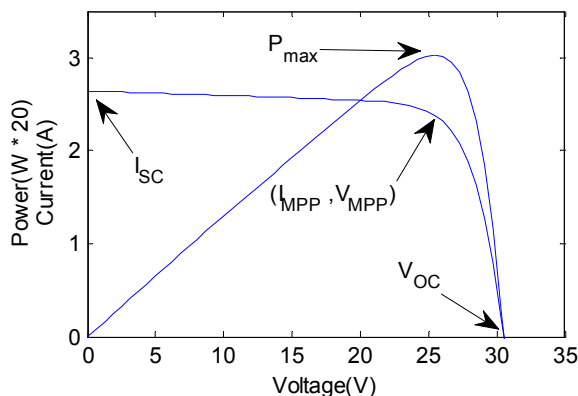


بهبود ردیابی نقطه حداکثر توان پنل‌های خورشیدی جدا از شبکه

محمدحسن مرادی و علیرضا رئیسی



شکل ۱: مشخصه ولتاژ-جریان و ولتاژ-توان یک پنل خورشیدی ۶۰ وات.

الگوریتم‌های مختلف MPPT را می‌توان به دو دسته وابسته به مدل که به صورت offline و مستقل از مدل که به صورت online انجام می‌شود دسته‌بندی کرد. ۱۹ روش مختلف offline و online در [۳] مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه به توضیح چند روش مهم از آنها پرداخته می‌شود.

روش‌های offline بر اساس داده‌های اولیه و متغیرهای ورودی پنل خورشیدی همچون شدت نور، دما، ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه، سیگنال کنترلی را تخمین زده و در هنگام بهره‌برداری از سیستم، این سیگنال کنترلی برای کنترل توان خروجی پنل استفاده می‌شود.

روش ولتاژ مدار باز [۴] و [۵] یکی از ساده‌ترین روش‌های offline است که بر اساس رابطه تقریباً خطی بین ولتاژ مدار باز (V_{OC}) و ولتاژ ماکزیمم توان (V_{MPP}) در شرایط مختلف جوی ارائه شده است

$$V_{MPP} \approx KV_{OC} \quad (1)$$

که K یک مقدار ثابت و کوچک‌تر از یک است (بین ۰٫۷ تا ۰٫۸) و به پنل خورشیدی بستگی دارد که با اندازه‌گیری مقادیر V_{MPP} و V_{OC} در شرایط مختلف جوی به صورت تجربی تعیین می‌شود. در این روش با استفاده از (۱) و با دانستن V_{OC} می‌توان مقدار تقریبی V_{MPP} را محاسبه کرد و با تنظیم ولتاژ خروجی پنل خورشیدی در V_{MPP} ، ماکزیمم توان آن را دریافت کرد. در این روش با جدا کردن بار از پنل خورشیدی مقدار V_{OC} را اندازه‌گیری می‌کنند. در حالی که پیاده‌سازی این روش خیلی ساده و ارزان است اما بهینه‌بودن و قطع متناوب پنل خورشیدی از بار برای محاسبه V_{OC} از جمله معایب اساسی این روش است.

روش جریان اتصال کوتاه [۶] از رابطه تقریباً خطی بین جریان اتصال کوتاه (I_{SC}) و جریان ماکزیمم توان (I_{MPP}) استفاده می‌کند (K بین ۰٫۸ تا ۰٫۹)

$$I_{MPP} \approx KI_{SC} \quad (2)$$

در این روش ابتدا I_{SC} تعیین شده و سپس با استفاده از (۲) مقدار I_{MPP} محاسبه شده و در نهایت با تنظیم جریان خروجی پنل برابر این مقدار، ماکزیمم توان ردیابی می‌گردد. برای تعیین I_{SC} ، پنل خورشیدی را از بار جدا کرده و با اتصال کوتاه کردن خروجی آن، مقدار جریان اتصال کوتاه را

چکیده: پنل‌های خورشیدی دارای مشخصه جریان-ولتاژ غیر خطی بوده و تنها در یک نقطه کار خاص، حداکثر توان را تولید می‌کنند. این نقطه بهینه توان با تغییر دما و شدت نور تغییر می‌کند. روش‌های مختلفی برای ردیابی نقطه حداکثر توان به صورت online و offline معرفی شده است. این مقاله روش جدیدی جهت بهبود عملکرد ردیابی نقطه حداکثر توان پنل‌های خورشیدی جدا از شبکه ارائه می‌دهد و الگوریتم روش پیشنهادی از دو بخش محاسبه نقطه کار و تنظیم دقیق تشکیل شده است. ابتدا بخش محاسبه نقطه کار که بر اساس روش ولتاژ مدار باز می‌باشد، حداکثر توان را تقریب می‌زند و سپس بخش تنظیم دقیق بر اساس روش اغتشاش و مشاهده مقدار دقیق حداکثر توان را دنبال می‌کند. روش پیشنهادی در محیط Matlab/Simulink شبیه‌سازی و برای یک نمونه آزمایشگاهی پیاده‌سازی شده و تأثیر تغییر فرکانس و دامنه اغتشاش بر روی پاسخ دینامیکی و عملکرد حالت پایدار ردیابی نقطه حداکثر مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایشگاه برای حالت راه‌اندازی و حالت پایدار با روش‌های موجود مقایسه می‌گردد و مؤثر بودن روش پیشنهادی نشان داده می‌شود.

کلید واژه: ردیابی نقطه حداکثر توان، پنل خورشیدی، ولتاژ مدار باز، روش اغتشاش و مشاهده.

۱- مقدمه

به علت هزینه زیاد سوخت‌های فسیلی و نیز تأثیر آنها روی محیط زیست، استفاده از منابع انرژی جایگزین در دهه اخیر افزایش یافته است [۱] و [۲] که در بین منابع انرژی جایگزین، انرژی خورشیدی گزینه‌ای مطلوب برای کاربردهای مختلف می‌باشد. از جمله کاربردهای آن، استفاده از پنل‌های خورشیدی (وسيله‌ای که نور خورشید را مستقیماً به برق تبدیل می‌کند) می‌باشد که مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این در صورتی است که عملکرد پنل‌های خورشیدی وابسته به شدت نور و دمای محیط می‌باشد. منحنی مشخصه ولتاژ-جریان پنل خورشیدی دارای نقطه بهینه (V_{MPP}, I_{MPP}) واحدی است که در آن توان تولیدی حداکثر است (شکل ۱). این نقطه بهینه با تغییر شدت نور یا دما تغییر می‌کند.

به منظور افزایش بازده، پنل‌های خورشیدی باید در نقطه حداکثر توانشان کار کنند. ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT) یکی از اهداف مهم و اساسی در سیستم پنل خورشیدی می‌باشد و تا کنون روش‌های زیادی جهت این کار ارائه شده است [۳]. روش‌های MPPT از نظر پیچیدگی، تعداد و نوع سنسورهای مورد نیاز، سرعت پاسخ، هزینه و سخت‌افزار پیاده‌سازی با یکدیگر متفاوت هستند.

این مقاله در تاریخ ۴ اردیبهشت ماه ۱۳۹۰ دریافت و در تاریخ ۲۰ بهمن ماه ۱۳۹۱ بازنگری شد.

محمدحسن مرادی، دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، (email: mh_moradi@yahoo.co.uk).

علیرضا رئیسی، دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، (email: reisi.alireza@gmail.com).

معکوس حالت قبل باشد تا توان به سمت MPP باز گردد. اندازه اغتشاشات اعمال شده به سیستم، عامل تعیین کننده‌ای در سرعت همگرایی الگوریتم به پاسخ نهایی و دامنه نوسانات آن می‌باشد. بدین صورت که هر قدر اندازه اغتشاش بزرگتر باشد الگوریتم سریع‌تر مقدار ماکزیمم را می‌یابد اما دامنه نوسانات حالت پایدار آن بزرگتر است. به عبارتی سرعت پاسخ این الگوریتم با مقدار نوسانات در حالت پایدار در تقابل است. استفاده از مقدار اغتشاش متغیر یک راه حل مناسب برای غلبه بر این تقابل می‌باشد. در این روش دامنه اغتشاش، بر اساس میزان تغییرات توان بر حسب اغتشاش اعمال شده قبلی تعیین شود. یعنی در نقاط دور از MPP دامنه اغتشاش بزرگ در نزدیکی نقطه MPP دامنه اغتشاش کوچک انتخاب می‌گردد. در [۱۰] شیب منحنی توان- جریان برای ایجاد اغتشاش متغیر به کار رفته است. در نقطه حداکثر توان شیب منحنی توان- جریان صفر است و با دور شدن از آن مقدار شیب منحنی افزایش می‌یابد. پس جریان در این روش به صورت (۳) به دست می‌آید

$$I[k+1] = I[k] + M \frac{\Delta P_k}{\Delta I_k} \quad (3)$$

که در آن ΔP_k تغییرات توان، ΔI_k تغییرات جریان، M ضریب تنظیم، $I[k]$ و $I[k+1]$ مقادیر جریان قبل و بعد از اعمال اغتشاش k ام می‌باشند. در صورتی که سیگنال مرجع، ولتاژ پنل خورشیدی باشد می‌توان مقدار اغتشاش را متناسب با شیب منحنی توان- ولتاژ قرار داد

$$V[k+1] = V[k] + M \frac{\Delta P_k}{\Delta V_k} \quad (4)$$

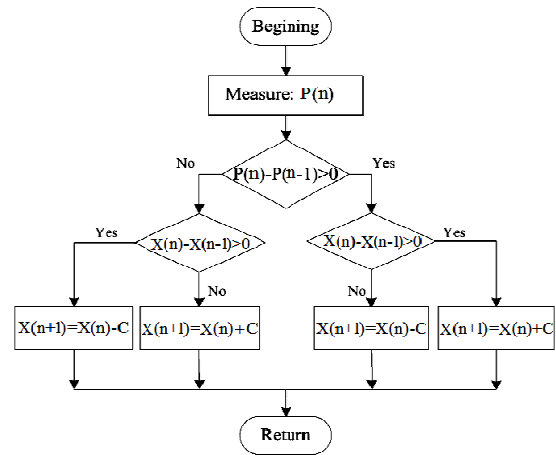
استفاده از مقدار اغتشاش متغیر مشکل سرعت پاسخ و نوسانات حالت پایدار را بهبود می‌دهد اما در صورت تغییرات سریع نقطه کار سیستم این الگوریتم دچار اشتباه می‌شود [۱۴] و [۱۵]. برای رفع این مشکل روش‌های مختلفی ارائه شده است. مثلاً در [۱۵] و [۱۶] شرط جدیدی برای مقابله با تغییرات سریع شدت نور به روش P&O اضافه شده است و در [۱۷] روش P&O با روش ولتاژ مدار باز ترکیب شده و روش جدیدی را به وجود آورده است.

در این مقاله روشی ترکیبی (online-offline) برای ردیابی ماکزیمم توان ارائه می‌گردد. در این روش، ابتدا نقطه ماکزیمم توان بر اساس روش ولتاژ مدار باز (offline) تقریب زده شده و سپس بر اساس روش اغتشاش و مشاهده (P&O) مقدار دقیق حداکثر توان محاسبه می‌شود. روش پیشنهادی در عین سادگی قادر است به خوبی ماکزیمم توان را دنبال کند. این مقاله شامل چهار بخش است. مدل پنل خورشیدی در بخش ۲ ارائه می‌شود، در بخش ۳ سیستم فوتوولتاییک معرفی می‌گردد، در بخش ۴ روش جدید برای ردیابی حداکثر توان ارائه می‌شود و در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی بررسی می‌شود.

۲- مدل پنل خورشیدی

ساختار فیزیکی یک سلول خورشیدی مانند یک دیود است که پیوند p-n آن در معرض نور خورشید قرار می‌گیرد. انرژی جذب شده حاصل از شدت نور در این ناحیه به تولید و انتقال حامل‌ها (الکترون‌ها و حفره‌ها) و جمع‌آوری آنها در ترمینال خروجی منجر می‌شود. معادله (۵) که اساس تئوری نیمه‌هادی‌ها را بیان می‌کند، مشخصه I-V یک سلول ایده‌آل را توصیف می‌کند [۱۸]

$$I = I_{PV,cell} - I_d \quad (5)$$



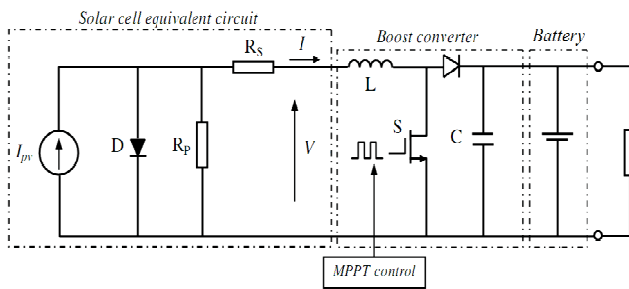
شکل ۲: الگوریتم اغتشاش و مشاهده (P&O).

اندازه‌گیری می‌کنند. این روش از روش ولتاژ مدار باز دقیق‌تر و بهینه‌تر است [۶] اما مشکلات محاسبه جریان اتصال کوتاه و هزینه پیاده‌سازی بیشتر از جمله معایب این روش است.

استفاده از شبکه عصبی برای ردیابی حداکثر توان یکی دیگر از روش‌های offline است که در ابتدا توسط Hiyama و همکارانش [۷] و [۸] مورد بررسی قرار گرفته است. ولتاژ مدار باز پنل خورشیدی تنها داده ورودی شبکه عصبی است و به کمک یک کنترلر PI سیگنال کنترلی لازم برای MPPT حاصل می‌شود. روش شبکه عصبی و سایر روش‌های offline پس از هر دوره زمانی نیاز به تنظیم مجدد پارامترها دارند. در روش‌های online معمولاً مقادیر لحظه‌ای متغیرهای پنل خورشیدی (ولتاژ و جریان) برای تولید سیگنال کنترلی استفاده می‌شود. در نتیجه سیگنال کنترلی این روش‌ها بر خلاف روش‌های offline مقدار ثابتی نبوده و در حالت پایدار نیز اطراف مقدار بهینه خود در حال نوسان می‌باشد. روش اغتشاش و مشاهده^۱ (P&O) [۹] و [۱۰]، روش کنترل ریپل‌های همگرا^۲ (RCC) [۱۱] و روش امیداندس افزایشی^۳ (IncCond) [۱۲] از جمله روش‌های online ردیابی حداکثر نقطه توان هستند که با استفاده از ولتاژ و جریان خروجی پنل خورشیدی سیگنال کنترلی مناسب را تولید می‌کنند.

روش P&O یکی از ساده‌ترین روش‌های online است که مورد توجه محققان قرار گرفته است. این روش را می‌توان با اعمال یک اغتشاش در سیگنال مرجع ولتاژ پنل خورشیدی [۹] یا سیگنال مرجع جریان پنل خورشیدی [۱۳] پیاده‌سازی نمود. اساس الگوریتم مذکور که به عنوان روش "hill climbing" نیز شناخته می‌شود در شکل ۲ نشان داده شده است که در آن X سیگنال مرجع می‌باشد. با قراردادن $X = V$ ، بر اساس این الگوریتم، ولتاژ لحظه‌ای پنل خورشیدی، ولتاژ حداکثر توان را به کمک ولتاژ و توان لحظه قبل دنبال می‌کند. با اعمال تغییرات کوچک و ثابتی (C) به عنوان اغتشاش، ولتاژ پنل خورشیدی و به عبارتی نقطه کار سیستم تغییر می‌کند. در این حالت تغییرات ولتاژ (ΔV) در راستای C بوده ولی تغییرات توان (ΔP) می‌تواند در راستای یا خلاف C (مثبت یا منفی) باشد. اگر ΔP مثبت باشد، توان به MPP نزدیک شده است پس تغییرات اعمالی در جریان برای مرحله بعد باید در همان جهت باشد. اگر ΔP منفی باشد، توان از MPP دور شده است پس تغییرات باید

1. Perturbation and Observation
2. Ripple Correlation Control
3. Incremental Conductance



شکل ۴: سیستم فوتولتاییک.

کوتاه و ولتاژ مدار باز را در شرایط جوی مختلف محاسبه کرد

$$I_{SC} = (I_{SC,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (12)$$

$$V_{OC} = V_{OC,n} + K_V \Delta T \quad (13)$$

۳- سیستم فوتولتاییک

سیستم فوتولتاییک شامل پنل خورشیدی، باتری، مبدل ولتاژ DC-DC و کنترلر می‌باشد. شکل ۴ سیستم فوتولتاییک استفاده شده در این مقاله را نشان می‌دهد. برای این که سیستم فوتولتاییک مانند یک منبع تغذیه واقعی عمل کند، یعنی دارای یک سطح ولتاژ ثابت در بارهای مختلف باشد از باتری استفاده می‌شود. در شکل ۴ باتری ولتاژ خروجی مبدل ولتاژ DC-DC (V_L) را مقداری ثابت نگه می‌دارد. باتری همچنین برای ذخیره و جبران مقطعی توان نیز لازم است. مبدل‌های ولتاژ DC-DC جهت تطبیق مشخصه بار با مشخصه پنل خورشیدی استفاده می‌شوند [۲۰]. مبدل‌های ولتاژ DC-DC به ۳ دسته افزایشده، کاهشده و DC-DC افزایشده-کاهشده دسته‌بندی می‌شوند و انتخاب نوع مبدل ولتاژ DC-DC به سطح تغییرات ولتاژ وابسته است. در این تحقیق از مبدل ولتاژ DC-DC افزایشده جهت تطبیق بار با پنل خورشیدی استفاده شده است. با توجه به رابطه مبدل ولتاژ DC-DC افزایشده که در آن دوره کار کلیدزنی است، داریم

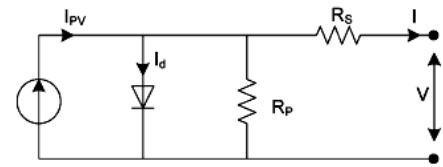
$$\frac{V_L}{V_{PV}} = \frac{1}{1-D} \quad (14)$$

$$\rightarrow V_{PV} = (1-D)V_L \quad (15)$$

$$\text{if } V_{PV} = V_{MPP} \rightarrow D = D_{MPP} \quad (16)$$

روابط فوق نشان می‌دهند که با تغییر مقدار D می‌توان نقطه کار پنل خورشیدی را تغییر داد و نیز با توجه به یکتایی V_{MPP} تنها یک مقدار یکتا برای D_{MPP} وجود دارد که نقطه کار پنل خورشیدی را در MPP قرار می‌دهد.

سیستم فوتولتاییک زمانی بهینه خواهد بود و بیشترین بازده را دارد که در هر لحظه توان تولیدی پنل خورشیدی آن مقدار ماکزیمم باشد یعنی نقطه کار آن در MPP باشد. با تغییر دوره کار کلیدزنی (D)، مشخصه بار از دید پنل خورشیدی از صفر تا بی‌نهایت تغییر می‌کند. منحنی تغییرات توان خروجی پنل خورشیدی به ازای تغییرات D در شکل ۵ آمده است.



شکل ۳: مدار معادل پنل خورشیدی.

$$I_d = I_{O,cell} \left[\exp\left(\frac{qV}{aKT}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

که $I_{PV,cell}$ جریان تولیدشده از نور تابشی، I_d جریان دیود طبق معادله دیودی شوکلی، $I_{O,cell}$ جریان اشباع معکوس یا جریان نشستی دیود، q بار الکترون، K ثابت بولتزمن، T دمای پیوند p-n و a ثابت ایده‌آلی دیود است.

شکل ۳ مدار معادل یک پنل خورشیدی را نشان می‌دهد. یک پنل خورشیدی از چندین سلول فوتولتاییک که دارای اتصال بیرونی سری یا موازی و یا سری-موازی است تشکیل شده است. با در نظر گرفتن پارامترهای شکل ۳ (۵)، مشخصه پنل خورشیدی به دست می‌آید [۱۸]

$$I = I_{PV} - I_O \left[\exp\left(\frac{V + R_S I}{aV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_p} \quad (7)$$

که I_{PV} جریان فوتولتاییک، I_O جریان اشباع معکوس، $V_t = N_s KT/q$ ولتاژ حرارتی، N_s تعداد سلول‌های سری شده و R_S و R_p مقاوت معادل‌های سری و موازی پنل خورشیدی می‌باشند. I_{PV} و I_O با شدت نور و تغییر دما به صورت زیر مرتبط هستند

$$I_{PV} = (I_{PV,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (8)$$

$$I_O = I_{O,n} \left(\frac{T}{T_n}\right)^r \exp\left[\frac{qE_g}{aK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (9)$$

که $I_{PV,n}$ جریان فوتولتاییک در شرایط استاندارد (در $T_n = 25^\circ C$ و $G_n = 1000 \text{ W/m}^2$)، K_I ضریب نسبت جریان اتصال کوتاه به دما، $\Delta T = T - T_n$ میزان اختلاف دما با دمای استاندارد، G شدت نور و E_g فاصله نوارهای انرژی سیلیسیم بر حسب الکترون بر ولت می‌باشد. $I_{O,n}$ جریان اشباع معکوس است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود

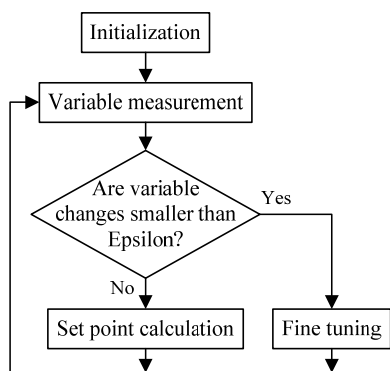
$$I_{O,n} = \frac{I_{SC,n}}{\exp\left(\frac{V_{OC,n}}{aV_t}\right)} \quad (10)$$

که $I_{SC,n}$ و $V_{OC,n}$ به ترتیب جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز در شرایط استاندارد می‌باشند. انتخاب مقدار a که بین ۱ تا ۱/۵ می‌باشد به سایر پارامترهای مدل وابسته است [۱۹] و انتخاب صحیح آن افزایش دقت مدل را به همراه دارد. همچنین به جای (۹) استفاده از رابطه زیر که در آن K_V ضریب نسبت ولتاژ مدار باز به دما می‌باشد دقت مدل را افزایش می‌دهد [۱۸]

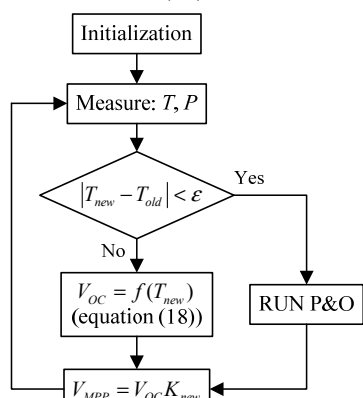
$$I_O = \frac{I_{SC,n} + K_I \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{OC,n} + K_V \Delta T}{aV_t}\right) - 1} \quad (11)$$

ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه از نقاط مهم مشخصه I-V پنل خورشیدی هستند. این نقاط با تغییر شرایط جوی تغییر می‌کنند. با استفاده از (۱۲) و (۱۳) که از روابط مدل استخراج می‌شوند می‌توان جریان اتصال

1. Boost
2. Buck
3. Buck-Boost



(الف)



(ب)

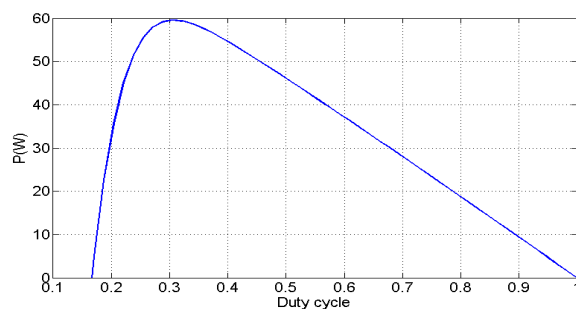
شکل ۶: (الف) الگوریتم کلی روش پیشنهادی و (ب) الگوریتم روش پیشنهادی.

تغییرات دما از حد معینی بزرگتر باشد حلقه محاسبه نقطه کار اجرا شده و در غیر این صورت حلقه تنظیم دقیق اجرا می‌شود.

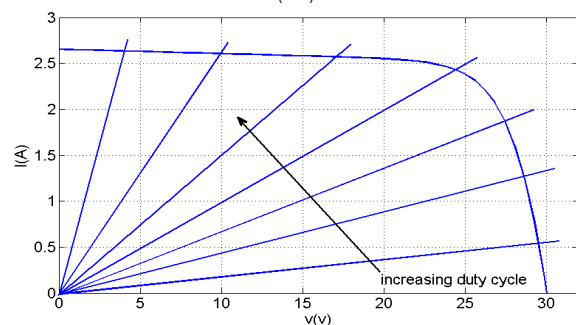
Loop محاسبه نقطه کار: در این حلقه با استفاده از داده‌های اولیه و مقادیر اندازه‌گیری شده مقدار تقریبی ولتاژ، جریان و یا توان نقطه حداکثر توان پنل خورشیدی محاسبه می‌شود. این کار بر اساس روش‌های offline انجام می‌پذیرد و در الگوریتم پیشنهادی محاسبه نقطه کار بر اساس روش ولتاژ مدار باز انجام می‌پذیرد.

در روش پیشنهادی به کمک (۱۷) ابتدا مقدار ولتاژ مدار باز محاسبه شده و سپس مقدار ولتاژ حداکثر توان با استفاده از (۱۸) محاسبه می‌شود. باید توجه شود که ولتاژ مدار باز و ولتاژ حداکثر توان با تغییر دما تغییر می‌کنند و با تغییر شدت نور تغییرات اندکی دارند. پس حلقه محاسبه نقطه کار در صورت تغییر دما اجرا می‌شود و مقدار جدید نقطه کار را محاسبه می‌کند.

Loop تنظیم دقیق: این حلقه با استفاده از مقادیر اولیه، مقادیر اندازه‌گیری شده و (۱۸)، مقدار تقریبی نقطه کار محاسبه شده در حلقه اول را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که توان خروجی پنل خورشیدی در نقطه حداکثر توان قرار گیرد. ردیابی مقدار دقیق حداکثر توان در این مرحله بر اساس روش‌های online انجام‌پذیر است. در الگوریتم پیشنهادی از روش P&O کلاسیک استفاده شده است. P&O با دریافت مقدار توان لحظه‌ای و مقدار سیگنال مرجع که نسبت ولتاژ حداکثر توان به ولتاژ مدار باز (K) می‌باشد، مقدار K (۱۸) را به گونه‌ای تغییر می‌دهد تا مقدار ولتاژ محاسبه شده در (۱۸) برابر ولتاژ حداکثر توان شود یا به عبارتی مقدار توان دریافتی حداکثر شود. چون مقدار اولیه ولتاژ حداکثر توان توسط حلقه محاسبه نقطه کار تخمین زده شده است همگرایی سریع بوده و نیاز به استفاده از اغتشاش با مقدار متغیر یا اغتشاش با دامنه بزرگ که باعث نوسانات در حالت پایدار می‌شود، نیست.



(الف)



(ب)

شکل ۵: (الف) تغییرات توان خروجی پنل خورشیدی به ازای تغییرات D و (ب) مشخصه پنل خورشیدی و مشخصه‌های بار به ازای تغییرات D.

۴- روش پیشنهادی

الگوریتم کلی روش پیشنهادی که از دو حلقه محاسبه نقطه کار و تنظیم دقیق تشکیل شده است، در شکل ۶ آمده است. در حلقه اول مقدار تقریبی نقطه حداکثر توان تخمین زده و در حلقه دوم مقدار دقیق آن محاسبه می‌شود. با توجه به شکل بعد از تنظیم و تعیین مقادیر اولیه، الگوریتم با اندازه‌گیری متغیرها شروع می‌شود. در مرحله بعد متغیرها با مقادیر قبلیشان مقایسه شده و با توجه به نتیجه این مقایسه یکی از دو حلقه محاسبه نقطه کار یا تنظیم دقیق انتخاب می‌شود. در ادامه به توضیح هر بلوک شکل ۶ می‌پردازیم.

مقادیر اولیه: مقادیر اولیه سیستم فوتوولتاییک به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول، داده‌های مربوط به پنل خورشیدی که توسط سازنده ارائه می‌گردد. از جمله این داده‌ها: ولتاژ، جریان و توان نقطه حداکثر توان، ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه در شرایط جوی خاص (دما ۲۵ درجه و شدت نور ۱۰۰۰ وات بر متر مربع)، ضرایب نسبت جریان اتصال کوتاه به دما (K_I) و نسبت ولتاژ مدار باز به دما (K_V) می‌باشند. دسته دوم پارامترهای که جهت ردیابی حداکثر توان مورد استفاده قرار می‌گیرند و توسط اپراتور باید مقداردهی شوند که نسبت ولتاژ حداکثر توان به ولتاژ مدار باز (K) و نسبت جریان حداکثر توان به جریان اتصال کوتاه از این جمله‌اند. در روش پیشنهادی مقادیر $V_{OC,n}$ و K_V از دسته اول و مقدار K (۱۸) از دسته دوم به عنوان مقادیر اولیه باید تعیین گردند.

متغیرهای اندازه‌گیری: این متغیرها شامل متغیرهای ورودی (مربوط به روش‌های offline) مانند دما، شدت نور، ولتاژ مدار باز و ... و متغیرهای سیستم (مربوط به روش online) مانند جریان، ولتاژ، توان و ... می‌باشد. در روش پیشنهادی متغیرهای دما و توان مورد استفاده قرار می‌گیرند.

انتخاب حلقه: انتخاب حلقه به عملکرد هر حلقه و شرایط سیستم (حالت پایدار یا گذرا) وابسته است. در این الگوریتم حلقه محاسبه نقطه کار زمانی اجرا می‌شود که تغییرات ورودی از حد معینی بزرگتر باشد و در غیر این صورت حلقه تنظیم دقیق اجرا می‌گردد. در روش پیشنهادی اگر

جدول ۱: مشخصات پنل خورشیدی.

پارامتر	I_{mp}	V_{mp}	$P_{max,m}$	I_{sc}	V_{oc}	K_V	K_I
مقدار	۲٫۵	۲۳٫۱	۶۰	۲٫۶۶	۳۰	-۰٫۳۶۵	۰٫۰۲۴
واحد	[A]	[V]	[W]	[A]	[V]	[V/K]	[A/K]

مختلف استخراج و با روش‌های دیگر مقایسه خواهد شد. پیاده‌سازی روش پیشنهادی برای یک نمونه آزمایشگاهی و بررسی نتایج آن، مؤید عملکرد مناسب این روش است.

۱-۵ راندمان

در این بخش مقاله، راندمان روش پیشنهادی، روش P&O بهبودیافته، روش [۱۷] و روش P&O کلاسیک با یکدیگر مقایسه می‌شود. برای مقایسه راندمان روش‌های مختلف ردیابی حداکثر توان از (۲۰) استفاده می‌شود [۱۷]

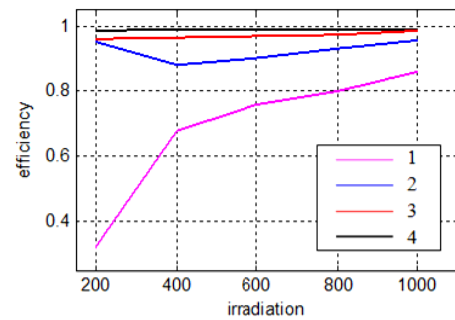
$$\eta_T = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n \sum_{i=1}^n P_{max,i}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n \sum_{i=1}^n P_{max,i}} \quad (20)$$

که P_i توان پنل خورشیدی، $P_{max,i}$ حداکثر توان پنل خورشیدی، P_i مقدار توان به دست نیامده یا توان اتلافی و n تعداد نمونه‌گیری است. در (۲۰) حداکثر توان (P_{max}) با شدت نور متناسب و با افزایش آن افزایش می‌یابد و تلفات حالت پایدار (P_i) با دامنه اغتشاش اعمالی به سیگنال کنترلی متناسب است و هرچه دامنه اغتشاش بیشتر شود، تلفات افزایش و راندمان کاهش می‌یابد. در روش P&O کلاسیک دامنه اغتشاش ثابت بوده و همواره شاهد نوسانات توان در حالت پایدار هستیم که این امر باعث کاهش راندمان می‌گردد.

در بخش تنظیم دقیق روش پیشنهادی از الگوریتم P&O کلاسیک استفاده شده است که نوسانات حالت پایدار را به همراه دارد اما با توجه به این که دامنه اغتشاش در این روش خیلی کوچک انتخاب شده است، مقدار این نوسانات خیلی کوچک می‌باشد. در روش P&O کلاسیک دامنه اغتشاشات که مقدار ثابتی است خیلی کوچک نیست پس دامنه نوسانات حالت پایدار توان زیاد است که سبب کاهش قابل توجه بازده می‌شود. در روش P&O بهبودیافته دامنه اغتشاش به صفر میل می‌کند که سبب کاهش مقدار نوسانات حالت پایدار و در نتیجه افزایش بازده می‌شود. روش [۱۷] شامل رابطه غیر خطی بین ولتاژ مدار باز و ولتاژ حداکثر توان و الگوریتم P&O کلاسیک می‌باشد، پس بازده آن به دقت رابطه غیر خطی و دامنه اغتشاش P&O وابسته است. شکل ۷ منحنی‌های بازده ردیابی را برای روش P&O کلاسیک [۱۷]، روش [۱۷]، روش پیشنهادی و روش P&O بهبودیافته نشان می‌دهد.

نمودار ۱ مربوط به روش P&O کلاسیک می‌باشد که در این روش همواره شاهد نوسانات ثابت توان به علت دامنه اغتشاش ثابت در حالت پایدار هستیم. مقدار این نوسانات ثابت مبین مقدار تلفات (P_i) است. در این روش مقدار تلفات توان در حالت پایدار که به دامنه اغتشاش وابسته است ثابت می‌باشد. در نتیجه بازده این روش در شدت نورهای پایین به علت کمبود مقدار حداکثر توان و ثابت بودن تلفات، اندک می‌باشد و در شدت نورهای بالا مقدار حداکثر توان و بازده افزایش می‌یابند.

نمودار ۲ مربوط به روش [۱۷] است. بازده آن به دقت رابطه غیر خطی بین ولتاژ مدار باز و ولتاژ حداکثر توان، دامنه اغتشاش P&O و دوره تناوب بازکردن پنل خورشیدی از بار برای اندازه‌گیری ولتاژ مدار باز وابسته است. این روش چون از P&O کلاسیک با دامنه کم برای تنظیم



شکل ۷: منحنی بازده ردیابی برای روش‌های مختلف ردیابی حداکثر توان، (۱) P&O کلاسیک، (۲) روش [۱۷]، (۳) روش پیشنهادی و (۴) P&O بهبودیافته.

محاسبه سیگنال کنترلی (D_{MPP}): با استفاده از الگوریتم پیشنهادی که در بالا توضیح داده شد مقدار ولتاژ حداکثر توان به دست می‌آید که به کمک آن می‌توان سیگنال کنترلی مبدل ولتاژ (D_{MPP}) را محاسبه کرد. برای محاسبه D_{MPP} با استفاده از ولتاژ حداکثر توان روش‌های مختلفی وجود دارد. در این مقاله بر اساس روابط مبدل ولتاژ مورد استفاده در سیستم فوتوولتاییک D_{MPP} محاسبه شده است. سیستم فوتوولتاییک استفاده‌شده در این مقاله شامل مبدل ولتاژ بوست می‌باشد که ولتاژ خروجی آن (V_L) که به باتری متصل است مقدار ثابتی است. پس جهت محاسبه مقدار D_{MPP} از (۱۹) که رابطه مبدل بوست می‌باشد، استفاده شده است

$$V_{oc} = V_{oc,n} + K_V \Delta T \quad (17)$$

$$V_{MPP} = K V_{oc} = K V_{oc,n} + K K_V (T - T_n) \quad (18)$$

$$V_{pv} = (1 - D) V_L \quad (19)$$

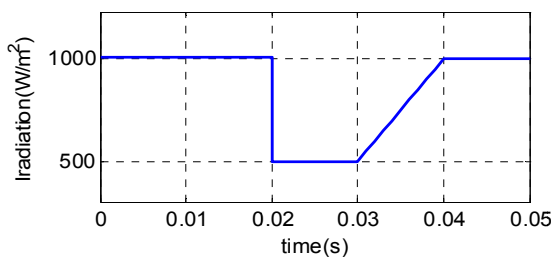
if: $V_{pv} = V_{MPP} \rightarrow D = D_{MPP} = 1 - \frac{V_{pv}}{V_L}$

قابل ذکر است که ولتاژ مدار باز و ولتاژ حداکثر توان با تغییر دما تغییر می‌کنند ولی با تغییر شدت نور تغییرات اندکی دارند. بنابراین در روش پیشنهادی حلقه محاسبه نقطه کار در صورت تغییر دما اجرا می‌شود و مقدار جدید نقطه کار را محاسبه می‌کند و حلقه تنظیم دقیق با تنظیم دقیق مقدار K در (۱۸)، حداکثر توان را در تغییرات شدت نور نیز دنبال می‌کند.

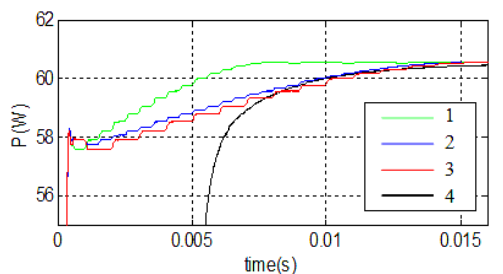
در روش‌های پیشین نیز از الگوریتم بالا استفاده شده است، به عنوان مثال الگوریتم روش [۱۷] که از دو حلقه تشکیل شده است. در حلقه اول با بازکردن بار از پنل خورشیدی مقدار ولتاژ مدار باز اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از رابطه‌ای غیر خطی بین ولتاژ مدار باز و ولتاژ حداکثر توان، مقدار ولتاژ حداکثر توان محاسبه می‌شود. این حلقه جهت اندازه‌گیری ولتاژ مدار باز به طور متناوب اجرا می‌شود. همچنین به منظور محاسبه دقیق حداکثر توان و دنبال کردن تغییرات آن در فاصله اندازه‌گیری مجدد ولتاژ مدار باز، از روش P&O در حلقه دوم استفاده شده است. در این روش حلقه دوم زمانی اجرا می‌شود که تغییرات توان مخالف صفر باشد.

۵- نتایج شبیه‌سازی، آزمایش و بحث

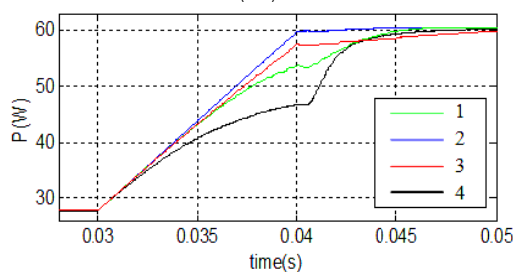
جهت بررسی روش پیشنهادی، سیستم فوتوولتاییک شکل ۴ شامل پنل خورشیدی ۶۰ وات با مشخصات جدول ۱، مبدل ولتاژ Boost و باتری lead-acid ۳۶ ولتی با حداکثر جریان ۵ آمپر ساعت در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی گردیده و کنترلر مبتنی بر روش پیشنهادی به آن اعمال شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در جنبه‌های



شکل ۹: تغییرات شدت نور.



(الف)



(ب)

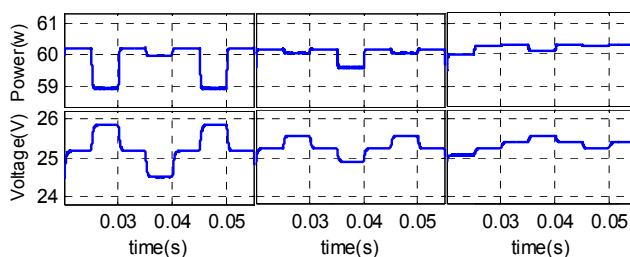
شکل ۱۱: ردیابی حداکثر توان با روش پیشنهادی در دامنه و فرکانس‌های مختلف و با روش P&O (الف) لحظه راه‌اندازی و (ب) تغییر شدت نور.

می‌گردد. این باعث می‌شود که عملکرد الگوریتم در رویارویی با تغییرات سریع بهبود یافته و کمتر دچار اشتباه شود اما در هنگام راه‌اندازی بخش offline روش، نقطه کار را تقریب زده و حلقه تنظیم دقیق نقطه کار را دنبال می‌کند. افزایش فرکانس اغتشاش سبب ردیابی سریع می‌گردد.

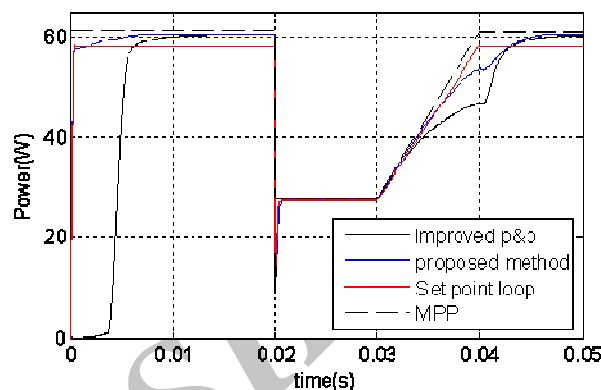
۵-۳-۲ اثر دامنه اغتشاش بر پاسخ دینامیکی

تغییر دامنه اغتشاش اثری مشابه تغییر فرکانس بر روی پاسخ دینامیکی دارد که در ادامه آمده است. شکل ۱۰ پاسخ سیستم در لحظه راه‌اندازی و تغییرات سریع نقطه کار برای روش پیشنهادی، بخش P&O روش پیشنهادی و روش P&O بهبودیافته را با هم مقایسه می‌کند که در آن دما ثابت بوده و شدت نور به صورت شکل ۹ تغییر می‌کند.

با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی توانسته است حداکثر توان را دنبال کند ولی مانند روش P&O در تغییرات سریع دچار اشتباه شده است. اما چون دامنه اغتشاش آن مقدار ثابت و کوچکی انتخاب شده میزان انحراف از مقدار حداکثر توان نسبت به روش P&O بهبودیافته کمتر است. بخش offline روش پیشنهادی مقدار نقطه کار را خوب تخمین زده است اما مقدار دقیق حداکثر توان را نتوانسته دنبال کند. بهتر است به منظور کاهش انحراف از حداکثر توان ناشی از اشتباه بخش online در تغییرات سریع شدت نور مقدار دامنه اغتشاش و فرکانس اغتشاش را کاهش دهیم. شکل ۱۱ لحظه راه‌اندازی و ردیابی حداکثر توان با روش پیشنهادی در دامنه اغتشاش ۰/۰۰۵ و فرکانس ۱۰۰۰، دامنه اغتشاش ۰/۰۰۵ و فرکانس ۵۰۰ و دامنه اغتشاش ۰/۰۰۲۵ و فرکانس ۱۰۰۰ و با روش P&O بهبودیافته را به ازای تغییرات شدت نور شکل ۱۰ نشان می‌دهد.



شکل ۸: حالت پایدار توان و ولتاژ روش پیشنهادی در فرکانس اغتشاش ۲۰۰ برای دامنه اغتشاش‌های مختلف.



شکل ۱۰: ردیابی حداکثر توان با روش پیشنهادی در دامنه اغتشاش ۰/۰۰۵ و فرکانس ۲۰۰۰، بخش offline روش پیشنهادی و روش P&O در تغییر خطی شدت نور.

دقیق استفاده می‌کند مقدار تلفات آن از روش P&O کلاسیک کمتر ولی غیر صفر است. همچنین مقداری از تلفات این روش مربوط به باز و بسته کردن پنل خورشیدی از بار می‌باشد.

نمودار ۳ مربوط به روش پیشنهادی است که بازده آن به دقت رابطه خطی بین ولتاژ مدار باز و ولتاژ حداکثر توان، دامنه اغتشاش P&O (۱۸) وابسته است. بازده این روش از روش P&O کلاسیک و روش [۱۷] بیشتر می‌باشد. چون از یک طرف دامنه اغتشاش آن خیلی کوچک است پس نوسانات و همچنین تلفات آن کم می‌باشند و از طرف دیگر نیازی به باز و بسته کردن پنل خورشیدی از بار نیست. نمودار ۴ مربوط به روش P&O بهبودیافته است که در حالت پایدار دامنه اغتشاش آن به صفر میل می‌کند و در نتیجه تلفات صفر شده و راندمان به حداکثر خود می‌رسد.

۵-۳-۲ اثر دامنه اغتشاشات بر توان و ولتاژ خروجی

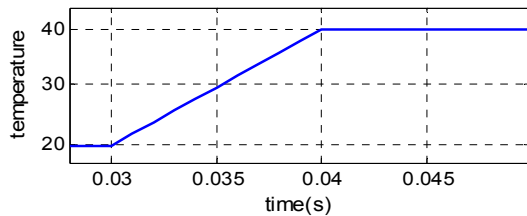
شکل ۸ اثر دامنه اغتشاشات بر توان و ولتاژ خروجی را برای روش پیشنهادی نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۸ نشان می‌دهد کاهش دامنه اغتشاشات سبب کاهش نوسانات ولتاژ، افزایش سطح زیر منحنی توان و بهبود راندمان سیستم می‌گردد. این بدیهی است که در حالت پایدار تغییر فرکانس تأثیری بر بازده روش پیشنهادی ندارد و به عبارتی متوسط ولتاژ حداکثر توان و سطح زیر منحنی توان برای فرکانس‌های مختلف ثابت است.

۵-۳-۳ پاسخ دینامیکی

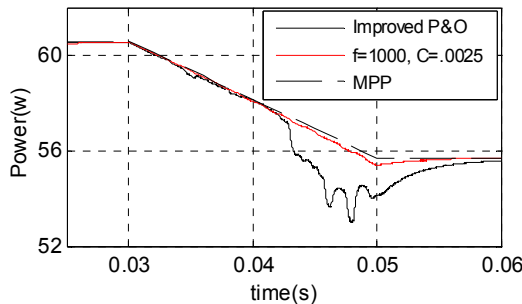
در این بخش پاسخ سیستم در لحظه راه‌اندازی و تغییرات سریع نقطه کار برای روش پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج آن با روش P&O بهبودیافته مقایسه می‌شود.

۵-۳-۱ اثر فرکانس اغتشاش بر پاسخ دینامیکی

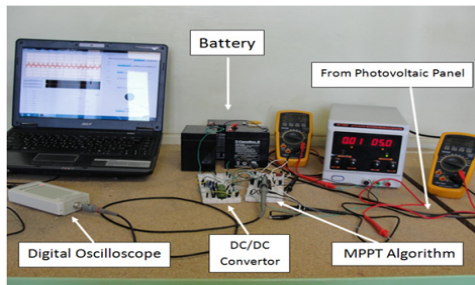
با کاهش فرکانس اغتشاش سرعت محاسبه (ردیابی) حداکثر توان کاهش می‌یابد و حلقه تنظیم دقیق در روش پیشنهادی کمتر اجرا



شکل ۱۴: تغییرات دما.



شکل ۱۵: ردیابی حداکثر توان با روش پیشنهادی و روش P&O در تغییرات دما.



شکل ۱۶: مدار عملی.

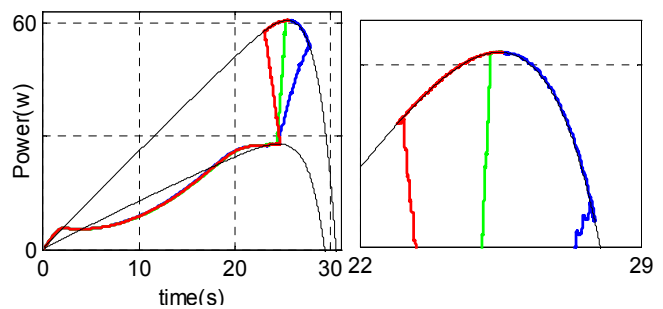
همان طور که مشاهده می‌کنید روش پیشنهادی به خوبی توانسته است مقدار حداکثر توان را در تغییرات دما دنبال کند اما روش P&O بهبود یافته در تغییرات دما دچار اشتباه شده است.

۵-۴ نتایج آزمایش عملی

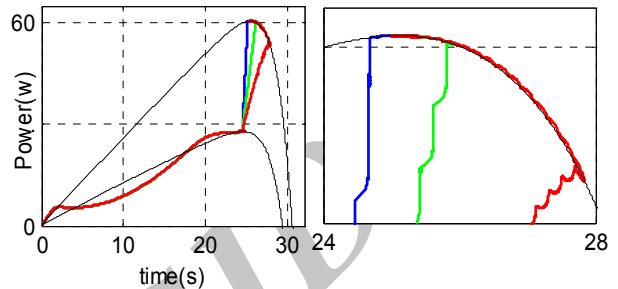
جهت بررسی عملی تأثیر اندازه اغتشاش بر روی چگونگی عملکرد، روش پیشنهادی سیستم شکل ۵ برای یک پنل خورشیدی ۶۰ وات (ساخت شرکت Ariasolar) که مشخصات آن در جدول ۱ آمده، اجرا شده است. الگوریتم توسط میکروکنترلر (Atmega ۳۲ AVR) پیاده‌سازی شده و برای اندازه‌گیری دما از سنسور LM۳۵ استفاده می‌شود. نهایتاً سیگنال کنترل به مبدل پوست با فرکانس کاری ۱۶ kHz متشکل از سلف ۸۲۰ μH، کلید قدرت IRFZ۴۴n (n-channel MOSFET) و خازن ۱۰۰ μF که از یک سمت به پنل خورشیدی مذکور و از سمت دیگر به مجموعه سری سه باتری ۱۲ ولتی (Sealed lead Acid Battery) متصل می‌باشد، اعمال شده است (شکل ۱۶).

شکل ۱۷ توان خروجی پنل خورشیدی در حالت راه‌اندازی برای اندازه اغتشاش‌های ۸، ۴ و ۲ درصد از مقدار K (۱۸) را نشان می‌دهد که در این شکل عملکرد دو حلقه محاسبه نقطه کار و تنظیم دقیق آن مشخص است.

شکل ۱۸ ولتاژ و توان پنل خورشیدی در حالت پایدار را برای این مقادیر اغتشاش نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۷ و ۱۸ مشخص است که کاهش دامنه، سرعت تنظیم را کاهش داده اما بازده حالت پایدار را به علت کاهش نوسانات حالت پایدار افزایش داده است. این نتایج در بخش شبیه‌سازی شکل‌های ۸ و ۱۰ نیز به دست آمده بود.



شکل ۱۲: عملکرد روش پیشنهادی به ازای تغییر دامنه اغتشاش در فرکانس اغتشاش ثابت (فرکانس ۱۰۰۰ و دامنه سبز، قرمز و آبی به ترتیب ۰٫۰۰۱۲۵، ۰٫۰۰۲۵ و ۰٫۰۰۵).



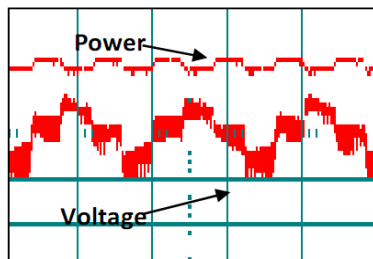
شکل ۱۳: عملکرد روش پیشنهادی به ازای تغییر فرکانس اغتشاش در دامنه اغتشاش ثابت (دامنه ۰٫۰۰۵ و فرکانس قرمز، سبز و آبی به ترتیب ۱۰۰۰، ۵۰۰ و ۲۰۰).

با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که نمودار ۱ ($C = ۰٫۰۰۵$)، $f = ۲۰۰۰$ که دامنه و فرکانس اغتشاش آن مانند روش P&O کلاسیک انتخاب شده است دارای سرعت زیادی در ردیابی حداکثر توان در لحظه راه‌اندازی و لحظه پس از تغییرات سریع شدت نور می‌باشد اما در تغییرات سریع بیشتر دچار اشتباه شده است. نمودارهای ۲ ($C = ۰٫۰۰۲۵$)، $f = ۲۰۰۰$ و ۳ ($f = ۱۰۰۰$) به ترتیب مربوط به کاهش دامنه و کاهش فرکانس اغتشاشات می‌باشند. این کاهش‌ها اگرچه سرعت تنظیم بخش offline را کاهش داده اما سبب بهبود ردیابی حداکثر توان در لحظه تغییرات سریع شده است. نمودار ۴ روش P&O بهبود یافته است که هم در لحظه راه‌اندازی و هم در تغییرات نامطلوب‌ترین پاسخ را دارد.

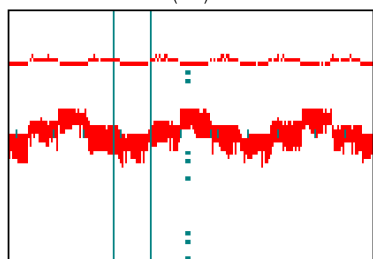
شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب تأثیر تغییر دامنه اغتشاش و تغییر فرکانس اغتشاش را بر عملکرد روش پیشنهادی نشان می‌دهد که نتیجه می‌شود کاهش دامنه و کاهش فرکانس سبب بهبود عملکرد الگوریتم در تغییرات سریع است.

نمودار ولتاژ-جریان برای تغییرات دامنه اغتشاش و تغییر در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. روش پیشنهادی مقدار ولتاژ حداکثر توان را دنبال می‌کند و مقدار ولتاژ حداکثر توان با تغییر شدت نور تغییر اندکی دارد پس در نمودار ولتاژ-جریان به ازای تغییر شدت نور حالتی که در آن مقدار ولتاژ ثابت بماند بهترین عملکرد روش پیشنهادی را دارد. با توجه توضیحات نمودار سبز، شکل ۱۲ و نمودار آبی، شکل ۱۳ کمترین دامنه و کمترین فرکانس اغتشاش و بهترین عملکرد را دارند. در این بخش شدت نور به طور خطی در ۲۰ میلی‌ثانیه از ۵۰۰ W/m^2 تا ۱۰۰۰ W/m^2 افزایش یافته است.

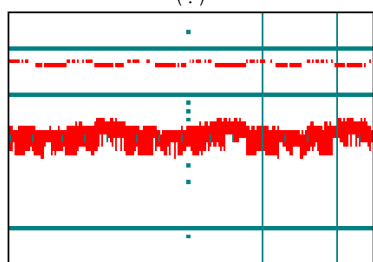
تغییرات دما برای پنل خورشیدی کندتر از تغییرات شدت نور می‌باشد و همچنین در الگوریتم پیشنهادی در صورت تغییرات دما حلقه محاسبه نقطه کار که یک رابطه خطی است بدون اشتباه این تغییرات را دنبال می‌کند. شکل ۱۵ نتایج شبیه‌سازی را برای روش پیشنهادی در دامنه اغتشاش ۰٫۰۰۲۵ و فرکانس اغتشاش ۱۰۰۰ و روش P&O بهبود یافته را نشان می‌دهد که در آن دما به صورت شکل ۱۴ تغییر می‌کند.



(الف)

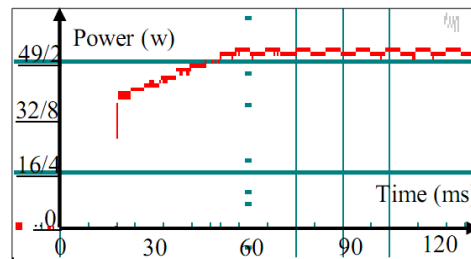


(ب)

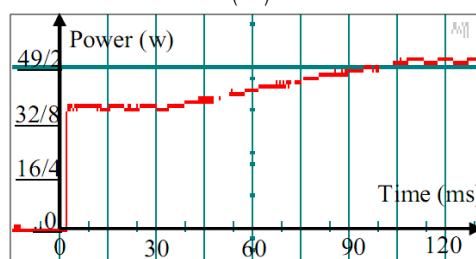


(ج)

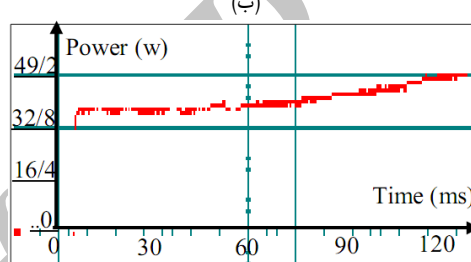
شکل ۱۸: تغییرات مقدار توان و ولتاژ پیل خورشیدی در حالت پایدار برای دامنه اغتشاش مختلف، (الف) ۰/۰۰۰۵، (ب) ۰/۰۰۲۵ و (ج) ۰/۰۰۱۲۵، (تقسیم‌بندی محور افقی ۵ میلی‌ثانیه و محور عمودی برای توان ۴ وات و برای ولتاژ ۰/۴ ولت می‌باشد).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۷: مقدار توان خروجی پیل خورشیدی در حالت راه‌اندازی برای دامنه اغتشاش‌های مختلف، (الف) ۰/۰۰۰۵، (ب) ۰/۰۰۲۵ و (ج) ۰/۰۰۱۲۵.

۵-۵ بحث

هزینه، راندمان و سادگی پیاده‌سازی فاکتورهای مهمی هستند که برای مصرف‌کننده از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. عوامل مختلفی در هزینه به کارگیری روش‌های مختلف MPPT مؤثر است که عبارتند از تعداد سنسورهای مورد نیاز، دانش فنی مصرف‌کننده، پیاده‌سازی آنالوگ یا دیجیتال و ... در ادامه برخی پارامترهای مؤثر در انتخاب روش مانند راندمان، پاسخ دینامیکی و ... مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۵-۵-۱ راندمان

راندمان بر اساس (۲۰) محاسبه گردیده و صرفاً حالت پایدار در نظر گرفته شده است. عواملی که باعث افزایش تلفات شده و راندمان را کاهش می‌دهند، دامنه نوسانات و باز و بسته کردن مدار جهت اندازه‌گیری ولتاژ مدار باز می‌باشند. در روش P&O بهبودیافته از دامنه اغتشاش متغیر استفاده می‌شود که در حالت پایدار این دامنه به صفر میل می‌کند، پس این روش و همچنین الگوریتم‌های [۲۱] تا [۲۳] که عملکردشان در حالت پایدار بر اساس این روش می‌باشند، دارای بالاترین راندمان هستند. روش پیشنهادی که از P&O کلاسیک با دامنه اغتشاش کم استفاده می‌کند و ولتاژ مدار باز را از (۱۷) تقریب می‌زند در جایگاه دوم است. روش [۱۷] با تلفات بیشتر به علت باز و بسته کردن مدار برای اندازه‌گیری ولتاژ مدار باز در مرتبه بعدی است و نهایتاً روش‌های P&O کلاسیک و ولتاژ مدار باز در رتبه آخر است.

۵-۵-۲ پاسخ دینامیکی

منظور از پاسخ دینامیکی برای سیستم فوتوولتائیک، تغییر نقطه حداکثر توان در لحظه راه‌اندازی و در تغییرات شرایط جوی می‌باشد. روش

پیشنهادی که در لحظه راه‌اندازی مقدار حداکثر توان را به خوبی تخمین زده است و در تغییرات سریع شرایط جوی مقدار حداکثر توان را به خوبی دنبال می‌کند، بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. روش‌های مبتنی بر شبکه عصبی و منطق فازی [۲۴] و [۲۵] فارغ از دقت عملکردشان در ردیابی نقطه حداکثر توان، پاسخ دینامیکی خوبی دارند. روش P&O بهبودیافته و همچنین الگوریتم‌های [۲۱] تا [۲۳] که عملکردشان برای ردیابی نقطه حداکثر توان بر اساس محاسبه شیب منحنی توان-ولتاژ می‌باشند، به خاطر تأخیر در راه‌اندازی و ردیابی اشتباه توان در تغییرات سریع در رتبه بعدی قرار دارند.

۵-۵-۳ سادگی

عموماً پیاده‌سازی و اجرای الگوریتم‌هایی که از منطق‌های ساده بهره می‌برند، برای پیل‌های خورشیدی آسان است. روش‌های ولتاژ مدار باز و P&O کلاسیک از ساده‌ترین روش‌های ارائه شده می‌باشند. استفاده از (۱۸) که یک رابطه خطی است برای تخمین ولتاژ حداکثر توان و استفاده از روش P&O کلاسیک که روش ساده‌ای است، جهت تنظیم دقیق مقدار ولتاژ ماکزیمم توان، سادگی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. از طرف دیگر روش‌هایی که نیازمند به محاسبه شیب منحنی توان-ولتاژ هستند مانند روش P&O بهبودیافته و روش‌های ارائه شده در [۲۱] تا [۲۳] در مرحله بعد قرار دارند. عملکرد این روش‌ها مستلزم اندازه‌گیری دقیق بعضی از پارامترهای پیل‌های خورشیدی و حجم محاسباتی قابل ملاحظه است. نهایتاً روش‌هایی که از شبکه عصبی و منطق فازی [۲۳] تا [۲۵] استفاده می‌کنند در رتبه آخر قرار دارند که در این روش‌ها پارامترهای زیادی باید توسط مصرف‌کننده تنظیم شوند.

۵-۵-۴ پایداری

حلقه محاسبه نقطه کار زمانی اجرا می‌شود که تغییرات در دما زیاد است، اما حلقه تنظیم دقیق در موارد زیر اجرا می‌شود: (۱) بلافاصله بعد از حلقه محاسبه نقطه کار، (۲) هنگامی که تغییرات دما کوچک باشد و (۳) هنگامی که شدت نور تغییر کند. با توجه به این که عملکرد دو حلقه با یکدیگر در تداخل نیست، پس اگر هر یک از این دو حلقه پایدار باشند، پایداری کل الگوریتم تضمین است. از یک سو در حضور تغییرات زیاد درجه حرارت، فقط حلقه محاسبه کار که بر اساس یک رابطه خطی می‌باشد، اجرا می‌شود. دما که عملاً در بازه محدودی تغییر می‌کند، تنها متغیر این حلقه است، پس خروجی نیز بر اساس تغییرات دما در بازه مشخصی تغییر می‌کند. از سوی دیگر، حلقه تنظیم دقیق مبتنی بر روش P&O کلاسیک با دامنه و فرکانس اغتشاش کم می‌باشد و عملکرد این حلقه، همگرایی نقطه کار MPP را تثبیت می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتمی جهت بهبود عملکرد ردیابی نقطه حداکثر توان پنل‌های خورشیدی در حالت جدا از شبکه ارائه شد. الگوریتم‌های مختلف در سرعت و دقت ردیابی نقطه حداکثر توان که تعیین‌کننده راندمان الگوریتم هستند، متفاوت می‌باشند. الگوریتم پیشنهادی از دو بخش محاسبه نقطه کار و تنظیم دقیق تشکیل شده است. بخش محاسبه نقطه کار که بر اساس روش ولتاژ مدار باز است، حداکثر توان را تقریب می‌زند و تضمین‌کننده سرعت الگوریتم می‌باشد. بخش تنظیم دقیق، بخش دیگری است که بر اساس روش اغتشاش و مشاهده کلاسیک مقدار دقیق حداکثر توان را دنبال می‌کند. عملکرد این بخش که مکمل عملکرد بخش محاسبه نقطه کار می‌باشد، دقت الگوریتم را تضمین می‌کند. الگوریتم پیشنهادی در محیط Matlab/Simulink شبیه‌سازی و برای یک نمونه آزمایشگاهی پیاده‌سازی شد. نتایج نشان داد که راندمان روش بعد از روش بهبودیافته بالاترین است و عملکرد آن در هنگام راه‌اندازی و تغییرات سریع شرایط جوی، بهترین است. سادگی، سخت‌افزار کم مورد نیاز و هزینه پایین اجرا از مزایای الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم برای یک نمونه آزمایشگاهی، ضمن تأیید نتایج شبیه‌سازی، اجرایی و مؤثر بودن روش را نشان داد.

مرجع

- [8] T. Hiyama, S. Kouzuma, and T. Imakubo, "Identification of optimal operating point of PV modules using neural network for real-time maximum power tracking control," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 10, no. 2, pp. 360-367, Jun. 1995.
- [9] C. Hua, J. Lin, and C. Shen, "Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no. 1, pp. 99-107, Feb. 1998.
- [10] E. Bianconi, J. Calvente, R. Giral, E. Mamarelis, G. Petrone, C. A. Ramos-Paja, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Perturb and observe MPPT algorithm with a current controller based on the sliding mode," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 346-356, Jan. 2013.
- [11] P. Huynh and B. H. Cho, "Design and analysis of a microprocessor-controlled peak-power-tracking system," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 32, no. 1, pp. 182-190, Jan. 1996.
- [12] Q. Mei, M. Shan, L. Liu, and J. M. Guerrero, "A novel improved variable step-size incremental-resistance MPPT method for PV systems," *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 58, no. 6, pp. 2427-2434, Jun. 2011.
- [13] T. Ebrahim, J. W. Kimball, P. T. Krein, P. L. Chapman, and P. Midya, "Dynamic maximum power tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1282-1291, Sep. 2006.
- [14] Z. Zhi-Dan, H. Hai-Bo, Z. Xin-Jian, C. Guang-Yi, and R. Yuan, "Adaptive maximum power point tracking control of fuel cell power plants," *J. Power Sources*, vol. 176, no. 1, pp. 259-269, Jan. 2008.
- [15] C. Hua and J. Lin, "An on-line MPPT algorithm for rapidly changing illuminations of solar arrays," *Renewable Energy*, vol. 28, no. 7, pp. 1129-1142, Jun. 2003.
- [16] G. J. Yu, Y. S. Jung, J. Y. Choi, and G. S. Kim, "A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms," *Solar Energy*, vol. 76, no. 4, pp. 455-463, Apr. 2004.
- [17] T. Tafticht, K. Agbossou, M. L. Doumbia, and A. Cheriti, "An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 7, pp. 1508-1516, Jul. 2008.
- [18] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, May 2009.
- [19] C. Carrero, J. Amador, and S. Arnaltes, "A single procedure for helping PV designers to select silicon PV module and evaluate the loss resistances," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 15, pp. 2579-2589, Dec. 2007.
- [20] W. Tasi-Fu and C. Yu-Kai, "Modeling PWM DC/DC converters out of basic converter units," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, no. 5, pp. 870-881, Sep. 1998.
- [21] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu, and Y. Kang, "A variable step size INC MPPT method for PV systems," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 55, no. 7, pp. 2622-2628, Jul. 2008.
- [22] B. N. Alajmi, K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, "Fuzzy-logic-control approach of a modified hill-climbing method for maximum power point in microgrid standalone photovoltaic system," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 26, no. 4, pp. 1022-1030, Apr. 2011.
- [23] C. Yang, C. Hsieh, F. Feng, and K. Chen, "Highly efficient analog maximum power point tracking (AMPPT) in a photovoltaic system," *IEEE Trans. on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, vol. 59, no. 7, pp. 1546-1556, Jul. 2012.
- [24] A. B. G. Bahgat, N. H. Helwa, G. E. Ahmad, and E. T. E. Shenawy, "MPPT controller for PV systems using neural networks," *Renew. Energy*, vol. 30, no. 8, pp. 1257-1268, Jul. 2005.
- [25] C. Chiu and Y. Ouyang, "Robust maximum power tracking control of uncertain photovoltaic systems: a unified T-S fuzzy model-based approach," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 19, no. 6, pp. 1516-1527, Nov. 2011.
- [1] M. Kheshti, M. Na Yeripour, and M. D. Majidpour, "Fuzzy dispatching of solar energy in distribution system," *Applied Solar Energy*, vol. 47, no. 2, pp. 105-111, Jun. 2011.
- [2] V. Reddy and A. Raturi, "Optimization and sensitivity analysis of a PV/Wind/Diesel hybrid system for a rural community in the pacific," *Applied Solar Energy*, vol. 46, no. 2, pp. 152-156, Jun. 2010.
- [3] A. R. Reisi, M. H. Moradi, and S. Jamasb, "Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 433-443, Mar. 2013.
- [4] J. J. Schoeman and J. D. Van Wyk, "A simplified maximal power controller for terrestrial photovoltaic panel arrays," in *Proc. 13th Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 361-367, Jun. 1982.
- [5] J. H. R. Enslin, M. S. Wolf, D. B. Snyman, and W. Swiegers, "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 44, no. 6, pp. 769-773, Dec. 1997.
- [6] T. Noguchi, S. Togashi, and R. Nakamoto, "Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 217-223, Feb. 2002.
- [7] T. Hiyama, S. Kouzuma, T. Imakubo, and T. H. Ortmeyer, "Evaluation of neural network based real-time maximum power

محمد حسن مرادی در سال‌های ۱۳۶۹ و ۱۳۷۲ مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را به ترتیب از دانشگاه صنعتی شریف و دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. از سال ۱۳۷۲ نامبرده در گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا همدان بعنوان عضو هیأت علمی مشغول به فعالیت گردید. دکتر مرادی در سال ۱۳۷۷ به دوره دکترای مهندسی برق در دانشگاه استراسکالاید در گلاسکو اسکاتلند وارد گردید و در سال ۱۳۸۱ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند انرژی‌های نو، ریز شبکه، مدلسازی، شبیه‌سازی و کنترل نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و فرایندهای صنعتی، کیفیت توان و اتوماسیون می‌باشد.

علیرضا رئیسی در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه بوعلی سینا و در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه بوعلی همدان دریافت نمود. از سال ۱۳۹۰ نامبرده در دانشگاه‌ها و مراکز عالی مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان انرژی های نو، کیفیت توان و مدل‌سازی است.

Archive of SID