

Improvement of Model Predictive Control in Maximum Power Tracking in a Photovoltaic System using Fuzzy Control in the Presence of Uncertainty in the Model

Loghman Samani¹, Rahmatollah Mirzaei²

¹ PhD Candidate, Dept. of Electrical Eng., faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

² Assistant Professor, Dept. of Electrical Eng., faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Abstract:

The P-V characteristic of a photovoltaic system is a nonlinear characteristic. The location and the value of the maximum power point in a Photovoltaic (PV) system depends on environmental conditions such as the intensity of solar radiation and the ambient temperature. To extract maximum power, a system including a DC-DC converter and a control method is required. Such a system is called maximum power tracking (MPPT), which is an essential part of a photovoltaic system. Model predictive control (MPC) is a type of control method which is used in MPPT. The model-based predictive control method detects the maximum power point using the equations of the dc-dc converter. In MPC, the system equations are ideally formulated. However, the values of the elements in the dc -dc converter change over time. There are two solutions to this problem. The first is to write real system equations. As a result, the formulations become very complicated and take up a large amount of microprocessor time and memory. Also, most of the time the exact values of the elements in the circuit are unknown. The second method is the use of additional sensors, which increases the cost of the system. In this article, a Fuzzy Model Predictive Control (FMPC) method is proposed for a Cuk converter to implement MPPT in photovoltaic systems. The proposed method obtains an improved performance and eliminates the need for the actual values of the elements. The method has been simulated in the MATLAB/Simulink workspace and its performance superiority has been demonstrated by comparing it against existing MPC and FL- MPPT approaches.

Keywords: Maximum Power Point Tracking, Model Predictive Control, Fuzzy controller, Photovoltaic Systems.

بهبود عملکرد کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در ردیابی ماکزیمم توان در سیستم فتوولتائیک با استفاده از کنترل فازی در صورت وجود عدم قطعیت در مدل لقمان سامانی^۱، رحمت‌الله میرزایی^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران

l.samani@eng.uok.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران

r.mirzaei@uok.ac.ir

چکیده: مشخصه توان - ولتاژ در یک سیستم فتوولتائیک، مشخصه غیرخطی است. محل و مقدار نقطه ماکزیمم توان (MPP) به شرایط محیطی مانند شدت نور و دمای محیط بستگی دارد. برای استخراج ماکزیمم توان به سیستمی نیاز است که شامل یک مبدل DC-DC و یک روش کنترلی است؛ به چنین سیستمی، ردیابی نقطه ماکزیمم توان (MPPT) گفته می‌شود که یک قسمت اساسی در سیستم فتوولتائیک است. یکی از این روش‌های کنترلی استفاده شده در MPPT، روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل (MPC) است. روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل با استفاده از معادلات مربوط به مبدل dc-dc، نقطه ماکزیمم توان را ردیابی می‌کند. در کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، معادلات سیستم به صورت ایدئال نوشته می‌شوند؛ درحالی‌که در واقعیت و با مرور زمان، مقادیر عناصر موجود در مبدل dc تغییر کرده یا نامشخص‌اند. برای حل این مشکل دو راه‌حل وجود دارد: راه‌حل نخست این است که معادلات سیستم به صورت واقعی نوشته شوند؛ در نتیجه، فرمول‌ها بسیار پیچیده می‌شوند و حجم زیادی از حافظه و زمان میکروپروسسور را اشغال می‌کنند و در نهایت، سرعت عملکرد کنترل را کاهش می‌دهند. در بیشتر اوقات نیز مقادیر دقیق عناصر موجود در مدار مشخص نیستند. روش دوم، استفاده از سنسورهای اضافی است که این امر نیز باعث افزایش قیمت سیستم می‌شود. در این مقاله با استفاده از یک کنترلر فازی، عملکرد کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در صورت وجود عدم قطعیت در مدل مبدل بهبود می‌یابد. در ضمن با استفاده از این روش، نیاز به سنسورهای اضافی برای تشخیص نامعینی عناصر موجود در مبدل DC-DC برطرف می‌شود. نتایج با استفاده از نرم‌افزار متلب (MATLAB) ارائه شده‌اند و عملکرد بهتر این روش را در مقایسه با روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و روش کنترلر فازی مرسوم نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: ردیابی ماکزیمم توان، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، کنترل فازی، سیستم فتوولتائیک

۱- مقدمه

یک سلول خورشیدی با دمای سلول و شرایط جوی تغییر می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند در هر لحظه، یک نقطه عملکردی مرتبط با یک سلول خورشیدی وجود دارد که در آن قدرت انتقال حداکثر می‌شود؛ بنابراین، برای ردیابی حداکثر توان از سلول فتوولتائیک، نقطه عملکرد سلول باید نزدیک به نقطه بهینه باشد. ردیاب نقطه حداکثر توان، این کار را با استفاده از یک مبدل DC به DC، بار و یک کنترل‌کننده قابل برنامه‌ریزی برای اعمال الگوریتم‌های

سلول‌های خورشیدی که تبدیل انرژی را انجام می‌دهند، طبیعت بسیار غیرخطی دارند. همچنین، توان تولیدشده با

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۱

نام نویسنده مسئول: رحمت‌الله میرزایی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، سنندج، دانشگاه کردستان، دانشکده مهندسی، گروه برق

ولتاژ مرجع کاهش می‌یابد و اگر dp/dV صفر باشد، یعنی نقطه عملکرد سیستم در نقطه ماکزیمم توان است و ولتاژ مرجع ثابت می‌ماند [۱۶-۱۱].

روش صعود از تپه^۵ (HC): روش P&O و HC دو روش متفاوت با اصول عملکردی یکسان‌اند. روش P&O در ولتاژ اغتشاش ایجاد می‌کند؛ اما HC در ضریب وظیفه اغتشاش ایجاد می‌کند [۱۹-۱۷].

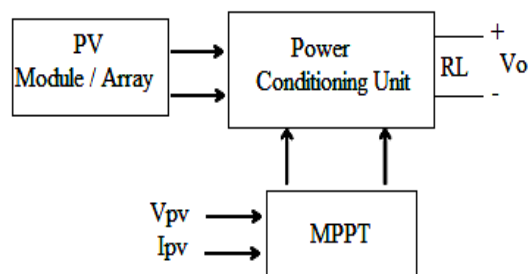
روش مقاومت افزایشی با گام متغیر^۷ (INR): در روش P&O با گام ثابت، اگر مقدار گام بزرگ باشد، سرعت پاسخ‌دهی آن زیاد می‌شود؛ اما نوسان اطراف MPP افزایش می‌یابد که این کار باعث کاهش بازدهی سیستم می‌شود. اگر مقدار گام کم باشد، سرعت پاسخ‌دهی کم می‌شود؛ اما بازدهی زیاد می‌شود. روش INR راه‌حلی برای این مشکل است [۲۱].

کندوکناس افزایشی: این روش همانند P&O و HC است؛ با این تفاوت که براساس مقایسه چگونگی تغییر ولتاژ و جریان عمل می‌کند. در نقطه ماکزیمم توان، منفی نسبت جریان لحظه‌ای به ولتاژ لحظه‌ای و مشتق جریان نسبت به ولتاژ برابر است [۲۴-۲۳].

روش‌های دیگری همچون سلول رهبر، بتا، جدول خوانی، برازش منحنی، مقایسه سه نقطه وزنی و کنترل افتی خازن لینک DC نیز وجود دارند [۲۸-۱۶، ۲۰، ۲۲، ۲۵-۹، ۷] که هرکدام مزایا و معایب مخصوص به خود را دارند. در اینجا صرفاً روش‌های بیشتر متداول بررسی شده‌اند. شبکه هوشمند مصنوعی (ANN): در یک شبکه مصنوعی ANN اطلاعات ورودی شبکه عصبی مانند شدت تابش و دمای محیط است و خروجی شبکه عصبی محل MPP است که براساس مقادیر وزن‌ها در شبکه تعیین می‌شود [۲۹].

کنترل فازی^۷ (FLC): در طراحی سیستم کنترل مرسوم از مدل‌های با روابط ریاضی دقیق برای توصیف سیستم استفاده می‌شود؛ اما اگر سیستم پیچیده شود، این کنترل‌کننده‌های مرسوم جوابگو نیستند. روش کنترل فازی FLC در اینگونه سیستم‌ها کارآمدی بیشتری دارد [۳۰].

MPPT انجام می‌دهد. ساختار کلی یک سیستم MPPT در شکل (۱) نشان داده شده است [۴-۱].



شکل (۱): ساختار کلی یک سیستم MPPT

در این قسمت درباره برخی الگوریتم‌های MPPT متعارف برای ردیابی ماکزیمم توان در شرایط محیطی یکسان بحث می‌شود.

روش ولتاژ ثابت: روش ولتاژ ثابت بر این اساس است که نقطه ماکزیمم توان در ۷۲٪ تا ۷۸٪ ولتاژ مدار باز V_{oc} در شرایط اتمسفری استاندارد اتفاق می‌افتد. ضریب وظیفه (سیکل کاری D) در کانورترهای DC به DC باید طوری تنظیم شوند که ولتاژ سیستم فتوولتائیک در ماکزیمم توان $k1$ برابر V_{oc} شود؛ مقدار $k1$ برابر $0.72-0.78$ است [۵-۶].

روش جریان ثابت: اصول عملکرد روش جریان ثابت همانند روش ولتاژ ثابت است. در روش ولتاژ ثابت، آرایه PV در شرایط ولتاژ ثابت عمل می‌کند؛ اما در روش جریان ثابت، PV در یک جریان ثابت عمل می‌کند. جریانی که در آن ماکزیمم توان اتفاق می‌افتد در محدوده $0.92-0.78$ جریان اتصال کوتاه I_{sc} است [۸].

روش اختلال و مشاهده^۴ (P&O): روش اختلال و مشاهده به آشفتگی در برخی متغیرهای کنترلی برای تعیین جهت مسیریابی ماکزیمم توان نیاز دارد. این متغیر کنترلی می‌تواند ولتاژ، جریان یا ضریب وظیفه باشد. این روش با ایجاد اغتشاش در ولتاژ در فواصل زمانی مشخص در اطراف نقطه MPP نوسان می‌کند. اگر dp/dV مثبت باشد، نقطه عملکرد سیستم در سمت چپ نقطه ماکزیمم توان است و ولتاژ مرجع افزایش می‌یابد. اگر dp/dV منفی باشد، نقطه عملکرد سیستم در سمت راست نقطه ماکزیمم توان است و

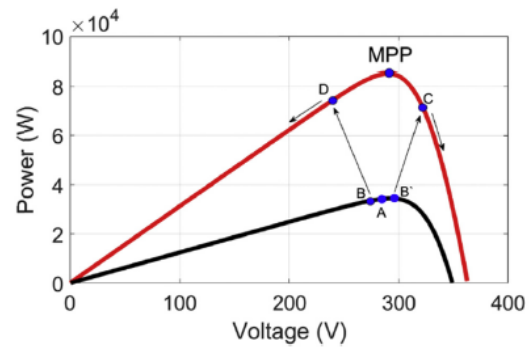
بهبود بخشیدند. نویسندگان در مرجع [۴۰] با استفاده از شبکه‌های شناختی فازی، روش FL-MPPT معمولی را بهبود بخشیدند. نویسندگان در مرجع [۴۱] یک الگوریتم GA را برای بهینه‌سازی توابع عضویت طراحی شده از کنترلی FL-MPPT معمولی استفاده کردند که پایه فازی آن قبلاً ساخته شده است. در مرجع [۴۲]، حداکثر ردیابی نقطه قدرت براساس توابع نامتقارن فازی ارائه شده است تا زمان پردازش طولانی‌تر FL-MPPT معمولی را به حداقل برساند. نتایج در مراجع [۴۱-۴۲] نشان می‌دهند با کنترل‌کننده فازی بهینه‌شده، به بهبود عملکرد، پاسخ سریع با نوسانات کمتر و همچنین، اجتناب از مشکل رانندگی می‌توان دست یافت؛ با وجود این، اجرای تمامی این روش‌ها پیچیده‌تر از تکنیک‌های MPPT کلاسیک است.

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل^A (MPC): روش کنترل

پیش‌بین مبتنی بر مدل به‌عنوان روش کنترلی برای اجرای MPPT درخور توجه قرار گرفته است. ایده ساده در روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل این است که با استفاده از مدل سیستم، جریان یا ولتاژ را پیش‌بینی و نقطه عملکرد بهینه را با استفاده از تابع هزینه مشخص پیدا می‌کند. روش MPC سه مشکل دارد. نخستین مشکل این است که به دلیل نیازمند بودن به زمان نمونه‌برداری کوچک Ts، نیاز به یک ریزپردازنده با فرکانس بالا ضروری است. دومین مسئله این است که در بعضی از مبدل‌ها، بیش از یک سنسور ولتاژ یا بیش از یک سنسور جریان نیاز است. سازگاری نبودن پارامتر مدل نیز یکی دیگر از ضعف‌هاست که بر عملکرد MPPT تأثیر منفی می‌گذارد [۴۳]. در کنترل پیش‌بین معادلات سیستم به صورت ایدئال نوشته می‌شوند؛ درحالی‌که در واقعیت و با مرور زمان، مقادیر عناصر موجود در مبدل dc تغییر کرده یا نامشخص‌اند. در جدول (۱) خلاصه‌ای از روش‌های بررسی شده آمده است.

تکنولوژی FL-MPPT، به دلیل سرعت بالای همگرایی و نوسان کم در اطراف MPP، یکی از قوی‌ترین کنترل‌کننده‌ها برای یک سیستم PV است [۳۲-۳۱]. همچنین، به اطلاعات آموزشی نیازی نیست؛ در نتیجه، برای انواع مختلف ماژول PV با همان طراحی MPPT مناسب است؛ با این حال، معایب اصلی این مسئله مربوط به پیچیدگی در طراحی و پیاده‌سازی سخت‌افزاری و مسئله رانندگی در مقایسه با روش‌های کلاسیک MPPT است [۳۳-۳۴].

مسئله رانندگی در شکل (۲) نشان داده شده است. اگر سیستم در نقطه A باشد و تغییرات سریع تابش روی دهد، سیستم به نقطه B منتقل می‌شود و طبق قوانین فازی سیستم از نقطه ماکزیمم جدید دور می‌شود؛ به این مشکل، مسئله رانندگی گفته می‌شود.



شکل (۲): مسئله رانندگی در FL-MPPT

برای مقابله با مسئله رانندگی، مقالات زیادی ارائه شده‌اند. در مرجع [۳۵] از الگوریتم PSO به منظور تنظیم چرخه کار مبدل بوسست در جهت درست برای FL-MPPT معمولی برای تغییرات سریع در تابش خورشید استفاده شده است. در مرجع [۳۶]، یک ثابت کنترل‌کننده براساس رویکرد FL برای تطبیق آنالین اندازه گام در FL-MPPT معمول ارائه شده است. در مرجع [۳۷]، یک FL-MPPT جدید براساس الگوریتم صعود تپه برای یک سیستم PV مستقل ارائه شده است. در مراجع [۳۸-۳۹]، پژوهشگران با استفاده از الگوریتم Fuzzy-IC برای آرایه PV و سلول‌های سوختی، تکنیک ردیابی حداکثر توان را

جدول (۱): خلاصه‌ای از روش‌های بررسی شده

معایب	مزایا	روش MPPT
<ul style="list-style-type: none"> • ردیابی ناصحیح MPPT • آفلاین • قطع مصرف در طول اندازه‌گیری I_{sc} / V_{oc} • انتخاب مقدار مطلوب برای ثابت k مشکل است. • برای شرایط تغییر سریع تابش مناسب نیست. • تعریف اندازه مناسب برای گام اختلال مشکل و مهم است. • نوسان در اطراف MPP • وابستگی سرعت و دقت در اندازه گام • نیاز به کنترل گران • نیاز به دو نوع سنسور • برای دقیق‌شدن، به داده‌های بیشتری نیازمند است. • پیچیدگی در طراحی و پیاده‌سازی سخت‌افزاری • در شرایط پرتودهی پایین، دقت زیاد نیست. • مسئله رانندگی • نیاز به مدل دقیق سیستم • ردیابی نشدن MPP در صورت ایدئال‌نبودن 	<ul style="list-style-type: none"> • سرعت خوب، سادگی • توانایی کار در هر دو حالت آنالوگ و دیجیتال • فقط به سنسور ولتاژ / سنسور جریان نیاز دارد. • ارزان بودن • آنالاین (بدون نیاز به اطلاعات قبلی درباره PV) • سادگی منطق • سادگی اجرای • دقت متوسط یا خوب (وابسته به اندازه اختلال) • آنالاین بودن • راندمان بالاتر • سرعت و دقت بیشتر INC • بازده بیشتر نسبت به روش‌های متعارف • استحکام • مکان‌یابی دقیق MPP • بازده بیشتری نسبت به ANN دارد. • بازده بیشتر نسبت به روش‌های متعارف • همگرایی سریع‌تر نسبت به P&O 	<ul style="list-style-type: none"> روش ولتاژ ثابت / جریان ثابت روش اختلال و مشاهده کندوکنانس افزایشی روش مقاومت افزایشی با گام متغیر ANN منطق fuzzy کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

ساختار مقاله به این صورت است که آنالیز مبدل چوک برای پیاده‌سازی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در قسمت ۲، روش پیشنهادی با استفاده از کنترلر فازی در قسمت ۳، شبیه‌سازی در قسمت ۴ و نتیجه‌گیری در قسمت ۵ ارائه شده است.

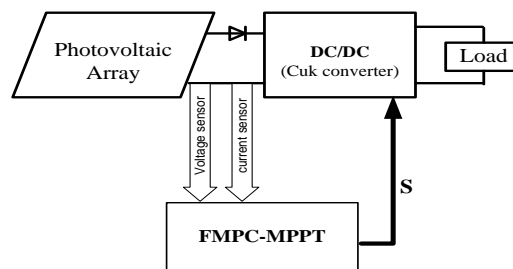
۲- آنالیز مبدل چوک برای پیاده‌سازی کنترل

پیش‌بین مبتنی بر مدل

روش P&O، روش شناخته‌شده‌ای است که عملکرد نسبتاً خوبی دارد. این روش نمی‌تواند همیشه به نقطه ماکزیمم توان همگرا شود و همچنین، روش نسبتاً کندی است. هدف اصلی مقاله حاضر این است که عملکرد روش P&O را با پیش‌بینی خطا در گام بعدی با استفاده از روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل بهبود بخشد.

در این مقاله نشان داده می‌شود که با استفاده از یک کنترلر فازی، عملکرد کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در صورت وجود عدم قطعیت در مدل مبدل بهبود می‌یابد و نیاز به سنسورهای اضافی برای تشخیص نامعینی برطرف می‌شود.

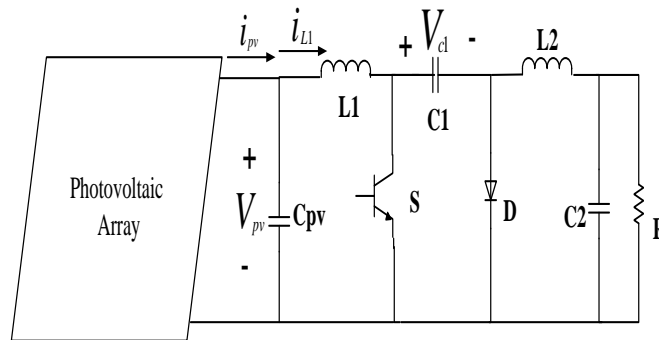
سیستم پیشنهادی در حالت مستقل از شبکه در شکل (۳) نشان داده شده است که شامل یک سیستم فتولتائیک، یک مبدل چوک و کنترلر ماکزیمم توان است.



شکل (۳): سیستم مطالعه‌شده

ورودی‌های کنترلر پیش‌بین، جریان و ولتاژ PV، جریان سلف، ولتاژ خازن و جریان مرجع‌اند. یک کانورتر چوک غیرایزوله با سیستم فتولتائیک در شکل (۴) نشان داده شده است.

یک مبدل چوک برای کانورتر DC-DC انتخاب شده است. روش P&O، جریان مرجع را برای MPC تعیین می‌کند تا MPC حالت سوئیچینگ را تعیین کند. این روش خطا را در نمونه‌برداری بعدی پیش‌بینی می‌کند و براساس بهینه‌سازی تابع هزینه G حالت سوئیچینگ تعیین می‌شود.



شکل (۴): یک کانورتر چوک غیرایزوله با سیستم فتولتائیک

$$C_{pv} \frac{V_{pv}(k+1) - V_{pv}(k)}{T_s} = i_{pv}(k) - i_L(k) \quad (6)$$

$$\rightarrow V_{pv}(k+1) = \frac{T_s}{C_{pv}} (i_{pv}(k) - i_L(k)) + V_{pv}(k)$$

معادلات گسسته در زمان مبدل چوک موقع خاموش‌بودن سوئیچ، به صورت زیرند:

$$i_L(k+1) = i_L(k) + \frac{T_s}{L} (V_{pv} - V_{c1}) \quad (7)$$

$$V_{pv}(k+1) = \frac{T_s}{C_{pv}} (i_{pv}(t) - i_L(t)) + V_{pv}(k) \quad (8)$$

ابتدا جریان مرجع با استفاده از روش P&O محاسبه می‌شود؛ سپس تابع هزینه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G_{s=0,1} = |I_{L,s=0,1}(k+1) - I_{ref}| \quad (9)$$

هدف، کاهش تابع هزینه G است. حالت سوئیچینگ برای MPPT با استفاده از الگوریتم توضیح داده شده در شکل (۵) به دست می‌آید.

معادلات مبدل چوک موقع روشن‌بودن سوئیچ، به صورت زیرند:

$$V_L(t) = V_{pv}(t) \rightarrow L \frac{di_L}{dt} = V_{pv}(t) \quad (1)$$

$$i_c(t) = i_{pv}(t) - i_L(t) \rightarrow C_{pv} \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = i_{pv}(t) - i_L(t) \quad (2)$$

معادلات مبدل چوک موقع خاموش‌بودن سوئیچ، به صورت زیرند:

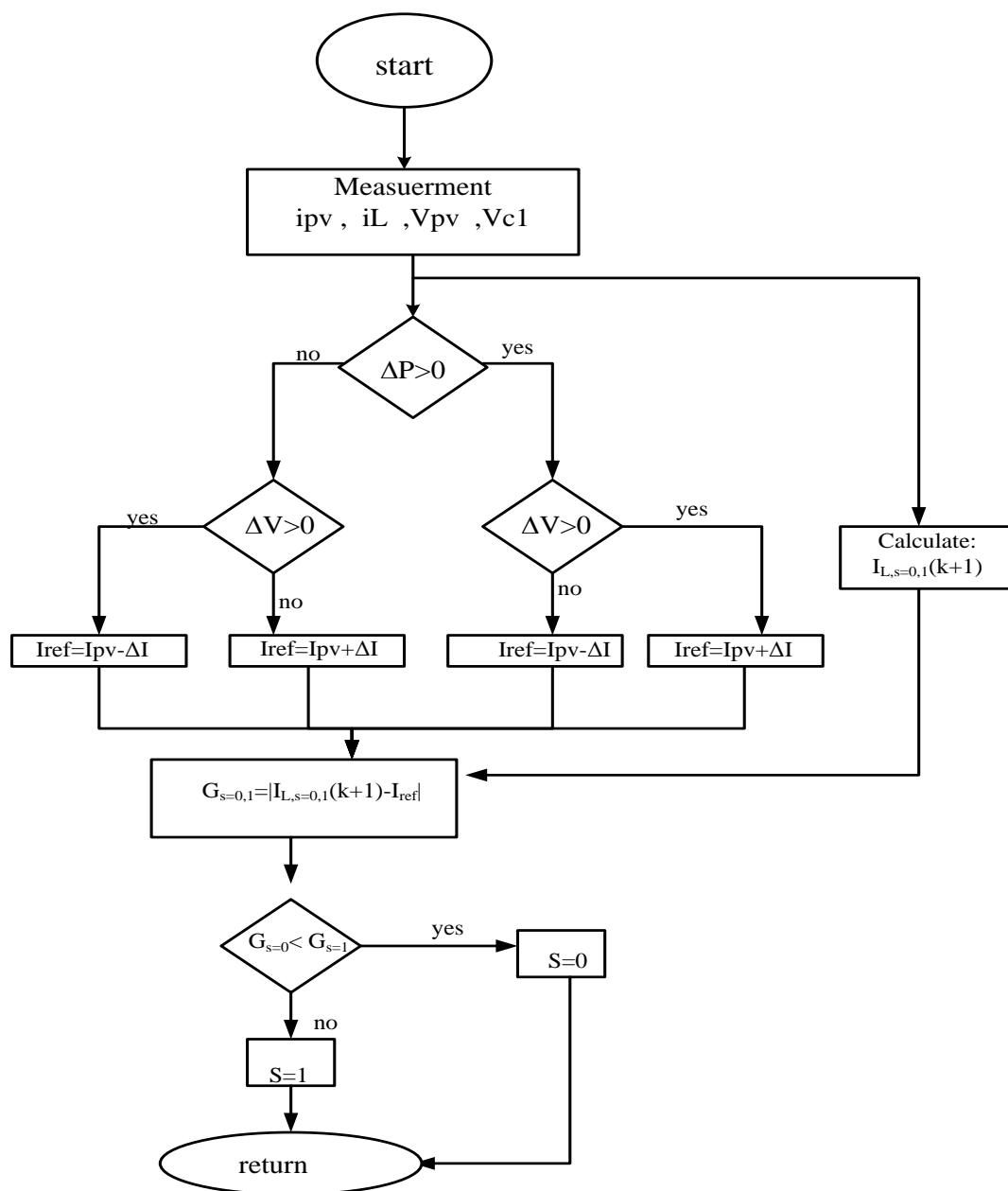
$$V_L(t) = V_L = V_{pv} - V_{c1} \rightarrow L \frac{di_L}{dt} = V_L = V_{pv} - V_{c1} \quad (3)$$

$$i_c(t) = i_{pv}(t) - i_L(t) \rightarrow C_{pv} \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = i_{pv}(t) - i_L(t) \quad (4)$$

با استخراج معادلات گسسته در زمان، رفتار متغیر کنترلی در زمان بعدی پیش‌بینی می‌شود.

معادلات گسسته در زمان مبدل چوک موقع روشن‌بودن سوئیچ، به صورت زیرند:

$$\frac{i_L(k+1) - i_L(k)}{T_s} = \frac{1}{L} V_{pv}(k) \rightarrow i_L(k+1) = i_L(k) + \frac{T_s}{L} V_{pv}(k) \quad (5)$$



شکل (۵): الگوریتم کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

معادله بالا، با استخراج معادلات گسسته در زمان به صورت زیر می‌شود:

$$i_L(k) = i_{pv}(k) - C_{pv} \frac{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)}{T_s} \quad (11)$$

که جریان سلف L_1 برابر می‌شود با:

$$i_L(k) = i_{pv}(k) - C_{pv} \frac{V_{pv}(k)}{T_s} + C_{pv} \frac{V_{pv}(k-1)}{T_s} \quad (12)$$

از معایب این حالت، زیاد شدن سنسورهای اندازه‌گیری است که با استفاده از معادلات مبدل، تعداد این سنسورها کاهش می‌یابد.

موقع خاموش بودن کلید، جریان سلف L_1 به صورت زیر است:

$$i_L(k) = i_{pv}(k) - i_c(k) \rightarrow i_L(k) = i_{pv}(k) - C_{pv} \frac{dV_{pv}(t)}{dt} \quad (10)$$

$$V_{C1}(k) = \frac{L}{T_s} i_{pv}(k-1) - \frac{L}{T_s} i_{pv}(k) + \left[1 + \frac{LC_{pv}}{T_s^2} \right] V_{pv}(k) - \frac{2LC_{pv}}{T_s^2} V_{pv}(k-1) + \frac{LC_{pv}}{T_s^2} V_{pv}(k-2) \quad (17)$$

با جایگذاری معادله ۱۳ در معادله ۸ داریم:

$$\rightarrow i_L(k+1) = 2i_{pv}(k) - i_{pv}(k-1) - \frac{2C_{pv}}{T_s} V_{pv}(k) + \frac{3C_{pv}}{T_s} V_{pv}(k-1) - \frac{C_{pv}}{T_s} V_{pv}(k-2) \quad (18)$$

با انجام این عملیات، نیاز به سنسورهای $i_L(k)$ و $V_{C1}(k)$ از بین می‌رود و الگوریتم سوئیچینگ به صورت شکل (۶) خواهد شد.

با جایگذاری معادله ۱۳ در معادله ۶، داریم:

$$i_L(k+1) = i_{pv}(k) + \left[\frac{T_s}{L} - \frac{C_{pv}}{T_s} \right] V_{pv}(k) + \frac{C_{pv}}{T_s} V_{pv}(k-1) \quad (13)$$

با جایگذاری معادله ۱۳ در معادله ۷، داریم:

$$V_{pv}(k+1) = 2V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1) \quad (14)$$

موقع روشن بودن کلید، ولتاژ خازن C_1 به صورت زیر است:

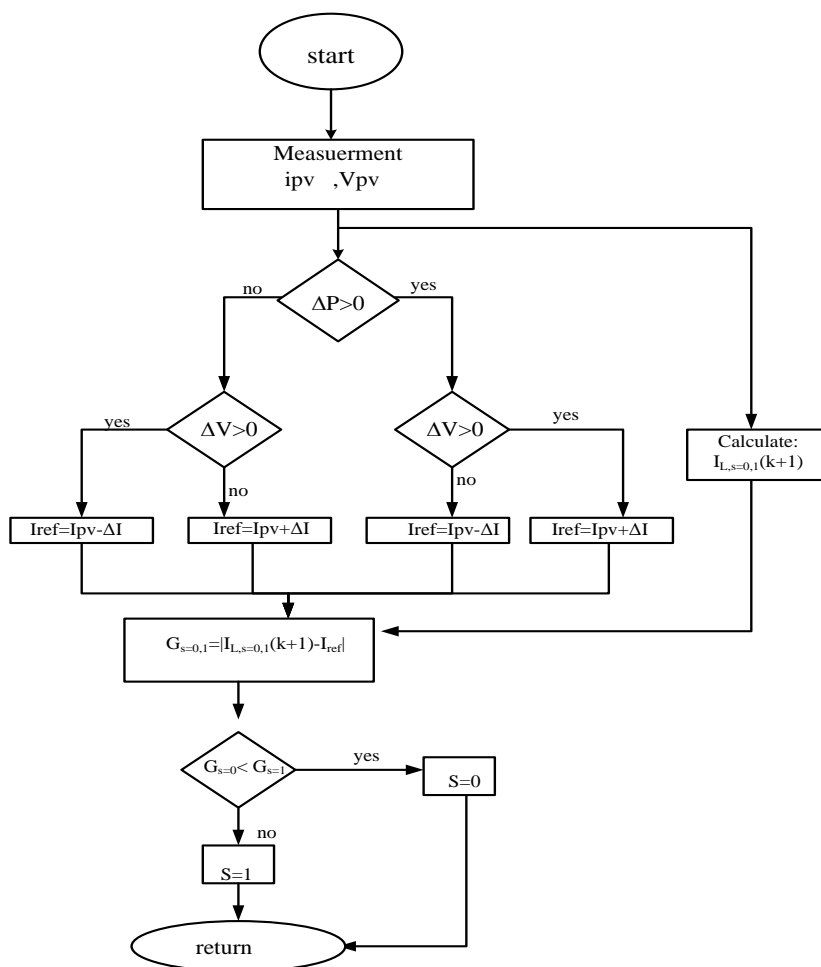
$$V_{C1}(k) = V_{pv}(k) - V_L(k) \rightarrow V_{C1}(k) = V_{pv}(k) - L \frac{di_L}{dt} \quad (15)$$

معادله بالا، با استخراج معادلات گسسته در زمان

به صورت زیر می‌شود:

$$V_{C1}(k) = V_{pv}(k) - \frac{L}{T_s} i_L(k) + \frac{L}{T_s} i_L(k-1) \quad (16)$$

با جایگذاری معادله ۱۳ در معادله ۱۷، داریم:



شکل (۶): الگوریتم کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل با حذف سنسورهای اضافی

نشان داده شده‌اند. قوانین کنترل در جدول (۲) با ورودی‌های E و ΔE و خروجی ΔD نشان داده شده‌اند. همچنین، توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی‌ها در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. شکل کلی توابع عضویت مثلثی، دوزنقه‌ای، گاوسی متقارن یا سیگموئید است. در این مقاله، کلیه توابع عضویت، مثلثی در نظر گرفته شده‌اند. این توابع به راحتی اجرا می‌شوند. این توابع با چندین شبیه‌سازی مختلف برای شرایط مختلف محیطی با هدف بهینه‌سازی خطا بین حداکثر توان واقعی و حداکثر توان مشاهده شده به ازای این توابع عضویت به دست آمده‌اند. توابع عضویت با استفاده از اطلاعات قبلی از پارامترهای طرح پیشنهادی و با بررسی نوسان هر تابع تعیین شده‌اند.

در این مقاله، قوانین فازی شامل ۲۵ قانون کنترل فازی است. سیستم استنتاج فازی، عملیات ترکیبی را طوری انجام می‌دهد که یک تصمیم منطقی را براساس قوانین فازی ایجاد می‌کند که با استفاده از آن، یک خروجی کنترلی تولید می‌شود. قوانین فازی با استفاده از تقسیم‌بندی منحنی عملکردی PV تنظیم شده که در زیر توضیح داده شده‌اند. کار FL - $MPPT$ معمولی بررسی نخستین ورودی است؛ اگر این مقدار از صفر بیشتر باشد، تغییر افزایشی ضریب وظیفه تا رسیدن به MPP افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که اگر کمتر از صفر باشد، خلاف آن اتفاق می‌افتد تا به مقدار بهینه برسد و از ورودی دوم به طور مؤثر برای کاهش نوسانات ضریب وظیفه استفاده می‌شود.

۳- روش پیشنهادی با استفاده از کنترلر فازی

کنترل منطق فازی براساس اصول نظریه منطق فازی است که لطفی زاده در ۱۹۶۵ ارائه کرد. در FLC ، دانش انسانی در قالب قوانین فازی استفاده می‌شود. FLC یک روش کنترل غیرخطی است که عموماً از ۵ مرحله تشکیل شده است.

مرحله ۱: انتخاب اصطلاحات زبانی برای متغیرها و بیان مجموعه فازی مرتبط با آن؛

مرحله ۲: فازی‌سازی ورودی‌ها؛

مرحله ۳: ارتباط مشکلات دانش با قوانین استنتاج فازی؛

مرحله ۴: استنتاج فازی؛

مرحله ۵: غیرفازی‌سازی.

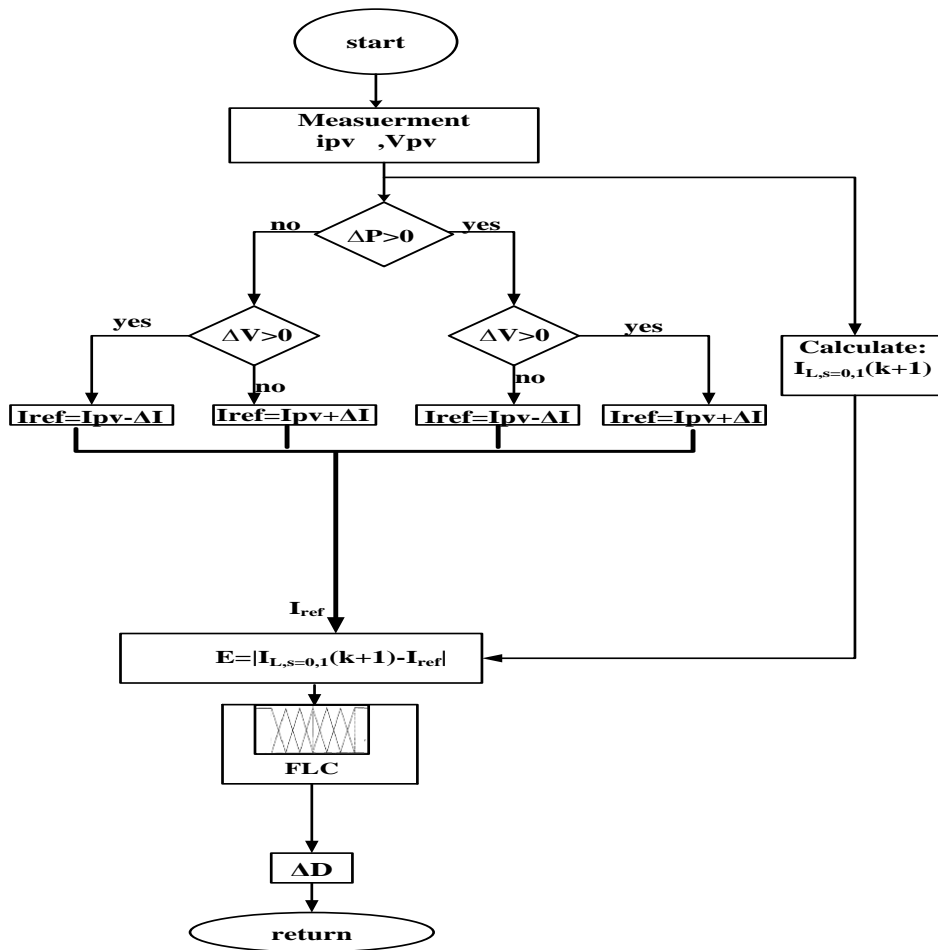
الگوریتم پیشنهادی در شکل (۷) نشان داده شده است. E و ΔE ورودی‌های FLC هستند که با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$E(k) = |I_{L,s}(k+1) - I_{ref}(k)|, S=0 \text{ و } 1 \quad (19)$$

$$\Delta E = E(k) - E(k-1) \quad (20)$$

$I_{L,s}(k+1)$ جریان پیش‌بینی شده، $I_{ref}(k)$ جریان مرجع، $E(k)$ خطای مسیریابی و ΔE تغییرات خطای مسیریابی است. E و ΔE ورودی‌های FLC هستند و ΔD خروجی FLC است. شکل (۸)، کنترلر فازی را نشان می‌دهد.

در این مقاله، مقادیر تابع عضویت به متغیرهای زبانی با استفاده از پنج زیرمجموعه فازی اختصاص داده می‌شود؛ NB (بزرگ منفی)، NS (کوچک منفی)، Z (صفر)، PS (کوچک مثبت) و PB (بزرگ مثبت). پاریشن‌های زیرمجموعه‌های فازی و شکل توابع عضویت در شکل (۹)



شکل (۷): الگوریتم پیشنهادی

در این مقاله از روش استنتاج فازی ممدانی استفاده شده است.

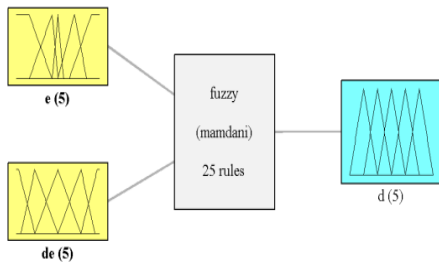
خروجی FLC تغییر در ضریب وظیفه مبدل DC-DC است. برای غیرفازی سازی خروجی، از روش مرکز ثقل استفاده شده است.

مطابق شکل (۷)، جدول قوانین فازی به سه ناحیه تقسیم می شود:

ناحیه ۱: شیب منحنی PV، یعنی در این منطقه منفی است. این نشان می دهد نقطه عملکردی ماژول PV در سمت راست MPP قرار دارد و برای ردیابی MPP باید ضریب وظیفه افزایش یابد.

ناحیه ۲: در این ناحیه، نقطه عملکرد نزدیک به MPP است؛ از این رو، در چنین شرایطی ضریب وظیفه نباید تغییر کند.

ناحیه ۳: شیب منحنی PV، یعنی در این منطقه مثبت است. این نشان می دهد نقطه عملکردی ماژول PV در سمت راست MPP قرار دارد و برای ردیابی MPP باید ضریب وظیفه کاهش یابد.



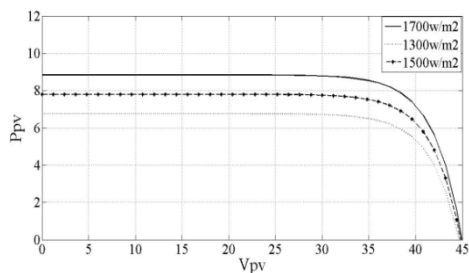
System fuzzy: 2 inputs, 1 outputs, 25 rules

شکل (۸): کنترلر FLC

بهبود عملکرد کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در ردیابی ماکزیمم توان در سیستم فتوولتائیک با استفاده از ...

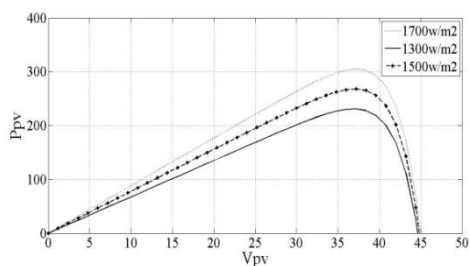
جدول (۳): مشخصات ماژول فتوولتائیک

Voltage Pmax (Vmp)	35/2
Current Pmax (Imp)	4/95
Short-circuit current (Isc)	5/2
Open-circuit voltage (Voc)	44/2
Temperature (°C)	25
Radiation (W/m ²)	1000



شکل (۱۱): منحنی شبیه‌سازی شده I-V تأثیر گرفته از سطوح

مختلف تابش و دمای ثابت ۲۵°C



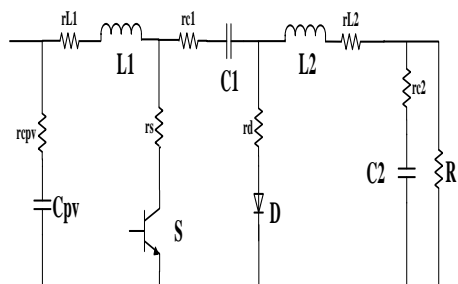
شکل (۱۲): منحنی شبیه‌سازی شده P-V تأثیر گرفته از سطوح

مختلف تابش و دمای ثابت ۲۵°C

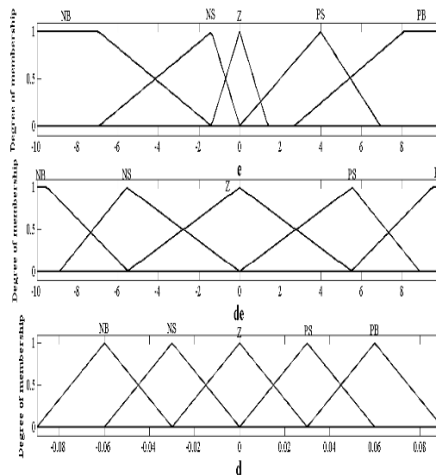
در بخش زیر، عملکرد روش پیشنهادی، بررسی و با روش‌های MPC و FL-MPPT در مطالعات موردی مختلف مقایسه می‌شود.

۴-۱- مطالعه موردی ۱: مبدل چوک ایدئال

شکل (۱۳)، مبدل چوک غیرایده‌آل را نشان می‌دهد که عناصر سیستم ایده‌آل اند ($r_{cpv}=0, r_{L1}=0, r_S=0, r_{C1}=0, r_d=0, r_{L2}=0, r_{C2}=0$).



شکل (۱۳): مبدل چوک غیرایده‌آل



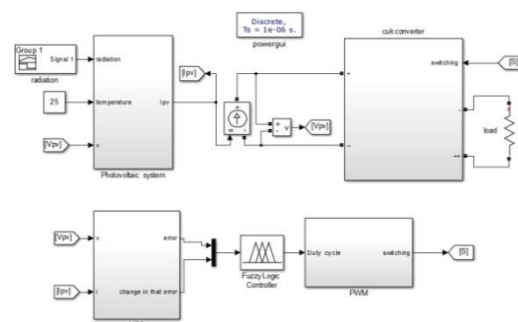
شکل (۹): توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی در کنترلر FLC

جدول (۲): قوانین فازی

ΔE \ E	NB	NS	Z	PS	PB
NB	Z	Z	PB	PB	PB
NS	Z	PS	PS	PS	PS
Z	Z	Z	PS	Z	Z
PS	NS	NS	Z	Z	Z
PB	NB	NB	NB	Z	Z

۴- مطالعه موردی و نتایج شبیه‌سازی

شکل (۱۰)، سیستم پیشنهادی شبیه‌سازی شده در MATLAB / Simulink را نشان می‌دهد. مشخصه‌های I-V و P-V سیستم فتوولتائیک استفاده شده در این مقاله، برای سطوح مختلف تابش، به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده‌اند.

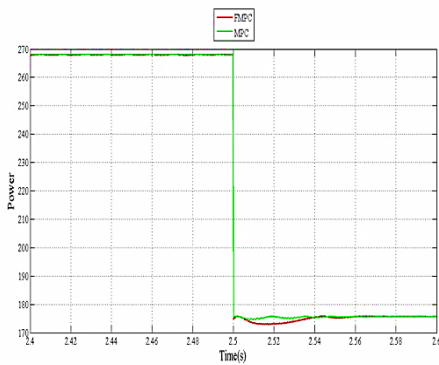


شکل (۱۰): شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی در MATLAB / Simulink

جدول (۳)، مشخصه ماژول فتوولتائیک شبیه‌سازی شده

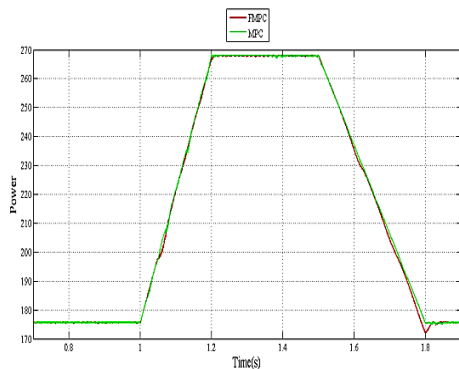
را نشان می‌دهد.

شکل (۱۴) و (۱۵)، عملکرد روش پیشنهادی، MPC و FL-MPPT را در حالتی نشان می‌دهند که تابش، تغییرات ناگهانی مثبت دارد. تابش در لحظه $t=2$ s از مقدار 1000 W/m^2 به مقدار 1500 W/m^2 به صورت ناگهانی تغییر می‌کند. دمای محیط برابر 25°C است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش‌های MPC و FL-MPPT در $t=2/025$ s به نقطه ماکزیمم توان می‌رسند؛ در حالی که روش پیشنهادی در $t=2/05$ s به نقطه ماکزیمم توان می‌رسد. دلیل فروجهش‌های بزرگ در پاسخ پله این است که روش‌های کنترلی هنگام رسیدن به نقطه ماکزیمم توان، به دلیل سرعت کنترلی، نقطه ماکزیمم توان را رد می‌کنند؛ سپس دوباره به سمت نقطه ماکزیمم توان حرکت می‌کنند.



شکل (۱۶): عملکرد روش پیشنهادی و MPC برای تغییرات ناگهانی منفی در تابش در مطالعه موردی ۱

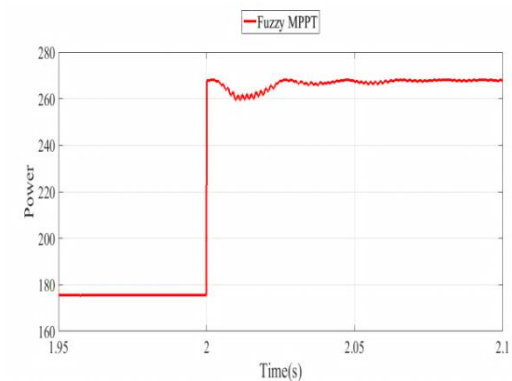
شکل (۱۷) و (۱۸)، عملکرد روش پیشنهادی، MPC و FL-MPPT را در حالتی نشان می‌دهند که تابش، تغییرات شیب‌دار مثبت دارد. تابش در مدت 2 s از مقدار 1000 W/m^2 به مقدار 1500 W/m^2 شیب‌دار بالا می‌رود. همچنین، تابش در مدت 3 s از مقدار 1500 W/m^2 به مقدار 1000 W/m^2 شیب‌دار پایین می‌رود. دمای محیط برابر 25°C است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی در $t=2/54$ s به نقطه ماکزیمم توان می‌رسد. مطابق شکل‌های (۱۷) و (۱۸)، در این مطالعه موردی روش پیشنهادی، MPC و FL-MPPT تقریباً پاسخ یکسانی دارند.



شکل (۱۷): عملکرد روش پیشنهادی و MPC برای تغییرات آرام در تابش در مطالعه موردی ۱

شکل (۱۴): عملکرد روش پیشنهادی و MPC برای تغییرات ناگهانی مثبت در تابش در مطالعه موردی ۱. The plot shows Power (W/m²) vs Time (s) from 1.9 to 2.2. At t=2s, the irradiance steps up from 1000 to 1500 W/m². The MPC (green) and FMP (red) both show a transient dip before settling at a new maximum power level around 265 W/m².

شکل (۱۴): عملکرد روش پیشنهادی و MPC برای تغییرات ناگهانی مثبت در تابش در مطالعه موردی ۱



شکل (۱۵): عملکرد روش FL-MPPT برای تغییرات ناگهانی مثبت در تابش در مطالعه موردی ۱

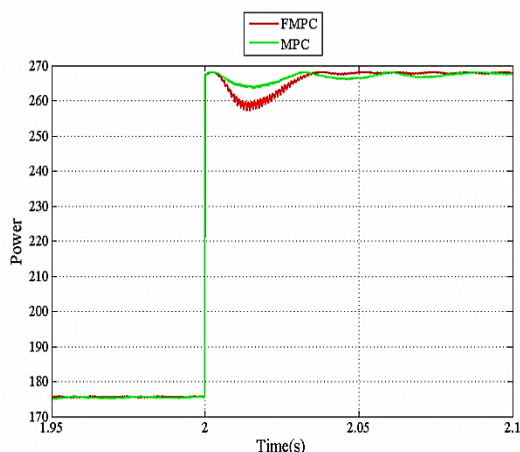
شکل (۱۶): عملکرد روش پیشنهادی و MPC را در حالتی نشان می‌دهد که تابش، تغییرات ناگهانی منفی دارد. تابش در لحظه $t=2/5$ s از مقدار 1500 W/m^2 به مقدار

۴-۲- مطالعه موردی ۲: مبدل چوک با

غیرایده‌نالی کم

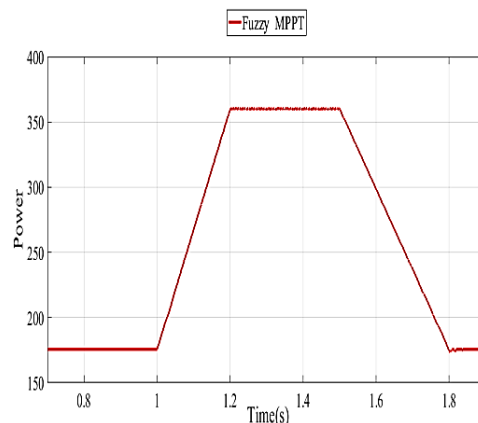
در این حالت به مقدار کمی از حالت ایده‌آل فاصله گرفته شده است؛ در نتیجه، المان‌ها به این صورت‌اند
 $(r_{cpv}=0/02\Omega, \quad r_{L1}=0/005\Omega, \quad r_s=0/005 \quad \Omega,$
 $r_{C1}=0/02\Omega, \quad r_d=0/005\Omega, \quad r_{L2}=0/005\Omega,$
 $(r_{C2}=0/02\Omega)$

شکل (۲۱)، عملکرد روش پیشنهادی و MPC را در حالتی نشان می‌دهد که تابش، تغییرات ناگهانی مثبت دارد. تابش در لحظه $t=2$ s از مقدار 1000 W/m^2 به مقدار 1500 W/m^2 به صورت ناگهانی تغییر می‌کند. دمای محیط برابر 25°C است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی در $t=2/04$ s به نقطه ماکزیمم توان می‌رسد؛ درحالی‌که روش MPC در $t=2/04$ s به نقطه ماکزیمم می‌رسد.



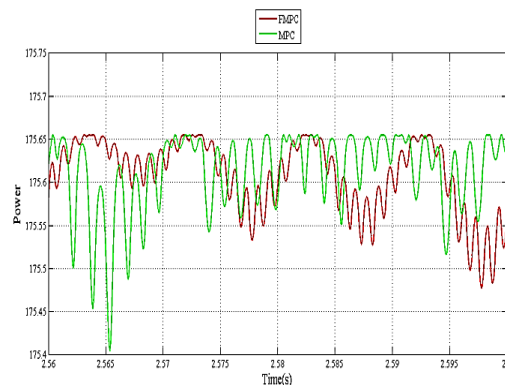
شکل (۲۱): عملکرد روش پیشنهادی و MPC برای تغییرات ناگهانی مثبت در تابش در مطالعه موردی ۲

شکل (۲۲) و (۲۳)، عملکرد روش پیشنهادی، MPC و FL-MPPT را در حالتی نشان می‌دهد که تابش، تغییرات شیب‌دار مثبت دارد. تابش در مدت 2 s از مقدار 1000 W/m^2 به مقدار 1500 W/m^2 به صورت شیب‌دار بالا می‌رود. دمای محیط برابر 25°C است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این حالت معادلات مربوط به MPC تا حدودی جوابگوی سیستم ردیابی‌اند؛ اما MPC در این مطالعه موردی، پاسخ رضایت‌بخشی را نشان نمی‌دهد. روش FL-MPPT، پاسخ نسبتاً بهتری نسبت به روش MPC

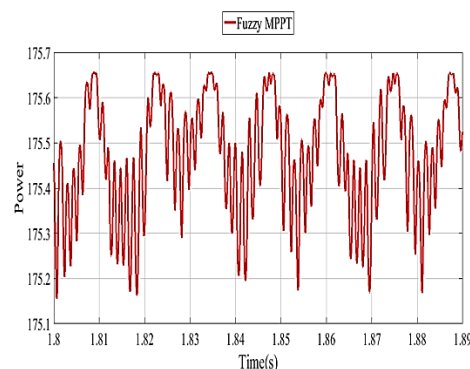


شکل (۱۸): عملکرد روش FL-MPPT برای تغییرات آرام در تابش در مطالعه موردی ۱

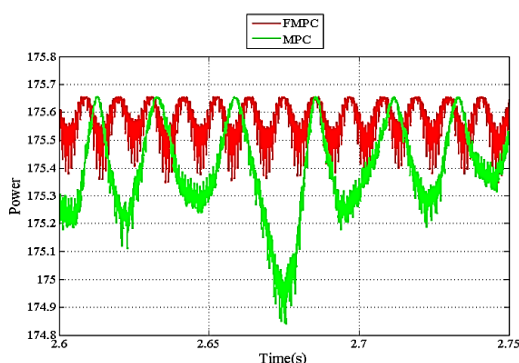
شکل (۱۹) و (۲۰)، عملکرد روش پیشنهادی و FL-MPPT را در مقایسه با MPC در حالت ماندگار نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نوسانات توان در هر دو روش تقریباً برابر است.



شکل (۱۹): عملکرد روش پیشنهادی و MPC در حالت ماندگار در مطالعه موردی ۱



شکل (۲۰): عملکرد روش FL-MPPT در حالت ماندگار در مطالعه موردی ۱



شکل (۲۴): عملکرد روش پیشنهادی و MPC در حالت ماندگار در مطالعه موردی ۲

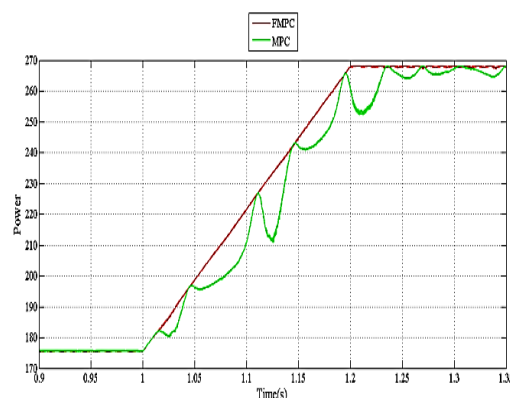
۴-۳- مطالعه موردی ۳: مبدل چوک غیرایده‌آل

در این حالت، المان‌های مدار به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

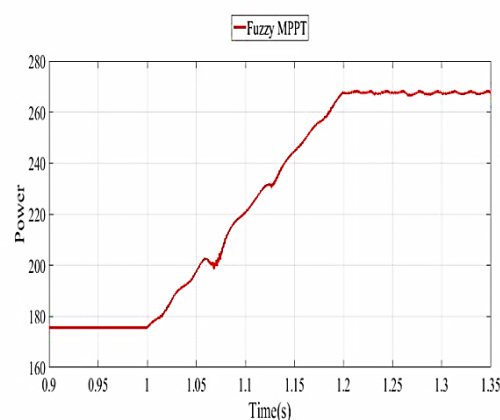
$$(r_{cpv}=0/05\Omega, r_{L1}=0/02\Omega, r_s=0/02 \Omega, r_{C1}=0/05 \Omega, r_d=0/02 \Omega, r_{L2}=0/02 \Omega, r_{C2}=0/05 \Omega).$$

شکل (۲۵)، عملکرد روش پیشنهادی و MPC را در حالتی نشان می‌دهد که تابش، تغییرات ناگهانی مثبت دارد. تابش در لحظه $t=2$ s از مقدار 1000 W/m^2 به مقدار 1500 W/m^2 به صورت ناگهانی تغییر می‌کند. دمای محیط برابر 25°C است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی در $t=2/02$ s به نقطه ماکزیمم توان می‌رسد؛ در حالی که روش MPC در $t=2/1$ s به نقطه ماکزیمم می‌رسد. در این مطالعه موردی روش پیشنهادی پاسخ‌دهی بهتر و سرعت دینامیکی بیشتری دارد. همچنین، روش MPC برای تغییرات ناگهانی تابش، عملکرد مناسبی ندارد. مقدار فروجهش در روش MPC بسیار زیاد است؛ به همین دلیل، زمان زیادی طول خواهد کشید تا روش کنترلی همگرا شود و در این مدت، توان از دست خواهد رفت؛ به دلیل اینکه معادلات مربوط به MPC به هم می‌خورند و روش کنترلی کارایی خود را از دست می‌دهد. در روش FMPC، فروجهش بسیار کمتر است؛ در نتیجه، سیستم به سرعت همگرا می‌شود و در مدت زمان خیلی کمتری به مقدار ماکزیمم توان می‌رسد و بازدهی سیستم افزایش می‌یابد.

دارد؛ درحالی‌که روش پیشنهادی نقطه ماکزیمم توان را با دقت خوبی دنبال می‌کند و می‌توان نتیجه گرفت وقتی از روش‌های MPC و FL-MPPT استفاده شود، کارایی سیستم کاهش می‌یابد. با ردیابی دقیق نقطه ماکزیمم توان با روش پیشنهادی، بازدهی سیستم افزایش می‌یابد.

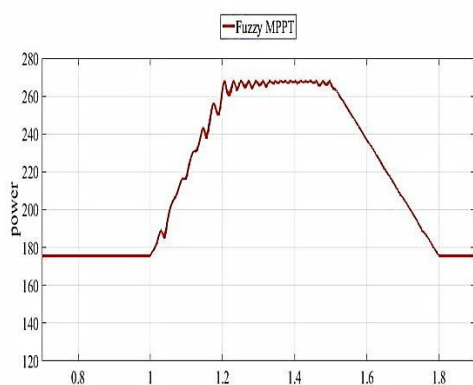


شکل (۲۲): عملکرد روش پیشنهادی و MPC برای تغییرات آرام در تابش در مطالعه موردی ۲



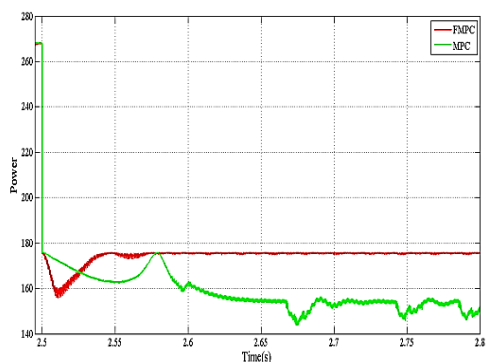
شکل (۲۳): عملکرد روش FL-MPPT برای تغییرات آرام در تابش در مطالعه موردی ۲

شکل (۲۴)، عملکرد روش پیشنهادی را در مقایسه با MPC در حالت ماندگار در مطالعه موردی ۲ نشان می‌دهد. با توجه به شکل اگر از MPC استفاده شود، نوسانات توان، افزایش و در نتیجه، بازدهی سیستم کاهش می‌یابد.



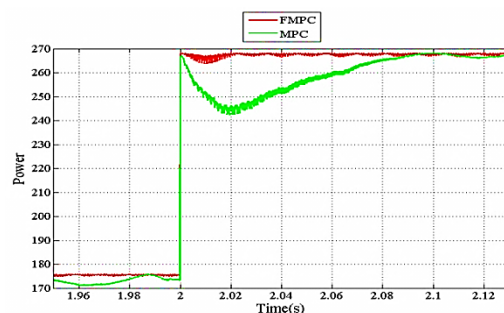
شکل (۲۷): عملکرد روش FL-MPPT برای تغییرات آرام در تابش در مطالعه موردی ۳

شکل (۲۸) و (۲۹)، عملکرد روش پیشنهادی، MPC و FL-MPPT را در حالتی نشان می‌دهند که تابش، تغییرات ناگهانی منفی دارد. تابش در لحظه $t=2/5$ s از مقدار 1500 W/m^2 به مقدار 1000 W/m^2 به صورت ناگهانی تغییر می‌کند. دمای محیط برابر 25°C است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی نقطه ماکزیمم توان را به خوبی پیدا می‌کند. در این حالت نیز معادلات مربوط به MPC جوابگو نیستند؛ در نتیجه، روش MPC توانایی ردیابی نقطه ماکزیمم توان را ندارد. همچنین، روش FL-MPC، فروجهش نسبتاً بزرگ و زمان پاسخ‌دهی نسبتاً طولانی دارد. در این حالت نیز روش MPC کاملاً واگرا است، نقطه ماکزیمم توان را پیدا نمی‌کند و از نقطه ماکزیمم توان دور می‌شود؛ در نتیجه، بازدهی سیستم کاهش می‌یابد.



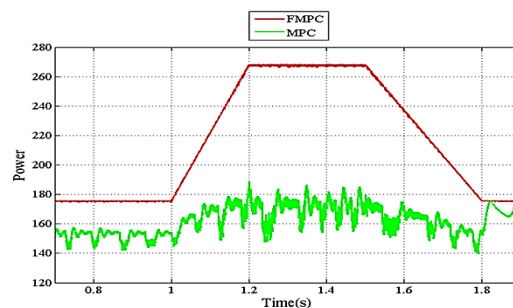
شکل (۲۸): عملکرد روش پیشنهادی و MPC برای تغییرات ناگهانی منفی در تابش در مطالعه موردی ۳

اگر تابش به صورت پله افزایش یابد، روش FMPC تمامی موارد آزمون جواب یکسانی دارد و این مفهوم را بیان



شکل (۲۹): عملکرد روش پیشنهادی و MPC برای تغییرات ناگهانی مثبت در تابش در مطالعه موردی ۳

شکل (۲۶) و (۲۷)، عملکرد روش پیشنهادی، MPC و FL-MPPT را در حالتی نشان می‌دهند که تابش، تغییرات شیب‌دار مثبت دارد. تابش در مدت 2 s از مقدار 1000 W/m^2 به مقدار 1500 W/m^2 به صورت شیب‌دار بالا می‌رود. همچنین، تابش در مدت 3 s از مقدار 1500 W/m^2 به مقدار 1000 W/m^2 به صورت شیب‌دار پایین می‌رود. دمای محیط برابر 25°C است. چون سیستم از حالت ایدئال دور شده است، معادلات مربوط به MPC جوابگو نیستند؛ در نتیجه، روش MPC نقاط ماکزیمم توان را ردیابی نمی‌کند. روش FL-MPPT، پاسخ نسبتاً بهتری نسبت به روش MPC دارد؛ در حالی که روش پیشنهادی نقطه ماکزیمم توان را با دقت خوبی دنبال می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت وقتی از روش‌های MPC و FL-MPPT استفاده شود، کارایی سیستم کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این حالت MPC کارایی خود را از دست می‌دهد و بازدهی سیستم به شدت کاهش می‌یابد.

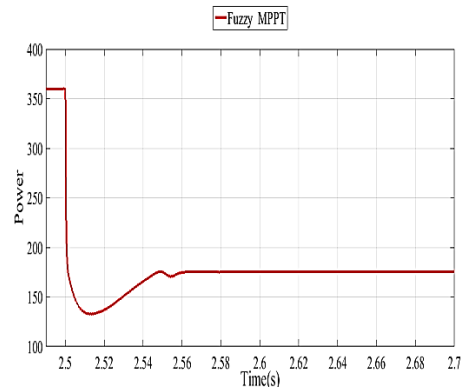


شکل (۲۶): عملکرد روش پیشنهادی و MPC برای تغییرات آرام در تابش در مطالعه موردی ۳

مراجع

- [1] M. Sedaghat, A. Siadatan, B. Taheri, " Photovoltaic Systems with Sliding Mode Control for Working in Maximum Power Point", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 9, No.3, pp. 77-90, summer 2018.
- [2] M. Niroomand, M. Sherkat, M. Soheili, "A high performance DC-DC converter with intelligent control for photovoltaic applications", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol.4, No.2, pp. 73-88, Autumn 2013.
- [3] Boukenoui R., Ghanes M., Barbot J.P., Bradai R., Mellit A. and Salhi H., " Experimental assessment of Maximum Power Point Tracking methods for photovoltaic systems", Vol. 132, pp. 324-340, *Energy* 2017.
- [4] Danandeh M.A., "Comparative and comprehensive review of maximum power point tracking methods for PV cells", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 82, pp.2743-2767, 2018.
- [5] Lasheen M., Rahman A.K.A., Abdel-Salam M. and Ookawara S., "Performance enhancement of constant voltage based MPPT for photovoltaic applications using genetic algorithm", *Energy Procedia*, Vol. 100, pp.217-222, 2016.
- [6] Leedy AW, Liping Guo, Aganah KA, "A constant voltage MPPT method for a solar powered boost converter with DC motor load," In: *Proceedings of IEEE Southeastcon*, pp. 1-6; 18-15, 2012;.
- [7] Salameh ZM, Dagher F, Lynch WA, " Step-down maximum power point tracker for photovoltaic systems," *Sol Energy*; Vol. 46, No. 5, pp. 279-82, 1991.
- [8] Wang H., Vinayagam L., Jiang H., Cai Z.Q. and Li H., "New MPPT solar generation implemented with constant-voltage constant-current DC/DC converter", In *2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [9] Leedy AW, Garcia KE, "Approximation of P-V characteristic curves for use in maximum power point tracking algorithms," In: *Proceedings of the system theory (SSST) 45th southeastern symposium*.pp.93-88, 2013.
- [10] Desai HP, Patel HK, " Maximum power point algorithm in PV generation: an overview," In: *Proceedings of the Power Electronics and Drive Systems PEDS 7th International Conference*. pp.630-24, 2007.
- [11] Abdel-Salam M., El-Mohandes M.T. and Goda M., "An improved perturb-and-observe based MPPT method for PV systems under varying irradiation levels", *Solar Energy*, Vol. 171, pp. 547-561, 2018.
- [12] Alik R. and Jusoh A., "Modified Perturb and Observe (P&O) with checking algorithm under various solar irradiation", *Solar Energy*, Vol. 148, pp. 128-139, 2017.
- [13] Abdelsalam AK, Massoud AM, Ahmed S, Enjeti

می‌کند که نامعینی سیستم بر روش کنترلی پیشنهادی تأثیری ندارد. روش MPC در دو آزمون اول پاسخ مطلوبی دارد؛ اما به محض افزایش نامعینی، فروجهش زیاد می‌شود، سرعت عملکرد سیستم به شدت کاهش می‌یابد و حتی وقتی تابش به صورت شیب‌دار تغییر کند، روش کنترلی از نقطه ماکزیمم دور می‌شود.



شکل (۲۹): عملکرد روش FL-MPPT برای تغییرات ناگهانی منفی در تابش در مطالعه موردی ۳

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، برای بهبود عملکرد کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، در صورت وجود عدم قطعیت در مدل مبدل DC-DC، یک کنترلر فازی پیشنهاد شد. رویکرد پیشنهادی با مطالعات موردی مختلف آزمایش شد.

نتایج شبیه‌سازی (با استفاده از نرم‌افزار MATLAB) تأیید می‌کنند اگر سیستم در حالت ایدئال باشد، روش پیشنهادی، روش‌های کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و روش کنترلر فازی مرسوم پاسخ‌دهی نسبتاً یکسانی دارند. در صورتی که سیستم در حالت واقعی و غیرایده‌آل باشد، روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و کنترلر فازی مرسوم توانایی ردیابی ماکزیمم توان را ندارند؛ اما روش پیشنهادی به خوبی نقطه ماکزیمم توان را ردیابی می‌کند و در نتیجه، بازدهی سیستم افزایش می‌یابد.

MPC معمولاً برای یک سیستم ایدئال طراحی می‌شود؛ درحالی‌که سیستم واقعی غیرایده‌آل است. روش پیشنهادی راه‌حلی مناسب برای حل این مشکل MPC است و نیاز به مقادیر واقعی مبدل و سنسورهای اضافی را حذف می‌کند.

- Techniques", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, pp.1-18, 2017.
- [26] Danandeh M.A., "Comparative and comprehensive review of maximum power point tracking methods for PV cells", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp.2743-2767, 2018.
- [27] Shmilovitz D, "On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters," *IEEP roc Elect Power Appl*; Vol. 152, No. 2, pp. 239–48, 2005.
- [28] Arias J, Linera FF, Martin-Ramos J, Pernia AM, Cambronero J," A modular PV regulator based on microcontroller with maximum power point tracking.", In: *Proceedings IEEE ind. appl. conference*; pp. 1178–84, 2004.
- [29] Liu YH, Liu CL, Huang JW, Chen JH," Neural-network-based maximum power point tracking methods for photovoltaic systems operating under fast changing environments," *Sol Energy*; Vol. 89,No. 53, 2013.
- [30] Algazar MM, Al-Monier H, EL-halim H A, Salem MEEK,"Maximum power point tracking using fuzzy logic control," *Int J Electr Power Energy Syst*; Vol. 39, No. 1, pp. 28–221, 2012.
- [31] Ben Salah C, Ouali M. Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems. *Elec Power Syst Res*; Vol. 81, No. 1, pp. 43-50, 2011.
- [32] Ozdemir S, Altin N, Sefa I. Fuzzy logic based MPPT controller for high conversion ratio quadratic boost converter. *Int J Hydrogen Energy*; Vol. 42, No. 28, pp.17748e59, 2017.
- [33] Kwan TH, Wu X. Maximum power point tracking using a variable antecedent fuzzy logic controller. *Sol Energy*; Vol. 13, pp. 189e200, 2016.
- [34] Ammirul M, Mohd A, Amran M, Radzi M, Soh AC, Rahim NA. Development of adaptive perturb and observe-fuzzy control maximum power point tracking for photovoltaic boost dc e dc converter. *IET Renew Power Gen*; 2014 (May 2013).
- [35] Soufi Y, Bechouat M, Kahla S. ScienceDirect Fuzzy-PSO controller design for maximum power point tracking in photovoltaic system. *Int J Hydrogen Energy*; Vol. 42, No. 13, pp. 8680e8, 2016.
- [36] Guenounou O, Dahhou B, Chabour F. Adaptive fuzzy controller based MPPT for photovoltaic systems. *Energy Convers Manag*; Vol. 78, pp. 843e50, 2014.
- [37] Alajmi BN, Ahmed KH, Finney SJ, Williams BW. Fuzzy logic controlled approach of a modified hill climbing method for maximum power point in microgrid stand-alone photovoltaic system. *IEEE Trans Power Electron*; Vol. 26, No. 4, 1022e30, 2011.
- [38] Harrabi N, Souissi M, Aitouche A, Chaabane M. Modeling and control of photovoltaic and fuel cell based alternative power systems. *Int J Hydrogen Energy*, pp. 1e11, 2018.
- [39] Harrag A, Messalti S. ScienceDirect How fuzzy logic can improve PEM fuel cell MPPT. *Int J Hydrogen Energy*; Vol. 3, pp. 1e14, 2017.
- P," High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids," *IEEE Trans Power Electron*; Vol. 26, No.4, pp. 1010–2021, 2011.
- [14] Elgendy MA, Zahawi B, Atkinson DJ," Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications," *IEEE Trans Sustain Energy*; Vol. 3, No. 1, pp. 21–33, 2012.
- [15] Ali A.I., Sayed M.A. and Mohamed E.E., "Modified efficient perturb and observe maximum power point tracking technique for grid-tied PV system", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 99, pp.192-202, 2018.
- [16] Sera D, Mathe L, Kerekes T, Spataru SV, Teodorescu R," On the perturb and observe and incremental conductance MPPT methods for PV systems," *IEEE J Photovoltaic*; Vol. 3, No. 3, pp. 1070–8, 2013.
- [17] Xiao X., Huang X. and Kang Q., "A hill-climbing-method-based maximum-power-point-tracking strategy for direct-drive wave energy converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 63, No. 1, pp.257-267, 2016.
- [18] Fatemi S.M., Shadlu M.S. and Talebkha A., "April. Comparison of Three-Point P&O and Hill Climbing Methods for Maximum Power Point Tracking in PV Systems", In *2019 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, pp. 764-768, 2019.
- [19] Ahmed A., Ran L. and Bumby J., " Perturbation parameters design for hill climbing MPPT techniques", In *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* , pp. 1819-1824, 2012.
- [20] Li X., Wen H., Jiang L., Hu Y. and Zhao C., "An improved beta method with autoscaling factor for photovoltaic system", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 52, No. 5, pp.4281-4291, 2016.
- [21] Mei Qiang, Shan Mingwei, Liu Liying, Guerrero JM," A novel improved variable step-size incremental-resistance MPPT method for PV systems," *IEEE Trans Ind Electron*; Vol. 58, No. 6, pp. 2427–34, 2011.
- [22] Jiang J-A, Huang T-L, Hsiao Y-T, Chen C-H. "Maximum power tracking for photovoltaic power systems", *Tamkang J Sci Eng*; Vol. 8, No. 2, pp. 147–53, 2005.
- [23] Safari A, Mekhilef S, "Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter," *IEEE Trans Ind Electron*; Vol. 58, No. 4, pp. 1154–61, 2011.
- [24] Necaibia S., Kelaiaia M.S., Labar H., Necaibia A. and Castronuovo E.D., "Enhanced auto-scaling incremental conductance MPPT method, implemented on low-cost microcontroller and SEPIC converter", *Solar Energy*, Vol. 180, pp. 152-168, 2019.
- [25] Karami N., Moubayed N. and Outbib R., "General review and classification of different MPPT

- [42] Gupta N, Garg R. Tuning of asymmetrical fuzzy logic control algorithm for SPV system connected to grid. *Int J Hydrogen Energy*; Vol. 42, No. 26, pp. 16375e85, 2017.
- [43] Lashab A, Sera D, Guerrero JM, Mathe L, Bouzid A. Discrete Model-Predictive-Control-Based Maximum Power Point Tracking for PV Systems: Overview and Evaluation. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol. 33, No. 8, pp. 7273-87, 2018.
- [40] Kottas TL, Boutalis YS, Karlis AD. New maximum power point tracker for PV arrays using fuzzy controller in close cooperation with fuzzy cognitive Networks. *IEEE Trans Energy Convers*; Vol. 21, No. 3, pp. 793e803, 2006.
- [41] Obeidi T, Zerguerras A, Larbes C, Ai SM. Genetic algorithms optimized fuzzy logic control for the maximum power point tracking in photovoltaic system. *Renew Energy*; Vol. 34, No. 10, pp. 2093e100, 2009.

¹ Maximum Power Point

² Maximum Power Point Tracking

³ Model predictive control

⁴ Perturb and observe (P&O) method

⁵ Hill climbing method

⁶ Variable step size incremental resistance (INR) method

⁷ Fuzzy logic control

۷۰ بهبود عملکرد کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در ردیابی ماکزیمم توان در سیستم فتوولتائیک با استفاده از ...