

Photovoltaic Systems with Sliding Mode Control for Working in Maximum Power Point

Mahsa Sedaghat, Alireza Siadatan, Bahman Taheri

- 1.2. Young Researchers and Elite Club, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Department of Electrical & Computer Eng., University of Toronto, Toronto, Canada
3. Young Researchers and Elite Club, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, Iran

Abstract:

In this paper, a method for tracking maximum power in solar panels with the design of a networked photovoltaic system, including photovoltaic cell modeling, DC-DC choke converter design and sliding mode controller is presented. Simulations show that due to the existence of wires in the structure of the input / output structure of the chokes converter, its use to track maximum power points is superior to other methods. The maximum power point tracking has been implemented based on the chaos and observation algorithm in the photovoltaic system connected to the network and the control of the slip mode ring packet. The use of the sliding mode, according to the nonlinear nature of the system, can preserve the stability of the converter in a wide range of radiation, load, and variations. In the presented slip mode, only the input voltage and capacitive filter flow are used as feedback and the design without the intervention of the converter model is completed. The efficiency of the proposed photovoltaic system has been evaluated using MATLAB / Simulink software.

Keywords Sliding Mode Control, Photovoltaic System, DC-DC Converter, Cuk Converter, Maximum Power Point, P&O algorithm.

سیستم‌های خورشیدی کنترل‌شونده با مد لغزشی برای کار در نقطه توان

ماکزیمم با استفاده از مبدل چوک

مهسا صداقت^۱، علیرضا سیادتان^۲، بهمن طاهری^۳

۱- دانشجوی دکتری، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران،

ایران

m.sedaghat@iauardabil.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب - باشگاه پژوهشگران جوان و

نخبگان - تهران - ایران

siadatan@wtiau.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران

b.taheri@iauardabil.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی به‌منظور ردیابی حداکثر توان در صفحات خورشیدی همراه با طراحی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه، شامل مدل‌سازی سلول‌های فتوولتائیک، طراحی مبدل DC-DC چوک و کنترل‌کننده مد لغزشی ارائه شده است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند وجود سیم‌پیچ‌هایی در ساختار ورودی - خروجی مبدل چوک که موجب می‌شود نیازی به فیلتر ورودی در این مبدل نباشد، هزینه ساخت مداری سیستم و حجم مداری آن را کاهش می‌دهد؛ بنابراین استفاده از مبدل چوک برای ردیابی نقطه توان حداکثری نسبت به سایر روش‌ها دارای برتری زیادی است. ردیابی نقطه توان ماکزیمم در این مقاله براساس الگوریتم آشوب و مشاهده در سیستم فتوولتائیکی متصل به شبکه و کنترل حلقه بسته مد لغزشی اجرا شده است. استفاده از روش مد لغزشی با توجه به ماهیت غیرخطی سیستم پایداری مبدل را در حوزه وسیعی از تغییرات تابش، بار و ... حفظ می‌کند. در روش مد لغزشی ارائه‌شده، فقط ولتاژ ورودی و جریان فیلتر خازنی به‌عنوان فیدبک، استفاده و طراحی بدون دخالت مدل مبدل تکمیل شده است. کارایی سیستم فتوولتائیک طرح‌شده با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink ارزیابی شده است.

واژه‌های کلیدی: کنترل مد لغزشی، سیستم‌های فتوولتائیک، مبدل DC-DC، مبدل Ćuk، نقطه توان ماکزیمم، الگوریتم P&O

۱- مقدمه

توان خروجی سلول‌های فتوولتائیک به شدت از عوامل محیطی مانند تابش، دمای محیط و میزان بار تأثیر می‌گیرد؛ به همین دلیل در صورت کنترل‌نکردن سلول‌های فتوولتائیک به‌ندرت در نقطه توان حداکثر کار می‌کنند. بنابراین ردیابی نقطه توان حداکثر در افزایش راندمان این سیستم نقش کلیدی دارد. تا کنون، روش‌های زیادی برای ردیابی نقطه کار ارائه شده است. در [رضا نوریان - حسین محمدی ۱۳۹۵] ترکیبی از شبکه DC مستقل و سیستم‌های PV برای تغذیه بارهای نامتعادل AC استفاده شده است. در [فرزاد حاجی محمدی و همکاران ۹۷] از روشی جدید براساس

استفاده از حداکثر راندمان سیستم‌های فتوولتائیک با در نظر گرفتن هزینه بالای آنها ضرورت اساسی به‌شمار می‌رود.

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۶

نام نویسنده مسئول: بهمن طاهری

نشانی نویسنده مسئول: ایران، اردبیل، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل، گروه مهندسی برق

مقاوم و پایدار بودن، سادگی پیاده‌سازی و قابلیت استفاده از سیستم‌های غیرخطی جایگاه ویژه‌ای دارد [Vadim Utkin 2010]–[H.El. Fadil et al 2013].

در [حسن ایجادی و امین حاجی‌زاده ۱۳۹۱] روشی به منظور ردیابی حداکثر توان در صفحات خورشیدی بر پایه منطق فازی ارائه شده است. اساس روش پیشنهاد شده در این مقاله بر پایه وجود رابطه بین شدت تابش و ولتاژ نقطه حداکثر توان است. در این مقاله روشی جدید با استفاده از الگوریتم آشوب و مشاهده مبتنی بر کنترل مد لغزشی، برای ردیابی و استخراج جریان نقطه کار برای ردیابی نقطه توان حداکثر در مبدل DC-DC چوک ارائه شده است. مزیت مبدل مذکور نسبت به سایر مبدل‌های استاندارد این است که هر دو جریان ورودی و جریان تغذیه‌کننده طبقه خروجی دارای ریپل اندکی اند (برخلاف مبدل‌های کاهنده - افزایشنده که در آن هر دو جریان شدیداً ناپیوسته‌اند)؛ بنابراین این مسئله نیاز به فیلترهای جداگانه را رفع می‌کند؛ با این حال به دلیل پیچیدگی مدل مبدل چوک تا کنون محققان هیچ گزارشی درباره ردیابی نقطه توان حداکثر با این مبدل و کنترل مد لغزشی گزارش نکرده‌اند. در این مقاله سعی شده است برای بهبود کارایی، روشی روشن و ساده برای طراحی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی گام‌به‌گام سیستم فتوولتائیک ارائه شود. مهم‌ترین مزیت مبدل Ćuk برای ردیابی نقطه توان ماکزیمم استفاده شده در این مقاله، کوچک بودن ریپل جریان‌های ورودی - خروجی مربوطه و نیانداشتن به فیلتر است که با حذف فیلتر ورودی از سیستم هزینه‌های ساخت مداری، کاهش و حجم مداری سیستم نیز کاهش می‌یابد. تمامی شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام شد.

۲- مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم فتوولتائیک

۲-۱- مدل و مشخصه ولتاژ - جریان، ولتاژ - توان آرایه‌های خورشیدی

مدار معادل الکتریکی یک آرایه خورشیدی موقع قرارگرفتن در مقابل تشعشعات خورشیدی، در شکل (۱) نشان داده شده است.

هماهنگی هوشمند فوز - ریکلوزر برای ظریب نفوذ زیاد سیستم‌های فتوولتائیک استفاده شده است. روش رسانایی افزایشی که براساس صفر بودن مشتق توان نسبت به ولتاژ یا نسبت به جریان در نقطه توان ماکزیمم کار می‌کند [Fangrui 2008]. روش حلقه باز که در آن کسری از جریان اتصال کوتاه با توجه به رابطه تقریباً خطی جریان نقطه کار استفاده می‌شود [S.Yuvarajan, S.Xu 2003]. روش ولتاژ مدار باز که اساس آن بر وجود تابع تقریباً خطی بین ولتاژ نقطه کار و ولتاژ مدار باز است [Ahmad.J 2010]؛ البته بدیهی است قطع دوره‌ای برای اندازه‌گیری ولتاژ مدار باز باعث از دست دادن توان در سیستم فتوولتائیک می‌شود؛ به همین دلیل استفاده از سلول پایه به‌منزله راهنما برای تشخیص رفتار کل پانل ارائه شده است که این مورد نیز مشکل جدید عدم قطعیت را در اندازه‌گیری سلول پایه نسبت به کل پانل موجب می‌شود [Vladimir V el tl 2009]. روش هوشمند مانند شبکه‌های عصبی و روش منطق فازی نیز به دلیل نیاز به مدل سلول فتوولتائیک دارای کاربرد محدودی‌اند.

[Alessandro Costabeber el tl 2014]–[S. Lalounia el tl 2009]. پس از محاسبه مقادیر مرجع برای نقطه کار، مهم‌ترین کار، کنترل مبدل DC-DC در نقطه کار مدنظر است. بیشتر از مبدل DC-DC افزایشنده برای ردیابی نقطه توان ماکزیمم در سلول‌های فتوولتائیک استفاده می‌شود [B.Taheri, M. Sedaghat 2018]؛ با این حال بدیهی است به دلیل وجود سیم‌پیچ‌هایی در ساختار ذاتی خود مبدل چوک استفاده از آن نسبت به مبدل افزایشنده برتری دارد. در [2018F.A.InthamoussouF.Valenciaga] روش پیگیری نقطه حداکثر نقطه (MPPT) با استفاده از ترکیبی از حالت مشاهدات حالت مرتبه دوم (SOSMO) و کنترل‌کننده سستی PI ارائه می‌دهد. SOSMO مدلی خاصی پیشنهاد شده است، به خصوص برای مقابله با تخمین گرادیان قدرت زمان محدود حتی در حضور پویایی unmodeled و اختلالات خارجی براساس این برآورد، کنترل‌کننده PI برای سرعت‌بخشیدن به سیستم PV برای کار بر MPP و ردیابی تغییرات آن استفاده می‌شود؛ با این حال با توجه به پیچیدگی‌های مداری مبدل چوک بدیهی است دیگر نمی‌توان از کنترل‌کننده‌های مرسوم استفاده کرد. در این میان روش کنترل مد لغزشی به دلیل

افزایش دمای محیط است؛ درحالی که افزایش جریان اتصال کوتاه تنها حدود ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۷۵ درصد به ازای هر درجه افزایش دما است و در نتیجه بازده سلول به اندازه ۰/۰۵ درصد به ازای هر درجه سانتیگراد افزایش دمای محیط کم می شود.

برای مدل سازی اثر تغییرات دما و شدت تابش می توان از روابط زیر استفاده کرد:

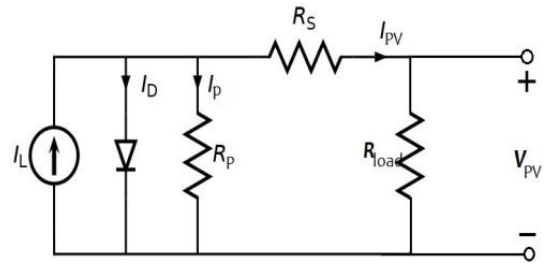
$$I_L = I_{L(T_1)}(1 + K_0(T - T_1)) \quad (۴)$$

$$I_{L(T_1)} = \frac{G}{G_{(nom)}} \times I_{SC(T_1, nom)} \quad (۵)$$

$$K_0 = \frac{I_{SC(T_2)} - I_{SC(T_1)}}{(T_2 - T_1)} \quad (۶)$$

$$I_o = I_{o(T_1)} \times \left(\frac{T}{T_1}\right)^{\frac{3}{n}} \times e^{\frac{-qV_g}{nk \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)}} \quad (۷)$$

$$I_{o(T_1)} = \frac{I_{SC(T_1)}}{\left(e^{\frac{qV_{oc(T_1)}}{nkT_1} - 1}\right)} \quad (۸)$$



شکل (۱): مدار معادل سلول خورشیدی

مشخصه ولتاژ - جریان آن را می توان به کمک روابط زیر به دست آورد [Il-Song Kim 2006]:

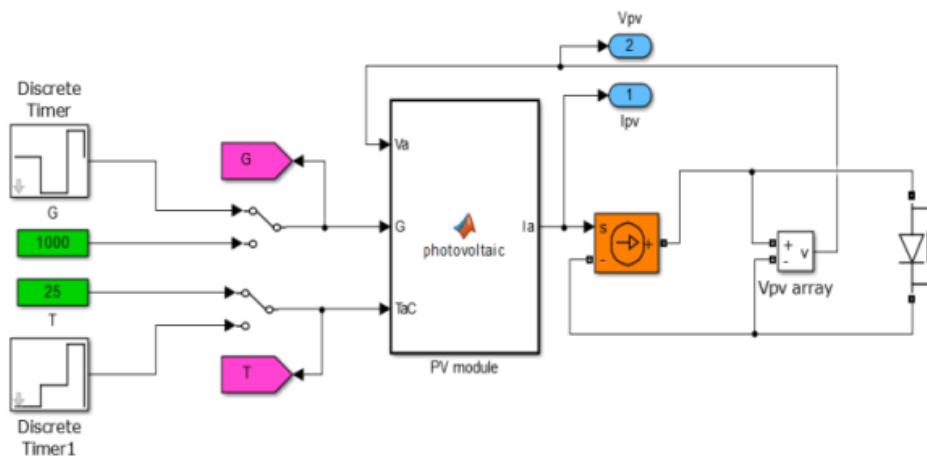
$$I_{PV} = I_L - I_p - I_d \quad (۱)$$

$$I_L = I_o \left[\exp\left(\frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (۲)$$

$$I_p = \frac{V_{PV} - R_s I_{PV}}{R_p} \quad (۳)$$

۲-۲- تأثیرات دما و تابش بر سیستم فتوولتائیک

منحنی ولتاژ - جریان آرایه به طور همزمان با دو فاکتور میزان تابش خورشید و دمای محیط تغییر می کند. افزایش دما اثرات نامطلوبی بر عملکرد سلول ها دارد و به طور کلی بازدهی آنها را کاهش می دهد. میزان افت ولتاژ مدار باز سلول ها حدود ۰/۳ تا ۰/۴ درصد به ازای هر درجه سانتیگراد



شکل (۲): شبیه سازی مدل سلول فتوولتائیک در نرم افزار MATLAB.

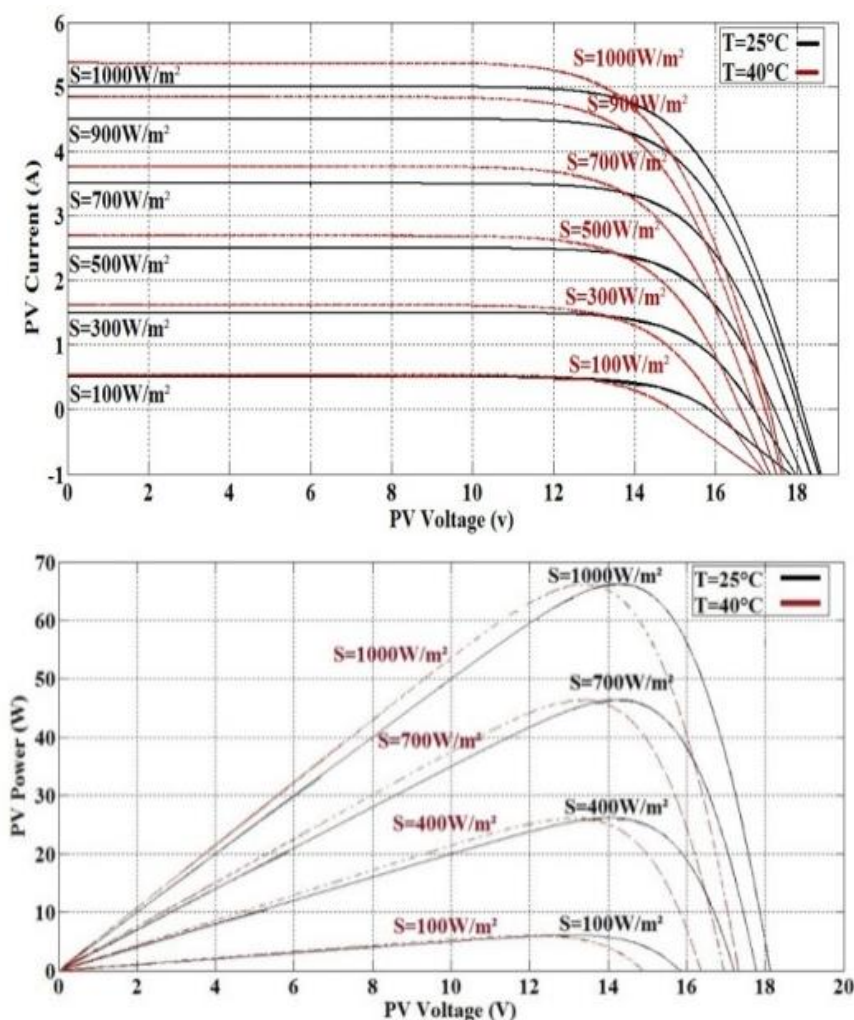
الکترون ولت اند. پارامترها و مقادیر استفاده شده برای سلول PV در جدول (۱) آورده شده است. شکل (۲) مدل

در روابط (۴) تا (۸)، G شدت تابش، $G_{(nom)}$ شدت تابش نامی و V_g انرژی شکاف نوری سیلیکون بر حسب

مقادیر	پارامترها
1.381e-23	K: (ثابت بولتزمن)
1.602e-19	q: (بار الکترون)
1.3	a: (ضریب ایدئالی دیود)
30	Ns: (تعداد سلول سری شده)
25°C	T: (دما)
100-1000 W/m ²	Gr: (تابش)
18.13 V	Voc: (ولتاژ مدارباز)
5 A	iSC: (جریان اتصال کوتاه)
0.005 (A.m ² /W)	Ks

طراحی شده شبیه‌سازی برای سلول فتوولتائیک در نرم‌افزار MATLAB را نشان می‌دهد. این مدل براساس روابط (۱) تا (۸) و پارامترهای جدول (۱) شبیه‌سازی شده است. شکل (۳) منحنی مشخصه جریان - ولتاژ و توان - ولتاژ براساس تغییرات دما و تابش را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود با کاهش تابش، جریان کاهش می‌یابد و این امر موجب کاهش توان سلول نیز می‌شود. بهترین حالت شرایط تابش استاندارد 1000W/m² اتفاق می‌افتد.

جدول (۱): پارامترهای سلول خورشیدی

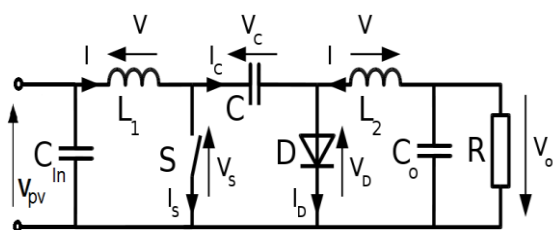


شکل (۳): منحنی مشخصه جریان - ولتاژ و توان - ولتاژ آرایه خورشیدی در حین تغییرات شدت نور تابشی (S) نشان‌دهنده سطح تابش خورشیدی است.

برای انتقال حداکثر توان از سلول فتوولتائیک، مبدل‌های DC-DC استفاده می‌شوند. در آرایه‌های PV ولتاژ خروجی

۲-۳- مبدل DC-DC

الگوریتم آشوب و مشاهده را در نرم افزار MATLAB نشان داده است.



شکل (۴): مبدل DC-DC چوک

جدول (۲): پارامترهای نامی مبدل چوک

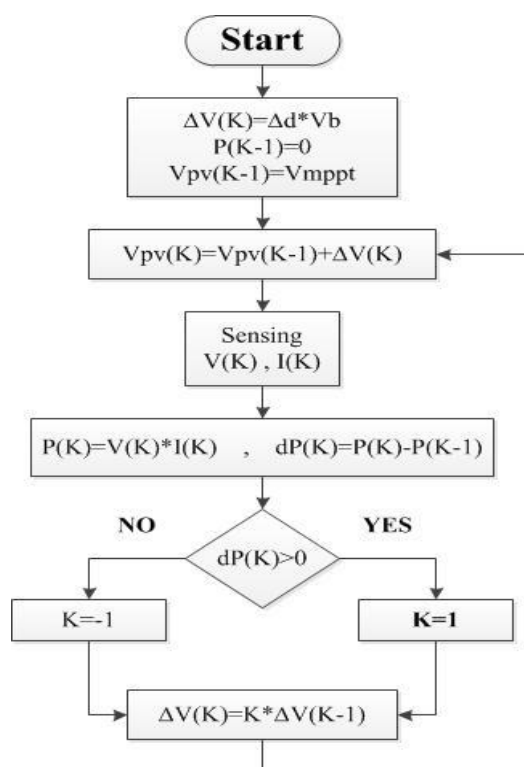
پارامترها	مقادیر
L_1	1 mH
C_1	850 μF
L_2	1 mH
C_2	2000 μF

با در نظر گرفتن ساختار سری - موازی نسبتاً پایین است؛ بنابراین استفاده از مبدل های DC-DC افزایش دهنده الزامی است. در این مقاله از مبدل DC-DC چوک نشان داده شده در شکل ۴، برای اتصال به آرایه PV استفاده شده است. پارامترهای مبدل مذکور در جدول (۲) آورده شده اند.

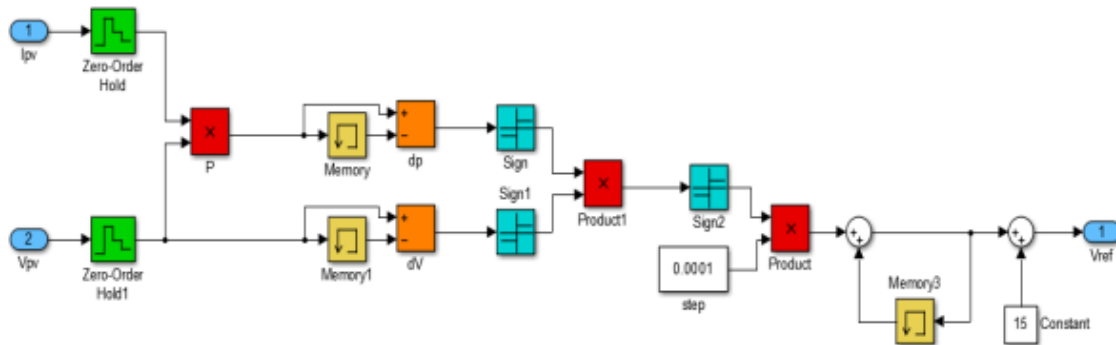
۴-۲- ردیابی نقطه توان ماکزیمم

یکی از روش هایی استفاده شده برای ردیابی نقطه توان ماکزیمم در سیستم های خورشیدی، روش آشوب و مشاهده است.

با توجه به اینکه توان خروجی سلول فتوولتائیک با پارامترهای متعددی مانند تابش خورشید و دما مرتبط است و همچنین مشخصه خروجی آن کاملاً غیرخطی است، لازم است سیستم فتوولتائیک با در نظر گرفتن کنترل کننده ای همیشه در نقطه توان حداکثر کار کند. شکل (۵) فلوجارت روش آشوب و مشاهده و شکل (۶) چگونگی شبیه سازی



شکل (۵): الگوریتم P&O.

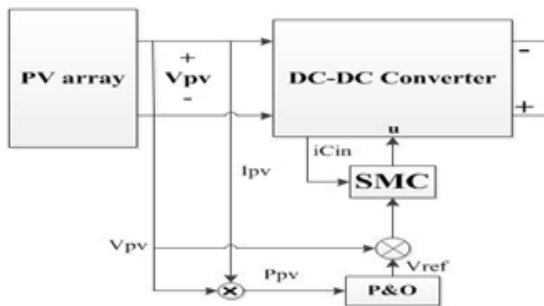


شکل (۶): چگونگی شبیه‌سازی الگوریتم آشوب و مشاهده برای به دست آوردن مقدار ولتاژ مرجع

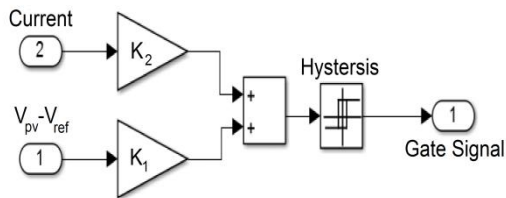
روابط (۱۰) و (۱۱) بیان می‌شود که در آن V_b و i_{PV} به ترتیب نشان‌دهنده جریان PV و ولتاژ خروجی مبدل‌اند. متغیر u مربوط به سیگنال کلیدزنی سوئیچ‌های نیمه‌هادی است.

$$i_{C_{in}} = C_{in} \cdot \frac{dv_{PV}}{dt} = i_{PV} - i_L \quad (10)$$

$$v_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} = v_{PV} - v_b \cdot (1 - u) \quad (11)$$



الف) بلوک دیاگرام



ب) ساختار کنترل‌کننده مد لغزشی.

شکل (۷): طراحی کنترل مد لغزشی براساس خطای ولتاژ و جریان خازن ورودی

در شکل (۷) بلوک دیاگرام سیستم کنترلی ارائه شده است که در آن u با استفاده از حلقه هیستریزس تولید

۳- تجزیه و تحلیل کنترل مد لغزشی (SMC)

لازم است فرآیند در نظر گرفته شده برای طراحی کنترل‌کننده، پایداری سیستم، زمان استقرار مدنظر و همچنین حداقل فراجهدش را تضمین کند. در این مقاله سطح لغزش به شکل زیر تعریف می‌شود. مزیت اصلی چنین تابع سوئیچینگ به امکان تنظیم ولتاژ فتوولتائیک بدون نیاز به کنترل‌کننده اضافی و مدل خطی‌سازی شده مربوط می‌شود و جایگزین خوبی برای تعریف رفتار ولتاژ PV، v_{PV} در این مقاله شامل خطا با توجه به مرجع و مشتق ولتاژ در تابع سوئیچینگ است، که در آن مشتق ولتاژ را می‌توان با اندازه‌گیری جریان خازن ورودی $i_{C_{in}}$ به دست آورد. مزیت اصلی چنین تابع سوئیچینگ مربوط به تنظیم ولتاژ PV بدون کنترل‌کننده اضافی براساس مدل خطی شده است؛ بنابراین، این کار روی تابع سوئیچینگ ψ و سطح ϕ در (۹) داده شده که به تجزیه و تحلیل پایداری ولتاژ PV در حضور بار، محیط زیست و یا تغییرات مرجع قادر است.

$$\psi = (v_{PV} - v_{ref}) \cdot K_1 + i_{C_{in}} \cdot K_2 \quad (9)$$

که در رابطه فوق v_{PV} ولتاژ لحظه‌ای خروجی فتوولتائیک و v_{ref} مقدار مرجع است.

طرح کلی روش ارائه شده در شکل ۷ (الف) برای اجرای تابع سوئیچینگ نشان داده شده است که در آن V_{ref} ولتاژ مرجعی است که با الگوریتم آشوب و مشاهده محاسبه شده است. رفتار دینامیکی مبدل DC-DC با

می‌شود. طراحی کنترل کننده مد لغزشی پایدار نیاز به بررسی سه شرط دارد: ترانسورسالیته (Transversally Condition)، کنترل معادل (Equivalent Control) و در دسترس بودن (Reachability Condition) [H. Sira-Ramirez1987]. ادامه، این شرایط برای بررسی روش طراحی شده مطالعه می‌شود.

$$\frac{d\psi}{dt} = 0 \rightarrow 0 < u_{eq} < 1 \quad (17)$$

با جایگزینی u با u_{eq} در رابطه (۱۵) و با قرار دادن آن در رابطه (۱۷)، نامعادله زیر به دست آمده است.

$$0 < u_{eq} = \frac{L}{v_b} \left[\left(\frac{K_1}{K_2} + Y \right) \cdot \frac{dv_{pv}}{dt} - \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{dv_{ref}}{dt} \right] + \frac{L}{v_b} \cdot \frac{di_{sc}}{dt} - \frac{v_{pv}}{v_b} + 1 < 1 \quad (18)$$

علاوه بر این، مطالعه سیستم در سطح $\psi = 0$ نیز در نظر گرفته شده می‌شود. رابطه (۱۹) از ترکیب روابط (۹) و (۱۰) به دست می‌آید. رابطه (۱۹) دینامیک مد لغزشی را توصیف می‌کند که می‌تواند در حوزه لاپلاس، تجزیه و تحلیل و در رابطه (۲۰) داده شود.

$$i_{C_{in}} = C_{in} \cdot \frac{dv_{pv}}{dt} = -\frac{K_1}{K_2} \cdot (v_{pv} - v_{ref}) \quad (19)$$

$$\frac{V_{pv}(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{1}{\frac{K_2 \cdot C_{in} \cdot s}{K_1} + 1} \quad (20)$$

معادله (۲۰) وجود یک قطب معادل را در $-\frac{K_1}{K_2 \cdot C_{in}}$ نشان می‌دهد. بنابراین K_1 و K_2 برای اطمینان از پایداری سیستم باید هم علامت باشند.

۳-۳- شرط در دسترس بودن

شرایط در دسترسی، توانایی سیستم برای رسیدن به حالت مدنظر $\psi = 0$ است. پژوهش انجام شده در [H. Sira-Ramirez1987] نشان می‌دهد یک سیستم که وضعیت کنترل معادل آن برآورده شده، شرایط در دسترسی آن نیز برآورده شده است. این کار همچنین نشان می‌دهد علامت شرط ترانسورسالیته مقدار u را برای هر شرایط در دسترسی تحمیل می‌کند. با توجه به محدودیت‌های اجرایی، طراحی ارائه شده از کنترل مد لغزشی به یک مقدار منفی برای پارامتر K_2 نیاز دارد؛ از این رو، شرایط ترانسورسالیته در رابطه (۱۶) مثبت است که تحمیل شرایط در دسترسی در روابط (۲۱) و (۲۲)

می‌کند حضور متغیر u در مشتق تابع سوئیچینگ [S. Tan et al 2013] برای تغییر و تعیین دینامیک سیستم لازم است.

۳-۱- شرط ترانسورسالیته

شرط ترانسورسالیته بیان شده در رابطه (۱۲) تضمین می‌کند حضور متغیر u در مشتق تابع سوئیچینگ [S. Tan et al 2013] برای تغییر و تعیین دینامیک سیستم لازم است.

$$\frac{d\psi}{du} \neq 0 \quad (12)$$

به منظور بررسی شرایط رابطه (۱۲)، مشتق زمانی تابع ψ در رابطه (۱۳) به دست آمده و مشتق جریان فتولتائیک در (۱۴) داده شده که در آن $Y = -I_R \cdot \alpha \cdot e^{\alpha \cdot v_{pv}}$ است.

$$\frac{d\psi}{dt} = K_1 \cdot \left(\frac{dv_{pv}}{dt} - \frac{dv_{ref}}{dt} \right) + K_2 \cdot \left(\frac{di_{pv}}{dt} - \frac{di_L}{dt} \right) \quad (13)$$

$$\frac{di_{pv}}{dt} = \frac{di_{sc}}{dt} + Y \cdot \frac{dv_{pv}}{dt} \quad (14)$$

با جایگزینی رابطه (۱۱) و (۱۴) در رابطه (۱۳)، معادله (۱۵) به دست می‌آید:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{dv_{pv}}{dt} \cdot (K_1 + K_2 \cdot \frac{di_{pv}}{dv_{pv}}) - K_1 \cdot \frac{dv_{ref}}{dt} + K_2 \cdot \frac{di_{sc}}{dt} - K_2 \cdot \left(\frac{v_{pv} - v_b \cdot (1-u)}{L} \right) \quad (15)$$

شرط ترانسورسالیته با ساده‌سازی رابطه (۱۵) به دست می‌آید. ملاحظه می‌شود اگر $K_2 \neq 0$ باشد، این شرط برقرار خواهد بود.

$$\frac{d\psi}{du} = -\frac{K_2 \cdot v_b}{L} \neq 0 \quad (16)$$

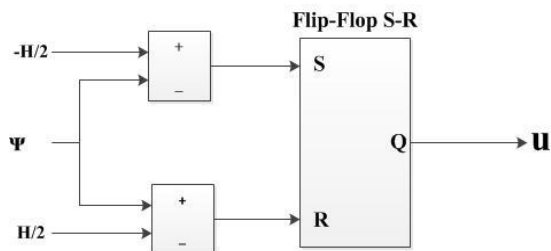
۳-۲- شرط کنترل معادل

گام بعدی در تجزیه و تحلیل بررسی شرط کنترل معادل است که در آن u_{eq} (مقدار متوسط متغیر کنترلی u) باید در محدوده عملیاتی متغیر کنترل محدود شود که آن

سیستم‌های خورشیدی کنترل‌شونده با مد لغزشی برای کار در نقطه توان ماکزیمم با استفاده از مبدل چوک

$$\psi \leq -\frac{H}{2} \rightarrow u = 1 \wedge \psi \geq \frac{H}{2} \rightarrow u = 0 \quad (25)$$

درواقع هدف طراحی روشی است که در آن جریان مطلوبی به صورت i_{Cin} وجود دارد و برای رسیدن به این جریان لازم است با مقدار $\Delta V_{MPPT} = (v_{PV} - v_{ref})$ مقایسه شود.



شکل (۸): مدار کنترل جریان

اثر خازن و سلف ورودی مبدل چوک (به‌عنوان فیلتر مرجع) در زمان استقرار سیستم باید در نظر گرفته شود. در غیر این صورت، زمان استقرار ولتاژ فتوولتائیک پذیرفته نخواهد بود. علاوه بر این، ولتاژ فتوولتائیک می‌تواند فراجھشی را نشان دهد که باعث کاهش تولید برق می‌شود. در مقابل، پارامتر K_1 برای رسیدن به زمان استقرار t_s مدنظر از ولتاژ فتوولتائیک اعمال و با الگوریتم آشوب و مشاهده طراحی شده است.

رفتار مد لغزشی شرح داده شده در روابط (۸) و (۲۰)، تضمین می‌کند در حالت پایدار $v_{PV} = v_{ref}$ است؛ از این رو با توجه به محدوده هیستریزس $-\frac{H}{2} < \psi < \frac{H}{2}$ داریم:

$$-\frac{H}{2} < i_{Cin} \cdot K_2 < \frac{H}{2}$$

این عبارت با استفاده از بانده هیستریزس H از سطح لغزش و با مقادیر حداقل و حداکثر جریان حالت پایدار در خازن ورودی محاسبه می‌شود که مربوط به جریان ریپل Δi_{Cin} است و در رابطه (۲۶) داده شده است.

$$|K_2| = \frac{H}{\Delta i_{Cin}} \quad (26)$$

علاوه بر این، Δi_{Cin} باید برای تضمین حالت انتقال پیوسته و برای جلوگیری از ریپل زیاد در ولتاژ PV طراحی شود. علاوه بر این، با توجه به رابطه (۲۶)، Δi_{Cin} باید در

ارائه شده است که عمل کنترل $u = 1$ برای $\psi < 0$ و $u = 0$ برای $\psi > 0$ اجرا می‌شود.

$$\lim_{\psi \rightarrow 0^+} \frac{d\psi}{dt} \Big|_{u=0} = \frac{d\psi}{dt} \Big|_{u=0, \psi=0} < 0 \quad (21)$$

$$\lim_{\psi \rightarrow 0^-} \frac{d\psi}{dt} \Big|_{u=1} = \frac{d\psi}{dt} \Big|_{u=1, \psi=0} > 0 \quad (22)$$

سپس، شرایط در دسترسی با جایگزینی رابطه (۱۵) در روابط (۲۱) و (۲۲)، و با ترکیب روابط (۲۳) و (۲۴) محاسبه می‌شود. با جایگزین کردن رابطه (۱۹) در روابط (۲۳) و (۲۴)، همان نامعادله داده شده در روابط (۲۱) و (۲۲) به دست آمده است؛ بنابراین، می‌توان اطمینان حاصل کرد در محدوده دینامیکی داده شده نیز شرایط در دسترسی به انجام برسد.

$$\lim_{\psi \rightarrow 0^+} \frac{d\psi}{dt} = \frac{v_{PV}}{dt} \cdot (K_1 + K_2 \cdot Y) - K_1 \cdot \frac{dv_{ref}}{dt} + K_2 \cdot \frac{di_{SC}}{dt} - K_2 \cdot \left(\frac{v_{PV}}{L}\right) > 0 \quad (23)$$

$$\lim_{\psi \rightarrow 0^-} \frac{d\psi}{dt} = \frac{v_{PV}}{dt} \cdot (K_1 + K_2 \cdot Y) - K_1 \cdot \frac{dv_{ref}}{dt} + K_2 \cdot \frac{di_{SC}}{dt} - K_2 \cdot \left(\frac{v_{PV} - v_b}{L}\right) < 0 \quad (24)$$

۳-۴- اجرای کنترل کننده و محاسبات پارامتری

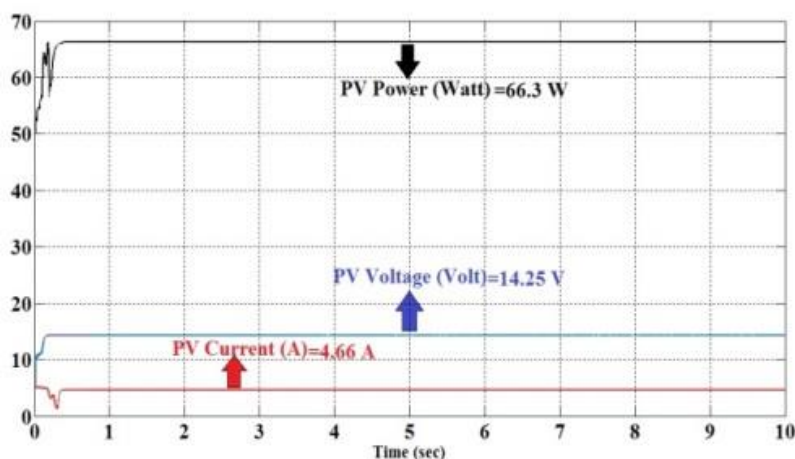
در این روش از مقایسه هیستریزس برای اجرای SMC استفاده می‌شود که روش معمول برای کنترل مبدل‌های DC-DC است. علاوه بر این، بانده هیستریزس H برای محدود کردن فرکانس سوئیچینگ، باید به سطح لغزش اضافه شود؛ از این رو سطح در داخل $-\frac{H}{2} < \psi < \frac{H}{2}$ محدود می‌شود. در چنین شرایطی، نامعادلات (۲۱) و (۲۲) طبق رابطه (۲۵) استخراج می‌شوند که طرح الکتریکی آن در شکل ۸ ارائه شده است. شرایط برای u در رابطه (۲۵) براساس علامت مثبت شرط ترانسورسالیته داده شده در رابطه (۱۶) تعریف شده است که نیاز به یک مقدار منفی برای K_2 ، و یک مقدار منفی برای K_1 دارد. پذیرش مقادیر مثبت برای K_1 و K_2 به اجرای اضافی مداری نیاز دارد.

حداکثر نقطه توان مابین ۱۶,۳۹ ولت و ۱۸,۱۳ ولت است. پارامترهای مبدل DC-DC نیز در جدول ۲ آورده شده است. نقطه کار ولتاژ PV مابین $10V \leq v_{PV} \leq 20V$ است. طراحی کنترل کننده مد لغزشی نیاز به نتایج الگوریتم آشوب و مشاهده زیر دارد: $\Delta v_{MPPT} = 2V$, $T_a = 2ms$. در شکل ۹ (الف) نتایج شبیه سازی برای ولتاژ، جریان، توان آرایه فتوولتائیک و شکل ۹ (ب) شبیه سازی ولتاژ مرجع تولید شده با الگوریتم آشوب و مشاهده را نشان داده است. ملاحظه می شود ولتاژ خروجی دقیقاً مساوی مقدار مرجع تعیین شده با واحد آشوب و مشاهده است.

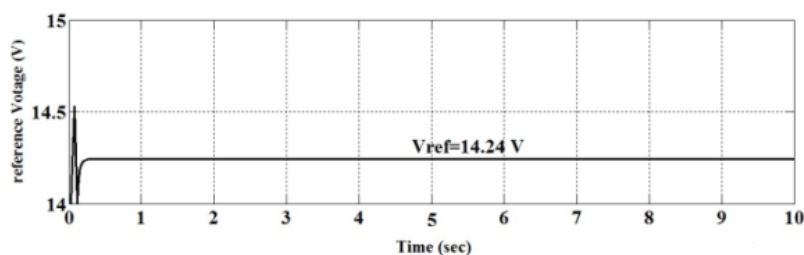
توافق با محدودیت های عملی از فرکانس سوئیچینگ تعریف شده باشد.

۴- نتایج شبیه سازی

نتایج روش پیشنهادی براساس مطالعه و طراحی کنترل مد لغزشی در سیستم فتوولتائیک در ادامه نشان داده شده است. محدوده کارکرد تابش در $100W/m^2 \leq S \leq 1000W/m^2$ با حداکثر مشتق تابش مداوم $\frac{dS}{dt} = 1kW/(m^2.s)$ فرض می شود. آرایه فتوولتائیک با پارامترهای داده شده در جدول ۱ و ولتاژ



(الف) شکل موج های ولتاژ، جریان، توان ماژول PV.



(ب) شکل موج ولتاژ مرجع تولید شده با الگوریتم P&O.

شکل (۹): نتایج شبیه سازی (الف) ولتاژ، جریان، توان ماژول PV (ب) ولتاژ مرجع تولید شده با الگوریتم P&O.

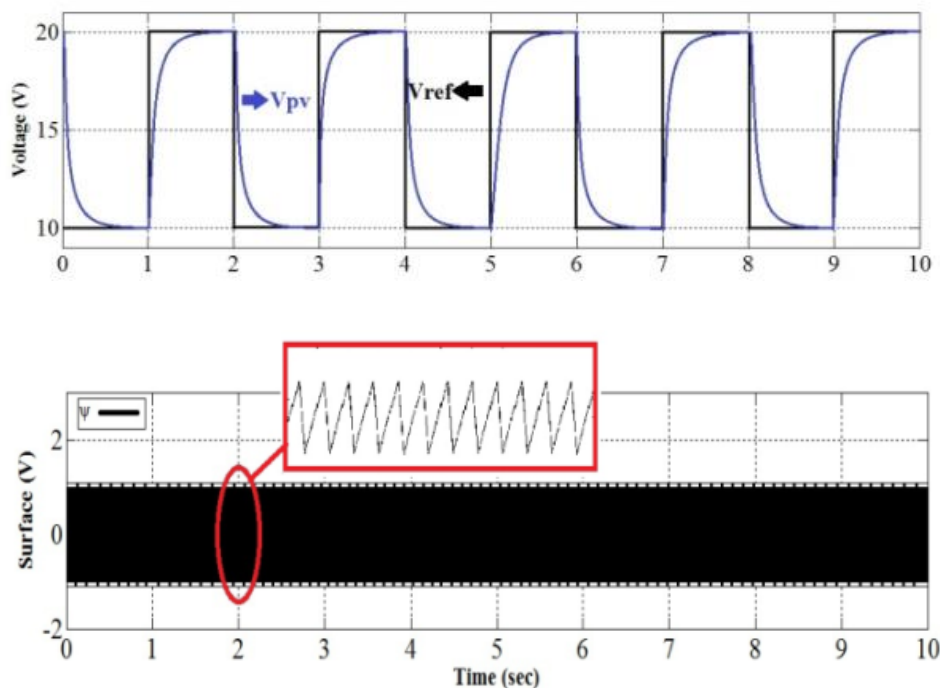
هیستریزس $H = 1.677V$ است. ریپل جریان خازن ورودی محاسبه شده از رابطه (26) در حداکثر ولتاژ بار و ولتاژ نقطه توان حداکثر برابر با $\Delta i_{Cin} = 5A$ به دست آمده است. سپس

برای اطمینان از پایداری الگوریتم آشوب و مشاهده، زمان استقرار برای ولتاژ فتوولتائیک به $t_p = 0.5ms$ محدود شده است. اجرای کنترل کننده در شکل (۷) داده شده که در آن باند

سیستم‌های خورشیدی کنترل‌شونده با مد لغزشی برای کار در نقطه توان ماکزیمم با استفاده از مبدل چوک

شکل (۱۰) شبیه‌سازی کنترل مد لغزشی به‌ازای گام بالا و گام پایین تغییرات مرجع نشان داده شده است. شبیه‌سازی ارائه‌شده در شکل (۱۰) مربوط به بلوک دیاگرام داده‌شده در شکل (۷) (الف) است. کاملاً واضح است ولتاژ آرایه فتوولتائیک به‌طور رضایت‌بخشی مرجع V_{ref} را ردیابی می‌کند؛ درحالی‌که سطح لغزش به سمت باند هیستریزس برای تمام شرایط حرکت می‌کند و حالت لغزشی را حتی در گذر از V_{ref} حفظ می‌کند و رژیم لغزشی پایداری را داراست.

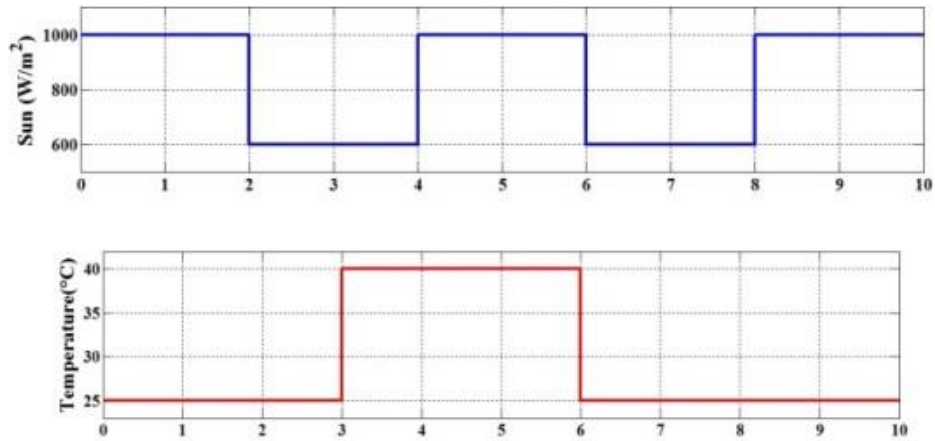
مقدار K_2 از رابطه (۲۶) محاسبه شده و $K_2 = -10$ به دست آمده است. پس از آن، سیستم معادلات تشکیل‌شده با استفاده از تابع $f_{solve}()$ نرم‌افزار MATLAB به $K_1 = -0.1$ رسیده است. با وجود کنترل‌کننده مد لغزشی طراحی‌شده برای تابش پیوسته، $\frac{dS}{dt} = 1kW/(m^2.s)$ در شرایط دینامیکی از مرجع، زمانی که سیستم در حالت پایدار است، برای مثال با مرجع ثابت، کنترل‌کننده مد لغزشی به ردیابی با تغییرات تابش بسیار سریع‌تر قادر است.



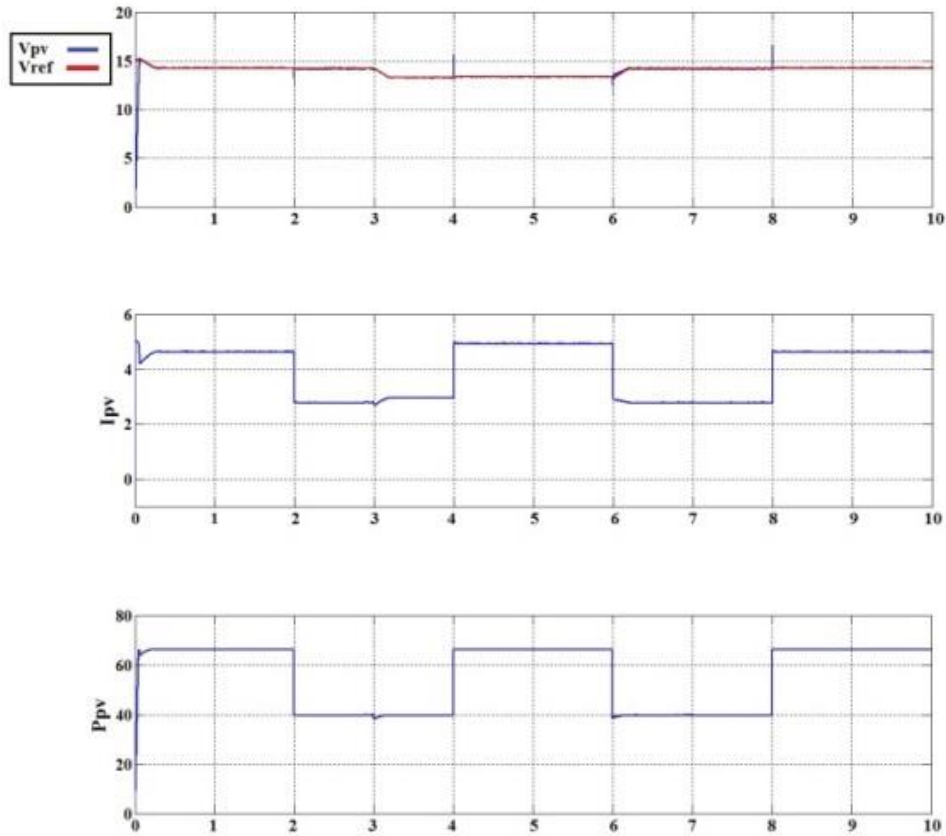
شکل (۱۰): شبیه‌سازی SMC برای مبدل چوک

ولتاژ خروجی و ولتاژ مرجع سیستم دقیقاً مساوی‌اند که کارایی کنترل‌کننده مد لغزشی را در محدوده کاری وسیع نشان می‌دهد.

در شکل (۱۱) و (۱۲)، پاسخ سیستم به‌ازای سطح تابش مختلف و در دماهای متفاوت نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود باوجود تغییرات پله‌ای و شدید در پارامترهای نامی،

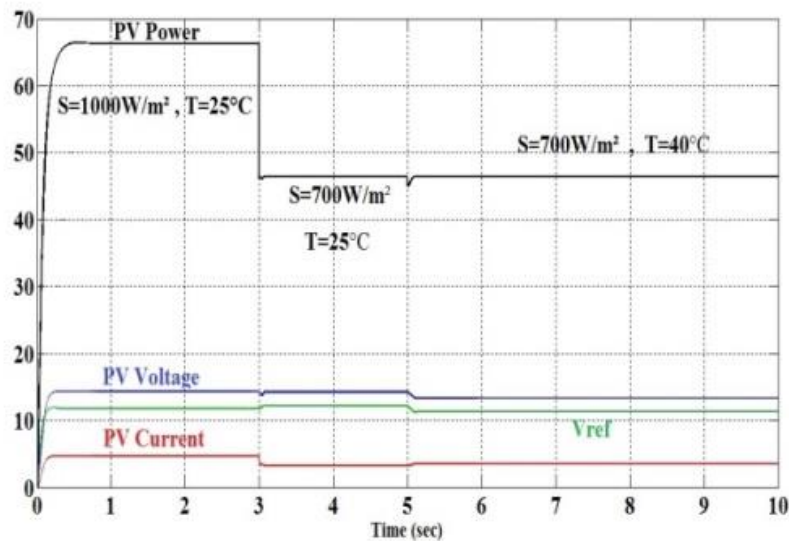


(الف) تغییرات دما (از ۲۵ درجه سانتیگراد تا ۴۰ درجه سانتیگراد در ۳ ثانیه و ۶ ثانیه) و تابش (از ۶۰۰ ولت بر مترمربع تا ۱۰۰۰ ولت بر مترمربع در ۲، ۴، ۶ و ۸ ثانیه).



(ب) تغییرات جریان، ولتاژ و توان PV به ازای تغییرات دما و تابش در قسمت (الف).

شکل (۱۱): نتایج شبیه‌سازی (الف) تغییرات دما و تابش خورشید (ب) جریان، ولتاژ و توان PV به ازای تغییرات دما و تابش

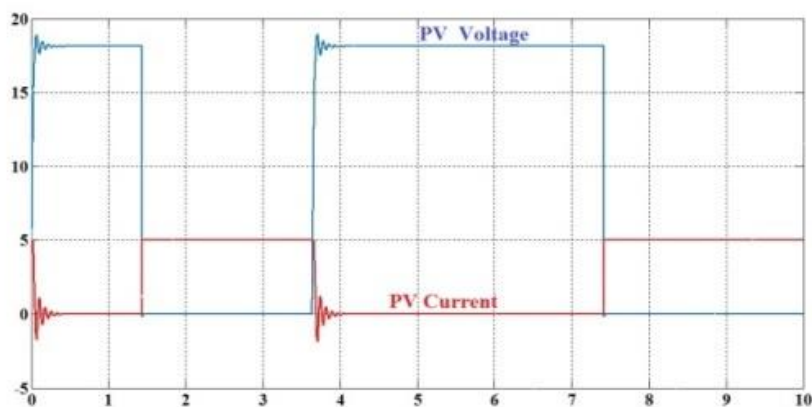


شکل (۱۲): شبیه‌سازی سیستم PV برای تغییرات در تابش و دما

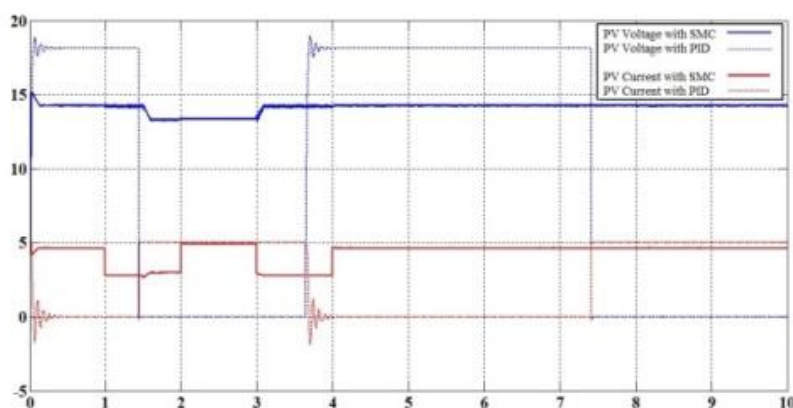
در کنترلر PID نسبت به SMC کندتر است و پایدار نیست؛ بنابراین با توجه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی طرح پیشنهادی در این مقاله کنترل‌کننده SMC کارایی بهتری نسبت به کنترلرهای کلاسیک نظیر PID دارد. در شکل (۱۴) مقایسه ولتاژ و جریان PV با استفاده از دو کنترل‌کننده SMC و PID مشاهده می‌شود.

۴-۱- مقایسه روش پیشنهادی با روشهای کلاسیک PID

با توجه به اینکه سیستم خورشیدی در شرایط تابش و دمای متفاوت کار می‌کند و اینکه ثابت نگه داشتن دما و تابش فقط حالت ایدئال است، در شکل (۱۳) شبیه‌سازی کنترل‌کننده PID برای شرایط دما و تابش متغییر ارائه شده است که نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند پاسخ حالت گذرا



شکل (۱۳): شبیه‌سازی سیستم PV برای تغییرات تابش و دما با PID



شکل (۱۴): مقایسه ولتاژ و جریان PV با استفاده از دو کنترل کننده SMC و PID

۵- نتیجه گیری

در این مقاله روشی جدید و ساده برای ردیابی نقطه توان حداکثر یک سیستم فتوولتائیک با استفاده از مبدل DC-DC چوک و براساس کنترل کننده مد لغزشی به صورت گام به گام ارائه شده است. ملاحظه می شود با تغییر در شرایط محیطی مانند تابش خورشید و یا درجه حرارت سیستم ارائه شده مقدار مرجع را ردیابی می کند. انتخاب سطح سوئیچینگ براساس ترکیب خطی از جریان خازن ورودی و خطای ولتاژ PV، به صورت حلقه کنترل واحد ارائه شده است. این رویکرد از دیگر راه حل های مشابه که قبلاً گزارش شده، متفاوت است و نیازی به کنترل کننده متوالی براساس حلقه های کنترل جریان داخلی و حلقه های ولتاژ ندارد. مهم ترین مزیت مبدل Cuk برای ردیابی نقطه توان ماکزیمم، که در این پروژه استفاده شده، کوچک بودن ریپل جریان های ورودی - خروجی مربوطه و نیازنداشتن به فیلتر است که با حذف فیلتر ورودی از سیستم هزینه های ساخت مداری، کاهش و حجم مداری سیستم نیز کاهش می یابد. پارامترهای کنترل کننده با حل مجموعه معادلات غیرخطی به دست آمده و محدودیت های لازم برای نگهداری آن در رژیم لغزشی آرایه فتوولتائیک و نقطه کار مبدل DC-DC محاسبه شده است.

منابع

- [1] R. Noorian , H. Mohammadi, Effective combined operation of an independent DC network and PV systems for feeding unbalanced AC loads, Computational Intelligence in Electrical, Vol. 7, No. 2, Summer 2016.
- [2] H. Ijadadi and A. Hajizadeh , "Maximum power tracking in the solar power generation system based on the fuzzy approximation of the point of operation voltage with radiation intensity" Computational Intelligence in Electrical, Vol. 3, No. 2, summer 2012.
- [3] F. HajiMohammadi ,B. Fani and M. Moazami, "A New Fuzzy-Risk-Intelligent Coordination Method in Distribution Systems with High Penetration Factor for Photovoltaic Systems", Computational Intelligence in Electrical, Vol. 9, No. 1, Spring 2018.
- [4] A. Salimi ,N. Gaffarzadeh, "A new method for controlling the combined system of solar cells and battery connected to a power grid with a predictive controller", Computational Intelligence in Electrical, Vol. 7, No. 2, summer 2016.
- [5] D. Gonzalez Montoya, C. Andres Ramos-Paja, Roberto Giral, "Improved design of sliding mode controllers based on the requirements of MPPT techniques", IEEE Transactions On Power Electronics, January, 2015.
- [6] S. Kim, M. Bok Kim, M . Joong Youn, " New Maximum Power Point Tracker Using Sliding-Mode Observer for Estimation of Solar Array Current in the Grid-Connected Photovoltaic System", IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 53, No. 4, August 2006.
- [7] Emilio Mamarelis, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, " A two-steps algorithm improving the P&O steady state MPPT efficiency", Applied Energy, 113, 414-421, 2014.
- [8] Fan Zhang, Jon Maddy, Giuliano Premier, Alan Guwy, "Novel current sensing photovoltaic maximum power point tracking based on sliding

- Mathematics and computers in simulation, Vol. 91, pp. 193-210, 2013.
- [18] D.G.Montoya, C.A. Ramos Paja, G.Petrone, "Design method of the perturb and observe controller parameters for photovoltaic applications", Circuits and systems (CWCAS), IEEE 4th Colombian Workshop on, 2012.
- [19] H. Sira-Ramirez, "Sliding motions in bilinear switched networks.," IEEE transactions on circuits and systems, Vol. CAS-34, No. 8, pp. 919-933, 1987.
- [20] S. Tan, Y. M. Lai, and C. K. Tse, "General design issues of sliding-mode controllers in dc-dc converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 3, pp. 1160-1174, 2008.
- [21] B.Taheri, M. Sedaghat, "A new general controller for DC-DC converters based on SMC methods.," 2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG), 25-26 April 2018, IEEE.
- [22] F.ValenciagaF.A.Inthamoussou, "A novel PV-MPPT method based on a second order sliding mode gradient observer.," Energy Conversion and Management Vol. 176, No. 15, pp. 422-430, 2018.
- [23] B. Taheri, M. Sedaghat, M. Bagherpour, P. Farhadi, "A New Controller for DC-DC Converters Based on Sliding Mode Control Techniques.," Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2018.
- [24] A. Siadatan, N. Fatahi, M. Sedaghat, "Optimum Designed Multilayer Switched Reluctance Motors for use in Electric Vehicles to Increase Efficiency.," 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), mode control strategy", Solar Energy, 118, 80-86, 2015.
- [9] Fangrui Liu, Shanxu Duan, Fei Liu, Bangyin Liu, Yong Kang, "A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems", IEEE Travs. Electron, Vol. 55, Jul. 2008
- [10] S.Yuvarajan, S.Xu, "Photo-voltaic power converter with a simple maximum power point tracker," in Proc. 2003 Int. Symp. Circuits Syst., pp. 399-402, 2003.
- [11] Ahmad.J, "A fractional open circuit voltage based maximum power point tracker for photovoltaic arrays". IEEE International Conference on Software Technology and Engineering", pp. 247-250, 2010.
- [12] Vladimir V.R.Scarpa, Simone Buso, Giorgio Spiazzi, "Low-Complexity MPPT Technique Exploiting the PV Module MPP Locus Characterization", IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 56, pp. 1531-1538, May 2009.
- [13] Alessandro Costabeber, Matteo Carraro, Mauro Zigliotto, "Convergence Analysis and Tuning of a Sliding-Mode Ripple-Correlation Mppt", Ieee Transactions On Energy Conversion, 2014.
- [14] S. Lalounia & D. Rekiouaa & T. Rekiouaa & E. Matagne, "Fuzzy logic control of standalone photovoltaic system with battery storage", Journal of Power Sources, Vol. 193, pp.899-907, 2009.
- [15] Il-Song Kim, "Sliding mode controller for the single-phase grid-connected photovoltaic system", Applied Energy, Vol. 83, pp. 1101-1115, 2006.
- [16] Vadim Utkin, "Sliding mode control of DC/DC converters", Journal of franklin institute, 350, 2146-2165, 2010
- [17] H.El Fadil, F.Giri, Josep M.Goerrero, "Adaptive sliding mode control of interleaved parallel boost converter for fuel cell energy generation system",