برای مقدار دمای مرجع حد بالا و پایین تعریف می‌شود. در صورت پایین تر آمدن دما از مقدار حد پایین تعریف شده، انتقال توان به بار انجام می‌شود. در صورت تجاوز دما از حد بالای در نظر گرفته شده انتقال توان الکتریکی به خروجی قطع می‌گردد.

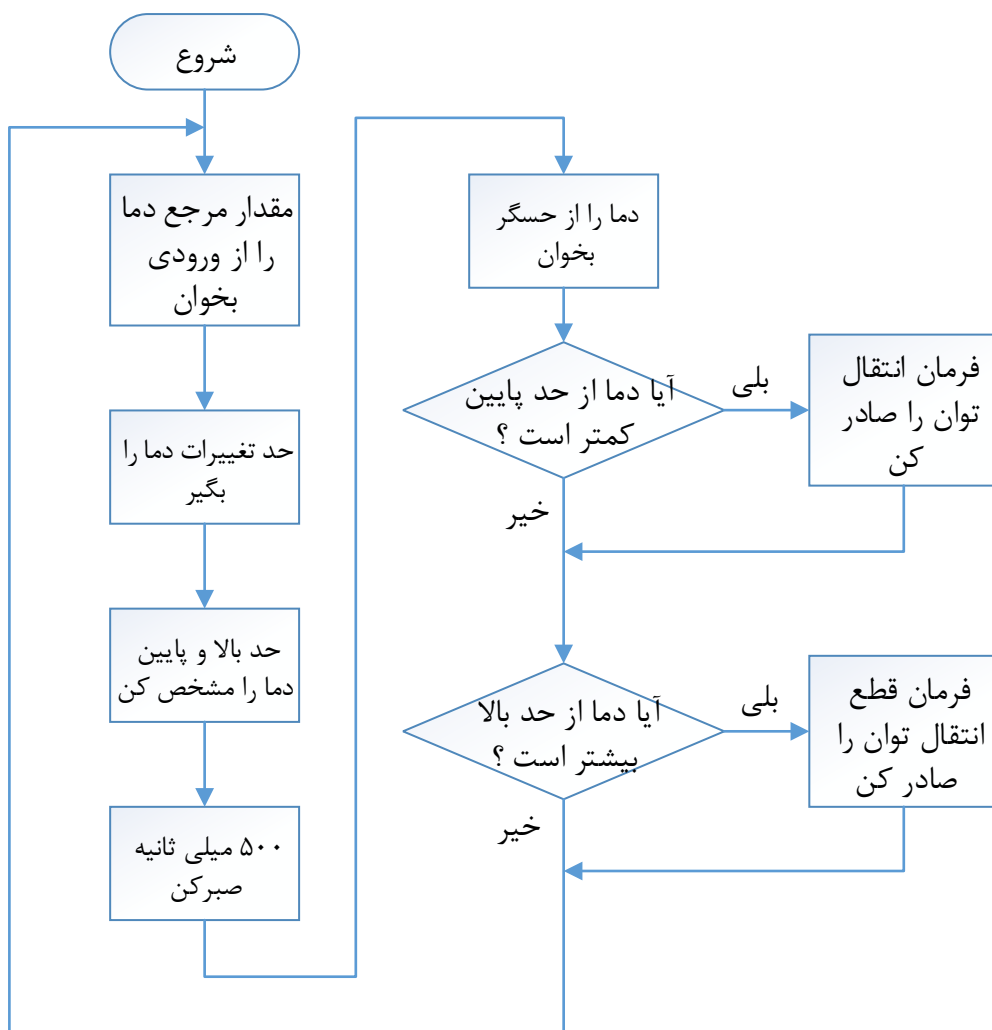


شکل ۴-۱۴ تغییرات دما با اعمال روش کنترل هیستریزیس

شکل ۴-۱۴ دمای قطعه کار با اعمال کنترل هیستریزیس را نمایش می‌دهد. برای این کنترل‌کننده مقدار Δt تعریف می‌شود که جمع و تفریق کردن آن از مقدار مرجع در نظر گرفته شده مقادیر حد بالا و پایین دما را تعیین می‌کند. واضح است که با کم کردن مقدار Δt می‌توان کنترل دقیق‌تر با ناهمواری^۱ کمتر ایجاد نمود.

فلوچارت شکل ۴-۱۵ برنامه نوشته شده برای کنترل دما را نشان می‌دهد. طبق فلوچارت دمای مرجع برای تنظیم از ورودی خوانده می‌شود مقدار Δt که در برنامه تعریف شده به آن اضافه و از آن کم می‌شود تا حد بالا و پایین نوسان دما را تعیین کند. هر چه این مقدار کوچک‌تر باشد بهتر است ولی کمتر انتخاب کردن آن از دقت حسگر تأثیری بر دقت کنترل دما ندارد. در این مورد حلقه‌ی کنترلی هر ۵۰۰ میلی‌ثانیه تکرار می‌شود ولی می‌توان برحسب مسئله و توان انتقالی از اینورتر به بار آن را تغییر داد. هر چه این میزان کوچک‌تر باشد کنترل‌کننده سریع‌تر عمل می‌کند و تجاوز کمتری از مقادیر مجاز رخ خواهد داد.

^۱ Ripple



شکل ۴-۱۵ برنامه نوشته شده برای انجام الگوریتم کنترل دما

خواندن دمای حسگر توسط فلوجارت شکل ۴-۱۳ انجام می شود و دمای اندازه گیری شده در قالب یک عدد اعشاری در اختیار برنامه کنترلی قرار می گیرد. خروجی حلقه کنترلی به صورت فرمان قطع و وصل به FPGA صادر می شود تا عملیات کلید زنی را کنترل کند.

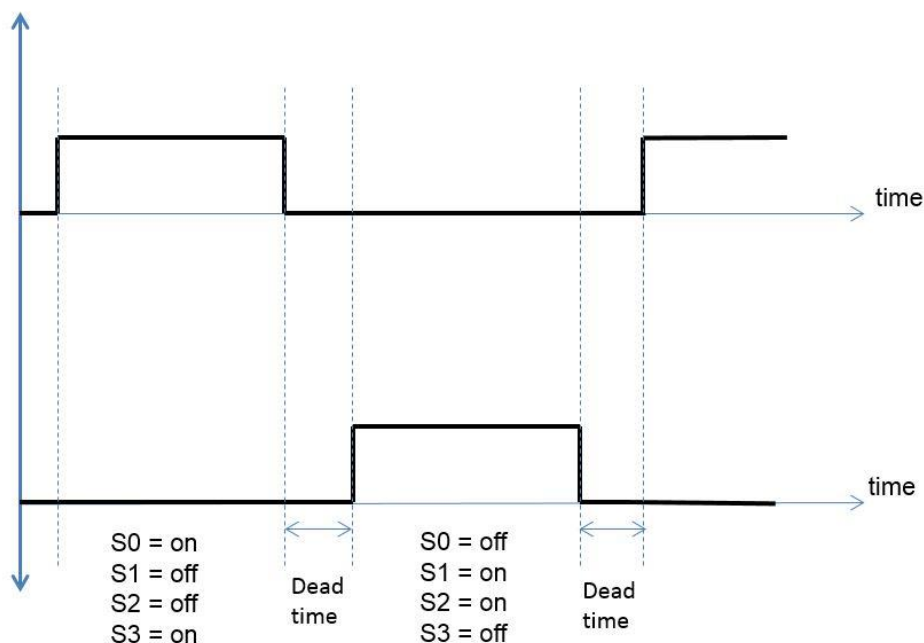
۴-۵-مدولاتور و FPGA

در این بخش مدولاتور پیشنهادی طراحی و معرفی می شود. در ابتدای بخش نیازها برای طراحی مدولاتور بررسی شده و یک مدولاتور برای انجام کلید زنی در یک گرم کن القایی طراحی

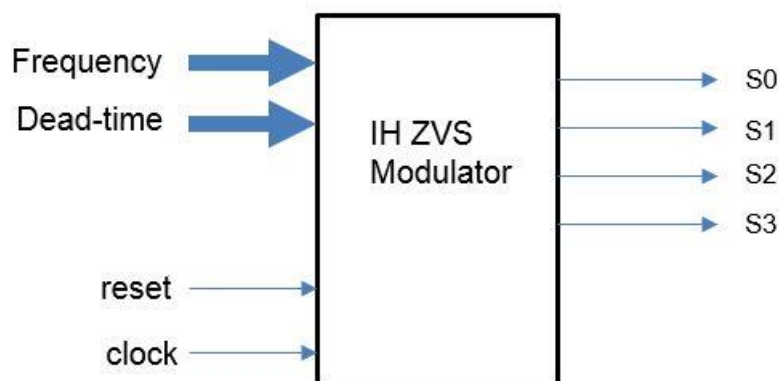
می‌شود. مدولاتور طراحی شده به صورت یک وسیله جانبی می‌تواند در پروژه‌های دیگر با پیکربندی‌های مختلف استفاده شود.

در مصارف گرمایش القایی در مواردی نیاز به تغییر فرکانس کلید زنی داریم برای این منظور مدولاتور طراحی شده باید قابلیت تغییر فرکانس کلید زنی را داشته باشد. مسئله‌ی مهم دیگر قابلیت تنظیم زمان مرده بین کلید زنی است. زمان مرده زمانی است که در آن تمامی کلیدها در وضعیت خاموش یا هدایت معکوس قرار دارند. در شکل ۴-۱۶ یک دوره کلید زنی نمایش داده شده است.

هدف از قرار دادن زمان‌های مرده در فرایند کلید زنی فرصت دادن به کلیدها برای خاموش شدن یا معکوس شدن جریان و جاری شدن آن از طریق دیودها است. قرار دادن زمان‌های مرده در اینورترهای تشدیدی با تغذیه منبع ولتاژ الزامی است و در صورت نبودن آن ممکن است در شاخه‌های اینورتر به دلیل هم‌زمان روشن بودن دو کلید اتصال کوتاه رخ داده و ممکن است باعث سوختن و از بین رفتن کلید قدرت شود. در اینورترهای منبع جریان وجود زمان مرده در کلید زنی باعث ایجاد ولتاژ زیاد در دوسر سلف منبع جریان شده و می‌تواند سوختن کلیدها را به دلیل شکست پیوند درین-سورس یا کلکتور-امیتر به همراه داشته باشد.



شکل ۴-۱۶ یک دوره کلید زنی با زمان‌های مرده برای استفاده در گرمایش القایی



شکل ۴-۱۷ بلوک مدولاتور طراحی شده برای کاربرد گرمایش القایی

در این پروژه به دلیل استفاده از اینورتر منبع ولتاژ، داشتن زمان مرده الزامی است و باید در طراحی لحاظ شود، همچنین مدولاتور باید قابلیت قطع و وصل کلید زنی را داشته باشد و در صورت لزوم انتقال توان از اینورتر به بار را متوقف کند. با این فرضیات می توان مدولاتور را به صورت شکل ۴-۱۷ مدل کرد.

ورودی های مدولاتور فرکانس و زمان مرده اند که به صورت یک باس ۱۶ بیتی در اختیار مدولاتور قرار می گیرند. مدولاتور طراحی شده قابلیت اتصال به باس میکروبلیز^۱ را دارد و می توان از آن به عنوان یک ابزار جانبی در طراحی استفاده کرد. سیگنال های کلاک و ریست به صورت سیگنال های یک بیتی به مدولاتور وارد می شوند. در صورت صفر شدن سیگنال ریست مدولاتور کلید زنی را متوقف کرده و تمام کلیدها را خاموش می کند. از آنجایی که کلید S_0 و S_3 و در مقابل آن S_1 و S_2 باهم روشن و خاموش می شوند برای هر گروه یک سیگنال در نظر گرفته شده است. برای هر یک از پارامترهای فرکانس و زمان مرده یک ثابت ۱۶ بیتی در نظر گرفته شده است. فرکانس کلید زنی تولید شده توسط مدولاتور پیشنهادی را می توان طبق رابطه (۴-۱۳) به دست آورد.

$$f_s = \frac{f_{clk}}{2 \times freq_reg} \quad (۴-۱۳)$$

¹ MicroBlaze

f_s : فرکانس سویچینگ تولیدشده

f_{clk} : فرکانس کلاک ورودی مدولاتور

$freq_{reg}$: مقدار ثبات فرکانس

پس

$$freq_{reg} = \frac{f_{clk}}{2 \times f_s} \quad (14-4)$$

زمان مرده بین کلید زنی در مدولاتور پیشنهادی از رابطه (4-15) به دست می آید.

$$T_{deadtime} = \frac{1}{f_{clk}} \times dead_time_reg \quad (15-4)$$

پس

$$deadtime_{reg} = T_{deadtime} \times f_{clk} \quad (16-4)$$

$T_{deadtime}$: زمان مرده

$dead_time_reg$: ثبات زمان مرده

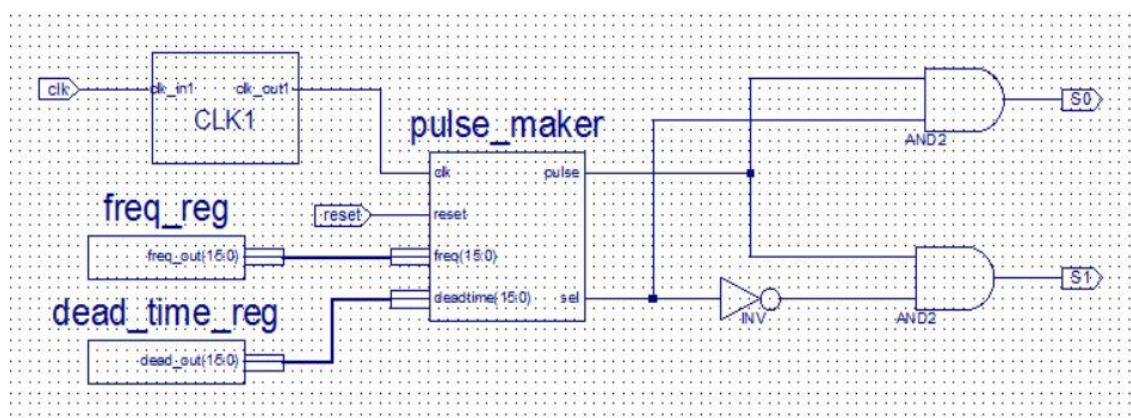
با استفاده از روابط فوق می توان مقدار ثبات های فرکانس و زمان مرده را برای تنظیم مقدار مطلوب تعیین کرد. در صورت نیاز به تغییر سیکل وظیفه می توان آن را با در نظر گرفتن مطلوب زمان مرده به طبق رابطه (4-17) وجود آورد.

$$Dutycycle = freq_reg - deadtime_reg \quad (17-4)$$

مدولاتور در زبان توصیف سخت افزار VHDL نوشته شده است که شامل دو قسمت می باشد. قسمت اول وظیفه تولید پالس و انتخاب کلیدها را بر عهده دارد. این واحد در حقیقت یک شمارنده می باشد که با اضافه شدن تعدادی شروط و عملگرهای ریاضی این قابلیت را دارد که پالس مناسب برای روشن شدن کلیدها و انتخاب آنها با فرکانس و زمان مرده مطلوب را تولید کند. قسمت دوم که به طور ساده دیمالتی پلکسر است با دریافت سیگنال های انتخاب و پالس، پالس را به کلید مورد نظر منتقل می کند.

در شکل ۴-۱ سطح بالای^۱ طراحی بر شکل ۴-۱۸ پایه FPGA به در نمایش درآمده است.

طراحی بر روی سخت‌افزار برد توسعه posedge1 پیاده شده است. برد پازدج یک برد توسعه FPGA بر پایه Xilinx Spartan6LX9 است. دلیل انتخاب آن سادگی، کوچک بودن، قرار گرفتن امکانات موردنیاز برای پیکربندی و عدم نیاز به تجهیزات جانبی برای برنامه‌ریزی برد است. استفاده از تراشه به نسبت ارزان‌قیمت Spartan6LX9 در مقابل امکانات آن باعث شده این برد قیمت مناسبی داشته باشد. همچنین بر روی این برد یک تولیدکننده پالس ۲۴ مگاهرتزی وجود دارد که می‌توان از آن برای استفاده به‌عنوان پالس ساعت در طرح استفاده کرد. پس از پیاده‌سازی طرح بر روی FPGA میزان واحد منطقی استفاده‌شده و گزارش جاییابی و مسیره‌ی طرح سنتز شده در جدول ۴-۲ آورده شده است.



شکل ۴-۱۸ شماتیک مدولاتور پیشنهادی بر پایه FPGA

¹ Top-level

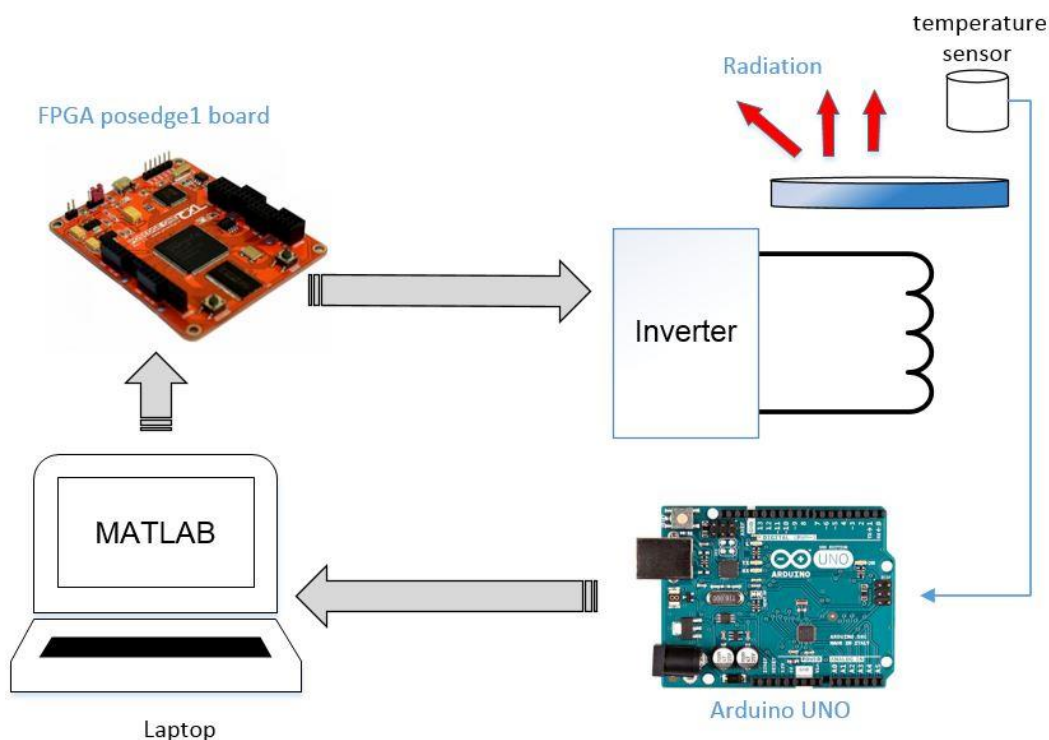
جدول ۴-۲ امکانات سخت‌افزاری استفاده‌شده بعد از سنتز طرح

| واحد استفاده‌شده | تعداد استفاده‌شده | درصد استفاده‌شده |
|----------------------|-------------------|------------------|
| قطعات ثابتی | ۱۰ | ٪۱ |
| قطعات جدول جست‌وجو | ۱۴ | ٪۱ |
| تعداد قطاع اشغال‌شده | ۶ | ٪۱ |
| جفت فیلیپ فلاپ | ۱۴ | ٪۱ |
| بلوک I/O | ۴ | ٪۳ |
| بافر کلاک | ۱ | ٪۳ |
| واحد DCM | ۱ | ٪۲۵ |
| واحدهای MUXCY | ۸ | ٪۱ |

طبق گزارش نرم‌افزار حداقل دوره سیگنال اعمالی به طرح می‌تواند $2/980$ نانوثانیه می‌باشد که این بدین معنی است که بیشترین فرکانسی که می‌توان به سیستم اعمال کرد برابر $355/57$ مگاهرتز است. از طرفی هرچه بالاتر انتخاب کردن فرکانس کلاک موجب بالا رفتن دقت مدولاتور می‌شود. در این پروژه مقدار 200 مگاهرتز برای فرکانس سیگنال کلاک انتخاب‌شده است و از آنجایی که نوسان‌ساز مورد مقدار 24 مگاهرتز را تولید می‌کند از یک واحد مدیریت کلاک برای افزایش آن تا فرکانس 200 مگاهرتز بهره برده شده است. شبیه‌سازی و نتایج عملی کار مدولاتور در فصل بعد ارائه‌شده و مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

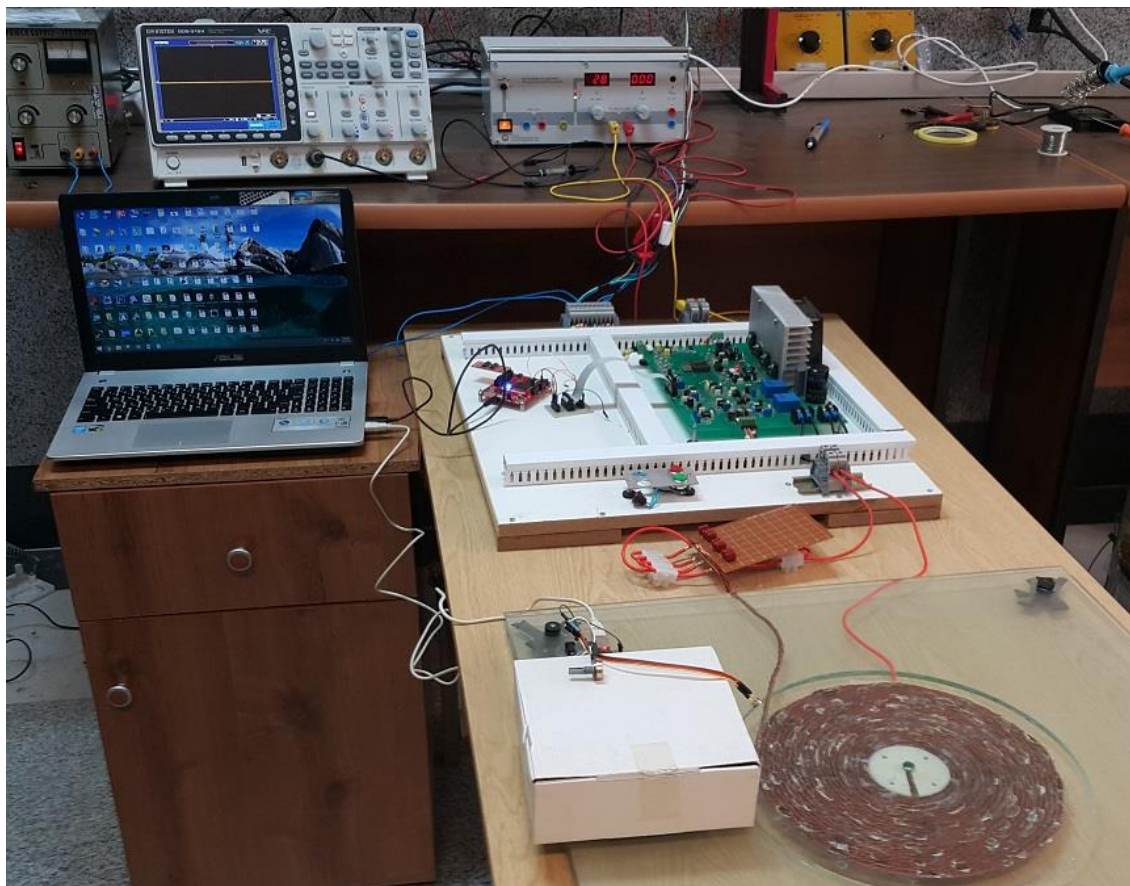
۴-۶- بلوک دیاگرام کلی سیستم

در قسمت‌های قبل به‌طور مفصل ریز بخش‌های سیستم معرفی شد و در طراحی آن مورد بررسی قرار گرفت در این قسمت بلوک دیاگرام کل سیستم معرفی‌شده و بررسی خواهد شد. بلوک دیاگرام کلی سیستم به‌صورت شکل ۴-۱۹ است.



شکل ۴-۱۹ بلوک دیاگرام کلی سیستم

گرم شدن بار باعث زیادتیر شدن میزان تابش الکترومغناطیسی از جسم می‌شود. میزان تابش جسم توسط حسگر به مقدار الکتریکی تبدیل شده و به بورد میکروکنترلر فرستاده می‌شود. در میکروکنترلر الگوریتم کنترل دما اجرا شده و نتیجه به صورت فرمان قطع و وصل کلید زنی به FPGA انتقال پیدا می‌کند. در ضمن مقادیر دمای هر لحظه با آهنگی که از قبل معین شده برای ثبت و رسم نمودارها توسط نرم افزار متلب خوانده می‌شود. برنامه‌ای که در نرم افزار متلب نوشته شده است مسئولیت خواندن دما در طی زمانی که برای آن تعیین می‌شود است. بعد از طی زمان تعیین شده اطلاعات دما ذخیره شده و نمودار آن رسم می‌گردد. شکل ۴-۲۰ سیستم پیاده سازی شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود خروجی بورد آردوینو و FPGA به کامپیوتر متصل شده و مانیتورینگ سیستم و همچنین دریافت اطلاعات حسگر و ذخیره آن توسط نرم افزار متلب انجام گرفته است. در این فصل طراحی مبدل، الگوریتم‌های طراحی شده، مدولاتور پیشنهادی، و همچنین تشریح مراحل ساخت به طور مفصل بیان گردید. در فصل بعد نتایج شبیه سازی و ساخت ارائه شده و مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۴-۲۰ سیستم ساخته شده در آزمایشگاه

فصل ۵ : نتایج شبیه‌سازی و ساخت

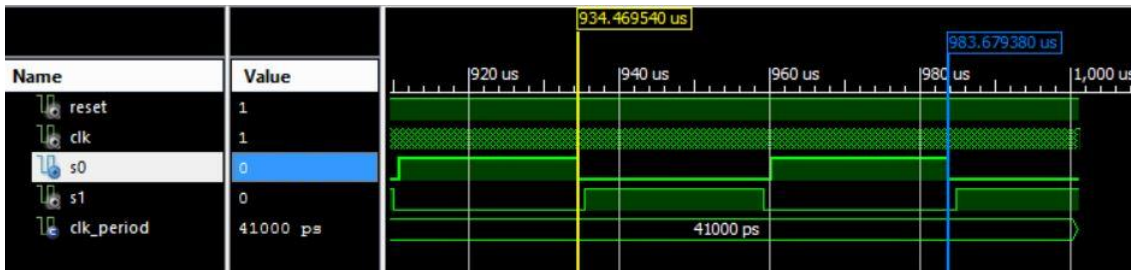
در این فصل نتایج حاصل از شبیه‌سازی، ساخت و کنترل‌کننده به نمایش گذاشته خواهد شد. این فصل به سه بخش تقسیم شده است. در بخش اول شبیه‌سازی مدولاتور طراحی شده و نتایج عملکرد آن بر روی FPGA و به صورت عملی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بخش دوم به شبیه‌سازی و نتایج عملی از کار اینورتر پرداخته خواهد شد. در بخش سوم نتایج عملکرد کنترل‌کننده در آزمایشگاه و همچنین نتایج کار سیستم حلقه باز بدون کنترل‌کننده آورده خواهد شد. در انتها نتایج حاصل شده از اعمال کنترل‌کننده بر تغییرات دما مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۵-۱- نتایج شبیه‌سازی و عملی مدولاتور

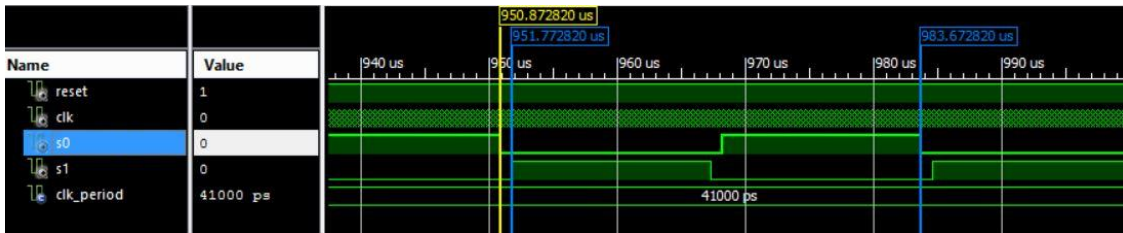
در این بخش نتایج شبیه‌سازی و عملی مدولاتور آورده شده است. شبیه‌سازی در نرم‌افزار ISIM که شبیه‌ساز کدهای نوشته شده به زبان‌های توصیف سخت‌افزار است انجام پذیرفته است. علت استفاده از این نرم‌افزار این است که با اولاً قابلیت شبیه‌سازی امکانات داخلی FPGA (که در این پروژه از المان مدیریت کلاک استفاده شده) را دارد و همچنین با پکیج نرم‌افزاری ISE بر روی کامپیوتر نصب می‌شود. مدولاتور بر روی بورد Posedge برنامه‌ریزی شده و نتایج آورده شده است. شبیه‌سازی برای فرکانس‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ کیلوهرتز انجام شده و نتایج آورده شده است. همچنین تغییر زمان مرده هم در نتایج در نظر گرفته شده است. مقادیر در جدول ۵-۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱ مقادیر شبیه‌سازی شده برای فرکانس و زمان مرده

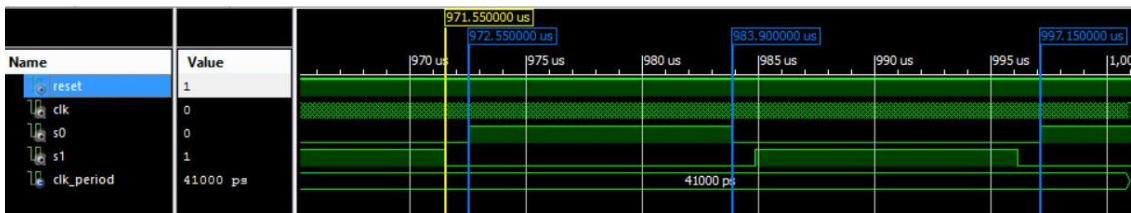
| فرکانس (کیلوهرتز) | زمان مرده (میکروثانیه) | ثبات فرکانس | ثبات زمان مرده |
|----------------------|------------------------|----------------|----------------|
| ۲۰ | ۱ | 0x1388 | 0x00C8 |
| ۳۰ | ۱ | 0x0D05 | 0x00C8 |
| ۴۰ | ۱ | 0x09C4 | 0x00C8 |
| ۴۰ | ۵ | 0x09C4 | 0x05E8 |
| ۵۰ | ۱ | 0x07D0 | 0x00C8 |



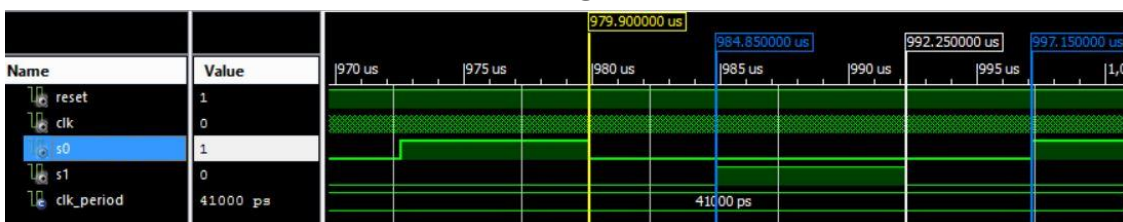
(الف)



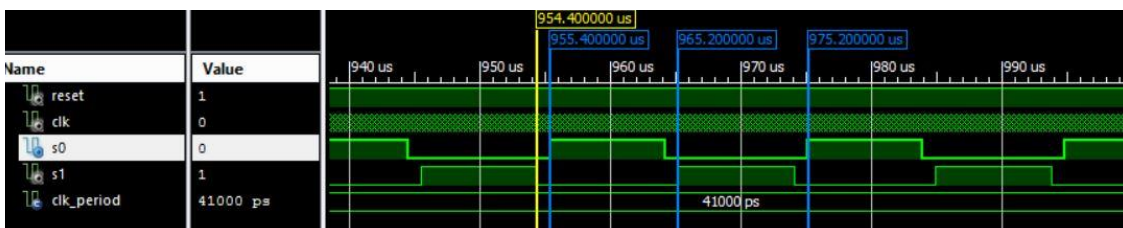
(ب)



(ج)

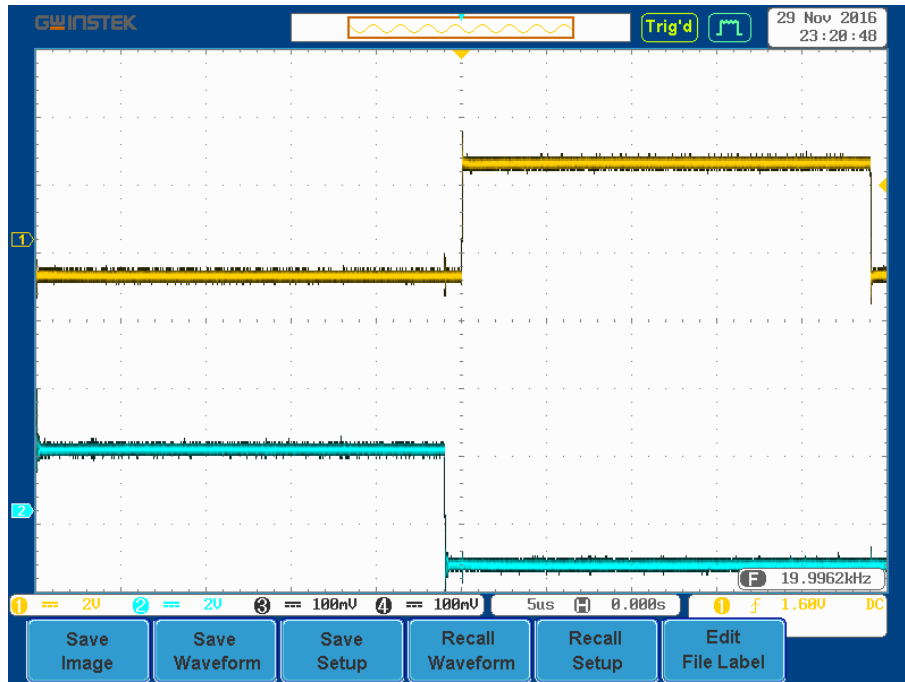


(د)

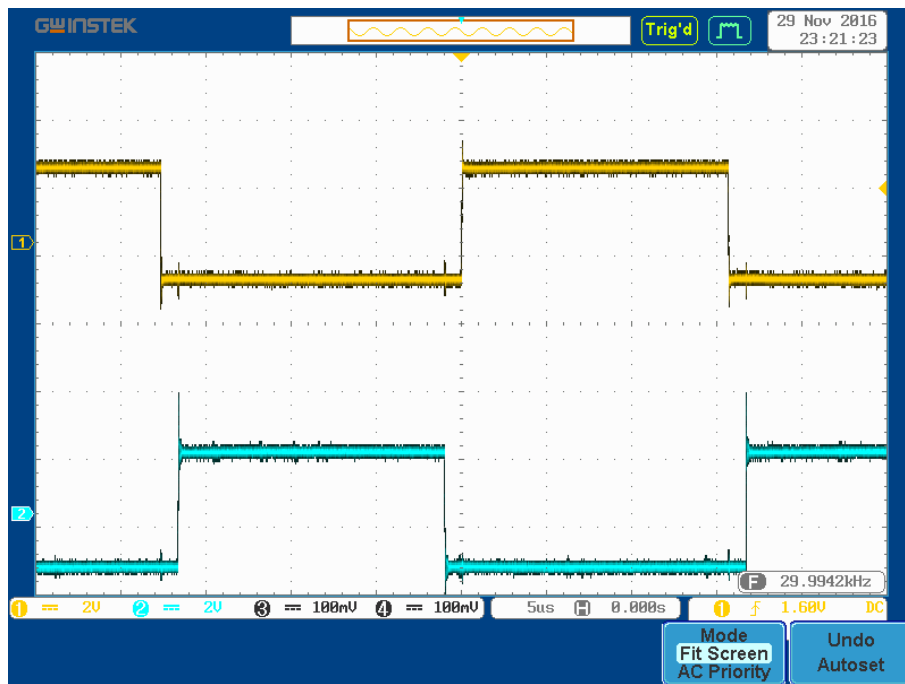


(ه)

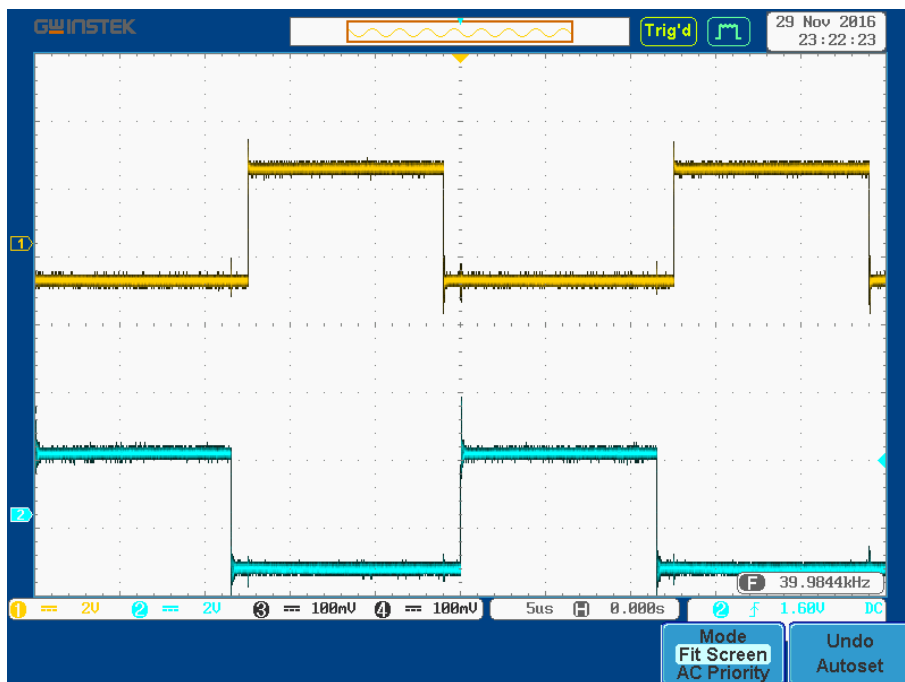
شکل ۵-۱ نتایج شبیه‌سازی مدولاتور طراحی شده با FPGA (الف) فرکانس کلید زنی ۲۰ کیلوهرتز و زمان مرده ۱ میکروثانیه، (ب) فرکانس کلید زنی ۳۰ کیلوهرتز و زمان مرده ۱ میکروثانیه، (ج) فرکانس کلید زنی ۴۰ کیلوهرتز و زمان مرده ۱ میکروثانیه، (د) فرکانس کلید زنی ۴۰ کیلوهرتز و زمان مرده ۵ میکروثانیه، (ه) فرکانس کلید زنی ۵۰ کیلوهرتز و زمان مرده ۱ میکروثانیه.



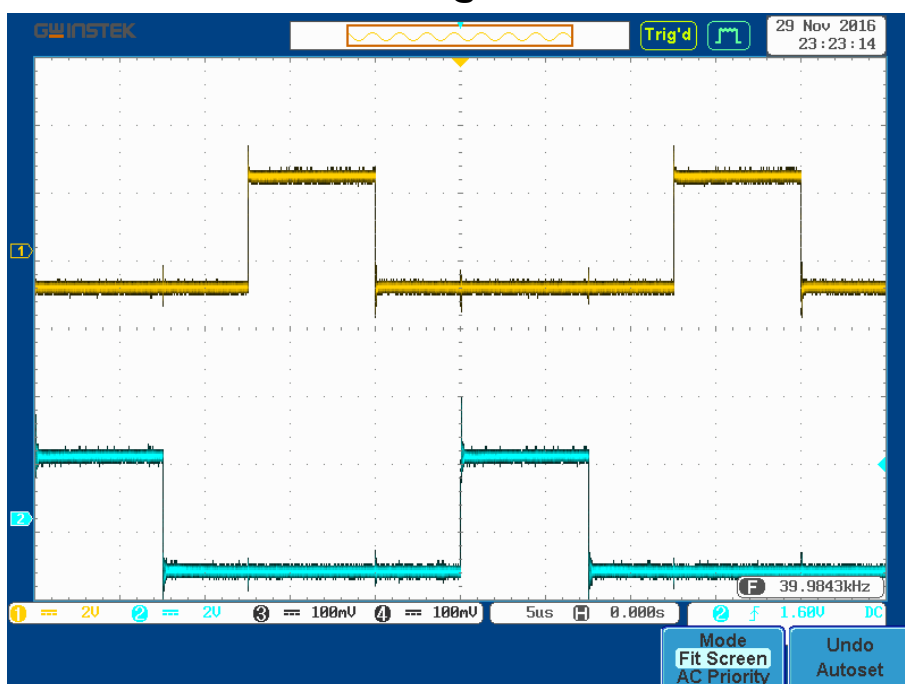
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۵-۲ نتایج آزمایشگاهی حاصل از پیاده‌سازی مدولاتور طراحی‌شده بر روی FPGA (الف) فرکانس کلید زنی ۲۰ کیلوهرتز زمان مرده ۱ میکروثانیه، (ب) فرکانس کلید زنی ۳۰ کیلوهرتز زمان مرده ۱ میکروثانیه، (ج) فرکانس کلید زنی ۴۰ کیلوهرتز زمان مرده ۱ میکروثانیه، (د) فرکانس کلید زنی ۴۰ کیلوهرتز زمان مرده ۵ میکروثانیه،

نتایج شبیه‌سازی مدولاتور طراحی شده در شکل ۵-۱ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۵-۱ واضح است مدولاتور به‌درستی کلید زنی دلخواه ما را تولید کرده است. برای معتبر ساختن نتایج شبیه‌سازی برنامه نوشته‌شده بر روی FPGA برنامه‌ریزی شده است. نتایج عملی مدولاتور طراحی شده در شکل ۵-۲ به نمایش درآمده است.

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی و ساخت اینورتر

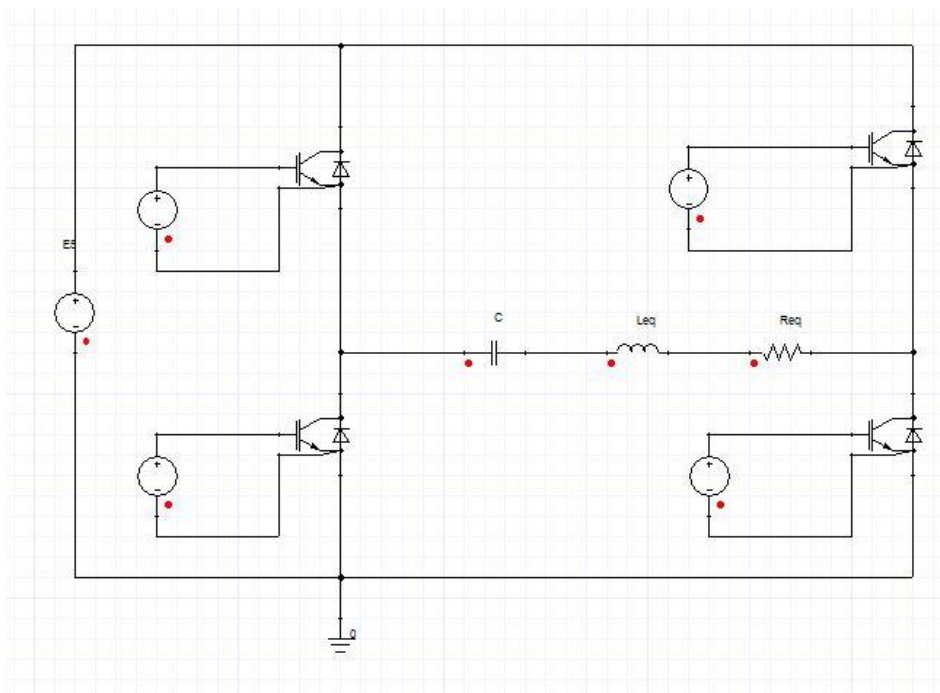
همان‌طور که در فصل قبل گفته شد در این پروژه از یک اینورتر تک فاز منبع ولتاژ با مدار تشدید سری استفاده شده است. از آنجایی که سیستم کنترلی به‌صورت قطع و وصل عمل می‌کند لذا در این بخش تنها به بررسی کارکرد اینورتر و شرایط کلید زنی ولتاژ صفر و جریان صفر پرداخته می‌شود.

برای شبیه‌سازی قسمت قدرت اینورتر از نرم‌افزار ANSYS Simplorer استفاده شده است. می‌دانیم عملکرد کلیدهای قدرت در شبیه‌سازی و واقعیت تفاوت دارد دلیل آن مشخصات متفاوت آن‌ها نسبت به مدل‌های ایدئال است. معمولاً نرم‌افزارهای شبیه‌ساز این تفاوت را در نظر نگرفته و مدلی ایدئال از کلیدهای قدرت ارائه می‌دهند و برخی از مشخصات نظیر زمان بازیابی و تأخیر قطع و وصل نیمه‌هادی‌ها در آن‌ها در نظر گرفته نشده است. هرچند نمی‌توان اتفاقات در عمل دقیقاً شبیه‌سازی کرد اما برای هرچه بیشتر نزدیک شدن نتایج شبیه‌سازی به واقعیت می‌توان مدلی دقیق‌تر از کلید را مورد بررسی قرارداد. دلیل استفاده از نرم‌افزار Simplorer قابلیت مدل کردن کلیدهای قدرت با استفاده از مشخصات آورده شده در برگه اطلاعات آن هست. همچنین این نرم‌افزار قابلیت اتصال به نرم‌افزارهای تحلیل اجزاء محدود را دارا بوده که می‌توان از این قابلیت برای تحلیل‌های بسیار دقیق در گرمایش القایی و دیگر حوزه‌های الکترونیک قدرت بهره برد

کلیدهای به‌کاررفته در اینورتر تک فاز مورد استفاده از نوع IGBT ساخت شرکت IXYS بوده و شماره قطعه آن IXDH 20N120 D1 که دارای دیود معکوس به‌صورت انتخابی هست. این IGBT با استفاده از مشخصات برگه اطلاعات در نرم‌افزار مدل شده و نمودارهای آن با استفاده از فن پویش برگه^۱ برای نرم‌افزار تعریف شده است. با استفاده از این مدل می‌توان شبیه‌سازی دقیق‌تر

¹ Sheet Scanning

و نزدیک تر به واقعیت انجام داد. اینورتر شبیه سازی شده در Simplerer به صورت شکل ۳-۵ است.

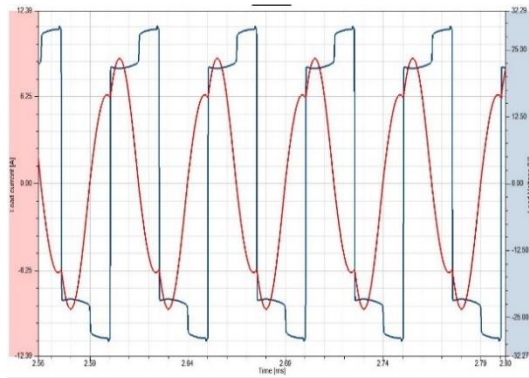


شکل ۳-۵ اینورتر شبیه سازی شده در نرم افزار ANSYS Simplerer

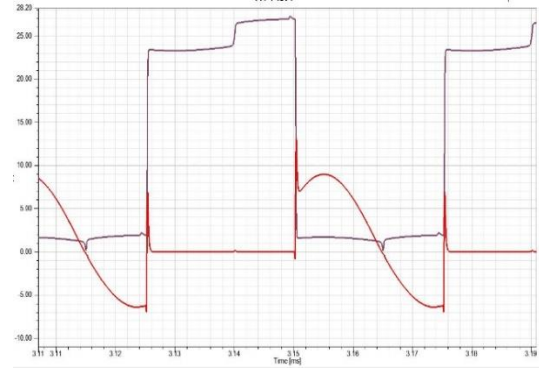
هدف از شبیه سازی اینورتر بررسی کلید زنی، شکل جریان، ولتاژ دوسر کلید و بررسی حالت کلید زنی نرم هست. شبیه سازی در فرکانس های کلید زنی مختلف انجام شده و اثر آن مورد بررسی قرار می گیرد. جدول ۲-۵ مشخصات سیستم شبیه سازی شده را نشان می دهد.

جدول ۲-۵ مشخصات سیستم مورد مطالعه برای شبیه سازی

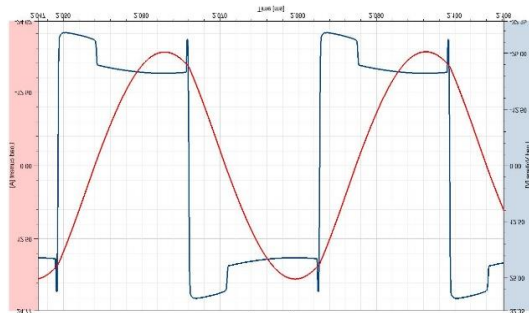
| سیستم مورد مطالعه | مقدار |
|-------------------|----------------------------|
| ولتاژ اتصال DC | ۲۵ ولت |
| فرکانس شبیه سازی | ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ و ۵۰ کیلوهرتز |
| اندوکتانس بار | ۳۵ میکروهانری |
| مقاومت بار با ظرف | ۱۱/۵ اهم |
| شماره قطعه کلیدها | IXDH 20N120 D1 |



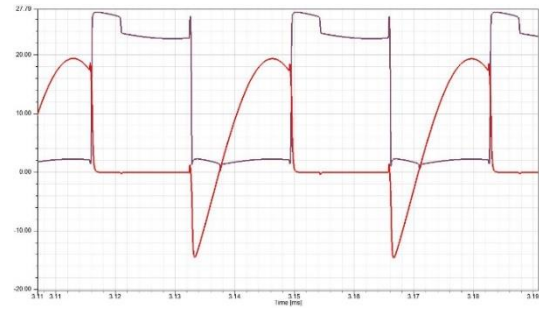
(ب)



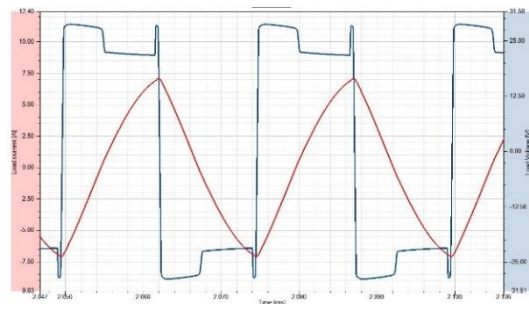
(الف)



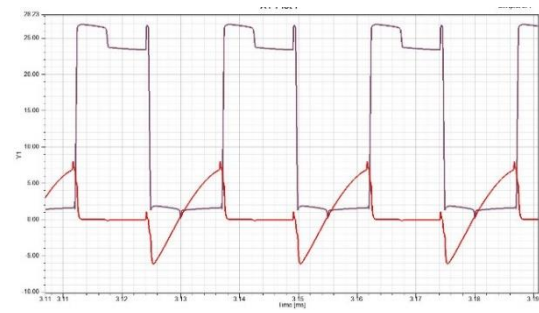
(د)



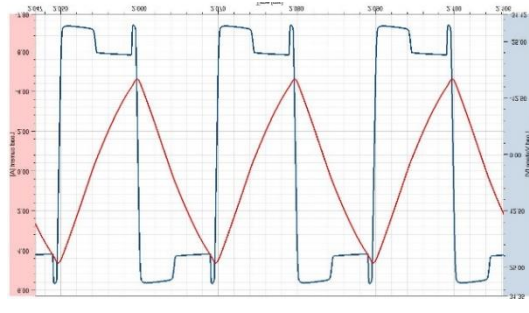
(ج)



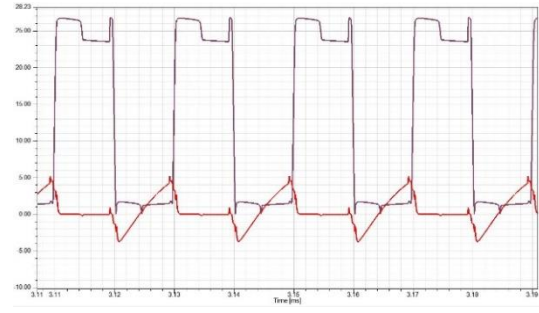
(و)



(ه)



(ح)



(ز)

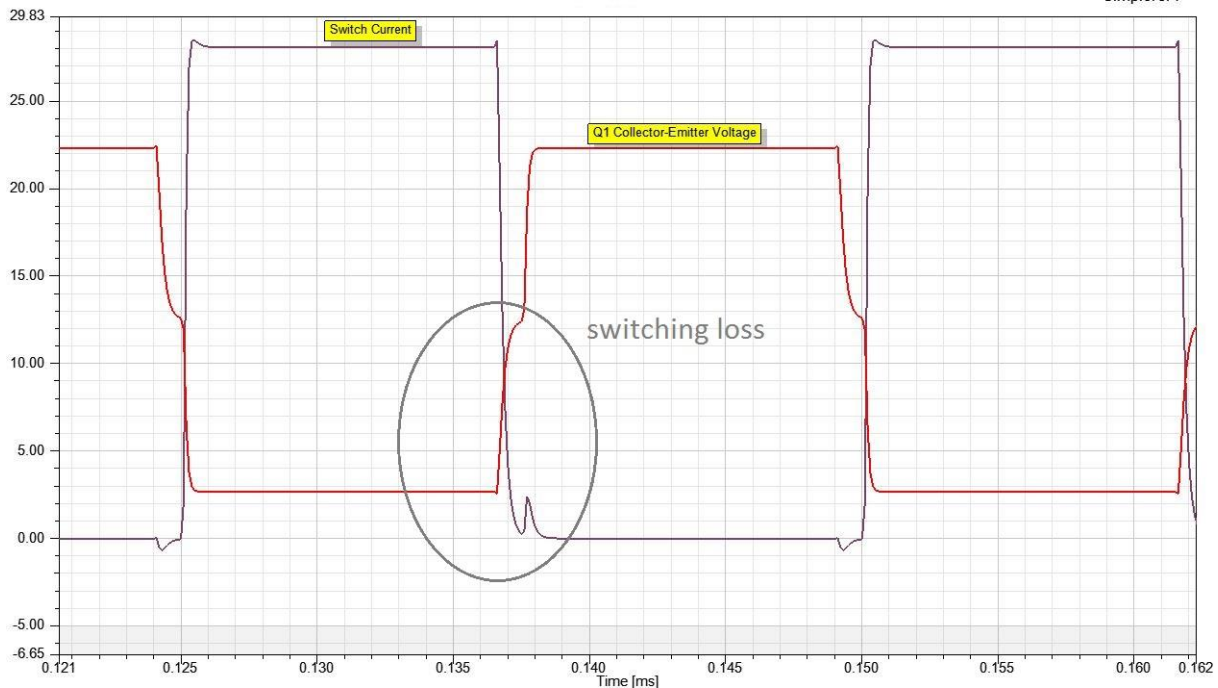
شکل ۴-۵ شکل جریان بار و ولتاژ کلکتور امیتر به ازای فرکانس‌های مختلف

شکل ۴-۵ شکل ولتاژ بار، ولتاژ دوسر کلید، جریان بار و جریان کلید را نشان می‌دهد. قسمت (الف) و (ب) شبیه‌سازی در فرکانس کلید زنی ۲۰ کیلوهرتز است. این فرکانس پایین‌تر از

فرکانس تشدید مدار تانک است پس کلید زنی در حالت نرم اتفاق نمی‌افتد. شکل (الف) ولتاژ کلید در برابر جریان آن را نشان می‌دهد و شکل ۴-۵ (ب) جریان بار در برابر ولتاژ بار. شکل ۴-۵ (ج) و (د) مربوط به شبیه‌سازی در فرکانس کلید زنی ۳۰ کیلوهرتز است. این فرکانس بالاتر از فرکانس تشدید و بسیار نزدیک به آن است. همان‌طور که مشخص است دامنه جریان نسبت به دو شکل قبل بیشتر شده و شکل آن به حالت سینوسی نزدیک‌تر است. شکل ۴-۵ (ج) ولتاژ کلید (بنفش) در برابر جریان کلید (قرمز) است. ولتاژ بار در برابر جریان بار هم در شکل (د) نشان داده شده است. شکل (ه) و (و) شبیه‌سازی در فرکانس کلید زنی ۴۰ کیلوهرتز است. این فرکانس نسبتاً فاصله‌ی زیادی از فرکانس تشدید سلف و خازن دارد به همین دلیل شکل جریان بار از حالت سینوسی فاصله گرفته و به حالت مثلثی نزدیک‌تر شده است. همچنین در این حالت دامنه جریان هم نسبت به فرکانس ۳۰ کیلوهرتز کمتر است. شکل ۴-۵ (ز) و (ح) رفتار مدار در فرکانس کلید زنی ۵۰ کیلوهرتز است. در این فرکانس جریان کاملاً از حالت سینوسی خارج شده و به شکل مثلثی درآمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جریان در این حالت کمتر از حالت قبل است. شکل ۴-۵ (ز) اندازه ولتاژ دو سر کلید در برابر جریان آن و شکل (ح) جریان بار در برابر ولتاژ آن را نشان می‌دهد.

۵-۲-۲- بررسی حالت کلید زنی نرم

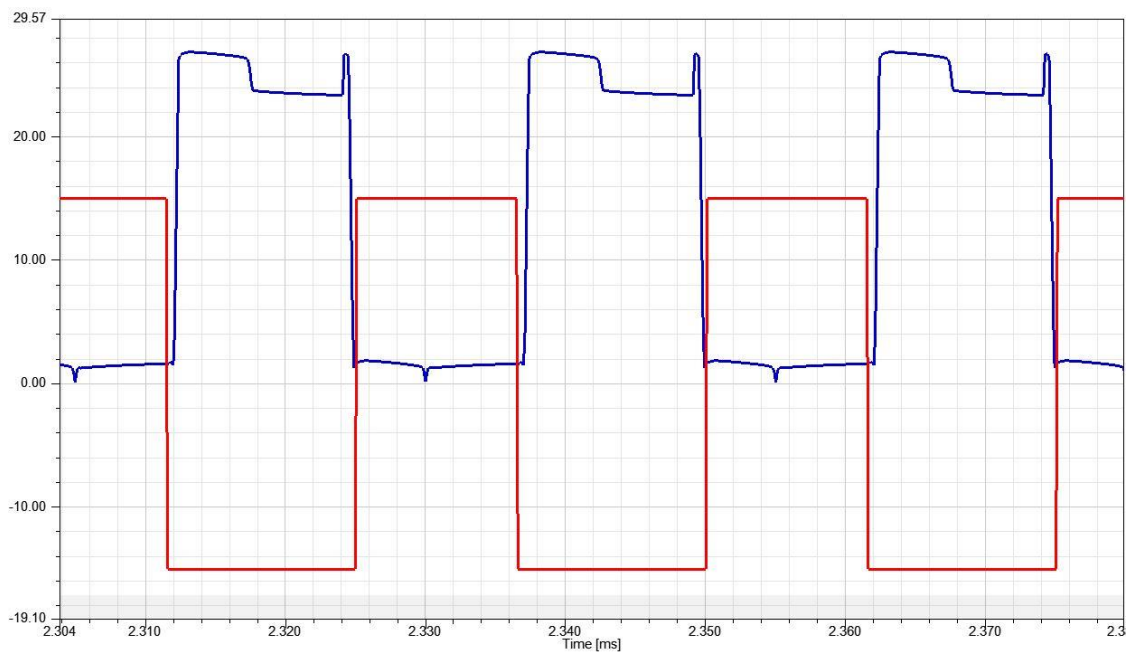
بالا رفتن فرکانس جریان بار موجب افزایش تلفات جریان ادی و افزایش توان حرارتی ایجاد شده بر روی بار می‌شود. افزایش فرکانس کلید زنی چالش‌هایی را پیش روی ما می‌گذارد که مهم‌ترین آن افزایش تلفات کلید زنی بر روی کلیدهای قدرت است. در شکل ۵-۵ اینورتر با همان شرایط و در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و بدون مدار تشدید شبیه‌سازی شده است.



شکل ۵-۵ شبیه‌سازی اینورتر بدون در نظر گرفتن مدار تشدید

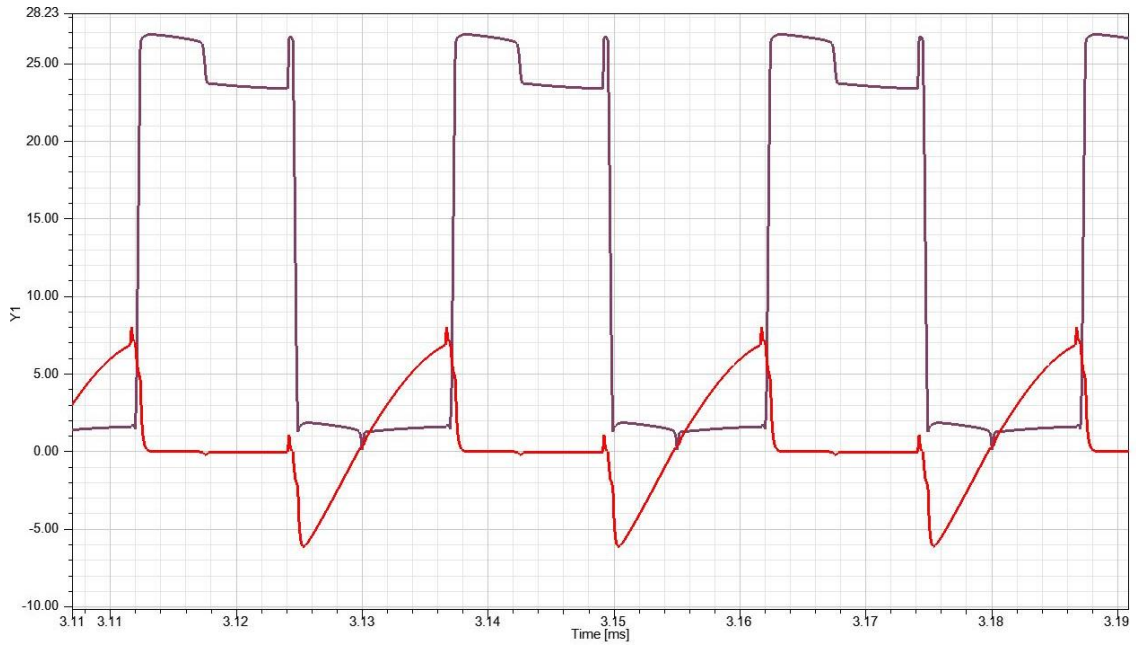
شکل ۵-۵ ولتاژ کلکتور-امیتر در برابر جریان کلید در یکی از کلیدهای قدرت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در لحظه روشن یا خاموش شدن کلید به دلیل تأخیرهای موجود بر روی کلیدها اتلاف انرژی داریم. بالا رفتن فرکانس کلید زنی موجب افزایش تعداد کلید زنی شده و باعث افزایش تلفات می‌شود. اتلاف انرژی بر روی کلیدها موجب گرم شدن آن‌ها می‌شود و در صورت گرم شدن بیش از حد سوختن و از بین رفتن آن را در پی خواهد داشت.

راه‌حل ارائه شده برای رفع این مشکل استفاده از روش کلید زنی نرم است. در این پروژه از روش کلید زنی ولتاژ صفر استفاده شده است. شکل ۵-۶ ولتاژ گیت IGBT در برابر ولتاژ دوسر کلکتور-امیتر آن را نشان می‌دهد. روشن شدن ترانزیستور با ولتاژ +۱۵ ولت در دوسر آن اتفاق می‌افتد و با ولتاژ -۱۵ ولت خاموش می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود قبل از رسیدن فرمان روشن شدن ترانزیستور ولتاژ دوسر آن به مقدار پایین آن افت می‌کند. در این حالت دیود موازی با ترانزیستور در حالت هدایت قرار می‌گیرد.

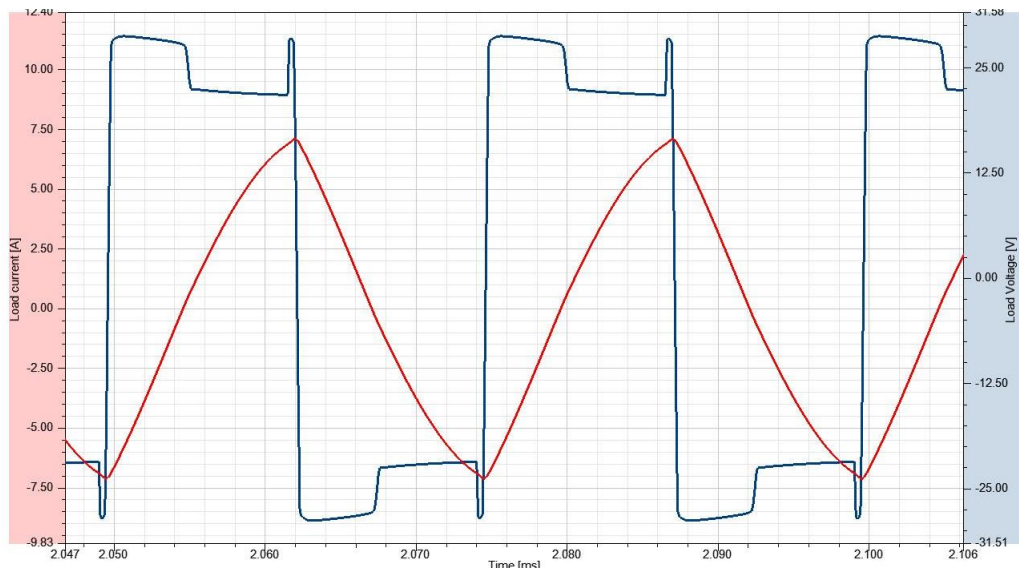


شکل ۵-۶ ولتاژ گیت IGBT در برابر ولتاژ کلکتور-امیتر آن

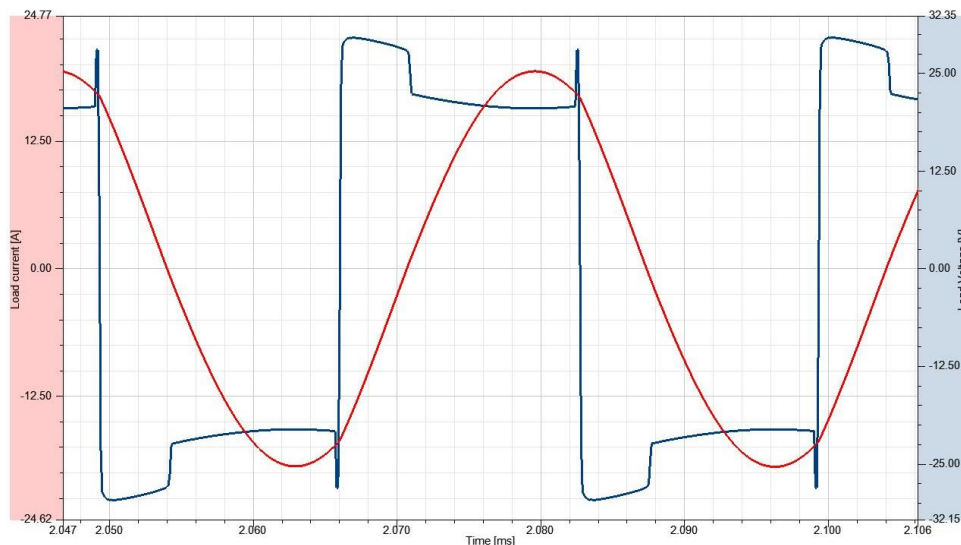
شکل ۵-۷ جریان کلید را در برابر ولتاژ آن نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل پیداست در لحظه روشن شدن کلید جریان به صورت معکوس در حال عبور از آن است و این باعث می‌شود تلفات کلید که در تأخیرها در ترانزیستور رخ می‌دهد ایجاد نشود. جریان بار در برابر ولتاژ آن در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به صورت شکل ۵-۸ است.



شکل ۵-۷ جریان کلید در برابر ولتاژ آن در حالت تشدید



شکل ۵-۸ جریان بار در برابر ولتاژ بار

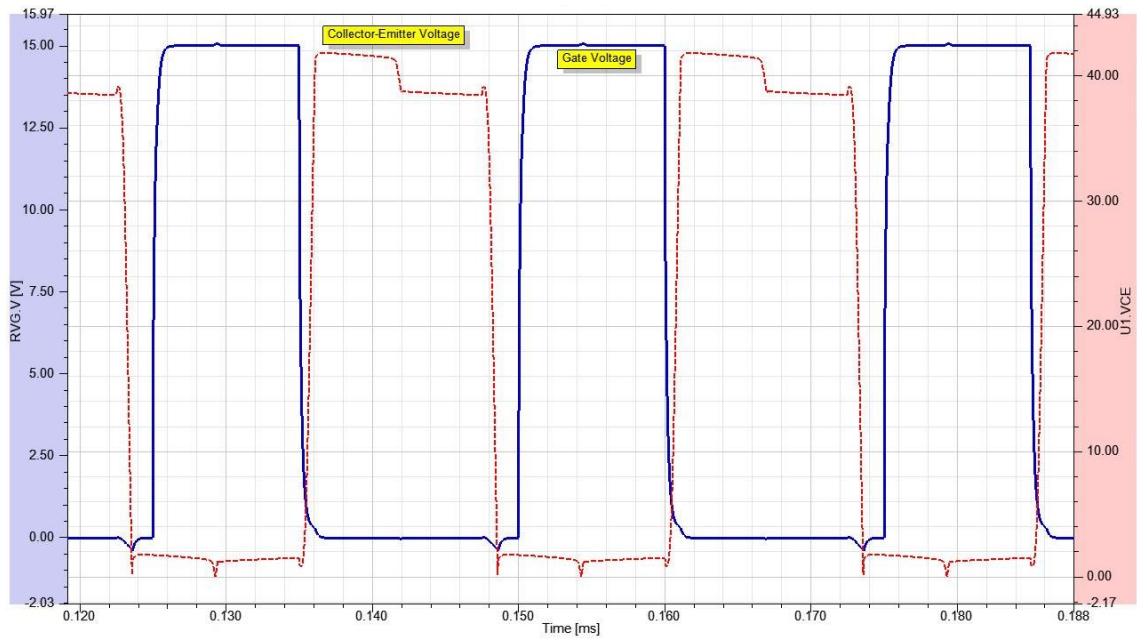


شکل ۵-۹ جریان بار در برابر ولتاژ بار در فرکانس ۳۰ کیلوهرتز

شده و دامنه‌ی آن نیز بیشتر شده است. کار در نزدیک فرکانس تشدید باعث کاهش تلفات کلی سیستم می‌شود. امپدانس مدار تشدید هم در این فرکانس کاهش می‌یابد. برای رسیدن به حالت کلید زنی ولتاژ صفر باید حتماً فرکانس کلید زنی بیشتر از فرکانس تشدید بین سلف و خازن باشد تا بتوان روشن و خاموش شدن کلیدها را در ولتاژ صفر انجام داد.

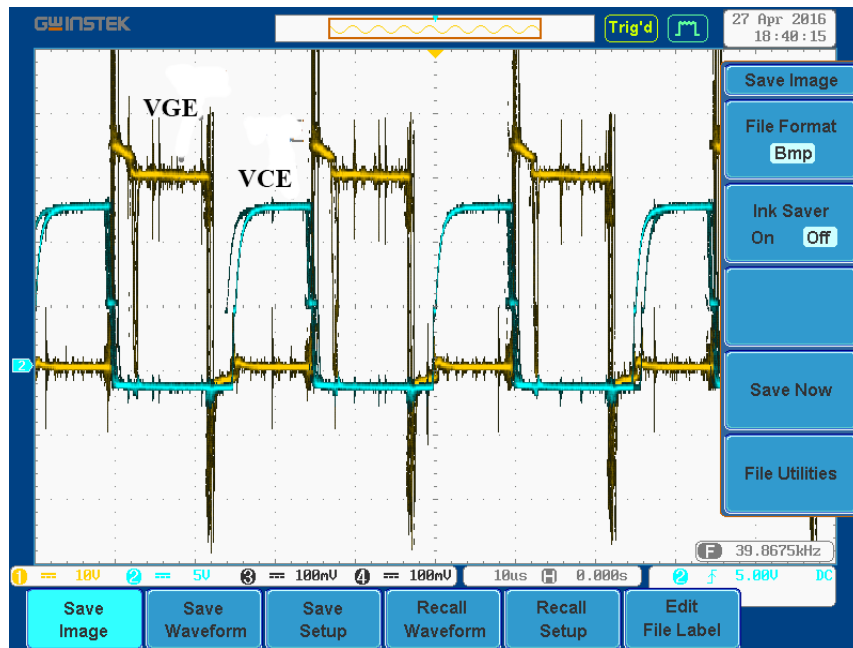
۵-۲-۳- نتایج آزمایشگاهی اینورتر

در این قسمت نتایج آزمایشگاهی اینورتر آورده شده و با نتایج شبیه‌سازی آن مقایسه شده است. تأکید این قسمت بر نشان دادن عملکرد اینورتر در کلید زنی نرم می‌باشد. تصویر سیستم آزمایشگاهی مورد آزمایش در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است.



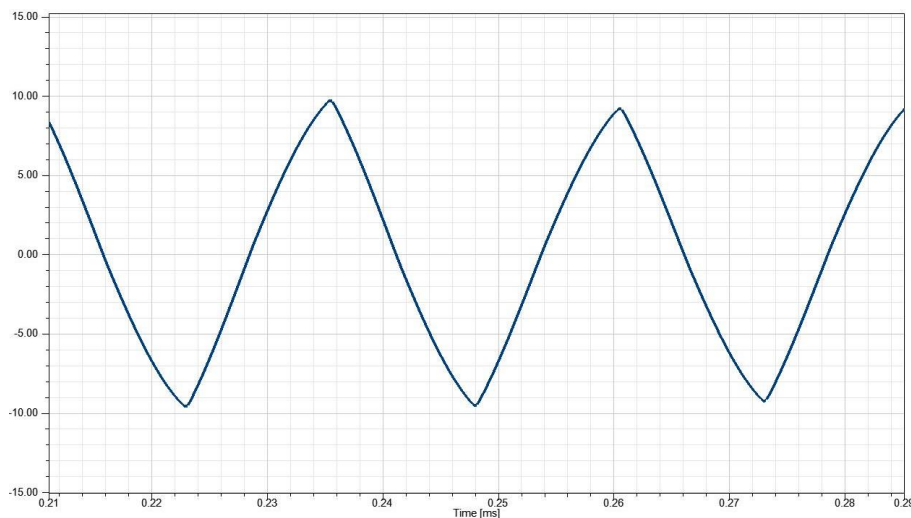
شکل ۵-۱۰ ولتاژ گیت-امیتر (خط صاف) در برابر ولتاژ کلکتور امیتر (نقطه چین) در شبیه سازی با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز

شکل ۵-۱۰ ولتاژ کلکتور-امیتر کلید در برابر ولتاژ گیت در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در شبیه سازی نشان می دهد. در این شکل زمان مرده برابر $\frac{2}{5}$ میکروثانیه در نظر گرفته شده است. نتیجه آزمایشگاهی این شکل در شکل ۵-۱۱ به تصویر درآمده است.



شکل ۵-۱۱ ولتاژ کلکتور امیتر (VCE) در برابر ولتاژ گیت امیتر (VGE) کلید قدرت در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در آزمایشگاه

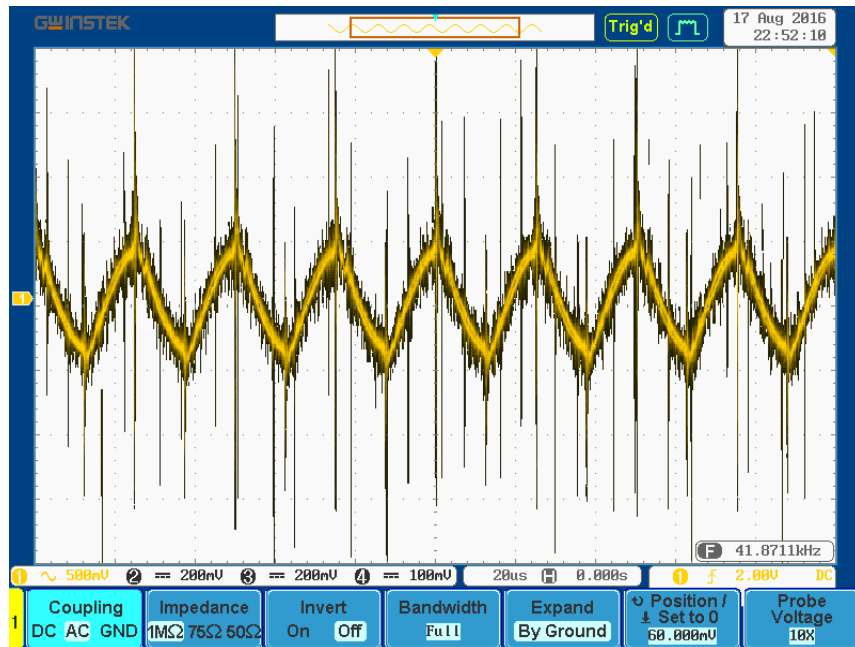
همان‌طور که در شکل ۵-۱۱ مشخص است ولتاژ کلکتور امیتر قبل از رسیدن فرمان گیت و روشن شدن ترانزیستور صفر شده است که این نشان‌دهنده سوئیچینگ ولتاژ صفر می‌باشد.



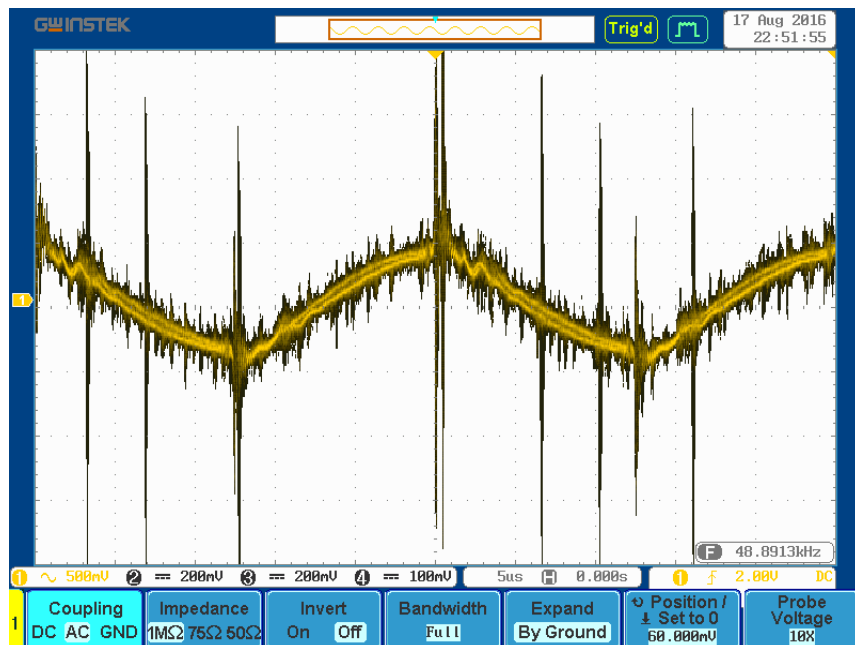
شکل ۵-۱۲ جریان بار در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در شبیه‌سازی

شکل ۵-۱۲ شکل جریان بار در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد و نتیجه عملی آن

نیز در شکل ۵-۱۳ آورده شده است. شکل ۵-۱۴ جریان بار در فرکانس ۵۰ کیلوهرتز را نمایش می‌دهد.



شکل ۵-۱۳ شکل جریان بار اینورتر در آزمایشگاه در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز



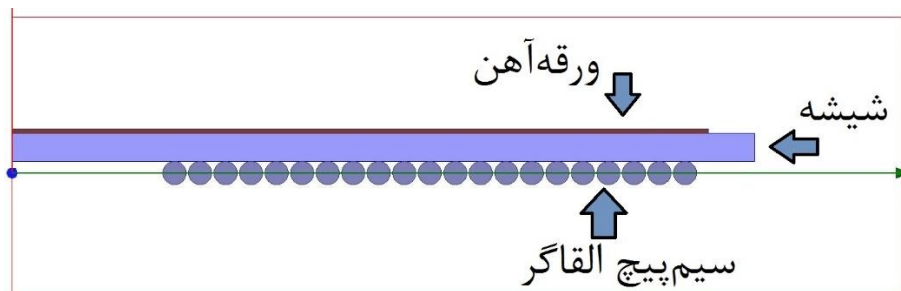
شکل ۵-۱۴ جریان بار در اینورتر با فرکانس ۵۰ کیلوهرتز

به دلیل استفاده از بانک خازنی به جای خازن تکی در مدار تشدید مقدار مقاومت سری خازن کم شده و از حدود $0/1$ اهم به $0/01$ اهم کاهش پیدا کرده است. به همین دلیل مقاومت اهمی آن در شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده است. همچنین به دلیل پایین آمدن جریان عبوری از هر خازن تلفات اهمی که به صورت حرارت ظاهر می‌شود در خازن کاهش پیدا کرده و از گرم شدن خازن جلوگیری می‌گردد.

۵-۳- تغییرات دمای بار و نتایج عملکرد کنترل کننده

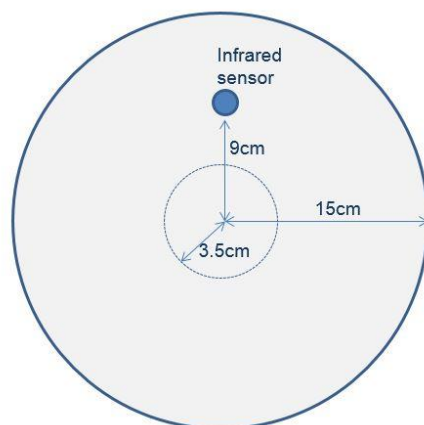
بخش اصلی کار ایجاد حرارت بر روی بار و نتایج تغییرات دما و عملکرد کنترل کننده هست که در این قسمت به آن پرداخته خواهد شد. به دلیل توزیع نامتوازن توان حرارتی بر روی بار و تلفات حرارتی که به صورت رسانایی حرارتی بین بار و سایر ادوات و همچنین جابجایی حرارتی شبیه‌سازی تغییرات دما و پیاده‌سازی کنترل کننده بر روی مدل شبیه‌سازی تنها می‌تواند با ابزارهای اجزاء محدود صورت گیرد. از جمله این ابزارها می‌توان به نرم‌افزارهای ANSYS Fluent و COMSOL اشاره کرد. به دلیل گستردگی مبحث اجزاء محدود و حجم بالای مطالب در این قسمت تنها به نتایج عملی و جواب کنترل کننده در آزمایشگاه بسنده شده است.

بار یک دیسک آهنی با ضخامت ۱ میلی‌متر و شعاع ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که تمام سطح القاگر را بپوشاند. بین القاگر و یک لایه شیشه به ضخامت ۶ میلی‌متر قرار داده شده است. برش عرضی سیستم به صورت شکل ۵-۱۵ است.



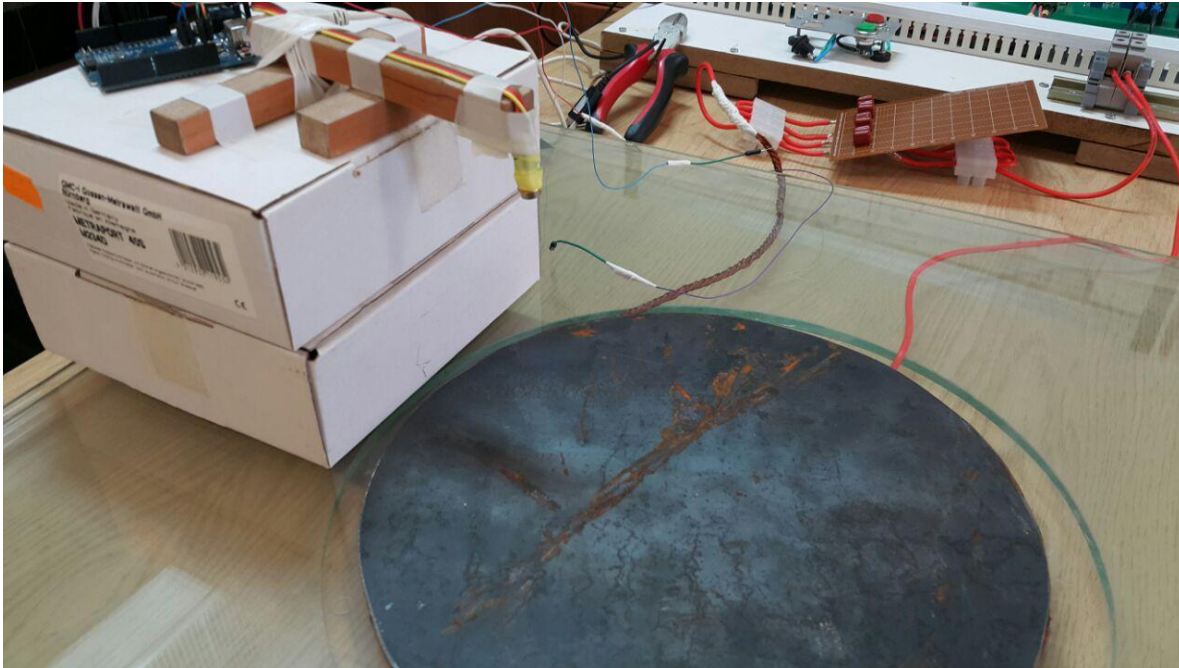
شکل ۵-۱۵ برش عرضی سیستم که شامل بار، شیشه و القاگر است

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد پخش حرارت بر روی سطح دیسک یکنواخت نیست و در قسمت‌هایی که سیم‌پیچ زیر آن قرار دارد بیشتر و در قسمت‌هایی که سیم‌پیچ ندارد کمتر است ولی می‌توان پخش حرارت را در قسمتی مرکز پخش حرارت کوئل (فاصله‌ی بین ۹ تا ۱۰ سانتیمتری از مرکز دیسک) یکنواخت در نظر گرفت. به همین دلیل این مکان می‌تواند مکان مناسبی برای نصب حسگر حرارتی باشد. در شکل ۵-۱۶ محل قرارگیری حسگر بر روی دیسک به نمایش درآمده است.

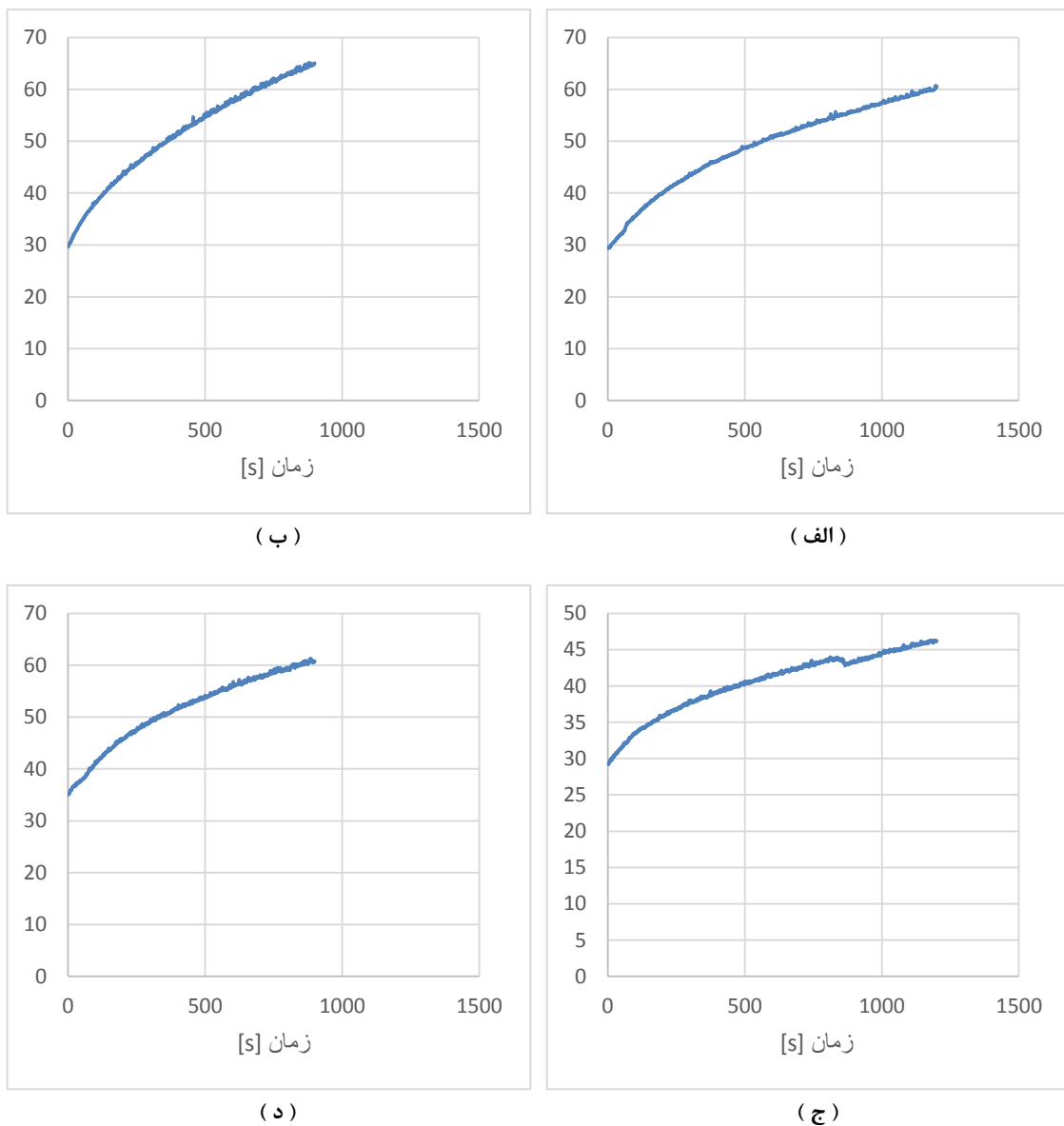


شکل ۵-۱۶ محل قرارگیری حسگر دما

در شکل ۵-۱۷ نحوه‌ی قرارگیری حسگر دما در آزمایشگاه نشان داده شده است. حسگر در فاصله ۹ سانتی‌متری از مرکز دیسک و در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری از دیسک نصب شده است. برای انتخاب فرکانس کلید زنی مناسب برای اینورتر نمودارهای تغییرات دما با جریان ثابت ۲ آمپر برای فرکانس‌های کلید زنی ۳۰ و ۴۰ و ۵۰ و ۶۰ کیلوهرتز آورده شده است. انتخاب فرکانس کلید زنی کمتر از ۲۰ کیلوهرتز موجب ایجاد اغتشاش صوتی شدید شده که بسیار آزاردهنده است و انتخاب نمی‌شود. فرکانس کلید زنی باید بالای ۲۶ کیلوهرتز انتخاب شود چون پایین‌تر انتخاب شدن موجب می‌شود کلید زنی نرم انجام نشود و کلیدهای قدرت آسیب می‌بینند.



شکل ۵-۱۷ محل قرارگیری حسگر دما در آزمایشگاه

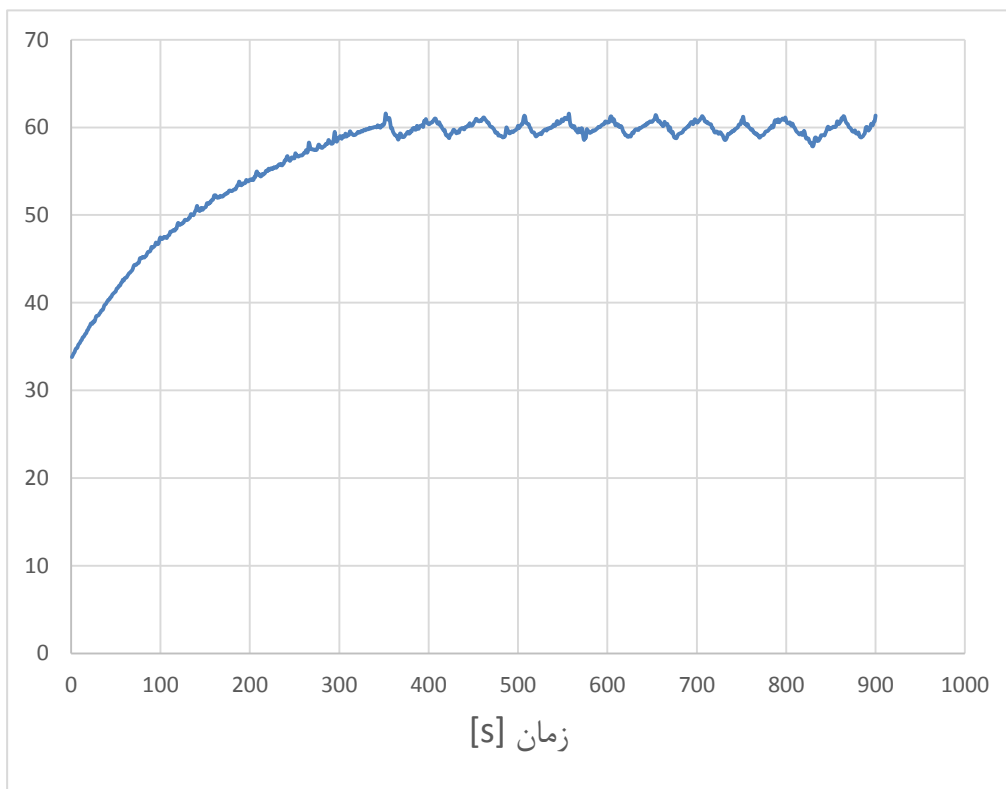


شکل ۵-۸ نمودارهای آزمایشگاهی تغییرات دما بر اساس فرکانس کلید زنی در جریان ثابت ۲ آمپر. الف) ۳۰ کیلوهرتز - ب) ۴۰ کیلوهرتز - ج) ۵۰ کیلوهرتز - د) ۶۰ کیلوهرتز

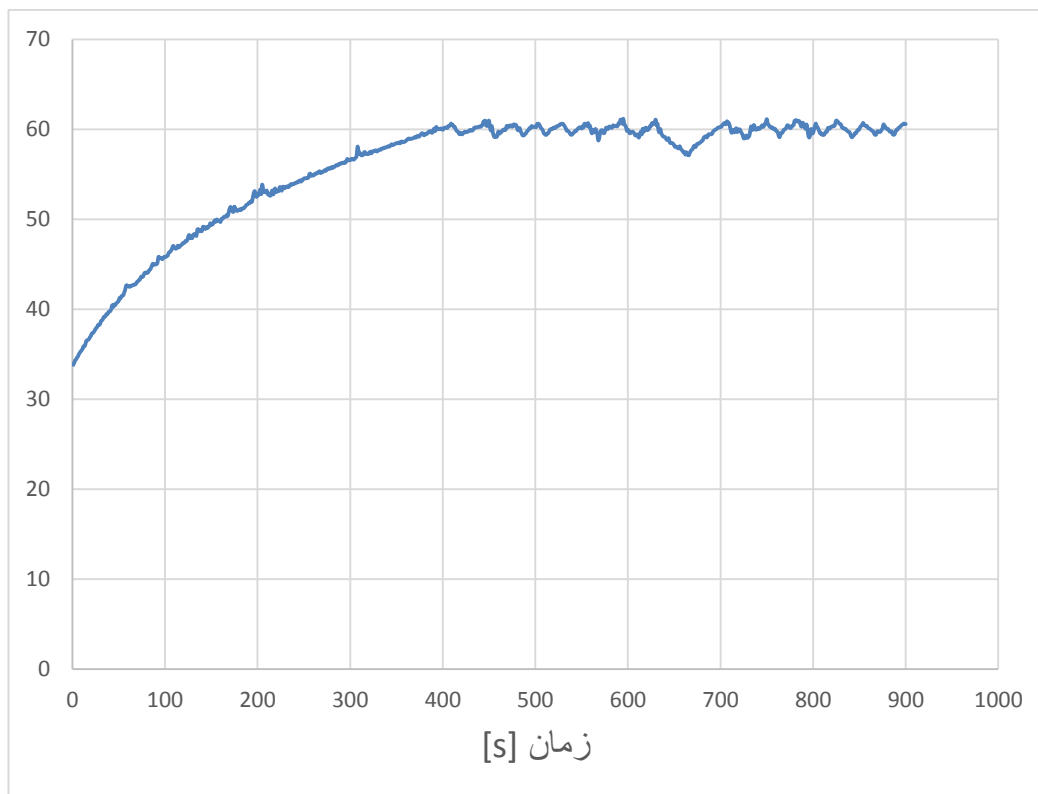
طبق نمودارهای به‌دست‌آمده مشخص است که سیستم در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز بهترین عملکرد را از نظر شیب تغییرات دما در جریان ۲ آمپر در بین فرکانس‌های آزمایش‌شده دارد. با توجه به این استدلال مناسب‌ترین فرکانس برای انتخاب فرکانس کلید زنی اینورتر همین فرکانس است. با انتخاب این فرکانس به‌عنوان فرکانس کلید زنی مرحله بعدی بررسی عملکرد کنترل‌کننده در این فرکانس کلید زنی می‌باشد.

کنترل‌کننده و شیوه‌ی عملکرد آن در فصل قبل به تفصیل توضیح داده شد و الگوریتم آن مورد بررسی قرار گرفت. در این قسمت فقط به عملکرد آن پرداخته خواهد شد. در ابتدا میزان حد بالا و پایین تغییرات دما یکی و برابر ۱ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. نمودار تغییرات دمای بار در این فرکانس به صورت شکل ۵-۱۹ است.

در شکل ۵-۱۹ مقدار مرجع برای کنترل‌کننده ۶۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده و اندازه‌گیری در ۹۰۰ ثانیه انجام گرفته است. زمان نمونه‌برداری ۱ ثانیه انتخاب شده که با توجه به دینامیک کند، سیستم مقدار مناسبی به نظر می‌رسد. ملاحظه می‌شود که کنترل‌کننده به خوبی توانسته مقدار ۶۰ درجه را ردیابی کند و حول آن نوسان نماید. برای بالاتر بردن دقت سیستم مقدار ۰/۵ درجه سانتی‌گراد را برای حد بالا و پایین کنترل‌کننده انتخاب شده است. تغییرات دمای جسم بر حسب درجه سانتی‌گراد در شکل ۵-۲۰ آمده است.



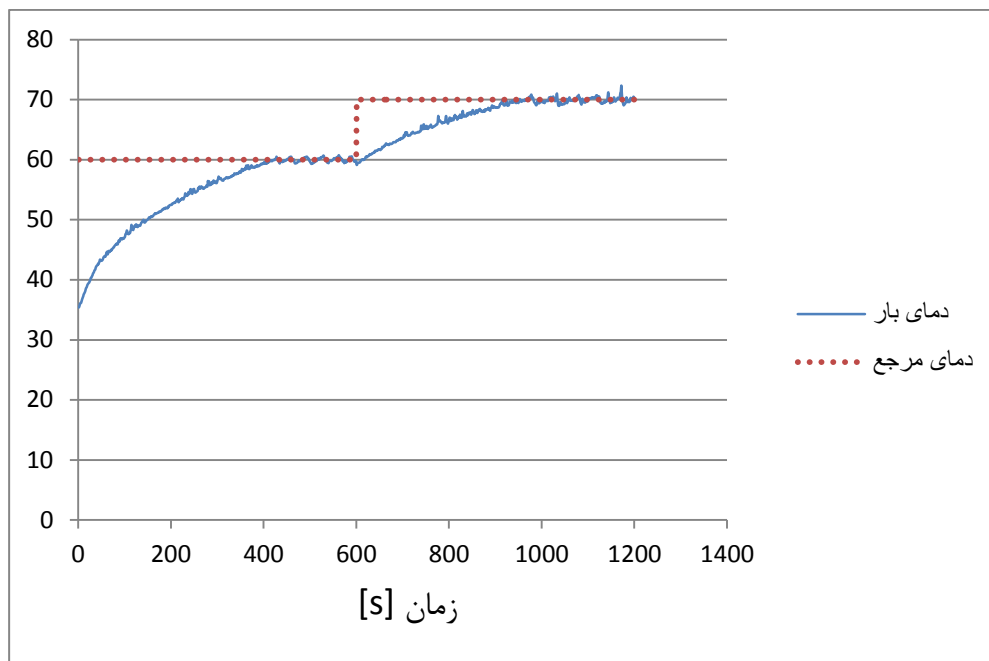
شکل ۵-۱۹ تغییرات دمای بار در شرایط فرکانس کلید زنی ۴۰ کیلوهرتز، جریان ۲ آمپر و در نظر گرفتن ۱ درجه سانتی‌گراد برای حد بالا و پایین تغییرات دما در کنترل‌کننده



شکل ۵-۲۰ تغییرات دمای بار با در نظر گرفتن مقدار ۰/۵ درجه سانتی گراد به عنوان حد بالا و پایین

با مقایسه شکل ۵-۱۹ و شکل ۵-۲۰ مشخص می شود که میزان نوسان حول مقدار مرجع دما در شکل ۵-۱۹ بیشتر از شکل ۵-۲۰ است و در مقابل مقدار دقیق تر کنترل با دامنه نوسان کمتری را در شکل ۵-۲۰ داریم دلیل آن هم کوچک تر انتخاب شدن حد تغییرات دما است. با مقایسه دو نمودار به این نتیجه می رسیم که انتخاب مقدار کوچک تر برای حدود تغییرات دما باعث می شود کنترل دقیق تر با دامنه نوسان کمتری بر روی خروجی داشته باشیم.

با توجه به مطالب ذکر شده مقدار ۰/۵ درجه سانتی گراد برای حد تغییرات دما در نظر گرفته می شود. در مرحله بعدی می خواهیم کنترل کننده را با دو مقدار مرجع مورد آزمون قرار دهیم. در مرحله اول مقدار مرجع دما برابر ۶۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته می شود. بعد از گذشت ۶۰۰ ثانیه از شروع عملیات مقدار مرجع تغییر کرده و به میزان ۷۰ درجه سانتی گراد می رسد. در شکل ۵-۲۱ تغییرات دما در ۱۲۰۰ ثانیه را نمایش می دهد.



شکل ۵-۲۱ تغییرات دمای بار با دو مقدار مرجع

همان‌طور که در شکل ۵-۲۱ ملاحظه می‌شود کنترل‌کننده به‌خوبی توانسته مقادیر موردنظر را ردیابی کرده و دما را در آن نقاط ثابت نگه دارد. عملکرد کنترل‌کننده علی‌رغم سادگی آن رضایت‌بخش بوده و با توجه به دقت خوب حسگر دما و سرعت عمل بالای آن در تشخیص دما می‌توان مقدار حد بالا و پایین آن را اعداد کوچکی انتخاب کرد که باعث بهبود کار کنترل‌کننده می‌شود. با توجه به ماهیت سیستم اینورتر که به‌صورت قطع و وصل کلید زنی عمل می‌کند، محدودیت برای انتخاب حد بالا و پایین و جود داد که سرعت قطع و وصل انتقال توان نباید از دوره کلید زنی کمتر باشد.

فصل ۶ : نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

در این پروژه یک سیستم گرمایش القایی باقابلیت کنترل دما طراحی و شبیه‌سازی شده است. حسگر مورد استفاده در این پروژه یک حسگر دمای مادون قرمز بوده که دما را به صورت دیجیتال به خروجی ارسال می‌کند. برای تولید فرمان کلید زنی از یک FPGA استفاده شده است. نتایج به دست آمده از پروژه به صورت زیر هست.

◆ اینورتر استفاده شده در این پروژه یک اینورتر تک فاز با پل کامل بوده که در آن از یک بار تشدید سری استفاده شده است. با توجه به افزایش خطی تلفات کلید زنی در فرکانس بالا و احتمال آسیب دیدی کلیدهای قدرت، در این پروژه از فن کلید زنی نرم استفاده شده است.

◆ فرکانس کلید زنی اینورتر ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شده در حالی که فرکانس تشدید سلف و خازن ۲۶ کیلوهرتز است که در این صورت با توجه به شرایط پیش‌بینی شده انجام کلید زنی در ولتاژ صفر انتظار می‌رود این موضوع در نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی نشان داده شده است. با توجه به عملکرد مدار در کلید زنی نرم می‌توان بدون نگرانی از آسیب دیدن کلیدهای قدرت به فرکانس‌های کلید زنی بالادست یافت.

◆ استفاده از نرم‌افزار Simplorer و مدل کردن دقیق کلید قدرت استفاده شده در اینورتر سبب شده است تا شبیه‌سازی دقیق و بسیار نزدیک به واقعیت داشته‌اشیم.

◆ برای کنترل دما از یک حسگر دمای مادون قرمز کمک گرفته شده که قابلیت اندازه‌گیری دما در بازه ۷۰- تا ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد را دارد. به دلیل عدم اتصال فیزیکی میان حسگر و بار، می‌توان بدون نگرانی از آسیب دیدن حسگر دمای جسم را بالا برد. مزیت دیگر این روش سرعت بالای آن در تشخیص دما بدون وجود اینرسی حرارتی است. از نتایج آزمایشگاهی نتیجه می‌شود که این روش مناسبی جهت اندازه‌گیری دما هست.

◆ برای انجام کلید زنی با فرکانس و زمان مرده دلخواه مدولاتوری بر پایه FPGA طراحی شده که مقادیر فرکانس و زمان مرده را در دو ثبات دریافت کرده و پالس مناسب جهت کلید زنی را تولید می‌نماید. مزیت طراحی بر پایه FPGA این است که

اولاً تمام قسمت‌های مدار مستقل از هم کار می‌کنند و عمل مدولاسیون بار پردازشی بر قسمت‌های دیگر ایجاد نمی‌کند. ثانیاً افزایش تعداد مدولاتور برای هر مدار نیاز به تجهیزات خاصی ندارد و با طراحی بر پایه Embedded system و قرار دادن تعداد زیادی مدولاتور بر روی گذرگاه پردازنده میکروبلیز تعداد زیادی اینورتر را کنترل نمود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و عملی مدولاتور در بخش قبل آورده شده است.

- ◆ بخش اصلی پروژه کنترل دمای یک دیسک آهنی با قطر ۳۰ سانتیمتر و ضخامت ۱ میلی‌متر است. در این قسمت با توجه به نتایج آورده شده فرکانس کلید زنی ۴۰ کیلوهرتز برای مجموعه در نظر گرفته شده است. الگوریتم کنترل دما در فصل ۴ آورده شده است. الگوریتم کنترل دمای انتخاب شده ساده بوده و در عمل نتایج مناسبی دارد. مقدار حد بالا و پایین برای الگوریتم کنترل دما ۰/۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است که به توجه به دقت حسگر دما عملکرد رضایت بخشی دارد.
- ◆ مجموعه ساخته شده عملکرد قابل قبولی در انجام کلید زنی و کنترل دما دارد و می‌توان از طراحی آن در کاربردهای گرمایش القایی خانگی و صنعتی با توان پایین استفاده نمود.

۶-۲- پیشنهادات

- در این پروژه یک مجموعه گرمایش القایی با توان پایین ساخته شده که می‌توان از آن برای انجام تحقیقات بر روی گرمایش القایی با توان پایین بهره برد. در راستای این پایان‌نامه و برای انجام تحقیقات بیشتر در این حوضه در آینده موارد زیر پیشنهاد می‌گردد
- ◆ طراحی و پیاده‌سازی روش‌های کنترل توان انتقالی به بار در اینورتر تشدیدی با استفاده از مدولاتور پیشنهادی و embedded system.
 - ◆ بررسی و پیاده‌سازی مبدل‌های AC-AC به جای اینورتر در این پروژه و مقایسه عملکرد آن با مبدل استفاده شده در این پایان‌نامه.
 - ◆ استفاده از انواع مختلف بار و مقایسه انواع اینورتر در کاربرد گرمایش القایی.
 - ◆ استفاده از مدولاتور پیشنهادی در سیستم‌های چندسیم‌پیچه و بررسی نتایج.

مراجع

- [1] P. R. Stauffer, T. C. Cetas, and R. C. Jones, "Magnetic Induction Heating of Ferromagnetic Implants for Inducing Localized Hyperthermia in Deep-Seated Tumors," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. BME-31, 1984, pp. 235-251.
- [2] S. Zinn and S. S. L, *Elements of Induction Heating*: ASM International®, 1988.
- [3] J. Acero, J. M. Burdio, L. A. Barragan, D. Navarro, R. Alonso, J. R. Garcia, *et al.*, "The domestic induction heating appliance: An overview of recent research," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE*, 2008, pp. 651-657.
- [4] H. Li, Y. Li, and Y. Peng, "FPGA-Based All Digital Phase-Locked Loop Controlled Induction Heating Power Supply Operating at Optimized ZVS Mode," in *TENCON 2006 - 2006 IEEE Region 10 Conference*, 2006, pp. 1-4.
- [5] Y. Kawaguchi, E. Hiraki, T. Tanaka, H. Sadakata, A. Fujita, H. Omori, *et al.*, "A comparison of operation mode for soft-switching PFC converter for induction heating cooking appliance," in *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*, 2009, pp. 13-18.
- [6] Ó. Lucia, L. A. Barragan, J. M. Burdio, Ó. Jimenez, D. Navarro, and I. Urriza, "A Versatile Power Electronics Test-Bench Architecture Applied to Domestic Induction Heating," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 998-1007, 2011.
- [7] S. Llorente, F. Monterde, J. M. Burdio, and J. Acero, "A comparative study of resonant inverter topologies used in induction cookers," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE*, 2002, pp. 1168-1174 vol.2.
- [8] I. Millan, J. M. Burdio, J. Acero, O. Lucia, and D. Palacios, "Resonant inverter topologies for three concentric planar windings applied to domestic induction heating," *Electronics Letters*, vol. 46, pp. 1225-1226, 2010.
- [9] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, and J. M. Burdio, "Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, pp. 2509-2520, 2014.
- [10] G. M. Segura, "Induction heating converter's design, control and modeling applied to continuous wire heating," UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, 2012.
- [11] C. C. Chen, C. C. Tai, S. J. Huang, Y. H. Chen, and C. H. Lin, "Thermotherapy Induction Heating Apparatus With New Magnetic-Wrapped Coil Design," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, pp. 2592-2600, 2014.
- [12] A. Boadi, Y. Tsuchida, T. Todaka, and M. Enokizono, "Designing of suitable construction of high-frequency induction heating coil by using finite-element method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, pp. 4048-4050, 2005.

- [13] P. R. Stauffer, P. K. Sneed, H. Hashemi, and T. L. Phillips, "Practical induction heating coil designs for clinical hyperthermia with ferromagnetic implants," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 41, 1994, pp. 17-28.
- [14] R. M. Baker, "Design and calculation of induction-heating coils," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, vol. 76, 1957, pp. 31-40.
- [15] I. Lope, J. Acero, J. M. Burdío, C. Carretero, and R. Alonso, "Design and Implementation of PCB Inductors With Litz-Wire Structure for Conventional-Size Large-Signal Domestic Induction Heating Applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, 2015, pp. 2434-2442.
- [16] O. Lucia, J. M. Burdío, I. Millan, J. Acero, and D. Puyal, "Load-Adaptive Control Algorithm of Half-Bridge Series Resonant Inverter for Domestic Induction Heating," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, 2009, pp. 3106-3116.
- [17] M. K. Kazimierczuk and D. Czarkowski, *RESONANT POWER CONVERTERS*. New Jersey: JOHN WILEY & SONS, 2011.
- [18] F. S. Corporation, "Application note AN9012," 2000, www.fairchildsemi.com.
- [19] o. semiconductor, "Application note AND9166," 2014, www.onsemi.com.
- [20] M. H. RASHID, "POWER ELECTRONICS HANDBOOK," 2001.
- [21] O. s. Jime'nez, O. Lucia, I. Urriza, L. A. Barragan, P. Mattavelli, and D. Boroyevich, "An FPGA-Based Gain-Scheduled Controller for Resonant Converters Applied to Induction Cooktops," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, 2014, pp. 2143-2152.
- [22] J. Acero, D. Navarro, L. A. Barragan, I. Garde, J. I. Artigas, and J. M. Burdío, "FPGA-Based Power Measuring for Induction Heating Appliances Using Sigma-Delta A/D Conversion," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, 2007, pp. 1843-1852.
- [23] Y. Yin and R. Zane, "Digital phase control for resonant inverters," *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 2, 2004, pp. 51-53.
- [24] J. Tian, J. Petzoldt, T. Reimann, M. Scherf, and G. Berger, "Modelling of asymmetrical pulse width modulation with frequency tracking control using phasor transformation for half-bridge series resonant induction cookers," in *Power Electronics and Applications, European Conference on*, 2005, pp. 9 pp.-P.9, 2005.
- [25] D. Puyal, L. A. Barragan, J. Acero, J. M. Burdío, and I. Millan, "An FPGA-Based Digital Modulator for Full- or Half-Bridge Inverter Control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, 2006, pp. 1479-1483.
- [26] N. J. Park, D. Y. Lee, and D. S. Hyun, "A Power-Control Scheme With Constant Switching Frequency in Class-D Inverter for Induction-Heating Jar Application," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, 2007, pp. 1252-1260.
- [27] A. d. Castro and E. Todorovich, "High Resolution FPGA DPWM Based on Variable Clock Phase Shifting," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, 2010, pp. 1115-1119.
- [28] C. Franco, J. Acero, R. Alonso, C. Sagues, and D. Paesa, "Inductive Sensor for Temperature Measurement in Induction Heating Applications," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, 2012, pp. 996-1003.

- [29] E. Imaz, R. Alonso, C. Heras, I. Salinas, E. Carretero, and C. Carretero, "Infrared Thermometry System for Temperature Measurement in Induction Heating Appliances," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, 2014, pp. 2622-2630.
- [30] V. Rudenv, D. Loveless, R. Cook, and M. Black, *Handbook of Induction Heating*: MARCEL DEKKER, INC, 2003.
- [31] W. C. Moreland, "The Induction Range: Its Performance and Its Development Problems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-9, 1973, pp. 81-85.
- [32] B. Meziane and H. Zeroug, "Comprehensive Power Control Performance Investigations of Resonant Inverter for Induction Metal Surface Hardening," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, 2016, pp. 6086-6096.
- [33] Ó. Jiménez, Ó. Lucía, I. Urriza, L. A. Barragan, D. Navarro, and V. Dinavahi, "Implementation of an FPGA-Based Online Hardware-in-the-Loop Emulator Using High-Level Synthesis Tools for Resonant Power Converters Applied to Induction Heating Appliances," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, 2015, pp. 2206-2214.
- [34] A. Namadmalan and J. S. Moghani, "Tunable Self-Oscillating Switching Technique for Current Source Induction Heating Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, 2014, pp. 2556-2563.
- [35] O. Lucia, J. Acero, C. Carretero, and J. M. Burdio, "Induction Heating Appliances: Toward More Flexible Cooking Surfaces," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, 2013, pp. 35-47.
- [36] X. Wang, J. Tang, and L. Shi, "Induction Heating of Magnetic Fluids for Hyperthermia Treatment," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, 2010, pp. 1043-1051.
- [37] انتشارات جنگل: *FPGA, VHDL, Max+PLUS II*: ح. ص. بیدگلی. طراحی خودکار مدار های دیجیتال و جاودانه, ۱۳۸۸.
- [38] Xilinx, "XC9500XL High-Performance CPLD Family Data Sheet," 2009.
- [39] xilinx, "Spartan-3 Generation FPGA User Guide," in *Extended Spartan-3A, Spartan-3E, and Spartan-3 FPGA Families*, ed: Xilinx, 2011.
- [40] S. V. A. Muthuramalingam, Vedula P. A. Janakiraman, "Performance evaluation of an FPGA controlled soft switched inverter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, 2006, pp. 923-932.
- [41] J. Tian, G. Berger, T. Reimann, M. Scherf, and J. Petzoldt, "Design and Implementation of a FPGA-Based Controller for Resonant Inverters," in *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 779-784, 2007.
- [42] J. Alvarez, O. Lopez, F. D. Freijedo, and J. Doval-Gandoy, "Digital Parameterizable VHDL Module for Multilevel Multiphase Space Vector PWM," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, 2011, pp. 3946-3957.
- [43] M. P. Aguirre, L. Calvino, and M. I. Valla, "Multilevel Current-Source Inverter With FPGA Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, 2013, pp. 3-10.
- [44] O. Gulbudak and E. Santi, "FPGA-Based Model Predictive Controller for Direct Matrix Converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, 2016, pp. 4560-4570.
- [45] Melexis, "MLX90614 family Datasheet," 2009.

Abstract:

One of the main applications of electrical energy is heat generation. Reasons of using electrical energy to produce heat are: easy access, cleanliness, safety and fast heat production for medical, domestic and industrial applications. One of the reasons that makes the use of electrical energy non-economical for heat production is low efficiency of such systems. The heat generated by the electromagnetic induction method in addition to the above benefits, is more efficient than other methods of heating by electricity. Thanks to developments of power electronic device and price reduction of such equipment, using induction heating in industry and utensils become more popular than ever and is expanding. In this thesis, an induction heating system designed and implemented using FPGA and its performance has been analyzed. In this thesis an infrared sensor is used to measure the temperature of the object and an algorithm to control the temperature is presented. In addition a modulator for switching of inverter in induction heating applications based on FPGA has designed. To reduce the pressure of switching of inverter in high-frequency, in this thesis a zero voltage switching technique is used. The FPGA-based modulator capable to adjust dead time and frequency required for soft switching induction heating applications. At the end the practical results of the implemented system has presented and compared with simulation results.

Keywords: Induction-heating, FPGA, modulator design, Arduino, temperature control, temperature measurement, Hysteresis method temperature control, infrared temperature measurement, FPGA-based modulator.



Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Power Electronic and Machine Engineering

**Temperature control of induction heating using FPGA in
inverter, design and implementation**

**By:
Saeed Babouie**

**Supervisor:
Dr. Ali Dastfan**

**Advisor:
Dr. Seyed Ali Soleymani Eivari**

Feburary 2017