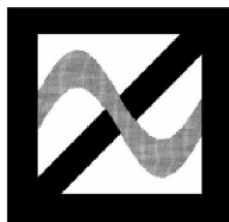




JDEVS

جهاد دانشگاهی علم و صنعت ایران



مرکز مبدل‌ها و منابع تغذیه
گروه تحقیق و توسعه

پروژه اینورتر خورشیدی ۸۸۰ کیلو ولت آمپر

مدیر پروژه

مهندس محسن فاضلی

طراح و مجری پروژه

دکتر محمد پیچان

مشاور پروژه

دکتر سیدادیب ابریشمی‌فر

آبان ۱۴۰۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول ها.....	ج
فهرست شکل ها.....	د
علائم اختصاری.....	و
فصل ۱ ساختار سیستم پیشنهادی.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- انواع اینورترهای سیستم فتوولتائیک.....	۳
۱-۲-۱- نمونه های صنعتی موجود در بازار.....	۵
۳-۱- ساختار سیستم پیشنهادی.....	۶
فصل ۲ طراحی و شبیه سازی اینورتر پیشنهادی.....	۹
۱-۲- ساختار مدار قدرت اینورتر پیشنهادی.....	۱۰
۲-۲- سیستم کنترلی.....	۱۰
۳-۲- الگوریتم ردیابی بیشینه توان (MPPT).....	۱۱
۴-۲- کنترل کننده جریان شبکه.....	۱۲
۵-۲- طراحی و شبیه سازی سیستم تست 12kW.....	۱۳
۶-۲- طراحی فیلتر LCL.....	۱۴
۱-۶-۲- محاسبه مقدار خازن.....	۱۴
۲-۶-۲- محاسبه سلف سمت شبکه (L_g).....	۱۵
۷-۲- ضرایب کنترل کننده ها.....	۱۵
۸-۲- شبیه سازی در شرایط تابش و دمای نامی ($1000 W/m^2, 25^0 C$).....	۱۶
۹-۲- شبیه سازی در شرایط تغییر پلهای تابش و دما.....	۱۷
فصل ۳ طراحی و شبیه سازی سیستم 220kW.....	۱۹
۱-۳- مدل سیستم 220Kw در MATLAB/Simulink.....	۲۰
۲-۳- پارامترهای سیستم.....	۲۰
۳-۳- فیلتر LCL.....	۲۱
۴-۳- ضرایب کنترل کننده ها.....	۲۱
۵-۳- شبیه سازی در شرایط تابش و دمای نامی ($1000 W/m^2, 25^0 C$).....	۲۲
۶-۳- شبیه سازی در شرایط تغییر پلهای تابش و دما.....	۲۳
۷-۳- طراحی سلفها برای سیستم 12kW.....	۲۴
۸-۳- نتیجه گیری.....	۲۵

۲۶.....۳-۹-مراجع

فصل ۴ امولاتور خورشیدی..... ۲۷

۲۸.....۴-۱-معرفی امولاتورها و مزیت آن

۲۸.....۴-۲-مدل سازی ریاضی پنل خورشیدی

۲۸.....۴-۲-۱-مدل سازی تک دیودی

۲۹.....۴-۲-۲-مدل سازی دو دیودی

۳۱.....۴-۳-امولاتور خورشیدی بر مبنای مدل های الکترونیک قدرت

۳۴.....۴-۴-طراحی مبدل باک به منظور به کارگیری در امولاتور خورشیدی

۳۵.....۴-۵-شبیه سازی و طراحی کنترل کننده امولاتور خورشیدی

۳۸.....۴-۶-شبیه سازی روش کنترل مستقیم امولاتور خورشیدی

۴۳.....۴-۷-شبیه سازی روش کنترل خط مقاومتی امولاتور خورشیدی

۴۵.....۴-۸-مراجع

فصل ۵ مقدمات پیاده سازی سختافزاری نهایی..... ۴۷

۴۸.....۵-۱-انتخاب IGBT و درایور IGBT

۴۸.....۵-۱-۱-انتخاب IGBT و درایور

۴۸.....۵-۱-۲-درایور فرستنده های نوری

۴۹.....۵-۲-طراحی و جانمایی مکانیکال

۴۹.....۵-۲-۱-جانمایی اولیه

۵۰.....۵-۲-۲-جانمایی دوم

۵۲.....۵-۲-۳-جانمایی سوم

۵۳.....۵-۲-۴-جانمایی چهارم

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول (۱-۱) مشخصات سیستم پیشنهادی.....	۶
جدول (۱-۲) پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده.....	۱۳
جدول (۲-۲) مشخصات سلول خورشیدی SUN POWER SPR 400E در شرایط تابش $1000 W/m^2$ و $25^{\circ}C$	۱۴
جدول (۳-۲) پارامترهای فیلتر LCL.....	۱۵
جدول (۴-۲) ضرایب کنترل‌کنندهها.....	۱۵
جدول (۱-۳) پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده.....	۲۰
جدول (۲-۳) مشخصات سلول خورشیدی SUN POWER SPR 415E در شرایط تابش $1000 W/m^2$ و $25^{\circ}C$	۲۰
جدول (۳-۳) پارامترهای فیلتر LCL.....	۲۱
جدول (۴-۳) ضرایب کنترل‌کنندهها.....	۲۱
جدول (۵-۳) پارامترهای سیستم.....	۲۴
جدول (۶-۳) پارامترهای طراحی.....	۲۵
جدول (۷-۳) مشخصات نهایی سلفها.....	۲۵
جدول (۱-۴) مشخصات اولیه طراحی مبدل کاهنده.....	۳۵
جدول (۲-۴) پارامترهای کنترل‌کننده مد جریان.....	۳۹
جدول (۱-۵) نتایج حاصل از آزمایش عملی در سطح توان حدود ۱۰۰۰ وات.....	۶۲
جدول (۲-۵) نتایج حاصل از آزمایش عملی در سطح توان حدود ۱۶۰۰ وات.....	۶۴

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱) نمایی از یک سیستم فتوولتائیک منفصل از شبکه [1].....	۴
شکل (۲-۱) نمایی از یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه [1].....	۵
شکل (۳-۱) ساختار سیستم پیشنهادی.....	۷
شکل (۴-۱) نقشه اولیه و سیم‌کشیهای مازول قدرت به همراه کلیدهای ورودی- خروجی.....	۸
شکل (۵-۱) ساختار تابلو و نمایشگرها.....	۸
شکل (۱-۲) شمای سیستم شبیه‌سازی شده.....	۱۰
شکل (۲-۲) ساختار کلی سیستم با کنترل‌کننده پیشنهادی.....	۱۱
شکل (۳-۲) روند نمای الگوریتم ردیابی بیشینه توان.....	۱۲
شکل (۴-۲) سیستم شبیه‌سازی شده در MATLAB/SIMULINK.....	۱۳
شکل (۵-۲) شکل موجهای ولتاژ و جریان PV.....	۱۶
شکل (۶-۲) شکل موجهای جریان و ولتاژ شبکه.....	۱۷
شکل (۷-۲) طیف هارمونیکي جریان شبکه.....	۱۷
شکل (۸-۲) شکل موجهای ولتاژ و جریان شبکه در شرایط تغییر تابش و دما.....	۱۸
شکل (۹-۲) شکل موج جریان شبکه در شرایط تغییر تابش و دما.....	۱۸
شکل (۱-۳) سیستم شبیه‌سازی شده در MATLAB/SIMULINK.....	۲۰
شکل (۲-۳) شکل موجهای ولتاژ و جریان PV.....	۲۲
شکل (۳-۳) شکل موجهای جریان و ولتاژ شبکه.....	۲۳
شکل (۴-۳) طیف هارمونیکي جریان شبکه.....	۲۳
شکل (۵-۳) شکل موجهای ولتاژ و جریان شبکه در شرایط تغییر تابش و دما.....	۲۴
شکل (۶-۳) شکل موج جریان شبکه در شرایط تغییر تابش و دما.....	۲۴
شکل (۱-۴) مدل تک دیودی پنل خورشیدی [۶].....	۲۹
شکل (۲-۴) مدل تک دیودی پنل خورشیدی [۶].....	۲۹
شکل (۳-۴) امولاتور پیشنهادی بر مبنای مبدل افزایشنده در [۷].....	۳۱
شکل (۴-۴) منحنی مشخصه پنل در مرجع [۷].....	۳۲
شکل (۵-۴) امولاتور پیشنهادی بر مبنای مبدل کاهنده در مرجع [۸].....	۳۳
شکل (۶-۴) ناحیه‌های خطی منحنی مشخصه پنل خورشیدی [۹].....	۳۴
شکل (۷-۴) روش کنترل مستقیم امولاتور خورشیدی. الف) روش کنترل مد جریان ب) روش کنترل مد ولتاژ [۱].....	۳۶
شکل (۸-۴) روش کنترلی خط مقاومتی [۵].....	۳۷
شکل (۹-۴) منحنی مشخصه V-I پنل خورشیدی مورد بررسی.....	۳۸
شکل (۱۰-۴) شبیه‌سازی امولاتور خورشیدی با کنترل مستقیم.....	۳۸
شکل (۱۱-۴) ساختار کنترل‌کننده مد جریان شبیه‌سازی شده.....	۳۹
شکل (۱۲-۴) جدول جستجو در نظر گرفته شده پنل بر اساس شدت تابش و دماهای مختلف.....	۴۰
شکل (۱۳-۴) مقایسه مشخصه V-I پنل و امولاتور طراحی شده در شرایط تابش و دمای مختلف.....	۴۱
شکل (۱۴-۴) پاسخ دینامیکی روش کنترل مستقیم امولاتور در شرایط تغییرات ناگهانی بار. الف) مقایسه جریان خروجی مبدل و جریان مرجع. ب) ولتاژ خروجی مبدل. پ) جریان سلف.....	۴۲
شکل (۱۵-۴) شبیه‌سازی امولاتور خورشیدی با کنترل خط مقاومتی.....	۴۳

- شکل ۴-۱۶) پاسخ دینامیکی روش کنترلی بر مبنای خط مقاومت در شرایط تغییرات ناگهانی بار. الف) مقایسه جریان خروجی مبدل و جریان مرجع. ب) ولتاژ خروجی مبدل. پ) جریان سلف ۴۴
- شکل ۴-۱۷) مقایسه پاسخ گذرای روش کنترلی مستقیم و روش بر مبنای خط مقاومت ۴۵
- شکل ۵-۱) TYPICAL 5 MBD INTERFACE CIRCUIT ۴۹
- شکل ۵-۲) جانمایی اولیه برای طرح مکانیکی ۵۰
- شکل ۵-۳) جانمایی دوم و طرح دیگری برای بخش مکانیکی ۵۱
- شکل ۵-۴) جانمایی سوم ۵۲
- شکل ۵-۵) شبیه‌سازی حرارتی برای طرح تک کلید ۵۳
- شکل ۵-۶) جانمایی بر اساس یک طرح خارجی ۵۴
- شکل ۵-۷) شبیه‌سازی نخست برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر ۵۵
- شکل ۵-۸) شبیه‌سازی دوم برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر ۵۶
- شکل ۵-۹) شبیه‌سازی سوم برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر ۵۷
- شکل ۵-۱۰) شبیه‌سازی چهارم برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر ۵۸
- شکل ۵-۱۱) شبیه‌سازی پنجم برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر ۵۹
- شکل ۵-۱۲) شبیه‌سازی ششم برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر ۶۰
- شکل ۵-۱۳) شبیه‌سازی هفتم برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر ۶۱
- شکل ۵-۱۴) نمایی از ساختار فیزیکی نصب دیودهای قدرت بر روی گرماگیر در آزمایش عملی ۶۲
- شکل ۵-۱۵) نتیجه شبیه‌سازی بر روی ساختار فیزیکی حاصل از ۵ دیود سری با نرم‌افزار سالیید ورکز در توان حدود ۱۰۰۰ وات ۶۳
- شکل ۵-۱۶) نتیجه شبیه‌سازی بر روی ساختار فیزیکی حاصل از ۵ دیود سری با نرم‌افزار سالیید ورکز در توان ۱۶۴۸ وات ۶۵

علائم اختصاری

[illegible]

فصل ۱

ساختار سیستم پیشنهادی

۱-۱- مقدمه

امروزه با توجه به حساسیت‌های موجود نسبت به پایان‌پذیر بودن منابع سوخت‌های فسیلی و همچنین نگرانی‌های ناشی از گرم شدن کره زمین، استفاده از منابع انرژی‌های نو به شدت رو به افزایش است. از سوی دیگر پاک، ارزان بودن و دسترسی ساده‌ی این منابع کشورهای دنیا مانند کشورهای اروپایی و آمریکایی را با سرعت زیاد به سمت تولید برق از این منابع سوق داده است. این افزایش تمایل به تولید انرژی از منابع انرژی‌های نو به حدی چشم‌گیر و گسترده بوده است که احتمال این که در آینده‌ای نه‌چندان دور تبدیل به یک وضعیت استراتژیک هر کشور شود نیز وجود دارد. در کشور ایران نیز به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی ویژه‌ای که دارد تولید انرژی از باد و خورشید در اولویت قرار گرفته است که انرژی حاصل از خورشید با توجه به کویری بودن کشور ایران بیش‌تر مورد توجه می‌باشد. انرژی حاصل از خورشید برای تبدیل به انرژی برق و ورود به چرخه تولید انرژی الکتریکی نیازمند تجهیزات واسطی بوده که یکی از اصلی‌ترین و در عین حال مهم‌ترین این تجهیزات اینورترهای صفحه‌های خورشیدی^۱ می‌باشد.

از سوی دیگر یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنعت برق ایران که در چندسال اخیر بسیار محسوس بوده، چالش تأمین توان الکتریکی مورد نیاز مصرف‌کننده‌ها در شبکه برق است. در ریشه‌یابی علل بروز این چالش جدید می‌توان به نکات قابل تأمل زیر اشاره نمود:

- ۱) رشد مصرف‌کننده‌های الکتریکی نوظهور و به تبع آن افزایش میزان مصرف انرژی
- ۲) عدم بهره‌برداری از نیروگاه‌های جدید جهت افزایش بیشینه ظرفیت قابل تولید
- ۳) خارج شدن تمام/بخشی از ظرفیت نیروگاهی کشور به دلیل خرابی و عدم امکان تعمیرات در شرایط تحریم
- ۴) عدم توسعه و کمبود نیروگاه‌های کوچک غیرمتمرکز و پشتیبان شبکه برق
- ۵) تغییرات آب و هوایی کاهش تولید برق آبی کشور در اثر کاهش بارندگی‌ها

عوامل اساسی فوق از یک‌سو و رویکرد تأکید بر سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های متمرکز سنتی از سوی دیگر، سبب شد میزان مصرف از میزان تولید پیشی بگیرد. در حال حاضر ظرفیت تولید انرژی در کشور، ۸۵ هزار مگاوات بوده و طبق سند برنامه‌ریزی وزارت نیرو، این عدد باید به ۱۲۰ هزار مگاوات ساعت در طی ۴ سال آتی برسد. یکی از روش‌های تأمین توان الکتریکی که سرمایه‌گذاری در آن در چندسال گذشته کم‌رنگ بود،

^۱ Photovoltaic (PV) Inverter

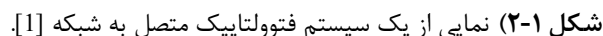
نیروگاه‌های فتوولتائیک است. در کشور به واسطه موقعیت جغرافیایی و نزدیکی به خط استوا، حداقل میزان تابش 5500 W/m^2 تا 6500 W/m^2 در بسیاری از مناطق آن وجود دارد. در ریشه‌یابی علل کمی اقبال برای سرمایه‌گذاری در این حوزه، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- (۱) چالش‌های اقتصادی بازار برق تولیدی این دست از نیروگاه‌ها که توسط متولی امر تاکنون برطرف نشده است.
 - (۲) وابستگی به خارج از کشور برای تأمین سیستم‌ها و اجزای نیروگاه‌های برق فتوولتائیک به‌خصوص اینورترهای پرفریت آن که در شرایط تحریم هزینه نهایی تأمین آن نیز قابل ملاحظه می‌گردد.
 - (۳) عدم انطباق دانش فنی داخل کشور با تکنولوژی روز دنیا در طراحی و ساخت این نوع از نیروگاه‌ها
- اگر چالش‌های تأمین سرمایه اولیه و مسائل اقتصادی تأمین توان فتوولتائیک را حل شده و عزم کشور را برای تحقق نیروگاه‌های فتوولتائیک، مطابق با سند توسعه نیروگاهی جدید کشور، جدی در نظر بگیریم، موارد ۲ و ۳ یادشده در درجه اهمیت بسیار بالایی قرار می‌گیرند، زیرا:

- (۱) وجود تکنولوژی داخلی در توسعه نیروگاه‌های فتوولتائیک از هزینه سرمایه‌گذاری اولیه که عمده‌تاً ارزی است و نه ریالی می‌کاهد.
- (۲) از خروجی سرمایه‌گذاری به عمل آورده و مانع صرف ارز می‌شود.
- (۳) بومی شدن تکنولوژی تجهیزات الکترونیکی و الکترونیک قدرتی این نیروگاه‌ها موجب تسهیل در خدمات و تعمیرات و بی‌نیازی از خارج از کشور در این حوزه می‌شود.
- (۴) فرصت‌های شغلی بسیاری برای فارغ‌التحصیلان و نیروهای متخصص دانشگاهی ایجاد می‌شود.
- (۵) تدوین دانش فنی ساخت این اجزا موجب تربیت نیروهای متخصص جدید در این حوزه می‌شود.
- (۶) توسعه این تجهیزات به همراه نشان‌سازی تجاری و بازاریابی صحیح سبب افزودن یک محصول جدید به سبد خدمات فنی و مهندسی کشور گردیده و لذا می‌توان به یک خدمت جدید مهندسی برای عرضه و صادرات به خارج از کشور دست یافت.

۱-۲- انواع اینورترهای سیستم فتوولتائیک

اینورترهای منفصل از شبکه: این اینورترها معمولاً در مکان‌هایی دور از شبکه‌ی برق‌رسانی قرار می‌گیرند. در این نوع کاربری تمام انرژی مورد نیاز با استفاده از انرژی خورشیدی تأمین و ذخیره و در زمان مقتضی استفاده می‌شود. توان صفحه‌های خورشیدی در مقایسه با نمونه‌های متصل به شبکه معادل می‌تواند بزرگ‌تر باشد و همچنین در این ساختار، استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی مانند باتری الزامی است. بنابر مطالعات صورت گرفته ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی از یک روز آفتابی برای استفاده در چند روز متوالی ابری در



۱-۲-۱- نمونه‌های صنعتی موجود در بازار

¹ Maximum Power Point Tracking (MPPT)

جنبه‌های فرعی کار مانند میزان ولتاژ MPPT و یا تعداد ماژول‌های MPPT و ... دارای تفاوت می‌باشد.

به طور کلی در توان‌های زیر 5kVA می‌توان گفت که تمامی ساختارها تک‌فاز و دارای یک ماژول MPPT می‌باشند که برای نمونه به کاتالوگ شرکت SMA می‌توان رجوع کرد. در توان‌های بالاتر و تا توان نامی حدود 10KVA هم ساختار تک‌فاز و هم ساختار سه‌فاز پیشنهاد شده است و تعداد ماژول‌های MPPT تا عدد ۳ نیز قابل افزایش می‌باشد که نمونه‌ی آن در محصولات شرکت SMA مشاهده می‌گردد. به نظر می‌رسد که نیاز به افزایش تعداد ماژول‌های MPPT تا توان 10kVA به ویژه در ساختارهای سه‌فاز چندان ضروری نبوده و بیش‌تر محدودیت‌های زیاد بازده منجر به افزایش تعداد ماژول‌های MPPT گردد.

در توان‌های میانه و حدود 15-100kVA تمامی ساختارها سه‌فاز بوده و دارای تعداد متناسب ماژول MPPT (معمولاً بین ۳ تا ۶) می‌باشند. از این نمونه می‌توان به کاتالوگ شرکت‌های SMA، KSTAR و Ingeteam اشاره نمود. لازم به ذکر است که نکته‌ی مورد تفاوت میان محصولات مختلف در این بازه توانی بحث تک‌طبقه یا دو طبقه بودن اینورترهای فتوولتائیک می‌باشد. لازم به ذکر است که در توان‌های بالا و به منظور افزایش راندمان اینورتر، طبقه‌ی مربوط به MPPT که معمولاً توسط مبدل‌های DC-DC پیاده‌سازی می‌گردد حذف گردیده و الگوریتم MPPT مستقیماً در خود اینورتر پیاده‌سازی می‌گردد.

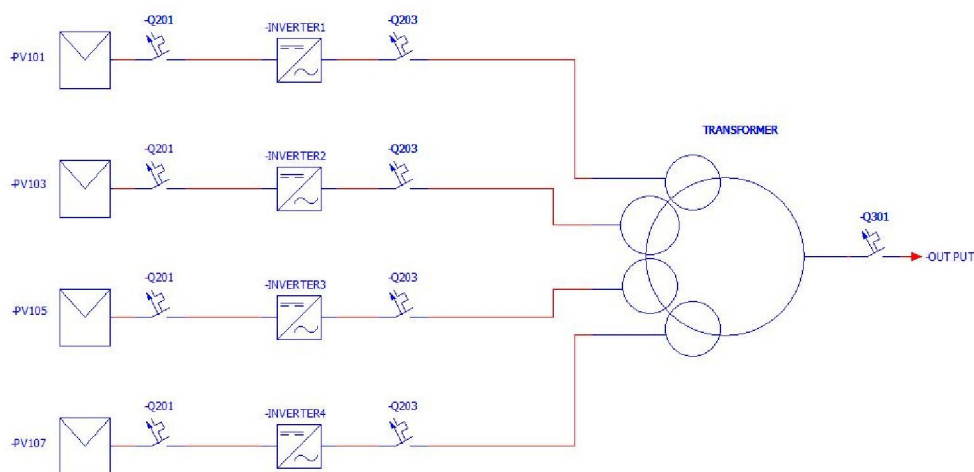
۳-۱- ساختار سیستم پیشنهادی

با توجه به بررسی‌های انجام شده و بررسی ساختارهای مختلف تولیدی شرکت‌های مختلف، طراحی اولیه مبتنی بر انتقال کل توان ورودی از طریق چهار اینورتر به ترانس خروجی شده است. از سوی دیگر با توجه به سطح توان انتقالی و ملاحظات راندمان ساختار تک طبقه برای هر واحد اینورتر در نظر گرفته شده است. مشخصات سیستم پیشنهادی در جدول ۱-۱ آورده شده است. هم‌چنین نقشه اولیه سیم‌کشی و تابلوها نیز در شکل‌های ۱-۳ تا ۱-۵ آورده شده است.

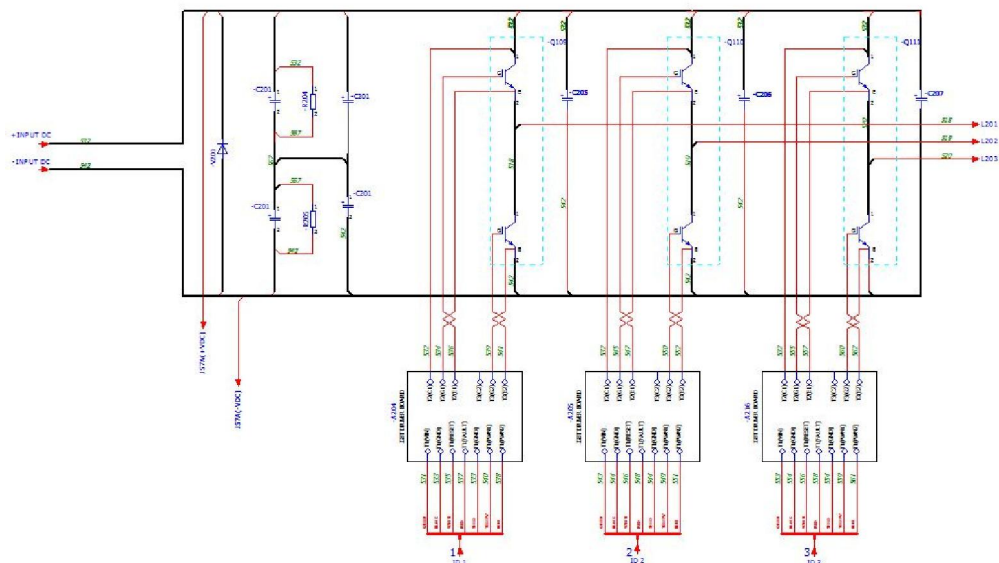
جدول ۱-۱) مشخصات سیستم پیشنهادی.

مقادیر	مشخصات
900V	ماکزیمم ولتاژ ورودی (Max Input Voltage)
528-900V	محدوده ولتاژ ورودی (Input (PV) Voltage)
540-880V	محدوده ولتاژ MPPT (MPPT Voltage Range)
700V	ولتاژ DC نامی (Rated DC Voltage)
840KW	حداکثر توان ورودی (Max DC Power)

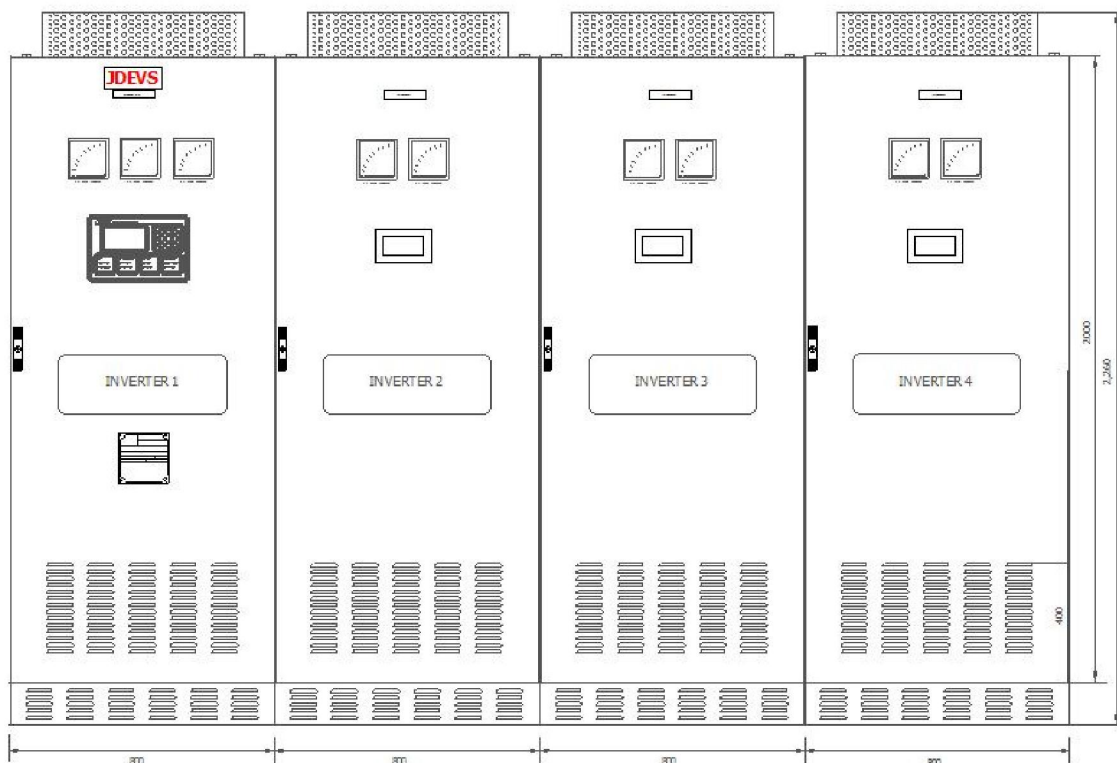
مقادیر	مشخصات
380V/360-400V	ولتاژ نامی/ محدوده خروجی اینورتر
50Hz/ 47.5-52.5Hz	فرکانس خروجی / محدوده فرکانسی خروجی
800KVA	حداکثر توان خروجی اینورتر (Rated Output Power)
>95%	راندمان اروپایی پیش‌بینی شده برای دستیابی (Efficiency)
<5%	حداکثر اعوجاجات هارمونیک شکل موج خروجی متناوب (THD%)
1/ 0.9 Lead- 0.9 Lag	ضریب قدرت توان نامی خروجی/ محدوده ضریب توان خروجی (Rated Power Factor /Rang of Power Factor)
1	تعداد ورودی‌های مستقل MPPT (Number of Independent MPPT Inputs)
8	تعداد کل ورودی‌های DC (Number of DC Inputs)
هواخنک	خنک‌سازی



شکل ۳-۱) ساختار سیستم پیشنهادی.



شکل (۴-۱) نقشه اولیه و سیم‌کشی‌های مازول قدرت به همراه کلیدهای ورودی-خروجی.



شکل (۵-۱) ساختار تابلو و نمایشگرها.

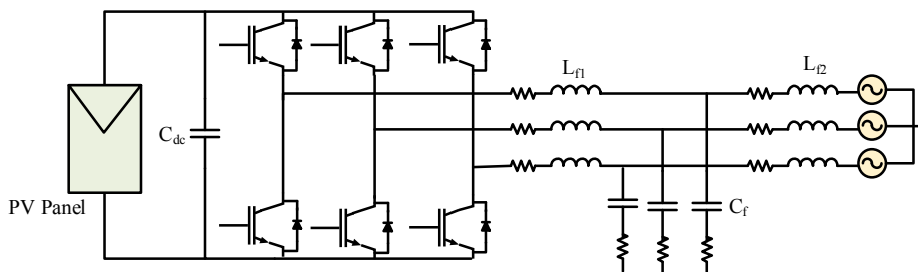
فصل ۲

طراحی و شبیه سازی اینورتر پیشنهادی

در این مرحله طراحی و شبیه سازی اینورتر خورشیدی متصل به شبکه با توان های 12kW و 220kW به شرح زیر صورت گرفته است.

۲-۱- ساختار مدار قدرت اینورتر پیشنهادی

سیستم پیشنهادی یک سیستم تک طبقه سه فاز شامل PV، اینورتر و فیلتر LCL می باشد. ساختار سیستم پیشنهادی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.

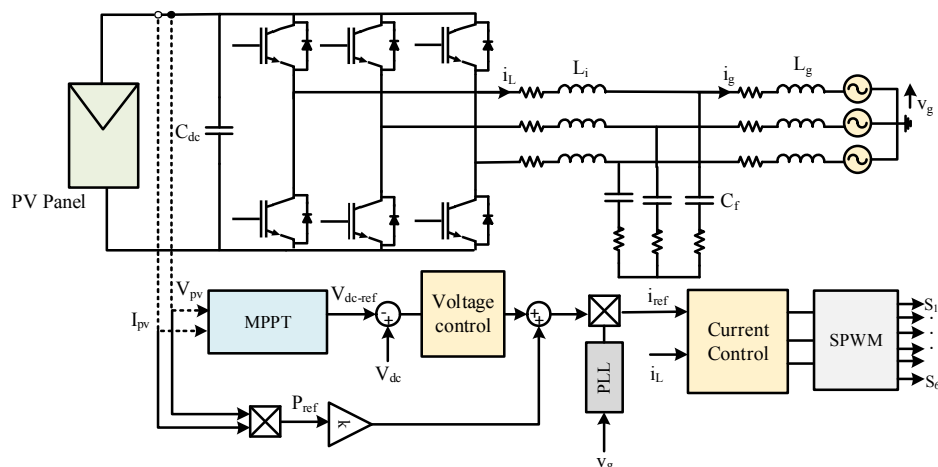


شکل ۱-۲) شمای سیستم شبیه سازی شده.

۲-۲- سیستم کنترلی

سیستم کنترلی در سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه شامل دو بخش اصلی ردیابی بیشینه توان^۱ و انتقال این توان از طریق کنترل کننده جریان به شبکه می باشد. ساختار کنترلی پیشنهادی در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.

^۱ Maximum Power Point Tracking (MPPT)



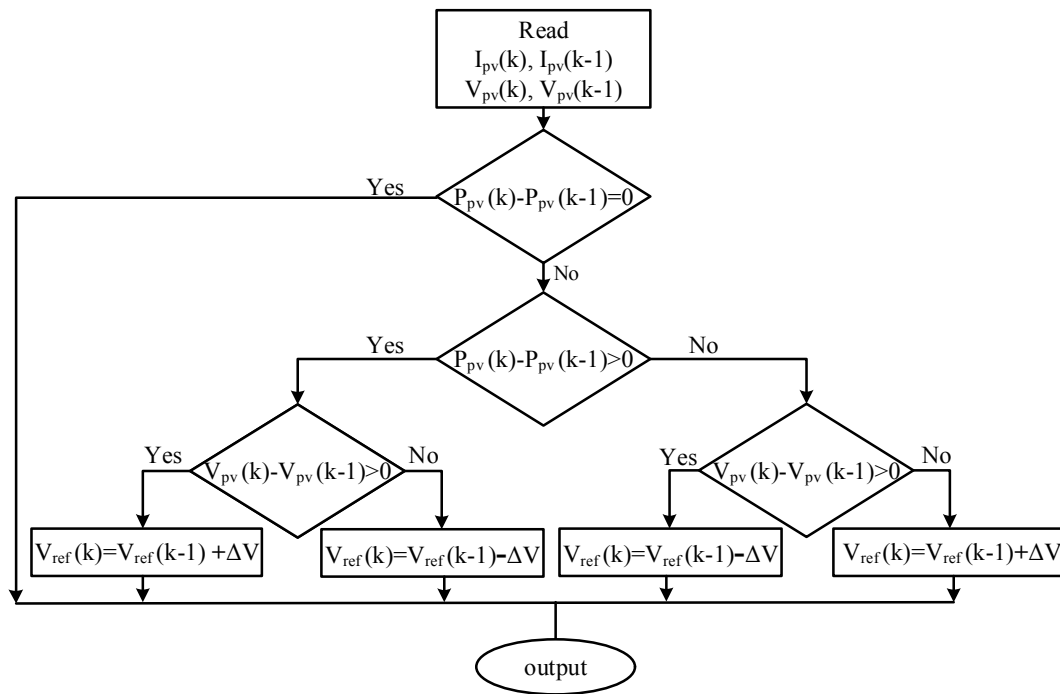
شکل ۲-۲) ساختار کلی سیستم با کنترل کننده پیشنهادی.

۲-۳- الگوریتم ردیابی بیشینه توان (MPPT)

به منظور کنترل بیشینه توان در این سیستم از الگوریتم اغتشاش و مشاهده^۱ به دلیل مزایایی از جمله دقت بالا در ردیابی و سادگی و پیاده سازی آسان استفاده شده است.

در این روش، ابتدا ولتاژ و جریان PV اندازه گیری می شود و بنابراین توان P_1 محاسبه می شود. با اعمال یک اغتشاش ولتاژ کم (ΔV) در یک جهت، توان مورد نظر P_2 محاسبه می شود. سپس P_1 با P_2 مقایسه می شود. اگر P_2 بیش تر از P_1 باشد، بنابراین اغتشاش در جهت صحیح وارد شده است، در غیر این صورت باید تغییر جهت دهد. به این صورت نقطه ی بیشینه توان تشخیص داده می شود و بنابراین ولتاژ متناظر با آن محاسبه خواهد شد. روند نمای الگوریتم P&O در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

¹ Perturb and Observe (P&O)



شکل ۲-۳ روند نمای الگوریتم ردیابی بیشینه توان.

۲-۴- کنترل کننده جریان شبکه

مقدار دامنه جریان مرجع از توان مازولهای خورشیدی و افزودن خروجی کنترل کننده باس DC تولید شده است. به منظور کنترل ولتاژ DC، از یک کنترل کننده PI استفاده می شود و به منظور کنترل جریان استفاده از کنترل کننده تناسبی-رزونانسی^۱ (PR) پیشنهاد می گردد. عملکرد این کنترل کننده در فرکانس تشدید بسیار مناسب بوده که بهره ی بی نهایت یا مقدار بسیار زیاد را در فرکانس تشدید فراهم می کند. تابع تبدیل کنترل کننده PR در حالت غیر ایده آل به صورت زیر می باشد:

$$G_{PR} = K_p + \frac{K_r s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad \text{معادله ۲-۱}$$

K_p و K_r بهره ها، ω_0 و $\zeta\omega_0$ فرکانس زاویه ای و پهنای باند را نشان می دهند.

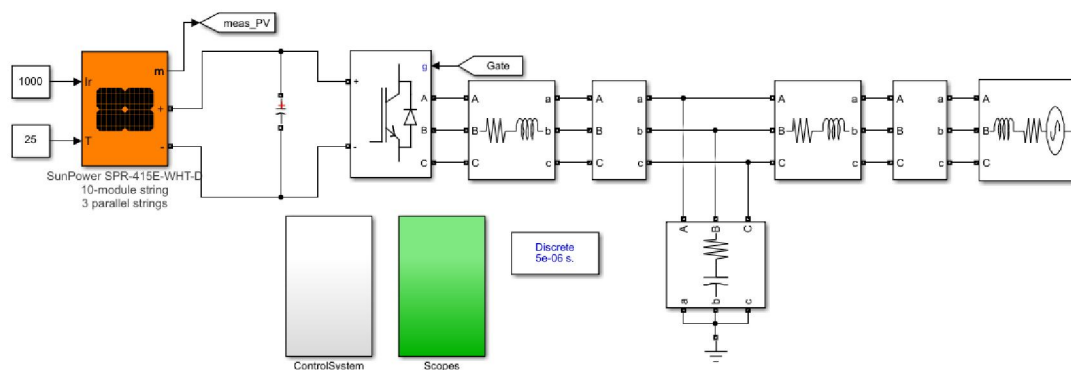
به منظور تست های عملیاتی اینورتر توان بالا با محدودیت های سیستم های تست مانند پنل خورشیدی و یا امولاتور خورشیدی، ظرفیت تزریق به شبکه و ... مواجه هستیم. از سوی دیگر در صورت وجود خطاهای

^۱ Proportional Resonant (PR)

انسانی یا سیم‌کشی ضرر بیش‌تری در سیستم‌های توان بالا اتفاق خواهد افتاد. به دلایل فوق و برای پرهیز از ضرر و خطرهای احتمالی ابتدا یک سیستم توان پایین طراحی، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی شده و تمامی تست‌های لازم صورت خواهد گرفت. سپس و در قدم بعدی تست سیستم توان بالا انجام خواهد شد.

۲-۵- طراحی و شبیه‌سازی سیستم تست 12kW

مدل سیستم 12kW در MATLAB/Simulink در شکل ۲-۴ زیر نشان داده شده است. هم‌چنین پارامترهای این سیستم نیز در جدول ۲-۱ آورده شده است. در جدول ۲-۲ نیز مشخصات و پارامترهای پنل خورشیدی شبیه‌سازی شده برای اتصال به اینورتر و تزریق توان به شبکه آورده شده است.



شکل ۲-۴) سیستم شبیه‌سازی شده در MATLAB/Simulink.

جدول ۲-۱) پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده

پارامتر	شرح	مقدار
V_g (rms)	ولتاژ شبکه	380 V
f_g	فرکانس شبکه	50 Hz
f_{sw}	فرکانس کلیدزنی اینورتر	3 kHz
f_s	فرکانس نمونه‌برداری	12 kHz
C_{dc}	خازن لینک DC	2200 μ F

جدول ۲-۲) مشخصات سلول خورشیدی Sun power SPR 400E در شرایط تابش $1000 W/m^2$ و $25^\circ C$

پارامتر	شرح	مقدار
P_{MPP}	بیشینه توان PV	400.221 W
V_{oc}	ولتاژ مدار باز	85.3 V
I_{sc}	جریان اتصال کوتاه	5.87 A
V_{MPP}	ولتاژ توان بیشینه	72.9 V
I_{MPP}	جریان توان بیشینه	5.49 A
$V_{oc,coef}$	ضریب دمایی ولتاژ مدار باز	-0.229
n_s	تعداد ماژول‌های سری در هر رشته ^۱	10
n_p	تعداد رشته‌ها	3

۲-۶- طراحی فیلتر LCL

به منظور تزریق توان با THD جریان مطابق با استاندارد معمولاً از فیلترهای LCL در خروجی اینورترهای خورشیدی استفاده می‌گردد. این فیلترها قابلیت بسیار مناسبی در حذف هارمونیک‌های فرکانس پایین و همچنین هارمونیک‌های فرکانس بالای کلیدزنی دارند. این فیلتر از دو سلف (سلف سمت مبدل و سلف سمت شبکه) و یک خازن موازی و یک مقاومت میراکننده تشکیل شده است که در ادامه به طراحی این المان‌ها پرداخته می‌شود.

به منظور طراحی سلف سمت مبدل (اینورتر) معمولاً نوسان جریان بین 15 تا 35 درصد جریان نامی اینورتر انتخاب می‌شود. با فرض نوسان جریان برابر 30 درصد، مقدار سلف سمت اینورتر (L_i) از رابطه زیر محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که در این حالت ولتاژ DC متوسط برای محاسبه‌ی سلف استفاده گردیده است.

$$L_i = \frac{V_{dc}}{8f_{sw}\Delta i_{L,max}} = \frac{720}{8 \times 3000 \times 0.3 \times 18.23} = 5.4mH \quad \text{معادله ۲-۲}$$

۲-۶-۱- محاسبه مقدار خازن

افزایش مقدار خازن سلف سمت شبکه را کاهش می‌دهد اما تلفات مقاومت اندکی افزایش می‌یابد. در این طراحی توان راکتیو خازن موازی برابر ۵ درصد توان نامی در نظر گرفته شده است. بر این اساس مقدار خازن برابر $13\mu F$ محاسبه می‌گردد که از طریق سری کردن دو خازن $33\mu F$ می‌تواند پیاده‌سازی گردد.

¹ String

۲-۶-۲- محاسبه سلف سمت شبکه (L_g)

سلف سمت شبکه معمولاً به صورت ضریبی از سلف سمت اینورتر می باشد که این ضریب به صورت تجربی برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است و بنابراین مقدار سلف سمت شبکه برابر ۱.۳mH به دست آمده است. از سوی دیگر یک مقاومت میراکننده مورد نیاز می باشد که باید به صورت مصالحه ای بین تلفات مقاومت و میراکنندگی باشد که این مقاومت حدود ۳ اهم در نظر گرفته می شود؛ بنابراین و با توجه به طراحی صورت گرفته، پارامترهای فیلتر در جدول ۲-۳ نشان داده شده است.

جدول ۲-۳) پارامترهای فیلتر LCL

5.4 mH	سلف فیلتر سمت اینورتر	L_i
1.3 mH	سلف فیلتر سمت شبکه	L_g
13 μ F	خازن فیلتر	C_f
3 Ω	مقاومت میراکننده	R_D

۲-۷- ضرایب کنترل کننده ها

با توجه به $\omega_0 = 100\pi$ و $f_s = 12000\text{Hz}$ تابع تبدیل زمان گسسته کنترل کننده جریان سمت شبکه به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$G_{PR} = K_{p1} + \frac{K_r(z-1)}{z^2 - 1.998z + 0.999} \quad \text{معادله ۲-۳}$$

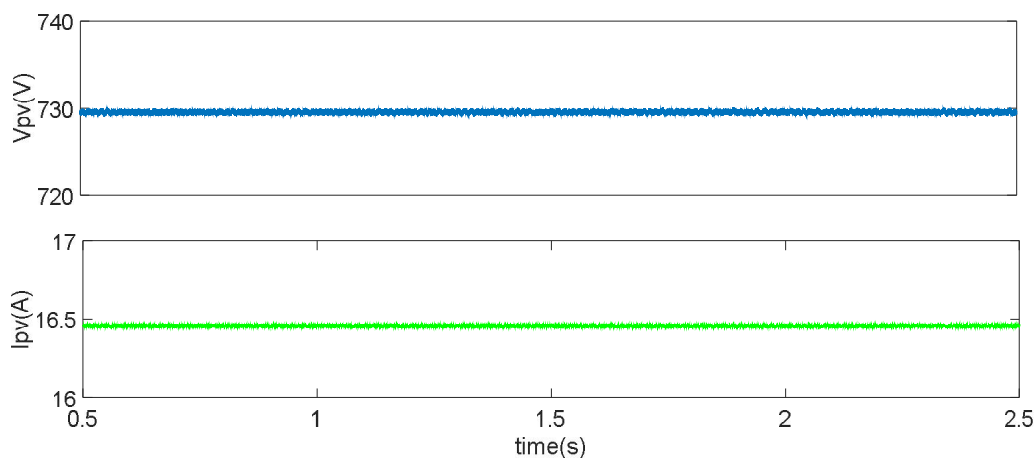
جدول ۲-۴) ضرایب کنترل کننده ها

مقدار	شرح	ضریب
2	بهره تناسبی کنترل کننده PR	K_{p1}
0.02	بهره رزونانسی کنترل کننده PR	K_r
0.3	بهره تناسبی کنترل کننده PI	K_{p2}
1	بهره انتگرالی کنترل کننده PI	K_i

کنترل کننده ولتاژ DC نیز یک کنترل کننده PI با ضرایب K_{p2} و K_i می باشد. ضرایب کنترل کننده ها در جدول ۴-۲ نشان داده شده است.

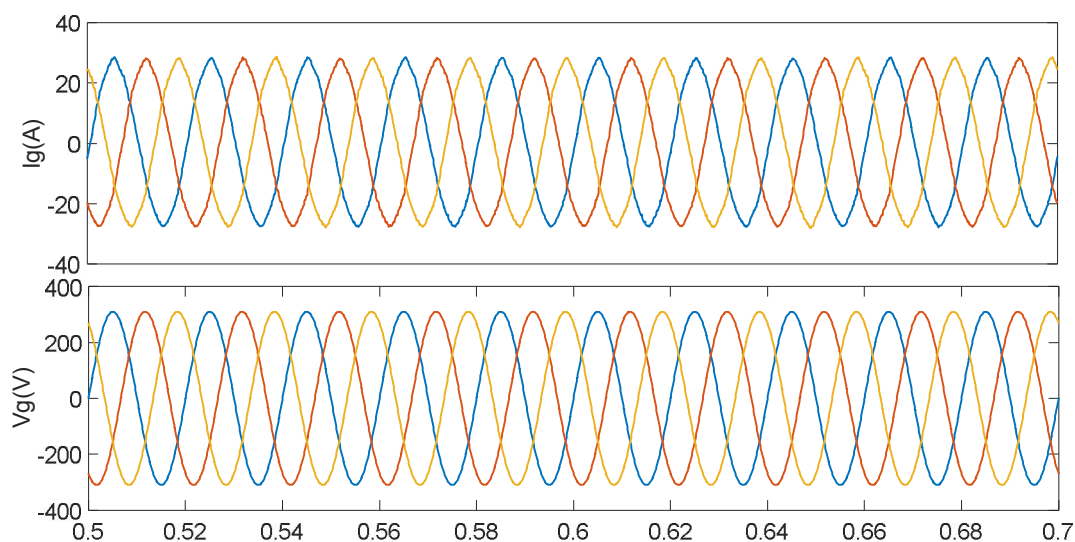
۲-۸- شبیه سازی در شرایط تابش و دمای نامی ($1000 W/m^2, 25^{\circ}C$)

شکل موج های ولتاژ و جریان PV در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. همان طور که از جدول ۲-۲ مشخص است، ولتاژ MPPT برابر 729 ولت و جریان آن برابر 16.47 آمپر می باشد که به خوبی توسط الگوریتم MPPT ردیابی گردیده است.

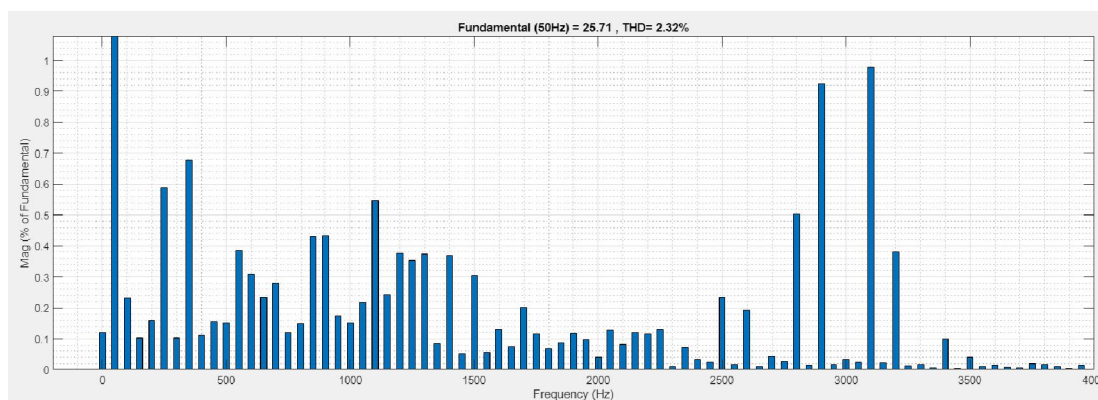


شکل ۵-۲) شکل موج های ولتاژ و جریان PV

جریان شبکه در شکل ۶-۲ و طیف هارمونیک آن در شکل ۷-۲ نشان می دهد که به خوبی توسط کنترل کننده ردیابی شده، دامنه آن 25.71 آمپر می باشد و THD برابر 2.32% می باشد.



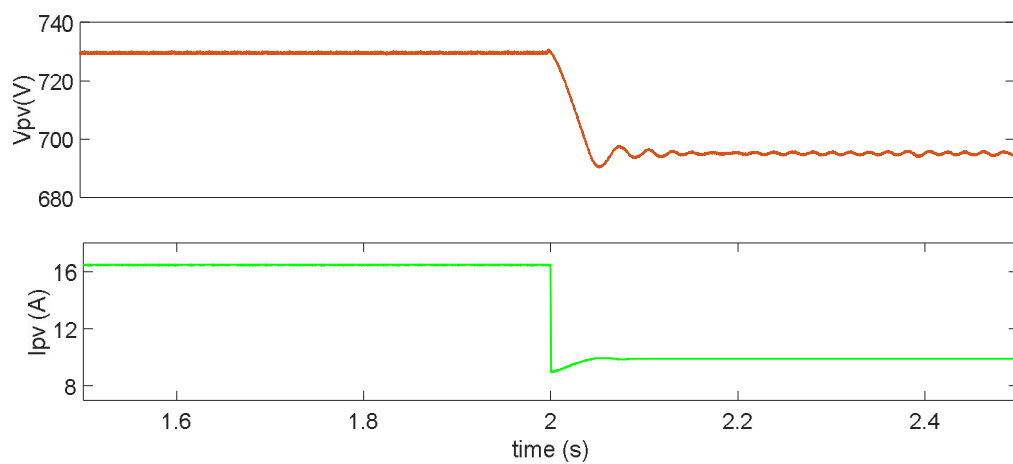
شکل ۶-۲) شکل موج‌های جریان و ولتاژ شبکه



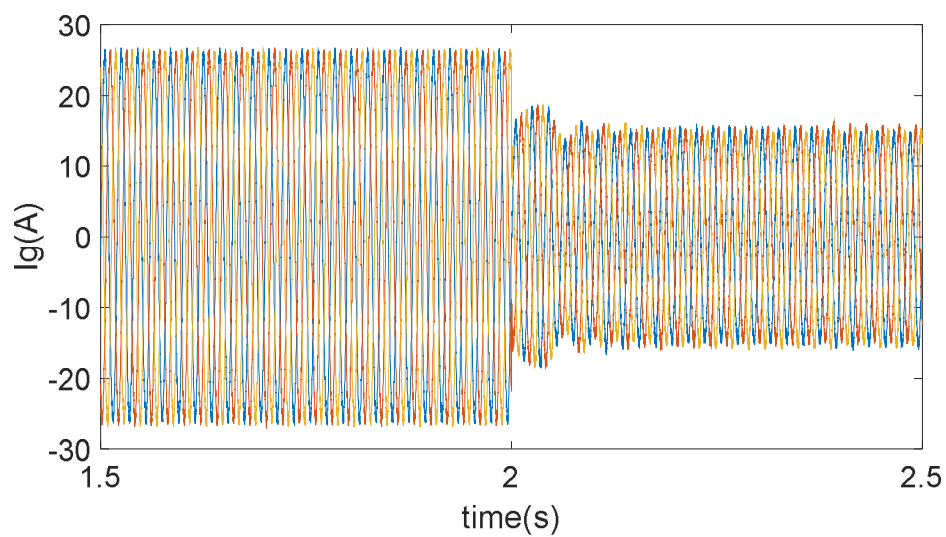
شکل ۷-۲) طیف هارمونیکی جریان شبکه

۲-۹- شبیه‌سازی در شرایط تغییر پله‌ای تابش و دما

به منظور بررسی عملکرد مدار، شبیه‌سازی‌ها در شرایط تغییر هم‌زمان دما و تابش به صورت پله‌ای با فرض تغییر تابش از 1000 W/m^2 به 600 W/m^2 و دما از 25°C به 40°C صورت گرفته است. در این شرایط شکل موج‌های ولتاژ و جریان PV در شکل ۸-۲ و شکل موج جریان شبکه در شکل ۹-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۸) شکل موج‌های ولتاژ و جریان شبکه در شرایط تغییر تابش و دما



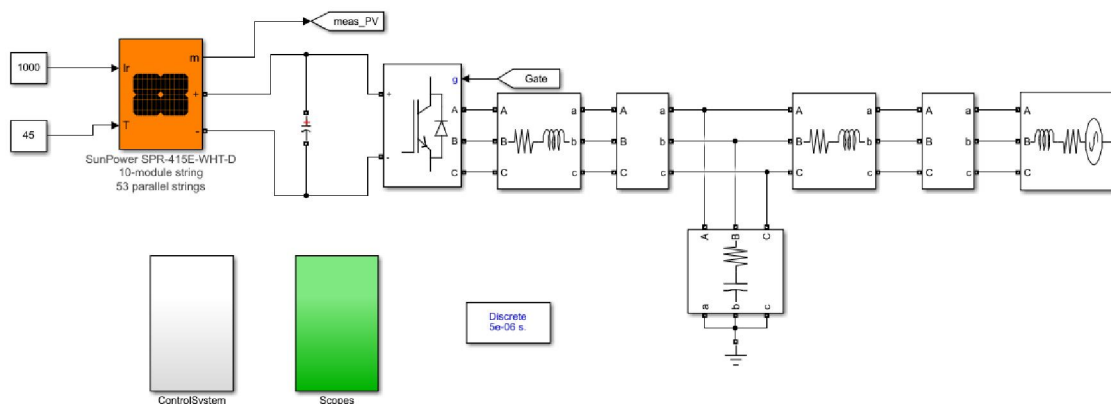
شکل ۲-۹) شکل موج جریان شبکه در شرایط تغییر تابش و دما

فصل ۳

طراحی و شبیه سازی سیستم 220kW

۳-۱- مدل سیستم 220Kw در MATLAB/Simulink

مدل سیستم ۲۲۰kW در متلب در شکل ۱-۳ ترسیم شده است.



شکل ۱-۳) سیستم شبیه‌سازی شده در MATLAB/Simulink

۳-۲- پارامترهای سیستم

جدول ۱-۳) پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده

پارامتر	شرح	مقدار
V_g (rms)	ولتاژ شبکه	380 V
f_g	فرکانس شبکه	50 Hz
f_{sw}	فرکانس کلیدزنی اینورتر	3 kHz
f_s	فرکانس نمونه‌برداری	۱۲kHz
C_{dc}	خازن لینک DC	0.0135 F

جدول ۲-۳) مشخصات سلول خورشیدی Sun power SPR 415E در شرایط تابش 1000 W/m^2 و 25°C

پارامتر	شرح	مقدار
P_{MPP}	بیشینه توان PV	414.801 W
V_{oc}	ولتاژ مدار باز	85.3 V
I_{sc}	جریان اتصال کوتاه	6.09 A
V_{MPP}	ولتاژ توان بیشینه	72.9 V
I_{MPP}	جریان توان بیشینه	5.69 A

پارامتر	شرح	مقدار
$V_{oc,coef}$	ضریب دمایی ولتاژ مدار باز	-0.229
n_s	تعداد ماژول‌های سری در هر رشته	10
n_p	تعداد رشته‌ها	53

۳-۳-۳ فیلتر LCL

به طریق مشابه با سیستم 12kW پارامترهای فیلتر در جدول ۳-۳ نشان داده شده است.

جدول ۳-۳) پارامترهای فیلتر LCL

L_i	سلف فیلتر سمت اینورتر	299 μ H
L_g	سلف فیلتر سمت شبکه	71 μ H
C_f	خازن فیلتر	249 μ F
R_D	مقاومت میراکننده	۰,۱۶

۳-۴-۳ ضرایب کنترل کننده‌ها

تابع تبدیل زمان گسسته کنترل کننده جریان سمت شبکه همانند حالت قبل به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$G_{PR} = K_{p1} + \frac{K_r(z-1)}{z^2 - 1.998z + 0.999} \quad \text{معادله ۳-۱}$$

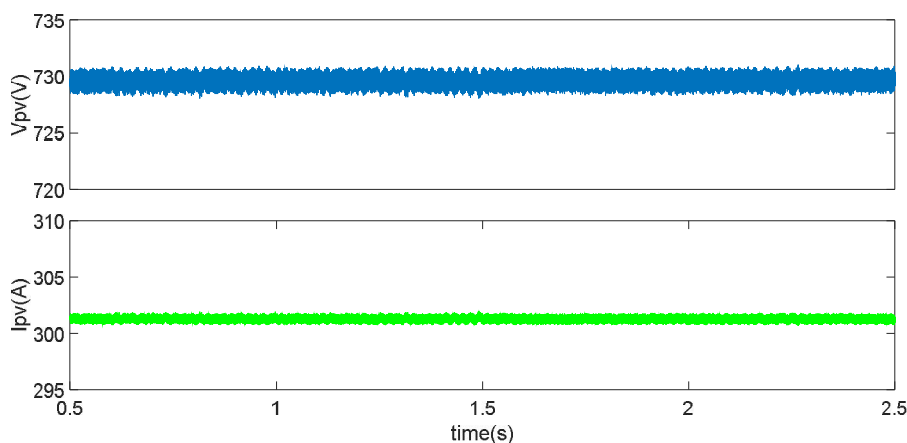
کنترل کننده ولتاژ DC نیز یک کنترل کننده PI با ضرایب K_{p2} و K_i می باشد. ضرایب کنترل کننده‌ها در جدول ۳-۴ نشان داده شده است.

جدول ۳-۴) ضرایب کنترل کننده‌ها

ضریب	شرح	مقدار
K_{p1}	بهره تناسبی کنترل کننده PR	2
K_r	بهره رزونانسی کنترل کننده PR	0.02
K_{p2}	بهره تناسبی کنترل کننده PI	2
K_i	بهره انتگرالی کنترل کننده PI	4

۳-۵- شبیه سازی در شرایط تابش و دمای نامی ($1000 W/m^2, 25^0 C$)

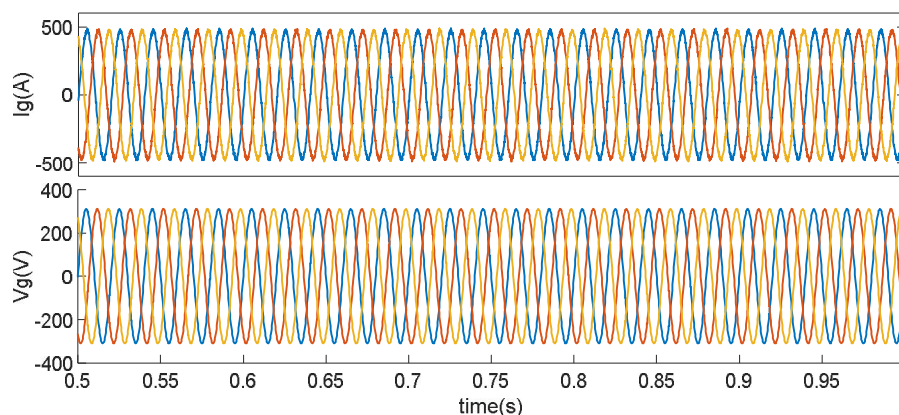
شکل موجهای ولتاژ و جریان PV در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. ولتاژ MPPT برابر 729 ولت و جریان آن برابر 301.57 آمپر می باشد که به خوبی توسط الگوریتم MPPT ردیابی گردیده است.



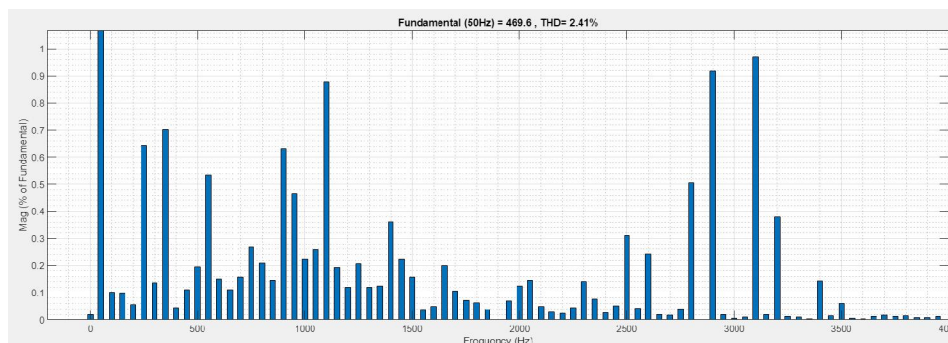
شکل ۳-۲) شکل موجهای ولتاژ و جریان PV

جریان شبکه در شکل ۳-۳ و طیف هارمونیک آن در شکل ۳-۴ نشان می دهد که به خوبی توسط کنترل کننده ردیابی شده، دامنه آن 469.6 آمپر می باشد و THD برابر 2.41% می باشد.

همچنین مقدار مؤثر جریان سوئیچهای اینورتر در سیستم 220kW به منظور محاسبه تلفات بر اساس شبیه سازی برابر 235 آمپر به دست آمده است.



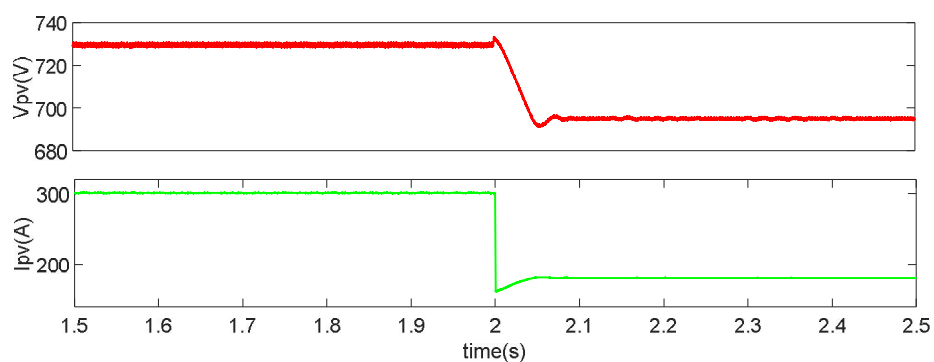
شکل ۳-۳) شکل موج‌های جریان و ولتاژ شبکه



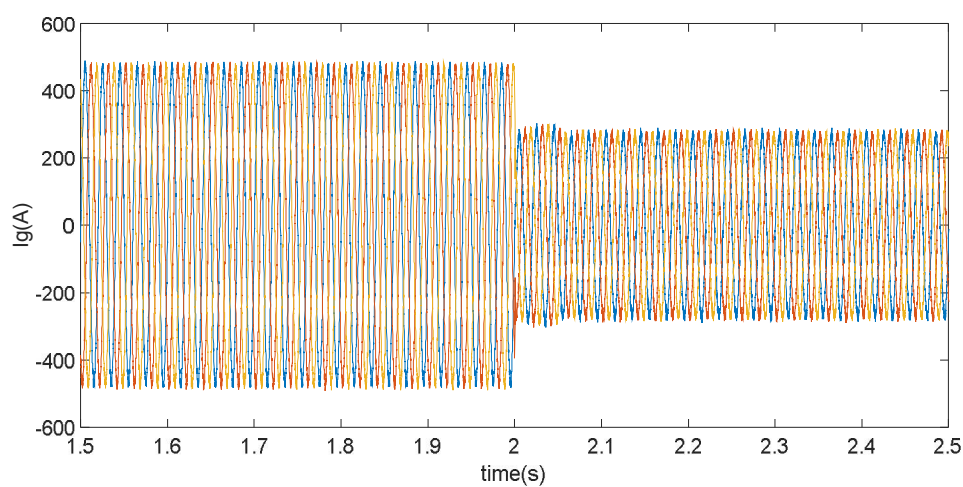
شکل ۳-۴) طیف هارمونیکي جریان شبکه

۳-۶- شبیه‌سازی در شرایط تغییر پله‌ای تابش و دما

به منظور بررسی عملکرد مدار، شبیه‌سازی‌ها در شرایط تغییر هم‌زمان دما و تابش به صورت پله‌ای با فرض تغییر تابش از 1000 W/m^2 به 600 W/m^2 و دما از 25°C به 40°C صورت گرفته است. در این شرایط شکل موج‌های ولتاژ و جریان PV در شکل ۳-۵ و شکل موج جریان شبکه در شکل ۳-۶ نشان داده شده است که نشان‌دهنده پاسخ زمانی 50ms می‌باشد.



شکل ۳-۵) شکل موج‌های ولتاژ و جریان شبکه در شرایط تغییر تابش و دما



شکل ۳-۶) شکل موج جریان شبکه در شرایط تغییر تابش و دما.

۳-۷- طراحی سلف‌ها برای سیستم 12kW

پارامترهای سیستم در جدول ۳-۵ و پارامترهای فرض شده برای طراحی در جدول ۳-۶ نشان داده شده است.

جدول ۳-۵) پارامترهای سیستم

پارامتر	مقدار
ولتاژ خط (V_L)	380V (rms)
جریان خط (I_g)	$\frac{12000}{\sqrt{3} \times 380} = 18.23A$
فرکانس شبکه (f_g)	50 Hz

پارامتر	مقدار
سلف فیلتر سمت اینورتر (L_i)	5.4 mH
سلف فیلتر سمت شبکه (L_g)	1.3 mH

جدول ۳-۶) پارامترهای طراحی

پارامتر	مقدار
چگالی جریان (J)	$300 A/cm^2$
نفوذپذیری ماده مغناطیسی (μ_m)	1500
چگالی شار (B_{ac})	1.4 T
ضریب پرشدگی (K_u)	0.4

طراحی سلف‌ها از روش ارائه شده در مرجع [1] صورت گرفته است. با توجه به روش ارائه شده در این مرجع، هسته سلف سمت اینورتر EI150 و سلف سمت شبکه EI96 در نظر گرفته شده است؛ بنابراین تعداد دورهای هسته (N_L)، ضخامت هسته (D)، فاصله هوایی (l_g) و قطر سیم مطابق جدول ۳-۷ به دست آمده است.

جدول ۳-۷) مشخصات نهایی سلف‌ها

پارامتر	مقدار
سلف فیلتر سمت اینورتر (L_i)	$L_i = 5.4mH$
	$N_L = 41$
	$D = 50mm$
	$l_g = 1mm$
سلف فیلتر سمت شبکه (L_g)	$L_g = 1.3mH$
	$N_L = 25$
	$D = 32mm$
	$l_g = 0.6mm$
قطر سیم	3mm

۳-۸- نتیجه‌گیری

در این گزارش به طراحی و شبیه‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه 12kW و 220kW پرداخته شد. سیستم کنترلی شامل دو بخش ردیابی بیشینه توان توسط الگوریتم‌های مربوطه و انتقال این توان به شبکه از طریق کنترل کننده جریان شبکه می‌باشد. به منظور ردیابی بیشینه توان، الگوریتم P&O و به منظور

کنترل جریان شبکه، کنترل کننده PR پیشنهاد شده است. فیلتر طراحی شده یک فیلتر LCL می باشد. پارامترهای سیستم های کنترلی، فیلتر LCL و خازن های لینک DC با توجه به ملاحظات عملی صورت پذیرفته است. در نهایت شبیه سازی ها در شرایط تابش و دمای نامی و همچنین در شرایط تغییر پله ای تابش و دما انجام گرفته است که ردیابی بیشینه توان توسط کنترل کننده ها را نشان می دهد. شبیه سازی ها در حالت نامی نشان دهنده THD کم تر از 3% می باشد.

۳-۹- مراجع

[1] McLyman CW. Transformer and inductor design handbook. CRC press; 2004 Mar 31.

فصل ۴

امولاتور خورشیدی

یکی از تجهیزات اساسی در تست اینورترهای خورشیدی پنل‌های خورشیدی می‌باشد. از آنجایی که طراحی و ساخت امولاتور در توان 220kW بسیار سنگین و هزینه‌بر خواهد بود، طراحی و ساخت یک امولاتور توان پایین به منظور تست سیستم کنترلی MPPT و تست‌های مطابق با واقعیت در این پروژه صورت گرفته است.

۴-۱- معرفی امولاتورها و مزیت آن

در شرایط تست آزمایشگاهی، به جای استفاده مستقیم از پنل خورشیدی از امولاتور استفاده می‌شود که مزیت‌های آن به شرح زیر است [۱]:

- حجم کم‌تر نسبت به پنل
- شبیه‌سازی شرایط محیطی مختلف
- قابلیت پیاده‌سازی انواع سلول‌های خورشیدی با مشخصات متفاوت
- توانایی حفاظت در برابر اضافه ولتاژ و اتصال کوتاه

هم‌چنین مشخصات امولاتور برای انجام تست‌های مختلف به قرار زیر است [۶]:

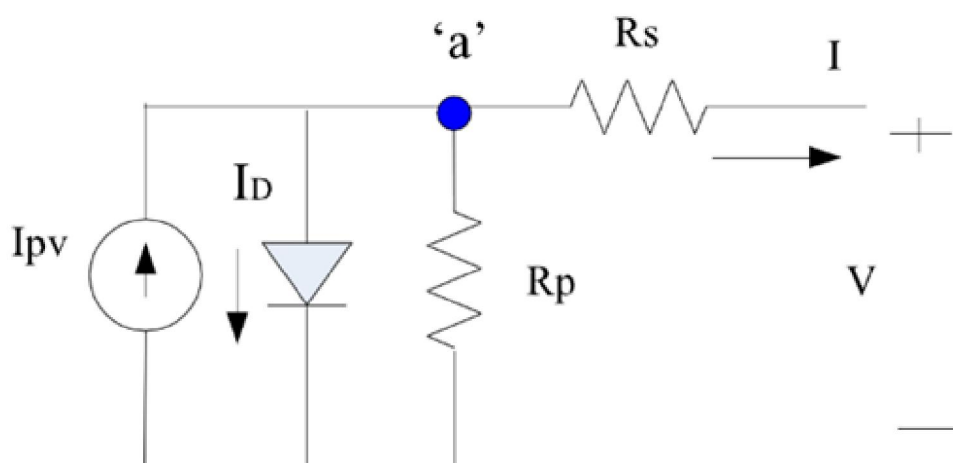
- توانایی اتصال به مبدل‌های dc/dc برای ردیابی نقطه ماکزیمم توان (MPPT)،
- توانایی بازتولید مشخصه P-V و یا I-V با توجه به شرایط سایه‌اندازی و میزان تابش و دمای محیط به عنوان اصلی‌ترین چالش پیاده‌سازی،
- توانایی تغییر نقطه کار در شرایط بارگیری مختلف بر اساس منحنی مشخصه.

۴-۲- مدل‌سازی ریاضی پنل خورشیدی

برای طراحی امولاتور، نیاز به مدل‌سازی ریاضی پنل به منظور توصیف رفتار فیزیکی و فرمول‌بندی آن می‌باشد. دو روش برای مدل‌سازی پنل در [۶] معرفی شده است:

۴-۲-۱- مدل‌سازی تک دیودی

مدار معادل پنل در روش تک دیودی در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود.



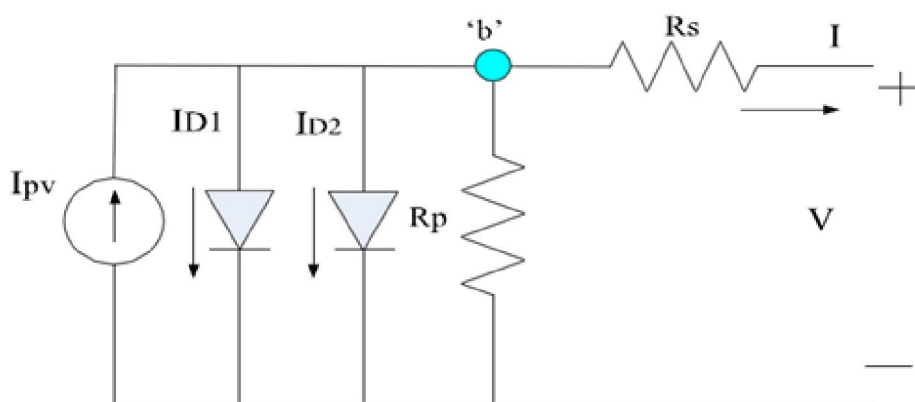
شکل ۱-۴ مدل تک دیودی پنل خورشیدی [۶].

با نوشتن روابط مداری، رابطه ۱-۴ به دست می آید:

$$I = N_{pp} \left\{ I_{pv} - I_o \left[\exp \frac{V + IR_s}{aV_t N_{ss}} - 1 \right] \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad \text{معادله ۱-۴}$$

۲-۲-۴- مدل سازی دو دیودی

مدار معادل پنل در روش دو دیودی در شکل ۲-۴ مشاهده می شود.



شکل ۲-۴ مدل تک دیودی پنل خورشیدی [۶].

روابط مداری مدل سازی دو دیودی طبق رابطه ۲-۴ می باشد.

$$I = N_{pp} \left\{ I_{pv} - I_{O1} \left[\exp \frac{V + IR_s}{a_1 V_t N_{ss}} - 1 \right] - I_{O2} \left[\exp \frac{V + IR_s}{a_2 V_t N_{ss}} - 1 \right] \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad \text{معادله ۲-۴}$$

در روابط به دست آمده، R_p و R_s مقاومت‌های سری و موازی هستند. I_{pv} جریان فتوالکتریک، N_{ss} و N_{pp} تعداد سلول‌های سری و موازی، V_t ولتاژ دمایی پیوند و a_1 و a_2 ضریب ایده‌آل دیودهای معادل هستند. هم‌چنین I_0 جریان اشباع معکوس دیود، I و V نیز جریان و ولتاژ پنل می‌باشند.

ولتاژ حرارتی پیوند بر اساس رابطه ۳-۴ است:

$$V_t \frac{KT}{q} \quad \text{معادله ۳-۴}$$

در رابطه‌ی ۳-۴، $K = 1.38 \times 10^{-23}$ و $q = 1.602 \times 10^{-19}$ و T دما بر حسب کلون است.

جریان فتوالکتریک بر اساس رابطه ۴-۴ تعریف می‌شود:

$$I_{pv} = \frac{G}{G_n} (I_{sc_n} + K_i (T - T_n)) \quad \text{معادله ۴-۴}$$

در رابطه ۴-۴، T_n دمای نامی و I_{sc_n} جریان اتصال کوتاه نامی و G میزان تابش و G_n تابش نامی و K_i ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه است.

جریان اشباع معکوس دیود معادل طبق رابطه ۵-۴ است:

$$I_o = \frac{(I_{sc_n} + K_i (T - T_n))}{\exp \left(\frac{(V_{oc_n} + K_v (T - T_n))}{a V_t} \right) - 1} \quad \text{معادله ۵-۴}$$

در رابطه ۵-۴، K_v ضریب دمایی ولتاژ مدار باز و V_{oc_n} ولتاژ مدار باز می‌باشد. در صورت استفاده از پنل‌های سری و موازی می‌توان نوشت:

$$I_{PV_{tot}} = N_{pp} I_{PV}$$

$$I_{O_{tot}} = N_{pp} I_O$$

$$R_{s_{tot}} = \frac{N_{ss}}{N_{pp}} R_s$$

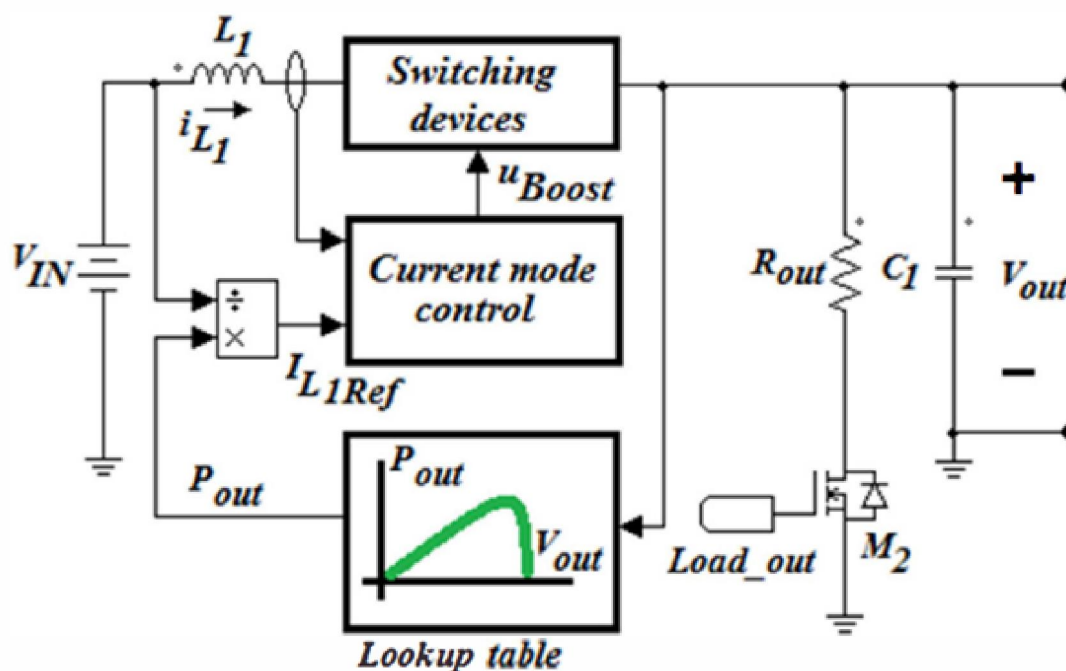
$$R_{p_{tot}} = \frac{N_{ss}}{N_{pp}} R_p$$

$$a_{tot} = N_{ss} a$$

معادله ۴-۶)

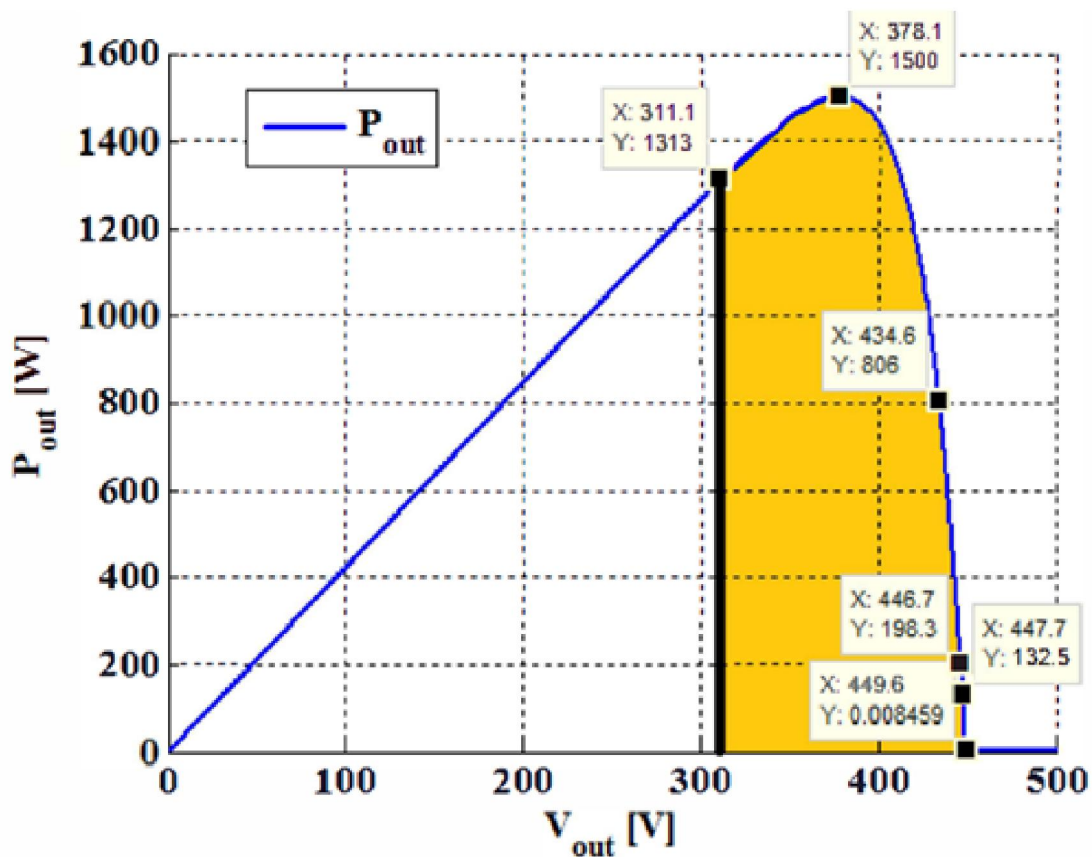
۴-۳- مولاتور خورشیدی بر مبنای مبدل‌های الکترونیک قدرت

مهم‌ترین چالش مولاتور خورشیدی، همانندسازی منحنی مشخصه در شرایط سایه‌اندازی و تحت شرایط دمایی و تابش مختلف است. به این منظور معادله غیرخطی ۴-۱ باید حل شود تا سیگنال مرجع مناسب برای کنترل‌کننده تولید گردد. در [۷]، مولاتور بر مبنای مبدل بوست معرفی شده است. شکل ۴-۳ مبدل پیشنهادی در این مرجع را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳) مولاتور پیشنهادی بر مبنای مبدل افزایش‌دهنده در [7]

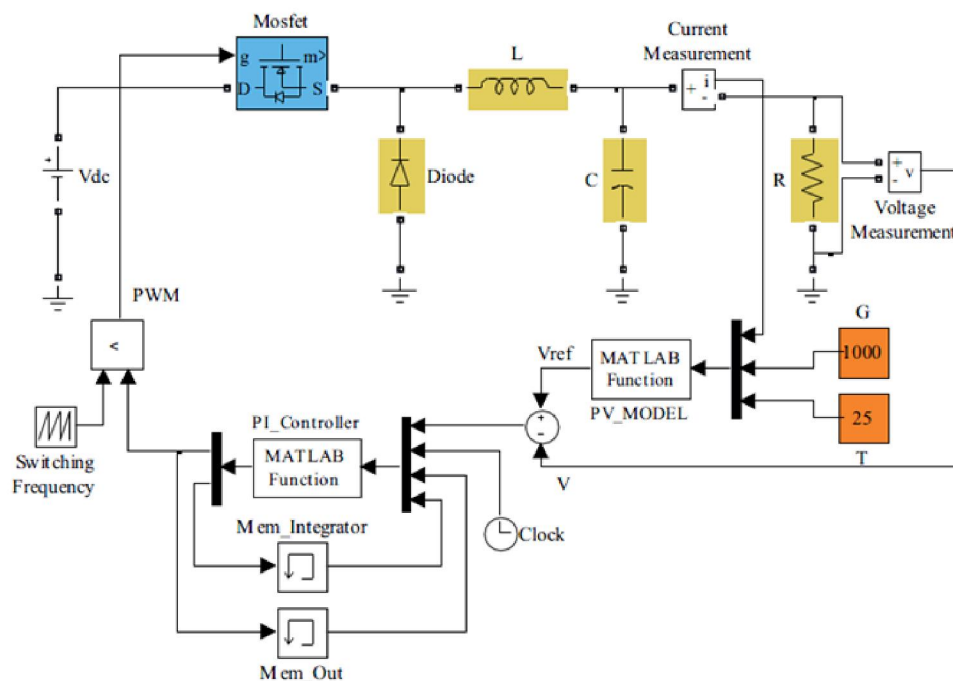
در مرجع [۷]، منحنی مشخصه P-V طبق شکل ۴-۴ ارائه شده است.



شکل ۴-۴) منحنی مشخصه پنل در مرجع [۷] [۷].

در شکل ۴-۴، با توجه به محدوده ولتاژ ورودی اینورتر متصل به امولاتور، منحنی مشخصه در بازه 311 تا 450 ولت در نظر گرفته شده است. هم‌چنین با نمونه‌گیری از ولتاژ خروجی و تعریف جدول جستجو lookup table جدول جستجو بر اساس منحنی مشخصه، توان خروجی به دست می‌آید. سپس با لحاظ راندمان، توان ورودی بر ولتاژ ورودی تقسیم شده تا جریان ورودی مرجع حساب شود. در نهایت حلقه کنترل جریان، جریان ورودی را به مقدار مرجع به دست آمده می‌رساند تا نقطه کار طبق منحنی P-V ردیابی شود. مشکل اصلی این روش در نظر نگرفتن اثر تابش و دما بر رفتار منحنی P-V است.

در مرجع [۸]، امولاتور بر مبنای مبدل باک معرفی شده است. شکل ۴-۵، شمای کلی و حلقه بسته این مبدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵) امولاتور پیشنهادی بر مبنای مبدل کاهنده در مرجع [۸]

در [۸]، معادله غیرخطی ۴-۱، با روش عددی نیوتن رافسون حل می‌شود. به این منظور، جریان خروجی و میزان تابش و دما در رابطه ۴-۱ لحاظ شده و ولتاژ مرجع پنل به حلقه کنترل ولتاژ (به صورت انتگرال گیر-تناسبی) اعمال می‌گردد. مشکل این روش، تحمیل حجم بالای محاسبات برای حل معادله غیرخطی می‌باشد.

در مرجع [۹]، منحنی مشخصه پنل (جریان-ولتاژ) به سه ناحیه خطی تقسیم‌بندی شده است. بر این اساس می‌توان پارامترهای پنل را به صورت رابطه ۴-۷ نوشت:

$$I_{sc} = I_{sc_n} \times \frac{G}{G_n} (1 + A(T - T_n))$$

$$I_{mmp} = I_{mmp_n} \times \frac{G}{G_n} (1 + A(T - T_n))$$

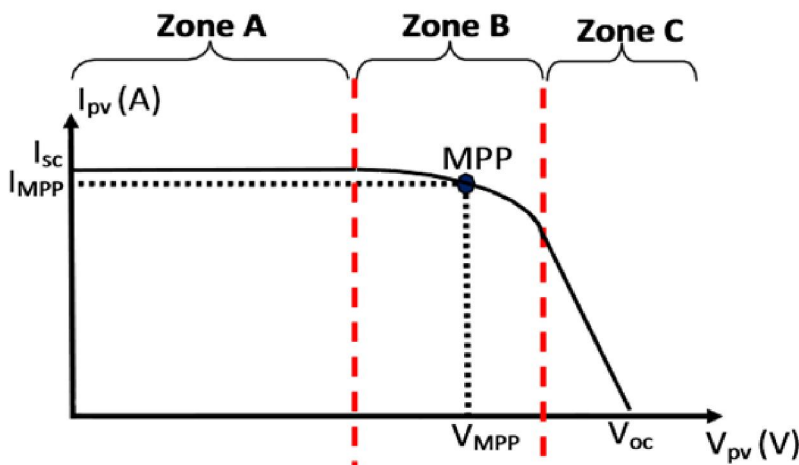
معادله ۴-۷)

$$V_{out} = V_{oc_n} (1 + B(G - G_n))(1 + C(T - T_n))$$

$$V_{mmp} = V_{mmp_n} (1 + B(G - G_n))(1 + C(T - T_n))$$

در رابطه ۴-۷، A، B و C ضریب حرارتی جریان اتصال کوتاه، ضریب حرارتی ولتاژ مدار باز و ضریب تغییرات

توان بر اثر دمای پنل می‌باشند. در نهایت بر اساس شکل ۴-۶، روابط خطی جریان مرجع پنل خورشیدی به صورت رابطه ۴-۸ به دست می‌آید.



شکل ۴-۶) ناحیه‌های خطی منحنی مشخصه پنل خورشیدی [۹] [۹]

$$\text{zone A: } 0 < V_{pv} < 0.95V_{mpp}$$

$$I_{pv_{ref}} = \frac{1.05I_{mpp}}{0.95V_{mpp}}$$

$$\text{zone B: } 0.95V_{mpp} < V_{pv} < 1.05V_{mpp}$$

$$I_{pv_{ref}} = \frac{-I_{mpp}}{V_{mpp}}V_{pv} + 2I_{sc}$$

معادله ۴-۸)

$$\text{zone C: } 1.05V_{mpp} < V_{pv} < V_{oc}$$

$$I_{pv_{ref}} = \frac{-0.95I_{mpp}}{V_{oc} - 1.05V_{mpp}}V_{pv} + 0.59I_{mpp} + \frac{0.9975I_{mpp}V_{mpp}}{V_{oc} - 1.05V_{mpp}}$$

۴-۴- طراحی مبدل باک به منظور به کارگیری در امولاتور خورشیدی

در این بخش با توجه به مشخصات اولیه در نظر گرفته شده برای امولاتور خورشیدی، به طراحی پارامترهای مبدل کاهنده در مد کاری جریان پیوسته پرداخته می‌شود. به این منظور، مشخصات طراحی بر اساس جدول ۴-۱ است.

جدول ۱-۴) مشخصات اولیه طراحی مبدل کاهنده

10 kW	Power (P)
12 kHz	Switching Frequency (fs)
V_{in}	800 V
V_{out}	$640 < V_{out} < 720$

با توجه به جدول ۱-۴ می توان مقدار نرخ وظیفه (D) را با تقریب های مناسب به صورت ۴-۹ نوشت:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \rightarrow 0.8 < D < 0.9 \quad \text{معادله ۹-۴}$$

ضربان جریان سلف به قرار ۴-۱۰ است:

$$\frac{\Delta i_L}{I_{L_{Min}}} = 0.3 \rightarrow I_{L_{Min}} = I_{out_{Min}} = \frac{10000}{720} = 13.88 A \rightarrow \Delta i_L = 4 A \quad \text{معادله ۱۰-۴}$$

از ۴-۱۱، حداقل مقدار اندوکتانس لازم برای رسیدن به ریپل جریان ۴۰٪ محاسبه می شود:

$$L_{Min} = \frac{(V_{in})(D)(1-D)}{\Delta i_L \times f_s} = \frac{800 \times 0.8 \times 0.2}{4 \times 12000} \approx 2.6 mH \quad \text{معادله ۱۱-۴}$$

هم چنین با در نظر گرفتن ریپل ۱٪ برای ولتاژ خروجی، حداقل مقدار خازن به صورت ۴-۱۲ به دست می آید:

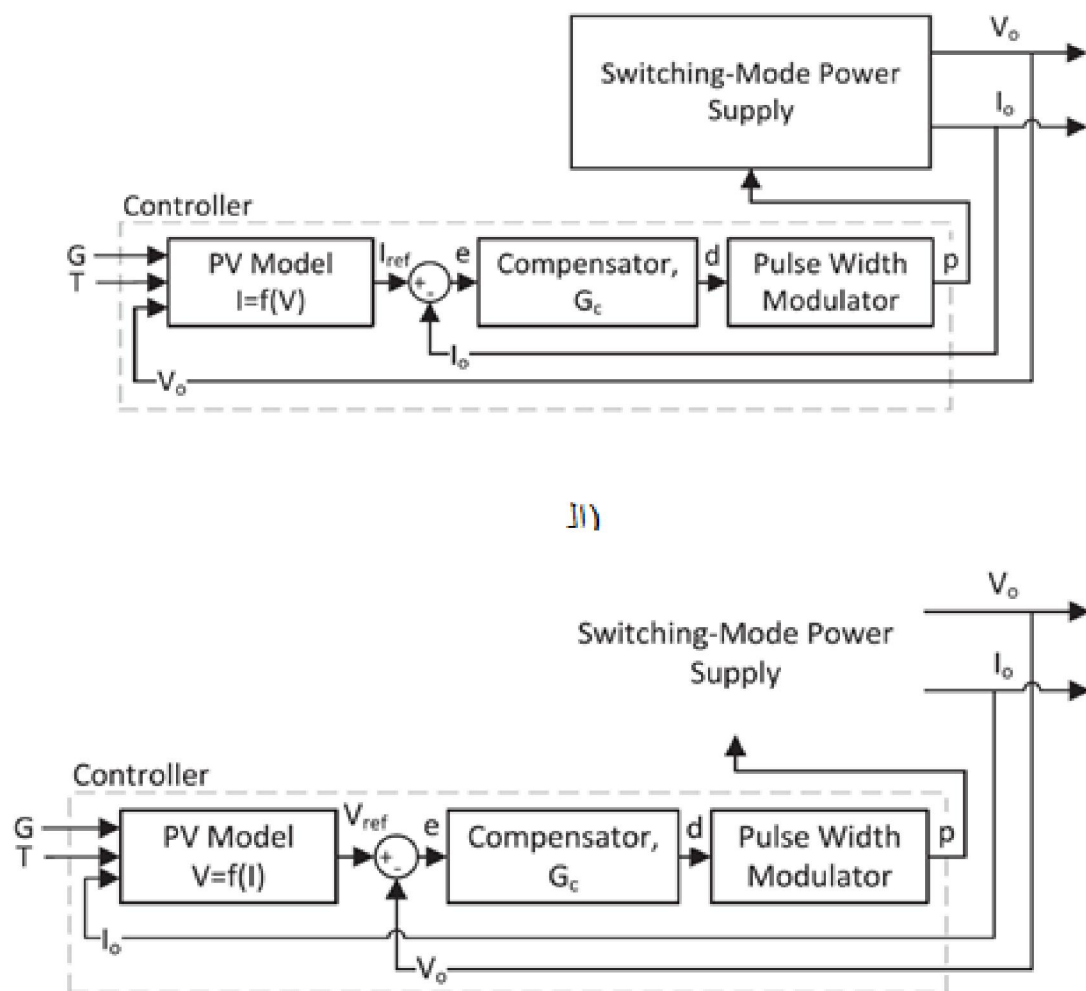
$$C_{Min} = \frac{1 - D_{Min}}{8L \times \frac{\Delta V_{out}}{V_{out}} \times f_s^2} = \frac{1 - 0.8}{8 \times 3 \times 10^{-3} \times 0.01 \times 12000^2} \approx 6.6 \mu F \quad \text{معادله ۱۲-۴}$$

در نهایت برای اطمینان از ریپل ولتاژ خروجی و در نظر گرفتن مقاومت معادل (ESR) این خازن و هم چنین خازن های موجود در کارگاه، مقدار ظرفیت خازن معادل $C = 1100 \mu F$ لحاظ می شود. این مقدار خازن با سری کردن دو خازن $C = 2200 \mu F$ حاصل می شود. لازم به ذکر است که مقادیر بزرگ تر برای سلف و خازن فیلتر، رفتار دینامیکی مبدل را کند می کند و رفتار گذرای آن با پاسخ سلول خورشیدی مدنظر فاصله می گیرد.

۴-۵- شبیه سازی و طراحی کنترل کننده امولاتور خورشیدی

جهت طراحی کنترل کننده امولاتور خورشیدی، روش های مختلفی وجود دارد. ساده ترین روش، روش کنترل

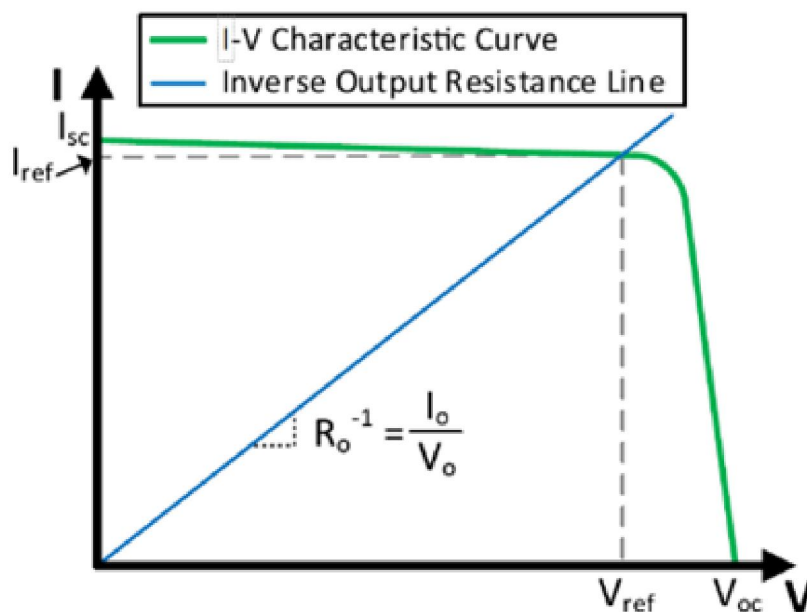
مستقیم است [۱] [۱]. در روش کنترل مستقیم، ولتاژ و جریان خروجی مبدل، اندازه‌گیری شده و بر اساس کنترل مود جریان و یا ولتاژ، ردیابی نقطه کار انجام می‌شود. در کنترل مد جریان، ولتاژ خروجی به مدل پنل اعمال شده و بر اساس تابش و دما و منحنی به دست آمده از پنل، جریان مرجع با جریان خروجی مبدل مقایسه می‌شود. در نهایت کنترل‌کننده کلاسیک مانند PI بر اساس خطا تصمیم‌گیری می‌کند و با تنظیم نرخ وظیفه، ولتاژ و جریان خروجی مبدل در نقطه‌ای کار مناسب متناظر با منحنی پنل، تنظیم می‌شود [۲]. در کنترل مد ولتاژ، جریان خروجی به مدل پنل اعمال شده و ولتاژ مرجع متناظر با تابش و دما و منحنی پنل، به کنترل‌کننده اعمال و نقطه کار ردیابی می‌شود [۳]. شمای این نوع کنترل‌کننده در شکل ۷-۴ نشان داده شده است.



شکل ۷-۴) روش کنترل مستقیم امولاتور خورشیدی. الف) روش کنترل مد جریان ب) روش کنترل مد ولتاژ [۱]

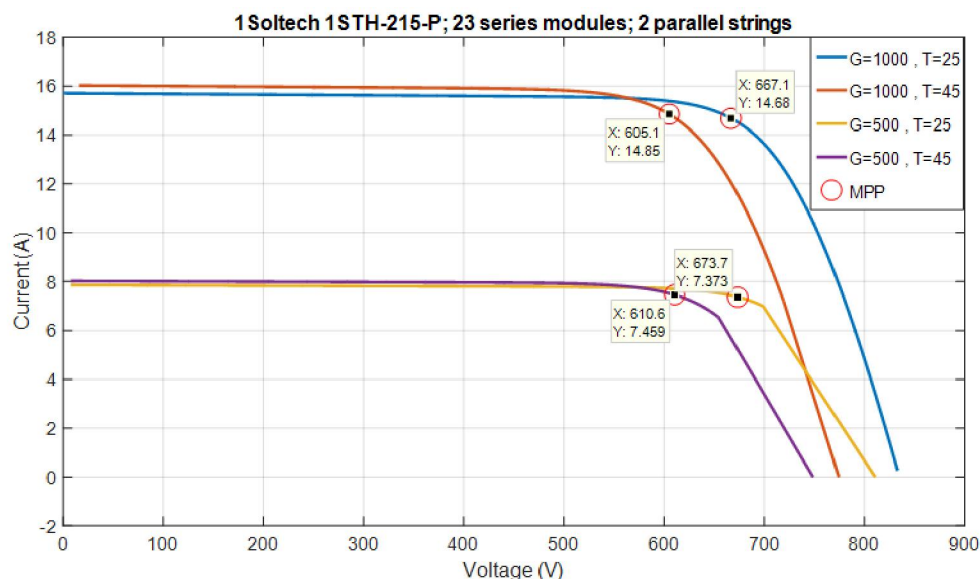
مشکل اصلی روش کنترلی مستقیم مد جریان، نوسانات سیگنال مرجع کنترل کننده در ناحیه ولتاژ ثابت منحنی پنل (I-V) است. همچنین نوسانات سیگنال مرجع در کنترل مد ولتاژ در ناحیه جریان ثابت زیاد است [1]. [۱]. برای بهبود پاسخ در این روش، کنترل کننده هایبیرید ارائه شده است که در آن، در ناحیه جریان ثابت، کنترل مد جریان و در ناحیه ولتاژ ثابت، کنترل مد ولتاژ انجام می شود [4]. [۴]. این روش ساختار کنترل کننده را در تشخیص مد کاری، پیچیده می کند.

جهت حذف ریبیل مرجع کنترلی استخراج شده از مدل پنل $(I_{ref} = f(V, G, T))$ می توان از روش خط مقاومتی استفاده کرد [5]. [۵] در این روش، خط مقاومت $I = \frac{V_{out}}{R}$ با منحنی پنل مقایسه می شود و نقطه تلاقی این دو منحنی محاسبه می گردد. در این شرایط جریان مرجع حاصل از نقطه تلاقی به حلقه کنترل داخلی جریان اعمال شده و نقطه کار مبدل بر نقطه تلاقی تنظیم می شود.



شکل ۴-۸) روش کنترلی خط مقاومتی [5]

در این گزارش از مدل پنل 1Soltech 1STH-215-P موجود در Simulink نرم افزار Matlab استفاده شده است. تعداد سلول های سری ۲۳ عدد و در ۲ رشته ی موازی تعریف شده است تا توان و ولتاژ مدنظر حاصل شود. منحنی های جریان بر حسب ولتاژ پنل (I-V)، تحت تابش و دماهای مختلف در شکل ۴-۹ قابل مشاهده است.

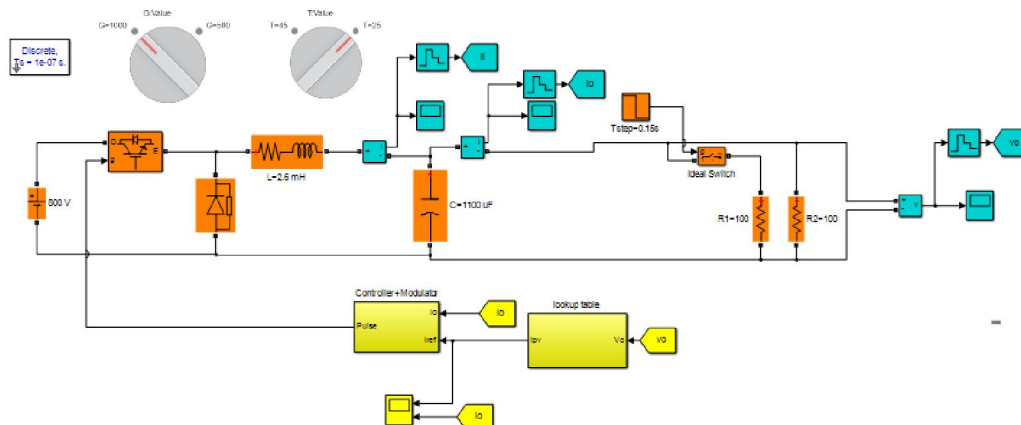


شکل ۹-۴) منحنی مشخصه V-I پنل خورشیدی مورد بررسی.

در شکل ۹-۴، G شدت تابش بر حسب $\frac{W}{m^2}$ و T دما بر حسب $^{\circ}C$ است.

۴-۶- شبیه سازی روش کنترل مستقیم امولاتور خورشیدی

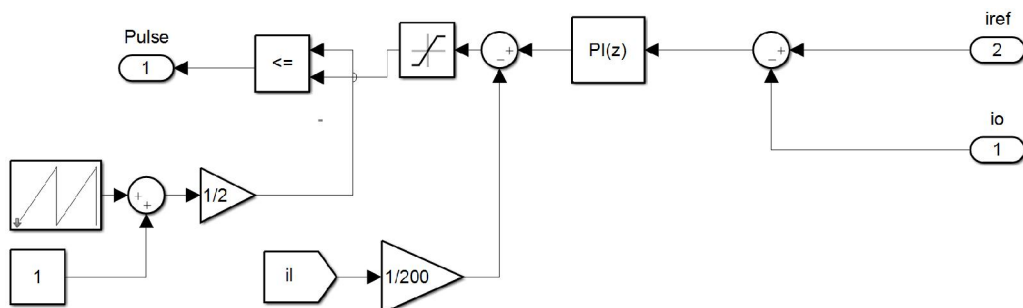
شکل ۱۰-۴ شمای کلی شبیه سازی امولاتور خورشیدی به روش کنترل مستقیم را نشان می دهد.



شکل ۱۰-۴) شبیه سازی امولاتور خورشیدی با کنترل مستقیم

کنترل کننده مستقیم مد جریان شبیه سازی شده در شکل ۱۱-۴ نشان داده شده است. نوسانات جریان سلف

به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شود. جریان سلف با بهره‌ی $1/200$ در مسیر پیش‌رو کنترل‌کننده اضافه شده است تا اثر آن در خروجی مبدل کاهش یابد.



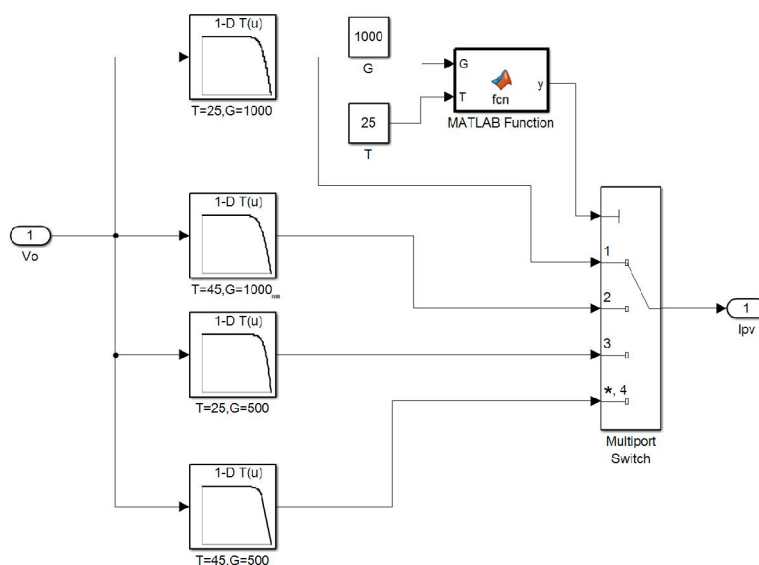
شکل ۴-۱۱) ساختار کنترل‌کننده مد جریان شبیه‌سازی شده

ضرایب کنترل‌کننده PI به کار گرفته شده بر اساس جدول ۴-۲ است.

جدول ۴-۲) پارامترهای کنترل‌کننده مد جریان

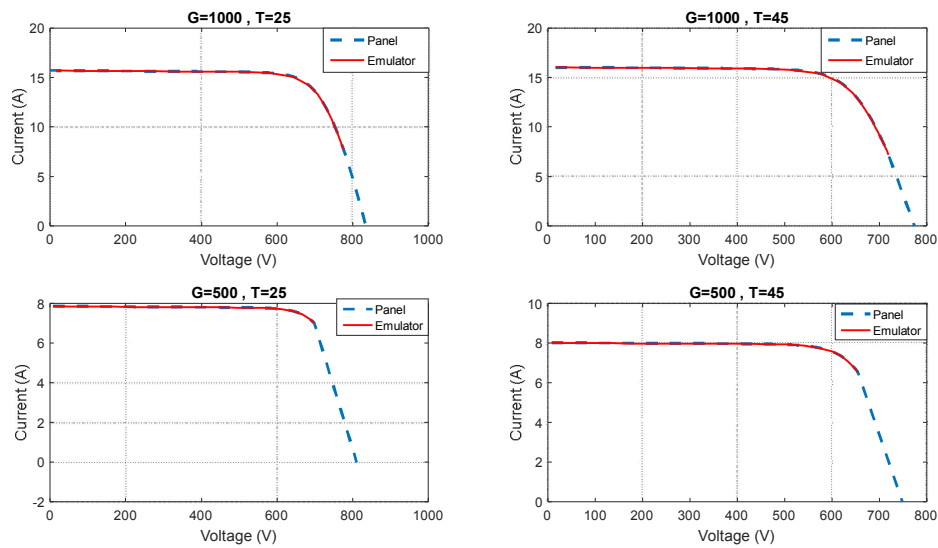
k_i	25
k_p	0.3
t_s (sample time)	1/12000

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در روش کنترل مستقیم مد جریان، ولتاژ خروجی اندازه‌گیری شده به منحنی‌های پنل اعمال شده و جریان پنل متناظر توسط جدول جستجو درون‌یابی می‌شود. در نهایت جریان پنل تولید شده از جدول جستجو به عنوان مرجع به کنترل‌کننده اعمال می‌گردد. شکل ۴-۱۲ ساختار جدول جستجو را نشان می‌دهد.



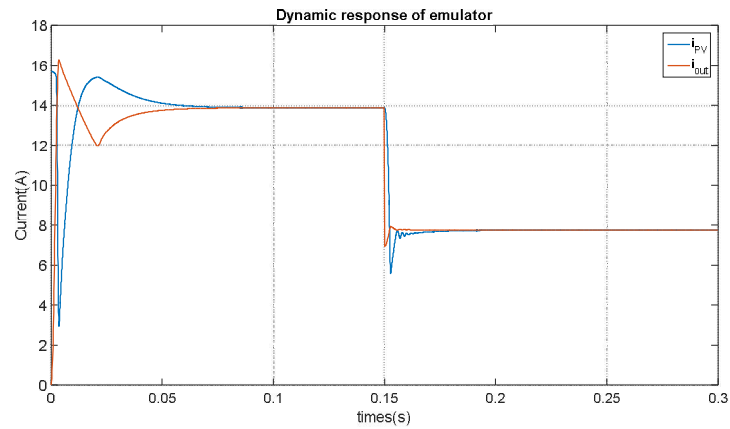
شکل ۴-۱۲) جدول جستجو در نظر گرفته شده پنل بر اساس شدت تابش و دماهای مختلف

در ادامه برای ارزیابی عملکرد امولاتور طراحی شده در حالت ماندگار، مبدل تحت بار مقاومتی از $R=1\Omega$ تا $R=100\Omega$ به ازای 20 مقدار مختلف قرار داده می‌شود. شکل ۴-۱۳ نتایج حاصل از این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد که در آن در شرایط دما و تابش‌های مختلف، منحنی مشخصه پنل با مشخصه امولاتور در یک مقیاس و در یک صفحه ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مشخصه مبدل در این شرایط کاملاً بر مشخصه پنل منطبق می‌باشد.

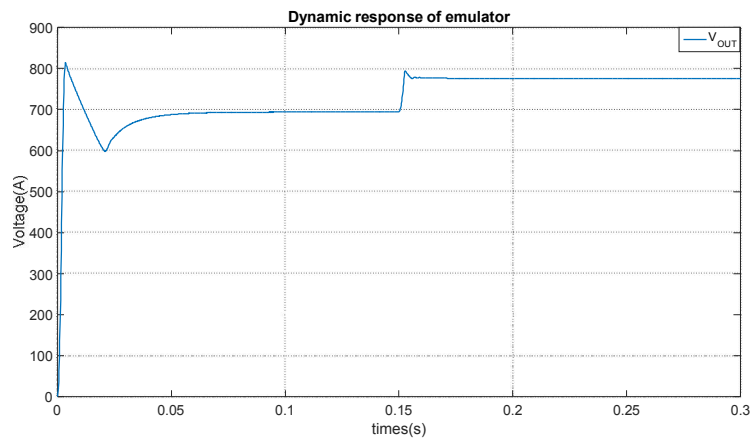


شکل ۴-۱۳) مقایسه مشخصه V-I پنل و امولاتور طراحی شده در شرایط تابش و دمای مختلف

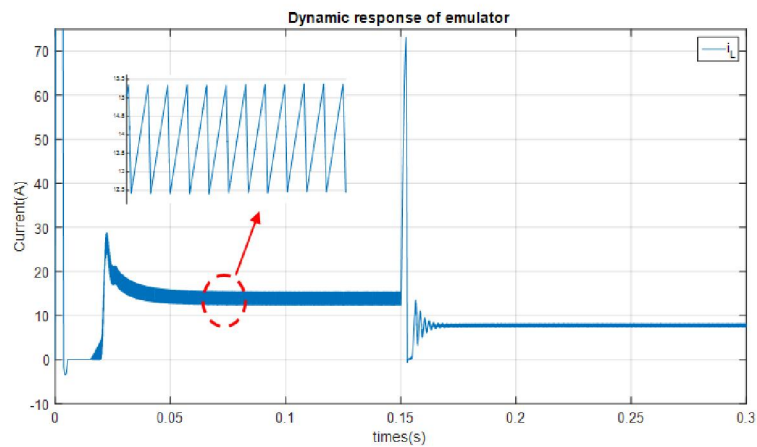
برای ارزیابی عملکرد دینامیکی مبدل ارائه شده، ابتدا مقاومت بار $R = 50\Omega$ قرار داده می شود و سپس در ثانیه $t = 0.15s$ به مقاومت بار $R = 100\Omega$ افزایش داده می شود.



(الف)



(ب)



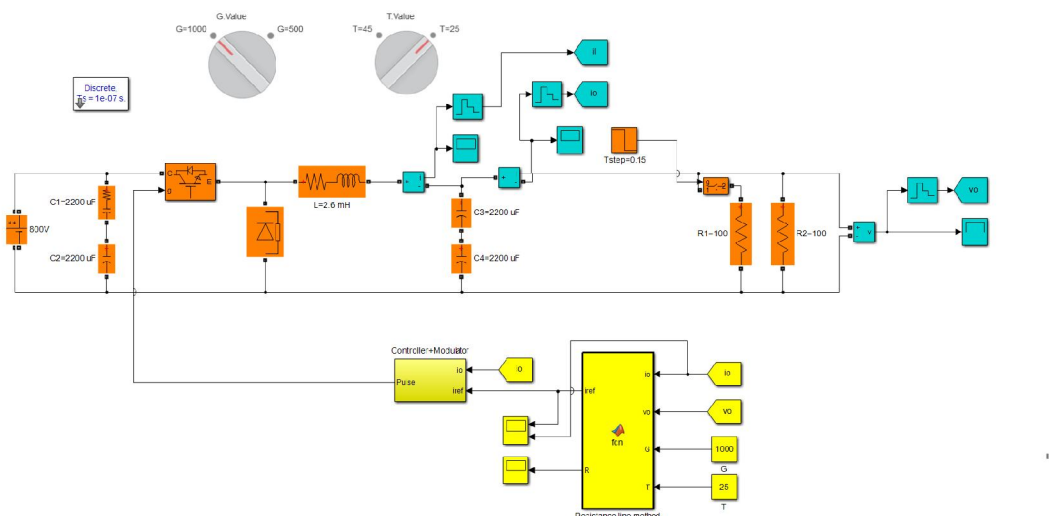
(پ)

شکل ۴-۱۴) پاسخ دینامیکی روش کنترل مستقیم امولاتور در شرایط تغییرات ناگهانی بار. الف) مقایسه جریان خروجی مبدل و جریان مرجع. ب) ولتاژ خروجی مبدل. پ) جریان سلف

همان طور که در شکل ۴-۱۴ الف مشاهده می شود، در تغییرات ناگهانی بار و در ناحیه ولتاژ ثابت مشخصه پنل، جریان مرجع در حالت گذرا شامل نوسانات می باشد.

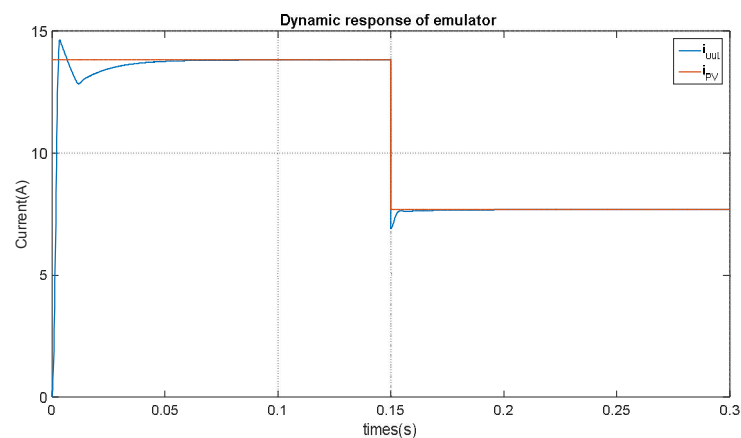
۴-۷- شبیه سازی روش کنترل خط مقاومتی امولاتور خورشیدی

در این بخش جهت حذف نوسانات سیگنال مرجع جریان از روش کنترلی خط مقاومتی استفاده می شود. برای این منظور جریان و ولتاژ خروجی در هر دوره نمونه برداری اندازه گیری شده و مقاومت خروجی و در نهایت نقطه تلاقی به عنوان سیگنال مرجع محاسبه می شود. شکل ۴-۱۵ شمای کلی مبدل شبیه سازی شده را نشان می دهد.

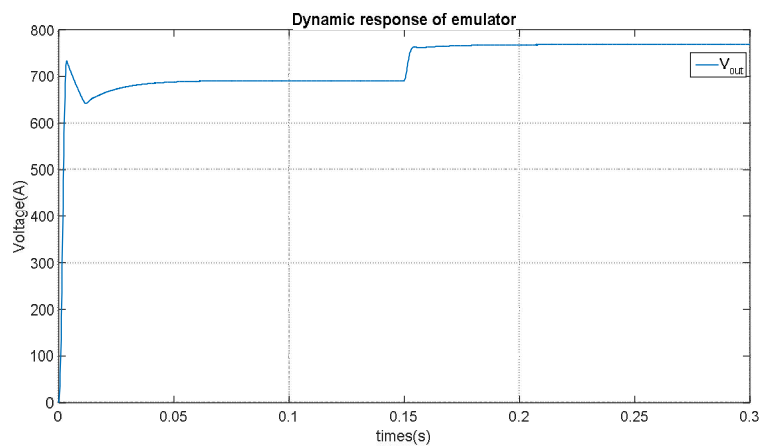


شکل ۴-۱۵) شبیه سازی امولاتور خورشیدی با کنترل خط مقاومتی

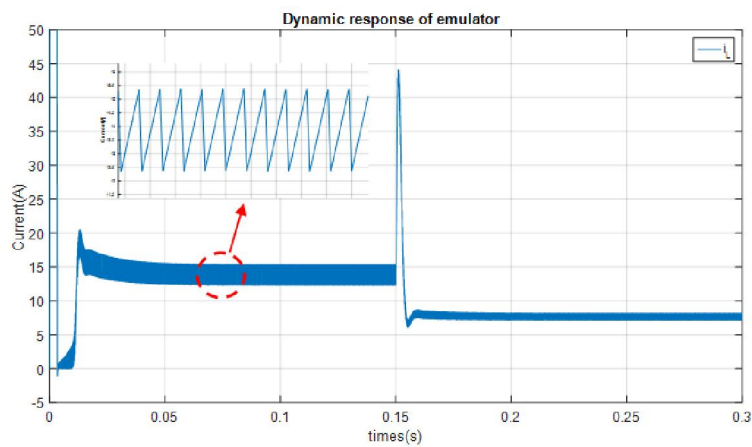
برای بررسی پاسخ دینامیکی مبدل با روش کنترلی بر مبنای خط مقاومت، در ثانیه $t = 0.15s$ تا $t = 0.15s$ بار مقاومتی از $R = 50\Omega$ به $R = 100\Omega$ تغییر می کند. نتایج حاصل از این آزمایش شبیه سازی در شکل ۴-۱۶ مشاهده می شود.



(الف)



(ب)

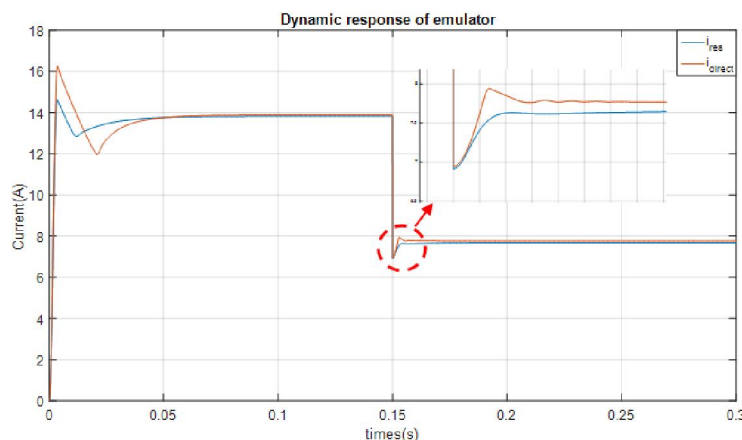


(پ)

شکل ۴-۱۶) پاسخ دینامیکی روش کنترلی بر مبنای خط مقاومت در شرایط تغییرات ناگهانی بار. (الف) مقایسه جریان خروجی

مبدل و جریان مرجع. (ب) ولتاژ خروجی مبدل. (پ) جریان سلف

همان‌طور که در شکل ۴-۱۶ الف مشاهده می‌شود، نوسانات سیگنال مرجع کاملاً حذف شده است؛ بنابراین پاسخ دینامیکی مبدل نوسانات کم‌تری داشته و سرعت آن بالاتر است. شکل ۴-۱۷ مقایسه روش کنترل مستقیم و روش کنترلی بر مبنای خط مقاومت را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۷) مقایسه پاسخ گذرای روش کنترلی مستقیم و روش بر مبنای خط مقاومت

۴-۸- مراجع

- [1]. Ayop, Razman, and Chee Wei Tan. "A comprehensive review on photovoltaic emulator," Renewable and Sustainable Energy Reviews 80 (2017): 430-452.
- [2]. Barra, Francesco, et al. "Dynamic and reconfigurable photovoltaic emulator based on FPAA." Proceedings of the 20th IMEKO TC4 International Symposium and 18th International Workshop on ADC Modelling and Testing Research on Electric and Electronic Measurement for the Economic Upturn, Benevento, Italy. Vol. 15. 2014.
- [3]. Algaddafi, Ali, et al. "Effect of PV array emulator on power quality of PV inverter compared to a real PV array." 2015 3rd international renewable and sustainable energy conference (IRSEC). IEEE, 2015.
- [4]. Kim, Younghyun, et al. "Dual-mode power regulator for photovoltaic module emulation." Applied energy 101 (2013): 730-739.
- [5]. Bhise, Kapil, et al. "Labview based emulation of photovoltaic array to study maximum power point tracking algorithms." 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. IEEE, 2012.
- [6]. Ram, J. Prasanth, et al. "Analysis on solar PV emulators: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 81 (2018): 149-160.
- [7]. Chavarria, Javier, et al. "Low cost photovoltaic array emulator design for the test of

PV grid-connected inverters." 2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14). IEEE, 2014.

[8]. Can, Hayrettin. "Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink." Turkish journal of electrical engineering and computer sciences 21.2 (2013): 300-308.

[9]. Messaoudi, H., et al. "Design and implementation of a solar PV emulator." First International Refrigeration Energy and Environment Colloquium (IREEC1). 2016.

[10]. Azharuddin, S. Mohammed, et al. "A near accurate solar PV emulator using dSPACE controller for real-time control." Energy Procedia 61 (2014): 2640-2648.

فصل ۵

مقدمات پیاده سازی سخت افزاری نهایی

۵-۱- انتخاب IGBT و درایور IGBT

IGBT نمونه ← SKM1400GB17R8 با مشخصه 1700V, 1400A

- درایور نمونه ← L5068112 (SKYPER PRIME O1700V 1400A ST10) که درایور آی جی بی تی SKM1400GB17R8 می باشد.

۵-۱-۱- انتخاب IGBT و درایور

از آنجایی که IGBT ی 1000A برای پروژه (با توجه به نظر مدیر پروژه) کفایت می کند، از شرکت SEMIKRON مدل SKM1000GB17R8 انتخاب شد.

نظر مدیر پروژه بر استفاده از درایورهای نوری بود. لذا مدل L5068111 (SKYPER PRIME O 1700V 1kA PP) که برای IGBT ی شرکت infineon با شماره FF1000R17IE4 طراحی شده است انتخاب شد. SKM1000GB17R8 و FF1000R17IE4 از نظر ابعاد و مشخصات مقایسه شدند و تا حد زیادی این مشخصات یکسان بودند. لذا FF1000R17IE4 می تواند جایگزینی برای SKM1000GB17R8 باشد.

انتخاب فرستنده و گیرنده نوری

فرستنده های برد درایور L5068111، HFBR2521 از شرکت AVAGO و گیرنده های آن FT10MHLR از شرکت Firecomms می باشد.

گزینه های فرستنده نوری برای برد کنترل:

5Mb, 650nm	HFBR1521
10Mb, 650nm	FT10MHLR
1Mb, 650nm	HFBR1522

گزینه های گیرنده نوری برای برد کنترل:

5Mb, 650nm	HFBR2521
10Mb, 650nm	FR10DHIR
1Mb, 650nm	HFBR2522

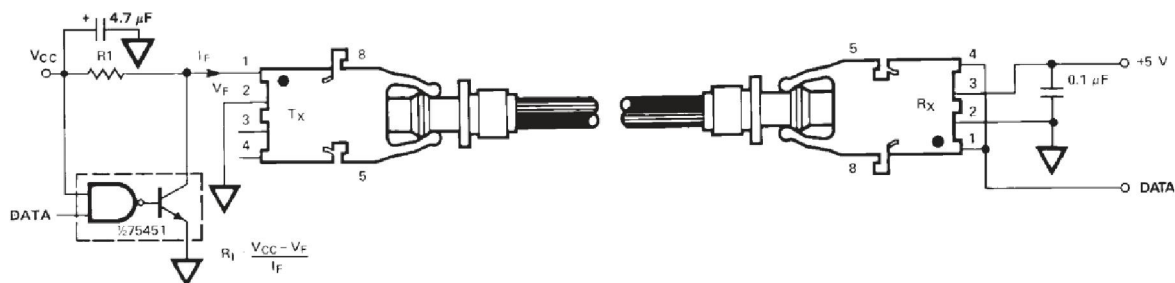
(از میان فرستنده و گیرنده های نوری مدل HFBR1521 برای فرستنده و HFBR2521 برای گیرنده با توجه به موجود بودن در بازار داخل و نیازها انتخاب شد.

۵-۱-۲- درایور فرستنده های نوری

طبق برگه داده و یادداشت های کاربردی دو تراشه برای درایور فرستنده های نوری انتخاب شد.

Military	SN55452BJG
Commercial	SN75452BP

(با توجه به موجود بودن در بازار داخل و نیازها مدل SN55452BJG انتخاب شد.



شکل ۵-۱) Typical 5 MBd interface circuit

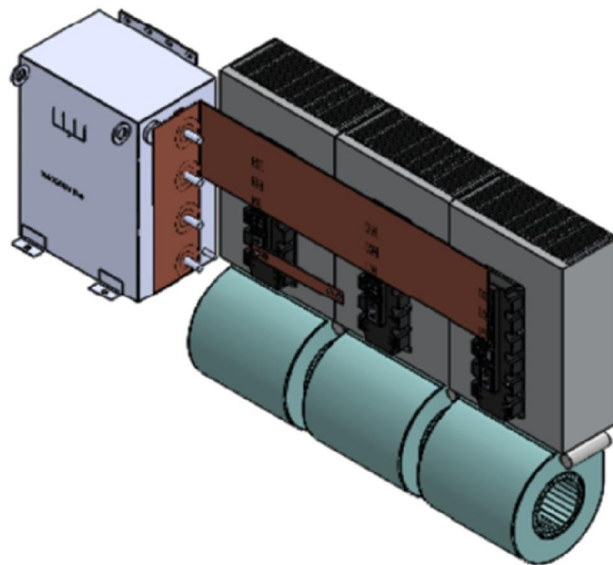
کانکتورها و فیبرهای نوری فرستنده و گیرنده‌های نوری
کانکتورهای فرستنده و گیرنده‌های نوری به انواع قفل‌دار، بدون قفل، دوبل و تک دسته‌بندی می‌شوند.
این کانکتورها توسط شرکت سازنده OPTO ها ساخته و ارائه می‌شود.
این کانکتورها عموماً با شماره HFBR45xx مشخص می‌شوند.

۵-۲- طراحی و جانمایی مکانیکال

طرح مکانیکی و جانمایی سه‌بعدی و همچنین شبیه‌سازی‌های حرارتی انجام شده برای هر جانمایی پذیرفته شده اولیه پروژه مبدل خورشیدی به شرح ذیل ایفاد می‌گردد. انتخاب این جانمایی‌ها بر اساس تجارب قبلی گروه طراحی و دیگر نکات عملی در انتخاب کلیدها بوده است.

۵-۲-۱- جانمایی اولیه

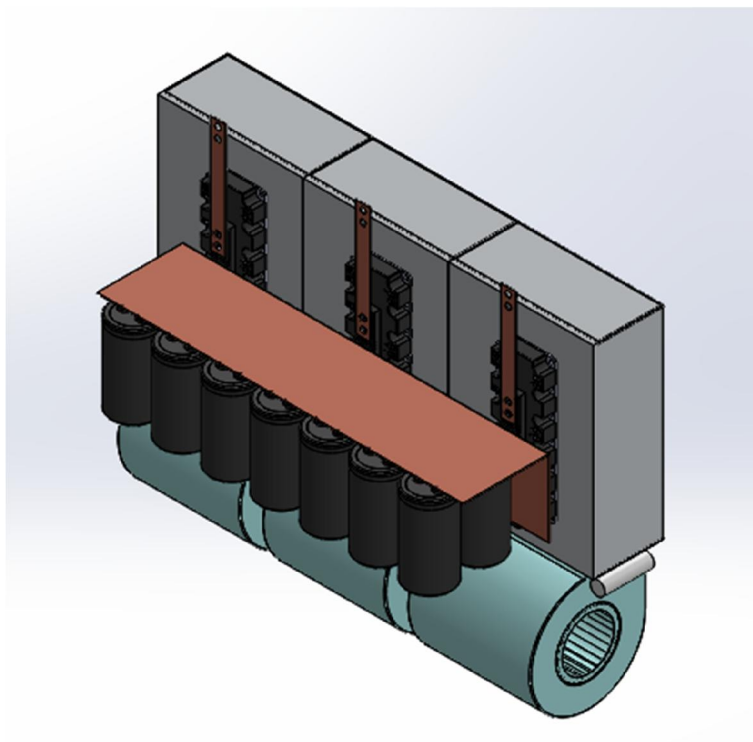
جانمایی ابتدایی برای طرح مکانیکی را در شکل ۵-۲ ملاحظه می‌کنید.



شکل ۲-۵) جانمایی اولیه برای طرح مکانیکی

۵-۲-۲- جانمایی دوم

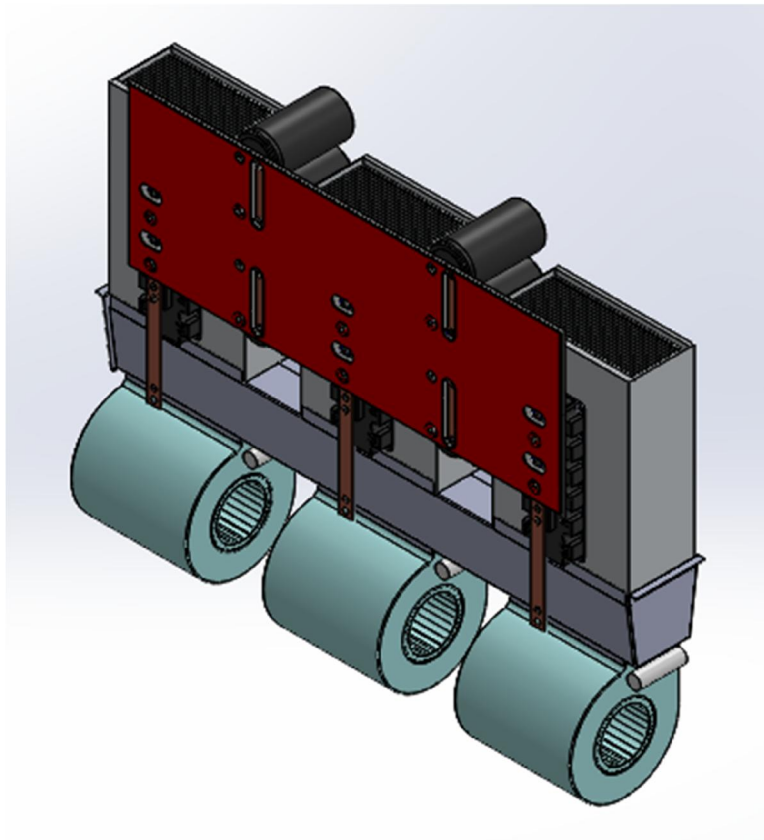
در شکل ۳-۵ جانمایی دیگری را برای طرح مکانیکی سیستم مشاهده می کنید.



شکل ۵-۳) جانمایی دوم و طرح دیگری برای بخش مکانیکی

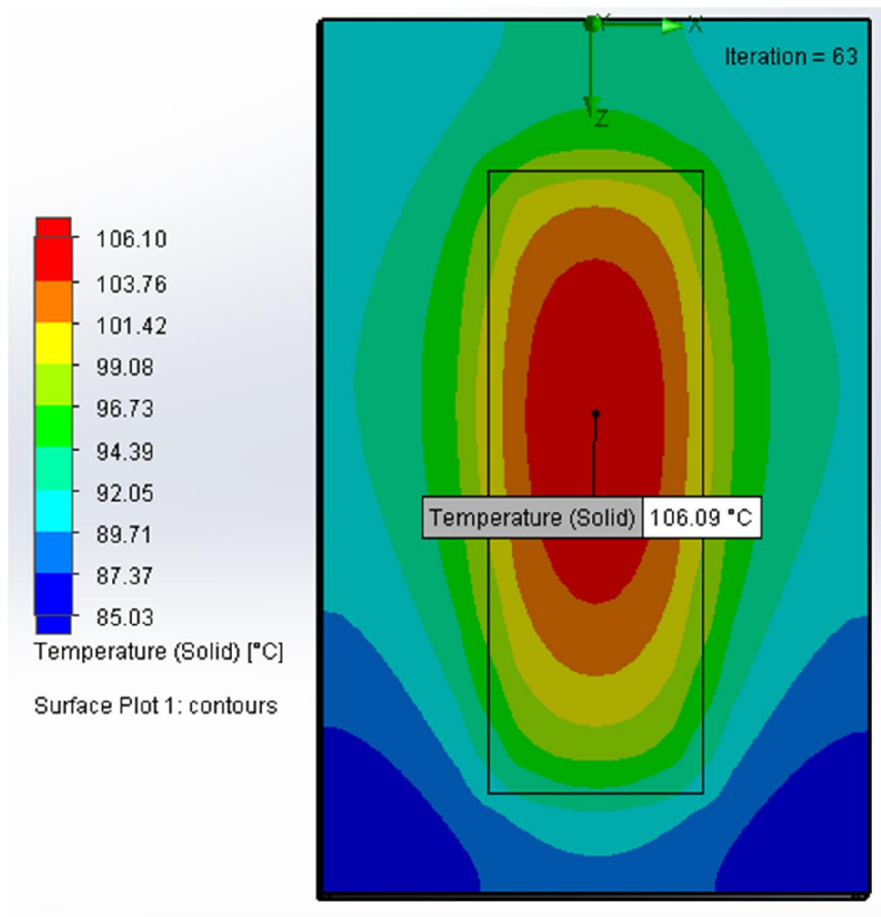
۵-۲-۳- جانمایی سوم

در شکل ۴-۵ جانمایی سوم برای طرح مکانیکی سیستم را مشاهده می کنید.



شکل ۴-۵) جانمایی سوم

شبیه سازی حرارتی برای جانمایی های تک کلید با توان حداکثر ۹۶۹ وات و سرعت هوای ورودی ۵ متر بر ثانیه انجام شده است. نتیجه شبیه سازی در شکل ۵-۵ مشاهده می شود.

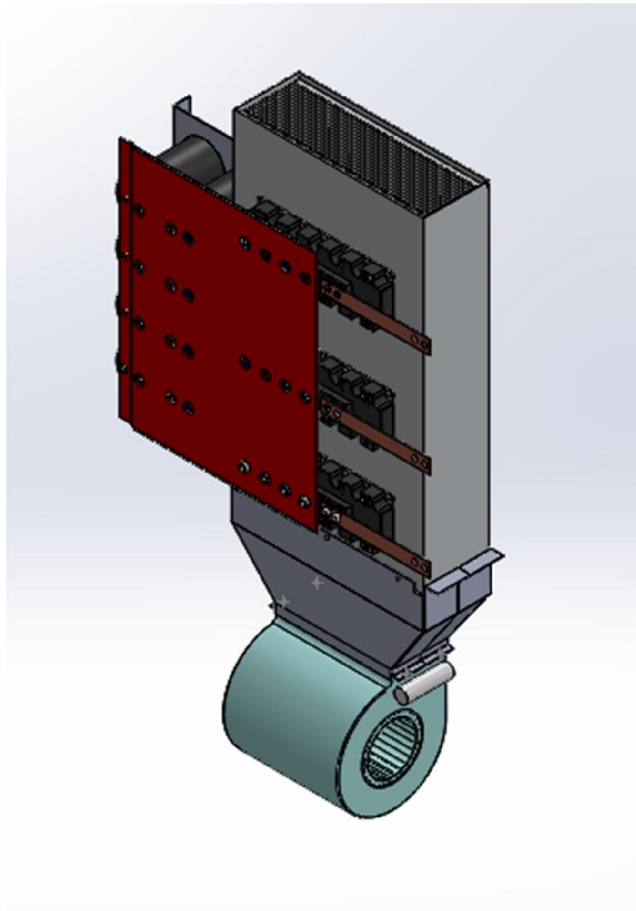


شکل ۵-۵) شبیه سازی حرارتی برای طرح تک کلید

از شکل ۵-۵ مشاهده می گردد که دمای مرکز کلید ۱۰۶،۰۹ درجه سانتی گراد شده است که نقطه بحرانی محسوب می شود. لذا تصمیم گرفته شد با اقتباس از نمونه های خارجی شکل جانمایی کاملاً تغییر یافته و به شکل ۵-۶ یعنی جانمایی چهارم انجام گردد.

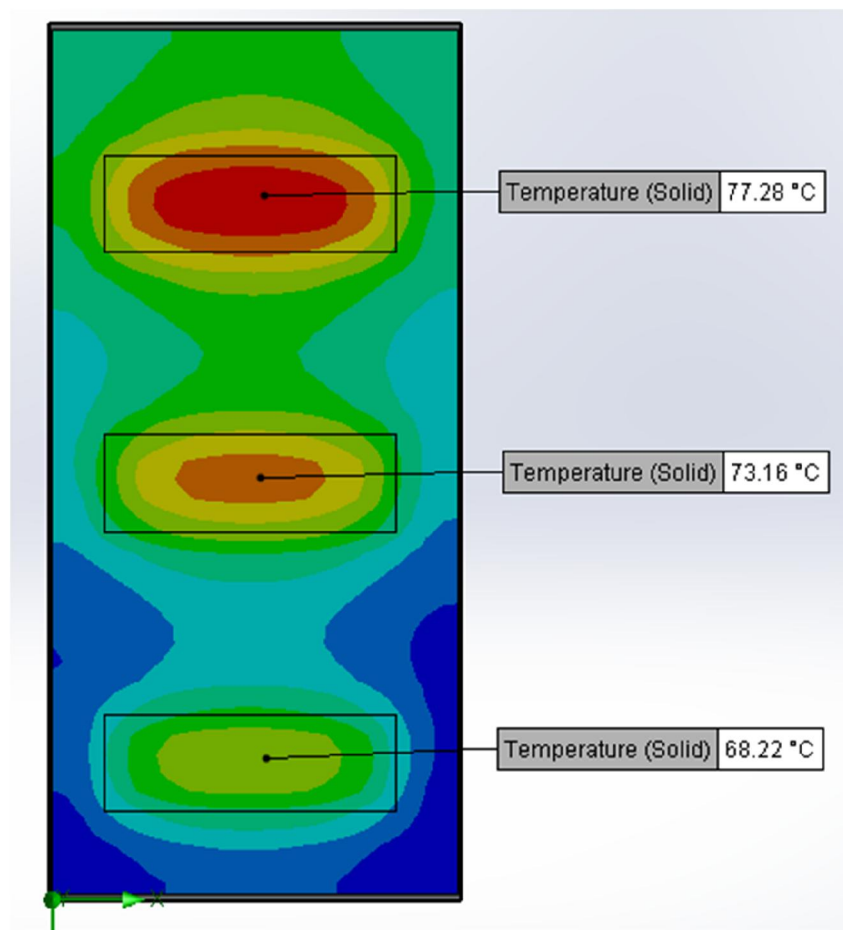
۵-۲-۴- جانمایی چهارم

در شکل ۵-۶ جانمایی دیگری برای طرح مکانیکال بر اساس یک نمونه خارجی مشاهده می شود.

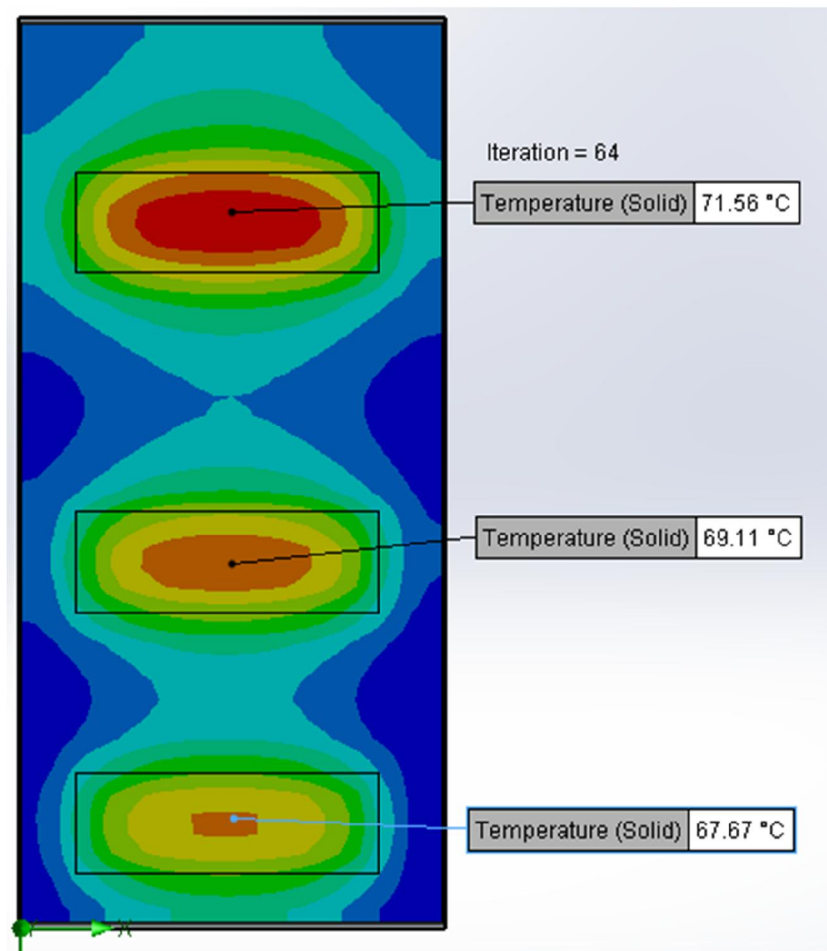


شکل ۵-۶) جانمایی بر اساس یک طرح خارجی

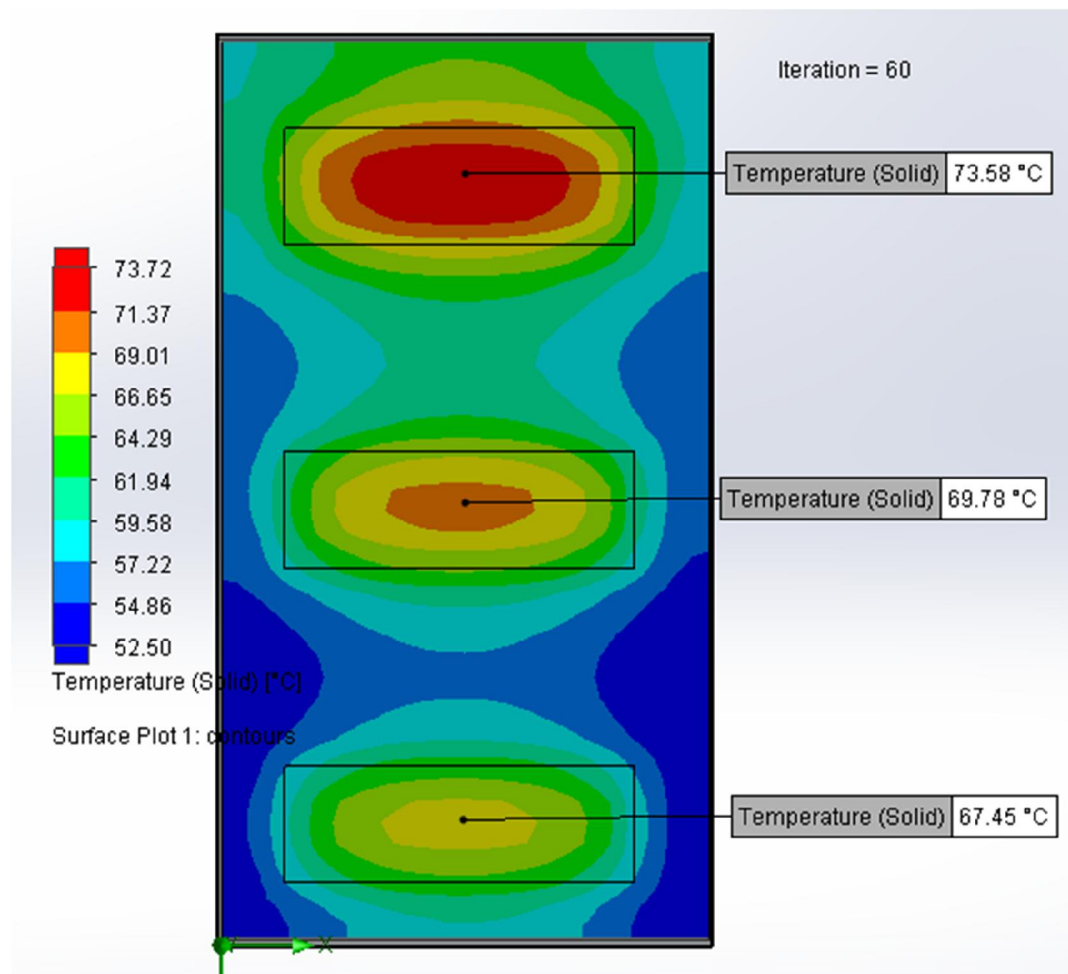
ابتدا با توجه به شبیه‌سازی‌های قبل به نظر می‌رسید عرض ۲۵ سانتیمتر در ۳۵ سانتیمتر برای ۱۰۰۰ وات تلفات مناسب باشد؛ بنابراین در ابتدای آزمایش یک گرماگیر نوع ۳۵ در ۷۵ سانتیمتر انتخاب شد. سپس در شبیه‌سازی‌های متوالی مطابق با ادامه متن و با بهینه کردن فواصل نصب کلیدها به طول بهینه برای گرماگیر رسیدیم. شبیه‌سازی‌ها مطابق با شکل‌های ۵-۷ تا ۵-۱۳ می‌باشد.



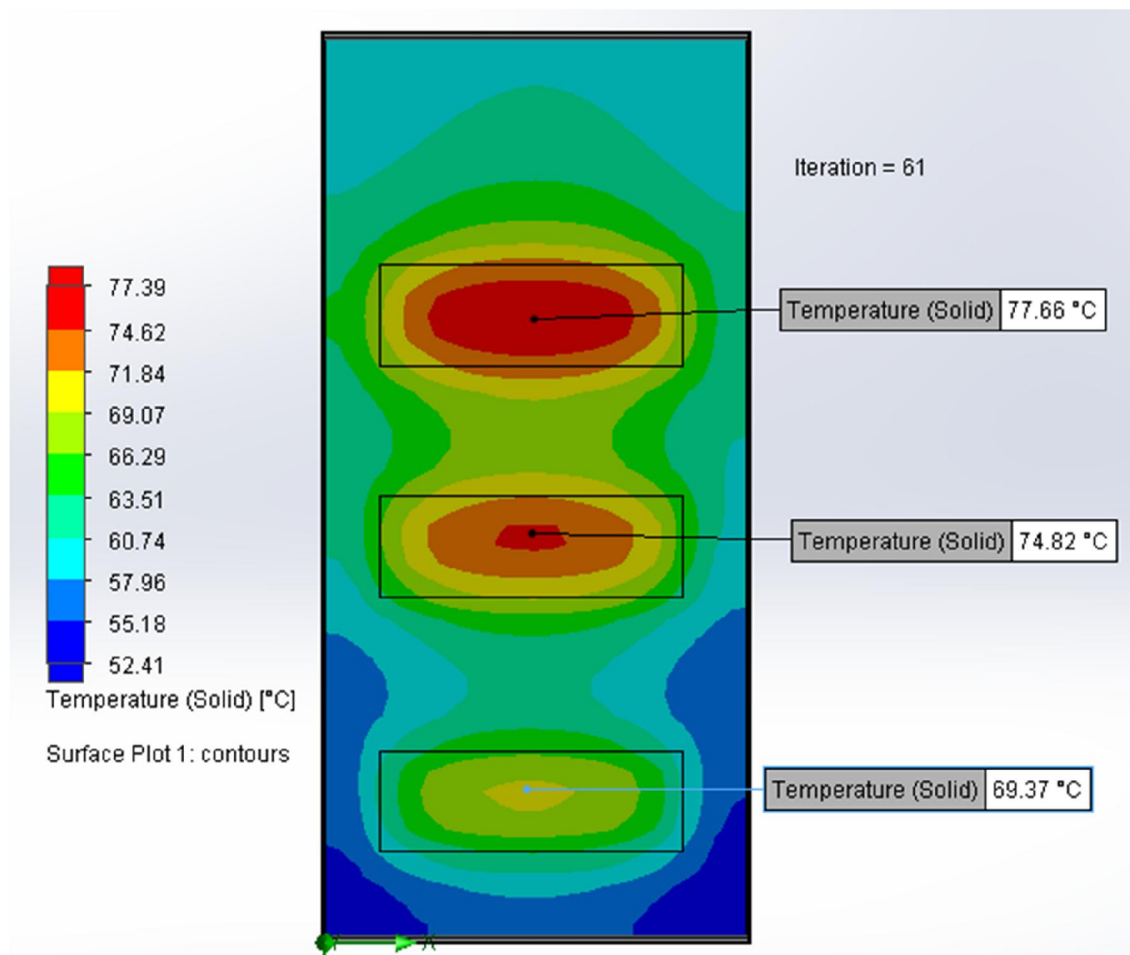
شکل ۵-۷) شبیه سازی نخست برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر



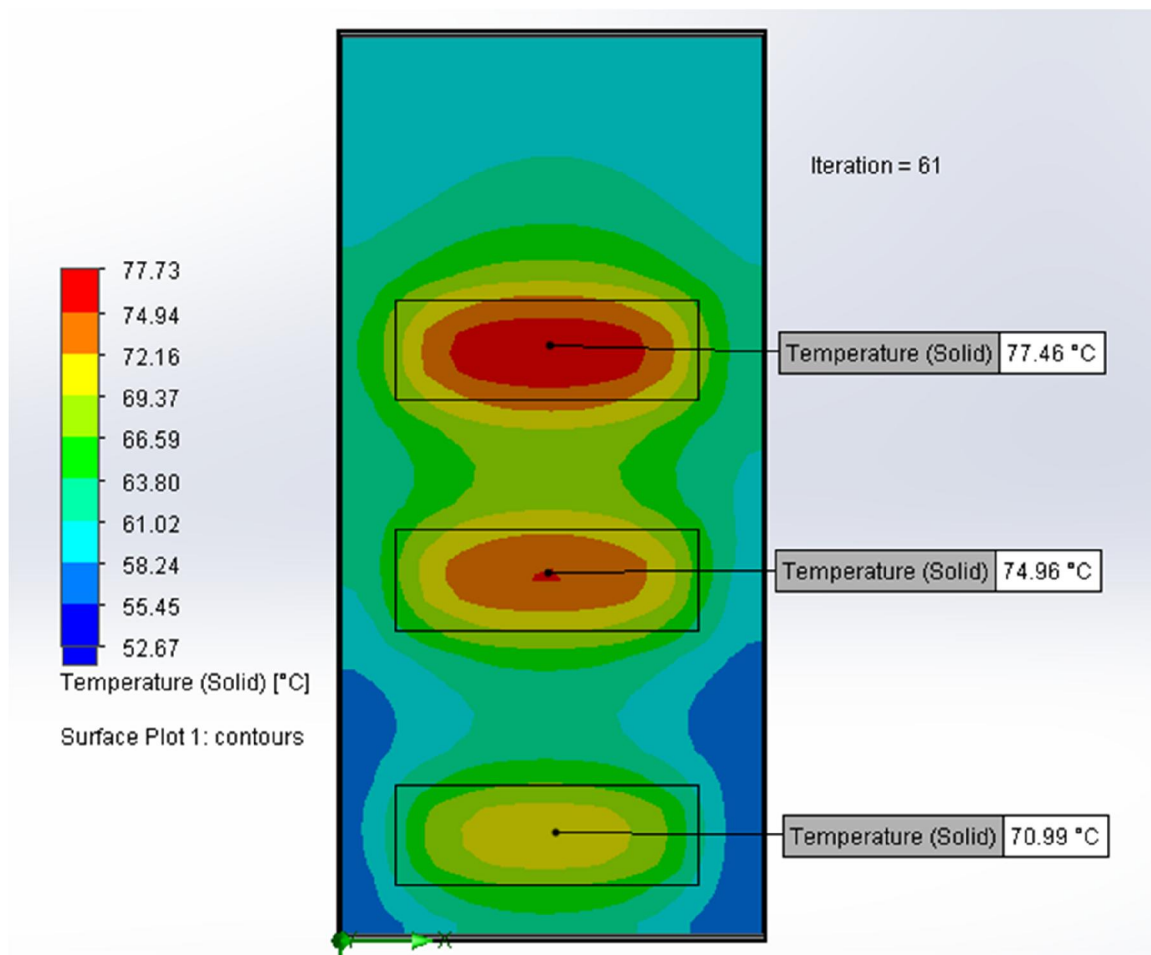
شکل ۵-۸) شبیه سازی دوم برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر



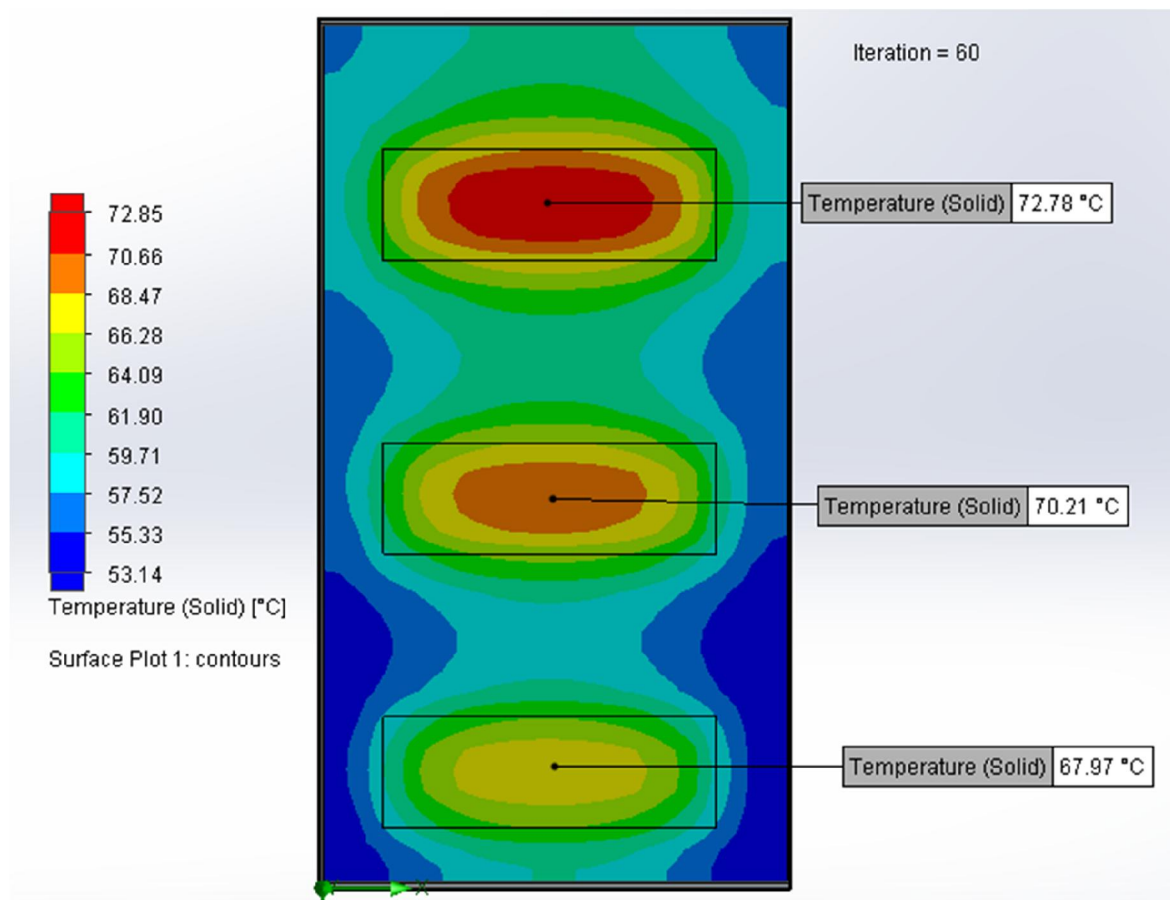
شکل ۵-۹) شبیه سازی سوم برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر



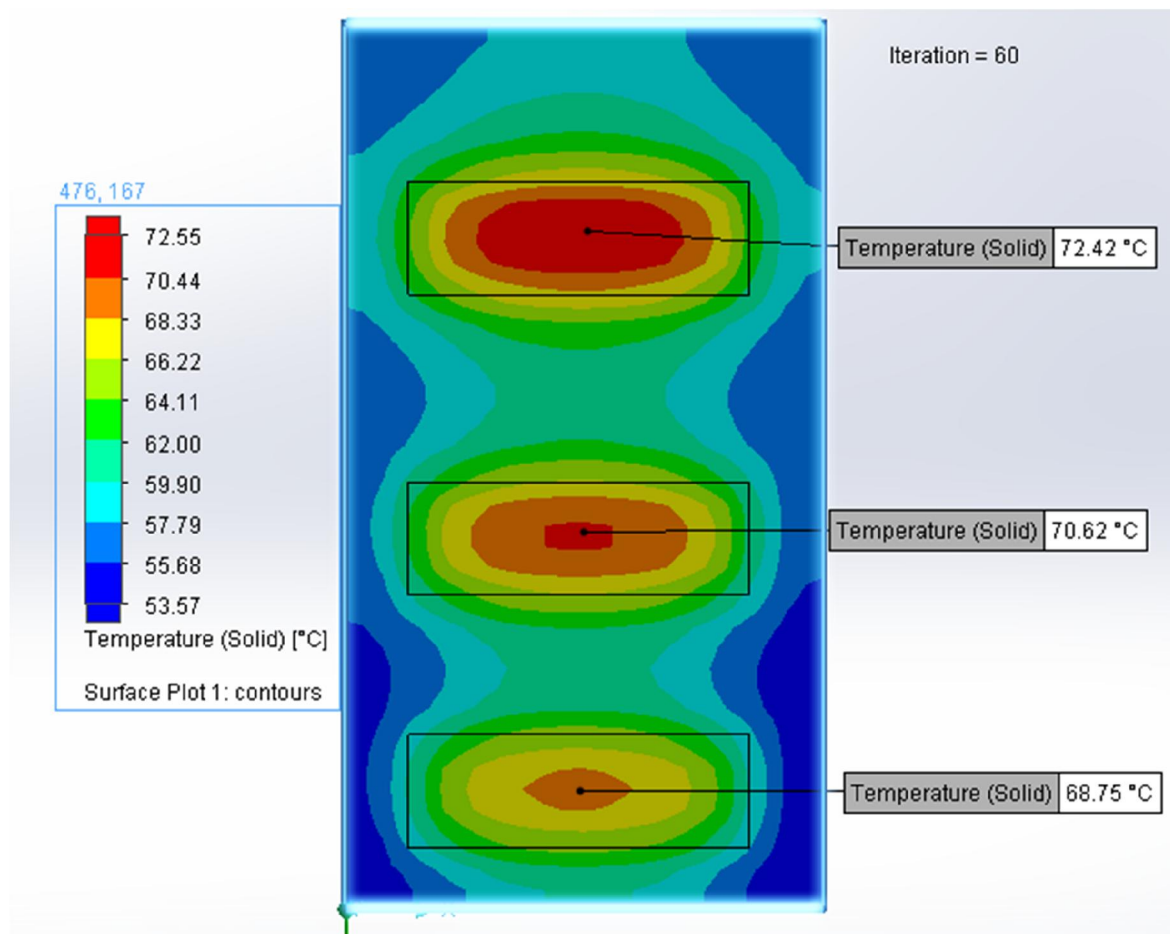
شکل ۵-۱۰) شبیه سازی چهارم برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر



شکل ۵-۱۱) شبیه سازی پنجم برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر



شکل ۵-۱۲) شبیه سازی ششم برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر



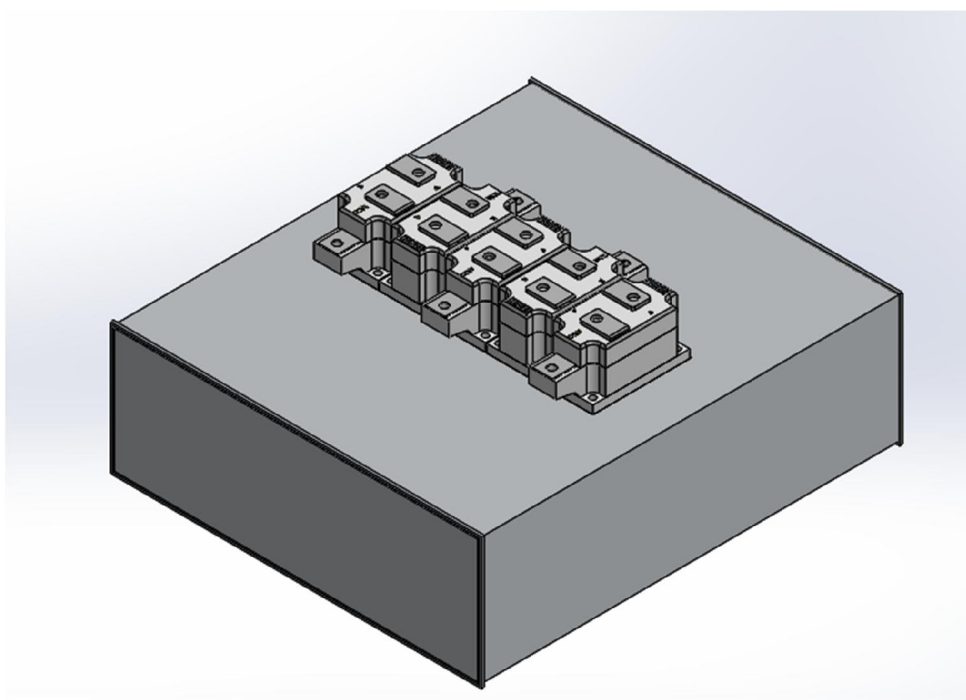
شکل ۵-۱۳) شبیه‌سازی هفتم برای تعیین طول بهینه برای گرماگیر

بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده طول بهینه برای گرماگیر برابر با ۶۰ سانتیمتر حاصل شد. برای کسب اطمینان از شبیه‌سازی‌های انجام شده، یک نمونه از گرماگیر استفاده شده در پروژه به ابعاد ۳۶,۵ در ۴۰ سانتیمتر هم به وسیله نرم‌افزار سولیدورکز شبیه‌سازی حرارتی شد و هم در کارگاه به صورت تجربی مورد آزمایش واقع گردید. جدول ۵-۱ نتایج حاصل از آزمایش عملی را برای توان حدود ۱۰۰۰ وات و جدول ۵-۲ نتایج برای توان حدود ۱۶۰۰ وات را نشان می‌دهد.

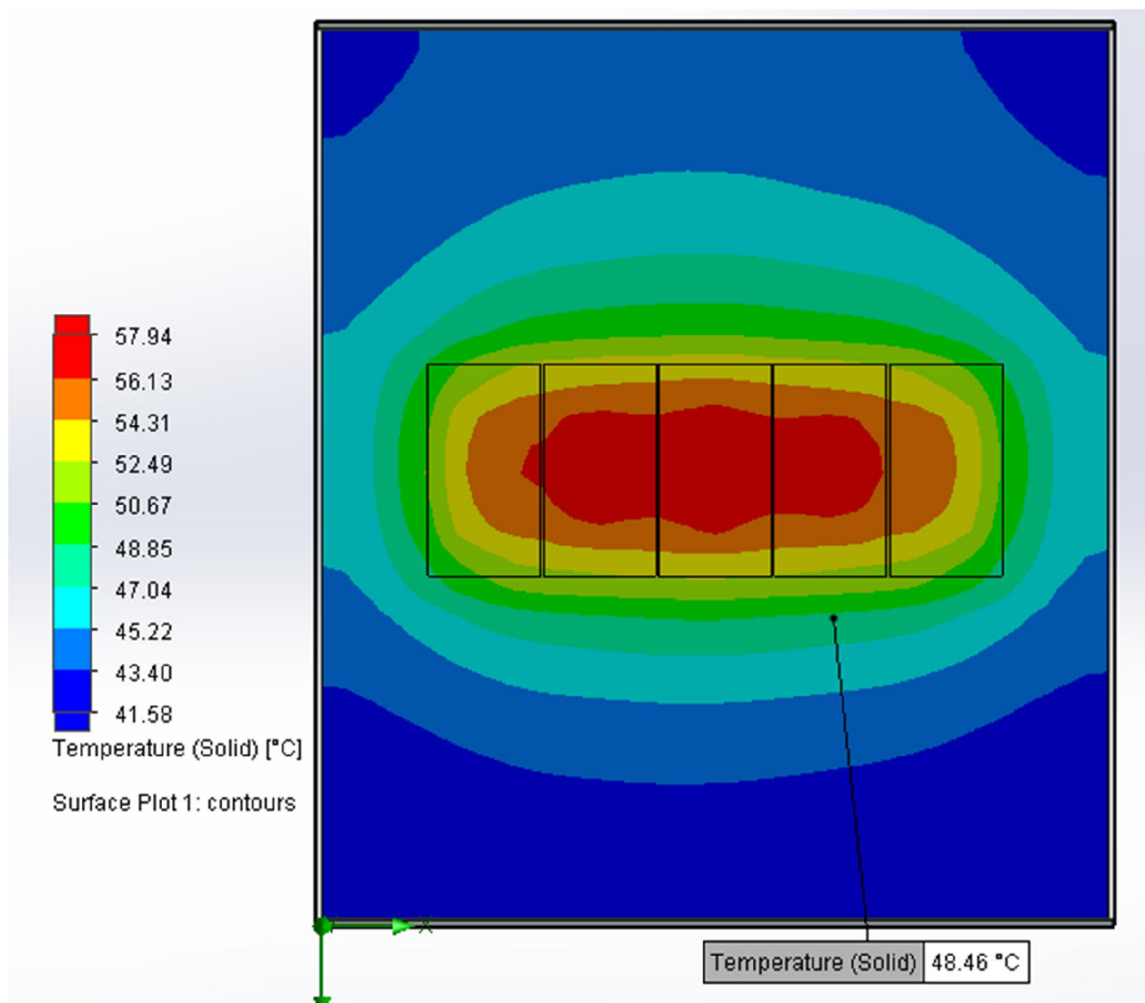
همان گونه که از جدول ۵-۱ مشاهده می‌شود شبیه‌سازی حدود ۲ درجه سانتی‌گراد بیش‌تر از آزمایش تجربی نشان می‌دهد. بنابراین از این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی‌های انجام شده در این سطح توان تا حد زیادی قابل اعتماد هستند.

جدول ۵-۱) نتایج حاصل از آزمایش عملی در سطح توان حدود ۱۰۰۰ وات

توان	ولتاژ	جریان	دما	ساعت	نقطه تحت آزمایش
۰	۰	۰	۲۱	۱۰:۴۵	۲
۱۰۲۲	۸/۱۲	۱۲۶	۴۳	۱۰:۵۵	۲
۱۰۱۴	۸/۰۹	۱۲۵	۴۴	۱۱:۱۰	۲
۱۰۱۵	۸/۰۷	۱۲۵	۴۵	۱۱:۲۵	۲
۱۰۱۷	۸/۰۸	۱۲۶	۴۵	۱۱:۴۰	۲
۱۰۲۰	۸/۰۸	۱۲۶	۴۵	۱۱:۵۵	۲
۱۰۲۰	۸/۰۷	۱۲۶	۴۵	۱۲:۱۰	۲
۱۰۲۱	۸/۰۸	۱۲۶	۴۵	۱۲:۲۵	۲
۱۰۲۲	۸/۰۸	۱۲۶	۴۶	۱۲:۴۰	۲
۱۰۲۵	۸/۰۸	۱۲۶/۹	۴۶	۱۲:۵۵	۲
۱۰۱۴	۸/۰۷	۱۲۵	۴۶	۱۳:۲۵	۲
۱۰۲۰	۸/۰۷	۱۲۵	۴۶	۱۳:۵۵	۲
۱۰۲۰	۸/۰۸	۱۲۵	۴۶	۱۴:۳۰	۲
۱۰۱۴	۸/۰۸	۱۲۵	۴۶	۱۵:۰۰	۲



شکل ۵-۱۴) نمایی از ساختار فیزیکی نصب دیودهای قدرت بر روی گرماگیر در آزمایش عملی

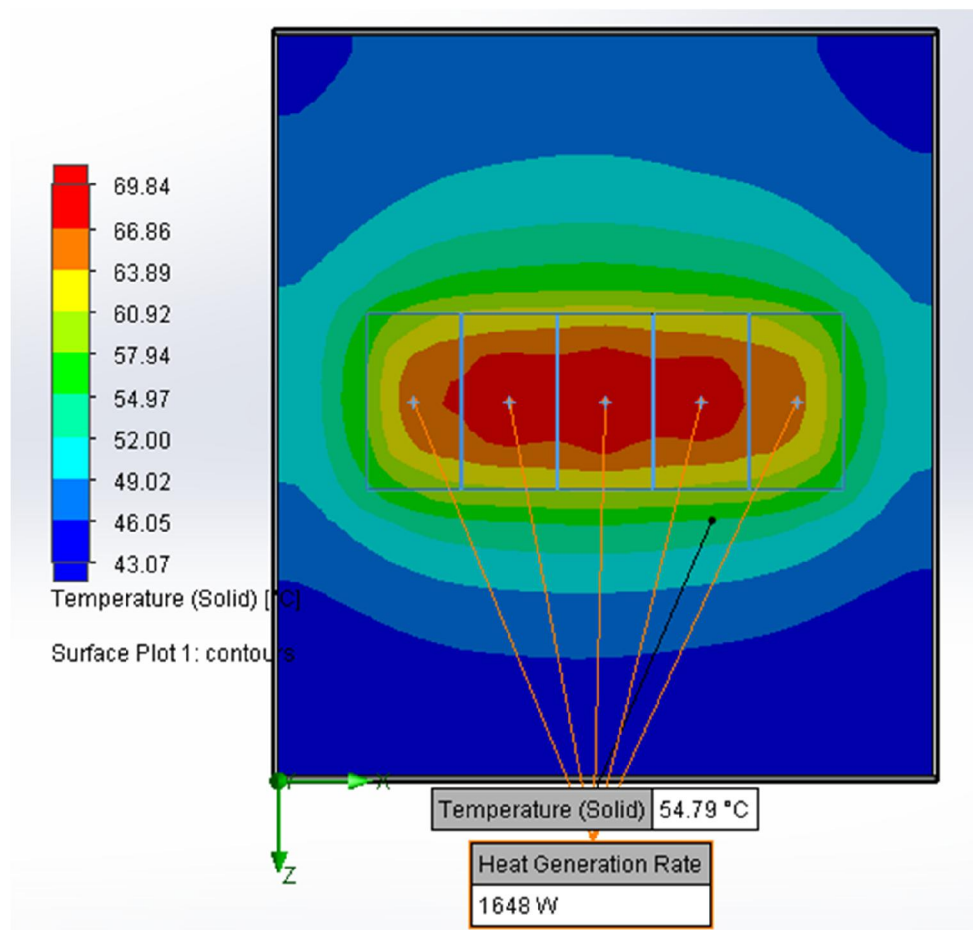


شکل ۵-۱۵) نتیجه شبیه‌سازی بر روی ساختار فیزیکی حاصل از ۵ دیود سری با نرم‌افزار سالیس ورکز در توان حدود ۱۰۰۰ وات

شبیه‌سازی با توان ۱۶۴۸ وات (جدول ۵-۲) نشان می‌دهد دمای شبیه‌سازی در نقطه آزمایش حدود ۲ درجه کم‌تر از واقعیت است که دلیل اصلی آن تغییر حرارت محیط در اثر گرم شدن محیط با بارهای مورد استفاده بود؛ بنابراین باز هم تایید می‌شود که نتایج شبیه‌سازی و عملی از تطابق خوبی برخوردار هستند.

جدول ۵-۲) نتایج حاصل از آزمایش عملی در سطح توان حدود ۱۶۰۰ وات

توان	ولتاژ	جریان	دما	ساعت	نقطه تحت آزمایش
۱۶۶۵	۸/۳۰	۲۰۰	۴۴	۱۰:۳۰	
۱۶۳۵	۸/۱۲	۲۰۰	۵۵	۱۰:۴۵	
۱۶۱۳	۸/۱۵	۱۹۸	۵۷	۱۱:۰۰	
۱۷۳۰	۸/۲۶	۲۱۰	۵۸	۱۱:۱۵	
۱۶۲۴	۸/۲۴	۱۹۷	۵۱	۱۱:۳۰	
۱۵۸۴	۸/۱۵	۱۹۷	۵۵	۱۱:۴۵	
۱۶۰۱	۸/۱۴	۲۰۰	۵۶	۱۲:۰۰	
۱۵۹۶	۸/۱۳	۱۹۵	۵۶	۱۲:۱۵	
۱۶۲۶	۸/۱۸	۱۹۸	۵۷	۱۲:۳۰	
۱۶۳۵	۸/۱۸	۱۹۹	۵۷	۱۳:۰۰	
۱۶۴۸	۸/۱۸	۲۰۰	۵۷	۱۳:۳۰	



شکل ۵-۱۶) نتیجه شبیه‌سازی بر روی ساختار فیزیکی حاصل از ۵ دیود سری با نرم‌افزار سالیس و مرکز در توان ۱۶۴۸ وات