

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

کنترل فازی بهینه سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

دانشجو :

علی فدائی

استاد راهنما :

دکتر حسین قلی زاده نرم

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار :

بهمن ۹۳



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره: ۱۲۴۱/آت.ب

تاریخ: ۹۳/۱۱/۰۴

ویرایش: -----

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای:

علی فدایی رشته: برق گرایش: کنترل

تحت عنوان: کنترل فازی بهینه سیستم فتو ولتائیک متصل به شبکه

که در تاریخ ۹۳/۱۱/۰۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه: بسیار خوب (۱۸)) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبۀ علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	حسین مهرزاد	۱- استاد راهنما
		-	۲- استاد مشاور
	استاد	مرتضی رحمان	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	محمدحسین عرف	۴- استاد ممتحن
	استاد	علی رستگار	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده:

تقديم به

پدر و مادر مهربان

9

همسر صبورم

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...
بر حسب وظیفه و از باب

" من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزوجل " :
از پدر و مادر عزیزم، این دو معلم بزرگوارم، که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده اند؛
از همسر مهربانم، که با صبرش، در تمامی لحظات رفیق راهم بوده و در سایه همیاری و همدلی او به این منظور نائل شدم. او که سایه مهربانیش سایه سار زندگی من باشد و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود؛
از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر قلی زاده نرم که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛
کمال تشکر و قدردانی را دارم باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

تعهد نامه

اینجانب علی فدائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش کنترل دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کنترل فازی بهینه سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه تحت راهنمایی دکتر حسین قلی زاده نرم متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده 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 های رایانه ای ، نرم افزار ها 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 :

در این پایان نامه با استفاده از کنترل کننده فازی عمل ردیابی نقطه حداکثر توان در سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه با بار مقاومتی متغیر و همچنین تحت تابش و دمای متغیر و استاندارد انجام می شود. روش آشفتن و مشاهده نیز برای ردیابی نقطه حداکثر توان استفاده شده و با روش فازی مقایسه می شود. نتایج به دست آمده عملکرد مناسب کنترل کننده فازی را جهت ردیابی نقطه حداکثر توان بیان می کند. همچنین جهت بهینه سازی گروه های فازی از الگوریتم اجتماع ذرات استفاده می گردد که باعث بهبود عملکرد کنترل کننده فازی می شود. در پایان نیز با استفاده از کنترل کننده فازی طراحی شده، سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه تک فاز پیاده سازی می گردد و با روش کنترل جریان هیستریزیس، سوئیچینگ اینورتر جهت تزریق حداکثر توان به شبکه انجام می شود.

کلمات کلیدی : آشفتن و مشاهده ، کنترل کننده فازی ، ردیابی حداکثر توان ، اینورتر، الگوریتم

اجتماع ذرات، کنترل جریان هیستریزیس

فهرست مطالب :

۱.....	فصل اول : مقدمه
۲.....	۱-۱ مقدمه
۳.....	۲-۱ برنامه توسعه انرژی های پاک
۵.....	۳-۱ انرژی خورشیدی در ایران
۶.....	۴-۱ بیان مسأله
۷.....	۵-۱ پیشینه تحقیق
۸.....	۶-۱ ساختار پایان نامه
۹.....	فصل دوم : سیستم های فتوولتائیک
۱۰.....	۱-۲ مقدمه
۱۱.....	۲-۲ تعریف سیستم های برق خورشیدی فتوولتائیک
۱۱.....	۳-۲ مزایا و معایب سیستم های فتوولتائیک
۱۲.....	۴-۲ ساختار سیستم فتوولتائیک
۱۲.....	۵-۲ سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه (Stand Alone)
۱۳.....	۶-۲ سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه (Grid Connected)
۱۴.....	۲-۷ مازول فتوولتائیک
۱۸.....	۸-۲ آرایه فتوولتائیک
۱۹.....	۹-۲ تجهیزات کنترل توان
۲۱.....	فصل سوم : ردیابی نقطه حداکثر توان در سیستم های فتوولتائیک

۲۲	.....	۱-۳ مقدمه
۲۲	.....	۲-۳ مشخصه ماژول فتوولتائیک
۲۶	.....	۳-۳ تکنیک ردیابی نقطه حداکثر توان
۲۷	.....	۱-۳-۳ روش کنترل وابسته به ریپل (RCC)
۲۷	.....	۲-۳-۳ الگوریتم آشفتن و مشاهده کردن (P&O)
۲۹	.....	۳-۳-۳ الگوریتم هدایت افزایشی (INC)
۳۱	.....	۴-۳-۳ روش ولتاژ مدار باز جزئی
۳۱	.....	۵-۳-۳ روش جریان اتصال کوتاه جزئی
۳۱	.....	۶-۳-۳ روش شبکه عصبی
۳۳	.....	۷-۳-۳ روش کنترل منطق فازی
۳۵	.....	فصل چهارم : طراحی کنترل کننده فازی بهینه برای ردیابی نقطه حداکثر توان
۳۶	.....	۱-۴ مقدمه
۳۶	.....	۲-۴ مبدل بوست
۴۰	.....	۴-۳ اینورتر
۴۲	.....	۴-۴ الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO)
۴۴	.....	۵-۴ طراحی و بهینه‌سازی کنترل کننده فازی
۴۴	.....	۱-۵-۴ مرحله فازی سازی
۴۵	.....	۲-۵-۴ قوانین و استنتاج
۴۵	.....	۳-۵-۴ غیرفازی سازی

فصل پنجم : شبیه سازی	۵۵
۱-۵ مقدمه	۵۶
۲-۵ انتخاب ماژول فتوولتائیک	۵۶
۳-۵ پارامترهای بوست	۵۷
۴-۵ شبیه سازی سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه با بار اهمی	۵۸
۵-۵ شبیه سازی تحت شرایط متفاوت دما و تابش	۶۷
۶-۵ شبیه سازی تحت تغییرات بار مقاومتی	۶۹
۷-۵ شبیه سازی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه تک فاز	۷۰
۱-۷-۵ همگام سازی با شبکه	۷۱
۲-۷-۵ کنترل کننده PID	۷۱
فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات	۸۱
مراجع	۸۳

فهرست اشکال :

- شکل (۱-۱) پیش‌بینی تولید برق در جهان از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۳۵ ۲
- شکل (۲-۱) میزان تولید انرژی های پاک سال ۲۰۰۲ ۴
- شکل (۳-۱) پیش‌بینی تولید انرژی در سال ۲۰۳۰ ۴
- شکل (۱-۲) نحوه ی تبدیل انرژی در سلول خورشیدی ۱۰
- شکل (۲-۲) نمای کلی سیستم مستقل از شبکه ۱۲
- شکل (۳-۲) نمای کلی سیستم متصل به شبکه ۱۳
- شکل (۴-۲) مدار معادل سلول فتوولتائیک ۱۴
- شکل (۵-۲) مدل معادل دقیق سلول فتوولتائیک ۱۵
- شکل (۶-۲) مدار معادل سلول فتوولتائیک با ترکیب دیودها و صرف نظر از مقاومت موازی ۱۷
- شکل (۷-۲) سلول، ماژول و آرایه ی خورشیدی ۱۸
- شکل (۱-۳) مشخصه ی I-V ماژول خورشیدی BP SX 150S ۲۳
- شکل (۲-۳) تاثیر دما بر مشخصه ی I-V ماژول خورشیدی ۲۴
- شکل (۳-۳) تاثیر دما بر مشخصه ی P-V ماژول خورشیدی ۲۴
- شکل (۴-۳) تاثیر تابش بر مشخصه ی I-V ماژول خورشیدی ۲۵
- شکل (۵-۳) تاثیر تابش بر مشخصه ی P-V ماژول خورشیدی ۲۵
- شکل (۶-۳) اتصال مستقیم یک بار مقاومتی به PV ۲۶
- شکل (۷-۳) فلوجارت الگوریتم P&O ۲۸
- شکل (۸-۳) منحنی P-V در الگوریتم هدایت افزایشی ۲۹
- شکل (۹-۳) الگوریتم IncCon ۳۰
- شکل (۱۰-۳) ساختار شبکه عصبی ۳۲

- شکل (۳-۱۱) نمای کلی سیستم فازی ۳۴
- شکل (۴-۱) مدار معادل مبدل بوست ایده آل ۳۶
- شکل (۴-۲) مبدل بوست در حالت بسته شدن کلید ۳۷
- شکل (۴-۳) مبدل بوست در حالت باز شدن کلید ۳۷
- شکل (۴-۴) الف: ولتاژ سلف ب: جریان سلف ج: جریان دیود د: جریان خازن ۳۸
- شکل (۴-۵) مدار معادل اینورتر تک فاز ۴۱
- شکل (۴-۶) الف: حالت وصل سوئیچ های S1 و S2 ب: حالت وصل سوئیچ های S3 و S4 ۴۱
- شکل (۴-۷) الف: سیستم فازی در حالت متداول ب: سیستم فازی استفاده شده ۴۶
- شکل (۴-۸) توابع عضویت گروه های فازی ورودی اول (E) ۴۸
- شکل (۴-۹) توابع عضویت گروه های فازی ورودی دوم (CE) ۴۸
- شکل (۴-۱۰) توابع عضویت گروه های فازی ورودی سوم (Vpv) ۴۹
- شکل (۴-۱۱) توابع عضویت گروه های فازی خروجی (ΔD) ۴۹
- شکل (۴-۱۲) نمودار تابع هزینه ۵۱
- شکل (۴-۱۳) توابع عضویت گروه های فازی ورودی اول (E) بعد از بهینه سازی ۵۲
- شکل (۴-۱۴) توابع عضویت گروه های فازی ورودی دوم (CE) بعد از بهینه سازی ۵۲
- شکل (۴-۱۵) توابع عضویت گروه های فازی ورودی سوم (Vpv) بعد از بهینه سازی ۵۳
- شکل (۴-۱۶) توابع عضویت گروه های فازی خروجی (ΔD) بعد از بهینه سازی ۵۳
- شکل (۵-۱) مدار معادل کلی سیستم ۵۶
- شکل (۵-۲) سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه با بار اهمی ۵۸
- شکل (۵-۳) ولتاژ خروجی مازول فتوولتائیک ۵۹
- شکل (۵-۴) جریان خروجی مازول فتوولتائیک ۵۹
- شکل (۵-۵) ولتاژ خروجی مبدل بوست با روش P&O ۶۰

- شکل (۶-۵) ریپل ولتاژ خروجی مبدل بوست با روش P&O ۶۰
- شکل (۷-۵) جریان خروجی مبدل بوست با روش P&O ۶۱
- شکل (۸-۵) ریپل جریان خروجی مبدل بوست با روش P&O ۶۱
- شکل (۹-۵) توان خروجی مبدل بوست با روش P&O ۶۲
- شکل (۱۰-۵) ریپل توان خروجی مبدل بوست با روش P&O ۶۲
- شکل (۱۱-۵) ولتاژ خروجی مبدل بوست با روش کنترل فاز-بهینه ۶۳
- شکل (۱۲-۵) ریپل ولتاژ خروجی مبدل بوست با روش کنترل فاز-بهینه ۶۳
- شکل (۱۳-۵) جریان خروجی مبدل بوست با روش کنترل فاز-بهینه ۶۴
- شکل (۱۴-۵) ریپل جریان خروجی مبدل بوست با روش کنترل فاز-بهینه ۶۴
- شکل (۱۵-۵) توان خروجی مبدل بوست با روش کنترل فاز-بهینه ۶۵
- شکل (۱۶-۵) ریپل توان خروجی مبدل بوست با روش کنترل فاز-بهینه ۶۵
- شکل (۱۷-۵) مقایسه توان ردیابی شده توسط روش فاز-بهینه و روش P&O ۶۶
- شکل (۱۸-۵) نمودار تغییرات تابش ۶۷
- شکل (۱۹-۵) توان خروجی مبدل بوست با روش کنترل فاز-بهینه در تابش متغیر ۶۷
- شکل (۲۰-۵) نمودار تغییرات دما ۶۸
- شکل (۲۱-۵) توان خروجی مبدل بوست با روش کنترل فاز-بهینه در دمای متغیر ۶۸
- شکل (۲۲-۵) نمودار تغییرات بار ۶۹
- شکل (۲۳-۵) توان خروجی مبدل بوست با روش فاز-بهینه در تغییرات بار ۶۹
- شکل (۲۴-۵) سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه با کنترل کننده فاز-بهینه ۷۰
- شکل (۲۵-۵) ولتاژ خروجی ماژول فتوولتائیک ۷۴
- شکل (۲۶-۵) جریان خروجی ماژول فتوولتائیک ۷۵
- شکل (۲۷-۵) ولتاژ خروجی مبدل بوست ۷۵

- شکل (۲۸-۵) توان خروجی مبدل بوست ۷۶
- شکل (۲۹-۵) ولتاژ شبکه ۷۶
- شکل (۳۰-۵) جریان مرجع ۷۷
- شکل (۳۱-۵) جریان مرجع به همراه جریان تزریقی به شبکه ۷۷
- شکل (۳۲-۵) ردیابی جریان مرجع توسط جریان تزریقی به شبکه ۷۸
- شکل (۳۳-۵) مقدار خطای ردیابی جریان مرجع توسط جریان تزریقی به شبکه ۷۸
- شکل (۳۴-۵) توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه ۷۹

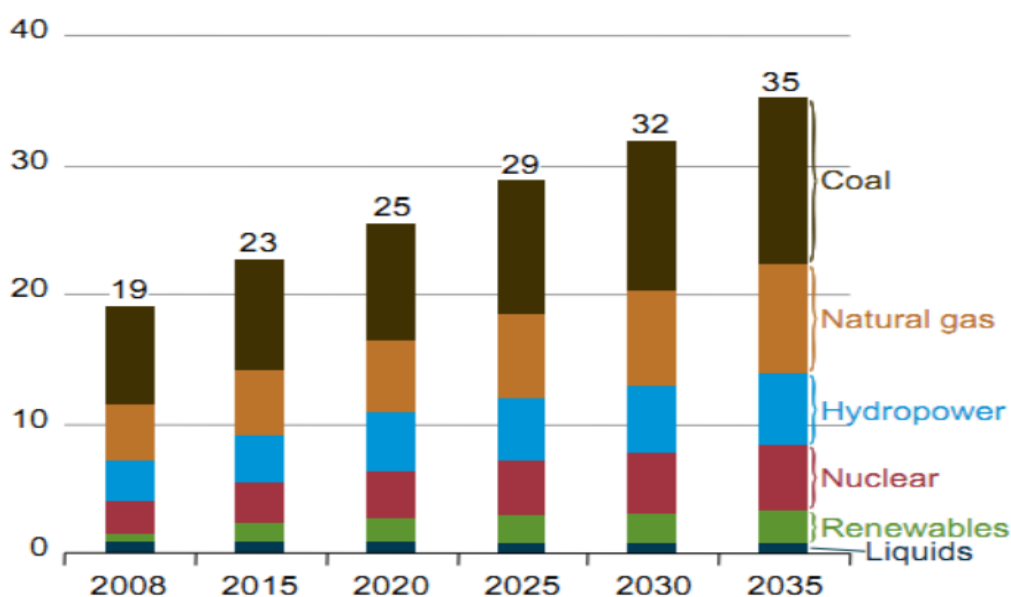
فهرست جداول :

- جدول (۱-۱) رشد استفاده از سلول‌های فتوولتائیک در کشورهای توسعه یافته (بر حسب مگا وات) ۵
- جدول (۲-۱) میزان مصرف انرژی در ایران در بخش‌های مختلف و پیش‌بینی در سال ۲۰۲۱ (بر حسب گیگاوات) ۶
- جدول (۱-۴) قوانین فازی ۵۰
- جدول (۱-۵) اطلاعات فنی ماژول ۵۶
- جدول (۲-۵) پارامترهای ماژول ۵۷
- جدول (۳-۵) نتایج مقایسه بین روش‌های P&O و کنترل فازی و کنترل فازی-بهینه ۶۶
- جدول (۴-۵) پارامترهای کنترل کننده PID در روش حلقه باز ۷۲
- جدول (۵-۵) پارامترهای کنترل کننده PID در روش حلقه بسته ۷۳

۱. فصل اول :

مقدمه

فعالیت‌های بشر پیوسته در حال تغییر شکل زمین و اتمسفر اطراف آن است. تبدیل جنگل‌ها به زمین‌های کشاورزی و یا تخریب آن‌ها برای مقاصد دیگر، پیدایش اثر گلخانه‌ای و همچنین با گسترش صنعت و تکنولوژی و استفاده انبوه و بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی، خطر آلودگی و تخریب محیط زیست روز به روز بشر و این کره خاکی را مورد تهدید قرار می‌دهد. در حال حاضر منابع انرژی فسیلی به عنوان مهم‌ترین و اصلی‌ترین منابع تأمین‌کننده انرژی بشر تلقی می‌گردند. با گذشت زمان مصرف انرژی الکتریکی با توجه به روند رو به رشد جمعیت و صنعتی شدن افزایش پیدا خواهد کرد و بنابراین توان تولیدی واحدهای نیروگاهی باید افزایش یابد. شکل (۱-۱) پیش‌بینی تولید برق در جهان از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۳۵ و سهم هر کدام از روشهای تولید را نشان می‌دهد. با توجه با این شکل افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی موجب افزایش آلودگی زیست محیطی و تولید گازهای گلخانه‌ای شده که مهمترین دلیل گرمایش جهانی است. محدود بودن این منابع، افزایش شدید قیمت آن و آلودگی‌های شدید زیست محیطی، بشر را به فکر جایگزینی برای تأمین انرژی انداخته است که هیچ کدام از مشکلات مذکور را به همراه نداشته باشد [۱].



شکل (۱-۱) پیش‌بینی تولید برق در جهان از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۳۵ [۱]

در حال حاضر مطالعه پیرامون استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین فرآیند جایگزینی انرژی های فسیلی، به شدت در حال گسترش است. منابع زیادی به عنوان انرژی تجدیدپذیر در دسترس هستند از قبیل انرژی خورشیدی، باد، زمین گرمایی، هیدروژن (پیل سوختی) و... اما به نظر میرسد در میان آنها گرایش به سمت انرژی خورشیدی بیشتر باشد. خورشید یک منبع بی پایان انرژی است که همیشه و در همه جای جهان قابل استفاده می باشد. براساس تحقیقات آزمایشگاه ملی انرژی های قابل بازیافت امریکا میزان انرژی خورشیدی که در هر دقیقه به سطح زمین می رسد بیشتر از انرژی است که که توسط انسانها در یک سال مصرف می شود. در این فصل اهمیت انرژی های نو، برنامه توسعه آن و همچنین اجرای طرح های خورشیدی در کشور ایران ارائه شده است.

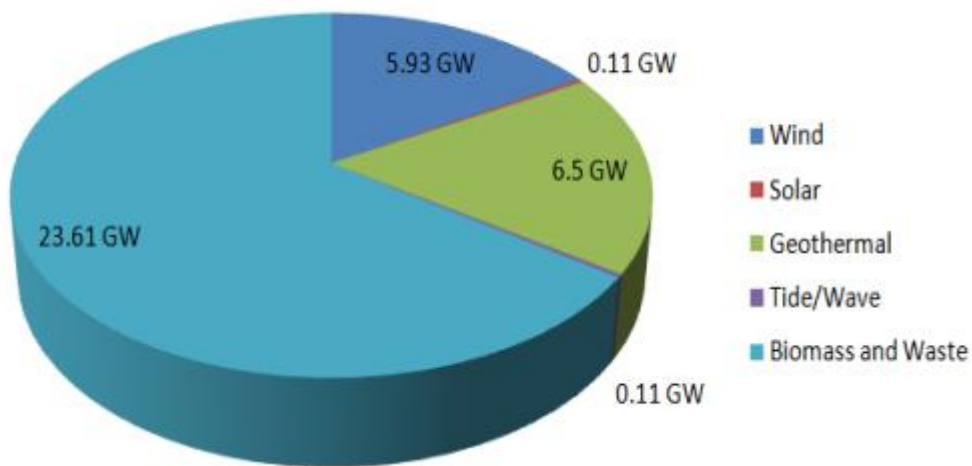
۲-۱ برنامه توسعه انرژی های پاک

در حال حاضر برنامه ریزی های گسترده ای جهت جایگزینی منابع انرژی فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر وجود دارد که یکی از مهمترین این منابع، انرژی خورشیدی می باشد. انرژی خورشیدی منبع اصلی تأمین کننده سایر انرژی هاست. از انرژی خورشیدی برای مصارف مختلفی می توان استفاده نمود. یکی از مهم ترین کاربردهای انرژی خورشیدی تولید برق می باشد. تولید برق به دو روش مستقیم و غیرمستقیم صورت می پذیرد. در روش مستقیم که با استفاده از سیستم های فتوولتائیک (PV)^۱ صورت می پذیرد، انرژی خورشید به طور مستقیم بعد از برخورد به سلول های فتوولتائیک تبدیل به انرژی الکتریسیته می شود ولی در روش غیرمستقیم، ابتدا انرژی خورشیدی تبدیل به انرژی گرمایی شده و سپس انرژی گرمایی تبدیل به انرژی الکتریکی می شود. نیروگاه هایی که به این روش تولید برق می نمایند به نیروگاه های حرارتی خورشیدی (CSP)^۲ موسوم هستند [۲-۳].

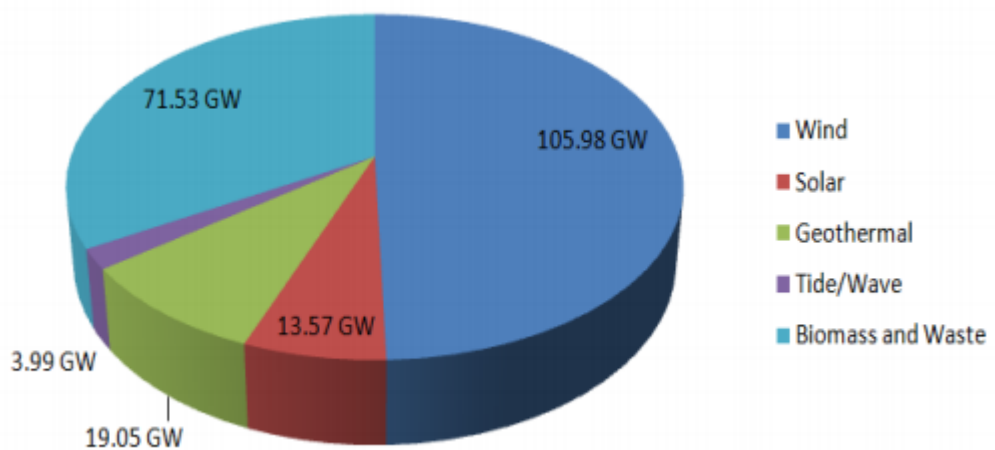
^۱ Photovoltaic

^۲ Concentrating solar power

در شکل های (۲-۱) و (۳-۱) میزان سهم هریک از منابع تجدیدپذیر در تأمین انرژی در سال های ۲۰۰۲ و ۲۰۳۰ با هم مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می شود میزان تولید انرژی از خورشید در سال ۲۰۳۰ تقریباً ۱۲۰ برابر خواهد شد [۴].



شکل (۲-۱) میزان تولید انرژی های پاک سال ۲۰۰۲ [۴]



شکل (۳-۱) پیش بینی تولید انرژی در سال ۲۰۳۰ [۴]

استفاده از سلول‌های فتوولتائیک جهت تأمین برق به جای استفاده از برق حاصل از سوخت‌های فسیلی، در دهه های اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته است. به گونه ای که اکثر کشورهای توسعه یافته سیاست اصلی تولید برق پاک خود را بر همین اساس تنظیم و تدوین کرده اند. جدول زیر رشد استفاده از سلول‌های فتوولتائیک در چند کشور توسعه یافته را نشان می‌دهد [۵].

جدول (۱-۱) رشد استفاده از سلول‌های فتوولتائیک در کشورهای توسعه یافته (بر حسب مگا وات) [۵]

کشور	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	درصد رشد
ایتالیا	۷	۱۳	۱۰۵	۱۸۴	۳۲۲	۱۱۵
هند	۸	۹	۱۷	۳۱	۵۷	۴۸
آمریکا	۱۰۳	۱۴۵	۲۶۱	۴۷۰	۸۴۶	۵۲
چین	۱۲	۱۵	۲۶	۴۳	۷۸	۴۵
ژاپن	۲۹۰	۲۸۷	۳۱۲	۴۶۴	۶۷۳	۱۸
آلمان	۸۶۶	۹۵۳	۱۳۰۰	۱۶۲۵	۱۹۸۳	۱۸
اسپانیا	۲۰	۶۱	۴۵۰	۶۹۸	۱۰۴۶	۱۲۱

۳-۱ انرژی خورشیدی در ایران

امروزه برنامه های بسیار زیادی در جهت ساخت و توسعه نیروگاه های خورشیدی و سایر نیروگاه های تجدیدپذیر تهیه و در حال اجرا می باشد. به عنوان مثال کشورهای عضو اتحادیه اروپا برنامه ریزی جهت تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را با استفاده از انرژی های تجدیدپذیر به خصوص انرژی خورشیدی آغاز نموده اند. مصرف انرژی در ایران نیز مانند سایر نقاط جهان در حال افزایش است و متأسفانه بر خلاف بسیاری از کشورهای جهان در روند افزایش و نوع مصرف انرژی از الگوی مناسبی برخوردار نمی باشد. در جدول زیر میزان مصرف انرژی در بخش های مختلف از سال ۱۹۷۶ الی ۲۰۰۶ میلادی آورده شده است [۶]. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین میزان مصرف انرژی در ایران مربوط به بخش خانگی و تجاری بوده و بر خلاف آمار جهانی که بخش صنعت رتبه اول را دارا می باشد، این بخش در ایران بعد از مصارف خانگی و حمل و نقل قرار دارد. با توجه به پتانسیل بالای انرژی خورشیدی و قابلیت بسیار زیاد استفاده از آن در مصارف خانگی می‌توان با جایگزینی انرژی

خورشیدی از انرژی فسیلی در جهت بهتری استفاده کرد. کشور ایران در بین مدارهای ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی قرار گرفته است و در منطقه ای واقع شده که به لحاظ دریافت انرژی خورشیدی در بین نقاط جهان در بالاترین رده ها قرار دارد. میزان تابش خورشیدی در ایران بین ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات ساعت بر متر مربع در سال تخمین زده شده است که البته بالاتر از میزان متوسط جهانی است. در ایران به طور متوسط سالیانه بیش از ۲۸۰ روز آفتابی گزارش شده است که بسیار قابل توجه است.

جدول (۲-۱) میزان مصرف انرژی در ایران در بخش های مختلف و پیش بینی در سال ۲۰۲۱ (بر حسب گیگاوات) [۶]

سال	۱۹۶۷	۱۹۷۲	۱۹۷۷	۱۹۸۲	۱۹۸۷	۱۹۹۲	۱۹۹۶	۲۰۰۶	۲۰۲۱	نوع مصرف
خانگی و تجاری	۲۱	۳۳	۶۱	۸۴	۱۱۱	۱۶۶	۲۲۰	۴۲۶/۷	۷۳۶/۷۵	
صنعت	۱۴	۲۵	۵۶	۷۲	۹۰	۱۳۳	۱۶۰	۱۹۷/۵	۵۲۶/۱	
حمل و نقل	۱۳	۲۲	۵۷	۵۰	۸۵	۱۱۱	۱۴۷	۲۷۰/۴	۳۵۵/۶	
کشاورزی	۳	۵	۱۲	۱۷	۲۷	۳۳	۳۳	۳۶/۸	۱۳۳/۹	
سایر	۲۴	۲۶	۵۴	۶۳	۱۰۰	۱۳۸	۱۷۹	۷۰/۵	۱۸۳/۲	

۴-۱ بیان مسأله

با توجه به مشخصه غیرخطی جریان- ولتاژ سلول خورشیدی، برای بهره برداری بهینه از آن نیاز است که حداکثر توان خروجی در هر لحظه ردیابی شود. روش های متفاوتی برای ردیابی حداکثر توان وجود دارد که یکی از این روش ها، استفاده از مبدل بوست برای ایجاد تثبیت توان ماکزیمم است. مبدل بوست با توجه به سیگنال کنترلی که از کنترل کننده دریافت می کند، عمل ردیابی را انجام می دهد. در این پایان نامه قصد داریم که یک کنترل کننده فازی جهت ردیابی نقطه حداکثر توان طراحی کنیم و سپس توسط الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات کنترل فازی طراحی شده را بهینه نماییم. کنترل فازی-بهینه طراحی شده عملکرد مناسبی در مقابل تغییرات دما و تابش دارد و دارای کمترین ریپل حول نقطه حداکثر توان می باشد. در ادامه از کنترل فازی-بهینه طراحی شده برای پیاده سازی

سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه استفاده می کنیم تا حداکثر توان تولیدی را بعد از هم گام سازی به شبکه تزریق نماییم.

۵-۱ پیشینه تحقیق

از روش های ردیابی حداکثر توان که طی سال های گذشته ارائه شده است، می توان به موارد زیر اشاره کرد :

روش آشفتن و مشاهده که اجرای آسان و الگوریتم کنترلی نسبتا ساده دارد و از معایب آن عدم ردیابی دقیق تحت تغییرات سریع دما و تابش خورشید و نوسان حول نقطه حداکثر توان می باشد [۷]. در مقاله [۸] از الگوریتم دو مرحله ای آشفتن و مشاهده برای ردیابی سریع تر و پالایش ردیابی استفاده شده است. روش هدایت افزایشی که از صفر بودن شیب منحنی توان در نقطه حداکثر توان استفاده نموده و با مقایسه کنداکتانس لحظه ای و کنداکتانس افزایشی ردیابی حداکثر توان را انجام می دهد. در مقاله های [۹-۱۰] از الگوریتم دو مرحله ای هدایت افزایشی برای ردیابی دقیق و نزدیک کردن نقطه عملکرد به حداکثر توان استفاده شده است و همچنین در مقاله های [۱۱-۱۲] با استفاده از کنداکتانس لحظه ای و افزایشی سیگنال خطا ایجاد شده و توسط کنترل کننده PI خطا به سمت صفر میل نموده و ردیابی حداکثر توان انجام می گیرد. در مقاله [۱۳] از روش کنترل وابسته به ریپل برای ردیابی حداکثر توان استفاده شده است که از ریپل ذاتی سیستم برای ردیابی حداکثر توان بهره می گیرد. در مقاله [۱۴] از روش ولتاژ مدار باز جزئی برای ردیابی حداکثر توان استفاده شده است که با بهره گیری از ولتاژ دیود پیوندگاه و کنترل حلقه بسته مبدل ردیابی انجام می شود. این روش تلفات توان زودگذر را به همراه دارد. در مقاله [۱۵] از روش جریان اتصال کوتاه جزئی برای ردیابی حداکثر توان استفاده شده است. در این روش یک کلید به مبدل توان اضافه می شود که باعث افزایش هزینه می گردد. در مقاله [۱۶] از روش شبکه عصبی برای ردیابی حداکثر توان استفاده شده است که

عملکرد مناسب این روش به چگونگی تحلیل شبکه عصبی و الگوریتم استفاده شده در لایه پنهان بستگی دارد. در مقاله های [۱۷-۱۸] از روش کنترل فازی برای ردیابی حداکثر توان استفاده شده است. مقاوم بودن در مقابل تغییرات تابش و دما و کارکردن با ورودی های غیردقیق و غیرخطی و کمترین نوسان در نقطه حداکثر توان از مزایای آن می باشد.

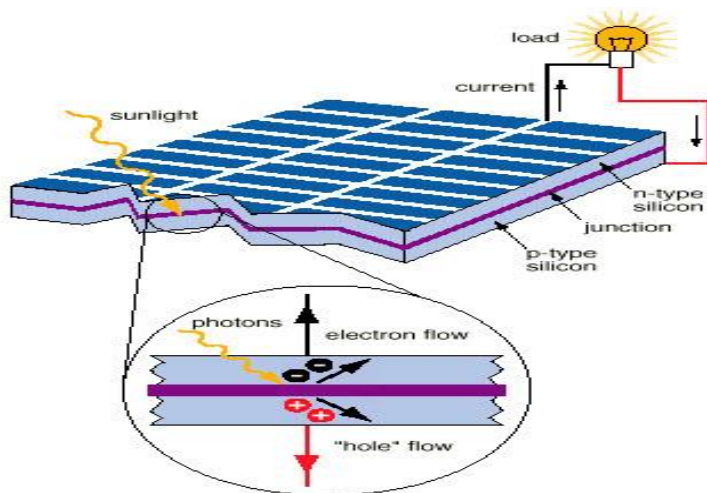
۶-۱ ساختار پایان نامه

همان گونه که دیده شد، در فصل اول به معرفی انرژی خورشیدی و لزوم استفاده از آن پرداختیم. در فصل دوم به معرفی سیستم های فتوولتائیک، کاربردها و مزایای آن می پردازیم. در فصل سوم به پژوهش های انجام شده در زمینه ردیابی نقطه حداکثر توان در سیستم های فتوولتائیک اشاره خواهد شد. در فصل چهارم روند طراحی کنترل کننده فازی بهینه سازی شده برای ردیابی نقطه حداکثر توان بیان می شود. در فصل پنجم نتایج شبیه سازی سیستم فتوولتائیک در حالت مستقل از شبکه و متصل به شبکه تحلیل خواهند شد.

۲. فصل دوم :

سیستم های فتوولتائیک

انرژی خورشیدی یکی از مهم‌ترین منابع انرژی است که رایگان، تمام نشدنی و بدون آلودگی و نویز می‌باشد. عبارت فتوولتائیک "Photovoltaic" ترکیبی از کلمه یونانی "Photos" به معنی نور و "Volt" به معنای تولید الکتریسیته از نور است [۱۹]. سلول خورشیدی یک نیمه هادی با اتصال p-n تحت تابش است که یک جریان مستقیم متناسب با شرایط آب و هوایی تولید می‌کند. با قرار دادن نیمه هادی در مقابل تابش خورشید، بارهای الکتریکی مثبت و منفی (الکترون و حفره) در نیمه هادی به وجود می‌آید و بر اثر میدان الکتریکی داخل سلول خورشیدی این بارها از یکدیگر جدا می‌شوند. از آنجایی که تعداد الکترون‌ها زیاد است، در نتیجه عدم توازن بار بین سطوح جلویی و سطوح عقبی یک پتانسیل ولتاژ شبیه قطب‌های مثبت و منفی یک باتری ایجاد می‌کند که باعث تولید جریان الکتریکی می‌شود [۲۰]. فرآیند تبدیل انرژی در یک سلول خورشیدی در شکل زیر مشاهده می‌شود.



شکل (۱-۲) نحوه ی تبدیل انرژی در سلول خورشیدی

سیستم‌های فتوولتائیک یکی از سیستم‌های تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی می‌باشد که قطعات متحرک نداشته و طول عمر بالایی دارد. همچنین در مقایسه با سایر سیستم‌های انرژی خورشیدی تعمیر و نگهداری کمتری نیاز دارند. اما دارای بازده نسبتاً پایین و تقریباً گران قیمت هستند. با وجود مزایا و معایب این سیستم‌ها، استفاده از آن‌ها در سال‌های اخیر روند روبه‌رشدی

داشته است. در این فصل ساختمان کلی این سیستم ها، اجزاء تشکیل دهنده آن به ویژه مدار معادل ماژول فتوولتائیک، مشخصه ماژول و تکنولوژی آن ارائه گردیده است.

۲-۲ تعریف سیستم های برق خورشیدی فتوولتائیک

به پدیده هایی که در اثر آن و بدون استفاده از مکانیزم های مکانیکی، انرژی تابشی به انرژی الکتریکی تبدیل شود پدیده فتوولتائیک گفته می شود. این پدیده بر فرضیه ذره ای بودن انرژی تابشی بنا شده است. هر سیستمی نیز که از این خاصیت استفاده نماید، سیستم فتوولتائیک نام دارد [۲۱].

بخش های اصلی یک سیستم فتوولتائیک عبارتند از :

- ۱- ماژول یا پنل های خورشیدی که مبدل انرژی تابشی خورشید به انرژی الکتریکی می باشد .
 - ۲- قسمت واسطه یا بخش توان مطلوب ، انرژی الکتریکی حاصل از سیستم های فتوولتائیک را بر اساس طراحی انجام شده ، متناسب با نیاز مصرف کننده، مدیریت و القا می نماید.
 - ۳- مصرف کننده یا بار الکتریکی: کلیه مصرف کنندگان الکتریکی اعم از مصارف برق مستقیم و متناوب را متناسب با میزان مصرف شامل می گردد .
- سیستم های فتوولتائیک یکی از پر مصرف ترین کاربرد انرژی های نو می باشند و تا کنون سیستم های گوناگونی با ظرفیت های مختلف (۵/۰ وات تا چند مگا وات) در سراسر جهان نصب و راه اندازی شده است و با توجه به قابلیت اطمینان و عملکرد این سیستم ها هر روزه بر تعداد متقاضیان آنها افزوده می شود.

۳-۲ مزایا و معایب سیستم های فتوولتائیک

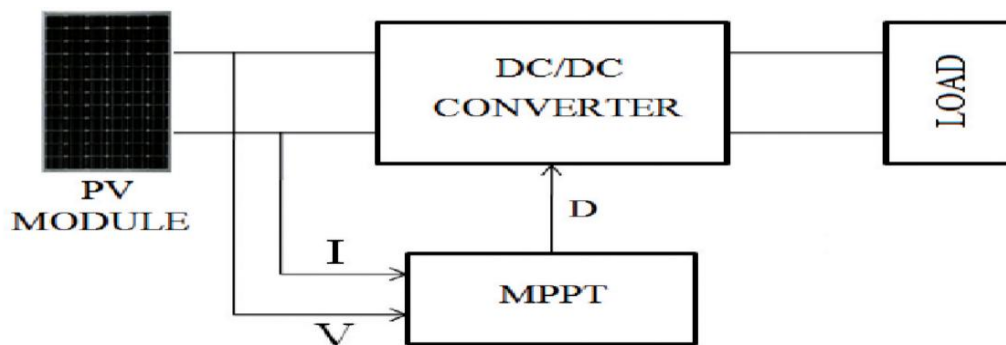
تجدیدپذیر بودن، عدم آلودگی محیط زیست ، قابلیت اطمینان بالا، عمر طولانی (حدوداً ۲۰ سال)، حمل و نقل آسان و امکان نصب سریع ، عدم نیاز به خدمات نگهداری دوره ای، عدم نیاز به سوخت ، تولید انرژی الکتریکی بدون چرخش مکانیکی (بدون صدا و استهلاک)

از محدودیت های اصلی سیستم های فتوولتائیک می توان به هزینه اولیه زیاد، راندمان کم، وابستگی شدید و غیرخطی آن ها به دو فاکتور میزان تابش نورخورشید و دمای محیط اشاره کرد.

۴-۲ ساختار سیستم فتوولتائیک

دو ساختار اصلی در سیستم فتوولتائیک وجود دارد که شامل سیستم مستقل از شبکه و سیستم متصل به شبکه می باشد. همانطور که از نام سیستم مستقل برمی آید، این سیستم بصورت غیروابسته به هرمنبع قدرت دیگری عمل می کند. سیستم مستقل از شبکه معمولاً برق مورد نیاز بارهای مشخص را تأمین می کند. در مقابل سیستم متصل به شبکه به صورت موازی با شبکه توزیع برق عمل می کند. این سیستم می تواند انرژی الکتریکی را به شبکه تزریق و یا بارهایی که متصل به شبکه هستند تغذیه نماید [۲۲]. همچنین می توان برای بالابردن قابلیت اطمینان شبکه از دیزل ژنراتور به عنوان سیستم پشتیبان و یا از انرژی باد استفاده نمود. این سیستم ها به سیستم های هیبرید معروف هستند. سیستم های هیبریدی می توانند در هر دو حالت مستقل از شبکه و متصل به شبکه عمل کنند.

۵-۲ سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه (Stand Alone)

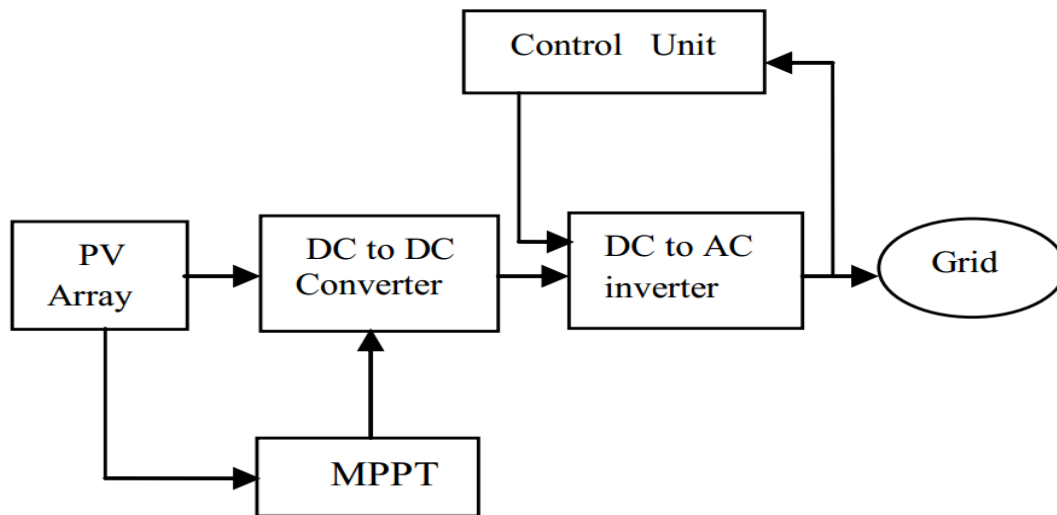


شکل (۲-۲) نمای کلی سیستم مستقل از شبکه

سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه از ماژول فتوولتائیک و مبدل بوست و سیستم ردیابی حداکثر توان و مصرف کننده الکتریکی تشکیل شده است. تأمین انرژی الکتریکی ایستگاه های مخابراتی و تلویزیونی، خانه های مسکونی، چادرهای عشایری، کلبه های روستایی و به طور کلی رفع

نیاز انرژی الکتریکی مناطقی که فاقد شبکه سراسری برق می باشند، برخی از کاربردهای سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه می باشد.

۶-۲ سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه (Grid Connected)



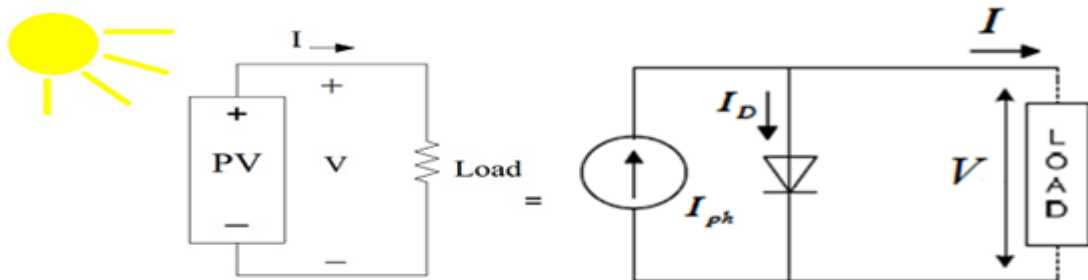
شکل (۲-۳) نمای کلی سیستم متصل به شبکه

سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه از مازول فتوولتائیک و مبدل بوست و سیستم ردیابی حداکثر توان و اینورتر جهت اتصال به شبکه برق سراسری، تشکیل شده است. در این روش انرژی الکتریکی حاصل از سیستم فتوولتائیک با استفاده از اینورترهای متصل به شبکه ضمن تغییر شکل و تطبیق سطح ولتاژ و فرکانس انرژی الکتریکی حاصل از سیستم فتوولتائیک، با مشخصات سطح ولتاژ، اختلاف فاز، فرکانس، و ... به شبکه سراسری برق تزریق می گردد. با استفاده از نیروگاه های فتوولتائیک متصل به شبکه سراسری به صورت متمرکز و یا غیر متمرکز به دلیل تزریق ولتاژ و جریان مانع افت ولتاژ شبکه توزیع گردیده و در نتیجه از فشار بر روی نیروگاه ها در طی روز جلوگیری می کند. این امر به معنی این است که هر مشترک شبکه سراسری برق، با نصب سیستم متصل به شبکه، خود به

عنوان یک تولید پراکنده کوچک (DG^۱) می‌تواند به صورت نیروگاهی کوچک عمل نماید. در این روش علاوه بر تامین بخشی از انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف کننده، انرژی الکتریکی (مازاد بر مصرف) به شبکه سراسری برق تزریق می‌شود.

۷-۲ ماژول فتوولتائیک

مطابق شکل زیر یک سلول فتوولتائیک اساساً از یک منبع جریان با دیود موازی تشکیل شده است. منبع جریان بیان گر جریان تولید شده توسط سلول فتوولتائیک به سبب فتون های دریافت شده است. این منبع جریان تحت تابش و دمای ثابت بدون تغییر است. دو پارامتر که اغلب یک سلول فتوولتائیک را با آن توصیف می کنند جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز است.



شکل (۴-۲) مدار معادل سلول فتوولتائیک

$$I = I_{ph} - I_d \quad (۱-۲)$$

I_{ph} جریانی معادل جریان تولید شده از فتون های دریافتی و I_d جریان گذرنده از دیود موازی است. جریان دیود با توجه به معادله شاکلی تعیین می گردد [۲۳-۲۴-۲۵].

$$I_d = I_o * (e^{q*V_d/(k*T)} - 1) \quad (۲-۲)$$

I_o جریان اشباع معکوس دیود، V_d ولتاژ دوسر دیود، k ثابت بولتزمن و q بار الکتریکی و T دمای پیوند برحسب کلوین می باشد.

^۱ Distributed Generation

با ترکیب معادله جریان دیود با معادله جریان خروجی سلول فتوولتائیک داریم:

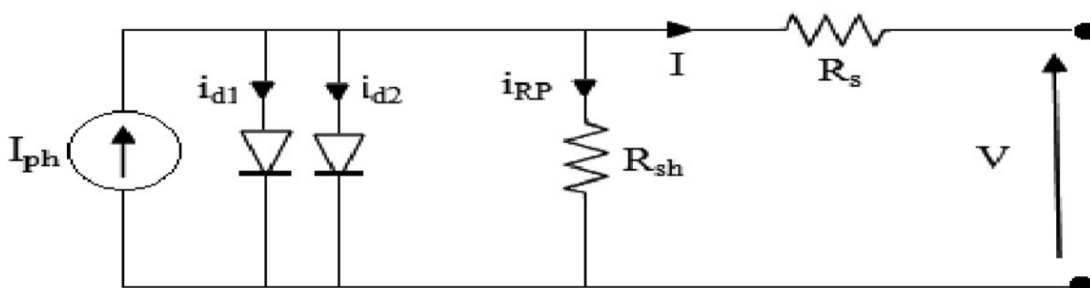
$$I = I_{ph} - I_o * (e^{q*V/(k*T)} - 1) \quad (3-2)$$

V ولتاژ دوسر سلول و I جریان خروجی است. با در نظر گرفتن جریان بی باری $I=0$ ، جریان اشباع معکوس دیود محاسبه خواهد شد.

$$0 = I_{ph} - I_o * (e^{q*V/(k*T)} - 1) \quad (4-2)$$

$$I_o = \frac{I_{ph}}{(e^{q*V/(k*T)} - 1)} \quad (5-2)$$

در مدل بالا از برخی پارامترها چشم پوشی شد. برای تشکیل یک مدل دقیق باید همانند شکل زیر مقاومت سری، مقاومت موازی و دیود دیگری در نظر بگیریم. مقاومت سری، مقاومت های مسیر عبور جریان از نیمه هادی و اتصالات را شامل می شود. اندازه مقاومت سری در تعداد سلول هایی که به صورت سری به یکدیگر متصل شده اند ضرب می شود. مقاومت موازی بیانگر تلفاتی است که ناشی از مقدار ناچیز نشتی جریان در مسیر موازی یا مصرف کننده است. این مقاومت بر خلاف مقاومت سری قابل ملاحظه نیست زیرا اثر آن ناچیز است، مگر اینکه تعدادی مازول موازی در یک سیستم بزرگ به یکدیگر متصل باشند. در ناحیه تخلیه در سلول فتوولتائیک مسیر موازی جریان غیرمقاومتی را می توان با استفاده از دیود دوم مدل کرد.



شکل (۵-۲) مدل معادل دقیق سلول فتوولتائیک

با در نظر گرفتن همه پارامترها معادله جریان سلول فتوولتائیک به صورت زیر خواهد بود:

$$I = I_{ph} - I_{o1} * \left(e^{q*(V+I*Rs)/(k*T)} - 1 \right) - I_{o2} * \left(e^{q*(V+I*Rs)/(2*k*T)} - 1 \right) - \frac{(V + I * R_s / R_{sh})}{(6-2)}$$

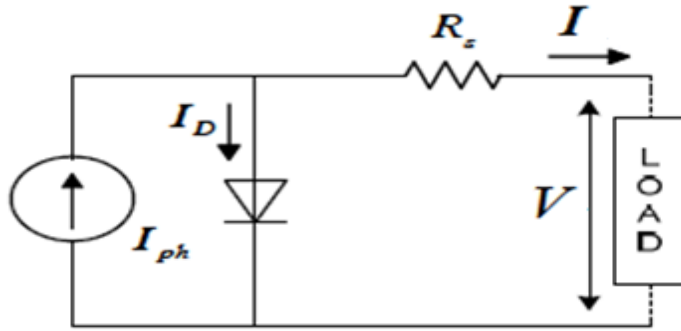
جریان هر دو دیود با یکدیگر ترکیب شده و معادله را ساده می کند.

$$I = I_{ph} - I_o * \left(e^{q*(V+I*Rs)/(n*k*T)} - 1 \right) - (V + I * R_s / R_{sh}) \quad (7-2)$$

در این معادله n ضریب ایده آل دیود است که مقداری بین ۱ تا ۲ را اختیار می کند. به دلیل اینکه سلول فتوولتائیک ولتاژ خروجی کمتر از یک ولت را تولید می کند برای دستیابی به ولتاژ مورد نظر تعداد مشخصی از سلول ها را با یکدیگر سری می کنند. معمولا ۳۶ سلول سری، ولتاژ کافی برای شارژ یک باتری ۱۲ ولت و ۷۲ سلول سری ولتاژ کافی برای شارژ یک باتری ۲۴ ولت را فراهم می کند. همچنین ولتاژ خروجی می تواند توسط یک مبدل $DC-DC$ تنظیم شده و باتری هایی با هر سطح ولتاژ را شارژ کند. اثر مقاومت موازی برای تعداد اندک ماژول فتوولتائیک ناچیز است. بنابراین از مقاومت موازی ($R_{sh} = \infty$) صرف نظر می کنیم. در نتیجه معادله جریان به صورت زیر خواهد بود:

$$I = I_{ph} - I_o * \left(e^{q*(V+I*Rs)/(n*k*T)} - 1 \right) \quad (8-2)$$

در معادله فوق همه پارامترها همان مقدار قبلی را حفظ می کند، فقط پارامتر V که باید بر تعداد سلول های سری تقسیم شود. مدار معادل سلول فتوولتائیک با ترکیب دیودها و صرف نظر از مقاومت موازی مطابق شکل زیر است.



شکل (۶-۲) مدار معادل سلول فتوولتائیک با ترکیب دیودها و صرف نظر از مقاومت موازی

جریان اتصال کوتاه در دمای T با توجه به معادله زیر تعیین می گردد:

$$I_{ph}(T) = I_{phref}(T_{ref}) * (1 + a * (T - T_{ref})) \quad (۹-۲)$$

در این معادله I_{phref} در دمای T_{ref} با توجه به دیتاشیت (تحت تابش ۱۰۰۰ وات برمترمربع) و a ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه بر حسب درصد تغییر به ازای هر درجه است. جریان تولید شده توسط سلول رابطه مستقیم با تابش دارد و جریان اتصال کوتاه در دیتاشیت تحت شرایط استاندارد آزمایش یعنی $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$ به دست می آید. بنابراین جریان تولید شده در سطح تابش G (W/m^2) به صورت زیر است:

$$I_{ph}(G) = I_{phref}(G_0) * (G/G_0) \quad (۱۰-۲)$$

جریان اشباع معکوس دیود I_0 در دمای مرجع در معادل (۵-۲) بیان شد. جریان اشباع معکوس وابسته به دما است. با استفاده از معادله زیر این جریان در دمای T به دست می آید.

$$I_0(T) = I_0(T_{ref}) * (T/T_{ref})^{3/n} * e^{-\left(\frac{q*E_g}{n*k}\right) * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)} \quad (۱۱-۲)$$

ضریب کیفیت دیود (n) مقداری بین ۱ تا ۲ دارد. برای محاسبه R_s داریم:

$$dI = 0 - I_0 * \left(q * \frac{dv + dI * R_s}{n * k * T} \right) * \left(e^{q(V + I * R_s) / (n * k * T)} \right) \quad (۱۲-۲)$$

$$R_s = -\frac{dI}{dv} - \frac{n \cdot k \cdot T / q}{I_0 \cdot e^{\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}\right)}} \quad (13-2)$$

مقدار $\left(-\frac{dI}{dv}\right)$ با استفاده از مشخصه ولتاژ-جریان ماژول فتوولتائیک منتشر شده در دیتاشیت محاسبه می‌شود. حال معادله (۷-۲) با استفاده از روش نیوتن حل می‌شود:

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (14-2)$$

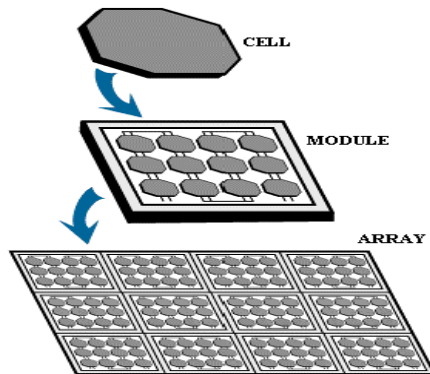
$f'(X_n)$ مشتق تابع $f(X_n) = 0$ و X_n مقدار فعلی پارامتر و X_{n+1} مقدار بعدی پارامتر است. حال معادله (۷-۲) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$f(I) = I_{ph} - I - I_0 \cdot \left(e^{q \cdot (V + I \cdot R_s) / (n \cdot k \cdot T)} - 1 \right) = 0 \quad (15-2)$$

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_n - I_0 \cdot \left(e^{q \cdot (V + I_n \cdot R_s) / (n \cdot k \cdot T)} - 1 \right)}{-1 - I_0 \cdot \left(\frac{q \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T} \right) \cdot e^{q \cdot (V + I_n \cdot R_s) / (n \cdot k \cdot T)}} \quad (16-2)$$

۸-۲ آرایه فتوولتائیک

سلول‌های فتوولتائیک به صورت الکتریکی در مدارهای سری و موازی متصل می‌شوند تا ولتاژ و جریان بیشتری تولید کنند. به مجموعه‌ای از این سلول‌ها که در کنار یکدیگر بر اساس طرح‌های هر شرکت سازنده در یک لایه حفاظت شده از نظر محیطی، سری و موازی می‌گردند و بلوک ساختمان اولیه یک واحد مولد فتوولتائیک را تشکیل می‌دهند، پنل یا ماژول فتوولتائیک گویند و مجموعه این



پنل‌ها آرایه خورشیدی عنوان می‌گردد [۲۱].

شکل (۷-۲) سلول، ماژول و آرایه‌ی خورشیدی

۹-۲ تجهیزات کنترل توان

بخش توان مطلوب انرژی الکتریکی حاصل از سیستم های فتوولتائیک را بر اساس طراحی انجام شده، متناسب با نیاز مصرف کننده ، مدیریت و القا می نمایند. تجهیزات کنترل توان نقش مهمی در سیستم های فتوولتائیک دارند زیرا وظیفه این بخش انتقال یا ذخیره سازی انرژی است. این تجهیزات عمدتاً از مبدل DC_DC و اینورتر تشکیل می شوند. وظیفه مبدل DC_DC کنترل نقطه کار ماژول فتوولتائیک می باشد. همچنین در صورت اتصال به شبکه یا تغذیه بار الکتریکی متناوب از اینورتر استفاده می شود. برای کلیدزنی از ادوات الکترونیک قدرت در مبدل DC_DC و همچنین برای پیدا کردن نقطه کار بهینه ماژول فتوولتائیک از کنترل کننده یا ردیاب نقطه حداکثر توان استفاده می شود. توسط این سیستم کنترلی با توجه به شرایط آب و هوایی (شدت تابش و دما) کلیدزنی مناسب صورت می پذیرد.

۳. فصل سوم :

ردیابی نقطه حداکثر توان در

سیستم های فتوولتائیک

یکی از موضوعات مهم در دهه اخیر در خصوص به کارگیری ماژول های فتوولتائیک، تکنیک ردیابی نقطه حداکثر توان (mppt^۱) است. این تکنیک در سیستم های فتوولتائیک روشی موثر برای دریافت بیشترین توان ممکن از ماژول فتوولتائیک است. یک ردیاب نقطه‌ی ماکزیمم توان در عمل یک مبدل الکترونیک قدرت است که طوری روی آن سوئیچ زنی صورت می‌گیرد تا همواره به ازای تغییرات شرایط محیطی و بار، نقطه‌ی ماکزیمم توان تعقیب گردد و فتوولتائیک همواره در شرایط توان ماکزیمم خود قرار داشته باشد و بتواند حداکثر توان خود را در هر لحظه به بار برساند. مشاهده می‌شود با استفاده از mppt می‌توان راندمان دستگاه را بالاتر برد و از نظر اقتصادی و راندمان بالا نیز به صرفه است. بررسی ماژول های خورشیدی نشان می‌دهد که مشخصه جریان- ولتاژ ماژول ها به شدت غیر خطی بوده و تابعی از دمای سلول، شدت نور تابشی، طول عمر و مشخصه بار می باشند. به ازای دما و شدت نور خاصی، تنها یک نقطه کار در مشخصه وجود دارد که حداکثر توان را ایجاد می نماید. از این رو در اکثر سیستم های فتوولتائیک جهت تطبیق بار با آرایه خورشیدی به منظور جذب حداکثر توان، یک مبدل سوئیچینگ میان آرایه و بار قرار می گیرد.

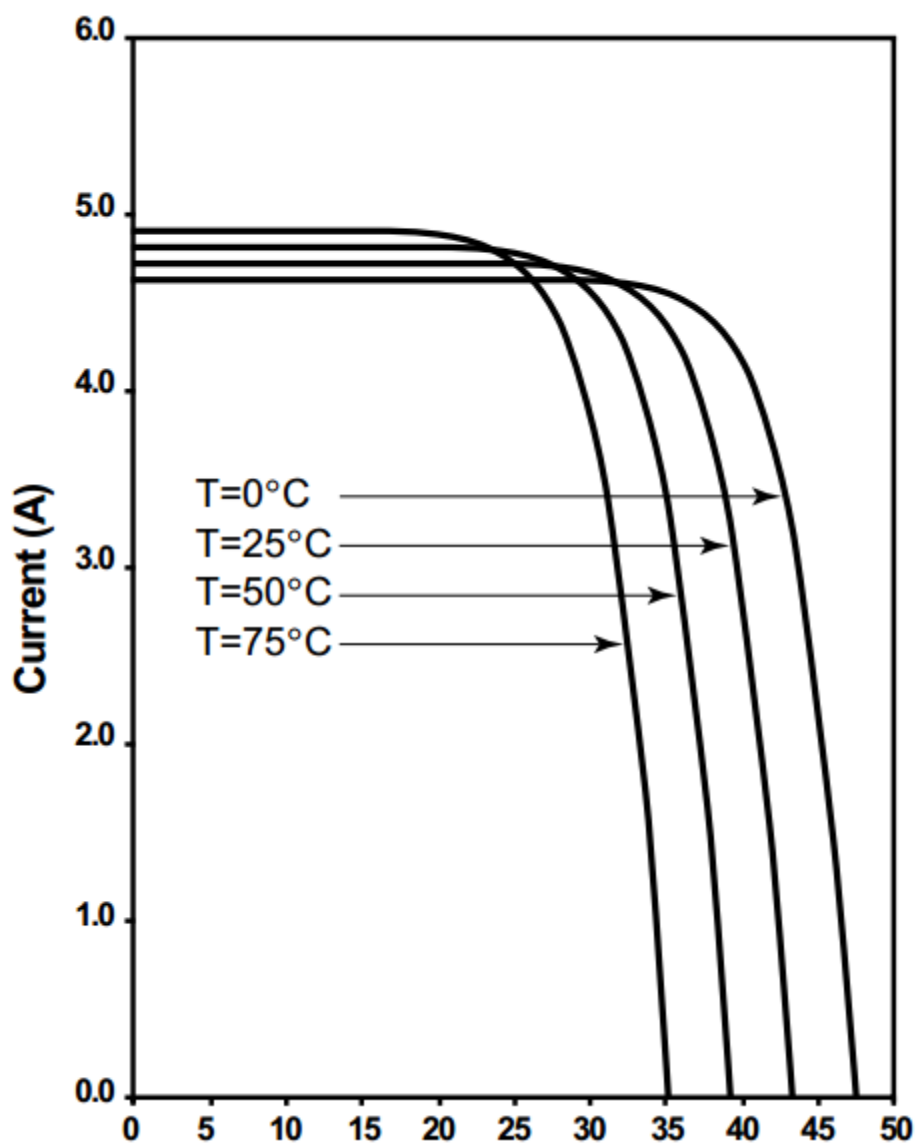
۲-۳ مشخصه ماژول فتوولتائیک

مشخصه سلول فتوولتائیک تحت تاثیر تابش نور خورشید و همچنین دمای کاری آن است. در دمای ثابت اگر میزان تابش افزایش یابد به دنبال آن توان خروجی افزایش می یابد. از طرف دیگر اگر میزان تابش ثابت باشد و دما کاهش یابد، توان خروجی زیاد می‌شود. در واقع توان خروجی ماژول فتوولتائیک با شدت تابش خورشید رابطه مستقیم و با دمای کاری سلول فتوولتائیک رابطه معکوس دارد [۲۶].

^۱ Maximum power point tracking

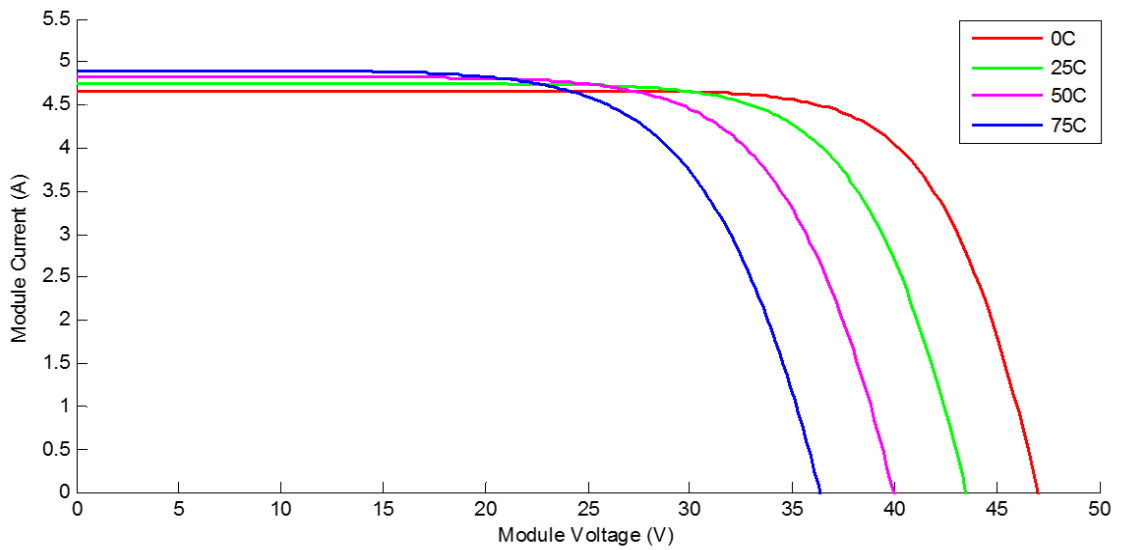
مشخصه ی I-V ماژول خورشیدی مدل BP SX 150S که برای شبیه سازی مورد استفاده قرار

گرفته است به صورت زیر می باشد [۴۰]:

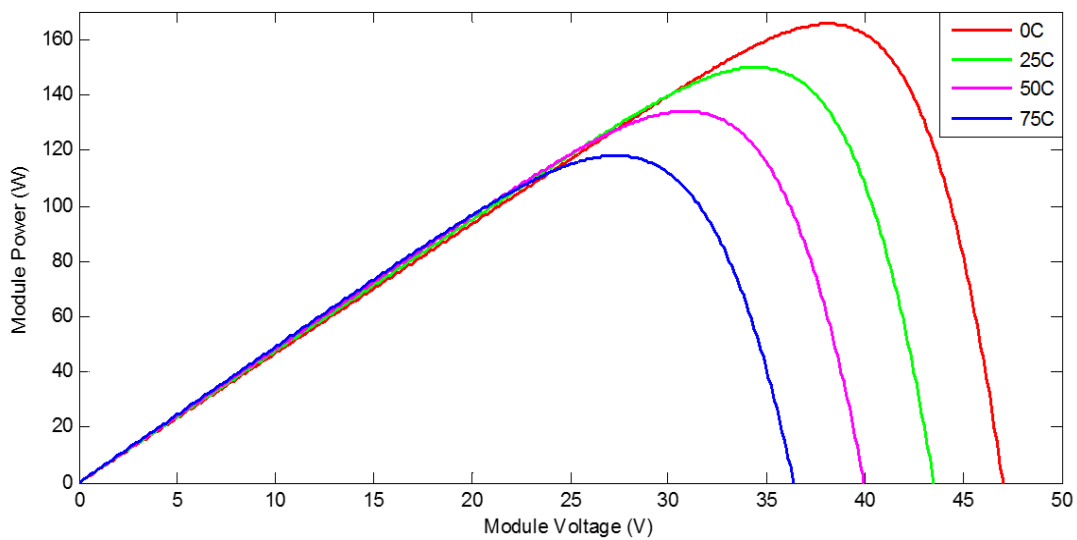


شکل (۱-۳) مشخصه ی I-V ماژول خورشیدی BP SX 150S [۴۰]

دمای کار : با تغییر دمای کار سلول خورشیدی منحنی $I-V$ آن نیز تغییر می کند، به این صورت که با افزایش دما، ولتاژ مدار باز و توان خروجی سلول کاهش پیدا می کند در حالی که جریان اتصال کوتاه آن افزایش می یابد. شکل های زیر بیانگر این مساله می باشند.

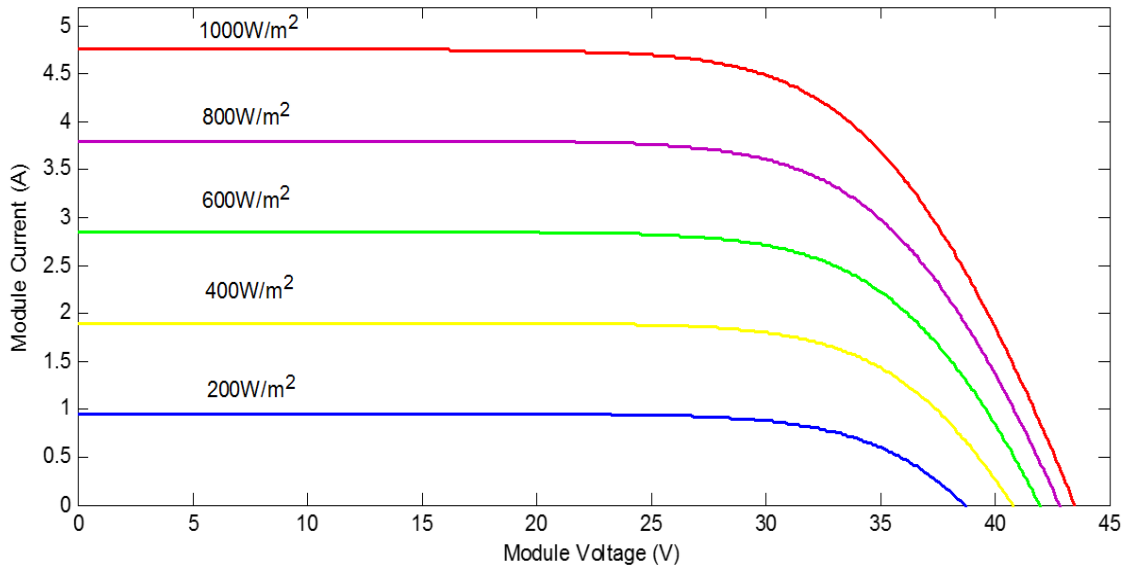


شکل (۲-۳) تاثیر دما بر مشخصه ی $I-V$ ماژول خورشیدی

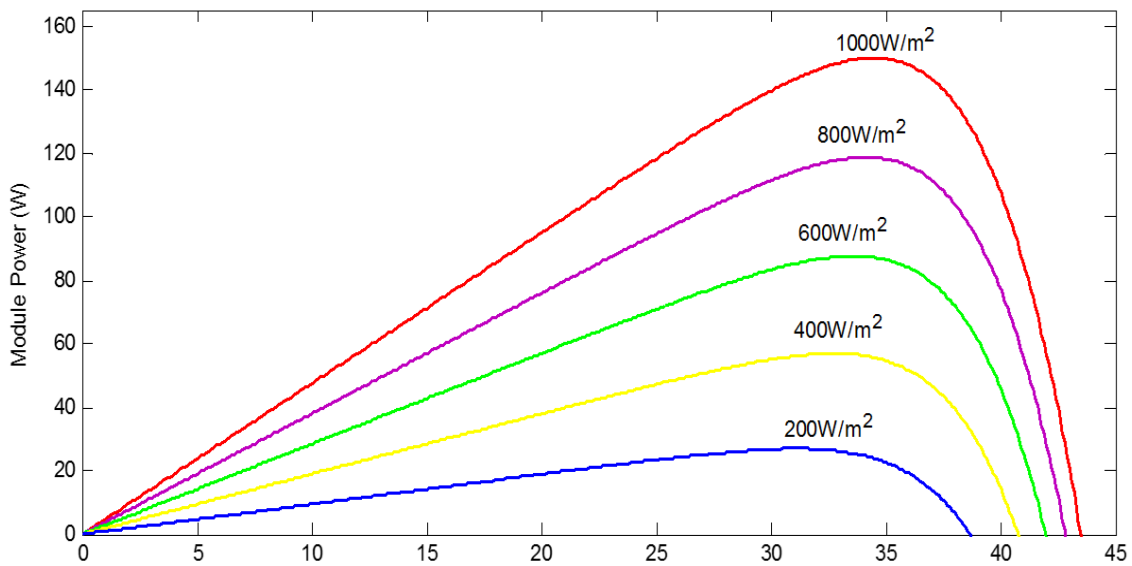


شکل (۳-۳) تاثیر دما بر مشخصه ی $P-V$ ماژول خورشیدی

میزان تابش : میزان جریان خروجی PV به طور مستقیم با تابش بر واحد سطح آن رابطه دارد و به تبع آن توان خروجی PV نیز متأثر از این پارامتر خواهد بود. شکل های زیر بیانگر تاثیر تابش بر خروجی PV می باشند.



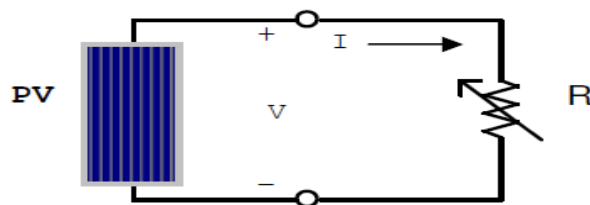
شکل (۴-۳) تاثیر تابش بر مشخصه ی I-V ماژول خورشیدی



شکل (۵-۳) تاثیر تابش بر مشخصه ی P-V ماژول خورشیدی

۳-۳ تکنیک ردیابی نقطه حداکثر توان

سلول‌های خورشیدی به خاطر طبیعت غیرخطی که دارند، منحنی‌های ولتاژ-توان و ولتاژ-جریان آن‌ها غیرخطی بوده و به ازای افزایش جریان دریافت شده از آن‌ها ولتاژ خروجی شان کاهش می‌یابد. از طرفی چون این منحنی به ازای تغییر شدت نور و دمای هوا ثابت نیست، برای استحصال بیشترین توان از سلول‌های خورشیدی می‌بایست جریان مشخصی از سلول کشیده شود. تکنیک ردیابی نقطه حداکثر توان بیانگر همین امر است. در واقع این تکنیک راجع به این موضوع بحث می‌کند که نقطه کار پنل فتوولتائیک چگونه باشد که بیشترین توان از سلول دریافت شود. پس فقط یک نقطه کار بهینه وجود دارد که می‌توان بیشترین توان را از ماژول دریافت کند.



شکل (۳-۶) اتصال مستقیم یک بار مقاومتی به PV

اگر بار الکتریکی مستقیماً با ماژول متصل شود، استحصال بیشترین توان در صورت برابر بودن مقاومت مصرف‌کننده الکتریکی با تقسیم ولتاژ به جریان ماژول فتوولتائیک امکان‌پذیر است اما چنانچه بار الکتریکی غیر از آن به ماژول متصل شود، توان دریافتی حداکثر نخواهد بود. از طرفی با تغییر شرایط محیطی مشخصه ولتاژ-توان ماژول تغییر نموده و به سبب آن نقطه کار بهینه از یک منحنی به منحنی دیگر منتقل می‌شود. لذا برای دریافت حداکثر توان، مقاومت مصرف‌کننده باید تغییر کند که این امر عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد [۲۷]. بنابراین اگر بار الکتریکی ثابت باشد به یک بخش واسطه به نام ردیاب نقطه حداکثر توان نیاز است. دنبال‌کننده نقطه حداکثر توان، یک مبدل DC_DC به همراه بخش کنترل است و غالباً بین ماژول فتوولتائیک و مصرف‌کننده قرار می‌گیرند [۲۸].

برای این منظور روش‌های زیادی پیشنهاد شده اند که در پیچیدگی، سرعت همگرایی، هزینه، سنسورهای مورد نیاز، رنج اثر بخشی، اجرای سخت افزاری و... تفاوت دارند که به صورت زیر دسته بندی می شوند [۲۹-۳۰-۳۱-۳۲-۳۳]:

۱-۳-۳ روش کنترل وابسته به ریپل (RCC)^۱

وقتی آرایه PV به مبدل توان وصل می‌شود عمل کلیدزنی مبدل باعث ایجاد ریپل در ولتاژ و جریان آرایه PV شده که در اثر آن در توان هم ریپل ایجاد می‌شود. روش RCC مشتق زمانی توان آرایه را با مشتق زمانی جریان و ولتاژ آرایه که متغیر با زمان هستند، مرتبط می‌کند. اگر جریان آرایه افزایش یابد و توان هم افزایش یابد، مشتق زمانی توان و مشتق زمانی جریان هر دو مثبت هستند و حاصل ضرب آن‌ها هم مثبت است. بنابراین نقطه عملکرد روی منحنی قبل از mppt می‌باشد و از طرف دیگر اگر توان کاهش یابد حاصل ضرب مشتق توان و مشتق جریان منفی شده و فقط عملکرد بعد از mppt قرار دارد.

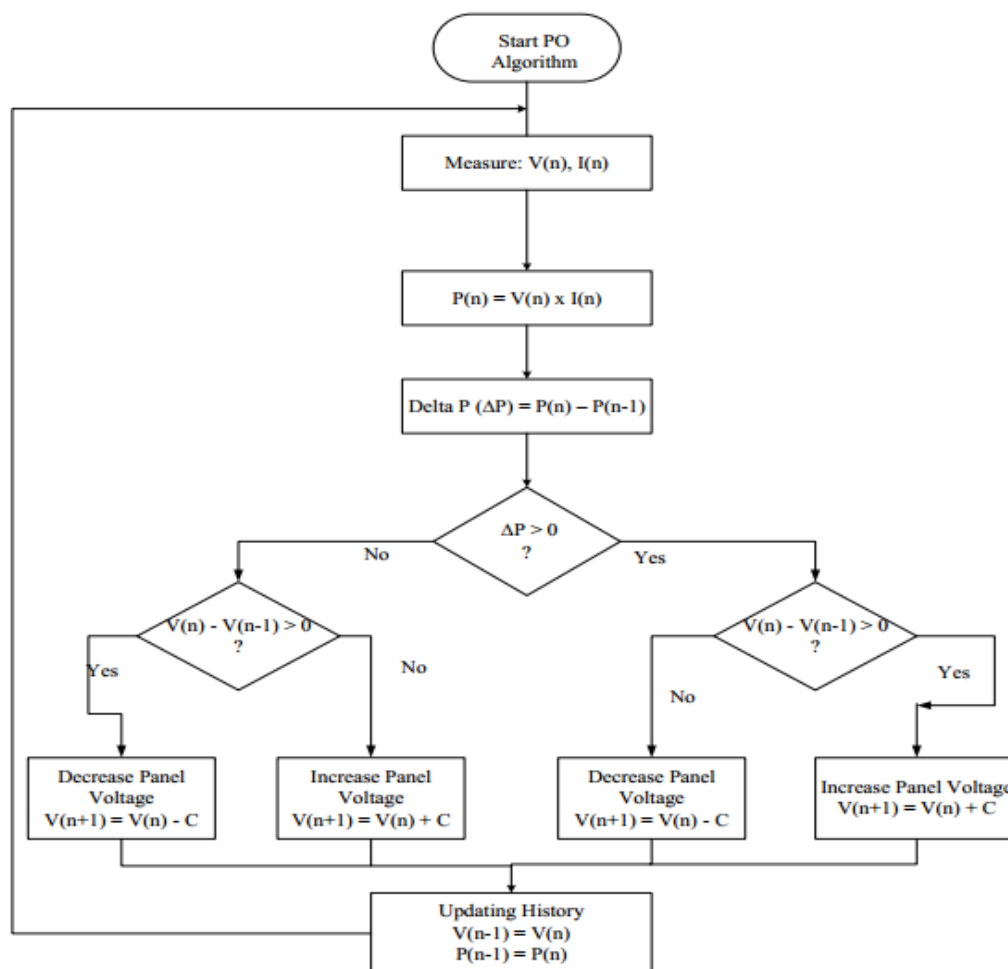
۲-۳-۳ الگوریتم آشفتن و مشاهده کردن (P&O)^۲

روش P&O نقطه حداکثر توان را روی منحنی P_i یا P_v با مقایسه توان و ولتاژ نمونه برداری شده با مقادیر قبلی آن‌ها به طور پیوسته ردیابی می‌کند. در این صورت نقطه عملکرد آرایه PV به سمت نقطه حداکثر توان شیف‌ت داده می‌شود. این کار با تغییر ولتاژ یا جریان صورت می‌گیرد به طوری که اگر با کاهش ولتاژ، توان افزایش یابد سیستم باز هم ولتاژ را کاهش می‌دهد و تا زمانی این کاهش ادامه پیدا می‌کند که توان افزایش یابد. هنگامی که با کاهش ولتاژ، توان افزایش نیابد، با افزایش ولتاژ به دنبال

^۱ Ripple correlation control

^۲ Perturbation and Observation

افزایش توان خروجی می رود و این چرخه ادامه می یابد تا توان سیستم در نقطه حداکثر خود ثابت نگه داشته شود. الگوریتم این سیستم نیز در شکل زیر قابل مشاهده است.



شکل (۷-۳) فلوجارت الگوریتم P&O

مزیت اصلی این روش در هزینه اجرای پایین و سادگی پیاده‌سازی آن و مشکل آن نوسان در اطراف mppt و سرعت همگرایی پایین در اعمال گام های کوچک برای رسیدن به mppt و عدم ردیابی دقیق در هنگام تغییر سریع تابش و دما نام برد که اجرای آن را در توان های بالا ضعیف تر می کند. برای پیاده‌سازی این روش با یک میکروکنترلر ولتاژ و جریان اندازه گیری شده و با مبدل آنالوگ به دیجیتال به سیگنال دیجیتال تبدیل می شوند سپس در هم ضرب شده تا مقدار توان آرایه PV تولید شود. مقادیر نمونه گیری شده توان و ولتاژ با هم مقایسه شده و سیکل کاری مبدل براساس آن تنظیم می شود.

۳-۳-۳ الگوریتم هدایت افزایشی (INC)^۱

در روش INC از علامت مشتق توان نسبت به ولتاژ $\left(\frac{dp}{dv}\right)$ محل $mppt$ تعیین می‌شود. اگر

$\frac{dp}{dv} = 0$ باشد، به $mppt$ رسیده است. اگر $\frac{dp}{dv} > 0$ باشد، $mppt$ سمت چپ نقطه کار است و

اگر $\frac{dp}{dv} < 0$ باشد، $mppt$ سمت راست نقطه کار قرار دارد.

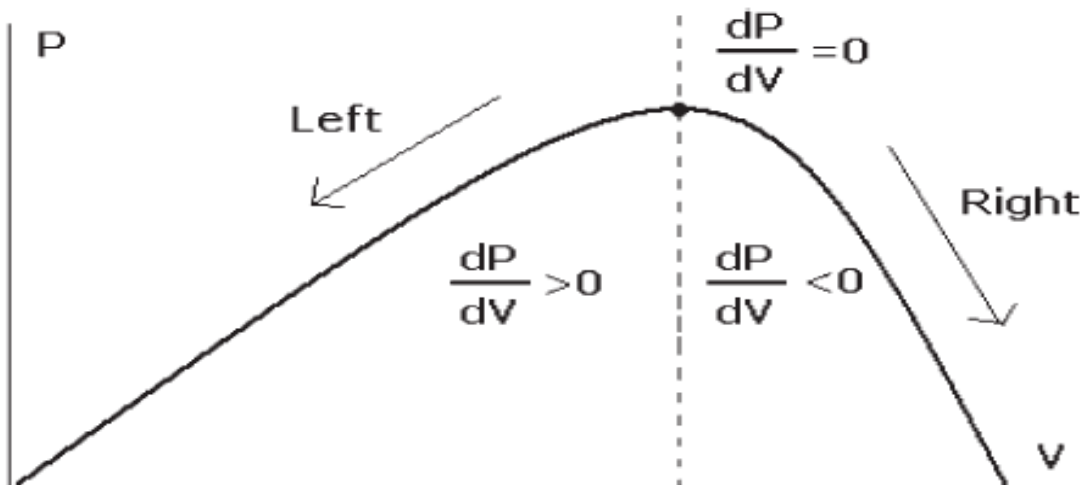
شیب منحنی $P-V$ از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\frac{dp}{dv} = \frac{d(VI)}{dv} = I + V \frac{dI}{dv} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta v} \quad (۱-۳)$$

اساس روش رسانایی افزایشی بر صفر بودن مشتق توان نسبت به ولتاژ در $mppt$ می باشد. این مساله

به خوبی در منحنی $P-V$ قابل مشاهده است. همچنین با مشاهده ی شیب منحنی امکان پیدا کردن

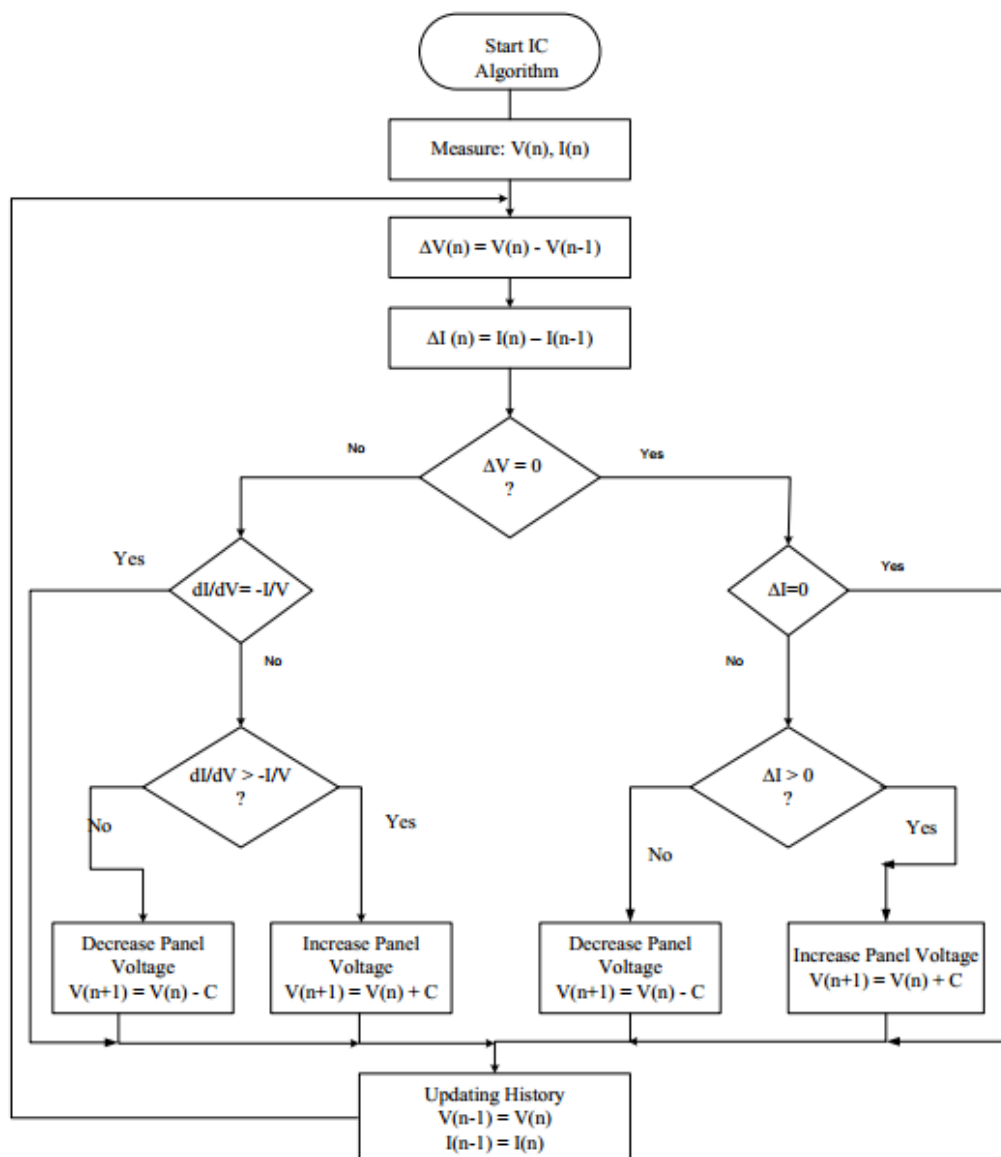
رابطه ای بین نقطه ی کار PV با نقطه ی حداکثر توان وجود دارد.



شکل (۸-۳) منحنی $P-V$ در الگوریتم هدایت افزایشی

^۱ Incremental Conductance

در این روش همانند روش P&O ابتدا ولتاژ و جریان آرایه خورشیدی اندازه گیری می شود سپس با ولتاژ و جریان حالت قبل مقایسه می شود. این مقایسه متفاوت با روش قبل می باشد، به این صورت که در مرحله اول تغییر ولتاژ را بررسی می کند که در صورت صفر بودن آن تغییرات جریان را بررسی می کند. صفر بودن تغییر جریان نیز بدین معنی است که در mppt قرار دارد. حالت های دیگر در فلوجارت زیر به طور کامل قابل مشاهده است.



شکل (۹-۳) الگوریتم IncCon

۴-۳-۳ روش ولتاژ مدار باز جزئی :

اساس این روش رابطه خطی نزدیک بین ولتاژ در mppt و ولتاژ مدار باز آرایه (Voc) تحت تغییرات تابش و دما است.

$$V_{mppt} \cong k_1 \times V_{oc} \quad (2-3)$$

ضریب k_1 به مشخصات آرایه pv وابسته است. مقدار آن به صورت تجربی با تعیین V_{mppt} و V_{oc} برای آرایه pv مشخص تحت تابش و دمای متفاوت به دست می آید که مقداری بین 0.71 تا 0.78 دارد. با تعیین k_1 برای یک بار V_{mppt} با اندازه گیری متناوب V_{oc} با قطع لحظه ای مبدل توسط رابطه بالا تعیین می شود. از معایب این روش تلفات توان به علت قطع لحظه ای مبدل اشاره کرد.

۵-۳-۳ روش جریان اتصال کوتاه جزئی :

اساس این روش رابطه خطی بین جریان در mppt و جریان اتصال کوتاه آرایه (Isc) تحت تاثیرات تابش و دما می باشد.

$$I_{mppt} \cong K_2 I_{sc} \quad (3-3)$$

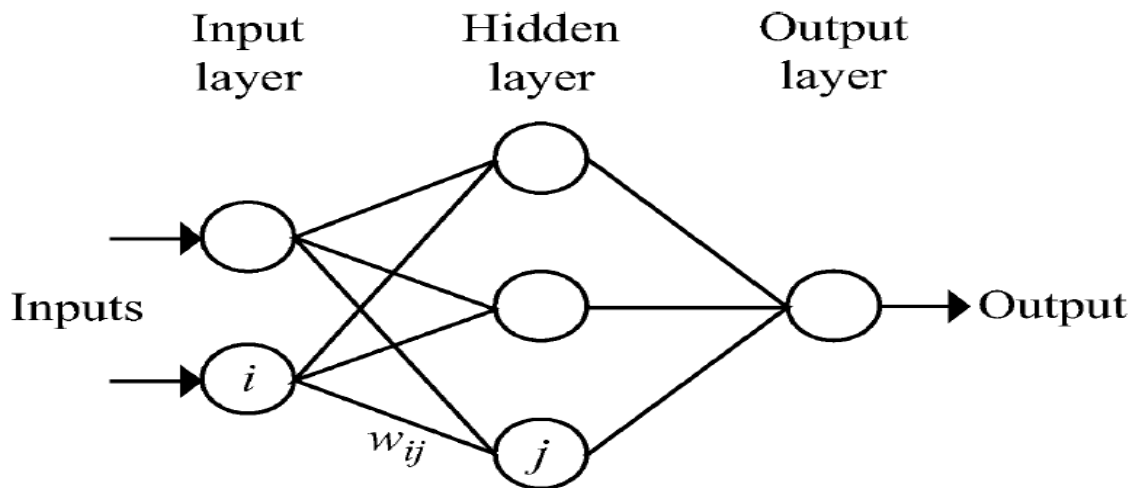
ضریب k_2 به مشخصات آرایه pv وابسته است و مقداری بین 0.78 تا 0.92 دارد. برای اندازه گیری Isc در طول عملکرد باید به مبدل یک کلید اضافه شود تا به صورت متناوب آرایه را قطع کند و Isc توسط سنسور جریان اندازه گیری شود که این امر باعث افزایش هزینه می گردد.

۶-۳-۳ روش شبکه عصبی^۱

شبکه عصبی را بطور کلی می توان همانند جعبه سیاهی معرفی کرد که تعدادی ورودی را می پذیرد و خروجی هایی را تولید می کند. سیستم های عصبی همانند شبکه های محاسباتی توزیع شده

^۱ Neural network

و موازی عمل می کنند. یکی از کاربردهای شبکه های عصبی در سیستم کنترل و ردیابی نقطه حداکثر توان در سیستم های فتوولتائیک است. کنترل کننده شبکه عصبی سیکل کاری بهینه (d_{opt}) را به منظور دسترسی به حداکثر توان به ازای سطح تابش (G) و دمای سلول فتوولتائیک (T) تخمین می زند. شکل زیر ساختار شبکه عصبی را نشان می دهد [۳۴].



شکل (۳-۱۰) ساختار شبکه عصبی

همانطور که ملاحظه می شود کنترل کننده شبکه عصبی شامل سه قسمت (لایه) می باشد :

لایه ورودی ، لایه پنهان ، لایه خروجی

تعداد گره ها در هر لایه تغییر می کنند و به کاربر بستگی دارد. اینکه چطور نقطه عملکرد به سمت mppt نزدیک می شود به الگوریتم استفاده شده در لایه پنهان بستگی دارد که چگونه شبکه عصبی آن را به خوبی پرورش دهد. برای اینکه mppt به درستی تشخیص داده شود W_{ij} باید به دقت از طریق یک پروسه ترتیبی معین شود که به موجب آن آرایه pv برای ماه ها یا حتی سال ها آزمایش شده و یک الگو بین ورودی و خروجی شبکه عصبی ضبط می شود.

در دهه اخیر از منطق فازی برای ردیابی حداکثر توان در آرایه pv استفاده شده است. کنترل کننده های فازی دارای این قابلیت هستند که با ورودی های غیر دقیق و غیر خطی کار کنند و به مدل ریاضی دقیق هم نیاز ندارند. کنترل فازی سه مرحله دارد :

فازی سازی ، تعیین قوانین براساس جداول جستجو، غیرفازی سازی

در طول فازی سازی متغیرهای عددی ورودی به متغیرهای زبان شناختی براساس یک تابع عضویت تبدیل می شوند. ورودی کنترل کننده فازی برای ردیابی حداکثر توان معمولا خطا (E) و تغییرات خطا (CE) می باشد. کاربر حق انتخاب دارد که E و CE چطور محاسبه شوند. بدین منظور می توان از صفر بودن $\left(\frac{dp}{dv}\right)$ در mppt استفاده کرد.

$$E(n) = \frac{p(n)-p(n-1)}{V(n)-V(n-1)} \quad (۴-۳)$$

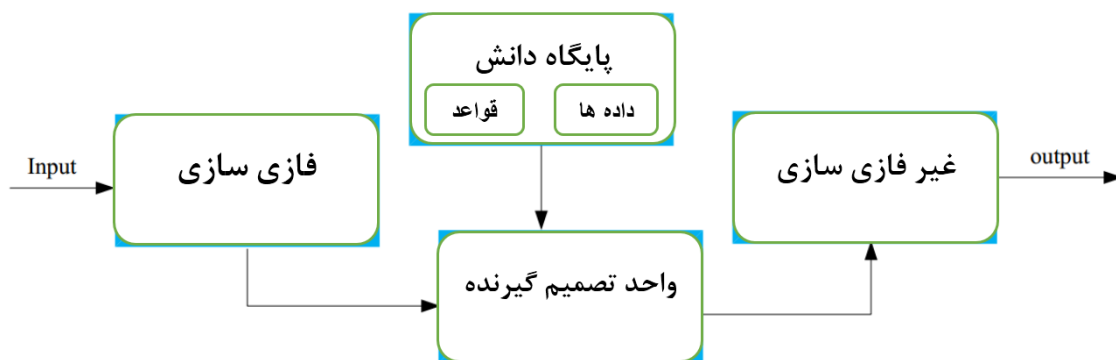
$$CE(n) = E(n) - E(n - 1) \quad (۵-۳)$$

E و CE محاسبه شده و به متغیرهای زبان شناختی تبدیل می شوند. خروجی کنترل کننده به طور معمول تغییر سیکل کاری مبدل (ΔD) می باشد و در جدول قوانین جستجو می شود.

در مرحله غیرفازی سازی خروجی کنترل کننده فازی از متغیرهای زبان شناختی به متغیرهای عددی که هنوز در تابع عضویت استفاده می شوند، تبدیل می شود. این کنترل کننده ها عملکرد خوبی در شرایط متغیر جوی دارند. نتایج آزمایشات نشان می دهد که به سرعت به mppt همگرا می شود و در

^۱ Fuzzy logic control

اطراف آن کمترین نوسان را دارد. عملکرد ردیابی تا حدود زیادی به نوع تابع عضویت که انتخاب می شود بستگی دارد [۳۵].



شکل (۳-۱۱) نمای کلی سیستم فازی

۴. فصل چهارم :

طراحی کنترل کننده فازی بهینه

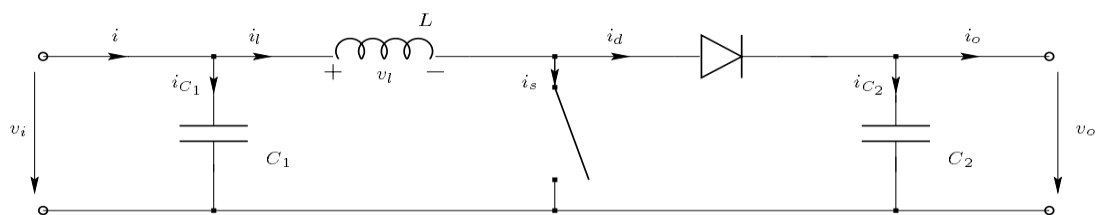
برای ردیابی نقطه حداکثر توان

نقطه حداکثر توان با تغییر شرایط محیطی تغییر می‌کند لذا برای دریافت حداکثر توان باید اندازه بار تغییر کند که این امر عملاً امکان پذیر نیست. برای غلبه بر این مشکل یک بخش واسطه در نظر گرفته می‌شود تا بوسیله آن به ازای بار ثابت و شرایط محیطی متفاوت از بیشترین ظرفیت ماژول بهره برداری شود. این بخش واسطه یک مبدل DC_DC است که با توجه به نظر طراح می‌تواند افزایشده یا کاهشده یا افزایشده-کاهشده باشد. در صورت اتصال به بار یا شبکه متناوب بعد از مبدل DC_DC باید یک اینورتر هم اضافه شود که می‌تواند اینورتر با مدولاسیون پهنای پالس با بازده بالا و مولفه هارمونیکی پایین یا یک اینورتر موج مربعی با مولفه هارمونیکی بالاتر و کنترل راحت تر باشد.

۲-۴ مبدل بوست^۱

همانطور که از نام مبدل بوست برمی آید ولتاژ خروجی این مبدل بیشتر از ولتاژ ورودی است. این مبدل بین ماژول فتوولتائیک و مصرف کننده قرار می‌گیرد که با کنترل مناسب آن می‌توان بیشترین توان ممکن را از ماژول فتوولتائیک دریافت نمود. مبدل بوست ولتاژ DC را تقویت می‌کند و به طور معمول در اکثر روش‌های ردیابی حداکثر توان استفاده شده است. با توجه به اینکه ماکزیمم ولتاژی که آرایه تولید می‌کند مقدار کمی دارد، می‌توان از این مبدل برای افزایش ولتاژ استفاده کرد.

مدل ایده آل یک مبدل بوست به صورت زیر می‌باشد [۳۶-۳۷].

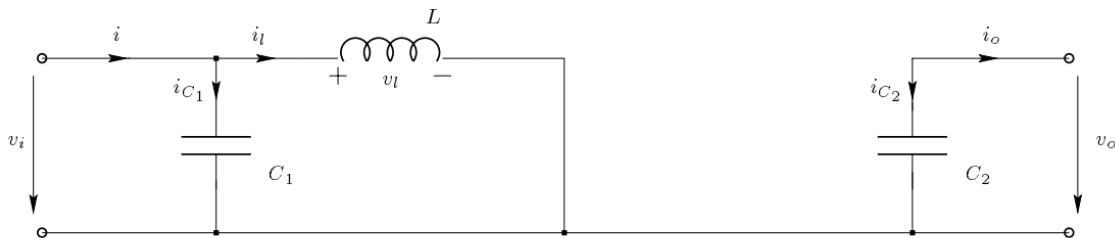


شکل (۱-۴) مدار معادل مبدل بوست ایده آل

^۱ Boost converter

طرز کار مدار را میتوان به دو حالت تقسیم کرد. حالت اول با بسته شدن کلید در $t=0$ آغاز میشود. ولتاژ ورودی روی سلف می افتد و جریان صعودی از سلف L و کلید می گذرد. حالت دوم هنگامی شروع میشود که کلید در لحظه $t=DT$ خاموش می گردد که D پارامتر کاری و T دوره زمانی است. جریانی که تاکنون از کلید قدرت عبور میکرد حالا از سلف، خازن، بار و دیود عبور می کند. جریان سلف کاهش می یابد تا اینکه کلید در سیکل بعدی دوباره روشن شود و انرژی ذخیره شده در سلف به بار منتقل می گردد.

حالتی که کلید بسته باشد :



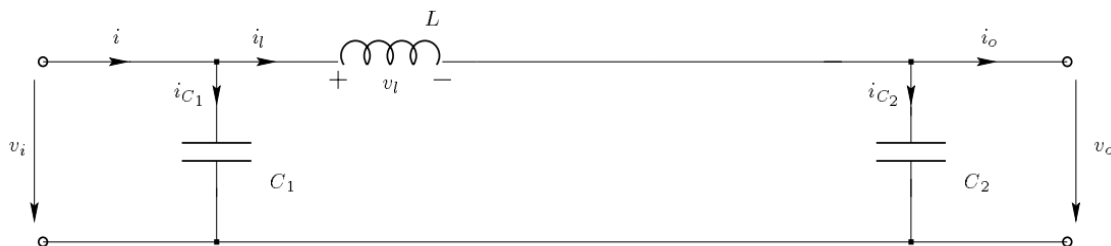
شکل (۲-۴) مبدل بوست در حالت بسته شدن کلید

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \quad (1-4)$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \quad (2-4)$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) \quad (3-4)$$

حالتی که کلید باز باشد :



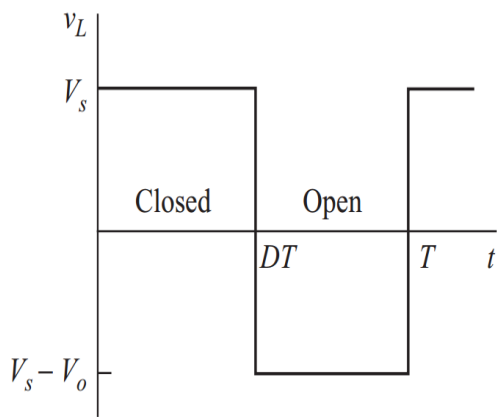
شکل (۳-۴) مبدل بوست در حالت باز شدن کلید

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \quad (4-4)$$

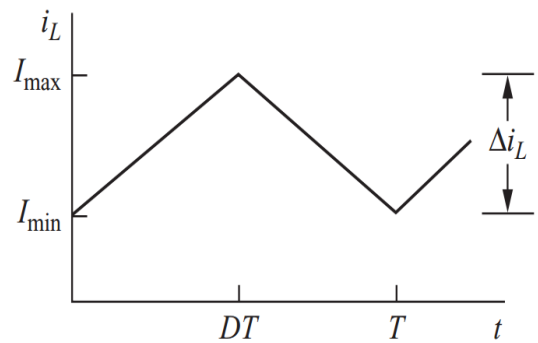
$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t) \quad (5-4)$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \quad (6-4)$$

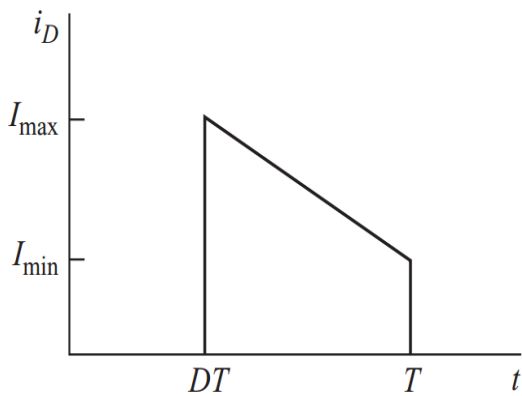
شکل موج های ولتاژ و جریان برای حالتی که جریان بار پیوسته باشد:



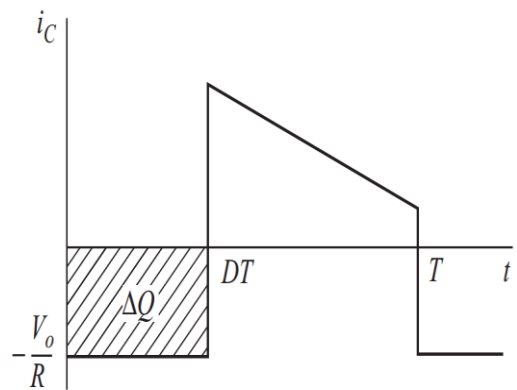
(الف)



(ب)



(د)



(ج)

شکل (4-4) الف : ولتاژ سلف ب : جریان سلف ج : جریان دیود د : جریان خازن

برای مبدل افزایش دهنده DC_DC داریم :

$$V_s \times DT = (V_o - V_s)(1 - D)T \quad (7-4)$$

بنابراین برای ولتاژ خروجی این مبدل خواهیم داشت :

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \quad (8-4)$$

ضریب بوست :

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_o} = \frac{1}{1-D} \quad (9-4)$$

طراحی مبدل بوست :

برای داشتن جریان پیوسته مقدار حداقل اندوکتانس به صورت زیر محاسبه خواهد شد :

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2 DR}{2F} \quad (10-4)$$

در معادله بالا D پارامتر کاری و R مقاومت مصرف کننده بر حسب اهم و F فرکانس کلیدزنی بر حسب هرتز می باشد. خازن خروجی در مبدل افزایش دهنده در زمانی که دیود خاموش است جریان خروجی مصرف کننده را تامین می کند. حداقل ظرفیت خازن در این مبدل با در نظر گرفتن نوسان ولتاژ از معادله زیر حاصل می شود :

$$C_{min} = \frac{D \times V_o}{2RF} \quad (11-4)$$

در این معادله V_o ولتاژ خروجی مبدل می باشد.

۳-۴ اینورتر^۱

یکی از مباحث الکترونیک صنعتی ، تبدیل یک ولتاژ DC به یک ولتاژ AC است. به سیستمی که این تبدیل را برای ما انجام می دهد اینورتر گفته می شود. اینورترها دارای رنج وسیعی از کاربردهای مختلف هستند که استفاده در سیستم های فتوولتائیک یکی از کاربردهای آن می باشد. پنل های خورشیدی دارای خروجی DC هستند که با استفاده از اینورتر این توان تبدیل به AC می شود. اینورتر پل تک فاز متشکل از چهار سوئیچ قدرت می باشد که با کنترل این سوئیچ ها می توان ورودی DC را به خروجی AC تبدیل کرد. این سوئیچ ها ترانزیستور هستند و با توجه به نیاز طراح متفاوت می باشند. معمولا IGBT برای فرکانس سوئیچینگ بالا و MOSFET برای فرکانس پایین و توان بالا مورد استفاده قرار می گیرند. برای کنترل سوئیچ های اینورتر روش های متفاوتی از جمله مدولاسیون پهنای پالس معمولی (PWM^۲) و روش SinPWM و روش موج مربعی با کنترل عرض پالس وجود دارد که هر کدام مزیت و معایبی دارد و بسته به نوع کارایی اینورتر از یکی از این روش ها برای کنترل سوئیچ ها استفاده می شود. اینورترها از نظر فاز تبدیل به دو نوع عمده تک فاز و سه فاز و از نظر شکل موج خروجی به چهار نوع زیر تقسیم می شوند :

(۱) خروجی به شکل موج مربعی

(۲) خروجی به شکل سینوسی اصلاح شده (معمولی)

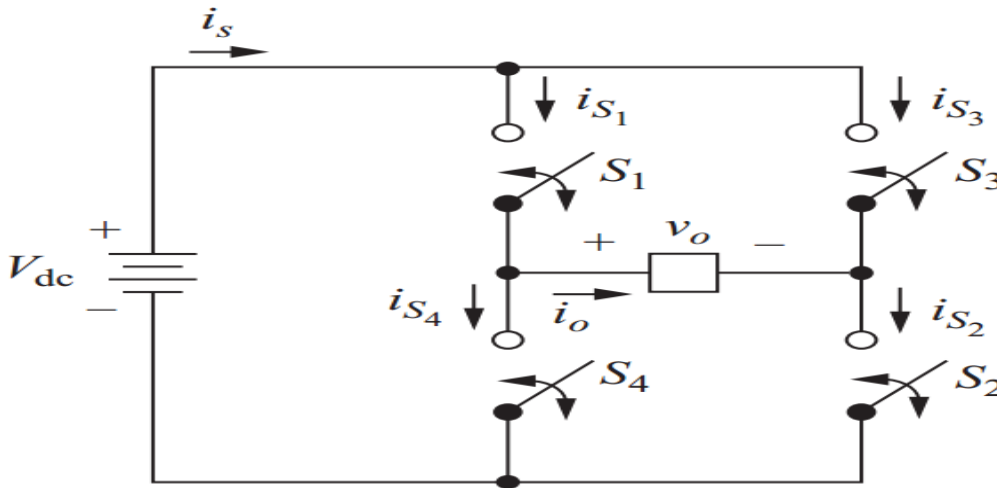
(۳) خروجی به شکل سینوسی اصلاح شده پله ای

(۴) خروجی به شکل سینوسی خالص

^۱ Inverter

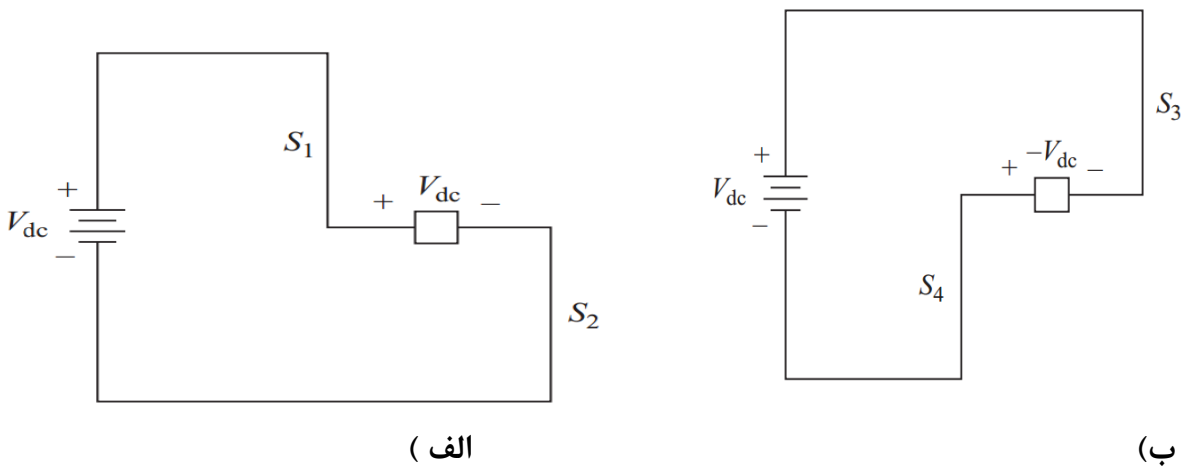
^۲ Pulse width modulation

مدل مداری اینورتر تک فاز در شکل زیر آمده است. همانطور که در شکل مشخص است این اینورتر از چهار سوئیچ تشکیل شده است که با روشن شدن هر کدام از سوئیچ ها ورودی DC به خروجی متصل می شود. موازی هر سوئیچ یک دیود قرار می گیرد، تا در زمانی که بار خروجی سلفی است مسیر جریان بسته شده و از آسیب رسیدن به سوئیچ جلوگیری شود.



شکل (۴-۵) مدار معادل اینورتر تک فاز

اینورتر دو حالت عملکرد دارد. در حالت اول بازه سیکل کاری d که سوئیچ های $S1$ و $S2$ بسته هستند و حالت دوم زمان مکمل $1-d$ که سوئیچ های $S3$ و $S4$ بسته می باشند.



شکل (۴-۶) الف : حالت وصل سوئیچ های $S1$ و $S2$ ب : حالت وصل سوئیچ های $S3$ و $S4$

۴-۴ الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO)^۱

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات یک نوع هوش جمعی مبتنی بر اصول روانشناسی اجتماعی و فراهم آوردن بینشی در رفتار اجتماعی و کمک کردن به کاربردهای مهندسی است [۳۸]. الگوریتم اجتماع ذرات در سال ۱۹۹۵ توسط جیمز کندی^۲، روانشناس اجتماعی و راسل سی ابرهارت^۳، مهندس برق ابداع شد و ایده اولیه آن از حرکت پرندگان یا ماهی‌ها اقتباس شده است. در این روش هر جواب مساله به عنوان یک پرنده در نظر گرفته می‌شود و ذره^۴ نامیده می‌شود. هر پرنده دارای یک تابع برازندگی^۵ است که بر اساس موقعیت آن در فضای جستجو محاسبه می‌شود. همچنین هر پرنده دارای یک بردار سرعت است که جهت حرکت پرنده را مشخص می‌کند. P_{best} بهترین موقعیتی است که یک پرنده به دست آورده است. N_{best} بهترین نتیجه است که پرنده همسایه به دست آورده است. G_{best} بهترین نتیجه‌ای است که به وسیله تمامی پرندگان در طول اجرای الگوریتم به دست آمده است. اگر همسایگی کل فضای جستجو را دربرگیرد N_{best} برابر G_{best} خواهد بود. هر پرنده جهت خود را براساس دو جهت تجربه خود و تجربه دوستانش اصلاح می‌کند. اجتماع ذرات الگوریتمی گروهی بوده که در آن دسته‌ای از ذرات به منظور یافتن پاسخ بهینه یک تابع هدف، به جستجو در فضای ممکن مساله می‌پردازند. هر جزء با سرعتی قابل تنظیم در فضای جستجو حرکت کرده و بهترین موقعیت را که تاکنون به دست آورده در حافظه خود نگه می‌دارد. بهترین موقعیت

^۱ Particle Swarm Optimization

^۲ Kennedy

^۳ Eberhart

^۴ particle

^۵ fitness

به دست آمده توسط کل گروه نیز بین تمامی اعضا مخابره می شود [۳۹].

الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات به صورت زیر می باشد :

- n ذره به صورت تصادفی ایجاد می شود.
- برای تمام ذرات، سرعت و موقعیت به صورت تصادفی ایجاد می شود.
- تا زمانی که شرایط خاتمه محقق نشده است :
 - یک واحد به t اضافه می شود.
 - مقدار تابع هدف را به ازای هر ذره محاسبه می کند.
 - به ازای i از یک تا n :
 - $X^{i,best}[t]$ را محاسبه می کند.
 - مقدار بعدی i وارد می شود .
 - $X^{gbest}[t]$ را محاسبه می کند.
 - به ازای i از یک تا n :
 - به ازای j از یک تا d :
$$V_j^i[t+1] = W V_j^i[t] + c_1 r_1 (X_j^{i,best}[t] - X_j^i[t]) + c_2 r_2 (X_j^{gbest}[t] - X_j^i[t])$$
$$X_j^i[t+1] = X_j^i[t] + V_j^i[t+1]$$
 - مقدار بعدی j وارد می شود .
 - مقدار بعدی i وارد می شود.

۴-۵ طراحی و بهینه سازی کنترل کننده فازی

نظر به اینکه شدت تابش خورشید متغیر است، نقطه حداکثر توان از یک منحنی به سرعت به منحنی دیگری منتقل می‌شود. بنابراین کنترل کننده حداکثر توان به منظور کاهش نوسانات و اتلاف توان می‌بایست قادر باشد که هر چه سریع‌تر به این نقطه برسد. در میان روش‌های پیشنهاد شده، استفاده از روش‌های هوشمند قابل توجه است. این روش‌ها در سال‌های اخیر بهبود یافته و جایگزین روش‌های متداول همچون آشفتن و مشاهده و هدایت افزایشی و الگوریتم‌های کنترلی نظیر آن شده‌اند. با توجه به طبیعت اکتشافی و تاثیرگذاری و سادگی روش‌های کنترل فازی در سیستم‌های خطی و غیرخطی این سیستم‌ها، نقش برجسته‌ای در ردیابی نقطه حداکثر توان در سیستم‌های فتوولتائیک دارند. کنترل فازی تضمین می‌کند که مازول فتوولتائیک در شدت تابش و دماهای مختلف در mppt کار کند. ورودی کنترل کننده فازی ولتاژ و جریان مازول است. کنترل فازی مطابق با مدل مرجع با تغییر دوره کار مبدل DC_DC امپدانس خروجی آرایه را به نحوی تغییر می‌دهد که علیرغم تغییرات شرایط جوی نقطه کار همواره بر mppt منطبق شود.

۴-۵-۱ مرحله فازی سازی

مرحله تعریف مجموعه‌های فازی برای متغیرهای ورودی و خروجی است. برای تعریف این مجموعه فازی باید دانش اولیه‌ای از دامنه تعریف هر کدام از متغیرها را داشته باشیم. به عبارت دیگر فازی سازی رابطی بین ورودی‌های حقیقی و موتور استنتاج است. در یک کنترل کننده فازی، ورودی‌های حقیقی توسط کاربر به صورت مجموعه‌های فازی تعریف می‌شوند. مجموعه‌های فازی اصطلاحاً توابع عضویت نامیده می‌شود. توابع عضویت به متغیرهای سیستم کاملاً وابسته است و با تغییر متغیرها شکل آن‌ها تغییر می‌کند. تنظیم توابع عضویت در سیستم‌های بزرگ اصولاً کار دشوار و پیچیده است.

۴-۵-۲ قوانین و استنتاج

در مرحله استنتاج تعدادی قوانین فازی به وجود می آوریم و با استفاده از این قوانین مقدار سیگنال کنترل را با توجه به مقدار خطا و مشتق آن محاسبه می کنیم. هر قاعده فازی شامل دو قسمت است. یک قسمت مقدمه و یک قسمت نتیجه است که توسط if و then از هم جدا می شوند. تنظیم کننده فازی با استفاده از این قوانین سیگنال کنترلی تولید می کند که در هر لحظه نمونه برداری به سیگنال کنترل قبل اضافه می شود یعنی خروجی تنظیم کننده فازی تغییرات سیگنال کنترل است.

۴-۵-۳ غیرفازی سازی

خروجی کنترل کننده فازی یک مجموعه فازی است اما در خروجی یک کمیت واقعی مورد نیاز است. بنابراین خروجی کنترل کننده فازی می بایست غیرفازی سازی شود.

نکته جدید استفاده شده در کنترل فازی استفاده از سه ورودی به جای دو ورودی و بکارگیری روش هوشمند می باشد. در کنترل کننده فازی معمولاً ورودی ها (E) که همان تغییرات توان به تغییرات ولتاژ و تغییرات آن (CE) در زمان t هستند که با معادلات زیر بیان شده اند. همچنین از ولتاژ خروجی ماژول به عنوان ورودی سوم به منظور افزایش توان خروجی ماژول فتوولتائیک استفاده نموده ایم. خروجی کنترل کننده فازی نیز سیکل کاری ΔD می باشد.

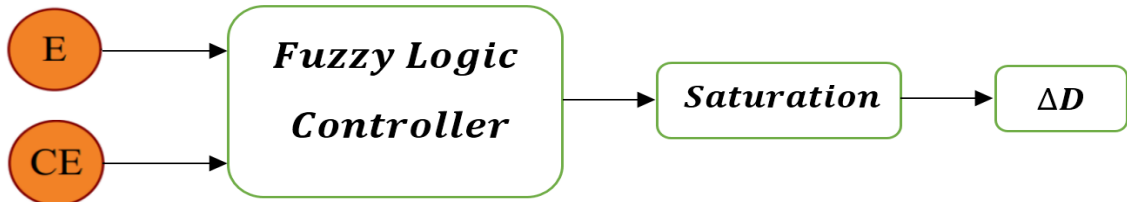
$$E(t) = \frac{P_{pv}(t) - P_{pv}(t-1)}{V_{pv}(t) - V_{pv}(t-1)} \quad (12-4)$$

$$CE(t) = E(t) - E(t-1) \quad (13-4)$$

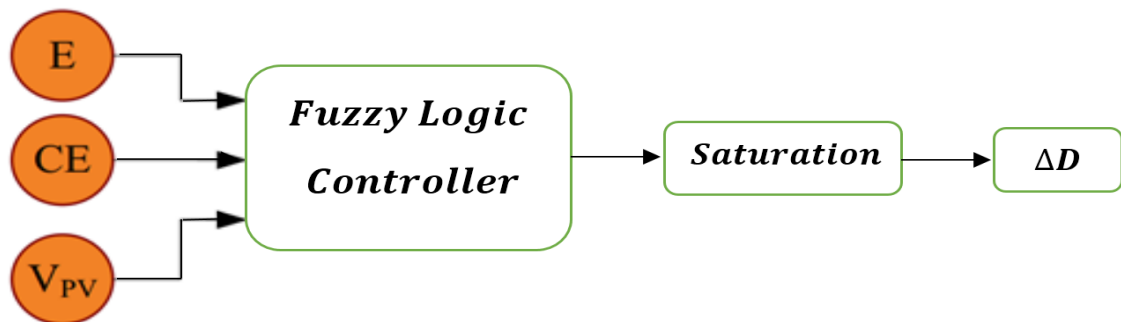
$$V_{pv}(t) \quad (14-4)$$

ساختار یک کنترل کننده فازی متداول و همچنین کنترل کننده فازی استفاده شده برای ردیابی نقطه حداکثر توان در شکل زیر نشان داده شده است.

(الف)



(ب)



شکل (۷-۴) الف: سیستم فازی در حالت متداول ب: سیستم فازی استفاده شده

در این سیستم از موتور استنتاج ضرب ممدانی^۱ با فازی ساز منفرد و همچنین غیر فازی ساز میانگین مراکز و توابع تعلق گوسین استفاده شده است که رابطه ورودی و خروجی آن به شکل زیر می باشد.

$$Y(X) = \frac{\sum_{L=1}^M \bar{Y}^L \times [\prod_{i=1}^n \exp(-(\frac{X_i - \bar{X}_i^L}{\sigma_i}))]}{\sum_{L=1}^M [\prod_{i=1}^n \exp(-(\frac{X_i - \bar{X}_i^L}{\sigma_i}))]} \quad (۱۵-۴)$$

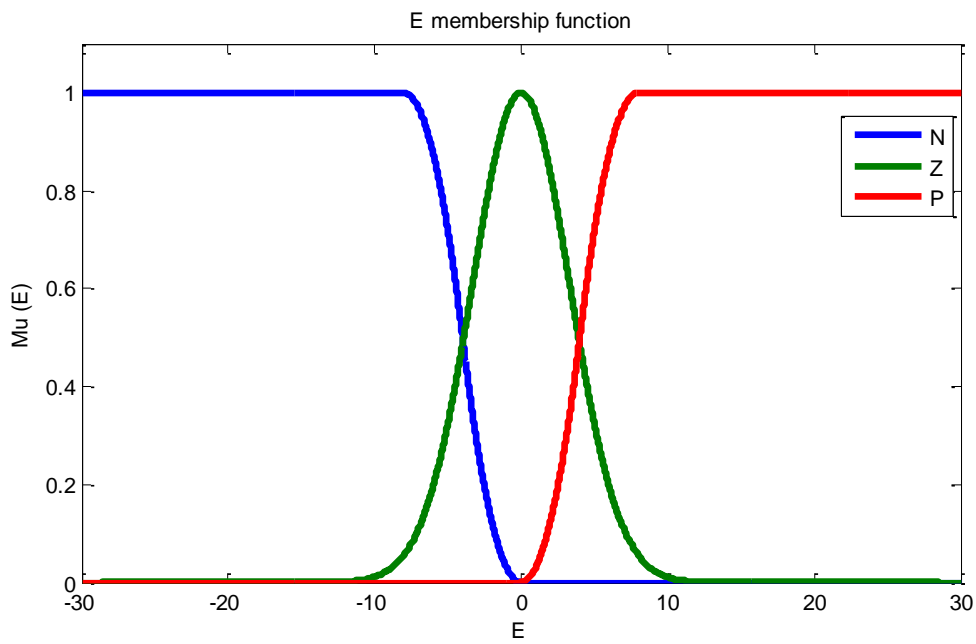
در رابطه (۱۵-۴)، $Y(X)$ خروجی سیستم فازی، M تعداد قوانین سیستم فازی، n تعداد گروه های ورودی سیستم فازی، \bar{Y}^L مراکز گروه های خروجی سیستم فازی، \bar{X}_i^L مراکز گروه های ورودی سیستم فازی

^۱ mamdani

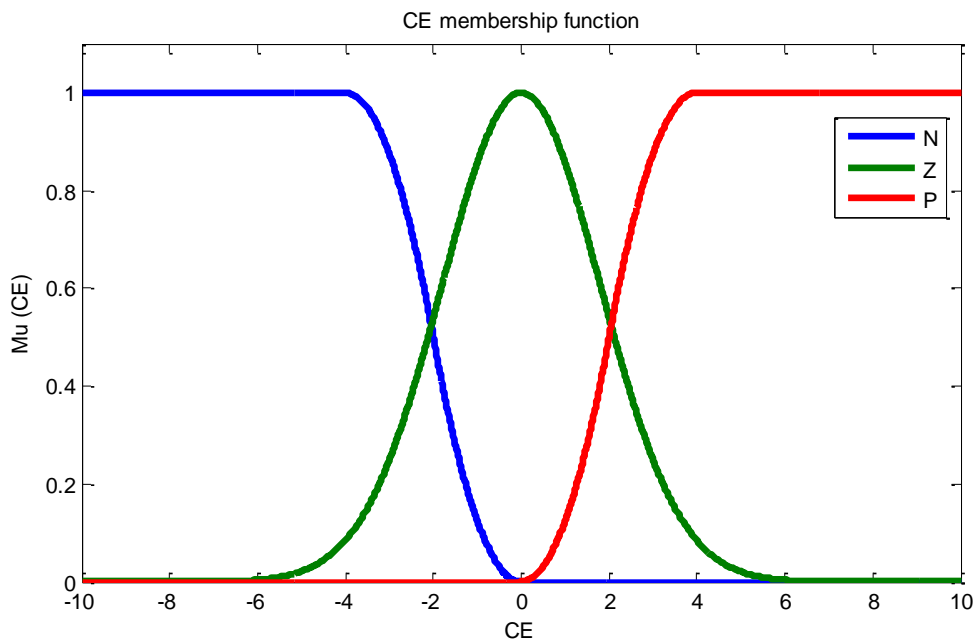
و σ_i بیان کننده میزان پراکندگی گروه های ورودی سیستم فازی است. در رابطه بالا \bar{Y}^L و \bar{X}_i^L و σ_i عواملی هستند که در دقت سیستم فازی نقش بسیار مهمی دارند. هر چه این سه پارامتر در سیستم فازی دقیق تر تنظیم شوند سیستم فازی عملکرد بهتری دارد. به همین علت برای تنظیم این سه پارامتر از الگوریتم های بهینه سازی ازدحام ذرات استفاده می کنیم.

روند کار بدین ترتیب است که الگوریتم بهینه سازی، مراکز و سیگماهای گروه های فازی را طوری تعیین می کند که تابع هزینه به حداقل مقدار خود برسد. روند بهینه سازی به صورت OFF-LINE انجام می شود و زمانی که الگوریتم بهینه سازی بهترین مراکز و سیگماها را به ازای کمترین تابع هزینه مشخص کرد، آن را به سیستم فازی اعمال می کند و از آن پس سیستم فازی از مراکز و سیگماهای که الگوریتم بهینه سازی تعیین کرده است، استفاده می کند.

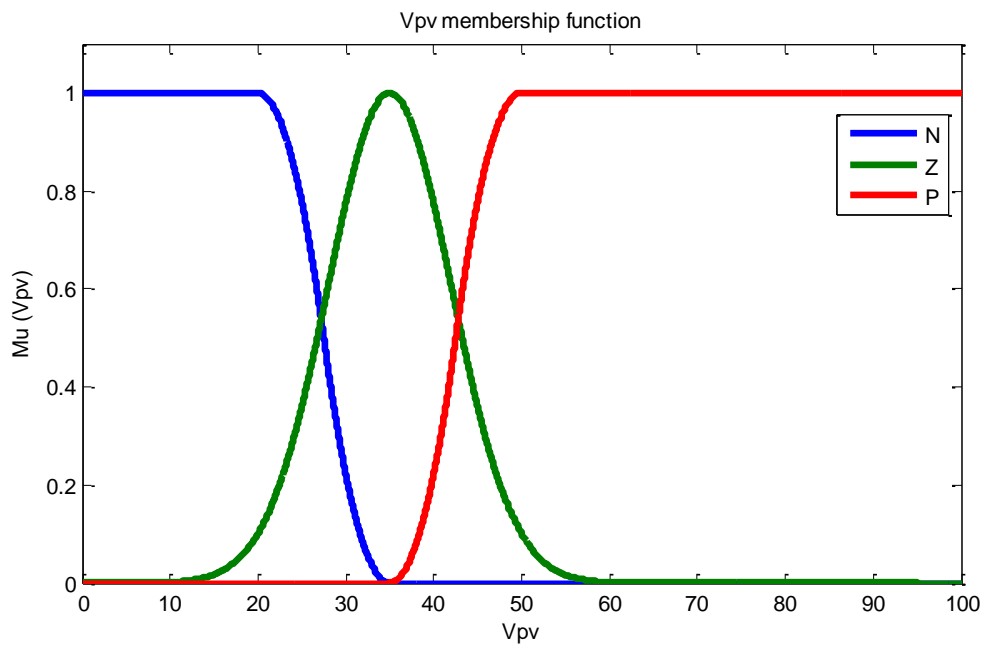
مطابق شکل های زیر توابع عضویت کنترل کننده فازی برای ورودی اول و ورودی دوم که همان تغییرات ورودی اول است به صورت منفی (N) و صفر (Z) و مثبت (P) و همچنین ولتاژ مازول به عنوان ورودی سوم به صورت منفی (N) و صفر (Z) و مثبت (P) و برای خروجی سیکل کاری از NVL تا PVL نام گذاری شده اند.



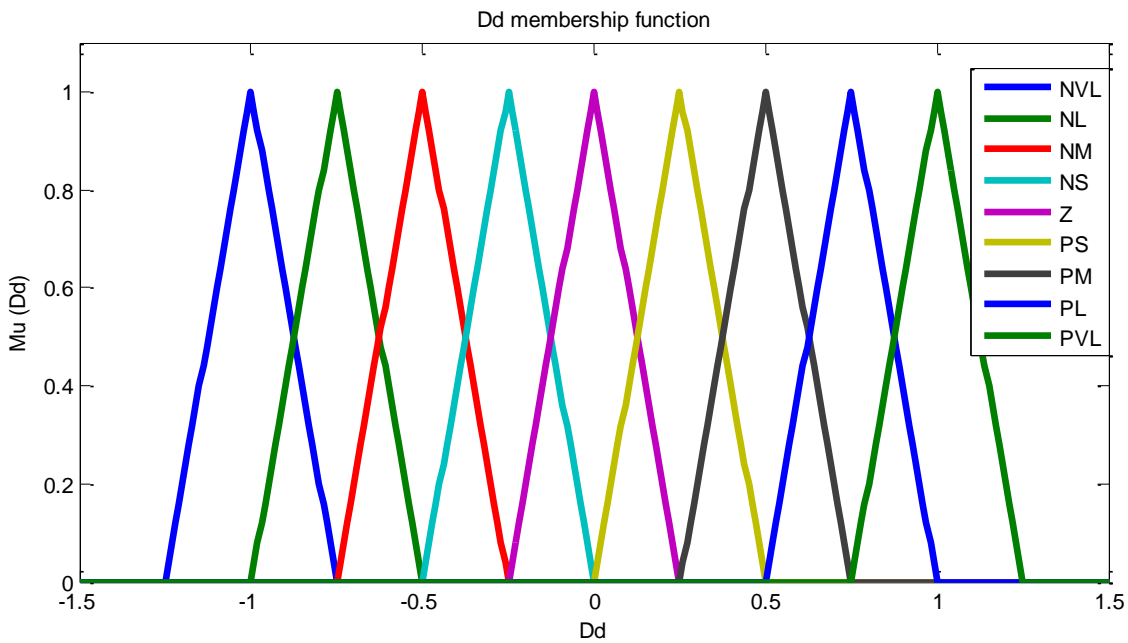
شکل (۸-۴) توابع عضویت گروه های فازی ورودی اول (E)



شکل (۹-۴) توابع عضویت گروه های فازی ورودی دوم (CE)



شکل (۴-۱۰) توابع عضویت گروه های فازی ورودی سوم (V_{pv})



شکل (۴-۱۱) توابع عضویت گروه های فازی خروجی (ΔD)

قوانین اگر-آنگاه فازی استفاده شده در کنترل کننده فازی مطابق جدول زیر می باشد. با توجه به اینکه کنترل کننده فازی سه ورودی دارد و هریک سه تابع عضویت دارند، در نتیجه امکان تنظیم ۲۷ قانون وجود دارد.

جدول (۱-۴) قوانین فازی

Input ۱	Input ۲	Input ۳	Output
N	N	N	Z
N	N	Z	NS
N	N	P	NVL
N	Z	N	Z
N	Z	Z	NM
N	Z	P	NVL
N	P	N	PS
N	P	Z	Z
N	P	P	NS
Z	N	N	PS
Z	N	Z	NS
Z	N	P	NL
Z	Z	N	PM
Z	Z	Z	Z
Z	Z	P	NM
Z	P	N	PL
Z	P	Z	PS
Z	P	P	NS
P	N	N	PM
P	N	Z	Z
P	N	P	NM
P	Z	N	PM
P	Z	Z	PS
P	Z	P	Z
P	P	N	PVL
P	P	Z	PM
P	P	P	Z

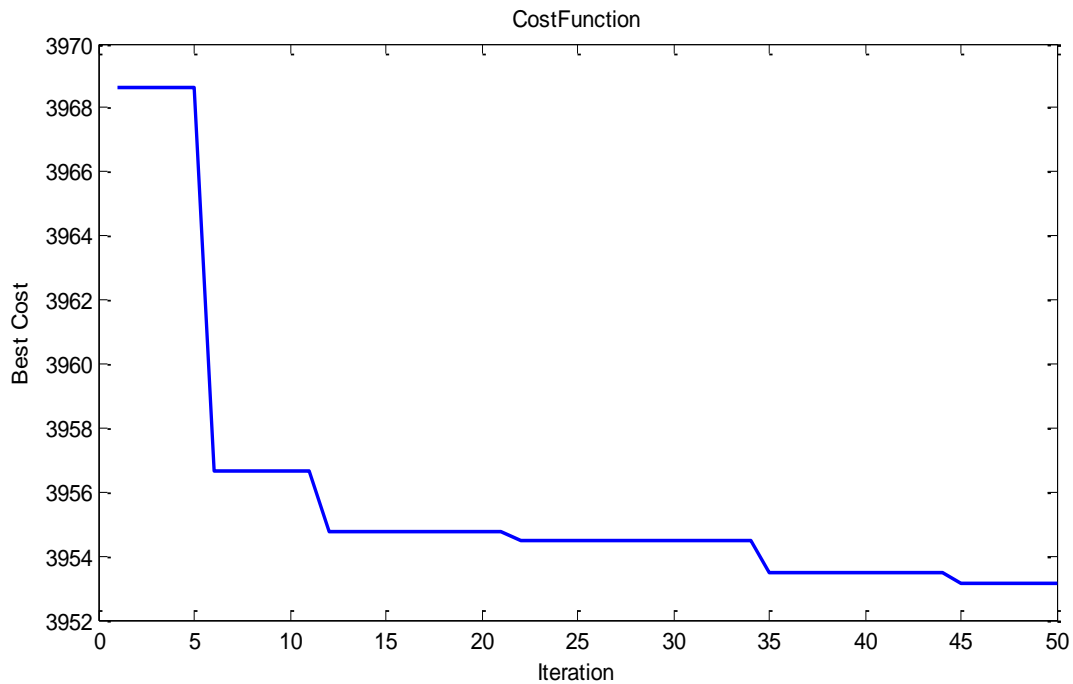
پارامترهای کنترل کننده فازی به منظور کاهش نوسانات توان حول نقطه حداکثر توان با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات بهینه شده است. برای بهینه‌سازی نیاز به انتخاب یک میزان مناسب به نام تابع معیار یا هزینه است.

$$j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (P_{ref} - P)^2 = 0 \quad (16-4)$$

$npop = 25$ تعداد ذرات ، $MAXit = 50$ تعداد تکرار

C_1 و $C_2 = 2.05$ پارامترهای PSO ، $W = 0.4$ ضریب اینرسی

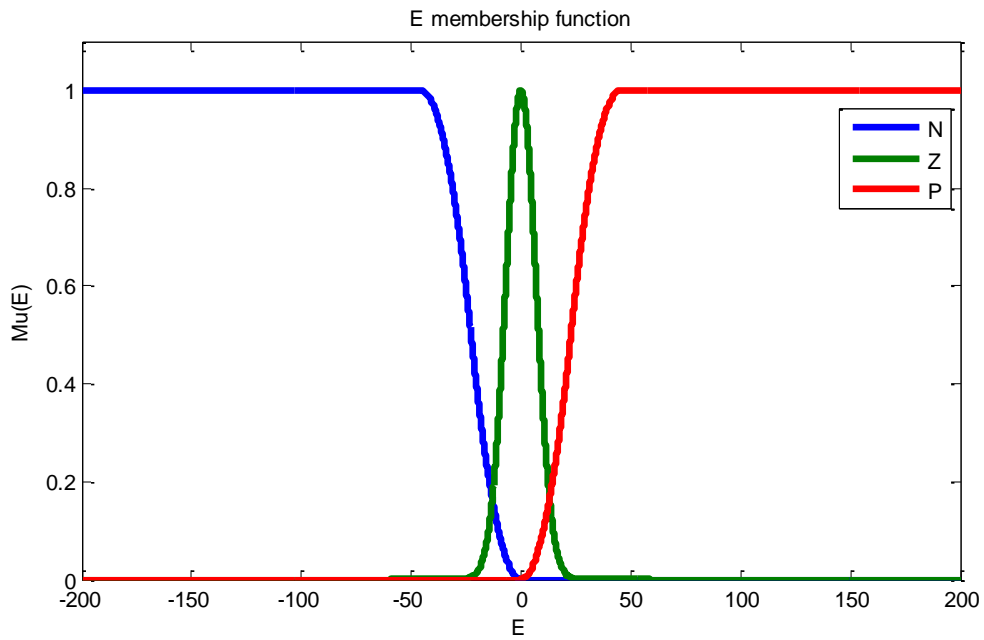
نمودار تابع هزینه^۱ بصورت زیر می باشد :



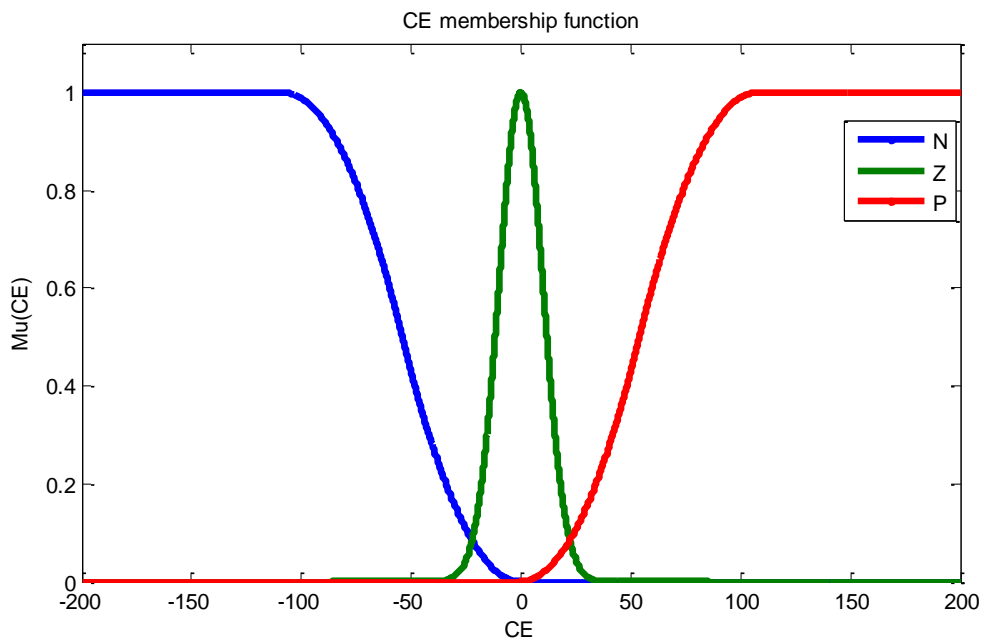
شکل (۱۲-۴) نمودار تابع هزینه

^۱ Cost function

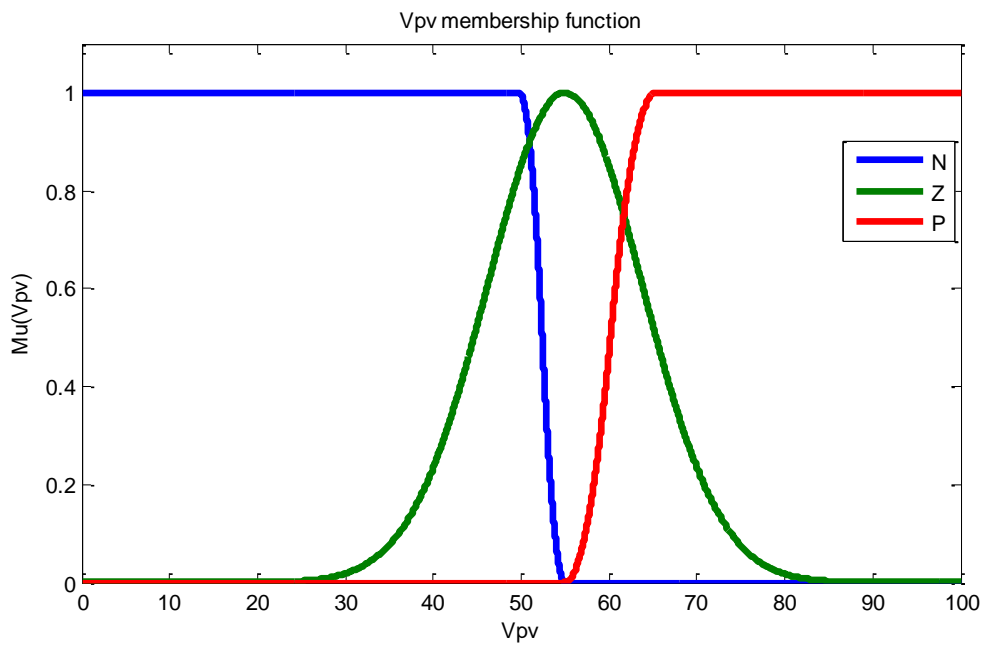
بعد از انجام بهینه‌سازی توسط الگوریتم ازدحام ذرات، توابع عضویت کنترل کننده فازی به صورت زیر بهینه می‌شوند :



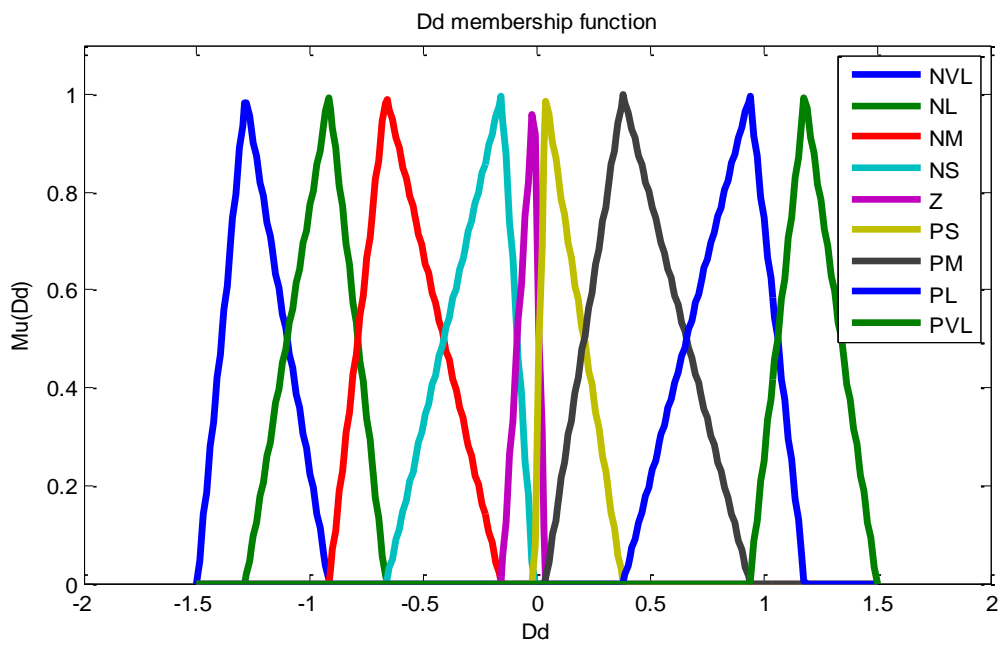
شکل (۴-۱۳) توابع عضویت گروه های فازی ورودی اول (E) بعد از بهینه سازی



شکل (۴-۱۴) توابع عضویت گروه های فازی ورودی دوم (CE) بعد از بهینه سازی



شکل (۴-۱۵) توابع عضویت گروه های فازی ورودی سوم (Vpv) بعد از بهینه سازی

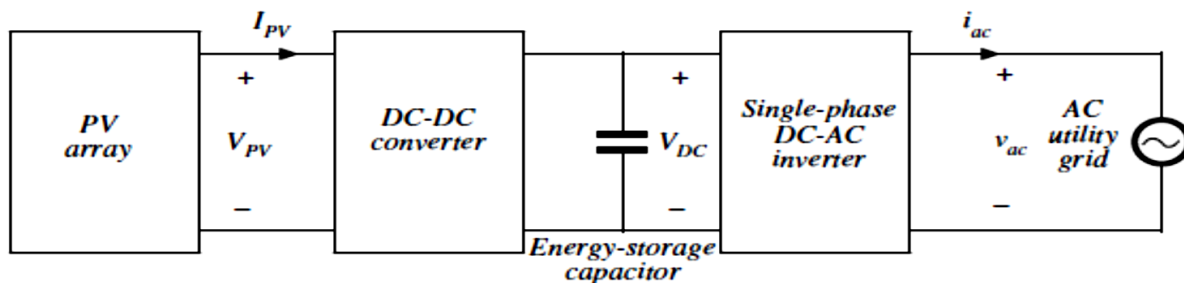


شکل (۴-۱۶) توابع عضویت گروه های فازی خروجی (ΔD) بعد از بهینه سازی

۵. فصل پنجم :

شبه سازی

مدار معادل کلی سیستم به صورت زیر می باشد:



شکل (۱-۵) مدار معادل کلی سیستم

مهمترین اجزای سیستم فتوولتائیک را ماژول فتوولتائیک، مبدل DC_DC ، واحد کنترل که وظیفه استحصال حداکثر توان از ماژول را بر عهده دارد و اینورتر جهت اتصال به شبکه تشکیل می دهند.

۲-۵ انتخاب ماژول فتوولتائیک

در این پروژه ماژول BP SX 150S برای شبیه سازی انتخاب شده است که شامل ۷۲ سلول سلیکونی سری بوده و حداکثر توان نامی آن 150 W می باشد [۴۰]. جدول زیر مشخصات این ماژول را نشان می دهد.

جدول (۱-۵) اطلاعات فنی ماژول

Solar EX BPSX150	
ماکزیمم توان	150 W
ماکزیمم ولتاژ	34.5 V
ماکزیمم جریان	4.35 A
جریان اتصال کوتاه	4.75 A
ولتاژ مدار باز	43.5 V
ضریب دمایی جریان	$0.065 \pm 0.015\% / ^\circ\text{C}$
ضریب دمایی ولتاژ	$-(160 \pm 20) \text{ mV} / ^\circ\text{C}$
تأثیر دما بر توان	$-(0.5 \pm 0.05)\% / ^\circ\text{C}$
دمای نامی عملکرد سلول	$47 \pm 2\ ^\circ\text{C}$

جدول (۲-۵) پارامتر های ماژول

ثابت بولتزمن	K=1.381e-23
بار الکتریکی	q=1.602e-19
ضریب ایده آل دیود	n=1.62
انرژی فاصله هوایی	Eg=1.12
ضریب دمایی	a=0.65e-3

در این سیستم برای شبیه سازی ماژول فتوولتائیک از بلوک متلب فانکشن استفاده شده است. این بلوک دارای دو ورودی شدت تابش برحسب کیلو وات بر متر مربع و دمای کاری سلول بر حسب سانتی گراد که به کلین تبدیل می شود، می باشد.

۳-۵ پارامترهای بوست

$$V_{in} = 70 \text{ v} , \quad V_{out} = 388 \text{ v} , \quad P = 1500 \text{ w} , \quad F = 25 \text{ KHZ}$$

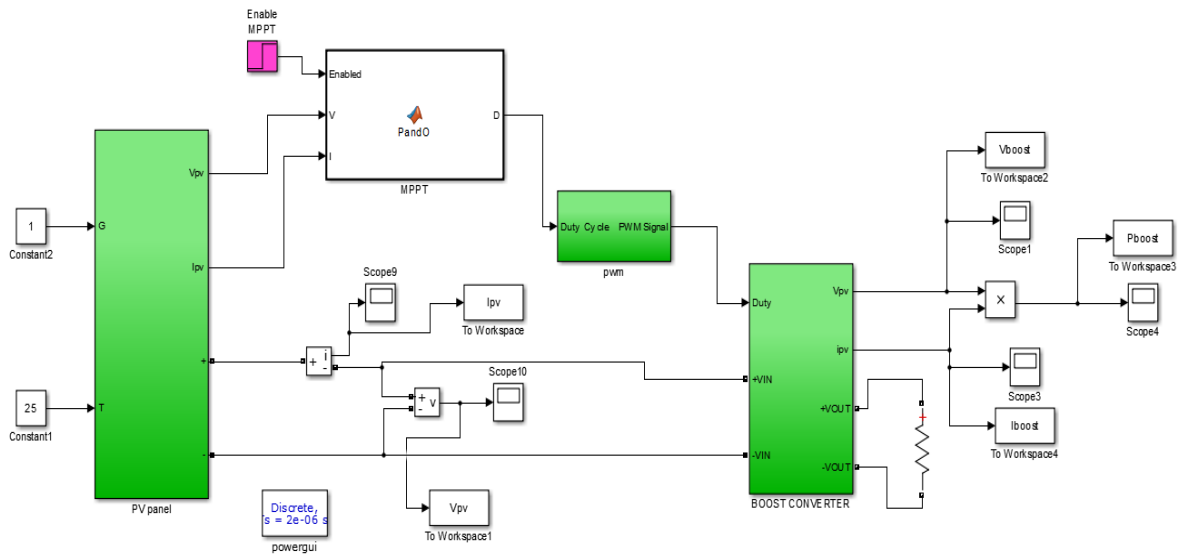
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)} \rightarrow (1-D) = 0.18 \rightarrow D = 0.819$$

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2 DR}{2F} \rightarrow L_{min} = 53 \mu H$$

$$C_{min} = \frac{DV_{out}}{2RF} \rightarrow C_{min} = 63.5 \mu f$$

$$R = \frac{V_{out}^2}{P} \rightarrow R = 100 \Omega$$

۴-۵ شبیه سازی سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه با بار اهمی



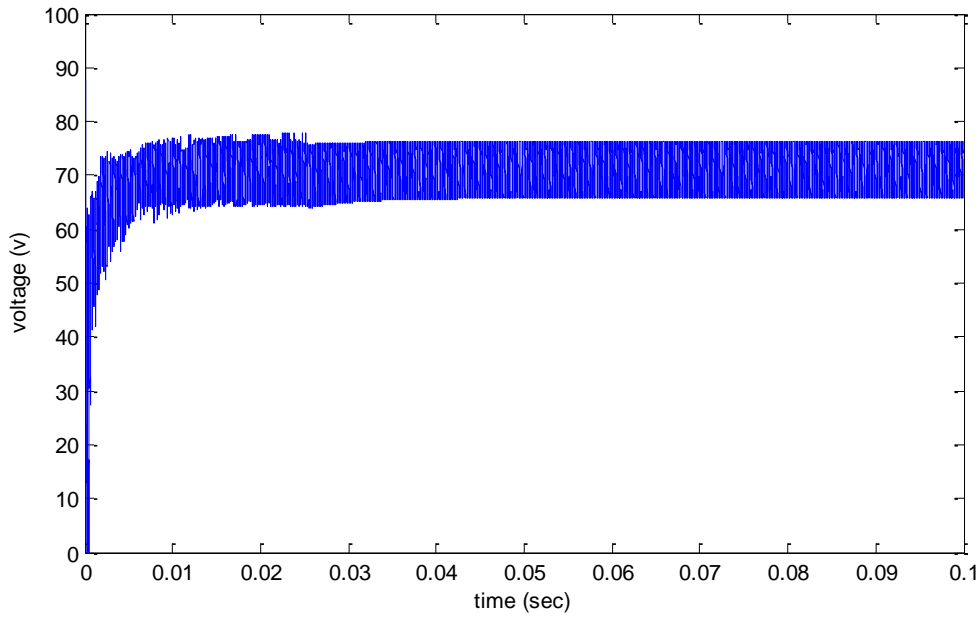
شکل (۴-۵) سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه با بار اهمی

MPPT نقطه بهینه را برای استخراج حداکثر توان ردیابی می کند. عملکرد PV در حداکثر

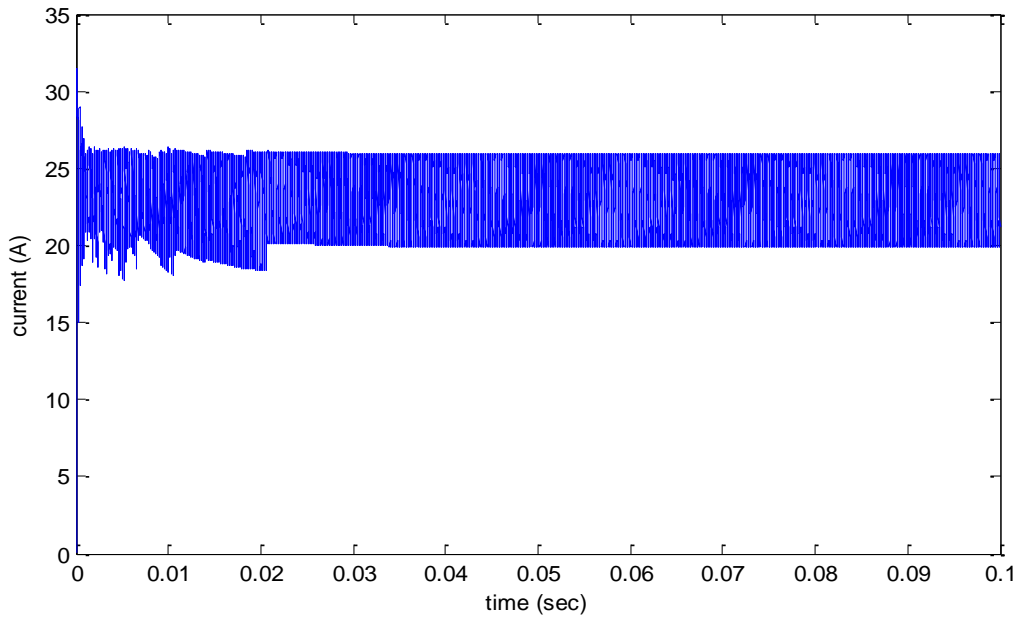
توان باید بوسیله کنترل سیکل کاری مبدل DC_DC متصل به آن انجام شود.

پارامترهای مبدل بوست :

$$L = 300 \mu H \quad , \quad C_1 = 5 \mu f \quad , \quad C_2 = 200 \mu f \quad , \quad R = 100 \Omega$$



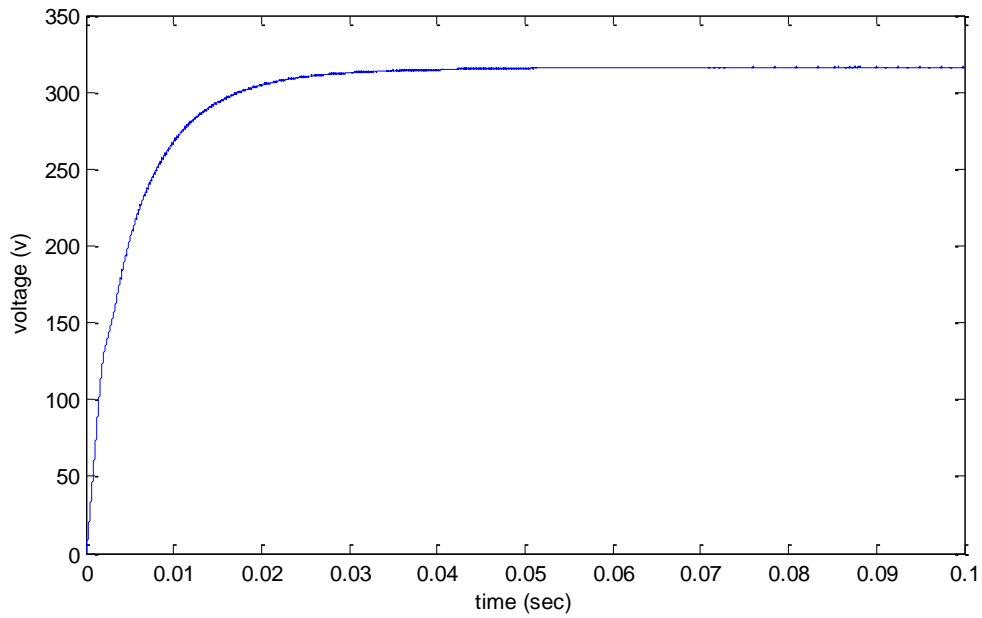
شکل (۳-۵) ولتاژ خروجی ماژول فتوولتائیک



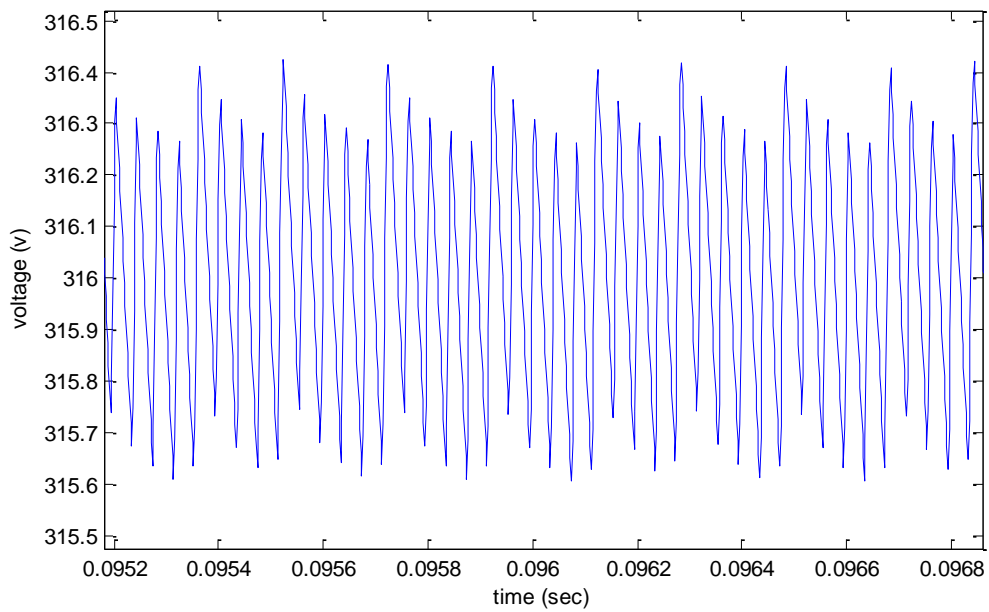
شکل (۴-۵) جریان خروجی ماژول فتوولتائیک

شبيه سازى تحت شرايط استاندارد (۲۵ °C دما ، $G = 1 \text{ kw/m}^2$ تابش):

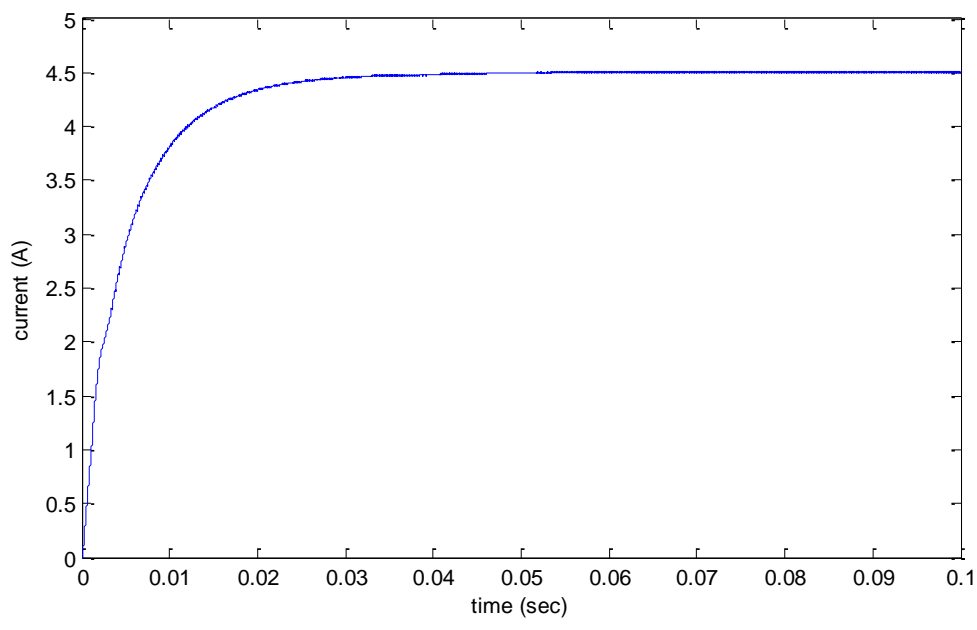
روش P&O :



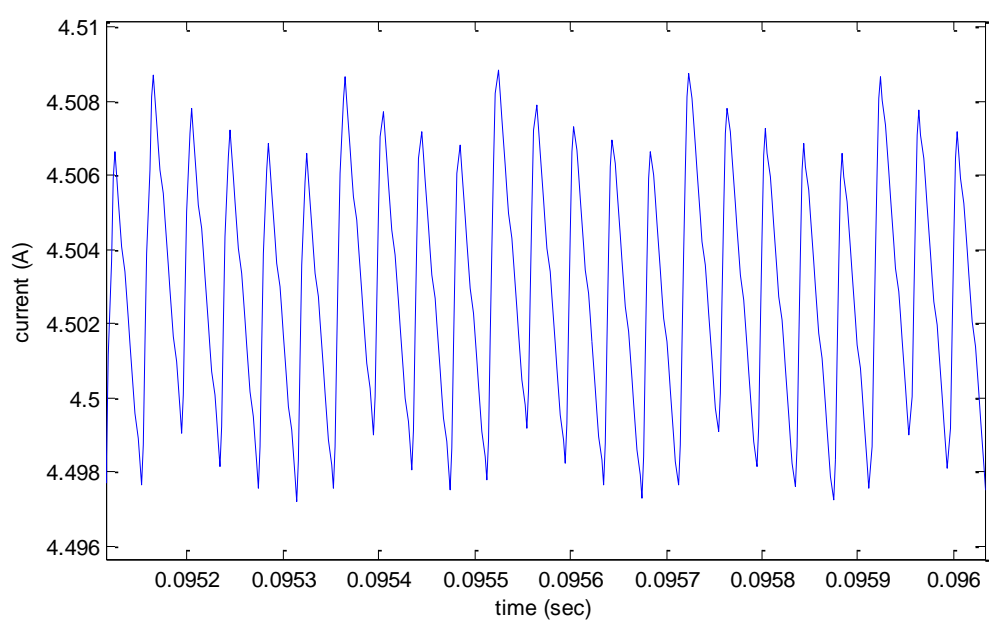
شکل (۵-۵) ولتاژ خروجى مبدل بوست با روش P&O



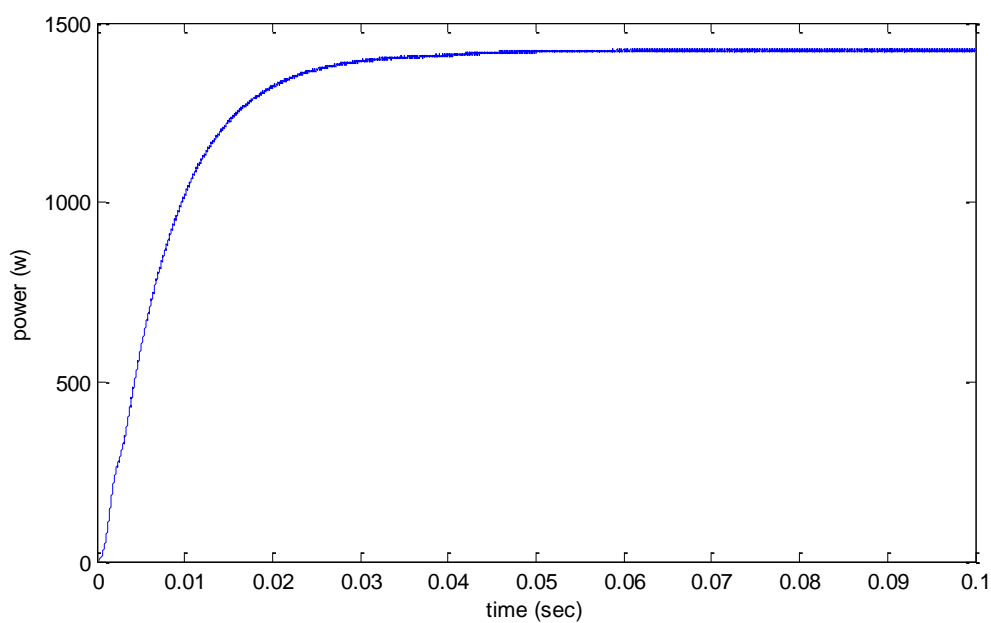
شکل (۶-۵) رييل ولتاژ خروجى مبدل بوست با روش P&O



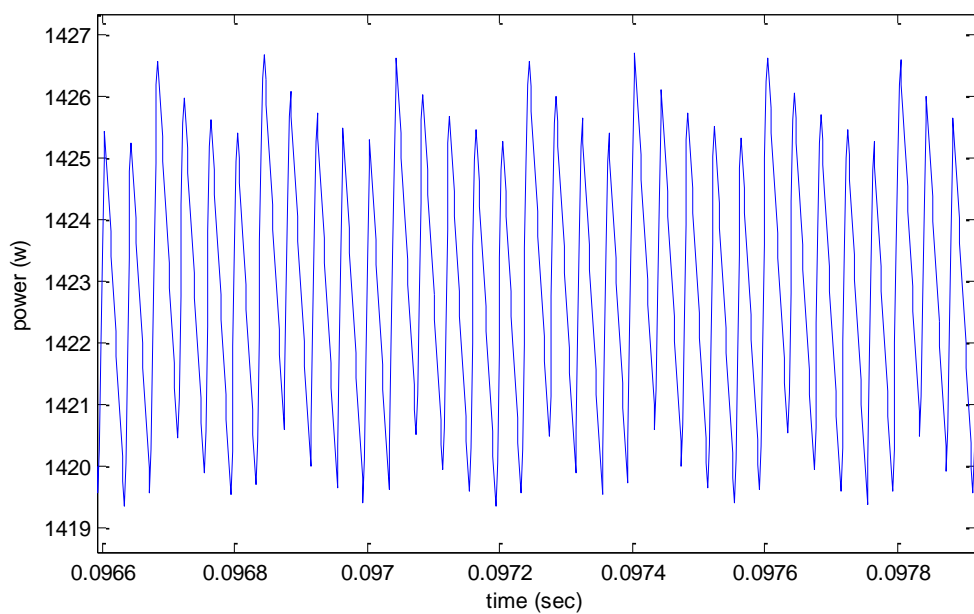
شکل (۷-۵) جریان خروجی مبدل بوست با روش P&O



شکل (۸-۵) ریبیل جریان خروجی مبدل بوست با روش P&O

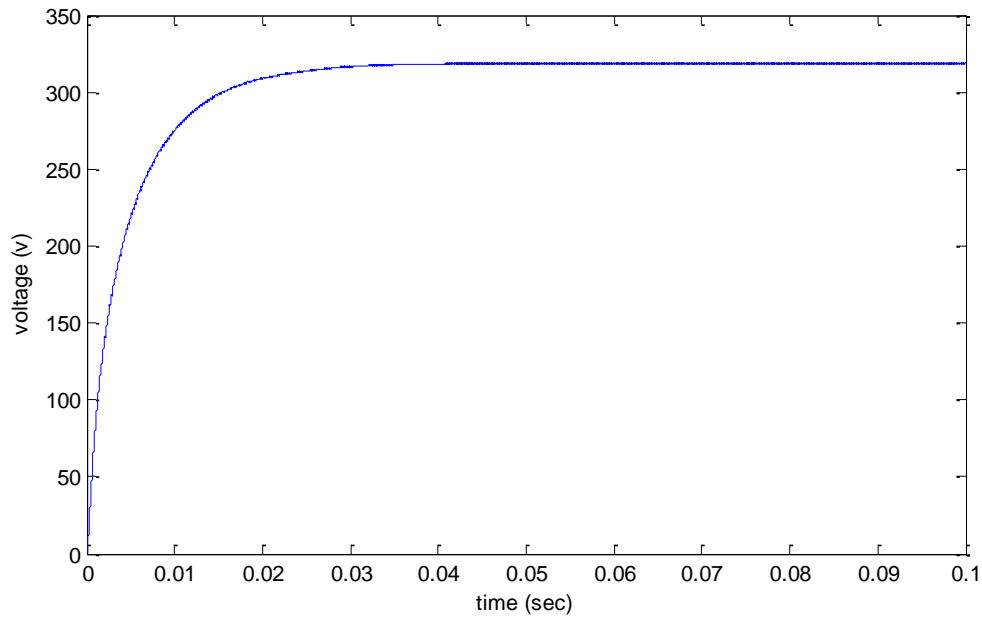


شکل (۹-۵) توان خروجی مبدل بوست با روش P&O

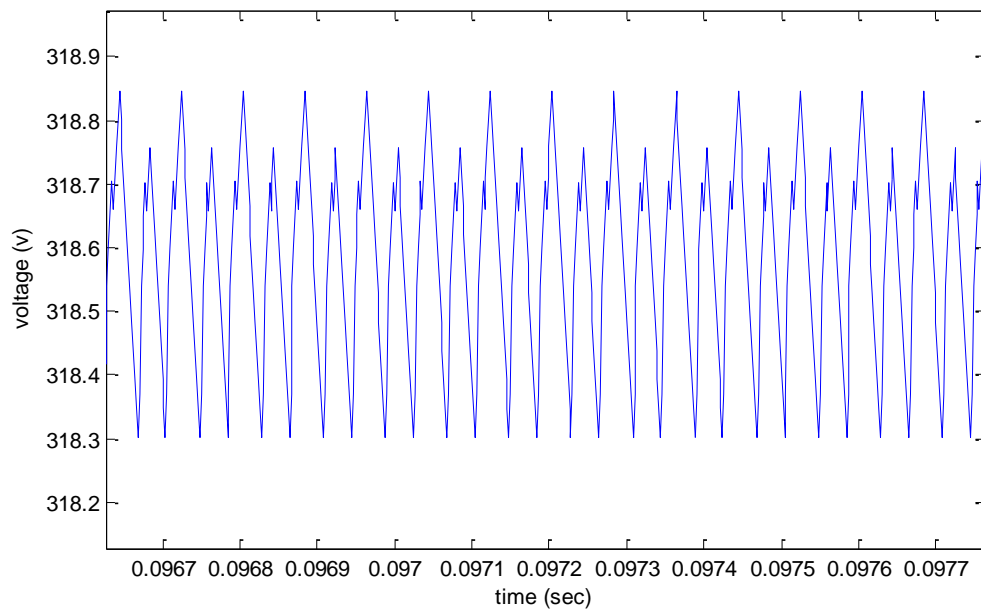


شکل (۱۰-۵) ریبیل توان خروجی مبدل بوست با روش P&O

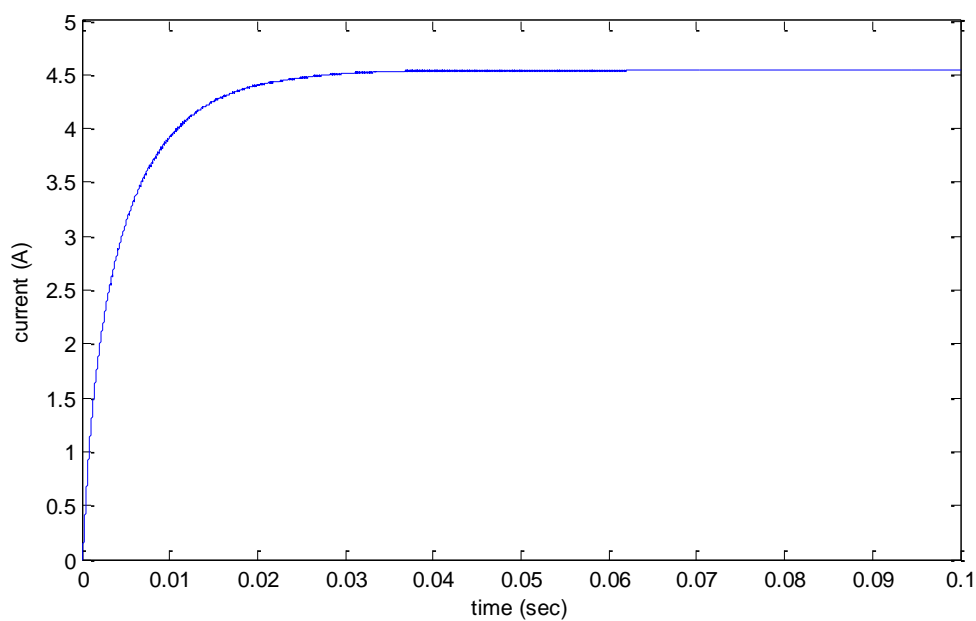
روش فازی بهینه :



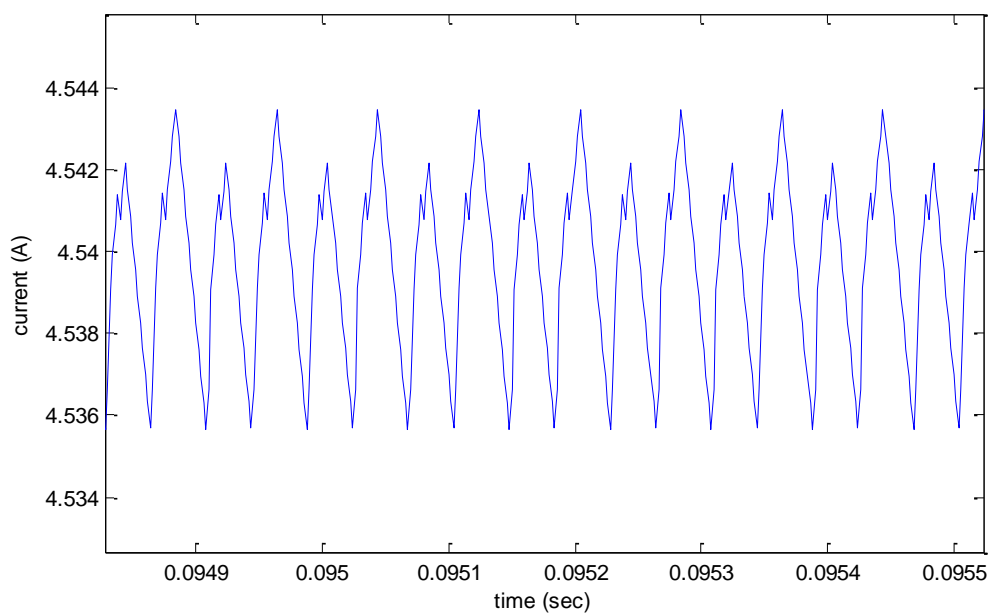
شکل (۱۱-۵) ولتاژ خروجی مبدل بوست با روش کنترل فازی-بهینه



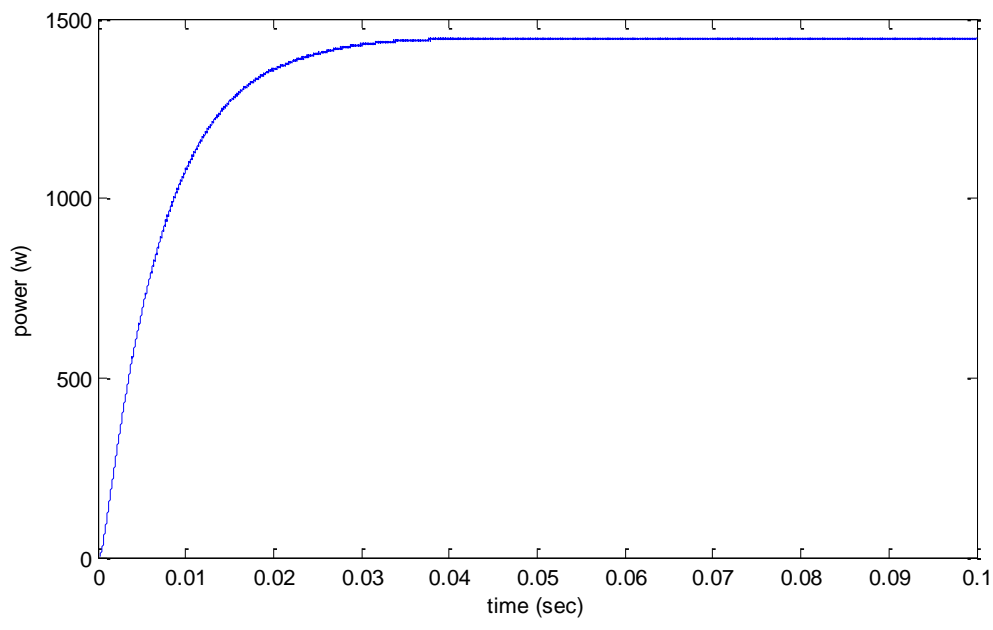
شکل (۱۲-۵) ریپل ولتاژ خروجی مبدل بوست با روش کنترل فازی-بهینه



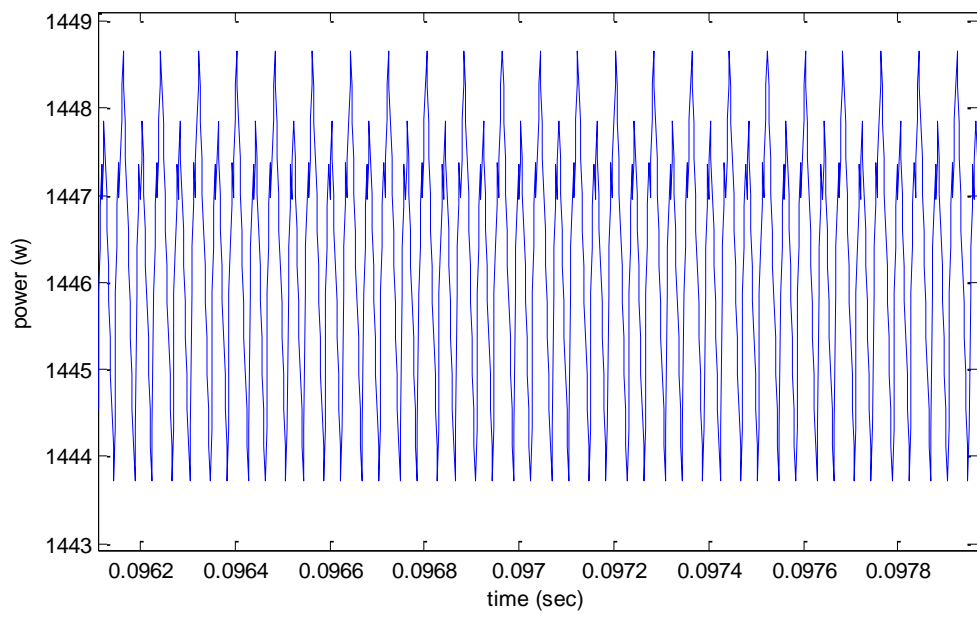
شکل (۱۳-۵) جریان خروجی مبدل بوست با روش کنترل فازی-بهینه



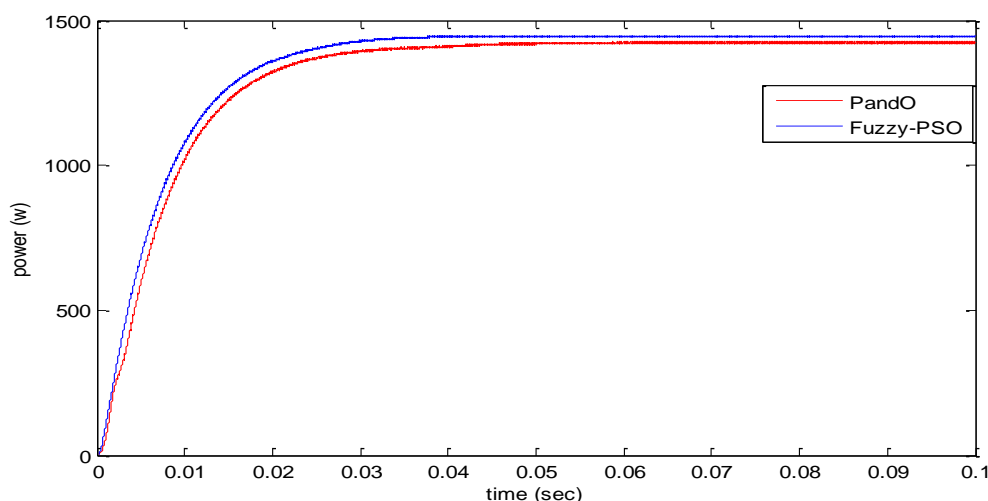
شکل (۱۴-۵) ریبیل جریان خروجی مبدل بوست با روش فازی-بهینه



شکل (۱۵-۵) توان خروجی مبدل بوست با روش کنترل فازی-بهینه



شکل (۱۶-۵) ریبیل توان خروجی مبدل بوست با روش کنترل فازی-بهینه



شکل (۱۷-۵) مقایسه توان ردیابی شده توسط روش فازی بهینه و روش P&O

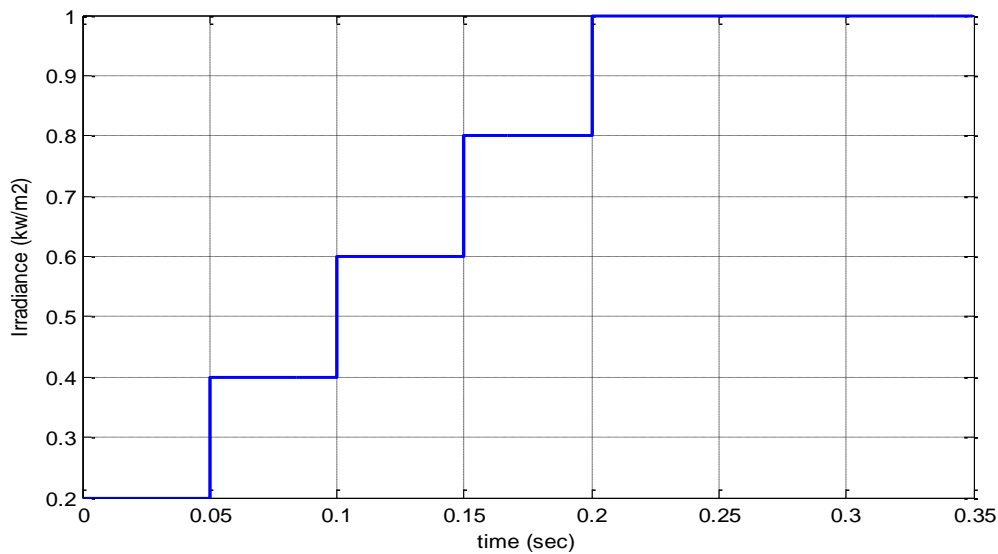
نتایج شبیه سازی :

در روش P&O با توجه به شکل های (۵-۶) و (۵-۸) و (۵-۱۰)، به ترتیب ریپل ولتاژ 0.8 ولت و ریپل جریان 0.012 آمپر و ریپل توان 7 وات می باشد و در روش کنترل فازی بهینه با توجه به شکل های (۵-۱۲) و (۵-۱۴) و (۵-۱۶)، به ترتیب ریپل ولتاژ 0.2 ولت و ریپل جریان 0.008 آمپر و ریپل توان 4.8 وات می باشد که نسبت به روش P&O عملکرد بهتری داشته است. مشاهده می شود که ریپل توان در روش P&O، 7 وات می باشد که با روش کنترل فازی بهینه ریپل توان به 4.8 وات کاهش یافته است و همچنین با توجه به شکل (۵-۱۷) مشاهده می شود توان ردیابی شده توسط کنترل کننده فازی بهینه مقدار بیشتری نسبت به روش P&O دارد که عملکرد مناسب روش پیشنهادی را اثبات می کند.

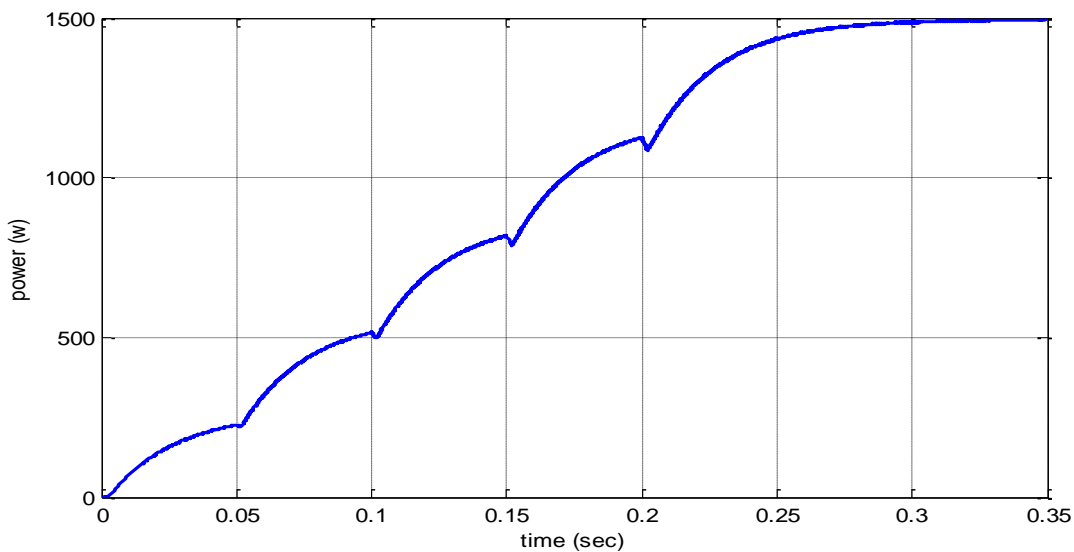
جدول (۵-۳) نتایج مقایسه بین روش های P&O و کنترل فازی و کنترل فازی-بهینه

	P&O	FUZZY-PSO
ریپل ولتاژ	0.8 V	0.2 V
ریپل جریان	0.012 A	0.008 A
ریپل توان	7 W	4.8 W

۵-۵ شبیه سازی تحت شرایط متفاوت دما و تابش

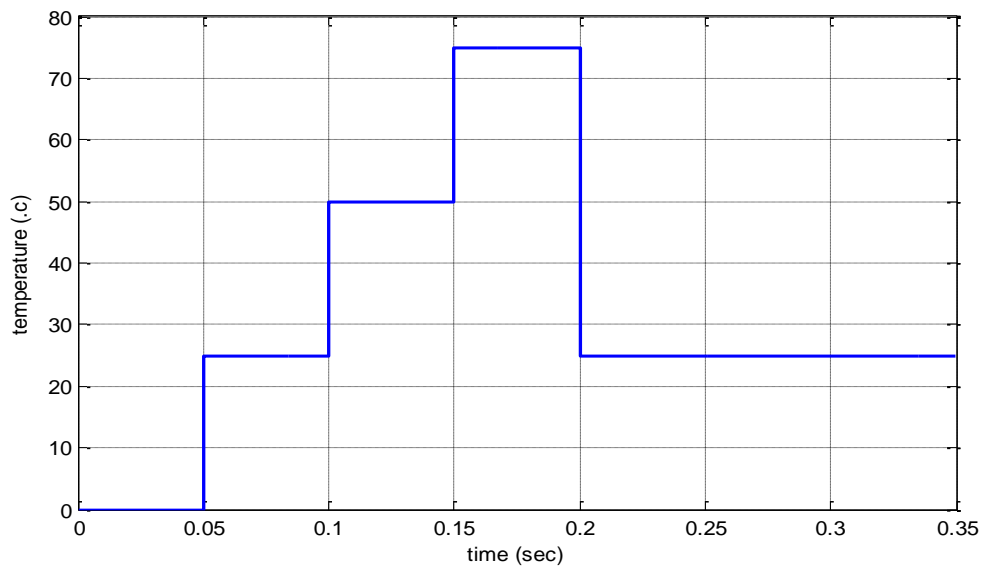


شکل (۱۸-۵) نمودار تغییرات تابش

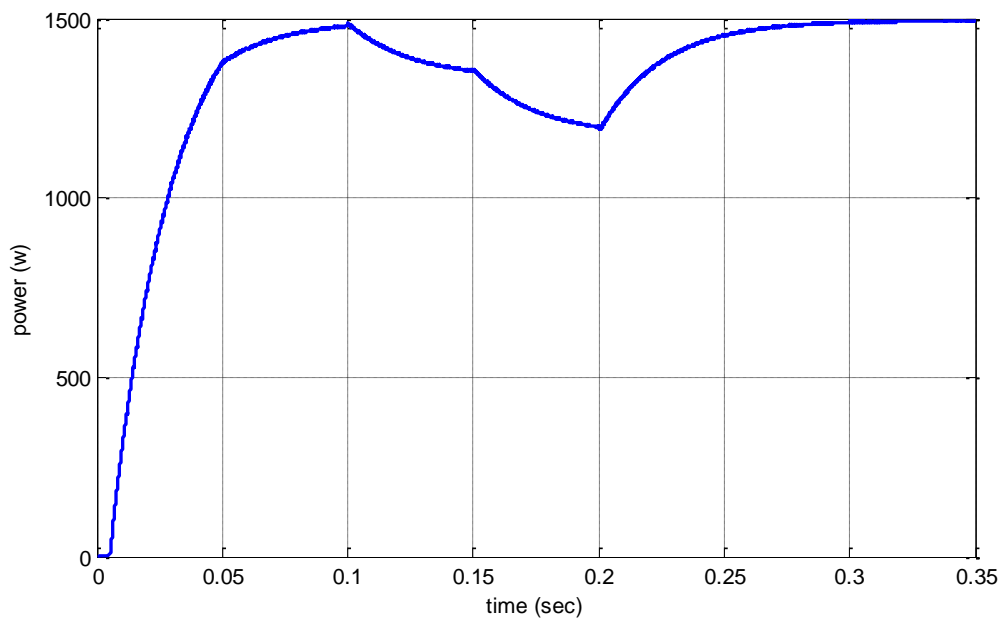


شکل (۱۹-۵) توان خروجی مبدل بوست با روش کنترل فازی-بهینه در تابش متغیر

با توجه به شکل (۱۹-۵) مشاهده می شود که در حداقل تابش (200 w/m^2) توان ردیابی شده تقریباً ۲۵۰ وات و در حداکثر تابش (1000 w/m^2) توان ردیابی شده تقریباً ۱۵۰۰ وات می باشد. در نتیجه عملکرد مناسب کنترل کننده فازی-بهینه پیشنهادی در تابش متغیر برای ردیابی نقطه حداکثر توان مشاهده می شود.



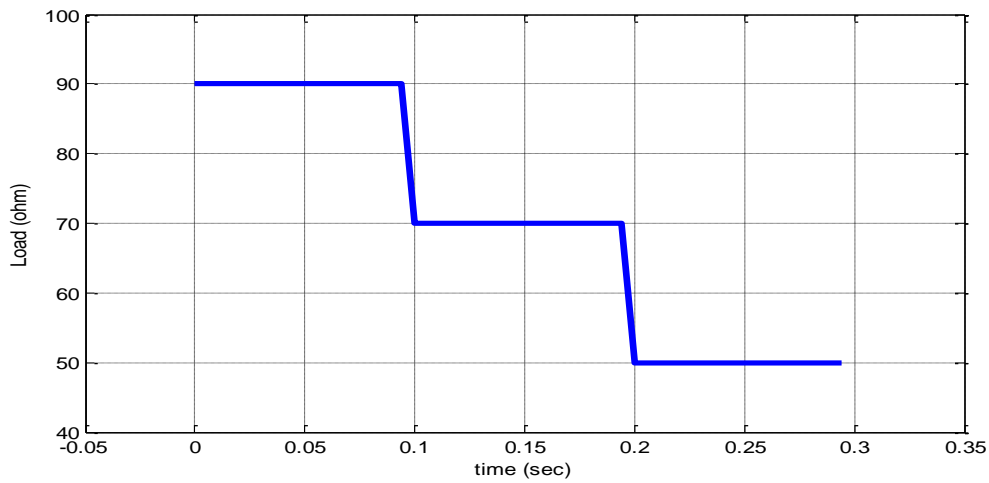
شکل (۲۰-۵) نمودار تغییرات دما



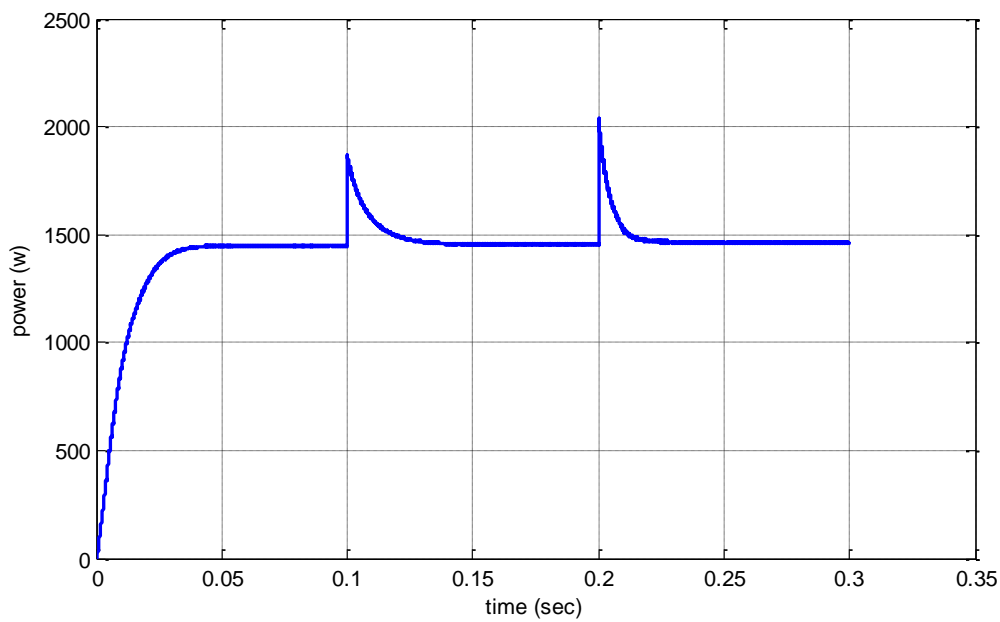
شکل (۲۱-۵) توان خروجی مبدل بوست با روش کنترل فازی-بهینه در دمای متغیر

با توجه به شکل (۲۱-۵) مشاهده می شود که دمای ۲۵ درجه سانتیگراد بهترین دما برای عملکرد سلول فتوولتائیک برای تولید حداکثر توان می باشد و افزایش دما باعث کاهش توان خروجی سلول فتوولتائیک می شود. با توجه به تغییرات دما عملکرد مناسب کنترل کننده فازی-بهینه پیشنهادی برای ردیابی نقطه حداکثر توان مشاهده می شود.

۶-۵ شبیه سازی تحت تغییرات بار مقاومتی



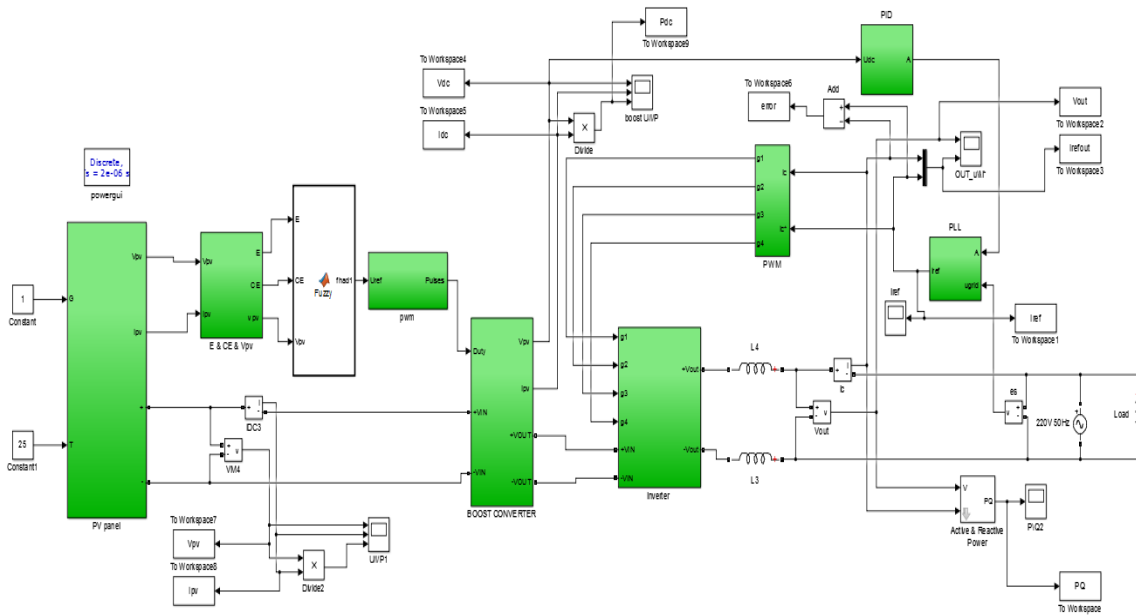
شکل (۲۲-۵) نمودار تغییرات بار



شکل (۲۳-۵) توان خروجی مبدل بوست با روش فازی-بهینه در تغییرات بار

با توجه به شکل (۲۳-۵) مشاهده می شود که کنترل کننده فازی بهینه در تغییرات بار مقاومتی نیز ردیابی نقطه حداکثر توان را به خوبی انجام می دهد و به ازای بارهای مقاومتی مختلف، توان خروجی به مقدار حداکثر خود رسیده است.

۷-۵ شبیه سازی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه تک فاز



شکل (۲۴-۵) سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه با کنترل کننده فازی-بهینه

در ابتدا توان خروجی آرایه فتوولتائیک توسط یک مبدل DC_DC تنظیم شده و سپس توسط اینورتر توان مستقیم به توان متناوب تبدیل می‌شود. اینورتر منبع ولتاژ تک فاز برای اتصال به شبکه توزیع ولتاژ پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف تزریق حداکثر توان تولیدی سیستم فتوولتائیک به شبکه می‌باشد. در نتیجه جریان تزریقی باید هم فاز با جریان شبکه باشد. شبکه مورد استفاده شامل حلقه قفل فاز (PLL)^۱ برای همگام سازی توان تزریقی به شبکه و همچنین یک فیلتر L برای کاهش هارمونیک های نامطلوب می‌باشد. حلقه قفل فاز برای ردیابی ولتاژ شبکه حتی در شرایط هارمونیک های شدید استفاده می‌شود.

^۱ Phase-Locked Loop

۵-۷-۱ همگام سازی با شبکه

یکی از مهم ترین جنبه های سیستم های تولید پراکنده همگام سازی با شبکه می باشد. مازول فتولتائیک و اینورتر باید توانایی تطبیق با فرکانس و فاز شبکه را داشته باشند. دو روش برای این کار وجود دارد. روش کنترل جریان و روش کنترل ولتاژ [۴۱].

برای همگام سازی سیستم فتولتائیک متصل به شبکه در این پایان نامه از روش کنترل جریان هیستریزس استفاده کرده ایم.

۵-۷-۱-۱ روش کنترل جریان هیستریزس

هنگامی که اینورتر در حالت متصل به شبکه توزیع قرار دارد از روش کنترل جریان برای همگام سازی استفاده می شود. ابتدا ولتاژ شبکه به PLL فرستاده می شود تا فرکانس و فاز شبکه معین گردند و سپس با استفاده از فرکانس و فاز تعیین شده، جریان مرجع را ایجاد می کنیم و سپس جریان مرجع با جریان شبکه مقایسه شده و با روش هیستریزس و تعیین باند مشخص، سوئیچینگ گیت های اینورتر را انجام می شود. همچنین برای کنترل دامنه جریان مرجع از یک کنترل کننده PID^۱ استفاده می شود. ضریب به دست آمده از کنترل کننده PID را در جریان مرجع، ضرب نموده تا ولتاژ ورودی اینورتر از یک مقدار دلخواه فراتر نرود و کنترل شود.

۵-۷-۲ کنترل کننده PID

کنترل کننده PID همانطور که مشخص است، کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتق گیر است. کنترل کننده PID به گونه ای عمل می کند تا خطای ورودی های کنترل کننده را حداقل کند. عملکرد کنترل کننده PID بستگی به ضرایب K_p و K_i و K_d دارد.

^۱ Proportional-integral-derivative

از لحاظ محاسباتی کنترل کننده های PID دارای ۳ مقدار ریاضیاتی زیر می باشد :

$$u(t) = k_p e(t) \quad (۱-۵)$$

$$u(t) = \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (۲-۵)$$

$$u(t) = k_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (۳-۵)$$

$$\rightarrow u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (۴-۵)$$

از $e(t)$ خطا و $\int_0^t e(t) dt$ سرعت خطا و $\frac{de(t)}{dt}$ تاریخچه خطا می باشند.

T_i زمان انتگرال گیری و $\frac{1}{T_i}$ نرخ انتگرال گیری است.

مهمترین بخش در کنترل فرآیندهای PID به دست آوردن ضرایب آن می باشد. روش زیگلر نیکولز یک روش تجربی برای به دست آوردن ضرایب PID می باشد که به دو صورت حلقه بسته و حلقه باز مورد استفاده قرار می گیرند [۴۲]. در روش حلقه باز به این صورت عمل می شود که ابتدا باید فیدبک را از مدار باز کرد تا مدار به یک حلقه باز تبدیل شود. سپس ورودی پله را به مدار اعمال می کنیم و پارامترهای مدل سازی را اندازه گیری می کنیم. در پایان از طریق جدول زیر پارامترهای کنترلی را انتخاب می کنیم. در این پروسه باید بهره فرآیند، تاخیر و ثابت زمانی فرآیند در نظر گرفته شود:

جدول (۴-۵) پارامترهای کنترل کننده PID در روش حلقه باز

Ziegler – Nichols	k_c	T_i	T_d
P	$T/(K_p \cdot t_d)$	-	-
PI	$0.9T/(K_p \cdot t_d)$	$3.3t_d$	-
PID	$1.2T/(K_p \cdot t_d)$	$2t_d$	$0.5t_d$

جدول بالا با توجه به مدل سیستمی زیر کار می کند:

$$\frac{ke^{-tds}}{Ts+1} \quad (۵-۵)$$

در روش حلقه بسته ابتدا باید انتگرال گیر و مشتق گیر کنترل کننده را حذف کنیم . در این حالت فقط گین تناسبی فعال می باشد (یعنی T_i را زیاد و T_d را کم می کنیم) آرام آرام K_{cu} را تا زمانی که سیستم مدار بسته دچار نوسان دائم شود، زیاد می کنیم . سپس دوره تناوبی این نوسانات را (P_u) اندازه گیری می کنیم و ضرایب تصحیح شده را برای هر کنترل کننده از جدول زیر استخراج می کنیم :

جدول (۵-۵) پارامترهای کنترل کننده PID در روش حلقه بسته

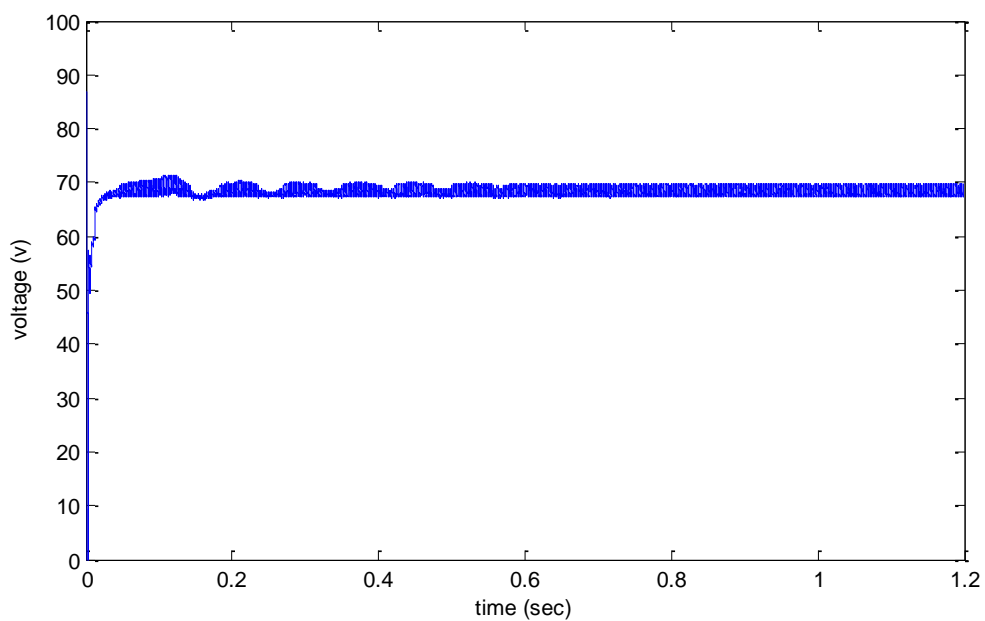
<i>Ziegler – Nichols</i>	k_c	T_i	T_d
<i>P</i>	$0.5K_{cu}$	-	-
<i>PI</i>	$0.45K_{cu}$	$P_u/1.2$	-
<i>PID</i>	$0.6K_{cu}$	$P_u/2$	$P_u/8$

پارامتر های مدار :

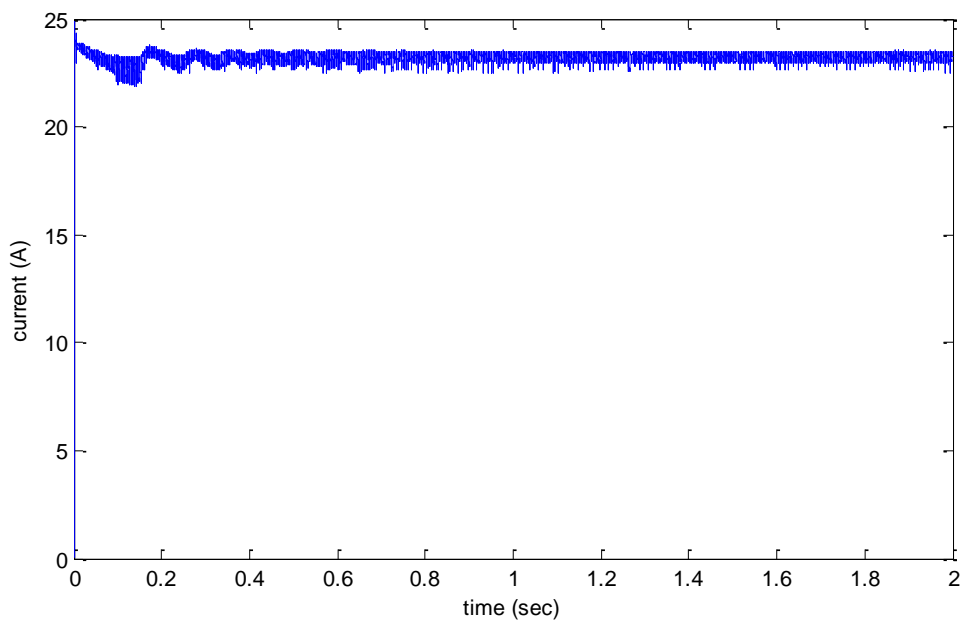
بوست $\rightarrow L = 5\text{ mH}$, $C_1 = 5\ \mu\text{f}$, $C_2 = 1000\ \mu\text{f}$

فیلتر $\rightarrow L = 10\text{ mH}$

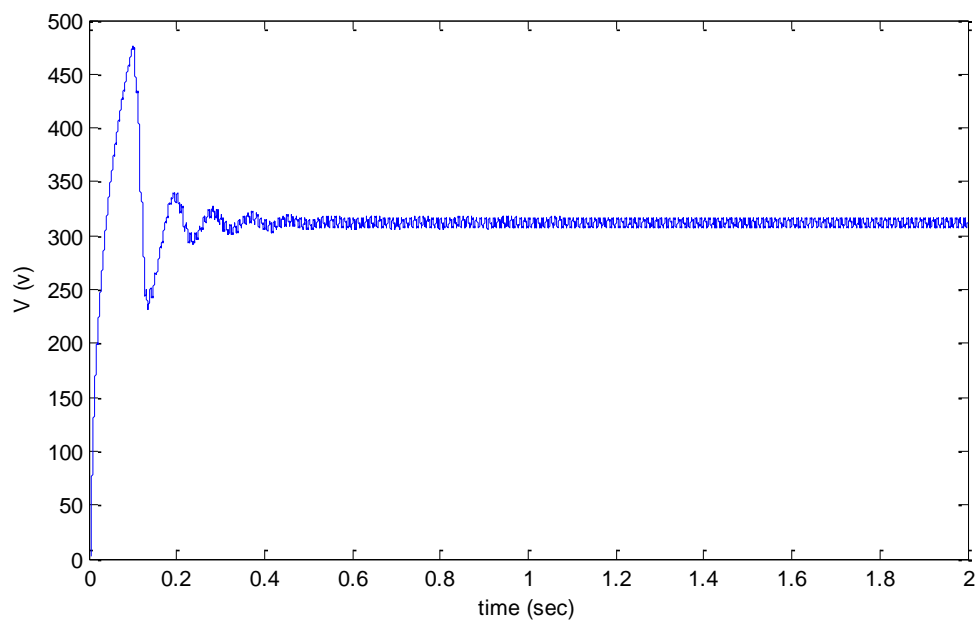
ضرایب PID $\rightarrow K_p = 0.00001$, $K_d = 0.000015$, $K_i = 0.000015$



شکل (۵-۲۵) ولتاژ خروجی ماژول فتوولتائیک

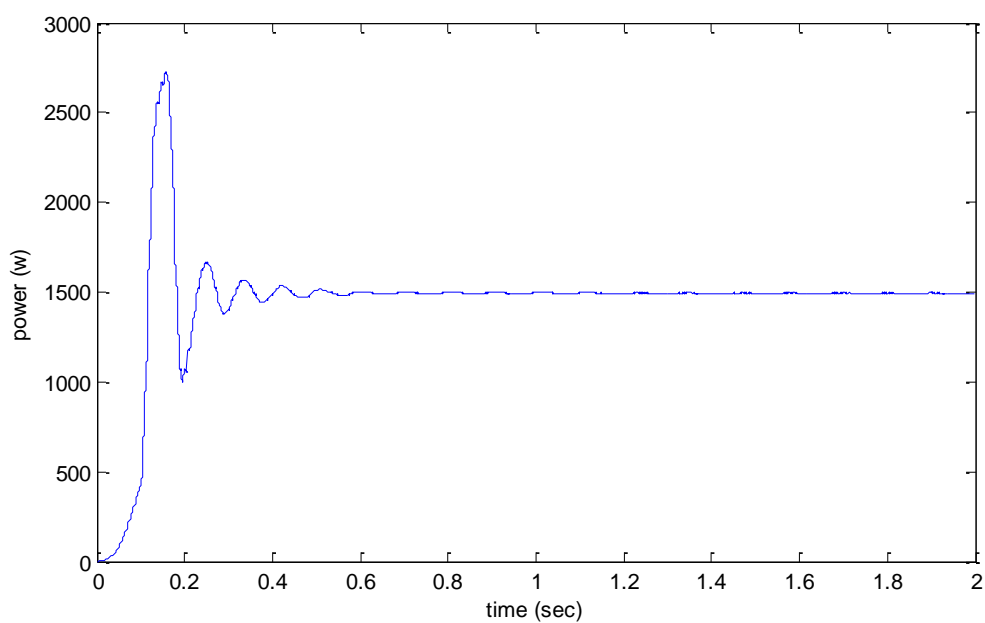


شکل (۲۶-۵) جریان خروجی مازول فتوولتائیک

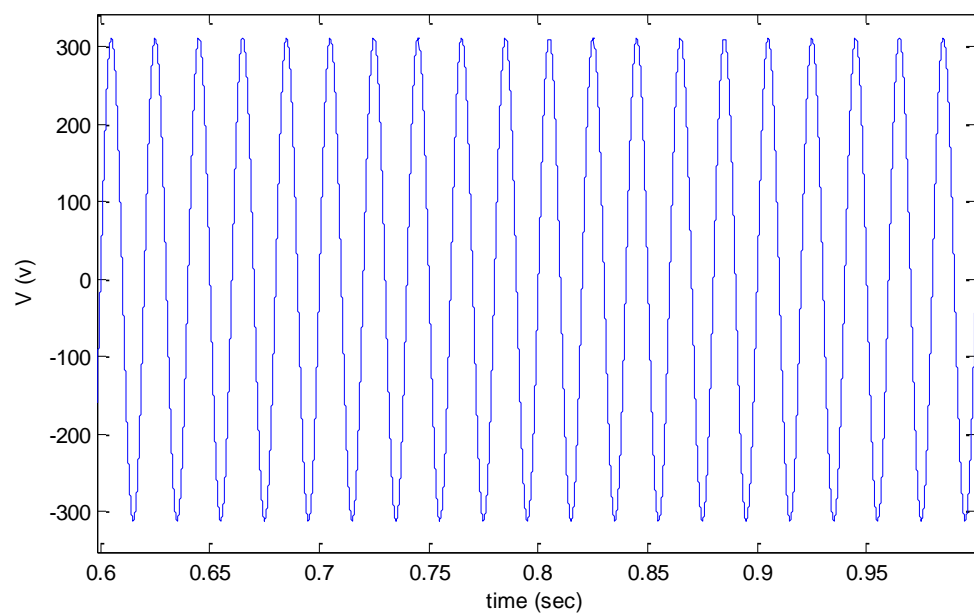


شکل (۲۷-۵) ولتاژ خروجی مبدل بوست

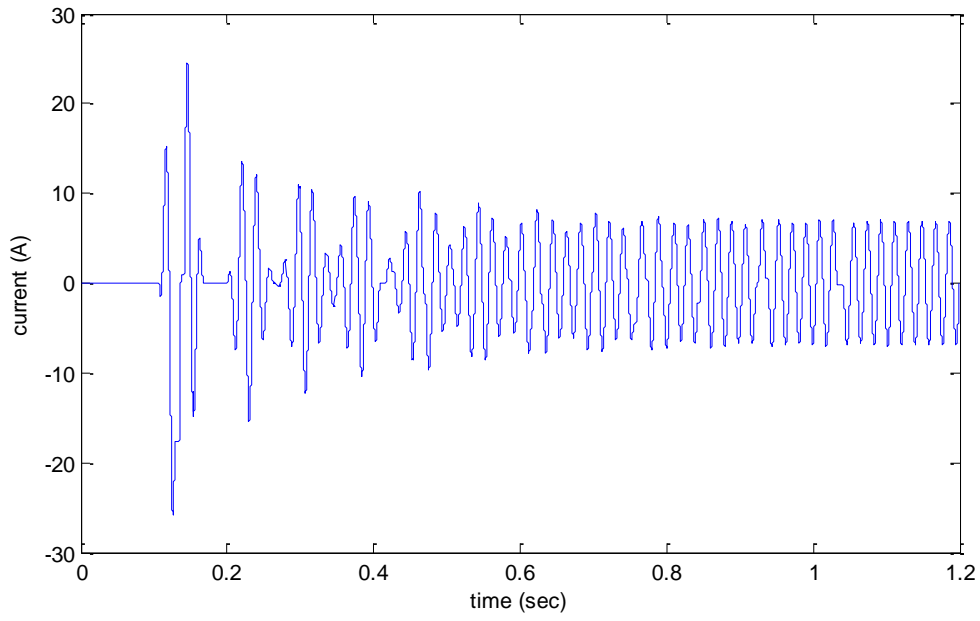
مشاهده می‌شود که ولتاژ خروجی مبدل بوست توسط کنترل کننده PID در مقدار مناسب کنترل شده است.



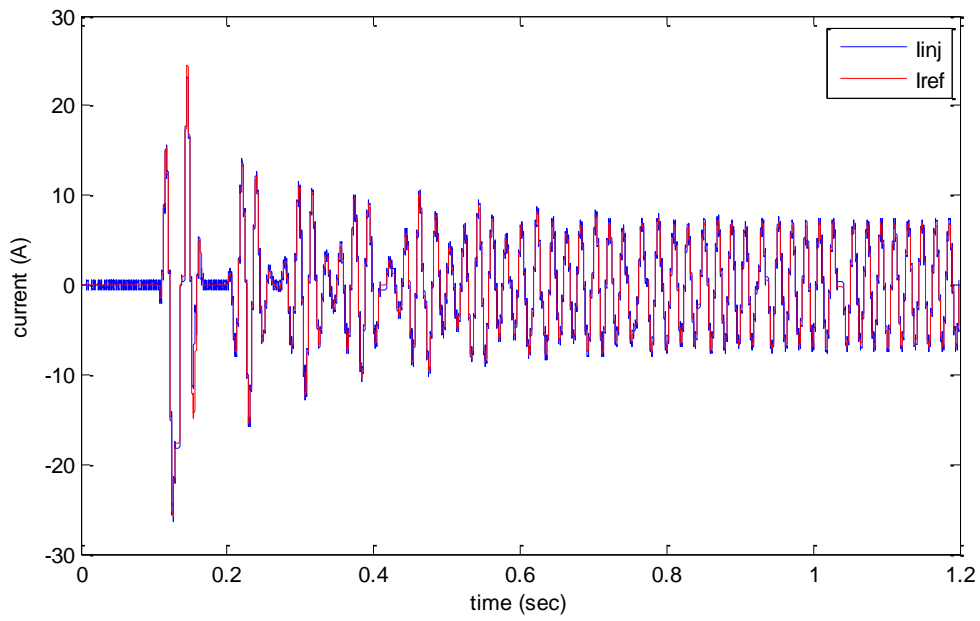
شکل (۲۸-۵) توان خروجی مبدل بوست



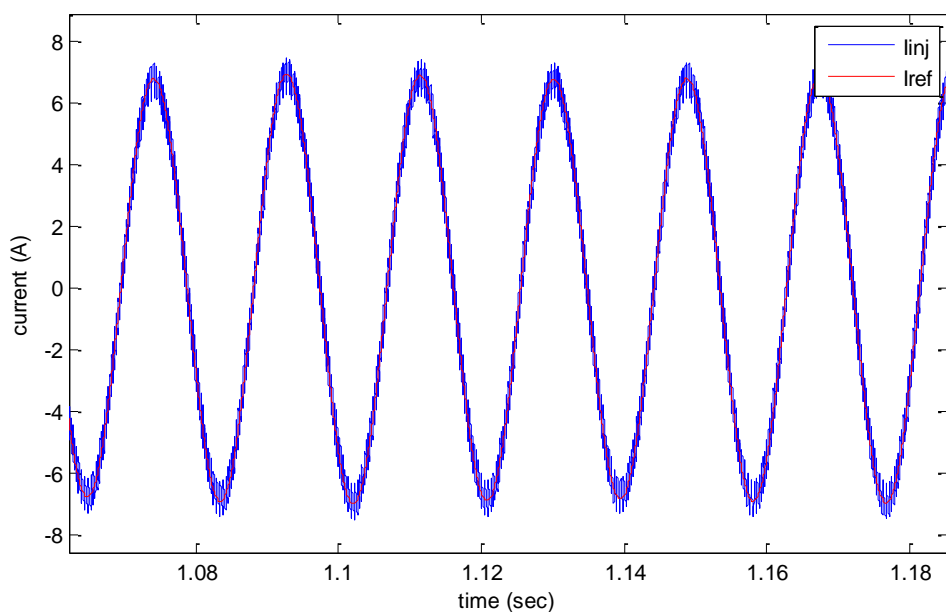
شکل (۲۹-۵) ولتاژ شبکه



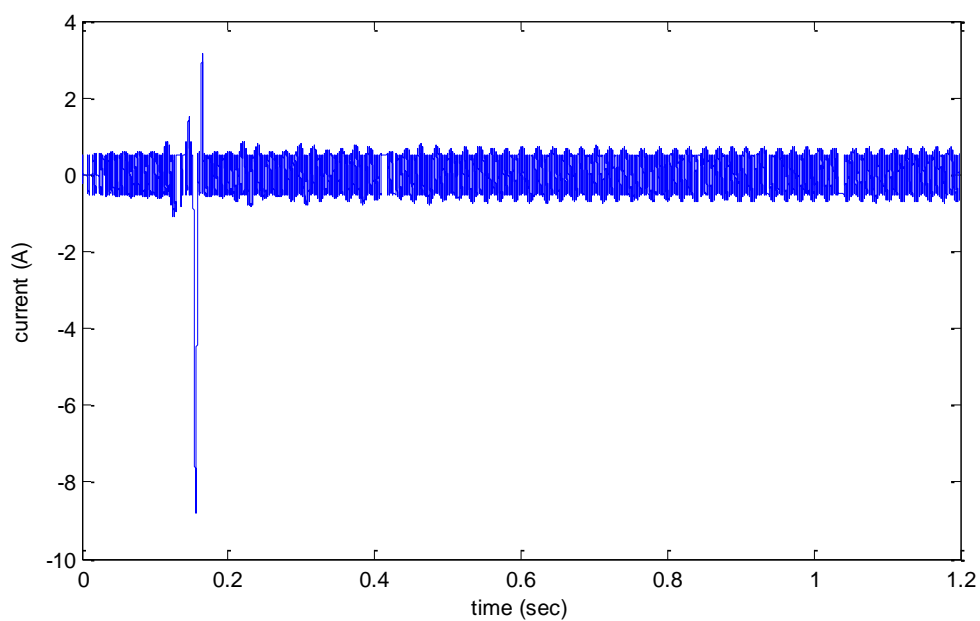
شکل (۳۰-۵) جریان مرجع



شکل (۳۱-۵) جریان مرجع به همراه جریان تزریقی به شبکه

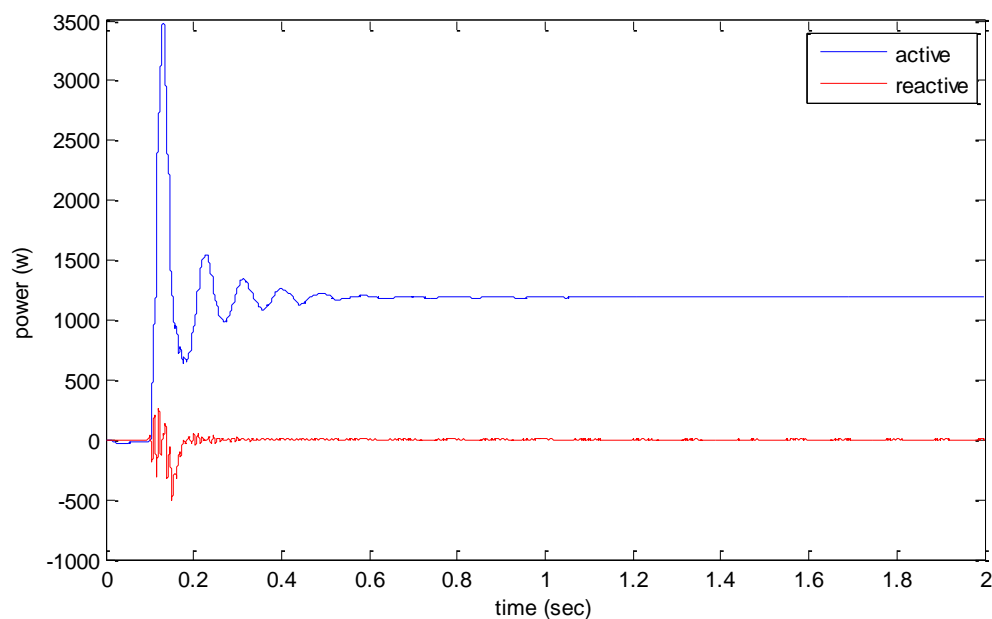


شکل (۳۲-۵) ردیابی جریان مرجع توسط جریان تزریقی به شبکه



شکل (۳۳-۵) مقدار خطای ردیابی جریان مرجع توسط جریان تزریقی به شبکه

با توجه به شکل (۳۲-۵) مشاهده می شود که جریان تزریقی به شبکه، جریان مرجع را به خوبی دنبال می کند و با توجه به شکل (۳۳-۵) خطای ردیابی تقریباً به صفر رسیده است.



شکل (۳۴-۵) توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه

شکل (۳۴-۵) توان های تزریقی به شبکه را نشان می دهد و مشاهده می شود که توان راکتیو تزریقی صفر بوده و توان اکتیو تزریقی به شبکه تقریباً ۱۳۰۰ وات می باشد. با توجه به اینکه مبدل بوست و اینورتر ایده آل فرض نشده اند و تلفات توان دارند، مشاهده می شود از ۱۵۰۰ وات توان تولیدی سیستم فتوولتائیک، تقریباً ۱۳۰۰ وات توان اکتیو به شبکه تزریق شده است.

۶. فصل ششم :

نتیجه گیری و پیشنهادات

نتایج :

در این پایان نامه روش هوشمند کنترل فازی جهت ردیابی نقطه حداکثر توان به منظور بهبود نوسانات توان و افزایش راندمان سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه ارائه شد و نتایج آن با روش مرسوم P&O مقایسه گردید و برتری روش کنترل فازی مشاهده گردید و همچنین با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO، پارامترهای کنترل کننده فازی به منظور کلیدزنی مناسب بهینه‌سازی شد. کنترل کننده فازی-بهینه پیشنهادی در نقطه حداکثر توان، ریپل را به حداقل مقدار رسانید و با وجود تغییرات دما و تابش عملکرد مناسب کنترل کننده فازی-بهینه پیشنهادی جهت ردیابی نقطه حداکثر توان مشاهده شد. همچنین با کنترل فازی-بهینه طراحی شده، سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه پیاده‌سازی شد و حداکثر توان تولیدی به شبکه تزریق گردید.

پیشنهادات :

- ✓ طراحی کنترل کننده با ترکیب روش عصبی و فازی و استفاده از الگوریتم های بهینه سازی برای ردیابی حداکثر توان
- ✓ به جای استفاده از مبدل بوست و اینورتر به صورت مجزا، از بوست-اینورتر استفاده کنیم و در نتیجه با کم شدن اجزای سیستم، هزینه را کاهش دهیم و همچنین برای کنترل آن از کنترل کننده فازی استفاده نماییم.

مراجع

- [1] International Energy Outlook , 2014 , US Energy Information Administration
Available : <http://www.eia.gov/forecasts/ieo>
- [2] L.D. Partian, Solar Cells and Their Applications, John Wiley & Sons, New York, 1995
- [3] M. R. Patel, Wind and Solar Power Systems, Crc Press, 1995.
- [4] IEA, "World Energy Outlook 2004", International Energy Agency, Paris, IEA/OECD, 2004
- [5] سمیرا منشی پور، ربابه عبداللهی، ارزیابی اقتصادی پکیج برق خورشیدی در برق رسانی به مناطق فاقد دسترسی به شبکه سراسری برق ، بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق PSC 2007
- [6] Yaghoubi, M. (2008, November). Studies of environmental compatible buildings using domed Roof architectures for passive cooling in hot arid regions of Iran. In *Proceedings of, Sustainable Energy Development in Asia Conference, Beijing, China.*
- [7] Sivagamasundari, M. S., Mary, D. P. M., & Velvizhi, V. K. (2013). Maximum Power Point Tracking For Photovoltaic System by Perturb and Observe Method Using Buck Boost Converter. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2(6).
- [8] Jain, S., & Agarwal, V. (2004). A new algorithm for rapid tracking of approximate maximum power point in photovoltaic systems. *Power Electronics Letters, IEEE*, 2(1), 16-19.
- [9] Kobayashi, K., Takano, I., & Sawada, Y. (2006). A study of a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions. *Solar energy materials and solar cells*, 90(18), 2975-2988.
- [10] Irisawa, K., Saito, T., Takano, I., & Sawada, Y. (2000). Maximum power point tracking control of photovoltaic generation system under non-uniform insolation by means of monitoring cells. In *Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE* (pp. 1707-1710). IEEE.

- [11] Harada, K., & Zhao, G. (1993). Controlled power interface between solar cells and AC source. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 8(4), 654-662.
- [12] Costogno, E. N., & Lindena, S. (1976). Comparison of candidate solar array maximum power utilization approaches.
- [13] ESRAM, T., Kimball, J. W., Krein, P. T., Chapman, P. L., & Midya, P. (2006). Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 21(5), 1282-1291.
- [14] Noguchi, T., Togashi, S., & Nakamoto, R. (2000). Short-current pulse based adaptive maximum-power-point tracking for photovoltaic power generation system. In *Industrial Electronics, 2000. ISIE 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on* (Vol. 1, pp. 157-162). IEEE.
- [15] Masoum, M. A., Dehbonei, H., & Fuchs, E. F. (2002). Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 17(4), 514-522.
- [16] Hiyama, T., Kouzuma, S., & Imakubo, T. (1995). Identification of optimal operating point of PV modules using neural network for real time maximum power tracking control. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 10(2), 360-367.
- [17] Wilamowski, B. M., & Li, X. (2002, November). Fuzzy system based maximum power point tracking for PV system. In *IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the]* (Vol. 4, pp. 3280-3284). IEEE.
- [18] Mahmoud, A. M. A., Mashaly, H. M., Kandil, S. A., El Khashab, H., & Nashed, M. N. F. (2000). Fuzzy logic implementation for photovoltaic maximum power tracking. In *Industrial Electronics Society, 2000. IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE* (Vol. 1, pp. 735-740). IEEE.
- [19] Jaboori, M. G., Saied, M. M., & Hanafy, A. A. (1991). A contribution to the simulation and design optimization of photovoltaic systems. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 6(3), 401-406.
- [20] Würfel, P., & Würfel, U. (2009). *Physics of solar cells: from basic principles to*

advanced concepts. John Wiley & Sons.

[21] نشریه سازمان انرژی های نو گروه مطالعات برق و انرژی روستایی : سمیرا منشی پور- فرید خلفی ، اسفند 1387

[22] Pearsall, N. M., & Hill, R. O. B. E. R. T. (2002). Photovoltaic modules, systems and applications. *Clean Electricity from Photovoltaics, World Science,1*, 1-42

[23] Dr. J. Abdul Jaleel, Nazar. A, Omega A R.(2012). Simulation on Maximum Power Point Tracking of the Photovoltaic Module using LabVIEW. IJAREEIE.ISSN 2278 – 8875

[24] Walker, G. R. (2000). Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model. *AUPEC 2000: Innovation for Secure Power, 1*, 138-143.

[25] Messenger, R. A., & Ventre, J. (2003). *Photovoltaic systems engineering*. CRC press.

[26] Wang, J. C., Su, Y. L., Shieh, J. C., & Jiang, J. A. (2011). High-accuracy maximum power point estimation for photovoltaic arrays. *Solar Energy Materials and Solar Cells, 95*(3), 843-851.

[27] Jimenez-Brea, E., Salazar-Llinas, A., Ortiz-Rivera, E., & Gonzalez-Llorente, J. (2010, February). A maximum power point tracker implementation for photovoltaic cells using dynamic optimal voltage tracking. In *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE* (pp. 2161-2165). IEEE.

[28] Kida, J., Tokuda, K., Ishihara, Y., & Todaka, T. (1991, November). Analysis of DC-DC converter for the maximum power point control of photovoltaic. In *Telecommunications Energy Conference, 1991. INTELEC'91., 13th International* (pp. 291-295). IEEE.

[29] Salas, V., Olias, E., Barrado, A., & Lazaro, A. (2006). Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar energy materials and solar cells, 90*(11), 1555-1578.

[30] Ben Salah, C., & Ouali, M. (2011). Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems. *Electric Power Systems Research, 81*(1), 43-50.

- [31] Alajmi, B. N., Ahmed, K. H., Finney, S. J., & Williams, B. W. (2011). Fuzzy-logic-control approach of a modified hill-climbing method for maximum power point in microgrid standalone photovoltaic system. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 26(4), 1022-1030.
- [32] Ngan, M. S., & Tan, C. W. (2011, April). A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. In *Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), 2011 IEEE* (pp. 22-27). IEEE.
- [33] Esram, T., & Chapman, P. L. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION EC*, 22(2), 439.
- [34] Bahgat, A. B. G., Helwa, N. H., Ahmad, G. E., & El Shenawy, E. T. (2005). Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks. *Renewable Energy*, 30(8), 1257-1268.
- [35] Raja, R., Kumar, L. U., & Kumar, S. R. (2013). FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR PHOTOVOLTAIC ARRAY SIMULATOR.
- [36] Skvarenina, T. L. (Ed.). (2001). *The power electronics handbook*. CRC press.
- [37] Rashid, M. H. (Ed.). (2001). *Power electronics handbook*. Academic Pr.
- [38] Poli, R., Kennedy, J., & Blackwell, T. (2007). Particle swarm optimization. *Swarm intelligence*, 1(1), 33-57.
- [39] Alatas, B., Akin, E., & Ozer, A. B. (2009). Chaos embedded particle swarm optimization algorithms. *Chaos, Solitons & Fractals*, 40(4), 1715-1734.
- [40] BP SX150 – 150 watt multi crystalline photovoltaic module datasheet, 2001
- [41] Kramer, W., Chakraborty, S., Kroposki, B., & Thomas, H. (2008). Advanced power electronic interfaces for distributed energy systems. *National Renewable Energy Laboratory, Cambridge, MA Rep. NREL/Tp-581-42672*, 1.
- [42] Hang, C. C., Åström, K. J., & Ho, W. K. (1991, March). Refinements of the Ziegler–Nichols tuning formula. In *IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)* (Vol. 138, No. 2, pp. 111-118). IEE.

Abstract

In this thesis, maximum power point tracking at the stand-alone photovoltaic system with Variable resistive load is proposed using a fuzzy controller. This procedure is perform under standard and variable radiation and temperature conditions. Perturbation and observation (P&O) method is also used to track the maximum power point and Compared with the fuzzy method. The results express appropriate performance of the fuzzy controller for maximum power point tracking over P&O method. Furthermore, the particle swarm algorithm is used to optimize the fuzzy membership functions. At the end, by using designed fuzzy controller, the Single phase grid-connected photovoltaic system is implemented. To control of the output current, proportional to the maximum power injected into the grid, the hysteresis method is used for firing the inverter switches.

Keywords: Perturbation and Observation, fuzzy controller, maximum power point tracking, inverter, particle swarm algorithm, hysteresis



Shahrood University of Technology
Department of Electrical and Robotic Engineering

**Optimal fuzzy control for grid-connected
photovoltaic system**

Ali fadaei

Supervisor(s):

Dr. Hossein gholizade narm

2015