

طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی فازی برای تعقیب نقطه‌ی حداکثر توان در سیستم فتوولتائیک

فاطمه جمشیدی*، رضا یزدانی

گروه مهندسی برق، دانشگاه فسا

گروه مهندسی برق و کنترل، موسسه آموزش عالی پاسارگاد

چکیده

تعقیب نقطه‌ی حداکثر توان (MPP) در صفحات خورشیدی برای بهبود بهره‌برداری از انرژی خورشیدی به‌عنوان یک منبع انرژی نو و پاک، مورد توجه محققان است. سیستم PV این مقاله شامل صفحه‌ی PV، مبدل DC/DC بوست و مقاومت بار است. ایده کنترل تعقیب MPP، (MPPT) کنترل‌کننده مود لغزشی بازگشتی به عقب بر مبنای روش دو حلقه‌ی است: حلقه اول برای جستجوی MPP و حلقه دوم برای تعقیب آن. با صفر کردن مشتق توان سیستم PV نسبت به جریان آن، MPP یافت گردید و ولتاژ در MPP (ولتاژ مرجع)، بدست آمد. عملکرد این کنترل‌کننده با استفاده از منطق فازی بهبود می‌یابد. از آنجاکه MPP با تغییر دما و تابش خورشید تغییر می‌کنند، عملکرد طرح کنترل پیشنهادی برای تغییر دما و تابش خورشید بررسی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مؤثر روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۱ مقدمه

به‌دلیل افزایش نیاز جهانی به انرژی، مسائل زیست محیطی، آلودگی هوا در اثر مصرف سوخت‌های فسیلی و رو به اتمام بودن آنها، منابع تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. انرژی

Mathematics Subject Classification (2010): 62A86 , **Email:** jamshidi@fasau.ac.ir.

عبارات و کلمات کلیدی: تعقیب نقطه‌ی حداکثر توان، (MPPT) سیستم فتوولتائیک، (PV) کنترل مود لغزشی بازگشتی به عقب، (BSMC) منطق فازی

طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی فازی برای تعقیب نقطه‌ی حداکثر توان در سیستم فتولتائیک ۱۶۴

خورشیدی مطمئن، پاک، نامحدود و منبع تمام انرژی‌های زمین است. [۱]. سلول‌های خورشیدی فتولتائیک^۱ (PV)، تجهیزات نیمه هادی برای تبدیل نور خورشید به انرژی الکتریکی است. ارائه روش‌هایی برای افزایش بازده تبدیل انرژی در سلول‌های خورشیدی از جمله تعقیب نقطه‌ی حداکثر توان^۲ (MPP) مورد توجه است. دسته‌ی از طرح‌های کنترلی بر پایه طراحی دو حلقه هستند: حلقه جستجوی MPP و حلقه تعقیب MPP.

متداول‌ترین الگوریتم‌های MPPT عبارتند از: روش اغتشاش و مشاهده^۳ (PO) [۲]، هدایت افزایشی^۴ (INC) [۳] - [۴]، روش‌های هوشمند مانند روش تپه‌نوردی [۵] (HC)^۵، شبکه عصبی [۶]، سیستم فازی [۷]، ترکیب سیستم فازی و شبه عصبی [۸] - [۹]، کنترل مود لغزشی^۶ (SMC) [۱۰] - [۱۱]. در همه‌ی این روش‌ها، دائما سیستم در حالتی تنظیم می‌شود که بیشترین توان را مستقل از شرایط محیطی یا شرایط بار در اختیار قرار دهد. در روش PO مقدار ولتاژ صفحه خورشیدی تغییر داده می‌شود. اگر توان خروجی نسبت به حالت قبلی افزایش یافت، تغییر ولتاژ در همان جهت ادامه می‌یابد تا جایی که توان خروجی ثابت شود. در غیر این صورت مقدار ولتاژ صفحه خورشیدی در جهت مخالف تغییر داده می‌شود. پیاده‌سازی روش PO ساده است اما عملکرد آن به اندازه‌ی اغتشاش بستگی دارد. این موجب نوسان حول MPP و افزایش تلفات و افزایش احتمال جهت‌گیری اشتباه موقع تغییر ناگهانی دما و یا تابش خورشید می‌شود. در روش INC، محاسبه‌ی مشتق توان PV نسبت به ولتاژ آن (V_{PV})، MPP یافت می‌شود. پیاده‌سازی روش‌های هوشمند پیچیده و پرهزینه است. کنترل‌کننده‌های خطی مانند PI با توجه به سادگی پیاده‌سازی به‌طور گسترده استفاده شده‌اند. روش‌های خطی معمولا حول یک نقطه تعادل پیاده‌سازی می‌شوند. از آنجا که نقاط کار سیستم‌های PV به میزان تابش، دما و مقدار بار وابسته است، این کنترل‌کننده‌ها در برابر این تغییرات مقاوم نیستند. در [۱۲]، با استفاده از سیستم فازی پارامترهای PI به‌صورت برخط تنظیم شده است. پارامترهای این کنترل‌کننده با

¹Photovoltaic

²Maximum Power Point (MPP) Tracking (MPPT)

³Perturb Observe

⁴Incremental Conductance

⁵Hill Climbing

⁶Sliding Mode Control

الگوریتم بهینه‌یابی ازدحام ذرات^۷ (PSO) بهینه شده است. خطی‌سازی ورودی- خروجی^۸ [۱۳] و خطی‌سازی فیدبک^۹ [۱۴] از دیگر روش‌های پیشنهادی هستند که یک رابطه خطی میان ورودی و خروجی سیستم PV می‌یابند، علیرغم تضمین پایداری مطلق، عیب اصلی این روش حذف دینامیک غیرخطی سیستم است که به مدل دقیق سیستم نیاز دارد که در عمل غیرممکن است. یکی از روش‌های مقاوم در برابر نامعینی‌های سیستم و اغتشاشات که به‌طورگسترده برای سیستم‌های غیرخطی استفاده می‌شود، SMC است. عیب اصلی آن پدیده وزوز^{۱۰} است که به دلیل وجود تابع ناپیوسته‌ی علامت در سیگنال کنترل است. وزوز باعث فعالیت زیاد کنترلی شده و می‌تواند دینامیک‌های مدل‌نشده سیستم را تحریک نماید. برخی روش‌های پیشنهادی برای کاهش وزوز در سیستم PV، استفاده از کنترل مود لغزشی مرتبه بالا است [۱۵] و [۱۶]. پیچیدگی این روش زیاد است. روش دیگر، تقریب پیوسته قانون کنترل سوئیچینگ با تابع اشباع است. در [۱۷]، یک روش برای غلبه بر وزوز، حول لایه‌مرزی سطح لغزش به‌کار رفت که میان عملکردکنترل‌کننده و حذف وزوز مصالحه برقرار می‌کرد، اما در حضور نامعینی و اغتشاشات خطای تعقیب را زیاد می‌کرد. در این مقاله یک کنترل‌کننده مود لغزشی فازی برای تعقیب MPP در سیستم PV طراحی می‌شود. سیستم موردنظر متشکل از صفحه‌ی PV، مبدل DC/DC بوست و مقاومت بار است. کنترل‌کننده پیشنهادی کنترل‌کننده مود لغزشی بازگشتی به عقب است. برای بهبود کارایی این کنترل‌کننده منطق فازی به‌کار می‌رود. روش کنترل دو حلقه‌ی استفاده می‌گردد که حلقه اول برای جستجوی MPP و حلقه دوم برای تعقیب MPP است. برای یافتن MPP از توان سیستم PV نسبت به جریان آن مشتق گرفته و برابر صفر قرار داده می‌شود. از آنجا که MPP با تغییر دما و میزان تابش خورشید عوض می‌شود، عملکرد سیستم PV با اعمال کنترل‌کننده پیشنهادی تحت سناریوهای مختلف دما و تابش ارزیابی می‌گردد. در ادامه در بخش دوم، ساختار سلول خورشیدی و مدل ریاضی آن، روش جستجوی MPP برای محاسبه‌ی ولتاژ در MPP (ولتاژ مرجع)، بیان می‌شوند. در بخش سوم، کنترل‌کننده مود لغزشی بازگشتی به عقب فازی و الگوریتم ازدحام ذرات

⁷ Particle Swarm Optimization

⁸ Input- Output Linearization

⁹ Feedback Linearization

¹⁰ Chattering

طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی فازی برای تعقیب نقطه‌ی حداکثر توان در سیستم فتوولتائیک ۱۶۶

معرفی می‌شوند. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای تغییرات دما و تابش خورشید ارائه می‌گردد. در بخش پنجم نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

۲ توصیف سیستم فتوولتائیک

سیستم آزمون این مقاله شامل سیستم PV، مبدل DC/DC بوست و بار مقاومتی است. سلول PV با ولتاژی حدود نیم ولت، قطعه‌یی متشکل از نیمه‌هادی‌هاست که انرژی خورشیدی را به صورت مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. برای دستیابی به ولتاژ بیشتر ترکیب سری سلول‌ها، ماژول، به کار می‌رود. ترکیب سری ماژول‌های خورشیدی، پنل (صفحه) خورشیدی نام دارد. برای دستیابی به سطح جریان بالا، باید پنل‌ها را با هم موازی نمود. ترکیب موازی رشته‌ها، آرایه خورشیدی نامیده می‌شود (شکل ۱).

شکل ۱: سلول، ماژول، پنل (صفحه) و آرایه خورشیدی

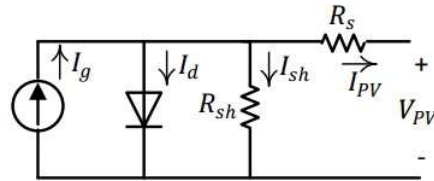


جریان و ولتاژ خروجی سلول‌های DC PV است و مقدار کم آن از مدل سلول بدست می‌آید. مدل تک دیودی استاندارد سلول PV در شکل ۲ آمده است. با صرف نظر از مقاومت بسیار کوچک سری R_S و مقاومت بسیار بزرگ شنت R_{sh} ، رابطه ریاضی آن برابر است با:

$$I_{PV} = N_p \left[I_g - I_{sat} \left(e^{\left(\frac{V_{PV}}{N_s V_t} \right)} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

که V_{PV} ولتاژ خروجی پنل PV و I_{PV} جریان خروجی پنل PV، N_S تعداد سلول‌های سری و N_P ، تعداد سلول‌های موازی در پنل PV است.

شکل ۲: مدل استاندارد سلول PV



I_g ، جریان تولید شده توسط PV از طریق نور تابش خورشید مطابق رابطه زیر است:

$$I_g = \frac{G}{1000} [I_{sc} + K_I (T - T_r)] \quad (2)$$

که G میزان تابش خورشید، I_{sc} ، جریان اتصال کوتاه در شرایط استاندارد، K_I ، ضریب دمای اتصال کوتاه و T ، دمای اتصالات دیود، T_r ، دمای استاندارد است. I_{sat} ، جریان اشباع معکوس یا جریان نشستی در دیود و $I_{sat,ref}$ ، جریان اشباع معکوس مرجع مطابق رابطه زیر است:

$$I_{sat} = \frac{I_{sc}}{\left(e^{\left(\frac{V_{OC}}{N_s V_t} \right)} - 1 \right)} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 e^{\left(\frac{q E_g}{A K_B} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right)}, \quad (3)$$

$$I_{sat,ref} = \frac{I_{sc}}{\left(e^{\left(\frac{V_{OC}}{V_t} \right)} - 1 \right)} \quad (4)$$

که $q = 1.60217646 \times 10^{-19}$ بار الکترون بر حسب کولن و $E_g = 1.1 eV$ ، ثابت انرژی فوتون (انرژی باند-گراف) و V_{oc} ، ولتاژ مدار باز است. V_t ، ولتاژ حرارتی مطابق رابطه زیر و در دمایی $27^\circ C$ برابر $26 mV$ است.

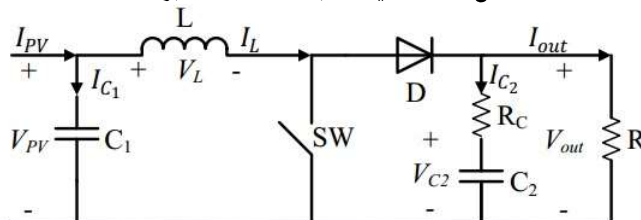
$$V_t = \frac{A K_B T}{q} \quad (5)$$

که $K_B = 1.3806503 \times 10^{-16}$ ، ثابت بولتزمن، A ، ضریب ایده‌آل اتصال p-n است. ولتاژ خروجی آرایه‌های PV نسبتاً پایین است، از این رو با به‌کارگیری مبدل DC/DC افزایشدهنده با

طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی فازی برای تعقیب نقطه‌ی حداکثر توان در سیستم فتوولتائیک ۱۶۸

راندمان بالا، ولتاژ پایین آرایه به ولتاژ بالایی رسانده می‌شود. مبدل DC/DC بوست مطابق شکل ۳، برپایه‌ی کلیدزنی سطح ولتاژ DC را تغییر می‌دهد [۱۸] و مدل ریاضی آن مطابق زیر است:

شکل ۳: شماتیک مبدل DC/DC بوست



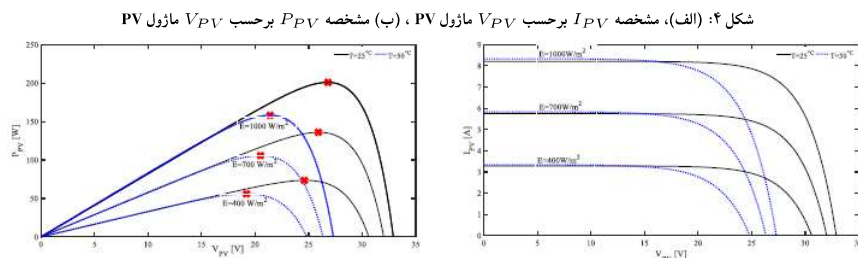
$$\begin{cases} \frac{dV_{PV}}{dt} = \frac{1}{C_1} \left(\frac{V_{PV}}{r_{in}} - I_L \right) \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} \left(V_{PV} - \bar{d}V_D - \bar{d} \frac{R_C R}{R_C + R} I_L - \bar{d}V_{C_2} \left(1 - \frac{R_C}{R_C + R} \right) \right) \\ \frac{dV_{C_2}}{dt} = \frac{1}{C_2} \left(\bar{d} \frac{R}{R_C + R} I_L - \frac{1}{R_C + R} V_{C_2} \right) \end{cases}$$

که V_D ، ولتاژ اتصال مستقیم دیود، d نسبت دیوتی^{۱۱} و سیگنال کنترلی u برای کنترل SW و $r_{in} = -\frac{\partial V_{PV}}{\partial I_{PV}}$ و $\bar{d} = 1 - d$ مقاومت دینامیکی خروجی سیستم PV است.

۱.۲ جستجوی نقطه‌ی حداکثر توان (MPP)

در سلول خورشیدی رابطه‌ی جریان و ولتاژ غیرخطی است. منحنی مشخصه جریان برحسب ولتاژ در شکل ۴ (الف) و توان برحسب ولتاژ سلول PV در شکل ۴ (ب) نشان داده شده است. MPP سلول با عوامل محیطی مثل تابش نور خورشید و دمای محیط اطراف سلول عوض می‌شود. در این شکل نقاط MPP با ضربدر مشخص شده‌اند.

^{۱۱}Duty ratio



در اینجا ولتاژ سیستم PV در MPP ولتاژ مرجع، V_{ref} ، و جریان سیستم PV در MPP جریان مرجع، I_{ref} ، نامیده می‌شود. هدف آن است که نقطه کار سیستم PV نزدیک ولتاژ مرجع V_{ref} باشد. در برخی مراجع مانند [۱۹]، ولتاژ مرجع V_{ref} با برابر صفر قرار دادن مشتق توان سیستم PV نسبت به جریان آن مطابق زیر تعیین می‌شود:

$$V_{ref} = V_t \ln \left(\frac{I_g - I_{ref} + I_{sat}}{I_{sat}} \right), \quad I_{ref} = 0.9 I_g$$

۳ طراحی کنترل کننده

هدف از طراحی کنترل کننده، تنظیم ولتاژ PV، V_{PV} ، برای تعقیب ولتاژ مرجع، V_{ref} ، تحت اغتشاش‌ها و نامعینی‌ها با تنظیم دیوتی سایکل، d ، بر روی مبدل DC/DC بوست است به‌گونه‌ای که حداکثر توان از سیستم PV استخراج شود.

در [۱۹]، برای کنترل MPPT سریع و موثر سیستم PV، کنترل کننده مود لغزشی بازگشتی به عقب^{۱۲} (BSMC) به عقب ارائه شد. طرح کنترل پیشنهادی شامل دو حلقه است. حلقه اول ولتاژ بیشینه توان را تقریب می‌زند که مقدار مرجع حلقه دوم است. این طرح کنترلی با تنظیم دیوتی سایکل، سیستم PV را وادار می‌کند تا خیلی نزدیک به MPP کار کند. این کنترل کننده با شبیه‌سازی ارزیابی شد. با تعریف خطای تعقیب ولتاژ، $e_v = V_{PV} - V_{ref}$ و متغیر خطای

¹² Backstepping Sliding Mode Control

طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی فازی برای تعقیب نقطه‌ی حداکثر توان در سیستم فتوولتائیک ۱۷۰

تعقیب کمکی، e_2 ، به شکل زیر:

$$e_2 = \dot{e}_1 + K_1 e_1$$

سطح لغزش، S ، مطابق زیر تعریف شد:

$$S = K_2 e_2 - e_1$$

با اعمال ورودی کنترلی $d(t)$ به شکل زیر:

$$d(t) = u_{eq}(t) + u_{co}(t)$$

$$u_{eq}(t) = \frac{1}{g_1(x)} \left[-f_1(x) - C_1 K_2 \dot{e}_1 + \dot{I}_{PV} - C_1 \dot{V}_{ref} + C_1 K_1 \dot{e}_1 \right]$$

$$u_{co}(t) = \frac{-C_1 h(S + \beta \operatorname{sgn}(S))}{g_1(x)}$$

دینامیک زیر به سطح لغزش اعمال گردید:

$$\dot{S} = -h(S + \beta \operatorname{sgn}(S))$$

پایداری مجانبی سطح لغزش و همگرایی سیستم حلقه بسته با انتخاب تابع لیاپانوف، V_{lyp} ، مطابق زیر اثبات شد:

$$V_{lyp} = \frac{1}{2} (e_1^2 + S^2)$$

پارامترهای مثبت β, h, K_1, K_2 پارامترهای طراحی هستند. در این مقاله با الهام از [۲۰]، برای بهبود عملکرد کنترل‌کننده BSMC [۱۹]، خروجی سیستم فازی، جایگزین تابع ناپیوسته در رابطه‌ی (۹) می‌گردد و کنترل‌کننده حاصل Fuzzy-BSMC نامگذاری می‌شود. اولین ورودی سیستم فازی این کنترل‌کننده به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$E(k) = \frac{P_{PV}(k) - P_{PV}(k-1)}{V_{PV}(k) - V_{PV}(k-1)} = \frac{\Delta P_{PV}}{\Delta V_{PV}}$$

که ΔP_{PV} ، تغییرات توان پنل PV و ΔV_{PV} ، تغییرات ولتاژ پنل PV در دو لحظه نمونه‌برداری متوالی k و $k-1$ است. دومین ورودی سیستم فازی، تغییرات E در دو لحظه نمونه‌برداری متوالی است:

$$\Delta E = E(k) - E(k-1)$$

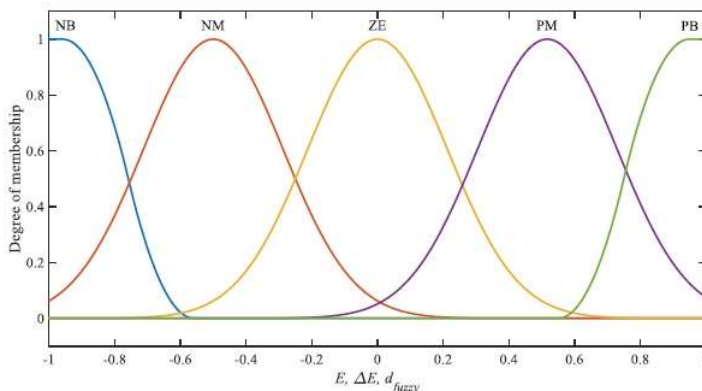
شکل (۵)، توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی سیستم فازی را نمایش می‌دهد و قواعد فازی در جدول (۱) آمده است. شکل (۶)، پیکربندی سیستم PV کنترل شده با کنترل‌کننده پیشنهادی این مقاله را نشان می‌دهد. پارامترهای مثبت r_1, r_2 و r_3 پارامترهای طراحی هستند که برای مقیاس کردن ورودی‌ها و خروجی سیستم فازی به‌کار می‌روند.

جدول ۱: قواعد سیستم فازی این مقاله

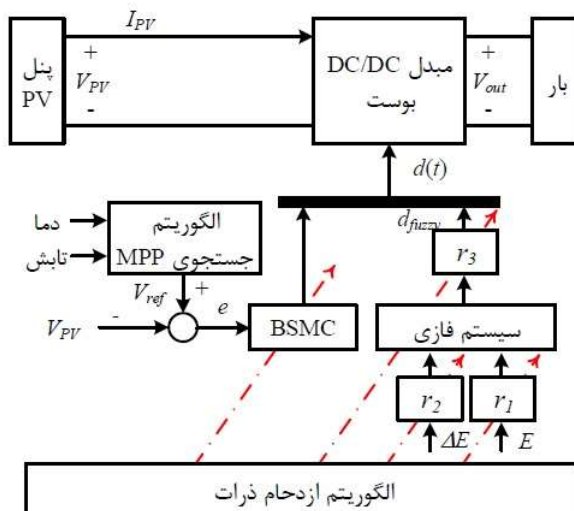
d_{fuzzy}		ΔE				
		NB	NM	ZE	PM	PB
E	NB	ZE	ZE	PM	NM	NB
	NM	ZE	ZE	ZE	NM	NB
	ZE	PB	PM	ZE	NM	NB
	PM	PB	PM	ZE	ZE	ZE
	PB	PB	PM	NM	ZE	ZE

شکل ۵: توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی سیستم فازی

طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی فاز برای تعقیب نقطه‌ی حداکثر توان در سیستم فتوولتائیک ۱۷۲



شکل ۶: پیکربندی سیستم PV با کنترل‌کننده پیشنهادی این مقاله



۴ شبیه سازی

سیستم آزمون این مقاله شامل ماژول PV، مبدل DC/DC بوست و بار مقاومتی است. مشابه [۲۱] و [۲۲]، ماژول PV در نظر گرفته شده در این مقاله، KC۲۰۰GH-۲P است که از ۵۴ سلول پلی‌کریستالین که به‌طور سری به هم متصل شده‌اند، تشکیل شده است. ویژگی‌های الکتریکی

این ماژول PV در شرایط استاندارد یعنی دما و میزان تابش خورشید () در جدول ۲ آمده است. پارامترهای مبدل DC/DC بوست و بار مقاومتی در جدول ۳ آمده است.

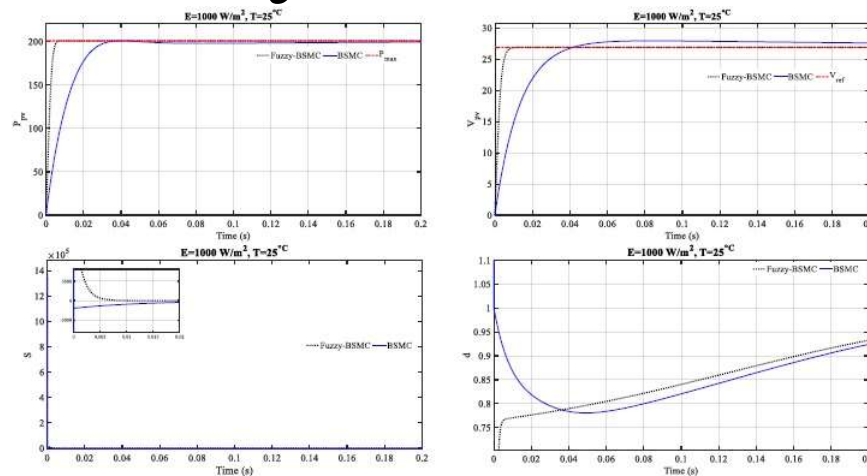
جدول ۲: مشخصات الکتریکی ماژول PV مدل ۲P-GH-۲۰۰KC در شرایط استاندارد

پارامتر	نماد	مقدار
بیشینه توان	P_{mpp}	200W
تولانس بیشینه توان		+10 / -5[%]
جریان اتصال کوتاه	I_{sc}	8.21A
ولتاژ مدار باز	V_{oc}	32.9V
ولتاژ در نقطه بیشینه توان	V_{mpp}	26.3V
جریان در نقطه بیشینه توان	I_{mpp}	7.61A
ضریب دمای جریان اتصال کوتاه	K_i	4.79mA/°C
فاکتور مشخصه اتصال P-N	A	1.8

جدول ۳: پارامترهای مبدل DC/DC بوست

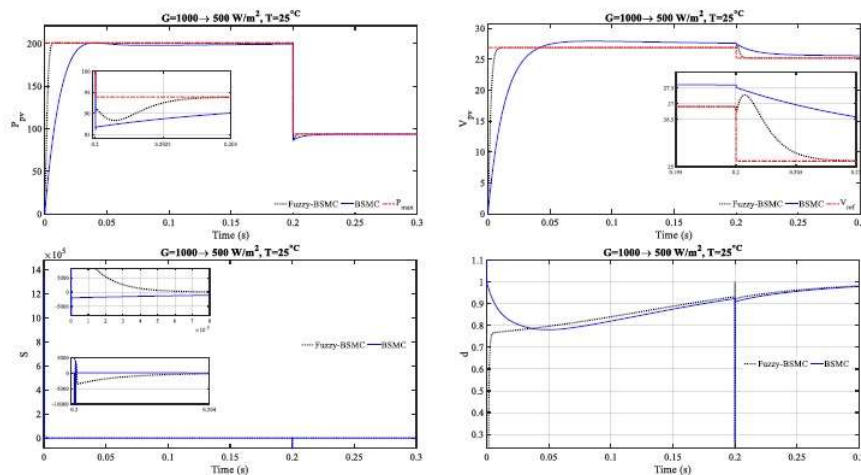
پارامتر	مقدار
L	1.2mH
C_1	1000 μ F
C_2	1000 μ F
R_C	39.6 Ω
V_D	0.82V
R	25 Ω

شکل ۷: ولتاژ و توان پنل PV، ورودی کنترلی و سطح لغزش (سناریو ۱)

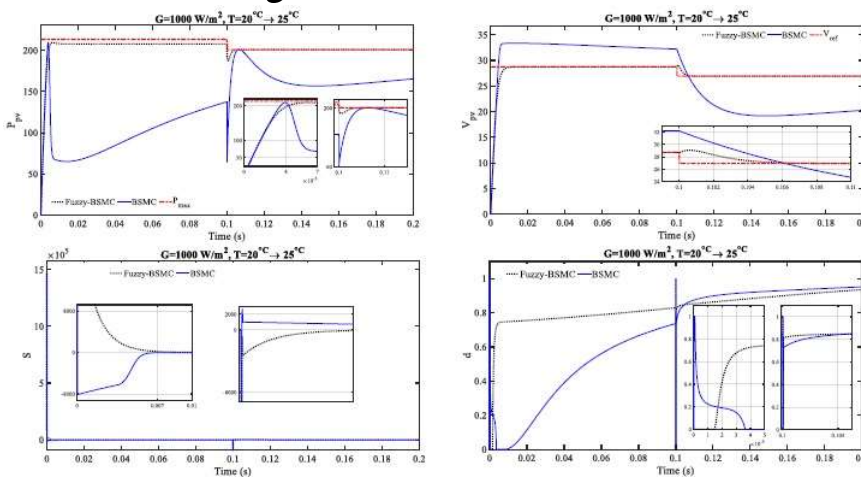


طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی فازی برای تعقیب نقطه‌ی حداکثر توان در سیستم فتوولتائیک ۱۷۴

شکل ۸: ولتاژ و توان پنل، ورودی کنترلی و سطح لغزش (سناریو ۲)



شکل ۹: ولتاژ و توان پنل، ورودی کنترلی و سطح لغزش (سناریو ۳)



نتایج شبیه‌سازی، همگرایی سریع‌تر ولتاژ PV به ولتاژ مرجع (زمان صعود کمتر)، خطای حالت ماندگار کمتر، ورودی کنترلی هموارتر و تطبیق سریع‌تر با تغییرات دما با کنترل‌کننده Fuzzy-BSMC در مقایسه با کنترل‌کننده BSMC را نشان می‌دهد.

۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله از سیستم PV نمونه شامل ماژول PV مبدل DC/DC بوسه و بار مقاومتی استفاده شد. برای تعیین MPP مشتق توان PV نسبت به جریان آن برابر صفر قرار داده شد و ولتاژ در MPP به عنوان ولتاژ مرجع انتخاب شد. کنترل‌کننده مود لغزشی بازگشتی به عقب (BSMC) طراحی گردید؛ سیستم فازی برای بهبود عملکرد آن به کار رفت. به دلیل تغییر MPP با تغییرات تابش خورشید و دما، سناریوهای مختلف تغییرات تابش خورشید و دما در نظر گرفته شد و عملکرد کنترل‌کننده طراحی شده با کنترل‌کننده BSMC مقایسه گردید. نتایج کیفی شبیه‌سازی، همگرایی سریع‌تر ولتاژ PV به ولتاژ مرجع (زمان صعود کمتر)، خطای حالت ماندگار کمتر، ورودی کنترلی هموارتر و تطبیق سریع‌تر با تغییرات دما و تابش خورشید با کنترل‌کننده Fuzzy-BSMC در مقایسه با کنترل‌کننده BSMC را نشان داد.

مراجع

- [1] Ajanovic and R. Haas, "Driving with the sun: Why environmentally benign electric vehicles must plug in at renewables," *Solar Energy*, vol. 21, pp. 169-180, 2015.
- [2] L. Piegari and R. Rizzo, "Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking," *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 4, pp. 317-328, 2010.
- [3] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu and Y. Kang, "A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 7, pp. 2622-2628, 2008.
- [4] Q. Mei, M. Shan, L. Liu and J. M. Guerrero, "A Novel Improved Variable Step-Size Incremental-Resistance MPPT Method for PV Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 6, 2011.

طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی فازی برای تعقیب نقطه‌ی حداکثر توان در سیستم فتوولتائیک ۱۷۶

- [5] 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 Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 4, pp. 1022-1030, 2011.
- [6] Y.-H. Liu, C.-L. Liu, J.-W. Huang and J.-H. Chen, "Neural-network-based maximum power point tracking methods for photovoltaic systems operating under fast changing environments," Solar Energy, vol. 89, pp. 42-53, 2013.
- [7] N. Mazouz and A. Midoun, "Control of a DC/DC converter by fuzzy controller for a solar pumping system," International Journal of Electrical Power Energy Systems, vol. 33, no. 10, pp. 1623-1630, 2011.
- [8] Syafaruddin, E. Karatepe and T. Hiyama, "Artificial neural network-polar coordinated fuzzy controller based maximum power point tracking control under partially shaded conditions," IET Renewable Power Generation, vol. 3, no. 2, pp. 239-253, 2009.
- [9] B. Salah and M. Ouali, "Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems," Electric Power Systems Research, vol. 81, no. 1, pp. 43-50, 2011.
- [10] C.-C. Chu and C.-L. Chen, "Robust maximum power point tracking method for photovoltaic cells: A sliding mode control approach," Solar Energy, vol. 83, no. 8, pp. 1370-1378, 2009.
- [11] Bianconi, J. Calvente, R. Giral, E. Mamarelis, G. Petrone, C. A. Ramos-Paja, G. Spagnuolo and M. Vitelli, "A Fast Current-Based MPPT Technique Employing

- Sliding Mode Control,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 3, pp. 1168-1178, 2013.
- [12] L. Letting, J. Munda and Y. Hamam, ”Optimization of a fuzzy logic controller for PV grid inverter control using S-function based PSO,” Solar Energy, vol. 86, no. 6, pp. 1689-1700, 2012.
- [13] R. Espinoza-Trejo and E. Bárcenas-Bárcenas, ”Voltage-Oriented Input–Output Linearization Controller as Maximum Power Point Tracking Technique for Photovoltaic Systems,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 6, pp. 3499-3507, 2015.
- [14] D. Lalili, A. Mellit, N. Lourci, B. Medjahed and C. Boubakir, ”State feedback control and variable step size MPPT algorithm of three-level grid-connected photovoltaic inverter,” Solar Energy, vol. 98, no. C, pp. 561-571, 2013.
- [15] M. R. Mojallizadeh, M. Badamchizadeh, S. Khanmoham, ”Chattering free full-order terminal sliding-mode control for maximum power point tracking of photovoltaic cells,” IET Renewable Power Generation, vol. 11, no. 1, pp. 85-91, 2017.
- [16] M. R. Mojallizadeh and M. A. Badamch, ”Second-order fuzzy sliding-mode control of photovoltaic power generation systems,” Solar Energy, vol. 149, pp. 332-340, 2017.
- [17] R. Pradhan and B. Subudhi, ”Double Integral Sliding Mode MPPT Control of a Photovoltaic System,” IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 24, no. 1, pp. 285-292, 2016.
- [18] Shamsoddini, Maximum Power Point Tracking Of Photovoltaic, Kerman: M. Sc. Thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, 2015.

طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی فازی برای تعقیب نقطه‌ی حداکثر توان در سیستم فتوولتائیک ۱۷۸

- [19] K. Dahech, M. Allouche, T. Damak and F. Tadeo, "Backstepping sliding mode control for maximum power point tracking of a photovoltaic system," *Electric Power Systems Research*, vol. 143, pp. 182-188, 2017.
- [20] Bounechba, A. Bouzid, K. Nabti and H. Benalla, "Comparison of perturb observe and fuzzy logic in maximum power point tracker for PV systems," *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 677-684, 2014.
- [21] F. Jamshidi, S. L. Emamzadehei and M. M. Ghanbarian, "Using fuzzy PI controller optimized by PSO for frequency control of island microgrids," *Journal of Soft Computing and Information Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 36-43, 2017.
- [22] Delavari and S. Z. Rashidnejad heydari, "Fractional order Adaptive Terminal Sliding Mode Controller Design for MPPT in a Solar Cell under Normal and Partial Shading Condition," *Journal of Nonlinear Systems in Electrical Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 4-22, 2019.
- [23] C. S. Chiu, Y. L. Ouyang and C. Y. Ku, "Terminal sliding mode control for maximum power point tracking of photovoltaic power generation systems," *Solar Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 2986-2995, 2012.
- [24] Enrique, J. Andújar and M. Bohórquez, "A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications," *Solar Energy*, vol. 84, no. 1, pp. 79-89, 2010.
- [25] Dehghanzadeh, G. Farahani and M. Maboodi, "Maximum Power Point Tracking of a Photovoltaic System Using Modified Incremental Algorithm and Model Predictive Control," *Journal of Control*, vol. 12, no. 2, pp. 67-75, 2018.

- [26] H. Abid, I. Zaidi, A. Toumi and M. Chaabane, "T-S Fuzzy Algorithm for Photovoltaic Panel," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 215-223, 2017.
- [27] M. Allouche, K. Dahech, M. Chaabane and D. Mehdi, "Fuzzy observer-based control for maximum power-point tracking of a photovoltaic system," *International Journal of Systems Science*, vol. 49, no. 8, pp. 1061-1073, 2018.
- [28] M. Effatpanah Hesary, "The Optimization of Parallel Distributed Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems," Ferdowsi University of Mashhad, 2016.