

دستیابی به حداکثر توان سیستم های خورشیدی با کنترل مد لغزشی بهبودیافته

رضا ایزدپور

شرکت ذوب آهن اصفهان

فرشاد حیدرپور

شرکت توزیع نیروی برق چهارمحال و بختیاری

رستم ایزدپور

شرکت توزیع نیروی برق چهارمحال و بختیاری

چکیده

دریافت توان بیشتر از سیستم های خورشیدی PV تحت شرایط محیطی متغیر، موجب افزایش راندمان کلی سیستم تولید مبتنی بر انرژی خورشیدی می گردد. میزان تابش نور خورشید دائماً در حال تغییر است و این تغییرات به خصوص در فصول سرد سال، ممکن است به صورت ناگهانی رخ دهد. علت این مسئله این است که در این فصول، شاخص شفافیت آسمان ضعیف تر بوده و تراکم ابرها بیشتر است. تغییرات ناگهانی شدت تابش عموماً با تغییرات دما نیز همراه است چون انرژی تابشی نور خورشید حامل انرژی گرمایی نیز می باشد. بنابراین افزایش بازدهی سیستم خورشیدی PV تحت این شرایط، مشروط به بهره گیری از ساختاری است که بتواند تغییرات ناگهانی شدت تابش و دما را به خوبی دنبال کرده و نقطه توان بیشینه را ردگیری کند. پرسش اصلی در این تحقیق این است که چگونه می توان بدون تغییر ساختار سیستم و تعویض پنل خورشیدی، با کمک مفهوم MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، توان بیشتری را از سیستم خورشیدی با وجود تغییرات شدت تابش و دمای محیط، دریافت نمود. در این مقاله، ردگیری نقطه توان بیشینه در سیستم خورشیدی متصل به چارپ بوست به کمک الگوریتم بهینه سازی ژنتیک ارائه می گردد. بلوک MPPT در سیستم خورشیدی که مسئول تولید سیگنال های کنترلی برای چارپ بوست است، به کمک بلوک MATLAB Function در مدل شبیه سازی به کار رفته و کد برنامه الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین دوره کار (d) بهینه در آن نوشته خواهد شد. همچنین به منظور ارزیابی توانایی روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در دنبال کردن نقطه توان تحت شرایط محیطی متغیر، شدت تابش و دمای محیط که پارامترهای ورودی سیستم خورشیدی در شبیه سازی می باشند، تغییر خواهند کرد.

واژگان کلیدی: ردگیری نقطه توان بیشینه، الگوریتم ژنتیک، چارپ بوست، سیستم خورشیدی PV.

۱-مقدمه (فونت B Nazanin - اندازه ۱۲ - پررنگ)

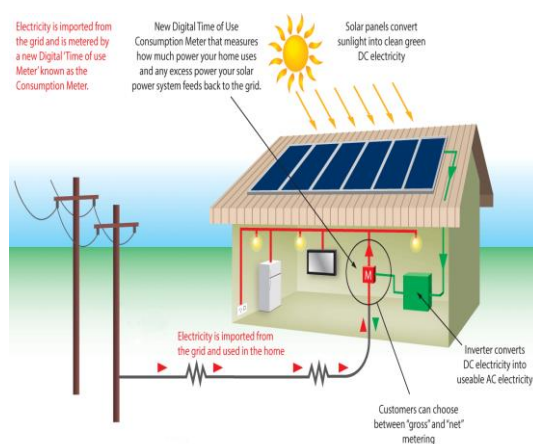
عنصر اصلی فناوری فتوولتائیک، سلول خورشیدی است. سلول های فتوولتائیک (PV) که عموم آن را با نام سلول های خورشیدی می شناسند، از مواد نیمه رسانای حالت جامد تشکیل شده اند. سیلیکون، عمومی ترین ماده نیمه رسانا است که به واسطه فراوانی آن در سلول های خورشیدی مورد استفاده قرار می گیرد. اگر چه سیلیکون عنصر فراوانی است و درصد زیادی از پوسته زمین را تشکیل می دهد، ولی سلول های سیلیکونی به خاطر فرایند ساخت و خالص سازی سیلیکون، قیمت بالایی دارند. سلول های فتوولتائیک با استفاده از اشعه خورشید و سلول های خورشیدی، و با ایجاد اختلاف فشار الکتریکی در نیمه هادی هایی که بطور مناسب ساخته شده اند الکتریسیته تولید می گردد. امروزه مؤثرترین و ارزان ترین سلول های خورشیدی ماده ای به نام سیلیسم می باشد. ماسه یکی از منابع مهم سیلیسم بوده که پس از پالایش آن کریستال های سیلیسم بدست می آید و پس از بریده شدن به صورت صفحه آماده می گردد. به عبارت دیگر سلول های فتوولتائیک که گاه نام سلول های خورشیدی نیز به آن اطلاق می گردد از پولک هایی ساخته می شوند که نور را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می کند. این پولک ها همانند ترانزیستور معمولاً از لایه های نازک یک ماده نیمه هادی مانند سیلیکان با مقادیر کمی افزودنی های خاص به منظور ایجاد مازادی از الکترون در یک لایه و کمبودی از الکترون در لایه دیگر ساخته می شوند. فوتون های نور در یک لایه الکترو نهایی آزاد را بوجود می آورند و یک رشته هادی، الکترون ها را قادر می سازد که در یک مدار خارجی جریان یافته و به لایه هایی که فاقد الکترون است دسترسی پیدا کنند. پنل های فتوولتائیک از نیمه هادی ها ساخته شده و با اتصال سیلیکون های نوع P و N شکل می گیرند. وقتی نور خورشید به یک سلول خورشیدی می تابد، به الکترون ها در آن انرژی بیشتری می بخشد. با تابش نور خورشید الکترون ها در نیمه هادی پلاریزه شده، الکترون های منفی در سیلیکون نوع N و یون های مثبت در سیلیکون نوع P بوجود می آیند. بدین ترتیب بین دو الکترون، اختلاف پتانسیل بروز کرده و این امر موجب جاری شدن جریان بین آن ها می گردد. از آنجا که سلول های فتوولتائیک کوچک، شکننده بوده و تنها مقدار کمی برق تولید می کنند آن ها را به صورت مدول شکل می دهند. مدول ها در اندازه های متنوع عرضه می گردند ولی برای سهولت جابجایی ابعاد آن ها به ندرت از ۹۰ سانتیمتر عرض در ۱۵۰ سانتیمتر طول تجاوز می کند. هنگامی که دو سلول با مدول در یک ردیف متصل می گردند ولتاژ آنها دو برابر می گردد و هنگامی که به صورت موازی به یکدیگر متصل می شوند جریان برق آن دو برابر می گردد. سیستم های فتوولتائیک متشکل از سه بخش کلی پنل خورشیدی، مبدل و باتری، انرژی خورشیدی را بدون هیچ گونه آلودگی به الکتریسیته تبدیل می کنند. تبدیلات انرژی خورشیدی به الکتریسیته توسط پنل یا همان سلول های فتوولتائیک انجام شده و به منظور استفاده از آن در مصارف خانگی مبدل الکتریسیته تولید شده را به جریان متناوب تبدیل می کند. در نهایت به کمک باتری می توان انرژی الکتریسته اضافی تولید شده در سیستم را ذخیره نمود. از دیگر اجزای جانبی سیستم می توان به سیم ها، سوئیچ های قطع جریان و سازه های پشتیبانی اشاره کرد.



شکل (۱) آرایه های خورشیدی.

۱-۱- انواع سیستم خورشیدی از نظر کاربرد

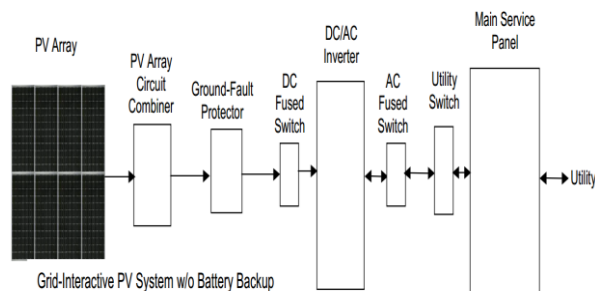
به طور کلی سیستم های فتوولتائیک با توجه به کاربردشان به دو گروه واحدهای متصل به شبکه و واحدهای مجزا از شبکه گروه بندی می شوند. در سیستم متصل به شبکه، برق تولید شده از انرژی خورشید به شبکه برق سراسری تزریق خواهد شد. به عبارتی در این سیستم کاربر برق تولیدی خود را به سازمان انرژی های نو (وزارت نیرو) عرضه می کند. سیستم های فتوولتائیک متصل به شبکه سراسری برق به صورت متمرکز و یا غیر متمرکز به منظور تقویت شبکه سراسری و جلوگیری از فشار الکتریکی وارد بر نیروگاه ها در طی روز کاربرد دارند. از مزایای این سیستم می توان به نصب و راه اندازی آسان، بازده بالا و عدم نیاز به تجهیزات جانبی پیچیده اشاره نمود. شکل (۲) نمایشی از سیستم های فتوولتائیک متصل به شبکه است



شکل (۲) سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه سراسری برق

۱-۲- سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه سراسری برق بدون باتری

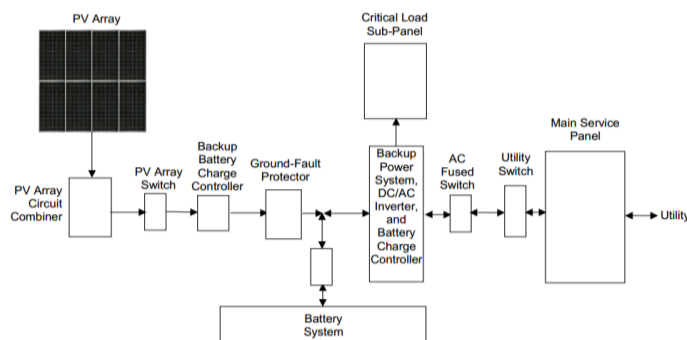
به طور معمول در این نوع شبکه بندی برای ذخیره انرژی الکتریکی نیازی به باتری نیست ولی در برخی موارد برای افزایش قابلیت اعتماد شبکه از سیستم های ذخیره کننده انرژی که عمدتاً باتری میباشند استفاده میگردد. بنابراین سیستم های متصل به شبکه سراسری برق را می توان به دو گروه دارای سیستم ذخیره و بدون سیستم ذخیره طبقه بندی نمود. طراحی سیستم های فتوولتائیک متصل به شبکه به گونه ای است که همزمان و به طور موازی با شبکه برق سراسری تولید توان می کنند. در این روش، ارتباطی دو جانبه میان سیستم های فتوولتائیک و شبکه برق وجود دارد به نحوی که اگر برق DC تولیدی توسط سیستم های فتوولتائیک بیش از نیاز بار مصرفی محلی باشد مازاد آن به شبکه برق سراسری تزریق میگردد. لذا در ساعات شبانه و مواقعی که به دلایل شرایط اقلیمی امکان استفاده از نور خورشید وجود ندارد بار الکتریکی مورد نیاز سایت توسط شبکه برق سراسری تامین می گردد. به طور کلی برق تولید شده پس از تبدیل شدن بوسیله اینورتر مخصوص سیستم های متصل به شبکه و با استفاده از کنتورهای مخصوص دوطرفه، به شبکه برق سراسری تزریق میگردد. اگر به هر دلیلی شبکه سراسری برق قطع شود ضروری است که واحد خورشیدی نیز تولید را متوقف سازد و بارهای مصرفی قطع شوند. شکل (۳) بلوک دیاگرام نمونه سیستم فتوولتائیک بدون سیستم ذخیره سازی است.



شکل (۳) بلوک دیاگرام سیستم فتوولتاییک بدون باتری

۳-۱- سیستم های فتوولتاییک متصل به شبکه برق دارای باتری ذخیره

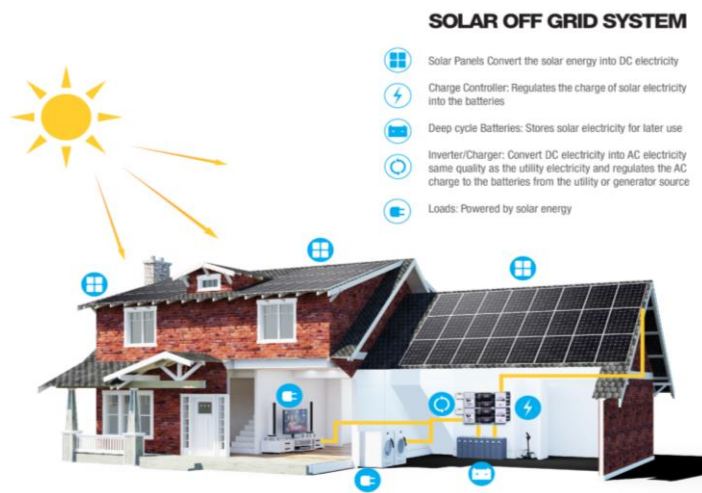
در سیستم های فتوولتاییک متصل به شبکه برق دارای باتری ذخیره، مبدل الکترونیک قدرت توسط آرایه خورشید تغذیه میگردد که خروجی آن به باتری به عنوان ذخیره ساز انرژی بار محلی و بار حساس متصل است. سیستم های فتوولتاییک متصل به شبکه برق مجهز به سیستم ذخیره مناسب برای خانه های مسکونی و محل های تجاری کوچکند زیرا در این سیستم ها از انرژی ذخیره شده برای بارهای حساس مانند یخچال، روشنایی، آسانسور و موارد مشابه استفاده میگردد. شکل ۴ بلوک دیاگرام این گروه از سیستم های فتوولتاییک است.



شکل (۴) بلوک دیاگرام سیستم فتوولتاییک با سیستم ذخیره ساز باتری

۴-۱- سیستم فتوولتاییک مستقل از شبکه

سیستم فتوولتاییک مستقل از شبکه به دلیل ماهیت مستقلش به سیستم جزیره نیز معروف است. در این نوع سیستم های خورشیدی برق تولیدی صرفاً وظیفه شارژ باتری ها را بر عهده دارد. لذا برای طراحی و محاسبه تعداد آرایه های فتوولتاییک در اینگونه واحدها لازم است مدل بار مصرفی و کل توان مورد نیاز بار در یک دوره شبانه روز محاسبه شود. از سوی دیگر، ضروری است در شرایط نامساعد جوی سیستم ذخیره ساز انرژی، قابلیت تغذیه کل بار سیستم را بدون استفاده از انرژی سیستم فتوولتاییک برای چند روز داشته باشد. کاربرد اصلی اینگونه واحدها در مکان هایی است که شبکه اصلی قدرت در دسترس نبوده و یا برای اتصال به شبکه قدرت هزینه زیادی لازم است. برای مثال در سایت های مخابراتی کوهستانی، مناطق عشایری، کلبه های روستایی و به طور کلی رفع نیاز الکتریکی مناطقی که دارای شبکه سراسری برق نمی باشند می توان از سیستم فتوولتاییک مستقل از شبکه استفاده کرد. شکل ۵ نمایشی از سیستم های فتوولتاییک مستقل از شبکه است. اجزای اصلی این نوع سیستم های خورشیدی عبارتند از: آرایه های نصب شده بر بام و یا مستقر بر روی زمین، کنترل کننده شارژ باتری و مبدل برای تامین برق مصرفی.



شکل (۵) سیستم فتوولتاییک مستقل از شبکه

در این مقاله، ردگیری نقطه توان بیشینه در سیستم خورشیدی متصل به چارپ بوست به کمک الگوریتم بهینه سازی ژنتیک ارائه می گردد. بلوک MPPT در سیستم خورشیدی که مسئول تولید سیگنال های کنترلی برای چارپ بوست است، به کمک بلوک MATLAB Function در مدل شبیه سازی به کار رفته و کد برنامه الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین دوره کار^۱ (d) بهینه در آن نوشته خواهد شد. همچنین به منظور ارزیابی توانایی روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در دنبال کردن نقطه توان تحت شرایط محیطی متغیر، شدت تابش و دمای محیط که پارامترهای ورودی سیستم خورشیدی در شبیه سازی میباشند، تغییر خواهند کرد.

۲- روش اغتشاش و مشاهده

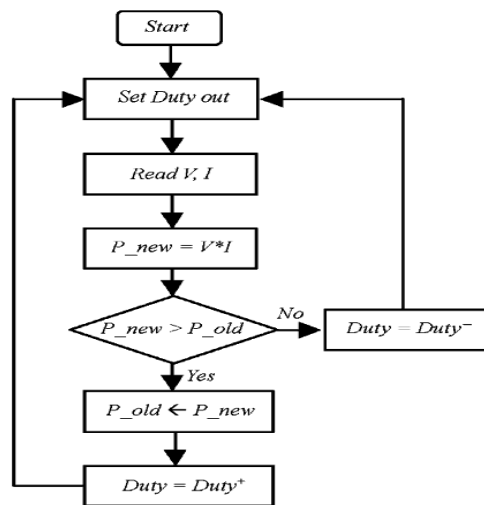
روش اغتشاش و مشاهده (P&O)^۲ از روش های معمول MPPT می باشند که به دلیل ساختار ساده تمرکز زیادی بر روی آنها شده است. اساس کار روش تپه نوردی ایجاد آشفتگی در سیکل کاری مبدل است که باعث آشفتگی در جریان و ولتاژ میگردد [۱]. در روش P&O با ایجاد آشفتگی در ولتاژ عملکرد آرایه باعث افزایش یا کاهش توان خروجی شده که با نگه داشتن یا معکوس کردن آشفتگی بعدی به نقطه MPPT نزدیک میگردد [۲ و ۳]. الگوریتم P&O به علت سهولت در پیاده سازی به طور گسترده در سیستم های PV استفاده میگردد در این روش با تغییر دوره کار به طور متناوب نقطه کار پنل را تغییر داده و توان تولیدی توسط پنل را در شرایط جدید به دست می آورد. سپس با مقایسه مقدار جدید توان خروجی پنل با مقدار قبلی آن، نسبت به انتخاب دوره کار مناسب برای داشتن حداکثر توان اقدام می کند. روش P&O را می توان به دو صورت دونقطه ای و سه نقطه ای پیاده سازی نمود [۴].

۲-۱- روش مقایسه دونقطه ای

مطابق فلوچارت شکل (۶) در این روش در هر بار تکرار حلقه اصلی برنامه، مقدار توان (P_{new}) محاسبه میگردد سپس این مقدار با توان در سیکل قبلی (P_{old}) مقایسه میگردد. اگر ($P_{new} > P_{old}$) باشد، به معنی مثبت بودن تغییر اعمال شده در دوره کار طی مرحله قبل است لذا در این مرحله نیز دوره کار باید در همان جهت افزایش یا کاهش یابد؛ اما اگر ($P_{new} < P_{old}$) باشد، دوره کار باید در جهت خلاف مرحله قبل، افزایش یا کاهش یابد.

¹ Duty Cycle

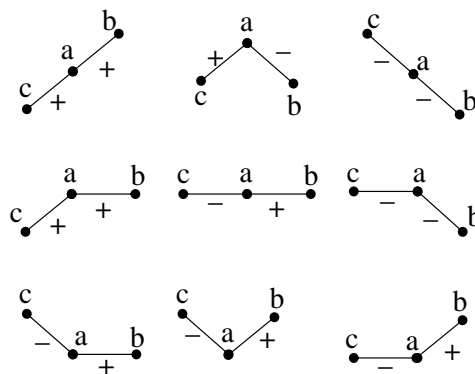
² Perturb and Observe



شکل (۶) الگوریتم روش دونقطه‌ای

۲-۲- روش مقایسه سه نقطه‌ای

در این الگوریتم، سه نقطه بر روی منحنی ولتاژ-توان با هم مقایسه می‌شوند. این سه نقطه عبارت‌اند از A (نقطه کار قبلی) نقطه B (نقطه‌ای که با افزایش دوره کار به میزان یک واحد حاصل شده است) و نقطه C (نقطه‌ای که با کاهش یک واحدی دوره کار حاصل شده است). مطابق شکل (۳)-۲ برای مقادیر به دست آمده توان در سه نقطه فوق، ۹ وضعیت متفاوت وجود دارد. بر مبنای وضعیت موجود متغیر M مقداردهی می‌گردد. اگر توان نقطه B بیشتر یا برابر نقطه A شود یک واحد به M افزوده می‌گردد در غیر این صورت M یک واحد کاهش می‌یابد. همچنین اگر توان نقطه C از توان نقطه A کوچک‌تر باشد مجدداً یک واحد به M افزوده شده در غیر این صورت M یک واحد کاهش می‌یابد [۵]. اگر مقدار M برابر دو شود، نقطه B به عنوان نقطه کار در سیکل بعد انتخاب می‌گردد اما اگر مقدار M برابر منفی دو شود، نقطه C به عنوان نقطه کار در سیکل بعد انتخاب می‌گردد. در سایر حالات (M برابر صفر، یک یا منفی یک) سیستم یا به نقطه ماکزیمم توان رسیده است و یا تابش بر سلول‌های خورشیدی به صورت ناگهانی تغییر کرده است و لزومی به تغییر دوره کار نمی‌باشد لذا نقطه کار همان نقطه A باقی می‌ماند. شکل (۷) فلوچارت الگوریتم فوق را نشان می‌دهد.



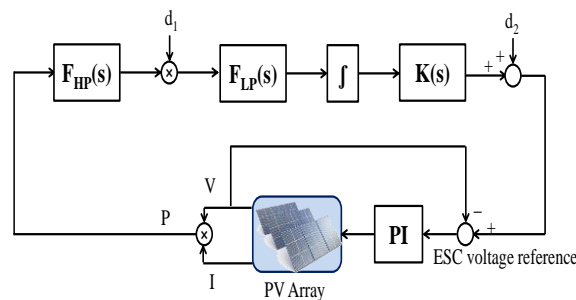
شکل (۷). حالات ممکن برای توان سه نقطه‌ای

در روش P&O اگر اندازه اغتشاش بزرگ باشد حول نقطه MPP نوسان می‌کند و اگر اندازه اغتشاش کوچک باشد ردیابی MPP کند می‌گردد. برای حل این مشکل از الگوریتم دومرحله‌ای استفاده کرده به صورتی که در مرحله اول ردیابی سریع انجام شده و در مرحله دوم پالایش ردیابی انجام

میگردد [۳]. مزایای این دو روش هزینه پایین و اجرای آسان، الگوریتم کنترلی نسبتاً ساده و ردیابی مناسب MPP و عیب آن‌ها عدم ردیابی MPP تحت تغییرات سریع دما و تابش خورشید است که باعث تلفات انرژی میگردد. برای اطمینان از ردیابی MPP تحت تغییرات ناگهانی تابش در این روش از الگوریتم P&O با مقایسه سه نقطه استفاده می‌کنیم. به این صورت که نقطه توان واقعی را با دو نقطه قبلی مقایسه می‌کند قبل از اینکه علامت اغتشاش جدید را ایجاد کند [۶].

۲-۳- روش جستجوی اکسترمم

یکی از روش‌های جدید و کارآمد ردیابی نقطه توان بیشینه در سیستم‌های خورشیدی، روش جستجوی نقطه اکسترمم (ESM) می‌باشد که هم دارای سرعت بالاتری در مقایسه با روش‌های کلاسیک (نظیر روش آشفته‌گی و مشاهده) است و هم از نظر پیاده‌سازی، الگوریتم ساده‌ای دارد. این روش بر اساس استفاده از بسط تیلور سیگنال‌های پیوسته در تعیین نقطه بیشینه می‌باشد. اساس این روش، استفاده از تجزیه یک سیگنال به مجموعه‌ای از جملات سینوسی و کسینوسی است که با عبور از فیلترهای بالاگذر و پایین گذر، توانایی استخراج نقطه اکسترمم هر تابعی را دارا می‌باشد. این روش یک نقطه ضعف اصلی دارد و آن این است که با تغییر شرایط محیطی، حالت گذرای نسبتاً طولانی داشته و نیز اضافه جهش‌های اولیه توان خروجی پنل بالاست. بلوک دیاگرام روش ESM در شکل (۸) ترسیم شده است [۷].



شکل (۸) بلوک دیاگرام روش ESM

در این شکل، $FHP(s)$ و $FLP(s)$ به ترتیب فیلترهای بالاگذر و پایین گذر میباشند که سیگنالی را متناسب با گرادیان (مشتق) توان خروجی پنل PV تولید کرده و به عنوان ورودی به یک انتگرال گیر اعمال می‌کنند. توضیحات بیشتر در مورد این روش، در فصل بعدی ارائه خواهد شد.

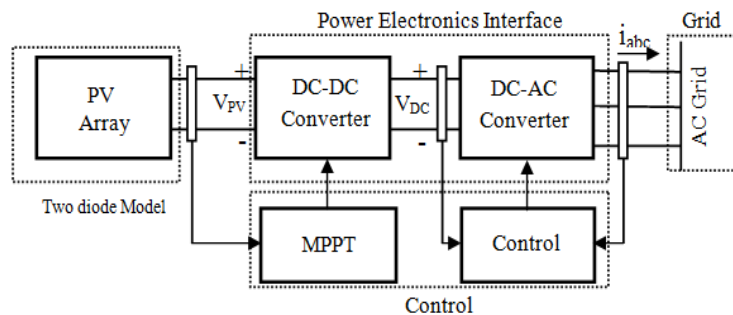
بر اساس بررسی‌ها و مطالعات، انرژی خورشیدی وسیع‌ترین منبع انرژی در جهان است. کارشناسان بخش انرژی می‌گویند انرژی نوری که توسط خورشید در هر ساعت به زمین می‌تابد، بیش از کل انرژی است که ساکنان زمین در طول یک سال مصرف می‌کنند. با وجود آنکه انرژی خورشید و مزایای آن در قرون گذشته به خوبی شناخته شده بود ولی بالا بودن هزینه اولیه چنین سیستم‌هایی از یک طرف و عرضه نفت و گاز ارزان از طرف دیگر سد راه پیشرفت این سیستم‌ها شده بود تا اینکه افزایش قیمت نفت در سال ۱۹۷۳ باعث شد که کشورهای پیشرفته صنعتی مجبور شدند به مسئله تولید انرژی از راه‌های دیگر (غیر از استفاده سوخت‌های فسیلی) توجه جدی‌تری نمایند.

۲-۴- تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی

با استفاده از فناوری های خاص، انرژی حاصل از نور خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند و این فناوری ها را به دو گروه می توان تقسیم کرد.

- سیستم فوتوولتائیک (PV) که عموماً تجهیزاتی جامد و بی حرکت میباشند (جز در مورد انواع مجهز به سیستم ردیابی خورشیدی)
- سیستم های حرارتی خورشیدی که از نور متمرکز شده خورشید برای گرم کردن مایعی که بخار آن یک توربین را به حرکت در می آورد، استفاده می کند.

در این میان استفاده از سیستم های فوتوولتائیک برای استفاده از نور خورشید به عنوان منبع انرژی بسیار رایج تر است. استفاده از پنل های فوتوولتائیک در کشورهای پیشرفته به سرعت روبه گسترش است.

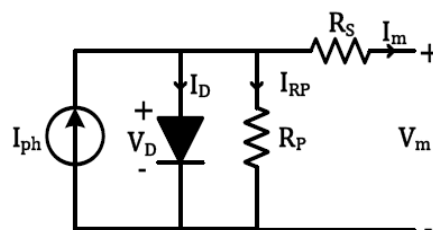


شکل (۹) سیستم PV اتصال به شبکه

شکل (۹) سیستم PV و اتصال به شبکه تک فاز را نشان می دهد، ولتاژ خروجی آرایه های PV با ساختار اتصال سری- موازی نسبتاً کم است؛ بنابراین به مبدل های DC-DC افزایشدهنده با بهره و راندمان بالا نیاز است تا ولتاژ پایین آرایه های PV را به ولتاژ بالایی تبدیل کند. باتری و مبدل DC-DC دوطرفه نقش منبع Back up را هنگامی که ولتاژ تولیدی از سلول خورشیدی ضعیف می گردد، بازی می کند. در طول مرحله دشارژ باتری، مبدل دوطرفه باید کارایی و راندمان بالایی، به علت استفاده از باتری های ۴۸ ولت استاندارد، داشته باشد.

۳- مدل مداری و مدل ریاضی پنل خورشیدی

یک مدل PV می تواند به وسیله مدار معادل نشان داده شده در شکل (۱۰) ارائه شود. این مدل، به عنوان یک مدل تک دیود شناخته می گردد. در این مدل، ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه پارامترهای کلیدی میباشند که جریان اتصال کوتاه به میزان تابش و ولتاژ مدار باز تحت تأثیر مواد و دما است.



شکل (۱۰) مدل سلول PV

با توجه به مدل فوق، مشخصه جریان- ولتاژ یک ماژول خورشیدی به کمک روابط زیر به دست می آید [۱]:

$$I = I_{ph} - I_{RP} - I_D \quad (۱)$$

$$I_{RP} = \frac{V_m + R_s I_m}{R_p} \quad (۲)$$

$$I_D = I_s \left(\exp \left(\frac{V_m + R_s I_m}{m \eta V_T} \right) - 1 \right) \quad (۳)$$

که I_{ph} معرف جریان فتوولتائیک، m نشان دهنده تعداد سلول های سری مازول، η ضریب ایده آلی دیود، I_s جریان اشباع معکوس دیود و V_T ولتاژ حرارتی هست. ضمن اینکه I و V معرف جریان و ولتاژ ترمینال های مازول بوده و R_s و R_p نیز برای مدل سازی تلفات اهمی و اثر جریان نشتی دیود p-n بکار می روند. برای مدل سازی اثر دما و شدت نور از روابط زیر استفاده می گردد.

$$I_{ph0} = I_{ph} \left(\frac{S}{1000} \right) + J_0 (T - T_{ref}) \quad (۴)$$

$$I_s = I_{s0} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{E_g}{\eta k} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (۵)$$

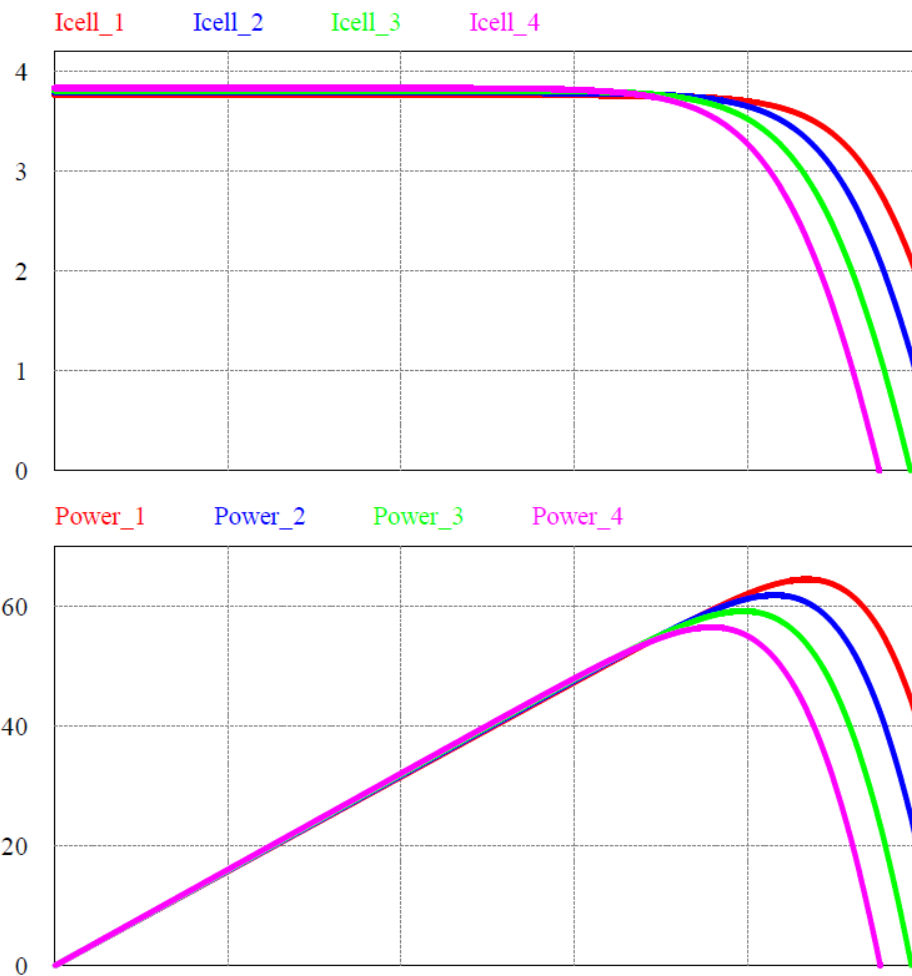
$$E_g = q \left(1.16 - 7.02 * 10^{-4} * \frac{T^2}{T - 1108} \right) \quad (۶)$$

که در آن S معرف شدت نور تابشی، T دمای مازول برحسب کلون، I_{ph0} جریان فتوولتائیک در دمای مبنا، I_s جریان اشباع معکوس در دمای مبنا، E_g فاصله نوارهای انرژی سیلیسیم برحسب الکترون ولت، K ثابت بولتزمن^۴ و q بار الکترون هست. J_0 نیز ضریب حرارتی است که وابستگی I_{ph0} را به دما مشخص می کند و توسط سازنده مازول داده می گردد.

۳-۱- مفهوم ردیابی نقطه بیشینه توان (MPPT)

برای پیاده سازی سیستمی که توانایی ردیابی نقطه توان بیشینه را داشته باشد، لازم است که سیستم دارای اجزایی شامل سلول خورشیدی، مبدل DC به DC، بار و یک کنترل کننده قابل برنامه ریزی جهت اعمال الگوریتم های MPPT باشد. ساختار کلی یک سیستم PV در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

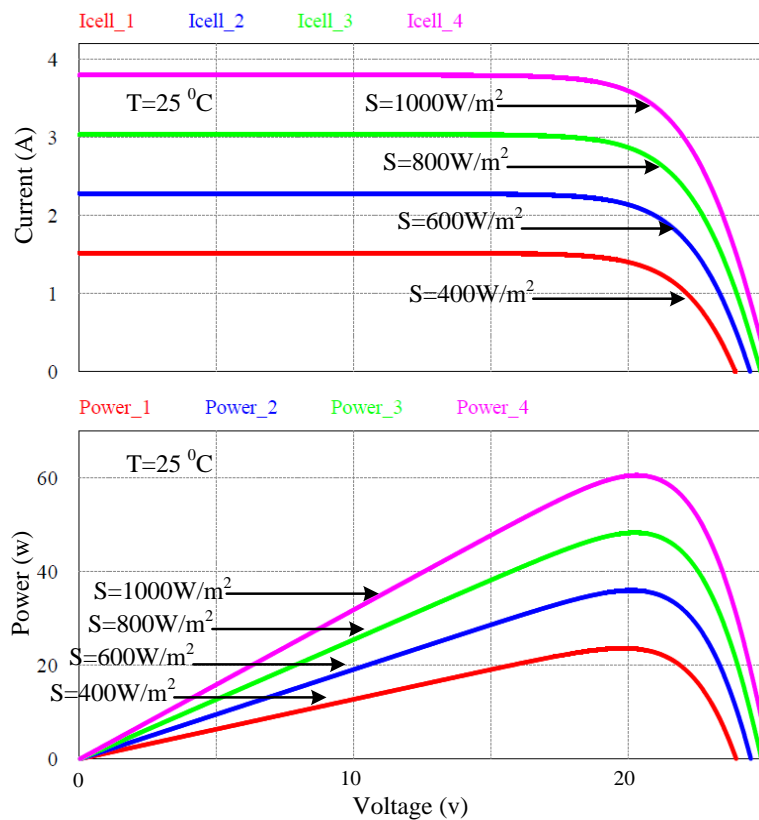
⁴Boltzmann's Constant



شکل (۱۱) مشخصه جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ آرایه خورشیدی در حین تغییرات دمایی

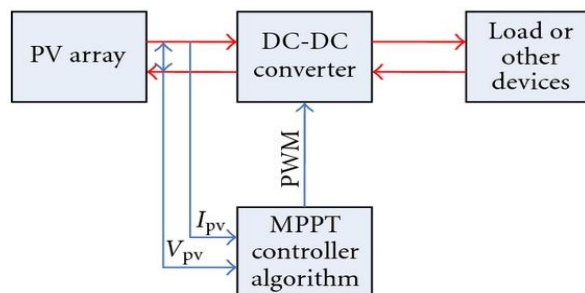
شکل (۱۱) اثر تغییرات دما را بر روی منحنی مشخصه مازول خورشیدی نشان می‌دهد، ملاحظه می‌گردد که افزایش دما منجر به کاهش ولتاژ

مدار باز مازول و همچنین کاهش ولتاژ نقطه حداکثر توان، و در نتیجه کاهش توان خروجی مازول می‌گردد.



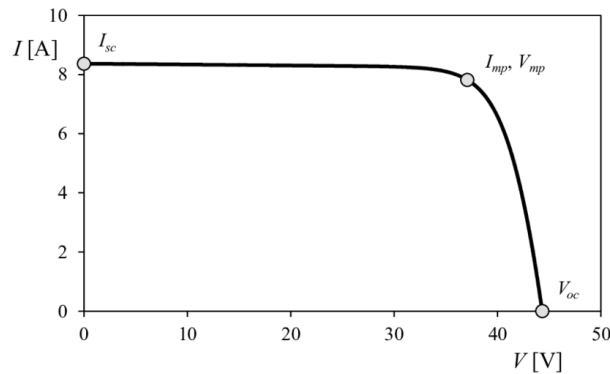
شکل (۱۲). مشخصه جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ آرایه خورشیدی در حین تغییرات شدت نور تابشی

در شکل (۱۲) اثر تغییرات شدت نور تابشی بر منحنی مشخصه آرایه خورشیدی، نشان داده شده است که در آن ملاحظه می‌گردد کاهش شدت نور تابشی منجر به کاهش جریان فتوولتائیک و در نتیجه کاهش جریان نقطه حداکثر توان می‌گردد؛ بنابراین با کاهش جریان مذکور توان خروجی آرایه نیز کاهش می‌یابد.

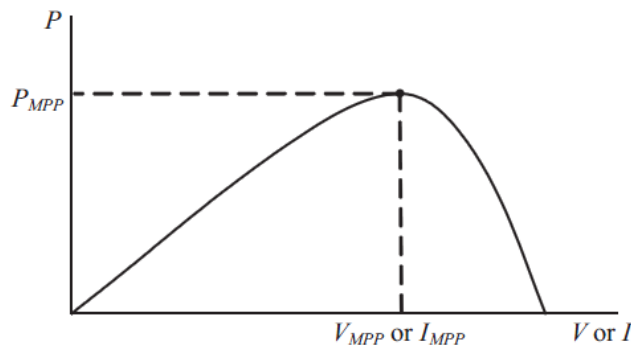


شکل (۱۳). بلوک دیاگرام کلی سیستم کنترل آرایه فتوولتائیک

عملکرد آرایه های خورشیدی توسط دو منحنی I-V (شکل ۳-۱۱) و P-V (شکل ۱۳) تعریف می شوند. روش های مذکور تحت عنوان ردیابی نقطه توان بیشینه یا MPPT نام گرفته اند.



شکل (۱۴). منحنی جریان بر حسب ولتاژ [۸]



شکل (۱۵) منحنی توان بر حسب جریان یا ولتاژ آرایه فتوولتائیک [۸]

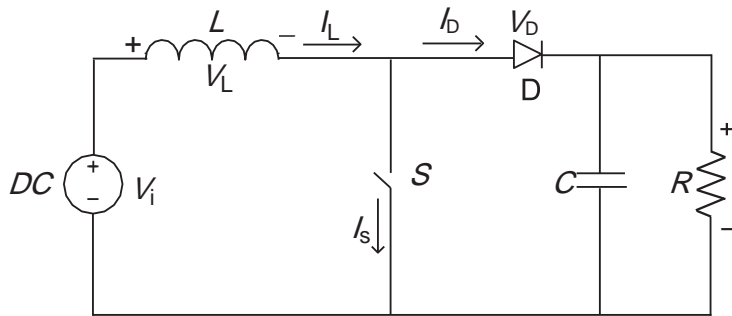
مسئله مورد نظر در روش های MPPT پیدا کردن خودکار ولتاژ نقطه ماکزیمم (V_{MPP}^5) یا جریان نقطه ماکزیمم (I_{MPP}^6) آرایه فتوولتائیک برای به دست آوردن حداکثر توان خروجی (P_{MPP}) تحت تغییرات دما و تابش است. در سیستم مورد نظر کنترل کننده MPPT به مبدل متصل شده و با تنظیم دوره کار نقطه توان ماکزیمم به دست می آید.

۳-۲-چاپر بوست

مبدل بوست دارای ساختار ساده ای است، همان طور که در شکل (۱۵) نشان داده شده است. وظیفه مبدل بوست افزایش ولتاژ ورودی است به گونه ای که ولتاژ خروجی بیشتر شود. به صورت مشابه، سلف در مدار نقش اصلی را در تقویت ولتاژ ورودی ایفا می کند. مبدل بوست نیز دارای حالت on و حالت off است. در حالت on، سوئیچ S در موقعیت بسته قرار دارد، $I_D=0$ است، جریان I_L عبوری از سلف L در حال افزایش بوده و ولتاژ دو سر سلف نیز برابر با ولتاژ منبع می باشد. در این پروسه، سلف انرژی دریافتی از منبع را ذخیره می کند.

⁵Voltage Maximum Power Point

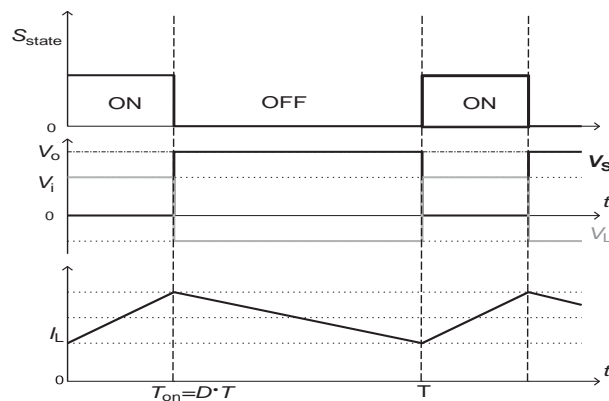
⁶Current Maximum Power Point



شکل (۱۶). ساختار مداری مبدل بوست

در حالت off، سوئیچ باز است. بار دوباره به منبع و سلف متصل میگردد. از این رو، جریان عبوری از سلف کاهش خواهد یافت، در نتیجه ولتاژ القایی دو سر سلف هم جهت با ولتاژ منبع قرار می گیرد. حالا، سلف به عنوان یک منبع تغذیه دیگر، با آزادسازی انرژی ذخیره شده، بار را تغذیه می کند. از آنجایی که منبع و سلف به صورت سری متصل شده اند، ولتاژ بار مجموع ولتاژ دو سر سلف و ولتاژ منبع خواهد شد که بدان معنی است که ولتاژ خروجی بیشتر از ولتاژ منبع است.

$$V_o = V_L + V_i \text{ (V)}$$



شکل (۱۷). جریان و ولتاژ در مود پیوسته

اگر جریان عبوری از سلف همیشه بیشتر از صفر باشد، مبدل در مود پیوسته کار می کند. مطابق با رابطه بین جریان و ولتاژ سلف، تغییرات جریان در حالت on و حالت off را می توان به دست آورد. در حالت on، تنها منبع V_i روی جریان عبوری از سلف مطابق با رابطه (۸) اثر می گذارد

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{t_{on}} \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_i}{L} t_{on} = \frac{V_i}{L} D.T \quad (8)$$

که در آن D دوره کار است. در حالت off، هم منبع و هم بار به صورت سری به سلف متصل شده اند. در این حالت تغییر جریان سلف بر اساس رابطه (۹) بیان میگردد.

$$\Delta I_{L_{off}} = \int_{t_{on}}^T \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_i - V_o}{L} (1 - D)T \quad (9)$$

در حالت پایا، همان طور که شکل (۳-۱۳) نشان می دهد، جریان I_L در ابتدای حالت on و در انتهای حالت off برابر خواهد بود که بدان معنی است که تغییر جریان کل در یک سیکل برابر صفر است.

$$\Delta I_{L_{on}} - \Delta I_{L_{off}} = \frac{V_i}{L} D.T + \frac{V_i - V_o}{L} (1 - D)T = 0 \quad (10)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(1 - D)} \quad (11)$$

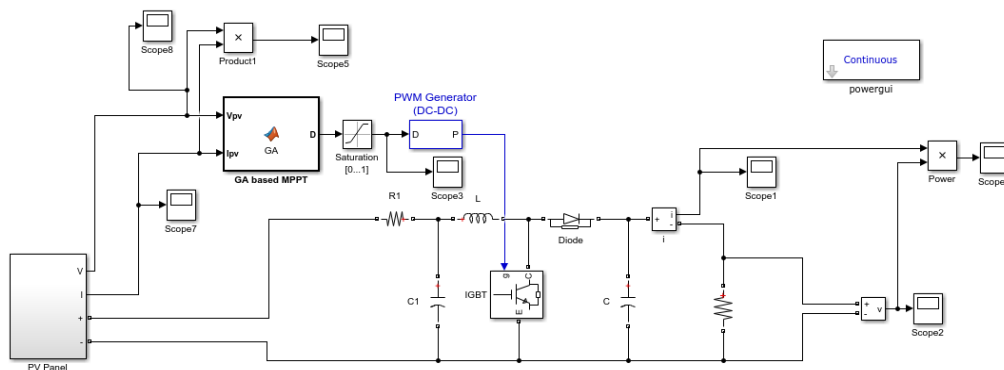
از آنجایی که D کمتر از ۱ است، نسبت تعریف شده در رابطه (۱۰) همیشه بیشتر از ۱ خواهد بود. این بدان معنی است که ولتاژ خروجی V_o همیشه بزرگتر از ورودی V_i است. بهره مبدل بوسه را می توان با تغییر دوره کار D ، کنترل نمود.

۳-۳- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک به عنوان یک الگوریتم محاسباتی بهینه سازی با در نظر گرفتن مجموعه ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی به نحو مؤثری نواحی مختلف فضای جواب را جستجو می کند. در مکانیزم جستجو گرچه مقدار تابع هدف تمام فضای جواب محاسبه نمی شود ولی مقدار محاسبه شده تابع هدف برای هر نقطه، در متوسط گیری آماری تابع هدف برای هر نقطه، در متوسط گیری آماری تابع هدف در کلیه زیر فضاهایی که آن نقطه به آنها وابسته بوده دخالت داده می شود و این زیر فضاها به طور موازی از نظر تابع هدف متوسط گیری آماری می شوند. این مکانیزم را توازی ضمنی^۷ می گویند. این روند باعث می شود که جستجوی فضا به نواحی از آن که متوسط آماری تابع هدف در آنها زیاد بوده و امکان وجود نقطه بهینه مطلق در آنها بیشتر است سوق پیدا کند. چون در این روش برخلاف روش های تک مسیری فضای جواب به طور همه جانبه جستجو می شود، امکان کمتری برای همگرایی به یک نقطه بهینه محلی وجود خواهد داشت. امتیاز دیگر این الگوریتم آن است که هیچ محدودیتی برای تابع بهینه شونده، مثل مشتق پذیری یا پیوستگی لازم ندارد و در روند جستجو خود تنها به تعیین مقدار تابع هدف در نقاط مختلف نیاز دارد و هیچ اطلاعات کمی دیگری، مثل مشتق تابع را استفاده نمی کند. لذا می توان در مسائل مختلف اعم از خطی، پیوسته یا گسسته استفاده می شود و به سهولت با مسائل مختلف قابل تطبیق است. در هر تکرار هر یک از رشته های موجود در جمعیت رشته ها، رمزگشایی شده و مقدار تابع هدف برای آن به دست می آید. بر اساس مقادیر به دست آمده تابع هدف در جمعیت رشته ها، به هر رشته یک عدد برازندگی نسبت داده می شود. این عدد برازندگی احتمال انتخاب را برای هر رشته تعیین خواهد کرد. بر اساس این احتمال انتخاب، مجموعه ای از رشته ها انتخاب شده و با اعمال عملکردهای ژنتیکی روی آنها رشته های جدید جایگزین رشته هایی از جمعیت اولیه می شوند تا تعداد جمعیت رشته ها در تکرارهای محاسباتی مختلف ثابت باشد.

⁷ Implicit Parallelism

۴- سیستم شبیه سازی شده



شکل (۱۸). سیستم خورشیدی شبیه سازی شده در MATLAB/Simulink

در بلوک GA based MPPT، کد برنامه مربوط به الگوریتم ژنتیک نوشته شده است. این کد برنامه در پیوست ذکر شده است. پارامترهای الگوریتم ژنتیک نیز به صورت جدول (۱۸) تعیین شده است.

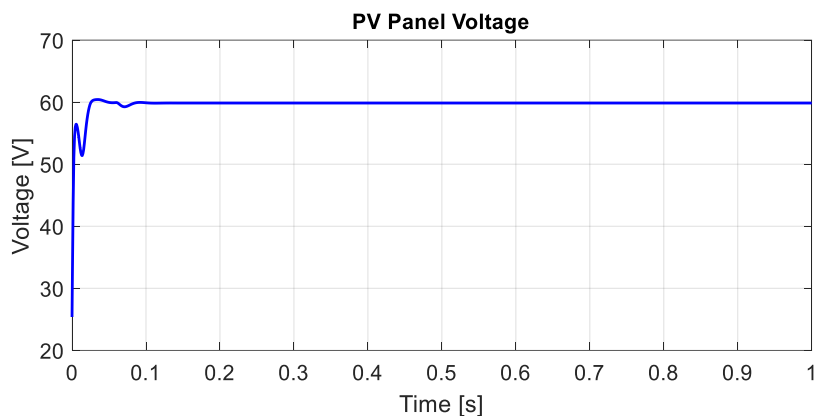
جدول (۱) پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامتر	مقدار
اندازه جمعیت	۱۰
معیار توقف (ماکزیمم تکرار)	۱۰۰
روش آمیزش	دو نقطه ای
احتمال آمیزش	۰.۸
احتمال جهش	۰.۱

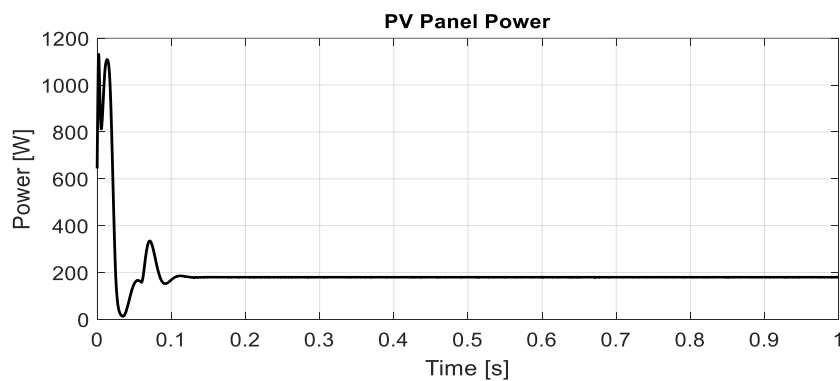
۴-۱ نتایج شبیه سازی

۴-۲- شرایط محیطی ثابت

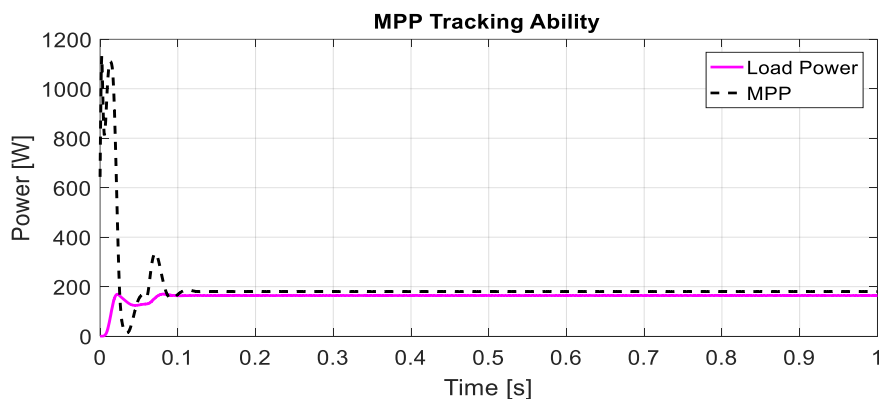
در این حالت، شرایط محیطی ثابت در نظر گرفته شده و نتایج شبیه سازی به صورت زیر ارائه می گردد. ولتاژ و توان خروجی پنل خورشیدی به ترتیب در شکل های (۱۹) و (۲۰) ترسیم شده است. قابلیت مبدل بوست در انتقال توان بیشینه از پنل خورشیدی به بار مقاومتی در نیز شکل (۴-۴) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، توان دریافتی از پنل خورشیدی تقریباً بدون کاهش به دو سر بار مقاومتی انتقال یافته است. همچنین جریان و ولتاژ بار مقاومتی نیز در شکل (۴-۵) رسم شده است.



شکل (۱۹). ولتاژ خروجی پنل خورشیدی در شرایط محیطی ثابت با روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

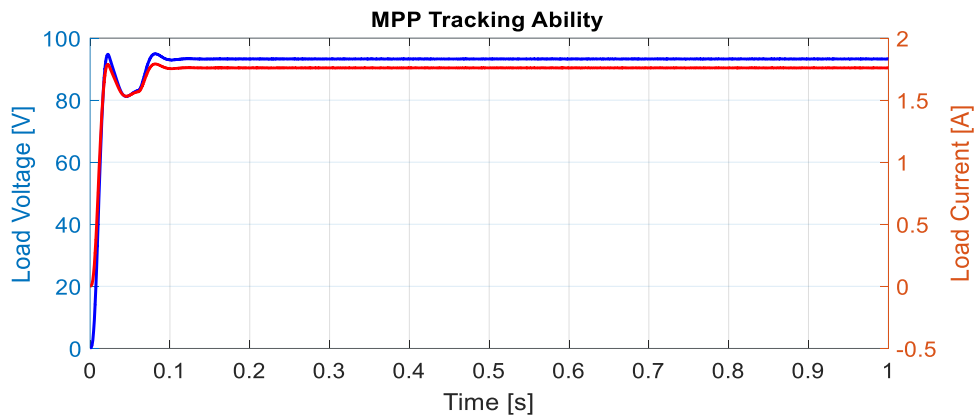


شکل (۲۰). توان خروجی پنل خورشیدی در شرایط محیطی ثابت با روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک



شکل (۲۱). قابلیت انتقال توان پنل خورشیدی توسط مبدل بوست به بار مقاومتی در شرایط محیطی ثابت با روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

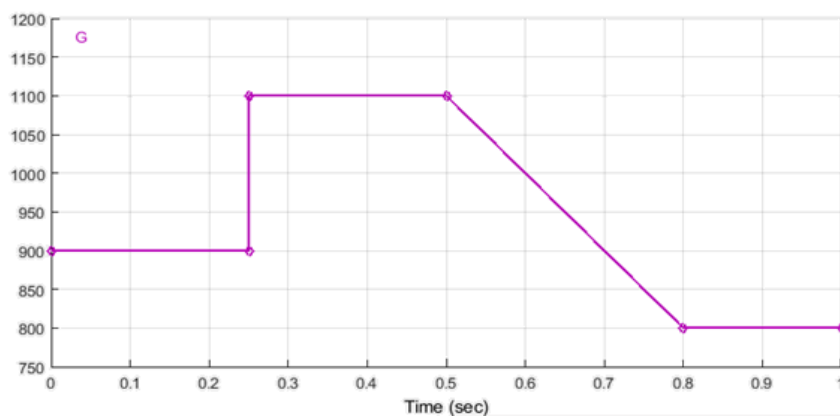
ژنتیک



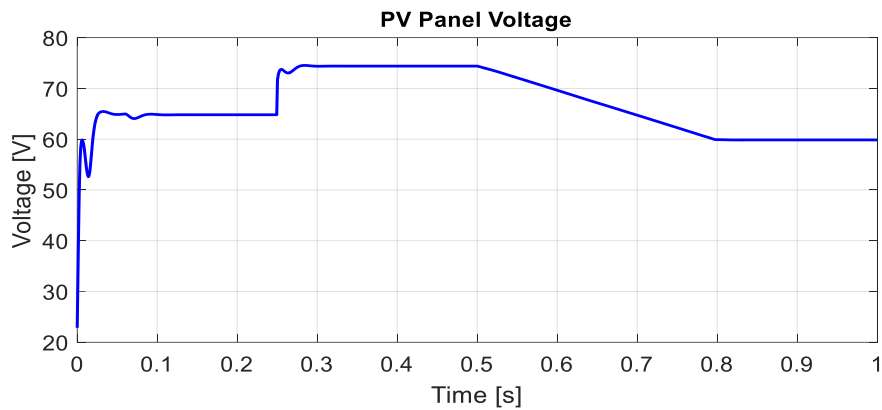
شکل (۲۲). جریان و ولتاژ بار مقاومتی در شرایط محیطی ثابت با روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

۳-۴- شرایط محیطی متغیر

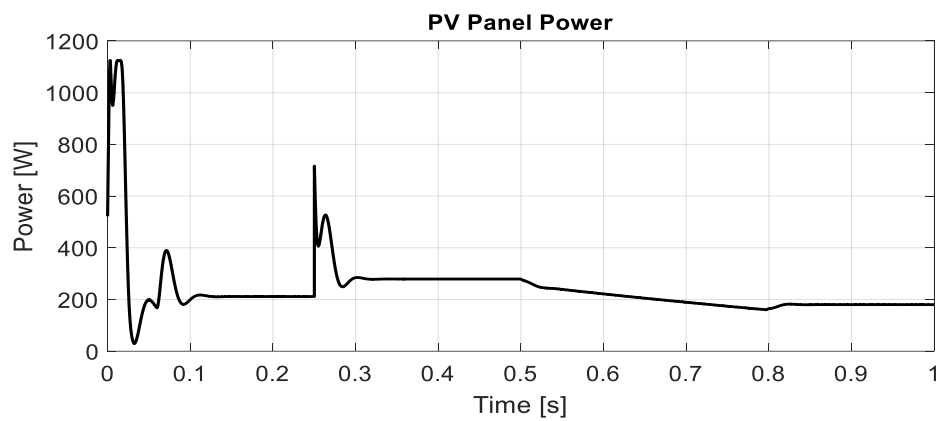
در این حالت، شدت تابش محیطی مطابق با تابع شکل (۲۳) تغییر می کند. در این صورت، توان و ولتاژ خروجی پنل خورشیدی نیز تحت تاثیر این تغییر شدت تابش قرار گرفته و با الگوی مشابهی تغییر خواهد کرد. قابلیت روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در دنبال کردن تغییرات محیطی و نیز حالت گذرا و اضافه جهش اولیه در این شبیه سازی بررسی خواهد شد. شکل (۲۴) ولتاژ و شکل (۲۵) توان خروجی پنل خورشیدی را تحت شرایط متغیر شدت تابش نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، در صورتی که شدت تابش تغییرات ناگهانی داشته باشد، اضافه جهش اولیه زیادی در توان خروجی پنل مشاهده می شود. شکل (۲۶) قابلیت انتقال توان چارپ بوس را به بار مقاومتی نشان می دهد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که چارپ بوس به دلیل وجود فیلتر RLC که در ورودی آن تعبیه شده است، اضافه جهش و حالت گذرای اولیه سیگنال ورودی را دمپ کرده و به همین دلیل، توان دو سر بار مقاومتی، عاری از اضافه جهش های قابل توجه خواهد بود. شکل (۲۷) نیز جریان و ولتاژ بار مقاومتی را تحت شرایط متغیر محیطی نشان می دهد.



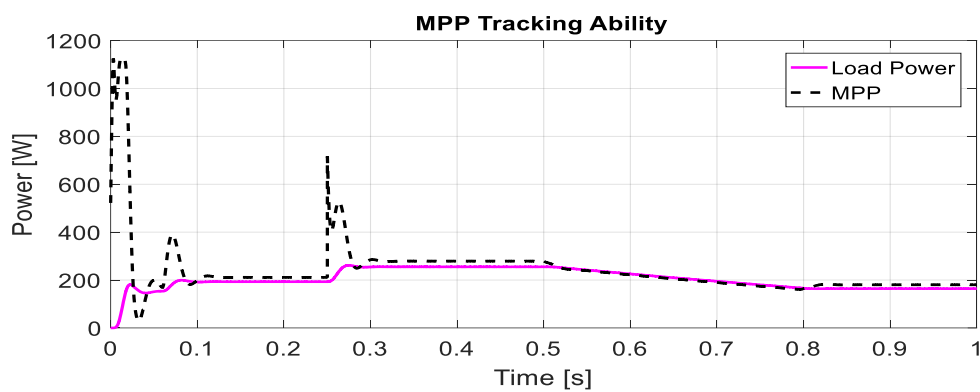
شکل (۲۳). الگوی تغییرات شدت تابش



شکل (۲۴). ولتاژ خروجی پنل خورشیدی در شرایط محیطی متغیر با روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

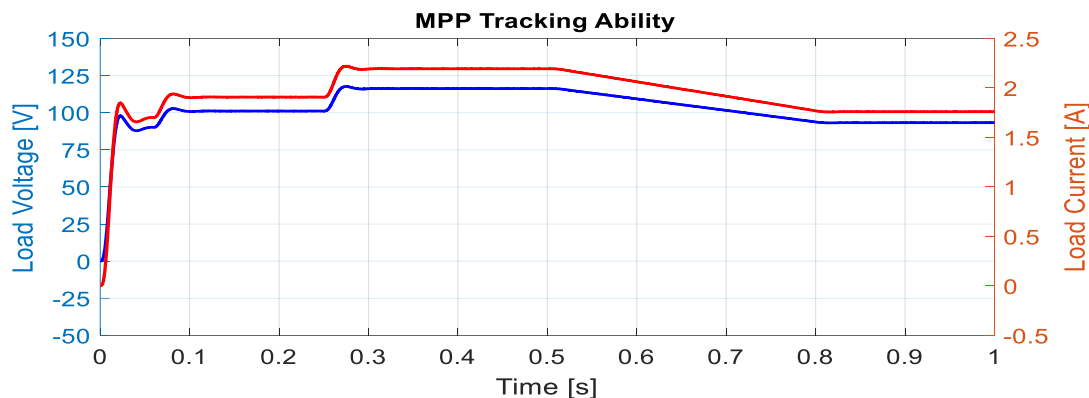


شکل (۲۵). توان خروجی پنل خورشیدی در شرایط محیطی متغیر با روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک



شکل (۲۶). قابلیت انتقال توان پنل خورشیدی توسط مبدل بوست به بار مقاومتی در شرایط محیطی متغیر با روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

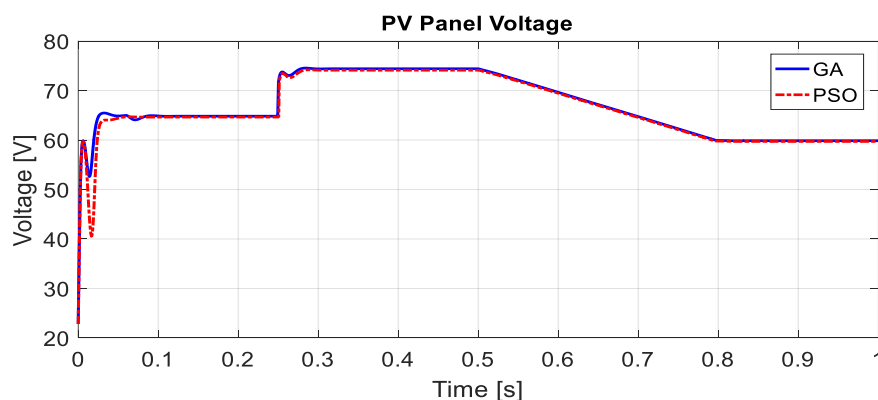
ژنتیک



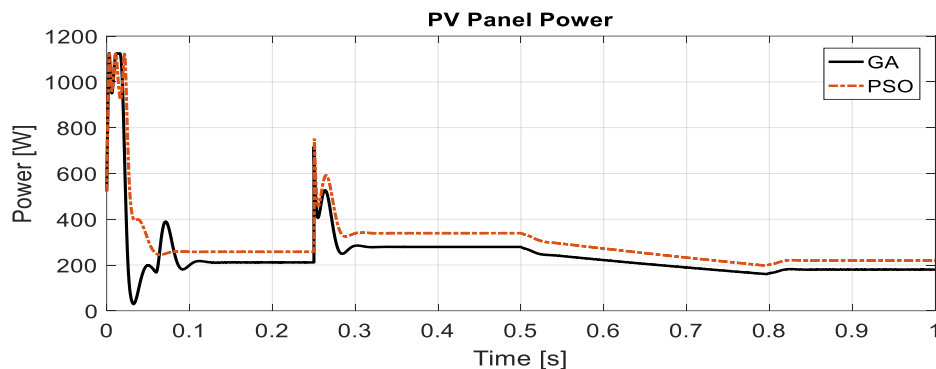
شکل (۲۷). جریان و ولتاژ بار مقاومتی در شرایط محیطی متغیر با روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

۴-۴- مقایسه نتایج

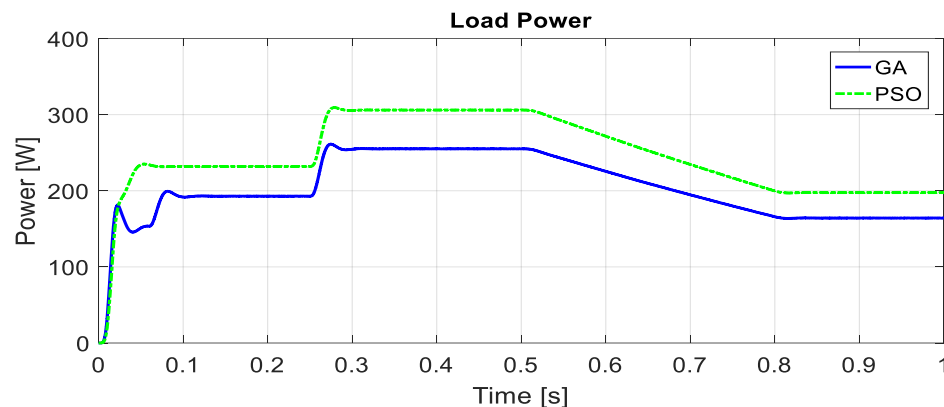
به منظور مقایسه روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، الگوریتم متداول PSO نیز به صورت بلوک MPPT برای سیستم خورشیدی شبیه سازی شده، پیاده سازی شده است. کد برنامه الگوریتم PSO به صورت پیوست ب است. در این حالت، ولتاژ و توان خروجی پنل خورشیدی با بهره گیری از هر دو روش MPPT به ترتیب در شکل های (۲۸) و (۲۹) نشان داده شده است. همچنین توان رسیده به بار مقاومتی نیز در شکل (۳۰) قابل مشاهده است. نتایج شبیه سازی با کمک دو الگوریتم ژنتیک و PSO نشان دهنده برتری الگوریتم PSO در استحصال توان بیشتر از پنل خورشیدی تحت شرایط کاملاً یکسان نسبت به الگوریتم ژنتیک است. دلیل این مسئله، قابلیت الگوریتم PSO در همگرایی بهتر به پاسخ بهینه نسبت به الگوریتم ژنتیک است. همانطور که قبلاً نیز بیان شد، الگوریتم ژنتیک پس از برآورده شدن معیار توقف، الزاماً بهینه ترین پاسخ را نتیجه نمی دهد اما الگوریتم PSO قابلیت همگرایی بالایی دارد که علت آن، مکانیزم به روز رسانی سرعت و موقعیت هر ذره در هر تکرار الگوریتم است. بنابراین نتایج شبیه سازی به کمک الگوریتم PSO بهتر از الگوریتم ژنتیک خواهد بود.



شکل (۲۸). ولتاژ خروجی پنل خورشیدی در شرایط محیطی متغیر با استفاده از روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و مبتنی بر PSO



شکل (۲۹). توان خروجی پنل خورشیدی در شرایط محیطی متغیر با استفاده از روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و مبتنی بر PSO



شکل (۳۰) توان رسیده به بار مقاومتی در شرایط محیطی متغیر با استفاده از روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و مبتنی بر PSO

۵- نتیجه گیری

دریافت توان بیشتر از سیستم های خورشیدی PV تحت شرایط محیطی متغیر، موجب افزایش راندمان کلی سیستم تولید مبتنی بر انرژی خورشیدی می گردد. میزان تابش نور خورشید دائماً در حال تغییر است و این تغییرات به خصوص در فصول سرد سال، ممکن است به صورت ناگهانی رخ دهد. علت این مسئله این است که در این فصول، شاخص شفافیت آسمان ضعیف تر بوده و تراکم ابرها بیشتر است. تغییرات ناگهانی شدت تابش عموماً با تغییرات دما نیز همراه است چون انرژی تابشی نور خورشید حامل انرژی گرمایی نیز می باشد. بنابراین افزایش بازدهی سیستم خورشیدی PV تحت این شرایط، مشروط به بهره گیری از ساختاری است که بتواند تغییرات ناگهانی شدت تابش و دما را به خوبی دنبال کرده و نقطه توان بیشینه را ردگیری کند. پرسش اصلی بررسی شده در این تحقیق آن بود که چگونه می توان بدون تغییر ساختار سیستم و تعویض پنل خورشیدی، با کمک مفهوم MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، توان بیشتری را از سیستم خورشیدی با وجود تغییرات شدت تابش و دمای محیط، دریافت نمود. در این مقاله، ردگیری نقطه توان بیشینه در سیستم خورشیدی متصل به چارپوست به کمک الگوریتم بهینه سازی ژنتیک ارائه گردید. بلوک MPPT در سیستم خورشیدی که مسئول تولید سیگنال های کنترلی برای چارپوست است، به کمک بلوک MATLAB Function در مدل شبیه سازی به کار رفته و کد برنامه الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین دوره کار (d) بهینه در آن نوشته شد. همچنین به منظور ارزیابی توانایی روش MPPT مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در دنبال کردن نقطه توان تحت شرایط محیطی متغیر، شدت تابش و دمای محیط که پارامترهای ورودی سیستم

خورشیدی در شبیه سازی میباشند ، تغییر کرد. در پایان نیز الگوریتم ژنتیک با الگوریتم PSO مقایسه شد که نتایج موثر بودن روش پیشنهادی را در شرایط تابش ثابت و متغیر و همچنین دمای ثابت و متغیر نشان داد.

جهت ادامه کار پیشنهاد میشود از سایر الگوریتم های بهینه سازی استفاده نمود. همچنین می توان اجزای دیگری را در کنار سلولهای خورشیدی مانند پیل سوختی در نظر گرفت.

منابع

- [۱] W. Xiao and W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photoVoltaic power systems", in Proc. 35th Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf., pp. 1957-1963, 2004.
- [۲] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 20, No. 4, pp. 963-973, 2005.
- [۳] L. Piegari and R. Rizzo, "Adaptive perturb and observe algorithm for photoVoltaic maximum power point tracking", IET Renew. Power Gener., Vol. 4, No. 4, pp. 317-328, 2010.
- [۴] A. K. Abdelsalam, A. M. Massoud, S. Ahmed, P. N. Enjeti, "High-Performance Adaptive Perturb and Observe MPPT Technique for PhotoVoltaic-Based Microgrids", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No.4, pp.1010-1021, 2010.
- [۵] Y. T. Hsiao and C. H. Chen, "Maximum power tracking for photoVoltaic power system", in Conf. Record 37th IAS Annu. Meeting Ind. Appl. Conf., pp. 1035-1040, 2002.
- [۶] O. Hashimoto, T. Shimizu and G. Kimura, "A Novel high performance utility interactive photoVoltaic inverter system", in Conf. Record IEEE Ind. Applicat. Conf., pp. 2255-2260, 2000.
- [۷] M. S. Shadlu, "Comparison of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Algorithms to Control DC-DC Converters in Photovoltaic Systems", Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, Vol. 11, pp. 1-12, 2018.
- [۸] S. C. W. Krauter, "Solar Electric Power Generation – PhotovoltaicEnergy Systems", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [۹] K. Harada and G. Zhao, "Controlled power interface between solar cells and AC source," IEEE Trans. on Power Electron., Vol. 8, pp. 654-662, 1993.
- [۱۰] A. Labouret and M. Vill, "Solar Photovoltaic Energy", Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2009.
- [۱۱] A. Goetzberger, V. U. Hoffmann, "Photovoltaic Solar Energy Generation", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [۱۲] A. P. Kirk, O. C. Onar, "Solar Photovoltaic Cells Photons to Electricity", Academic Press is an imprint of Elsevier, 2015.
- [۱۳] A. Khaligh, O. C. Onar, "ENERGY HARVESTING Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems", by Taylor and Francis Group, 2010.
- [۱۴] C. W. Tan, T.C. Green, H. Aramburo, "An improved maximum power point tracking algorithm with current-mode control for photoVoltaic applications", IEEE International Conf., Vol. 1, pp. 489-494, 2005.
- [۱۵] S. Jain and V. Agarwal, "A newalgorithm for rapid tracking of approximate maximum power point in photoVoltaic system", IEEE Power Electron. Lett., Vol. 2, No. 1, pp. 16-19, 2004.
- [۱۶] K. Kobayashi, I. Taka and Y. Sawada, "A study on a two stage maximum power point tracking control of a photoVoltaic system under partially shaded insolation conditions", in IEEE Power Eng. Soc. Gen.Meet., pp. 2612-2617, 2003.
- [۱۷] S. S. Mohammed, D. Devaraj, "Simulation of Incremental Conductance MPPT based two phase interleaved boost converter using MATLAB/Simulink", IEEE International Conference onElectrical,