

مدلسازی و شبیه‌سازی اینورتر هیبرید با منابع انرژی تجدید پذیر سلول خورشیدی و توربین بادی مجهز به الگوریتم MPPT بهبودیافته

علی شمس‌نیا، دانشجوی دکتری^۱ سید حسین حسینی، استاد^۲ سعید دانیالی، دانشجوی دکتری^۳

۱- فارغ التحصیل کارشناسی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز و دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق - دانشگاه

صنعتی شریف - تهران - ایران

shamsnia_ali@ee.sharif.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران

hosseini@tabrizu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران

danyali_saeed@yahoo.com

چکیده: در مقاله حاضر به معرفی مدار اینورتر هیبرید با منابع انرژی سلول خورشیدی و توربین بادی خواهیم پرداخت که در این مدار بکارگیری اینورتر واحد برای هر دو منبع ورودی، باعث کاهش هزینه و ساده‌تر شدن مدار سیستم گردیده است. از آنجائیکه مشخصه P-V سلول خورشیدی و توربین بادی تحت شرایط مختلف دارای یک نقطه ماکزیمم توان است، از الگوریتم MPPT برای بکارگیری این نقطه کار بهینه استفاده شده است. لازم به ذکر است که بکارگیری یک الگوریتم MPPT ترکیبی و جدید برای سلولهای خورشیدی امکان ردیابی سریع و دقیق نقطه کار بهینه آنها تحت شدت نورهای مختلف را فراهم کرده است و به این ترتیب عیب عمده الگوریتمهای قبل در این الگوریتم برطرف شده است. علاوه بر بخش‌های مذکور، سیستم حاضر شامل یک قسمت سوخت هیدروژن Backup برای انجام وظایف باتری نیز می‌باشد. توان تولیدی توسط منابع مختلف سیستم به یک لینک DC مشترک تزریق می‌شود تا اینورتر تکفاز متصل به این لینک بتوان مذکور را برای تغذیه بارهای AC خروجی بکار گیرد. نتایج شبیه‌سازی این سیستم نشان از عملکرد مطلوب آن دارد. همچنین در این مقاله مدل جدیدی برای سلولهای خورشیدی ارائه شده است که عملکرد بهتری نسبت به مدل متداول منبع جریانی دارد و رفتار سلول خورشیدی واقعی را بسیار دقیقتر و بهتر شبیه‌سازی می‌نماید در عین حال اعمال تغییرات محیطی به این مدل به سادگی امکان پذیر است.

واژه‌های کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، ردیابی نقطه کار بهینه (MPPT)، باتری خورشیدی، توربین بادی با PMSG، اینورتر تکفاز تمام پل، رگولاسیون ولتاژ خروجی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۴/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۹/۷

نام نویسنده‌ی مسئول : علی شمس‌نیا

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - تهران - خیابان آزادی - دانشگاه صنعتی شریف - دانشکده‌ی مهندسی برق - آزمایشگاه کیفیت توان

۱- مقدمه

بدی (با PMSG) است که این دو منبع، ورودی مبدل‌های DC-DC می‌باشند. مبدل‌های DC-DC نمایش داده شده در شکل با بکارگیری الگوریتم ردیابی نقطه ماکزیمم توان یا همان MPPT، به جذب حداکثر توان ممکن از ورودی‌ها می‌پردازند سپس این توان را در خروجی خود به اینورتر تحویل می‌دهند تا این بخش به همراه ترانسفورمر خروجی، با تبدیل توان DC تولیدی به توان AC با دامنه و فرکانس مناسب، شکل مطلوب انرژی جهت مصرف بارها را فراهم آورد. اینورتر این مدار از نوع تمام پل بوده و به روش SPWM سوئیچ زنی می‌شود تا امکان تعدیل ولتاژ خروجی در برابر تغییرات متوسط بار فراهم گردد. تعدیل ولتاژ به هنگام تغییرات شدیدتر بار توسط واحد سوخت هیدروژن صورت می‌پذیرد به این ترتیب که به هنگام اضافه ولتاژ (که به معنی اضافه تولید می‌باشد)، قسمت کنترلی توان مصرفی کاتالیزور آب واحد سوخت هیدروژن را تا جایی افزایش می‌دهد که ولتاژ خروجی به حد مجاز برگردد و در حالت افت ولتاژ و عدم امکان جبران این افت به روش SPWM (یعنی به هنگام تامین نشدن توان مصرفی توسط ورودی‌ها)، قسمت کنترلی با بکار انداختن موتور سوخت هیدروژن و ژنراتور DC متصل به آن، کمبود توان تولیدی را جبران می‌کند به این ترتیب این سیستم قادر است بدون آلودگی محیط به تغذیه مداوم بار AC متغییر در خروجی بپردازد.

۲- معرفی اجزای مدار اینورتر هیبرید

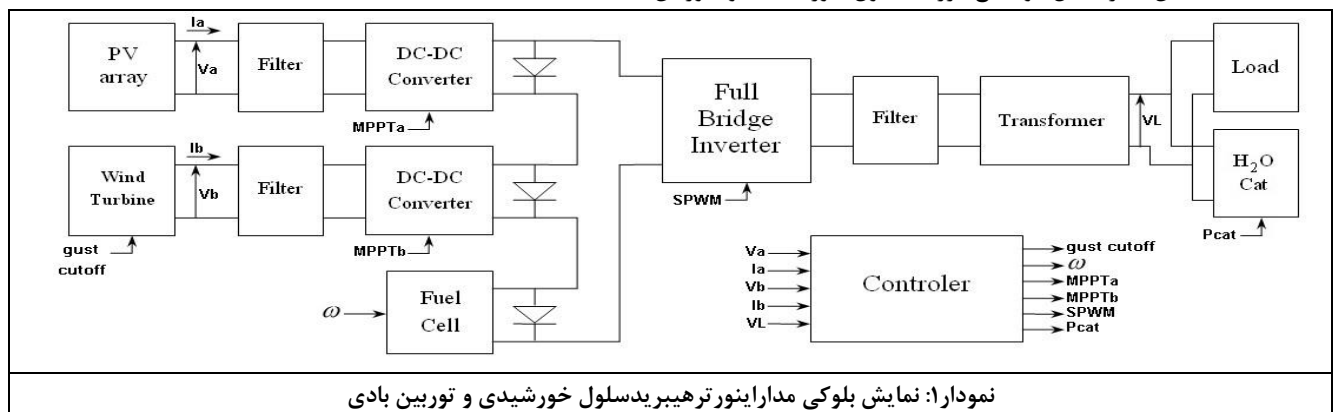
۳-۱- باطری خورشیدی

در حال حاضر یکی از اصلی‌ترین روش‌های تبدیل انرژی نور خورشید به انرژی الکتریکی، استفاده از باطری‌های خورشیدی می‌باشد [5]. مشخصه‌های الکتریکی P-V و I-V یک پانل خورشیدی نمونه تحت شدت نورهای $\psi_1 > \psi_2 > \psi_3 > \psi_4 > \psi_5$ ، در نمودار ۲ نمایش داده شده است. این نمودارها بر اساس آزمایشات عملی رسم شده‌اند [6]. ویژگی بارز این مشخصه‌ها، بخصوص در شدت نور نزدیک شدت نور نامی، افت شدیدی است که توان خروجی پانل در نقاط کار غیر از نقطه کار بهینه پیدا می‌کند که این مشکل با بکارگیری الگوریتم ردیابی نقطه کار بهینه بطور کامل قابل رفع است.

در سالهای اخیر کشورهای زیادی بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر را در تولید انرژی الکتریکی مورد توجه قرار داده‌اند و به تبع آن استفاده از این انرژی‌ها رشد چشمگیری داشته است که پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه الکترونیک صنعتی نیز باعث تسریع هرچه بیشتر این رشد گردیده است. علت گرایش فراوان کشورها به انرژی‌های تجدیدپذیر مزایای زیادی است که این انرژی‌ها به همراه دارند از جمله هزینه و آلودگی ناچیز. در پژوهش حاضر، از بین انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از انرژی خورشید و انرژی باد را مورد توجه قرار داده‌ایم چراکه این انرژی‌ها تقریباً مکمل یکدیگر می‌باشند. به عبارت دیگر روزهای آفتابی معمولاً آرام بوده و با نسیم ملایم همراه هستند و در مقابل بادهای تند معمولاً در روزهای ابری یا در طول شب اتفاق می‌افتد بنابراین می‌توان انتظار داشت که سیستم هیبرید سلول خورشیدی و توربین بادی نسبت به هر یک از این سیستم‌ها بصورت منفرد، تولید انرژی الکتریکی مداوم‌تری در خروجی داشته باشد [1,2]. معمول است که در چنین سیستم‌هایی برای داشتن ذخیره انرژی و نیز جهت اخذ ماکزیمم توان از ورودی‌ها، از باطری استفاده شود [3] ولی استفاده از باطری با مشکلاتی همراه است منجمله هزینه زیاد، عمر محدود و آلودگی شیمیایی که گاهی باطری‌ها به دنبال دارند. به همین دلیل در سیستم حاضر از یک واحد سوخت هیدروژن برای انجام وظایف باطری بهره گرفته‌ایم. دیگر بخش سیستم مورد بحث اینورتر تکفاز تمام پل می‌باشد. معمولاً در سیستم‌های مشابه، برای هر یک از ورودی‌ها یک اینورتر مجزا در نظر گرفته می‌شود و انرژی تولیدی در خروجی اینورترها با هم ترکیب می‌شود [4] ولی در مدار حاضر ترکیب انرژی منابع در لینک DC بین ورودی‌ها و اینورتر صورت پذیرفته تا با کاهش تعداد اینورترها به یک اینورتر، هم هزینه کاهش یابد و هم مدار سیستم قدرت ساده‌تر شود.

۲- معرفی کلی مدار اینورتر هیبرید

نمایش بلوکی مدار اینورتر هیبرید پیشنهادی در نمودار ۱ ارائه شده است. این مدار شامل دو منبع انرژی سلول خورشیدی و توربین

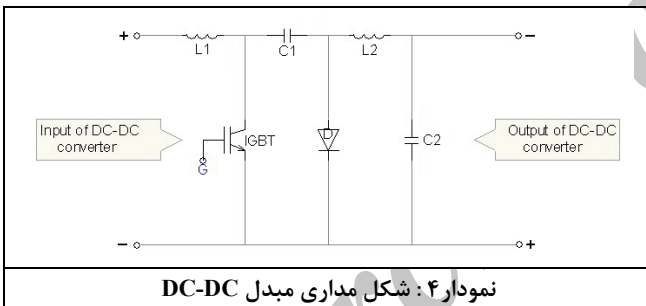


منظور باشند ولی معیایی مانند هزینه زیاد، ظرفیت محدود، عمر کم و بخصوص آلاینده‌گی شیمیایی که گاهی این باطری‌ها به همراه دارند موجب می‌شود تا کمتر از آنها در ساختمان چنین سیستم‌هایی استفاده شود [9] به همین دلیل در سیستم حاضر واحد سوخت هیدروژن را برای انجام وظایف باطری جایگزین کرده‌ایم. این واحد از یک موتور احتراق داخلی، یک ژنراتور DC، یک کاتالیزور آب و مخازن ذخیره کننده هیدروژن تشکیل یافته است. سوخت موتور احتراق داخلی، هیدروژن است که از سوخت‌های بدون آلاینده‌گی می‌باشد. محور موتور احتراق داخلی به ژنراتور DC کوپل شده است تا توسط آن انرژی حاصل از احتراق به انرژی الکتریکی تبدیل شود. وظیفه تولید هیدروژن مورد نیاز موتور نیز به عهده کاتالیزور آب می‌باشد که به همراه بار به خروجی سیستم متصل است.

این بخش همچنین این امکان را فراهم می‌کند که در بیشتر ساعات روز و بدون توجه به میزان مصرف سیستم، بتوانیم ماکزیمم توان ممکن را از ورودی‌ها جذب کنیم.

۳-۴- مبدل DC-DC

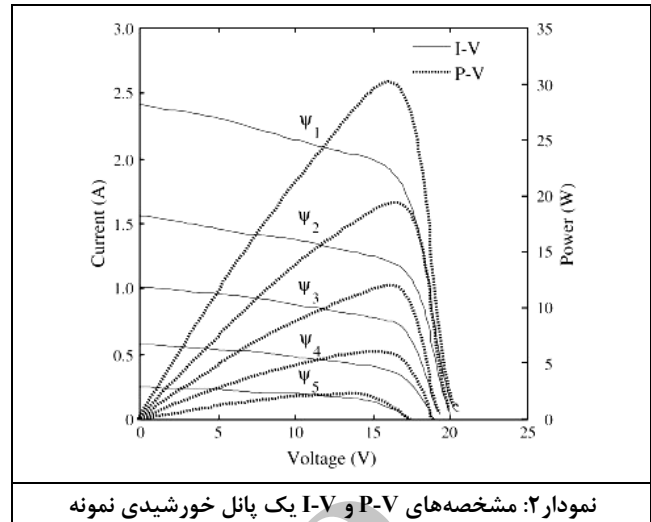
در قسمتهای قبل توجه به مشخصه‌های P-V منابع انرژی ورودی لزوم بکارگیری الگوریتم MPPT برای این منابع را واضح نمود که در سیستم حاضر وظیفه اعمال این الگوریتم برعهده مبدلهای DC-DC نوع کاک می‌باشد. این مبدل در نمودار ۴ نمایش داده شده است.



مبدل فوق می‌تواند ولتاژ و جریان خروجی بزرگتر یا کوچکتر از ولتاژ و جریان ورودی تولید نماید (البته با توان ثابت) بدین ترتیب امکان تغییر نقطه کار منابع ورودی و بردن آن به نقطه کار بهینه فراهم می‌شود [6]. یک مزیت استفاده از این مبدلها برای ردیابی نقطه کار بهینه منابع ورودی در این است که سوئیچ مبدل بصورت سری با منبع قرار نمی‌گیرد بلکه یک سلف با منبع سری می‌گردد و این باعث می‌شود که جریان کشیده شده از منبع و در نتیجه توان خروجی منبع نه تنها حالت قطع و وصل نداشته باشد بلکه شکل یکنواخت‌تری نیز پیدا کند.

۳-۵- واحد اعمال کننده الگوریتم MPPT روی منابع:

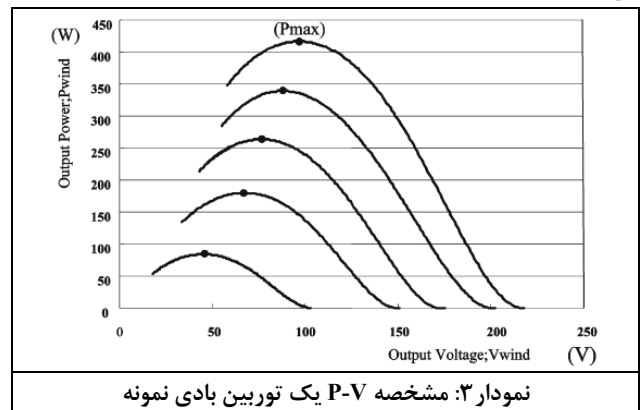
این واحد برای ردیابی (Maximum Power Point) MPP توربین بادی از روش Hill Climbing استفاده می‌کند ولی از آنجائیکه



۳-۲- توربین بادی

در سیستم حاضر برای دریافت انرژی باد از یک توربین بادی بهره برده‌ایم که محور این توربین بادی به یک ژنراتور سنسکرون آهنربای دائم یا همان PMSG کوپل شده است تا انرژی باد را به انرژی الکتریکی مبدل سازد. خروجی این ژنراتور نیز از طریق یکسوساز سه فاز پل دیودی به مبدل DC-DC اعمال کننده MPPT روی این منبع، وصل شده است. علت انتخاب PMSG برای این سیستم به بازده بالاتر این ژنراتور نسبت به سایر انواع برمی‌گردد.

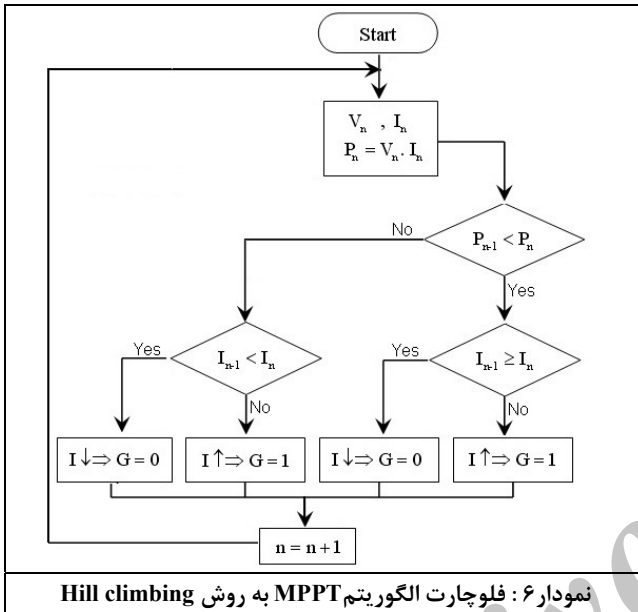
مشخصه P-V یک توربین بادی نمونه به ازاء چند سرعت باد مختلف در نمودار ۳ نمایش داده شده است [9]. نکته قابل توجه تشابه مشخصه P-V توربین بادی به مشخصه P-V باطری خورشیدی است بخصوص از این نظر که این نمودار هم دارای یک نقطه ماکزیمم توان می‌باشد.



۳-۳- واحد سوخت هیدروژن

یکی از اهدافی که سیستم حاضر دنبال می‌کند تامین انرژی مورد نیاز بار خروجی در بیشتر ساعات شبانه روز، بدون توجه به شرایط جوی و میزان تولید منابع ورودی می‌باشد. واضح است که برای دستیابی به چنین هدفی به یک قسمت ذخیره کننده انرژی نیاز داریم. باطری‌های شیمیایی می‌توانند یکی از انتخاب‌های ممکن برای این

در پایان باید مدنظر داشت که قسمت اعمال‌کننده الگوریتم MPPT از طریق مبدل‌های DC-DC و با فرمان دادن به سوئیچ‌های آنها به انجام وظیفه خود می‌پردازد و با توجه به مدار مبدل DC-DC ملاحظه می‌شود که افزایش جریان منبع ورودی به معنی بسته شدن سوئیچ مبدل است و کاهش جریان به معنی باز شدن سوئیچ می‌باشد پس به این ترتیب واحد اعمال‌کننده MPPT باید در حالت‌های ۱ و ۲ بررسی فوق، فرمان باز شدن (یعنی $G = 0$) را به سوئیچ مبدل بدهد و در حالت‌های ۳ و ۴ فرمان بسته شدن سوئیچ (یعنی $G = 1$) را صادر نماید.



روش Hill climbing از روش‌های ابتدایی و رایج در اعمال MPPT بر سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی است که کاربرد فراوانی داشته است. عیب عمده این روش در بکارگیری برای سلول خورشیدی (به تنهایی) در این است که تحت شدت نور کم خورشید این روش در ردیابی نقطه کار بهینه با مشکل روبرو می‌شود بطوریکه یا قادر به ردیابی MPP نیست و یا با تاخیر زیاد به این نقطه دست می‌یابد ولی تحت شدت نورهای بالاتر این روش با سرعت متوسط و دقت کافی نقطه کار بهینه را ردیابی می‌کند.

۳-۵-۲- معرفی الگوریتم MPPT به روش β :

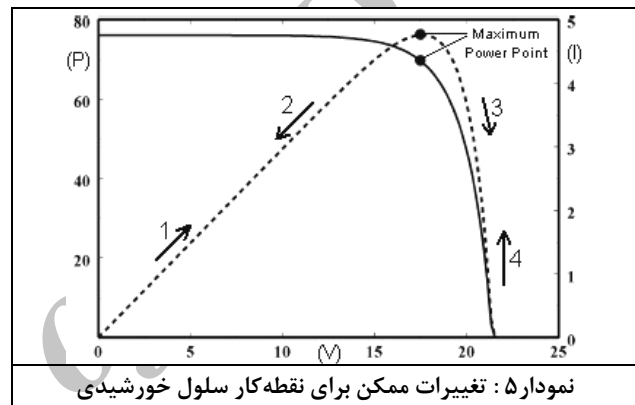
بررسی مشخصه I-V سلول خورشیدی به تعریف پارامتری به نام β برای آن منجر می‌شود که مشخصه اصلی این پارامتر در این است که تحت شرایط محیطی مختلف، با نزدیک شدن نقطه کار سلول خورشیدی به نقطه کار بهینه، اندازه این پارامتر در یک بازه کوچک ویژه آن پائل قرار می‌گیرد، به این ترتیب با محاسبه این پارامتر در شرایط کاری مختلف می‌توان معیاری از میزان نزدیکی نقطه کار فعلی به نقطه کار بهینه داشت و با مقایسه مقدار فعلی و مقدار قبلی این پارامتر، جهت صحیح برای رسیدن به نقطه کار بهینه را تعیین کرد.

تعریف پارامتر β به صورت زیر انجام می‌پذیرد:

استفاده از این روش برای سلول خورشیدی با معایبی همراه است، از ترکیبی از روش مذکور و روش دیگر به نام β برای سلول‌های خورشیدی سیستم بهره گرفته شده است تا ردیابی نقطه ماکزیمم توان این سلول‌ها نیز تحت شرایط جوی مختلف به سرعت و با دقت کافی صورت پذیرد. در ادامه ابتدا به معرفی هر یک از روش‌های فوق می‌پردازیم سپس روش ترکیبی بکار رفته برای سلول‌های خورشیدی را تشریح می‌کنیم:

۳-۵-۱- معرفی الگوریتم MPPT به روش Hill climbing:

روش Hill climbing روشی است که براساس تغییرات توان و جریان خروجی منبع کار می‌کند. در نمودار ۵ مشخصه‌های P-V و I-V یک سلول خورشیدی نمونه و تغییرات ممکن برای نقطه کار این سلول نمایش داده شده است.



طبق نمودار ۵ تغییرات نقطه کار سلول خورشیدی چهار حالت امکان‌پذیر است:

حالت ۱: در این حالت تغییرات نقطه کار در جهت افزایش P و نیز افزایش V است و از مشخصه I-V نیز در همان لحظه نتیجه می‌شود که I در حال کاهش است از سوی دیگر برای رسیدن به MPP در این حالت، باید جهت تغییرات به همین صورت حفظ شود. بیان ریاضی در تشخیص این حالت و عمل صورت گرفته در پی آن عبارت است از:

$$\text{If } P_n > P_{n-1}, I_n < I_{n-1} \Rightarrow I \downarrow$$

حالت ۲: در این حالت P و V در حال کاهش هستند و I در حال افزایش می‌باشد، بعلاوه جهت تغییرات نیز در جهت دور شدن از MPP است بنابراین باید جهت تغییرات عوض شود:

$$\text{If } P_n < P_{n-1}, I_n > I_{n-1} \Rightarrow I \downarrow$$

حالت ۳: در این حالت P در حال کاهش است و V در حال افزایش، I نیز در حال کاهش می‌باشد بعلاوه باید جهت تغییرات عوض شود تا به MPP برسیم:

$$\text{If } P_n < P_{n-1}, I_n < I_{n-1} \Rightarrow I \uparrow$$

حالت ۴: در نهایت در این حالت افزایش P، کاهش V و افزایش I را شاهد هستیم و جهت تغییرات هم برای رسیدن به MPP مناسب است:

$$\text{If } P_n > P_{n-1}, I_n > I_{n-1} \Rightarrow I \uparrow$$

به این ترتیب می‌توان فلوچارتی بصورت نمودار ۶ برای پیاده کردن این الگوریتم در نظر گرفت.

عمده دو روش استاندارد قبل را نیز برطرف می‌کند. مقایسه روش جدید با روشهای استاندارد Hill climbing و β در بخش شبیه سازی ارائه شده است تا معیاری از عملکرد این روش در مقایسه با روشهای استاندارد موجود ارائه دهد و بهبود صورت گرفته را به نمایش گذارد. برای مقایسه بیشتر این روش با روشهای استاندارد دیگر می‌توان از مقالاتی مانند مرجع [8] که در آن روشهای استاندارد Hill climbing و β با روشهای دیگر مقایسه گشته اند، بهره برد.

۳-۶- واحد کنترلی سیستم

واحد کنترلی این سیستم از یک میکروکنترلر تشکیل شده است که با نمونه برداری از ولتاژ خروجی و مقایسه آن با بازه مجاز ولتاژ، در صورت نیاز، به کاتالیزور آب، اینورتر و موتور سوخت هیدروژن فرمان‌های لازم را می‌دهد تا ولتاژ خروجی را به محدوده مجاز بازگرداند. نحوه عملکرد دقیقتر این بخش به این صورت است که به هنگام بیشتر بودن تولید منابع ورودی از بار سیستم که متناظر با اضافه ولتاژ در خروجی سیستم است، این بخش با افزایش توان مصرفی کاتالیزر آب سعی در ایجاد تعادل بین تولید و مصرف می‌نماید. به هنگام افت ولتاژ خروجی نیز این بخش با کاهش مصرف کاتالیزر و اعمال تغییرات مناسب در پالسهای گیت تولید شده به روش SPWM برای اینورتر تکفاز خروجی، سعی می‌کند ولتاژ خروجی را به بازه مجاز بازگرداند ولی اگر مشکل افت ولتاژ خروجی به این ترتیب حل نشود علت در کمبود توان الکتریکی تولیدی نسبت به توان مصرفی خواهد بود که در این صورت واحد کنترلی فرمان راه‌اندازی موتور سوخت هیدروژن و ژنراتور DC کوپل شده به آن را صادر نموده و این مجموعه را چنان کنترل می‌کند که ژنراتور مذکور توان اضافی مورد نیاز سیستم را تولید نماید. به این ترتیب سیستم می‌تواند تحت شرایط جوی مختلف و بارهای خروجی متفاوت تعادل تولید و مصرف را حفظ نماید.

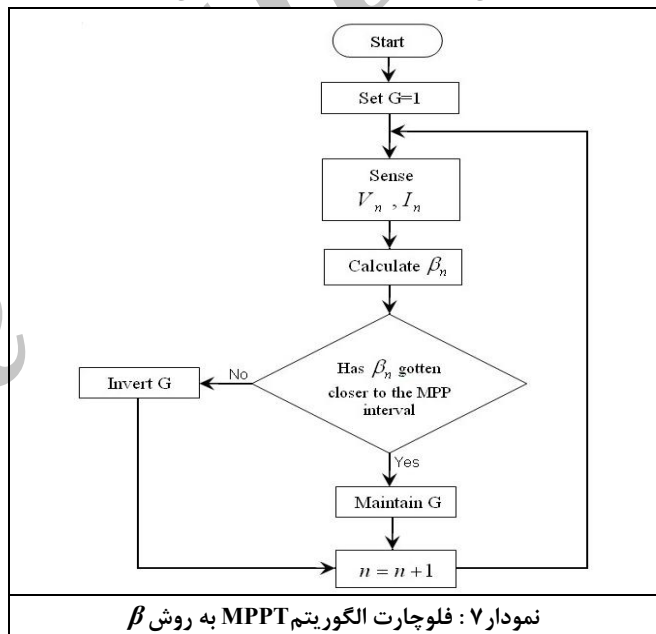
۴- مدلسازی باطری خورشیدی

مدار معادل معمولی که برای سلول خورشیدی در شبیه‌سازی‌ها بکار می‌رود مدار معادل دیودی می‌باشد. همانطور که در نمودار ۸ نمایش داده شده است اصلترین عیب این مدار معادل در این است که مشخصه P-V حاصل از آن به سرعت از نقطه ماکزیمم توان دور می‌شود در صورتیکه در سلول‌های خورشیدی واقعی چنین نیست [10]. عیب دیگر مدار معادل دیودی در این است که برای اعمال تغییرات دما و شدت نور محیط باید مقادیر عناصر مدار تغییر یابد. در پژوهش حاضر برای رفع معایب مذکور از مدار معادل جدیدی بهره‌گرفته‌ایم که در ادامه به تشریح آن می‌پردازیم.

$$\beta = \ln\left(\frac{I_A}{V_A}\right) - C \times V_A = \ln(I_0 \times C) \quad , \quad C = \frac{q}{A \cdot k \cdot T \cdot N_s}$$

که V_A ولتاژ دو سر پانل، I_A جریان پانل، q بار الکترون، T دمای مطلق، N_s تعداد سلول‌های خوشیدی سری شده در یک پانل، I_0 جریان اشباع معکوس سلول خورشیدی، A ضریب ایده‌آلی و K ثابت بولتزمن می‌باشد [8].

با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان الگوریتمی بصورت نمودار ۷ برای پیاده‌سازی روش β ارائه کرد. این روش نیز از روشهای استاندارد است که در مقالات مختلف مدنظر قرار گرفته است و بررسی‌های گوناگونی روی آن انجام گرفته است. مزیت عمده این روش در سرعت بالای آن در ردیابی نقطه کار بهینه تحت شرایط نور ضعیف می‌باشد ولی عیب آن در این است که بعد از رسیدن به نزدیکی نقطه ماکزیمم توان (بعد از قرار گرفتن β در بازه متناظر با MPP) این روش دیگر نمی‌تواند MPP را بطور دقیقتر ردیابی کند.



۳-۵-۳- روش ترکیبی بکاررفته برای سلول‌های خورشیدی:

دقت در مزایا و معایب اشاره شده برای روشهای Hill climbing و β نشان می‌دهد که این دو روش می‌توانند مکمل مناسبی برای یکدیگر جهت استفاده در سلول خورشیدی باشند که این ایده، پایه روش ترکیبی جدید پیشنهادی می‌باشد. در حقیقت روش ترکیبی جدید به این ترتیب عمل می‌کند که در ابتدای ردیابی نقطه ماکزیمم توان پانل خورشیدی از روش β استفاده می‌کند تا این روش نقطه کار سلول خورشیدی را تا نزدیکی MPP پیش برد بعد از قرار گرفتن β در بازه متناظر با نقاط کار بهینه، روش Hill climbing وارد عمل شده و نقطه دقیق ماکزیمم توان را ردیابی می‌کند.

از مزایای این روش می‌توان به دقت بالا و سرعت بالا در ردیابی MPP، حتی تحت شدت نور ضعیف، اشاره کرد بعلاوه این روش معایب

۵- شبیه‌سازی سیستم

۱-۵- ارزیابی صحت عملکرد الگوریتم MPPT و

بهبود حاصل شده در آن

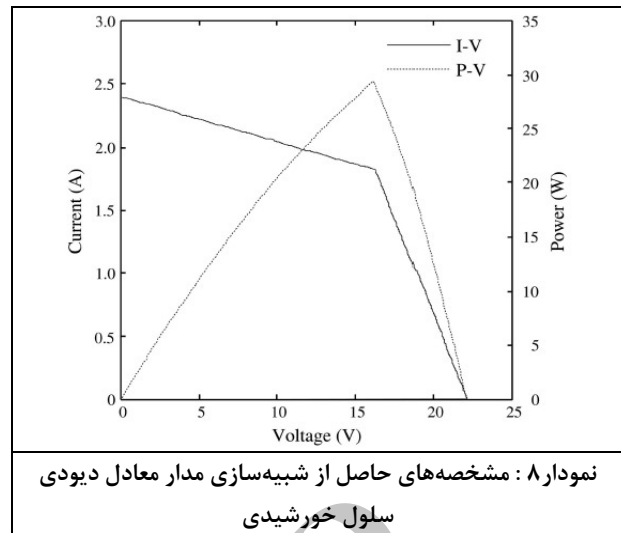
در این بخش دو الگوریتم MPPT استاندارد β و Hill climbing را با الگوریتم ترکیبی جدید روی یک سیستم پانل خورشیدی واحد و تحت شدت نورهای ضعیف و شدید مقایسه می‌کنیم تا بهبود حاصله از بکارگیری الگوریتم جدید روشن گردد. در سیستم شبیه‌سازی شده در این بخش تعداد پانلهای خورشیدی چهار عدد در نظر گرفته شده است که مشخصات هر یک از آنها در جدول ۱ ارائه شده‌است [6] (پارامترهای این جدول در قسمتهای قبل معرفی شده‌اند). لازم به توضیح است برای این پانلها در تمام مراحل شبیه‌سازی دمای محیط 25°C در نظر گرفته شده‌است.

جدول ۱: مشخصات پانلهای خورشیدی بکار رفته

Parameter	Value
$\frac{q}{AKTN_s}$	0.4375
$N_p I_0$	0.0002
$R_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right)$	0.5
V_{oc} (V)	22
I_{sc} (A)	2.4

مشخصه P-V این مجموعه پانل خورشیدی تحت شدت نور نسبتاً ضعیف در نمودار ۱۰ نمایش داده شده است. توجه به این نمودار نشان می‌دهد که ماکزیمم توان قابل حصول از مجموعه پانلها تحت این شرایط در حدود 46 W می‌باشد. در نمودار ۱۱ نیز توان خروجی مجموعه پانلها تحت شدت نور ضعیف و با اعمال سه الگوریتم MPPT ترکیبی جدید و روشهای β و Hill climbing نمایش داده شده است. توجه به این نمودار و نمودار ۱۰ نشان می‌دهد که دو الگوریتم β و روش ترکیبی جدید با سرعت یکسان و به دقت نقطه MPP را ردیابی کرده‌اند اما طبق انتظار روش Hill climbing به خاطر شدت نور کم نتوانسته است پایداری لازم را داشته باشد و بعد از ردیابی MPP از آن فاصله گرفته و رفتار نوسانی برای سیستم به دنبال داشته است.

در نمودار ۱۲ مشخصه P-V مجموعه پانل خورشیدی تحت شدت نور نسبتاً شدید ارائه شده‌است و نمودار ۱۳ توان خروجی پانلها با اعمال سه الگوریتم مورد بحث تحت این شرایط را به نمایش می‌گذارد. ملاحظه می‌شود در حالت نور شدید هر سه روش توانسته‌اند نقطه MPP را با دقت خوبی ردیابی کنند اما از لحاظ سرعت عملکرد دو روش ترکیبی جدید و Hill climbing بسیار بهتر از روش β بوده‌اند.



تحقیقات در رابطه با سلول خورشیدی نشان می‌دهد که رابطه زیر برای ولتاژ خروجی آن برقرار است [10]:

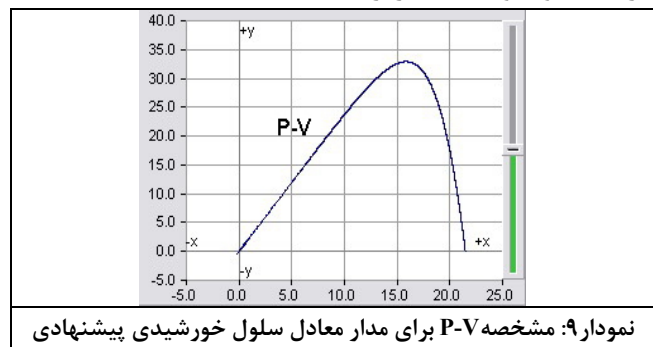
$$V_A = -I_A R_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) + \frac{N_s}{\Lambda} \ln \left\{ 1 + \frac{N_p I_{ph} - I_A}{N_p I_0} \right\}, \quad \Lambda = \left(\frac{q}{AKT} \right)$$

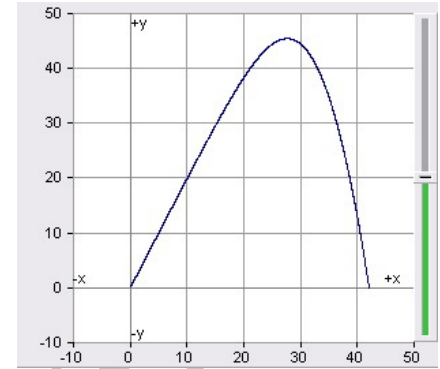
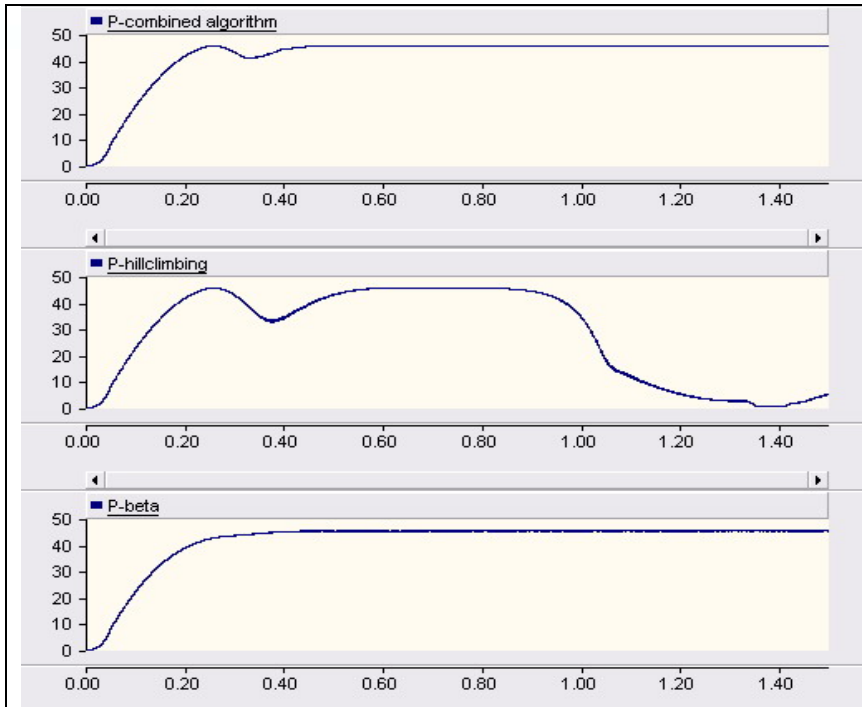
که در این رابطه R_s مقاومت سری هر سلول خورشیدی است، N_p تعداد رشته‌های سری موازی شده با یکدیگر در یک پانل می‌باشد و I_{ph} جریان تولیدی در یک سلول در اثر تابش نور (جریان فوتو ولتائیک) است، بقیه پارامترها نیز قبلاً در بخش ۳-۵-۲ تعریف شده‌اند. با دقت در جملات این رابطه درمی‌یابیم که عبارت $-I_A R_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right)$ افت ولتاژ ناشی از مقاومت معادل پانل می‌باشد و

$$\frac{N_s}{\Lambda} \ln \left\{ 1 + \frac{N_p I_{ph} - I_A}{N_p I_0} \right\}$$

عبارت را هم می‌توان بعنوان رابطه

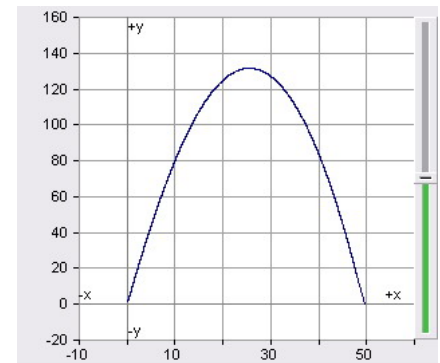
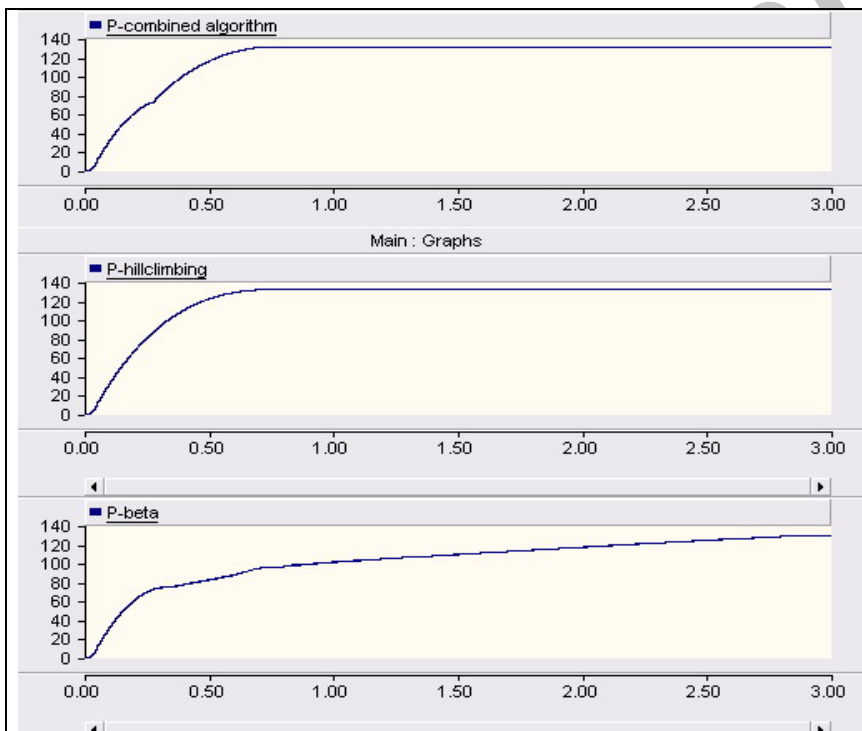
تعریف کننده ولتاژ یک منبع وابسته در نظر گرفت بنابراین می‌توان مدار معادلی شامل یک منبع ولتاژ وابسته و یک مقاومت پس‌سوی سری با آن برای پانل خورشیدی در نظر گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدار معادل پیشنهادی بصورت مشخصه P-V در نمودار ۹ ارائه شده‌است. مقایسه این نمودار با نمودار ۲ و نمودار ۸ نشان می‌دهد که عملکرد مدار معادل جدید بهبود قابل ملاحظه‌ای نسبت به مدار معادل دیودی پیدا کرده است و به واقعیت بسیار نزدیک شده‌است.





نمودار ۱۱: توان خروجی مجموعه پانلها با اعمال الگوریتمهای Hill climbing، β و روش ترکیبی در شرایط نور ضعیف (واحد W)

نمودار ۱۰: مشخصه P-V مجموعه پانلها تحت شدت نور ضعیف (متناظر با جریان فوتو ولتاژیک 2 A)



نمودار ۱۳: توان خروجی مجموعه پانلها با اعمال الگوریتمهای Hill climbing، β و روش ترکیبی در شرایط نور شدید (واحد W)

نمودار ۱۲: مشخصه P-V مجموعه پانلها تحت شدت نور شدید (متناظر با جریان فوتو ولتاژیک 10 A)

ملاحظه می‌شود نقطه ضعف روش Hill climbing در ردیابی MPP در شدت نور کم با بکارگیری روش ترکیبی جدید پیشنهادی بطور کامل برطرف می‌گردد.

به این ترتیب در کل نتیجه می‌شود که اولاً الگوریتم ترکیبی جدید نقطه ماکزیمم توان پانلها را تحت شرایط گوناگون محیطی به درستی و با دقت خوب ردیابی می‌کند، ثانیاً این روش در مقایسه با روشهای β و Hill climbing یا سریعتر به MPP دست می‌یابد و یا در بدترین حالت سرعتی یکسان با آنها ارائه می‌دهد. ثالثاً

۵-۲- ارزیابی عملکرد کلی سیستم

در این بخش به شبیه‌سازی کل سیستم معرفی شده می‌پردازیم تا عملکرد آن را تحت شرایط مختلف محیط و بار مورد ارزیابی قرار دهیم. مجموعه پانل خورشیدی بکار رفته در این شبیه‌سازی همان مجموعه معرفی شده در بخش ۵-۱ است و توربین بادی بکار رفته برای این سیستم نیز یک توربین بادی با ژنراتور سنکرون از نوع آهنربای دائم می‌باشد که مشخصات کامل این توربین و ژنراتور آن در جدول شماره ۲ ارائه شده است [7] (پارامترهای ارائه شده در این جدول برای PMSG پارامترهای مدار معادل دومحوری آن می‌باشند).

جدول ۲: مشخصات توربین بادی و ژنراتور آن

Turbine	Rotor diameter (m)	3
	Number of blades	4
	Rated wind velocity (m/s)	10
Generator	Type of generator	PMSG
	Rated power (W)	500
	Rated voltage (V)	400
	Stator resistance (Ω)	0.2
	L_d, L_q (mH)	9
	Pole pairs	16
Flux (Wb)	0.1	

همچنین توجه شود که توان خروجی توربین بادی در نتایج ارائه شده با نماد P-wind و توان خروجی مجموعه چهار پانل خورشیدی با نماد P-solar نمایش داده شده است. شبیه‌سازی این سیستم با بهره‌گیری از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC صورت گرفته است و شامل بازه زمانی ۶۰ ثانیه‌ای می‌باشد که در پله‌های ۱۰ ثانیه‌ای، تغییراتی به ترتیب زیر به سیستم اعمال می‌شود تا عملکرد آن بررسی شود:

- ۱- در شروع شبیه‌سازی شرایط محیط و بار عبارتند از:

$$\text{سرعت باد: } 7.5 \frac{m}{s}$$

جریان فوتو ولتائیک پانل‌های خورشیدی: 6 A (شدت نور متوسط)
 بار تکفاز خروجی: 100 W با ضریب توان 0.95 پسفاز
 ۲- در ثانیه دهم از آغاز شبیه‌سازی بار خروجی به 50 W کاهش می‌یابد.

۳- از ابتدای ثانیه بیستم و در عرض پنج ثانیه سرعت باد بصورت خطی از $7.5 \frac{m}{s}$ به $5.5 \frac{m}{s}$ کاهش می‌یابد.

۴- از ابتدای ثانیه سی‌ام و در عرض سه ثانیه جریان فوتو ولتائیک پانلها بصورت خطی از 6 A به 11 A (متناظر با شدت نور شدید) افزایش می‌یابد.

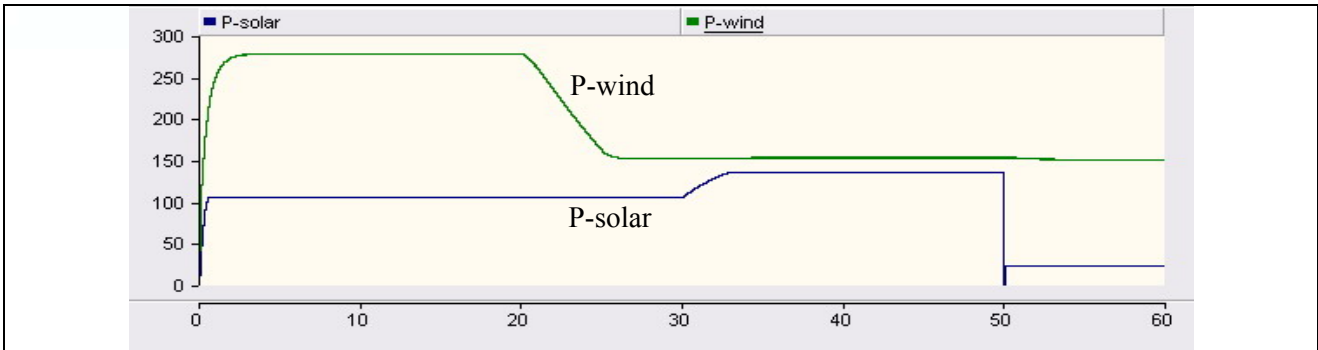
۵- در ثانیه چهل‌ام بار تکفاز خروجی حذف می‌شود.

۶- در ثانیه پنجاهام جریان فوتو ولتائیک پانلها بصورت یکباره به 1 A (متناظر با شدت نور ضعیف) کاهش می‌یابد.

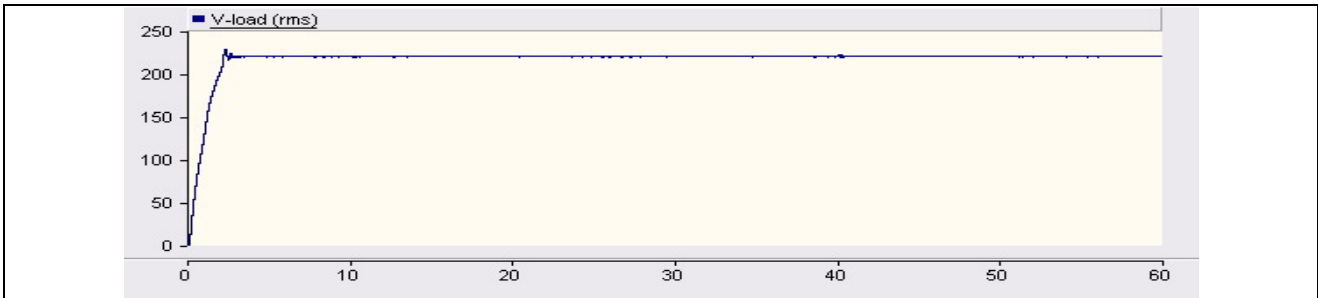
در نمودارهای ۱۴ و ۱۵ تغییرات زمانی توان تولیدی هر یک از منابع ورودی و مقدار موثر ولتاژ خروجی سیستم نمایش داده شده است. توجه به این نمودارها حکایت از آن دارد که سیستم به خوبی توانسته است تغییرات توان تولیدی و بار را با سرعت و دقت مناسب ردیابی کرده و با تنظیم سریع توان مصرفی کاتالیزر یا توان تولیدی بخش سوخت هیدروژن دامنه ولتاژ خروجی سیستم را در بازه استاندارد حفظ کند (بیشتر بودن توان تولیدی کل از توان مصرفی کل، سیستم را با اضافه ولتاژ مواجه می‌کند و کم بودن توان تولیدی هم افت ولتاژ در سیستم بوجود خواهد آورد). بعلاوه توجه به نمودار توان پانل خورشیدی در بازه زمانی ۵۰ الی ۶۰ ثانیه نشان می‌دهد که الگوریتم MPPT ترکیبی ارائه شده توانسته است تحت شدت نور خورشید ضعیف نقطه ماکزیمم توان را به راحتی ردیابی کند.

در نمودارهای ۱۶ تا ۲۱ نیز شکل موج ولتاژ خروجی، THD این ولتاژ و کل توان مصرفی سیستم (مجموع توانهای بار خروجی و کاتالیزور آب) در لحظاتی برگزیده از شبیه‌سازی و پس از اعمال هر تغییر نمایش داده شده است. توجه به این نتایج نیز نشان می‌دهد سیستم تحت شرایط مختلف توانسته است THD ولتاژ خروجی را در حد مطلوب کمتر از 5% حفظ کند و تغییرات مختلف باعث اعوجاج چندانی در ولتاژ خروجی نشده است.

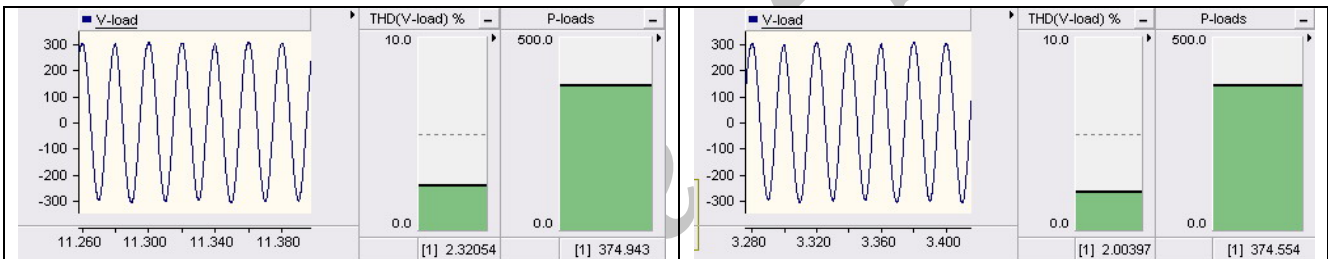
همچنین برای مقایسه عملکرد سیستم پیشنهادی با سیستمهای مشابه از شبیه‌سازی سیستم ارائه شده در مرجع [11] در شرایط محیطی یکسان با سیستم حاضر استفاده شده است. سیستم ارائه شده در مرجع [11] بسیار مشابه سیستم هیبرید مقاله حاضر است با این تفاوت اصلی که الگوریتم MPPT بکار رفته برای پانلهای خورشیدی آن روش Hill Climbing تنها است. دیگر تفاوت دو سیستم مدنظر در این است که سیستم مرجع [11] متصل به شبکه قدرت بوده و بنابراین نیازی به بخش ذخیره سازی انرژی ندارد. هدف از مقایسه این دو سیستم بیشتر تمرکز روی تفاوت اصلی آنها است که الگوریتم MPPT بخش خورشیدی آن دو می‌باشد. به این ترتیب سیستم مرجع [11] در شرایط محیطی (شدت نور و سرعت باد) مشابه با شرایط اشاره شده برای سیستم جدید شبیه‌سازی شده است و نتایج توان خروجی دو واحد تولیدی بادی و خورشیدی آن در نمودار ۲۲ نمایش داده شده است. توجه به این نمودار به خوبی نشان می‌دهد که سیستم مرجع [11] در شرایط نور ضعیف نتوانسته است پایداری بخش خورشیدی را حفظ کند در صورتیکه طبق نمودار ۱۴ سیستم جدید در این شرایط نیز بدون مشکل به عملکرد خود ادامه داده است. به این ترتیب سیستم جدید با سرعت عملکردی برابر با سیستم مرجع [11] توانسته است عیب بخش خورشیدی آن در مواجهه با شدت نور ضعیف را برطرف نماید.



نمودار ۱۴: توان تولیدی منابع ورودی در طول شبیه‌سازی (با واحد W)

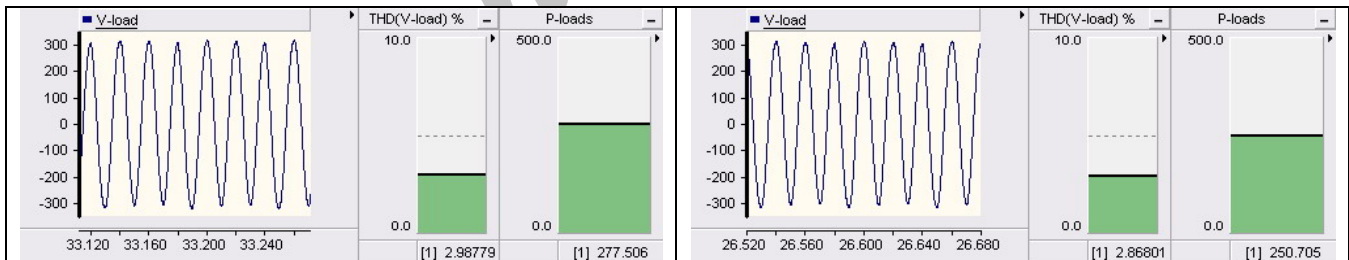


نمودار ۱۵: مقدار موثر ولتاژ خروجی در طول شبیه‌سازی



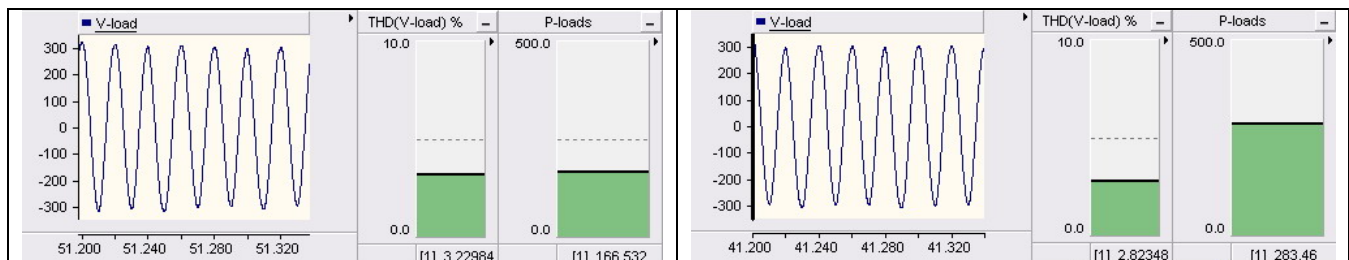
نمودار ۱۷: شکل موج و THD ولتاژ خروجی به همراه توان کل مصرفی در بازه ۱۰ ثانیه‌ای دوم

نمودار ۱۶: شکل موج و THD ولتاژ خروجی به همراه توان کل مصرفی در بازه ۱۰ ثانیه‌ای اول



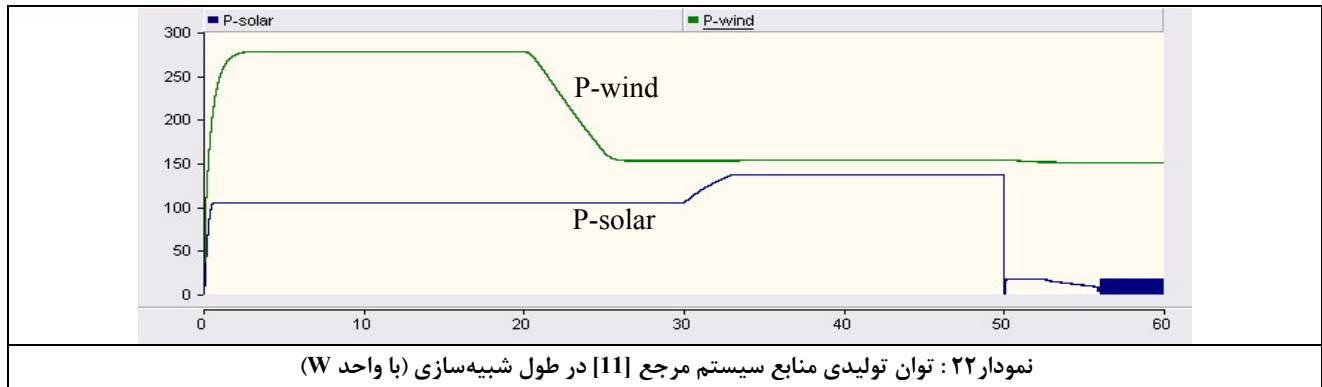
نمودار ۱۹: شکل موج و THD ولتاژ خروجی به همراه توان کل مصرفی در بازه ۱۰ ثانیه‌ای چهارم

نمودار ۱۸: شکل موج و THD ولتاژ خروجی به همراه توان کل مصرفی در بازه ۱۰ ثانیه‌ای سوم



نمودار ۲۱: شکل موج و THD ولتاژ خروجی به همراه توان کل مصرفی در بازه ۱۰ ثانیه‌ای ششم

نمودار ۲۰: شکل موج و THD ولتاژ خروجی به همراه توان کل مصرفی در بازه ۱۰ ثانیه‌ای پنجم



۶- نتیجه‌گیری

با توجه به آلابندگی سوخته‌های فسیلی و محدود بودن ذخایر این سوخته‌ها، کشورها ناگزیرند تا این منابع انرژی را با منابع دیگر با آلودگی کمتر جایگزین سازند و بهترین گزینه در این میان، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. از همین رو در پژوهش حاضر استفاده از این انرژی‌ها مورد توجه قرار گرفته است. سیستم ارائه شده از انرژی‌های نور خورشید و باد به عنوان منابع ورودی بهره می‌گیرد بعلاوه این سیستم از یک واحد سوخت هیدروژن نیز جهت ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌کند. برای استفاده بهینه از منابع ورودی سیستم از الگوریتم MPPT برای آنها استفاده شده است. الگوریتم بکاررفته برای سلول خورشیدی الگوریتم ترکیبی جدیدی می‌باشد که طبق نتایج بدست آمده این روش جدید در مقایسه با روشهای استاندارد β و Hill climbing مشکل سختی ردیابی نقطه کار بهینه تحت شدت نور ضعیف خورشید را به خوبی حل کرده است بعلاوه سرعت ردیابی MPP به این روش تحت شرایط مختلف نیز بسیار مناسب است و در مجموع می‌توان این روش ترکیبی جدید را برای سلول خورشیدی خوب ارزیابی کرد.

در پژوهش حاضر بعد از ارائه سیستم مذکور، به شبیه‌سازی آن پرداخته شده است و نتایج شبیه‌سازی به ازاء شرایط متغیر ارائه شده است. در مجموع نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی عملکرد قابل قبولی را تحت شرایط محیطی مختلف به نمایش می‌گذارد و این سیستم می‌تواند در مناطق دور دست فاقد شبکه قدرت یا حتی در مناطقی که علی‌رغم وجود شبکه قدرت تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر وجود دارد، مورد استفاده قرار گیرد و در اکثر ساعات شبانه روز بار خروجی را تغذیه نماید. بعلاوه مدل جدیدی هم که برای شبیه‌سازی سلولهای خورشیدی پیشنهاد شده است نسبت به مدل معمول منبع جریانی عملکرد بسیار بهتری به نمایش گذاشته است.

مراجع

- [6] Veerachary.M, "PSIM Circuit-Oriented Simulator Model for the Nonlinear Photovoltaic Sources" IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems ,vol. 42, no. 2 , pp.735-740, APRIL 2006
- [7] Fu Xunbo, Guo Jindong, Zhao Dongli, Xu Honghua, "Research on the characteristics of back to back full-size converter applied to direct drive wind power system" in IEEE World Conf .Sustainable Power Generation and Supply, 2009, pp.1-7
- [8] Bombay, Powai,Mumbai , "Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems" IET Electr. Power Appl., 2007, 1, (5), pp. 753-762
- [9] Yaow-Ming Chen, Yuan-Chuan Liu, Shih Chieh Hung, and Chung-Sheng Cheng "Multi Input Inverter for Grid-Connected Hybrid PV/Wind Power System" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 3, pp.1070 1077, MAY 2007
- [10] Appelbaum. J, "Starting and steady-state characteristics of dc motors powered by solar cell generators" IEEE Transactions on Energy Conversion, EC-1 (1986), pp.17-23.
- [11] Jin-Hong Jeon, Chang-Hee Cho, Jong-Bo Ahn, Sae-Hyuk Kwon "Dynamic Modeling and Control of a Grid-Connected Hybrid Generation System With Versatile Power Transfer" IEEE Transactions on Industrial Electronics, April 2008, pp.1677-1688
- [1] L.Solero, F.Caricchi, F.Crescimbeni, O.Honorati, and F. Mezzetti, "Performance of a 10 kW power electronic interface for combined wind/PV isolated generating systems," in Proc.IEEE PESC, 1996, pp.1027-1032.
- [2] S. Wakao, R. Ando, H. Minami, F.Shinomiya, A. Suzuki, M. Yahagi, S. Hirota, Y. Ohhashi, and A. Ishii, "Performance analysis of the PV/wind/wave hybrid power generation system" in Proc. IEEE World Conf. Photovolt. Energy Conv., 2003, pp. 2337-2340
- [3] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, "Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system" IEEE Trans. Energy Conv., vol. 11, no. 2, pp. 367-375, Jun. 1996.
- [4] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules" IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 5, pp. 1292-1306, Sep./Oct. 2005.
- [5] Seok-Ju Lee; Hae-Yong Park; Gyeong-Hun Kim; Hyo-Ryong Seo; Ali, M.H.; Minwon Park; In-keun Yu; "The experimental analysis of the grid- connected PV system applied by POS MPPT" Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on 8-11 Oct. 2007 Page(s):1786 - 1791

Archive of IIPAV