

کنترل مبدل افزایشنده در سیستم‌های فتوولتائیک با استفاده از کنترل‌کننده فازی

عبدالله کوتاهی^۱، مهدی زینالی^۲.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی برق - کنترل، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی تبریز (سهند)، ایران

(abdollahkotahi3@gmail.com)

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی تبریز (سهند)، ایران (zeinali@sut.ac.ir)

خلاصه

سیستم‌های فتوولتائیک به عنوان یکی از مهمترین فناوری‌های تبدیل انرژی خورشیدی، در سال‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای در تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر یافته‌اند. برای استخراج حداکثر توان از این سیستم‌ها، استفاده از الگوریتم‌های ردیابی نقطه بیشینه توان ضروری است. در این پژوهش، عملکرد مبدل افزایشنده در سیستم‌های فتوولتائیک با استفاده از کنترل‌کننده منطق فازی بررسی و با کنترل‌کننده PID مقایسه شده است. برای این منظور، یک روش MPPT مبتنی بر منطق فازی در نرم‌افزار Simulink طراحی و ارزیابی شد. مقایسه عملکرد دو روش بیانگر آن است که کنترل‌کننده FLC در مواجهه با تغییرات ورودی، عملکرد پایداری داشته و نسبت به کنترل‌کننده PID از کارایی بالاتری در ردیابی نقطه بیشینه توان برخوردار است.

کلمات کلیدی: سیستم‌های فتوولتائیک، منابع تجدیدپذیر، ردیابی نقطه بیشینه توان، کنترل‌کننده منطق فازی، کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی

۱. مقدمه

با افزایش نگرانی‌های جهانی در خصوص محدودیت منابع انرژی فسیلی، آلودگی‌های زیست‌محیطی و تغییرات اقلیمی، توسعه و بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر به یکی از مهم‌ترین اولویت‌های پژوهشی و صنعتی تبدیل شده است. در این میان، انرژی خورشیدی به دلیل فراوانی، دسترسی گسترده و سازگاری با محیط‌زیست، جایگاه ویژه‌ای در سبد انرژی کشورهای مختلف پیدا کرده است. سامانه‌های فتوولتائیک^۱ از پرکاربردترین فناوری‌های تولید برق تجدیدپذیر هستند و پیشرفت‌های اخیر در این حوزه عمدتاً بر بهبود طراحی، بهره‌برداری و نگهداری این سامانه‌ها متمرکز بوده است. این تلاش‌ها با هدف افزایش بازده، قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های عملیاتی صورت می‌گیرد [۱].

سامانه‌های PV دارای مزایای متعددی از جمله هزینه تعمیر و نگهداری پایین، عدم وجود قطعات متحرک و اثرات زیست‌محیطی ناچیز در زمان بهره‌برداری هستند [۲]. با این حال، توان خروجی این سامانه‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی نظیر شدت تابش خورشیدی و دمای محیط قرار دارد. از این‌رو، استخراج حداکثر توان قابل دسترس از پنل‌های خورشیدی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های فنی در طراحی سامانه‌های PV تبدیل شده است. برای دستیابی به این هدف،

¹ Photovoltaic Systems

روش‌های ردیابی نقطه حداکثر توان^۲ (MPPT)، توسعه یافته‌اند تا به صورت پیوسته نقطه عملکرد بهینه پنل خورشیدی را شناسایی کرده و بیشترین توان ممکن را استخراج کنند.

روش‌های متداول MPPT شامل روش جریان اتصال کوتاه^۳، روش ولتاژ ثابت^۴، روش صعود تپه‌ای^۵، روش رسانیایی افزایشی^۶ و روش اغتشاش و مشاهده^۷ هستند. اگرچه این روش‌ها به دلیل سادگی ساختار، هزینه پایین و سهولت پیاده‌سازی در بسیاری از کاربردهای عملی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما معمولاً بر پایه اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای ولتاژ و جریان عمل می‌کنند و در نتیجه در شرایط تغییرات سریع تابش و دما، با تأخیر در تشخیص جهت صحیح ردیابی و کاهش دقت عملکرد مواجه می‌شوند [۲].

در راستای رفع این محدودیت‌ها، پژوهشگران به استفاده از کنترل‌کننده‌های هوشمند و روش‌های پیشرفته کنترل روی آورده‌اند. یکی از پرکاربردترین ساختارهای کنترلی در سیستم‌های صنعتی، کنترل‌کننده تناسبی – انتگرالی – مشتقی^۸ (PID) است که به دلیل سادگی، پایداری و عملکرد مناسب در بسیاری از فرآیندهای کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود، عملکرد مطلوب کنترل‌کننده PID به تنظیم صحیح ضرایب آن وابسته است و انتخاب نامناسب این ضرایب می‌تواند موجب افزایش فراجش، زمان نشست و خطای حالت ماندگار شود.

همچنین در سال‌های اخیر، کنترل‌کننده‌های منطق فازی^۹ (FLC) به دلیل توانایی در مدیریت رفتارهای غیرخطی، عدم قطعیت‌ها و تغییرات محیطی بدون نیاز به مدل ریاضی دقیق، مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. برخلاف کنترل‌کننده‌های PID متداول، سیستم‌های مبتنی بر منطق فازی قادرند در شرایط تغییرات ناگهانی تابش خورشیدی و دما، پاسخ سریع‌تر و دقیق‌تری ارائه دهند. از این رو، استفاده از کنترل‌کننده‌های فازی در کاربردهای MPPT به عنوان یک راهکار مؤثر برای افزایش بازده سامانه‌های PV مطرح شده است.

مطالعات متعددی برای بهبود عملکرد PID در سامانه‌های PV انجام شده است. Yang و همکاران (۲۰۱۱)، یک کنترل‌کننده PID خودتنظیم مبتنی بر منطق فازی برای ردیابی نقطه حداکثر توان ارائه کردند [۳]. همچنین Sun و Hui (۲۰۱۰)، از یک کنترل‌کننده تطبیقی ترکیبی PID – FLC برای تنظیم ولتاژ خروجی مبدل افزایشی استفاده نمودند [۴]. Bachtiri و Salhi (۲۰۱۱)، یک سیستم MPPT برای پنل خورشیدی طراحی کردند که در آن از یک باتری به عنوان منبع ذخیره‌ساز انرژی و یک مبدل افزایشی^{۱۰} DC-DC استفاده شده بود. کنترل این مبدل توسط یک تنظیم‌کننده PI انجام می‌شد و پارامترهای این کنترل‌کننده با استفاده از روش بود (Bode) به منظور دستیابی به ردیابی حداکثر توان در شرایط مختلف تابش خورشیدی و دما تنظیم شده بودند [۵]. همچنین، Shafy و Nafeh (۲۰۱۱)، یک الگوریتم اصلاح‌شده MPPT برای سیستم شارژ باتری پنل خورشیدی ارائه کردند که در آن پارامترهای کنترل‌کننده PI با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده بودند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که روش پیشنهادی، در مقایسه با کنترل‌کننده‌های متداول، موجب بهبود دقت ردیابی، بهبود پاسخ دینامیکی و افزایش کارایی فرایند شارژ باتری شده است [۶]. در مطالعه‌ای دیگر، Besheer و Adly (۲۰۱۲)، از الگوریتم کلونی مورچگان برای تنظیم پارامترهای PI استفاده کردند [۷].

علاوه بر این، Dounis و همکاران (۲۰۱۳)، یک کنترل‌کننده PID با زمان‌بندی بهره فازی تطبیقی برای MPPT پیشنهاد کردند که در آن ضرایب PID بر اساس شرایط کاری سیستم تنظیم می‌شوند [۸]. Park و همکاران (۲۰۱۲) نیز

¹⁰ Boost Converter⁷ Perturb and Disturbance⁴ Constant Voltage² Maximum Power Point⁸ Proportional – Integral⁵ Hill Climbing

Tracking

– derivative Controller

⁶ Incremental³ Fractional Short Circuit⁹ Fuzzy Logic Controller

Conductance

Current

از شبکه عصبی مصنوعی برای تنظیم پارامترهای PID در کنترل مبدل DC-DC بهره گرفتند [۹]. همچنین Mohammad و همکاران (۲۰۱۳)، عملکرد کنترل‌کننده‌های مبتنی بر PID و منطق فازی را در شرایط سایه‌اندازی مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. در ادامه، Khateb و همکاران (۲۰۱۳)، یک روش بهینه‌سازی نوین مبتنی بر گرادیان کاهشی را برای تنظیم پارامترهای PID در سامانه‌های PV ارائه کردند [۱۱]. اگرچه نتایج این مطالعات نشان‌دهنده بهبود عملکرد ردیابی و کاهش خطاهای گذرا بوده است، اما در اغلب موارد ضرایب کنترل‌کننده پیش از راه‌اندازی سیستم و به صورت برون خط تعیین شده‌اند که این موضوع توانایی سازگاری کنترل‌کننده را در شرایط عملیاتی متغیر محدود می‌سازد.

پژوهش حاضر به مقایسه عملکرد کنترل‌کننده منطق فازی و کنترل‌کننده PID در فرآیند ردیابی نقطه حداکثر توان یک سامانه PV می‌پردازد. هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی توانایی هر یک از این روش‌ها در بهبود عملکرد MPPT و افزایش توان استخراجی از پنل خورشیدی است.

۲. توصیف مسئله و روش کنترلی

در این بخش، به توصیف کلی مسئله اعم از شرح پنل‌های خورشیدی، ردیابی نقطه حداکثر توان، مبدل DC – DC، کنترل‌کننده منطق فازی (FLC)، کنترل‌کننده تناسبی – انتگرالی – مشتقی (PID)، نرم‌افزار MATLAB و شبیه‌ساز Simulink و نهایتاً روش پژوهش پرداخته خواهد شد.

۱.۲ پنل‌های خورشیدی

پنل‌های خورشیدی مجموعه‌ای از سلول‌های خورشیدی هستند که در یک ساختار واحد و در یک سطح مشخص کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. پنل خورشیدی یک حسگر نوری PV است که توانایی تبدیل شدت نور دریافتی به ولتاژ خروجی را دارد [۱۲]. با دریافت تابش خورشید توسط سلول‌های خورشیدی، ولتاژ خروجی جریان مستقیم (DC) تولید می‌شود که مقدار آن به تعداد سلول‌های موجود در هر پنل بستگی دارد. هنگامی که فوتون‌های نور وارد سلول خورشیدی می‌شوند، انرژی نور جذب شده و موجب برانگیخته شدن الکترون‌ها در لایه سیلیکونی می‌گردد. این فرآیند باعث حرکت الکترون‌ها و ایجاد جریان الکتریکی شده و در نهایت جریان تولیدشده از طریق کابل‌ها به سیستم PV منتقل می‌شود [۱۳]. برق تولیدی توسط سامانه‌های PV از نوع جریان مستقیم است؛ از این رو برای تبدیل آن به جریان متناوب (AC) قابل استفاده در شبکه برق و تجهیزات الکتریکی، به یک یا چند اینورتر نیاز است. تمامی سامانه‌های PV با مجموعه‌ای از ماژول‌های خورشیدی^{۱۱} که تحت عنوان آرایه^{۱۲} فتوولتائیک شناخته می‌شوند، آغاز می‌گردند.

۲.۲ ردیابی نقطه حداکثر توان

در سامانه‌های PV، ردیابی نقطه حداکثر توان یکی از مهم‌ترین روش‌های کنترلی برای استخراج بیشترین توان از پنل‌های خورشیدی است. این روش با تنظیم نقطه کار الکتریکی پنل از طریق تغییر ولتاژ و جریان، شرایط عملکرد در نقطه بیشینه توان را فراهم می‌کند [۱۴]. برخلاف سامانه‌های ردیاب خورشید که مسیر تابش را به صورت مکانیکی دنبال می‌کنند، الگوریتم‌های MPPT تنها بر تغییر نقطه کار الکتریکی پنل متمرکز هستند [۱۵]. از آنجا که هر سلول خورشیدی دارای

¹² Array¹¹ Solar Modules



یک نقطه بیشینه توان بر روی منحنی‌های مشخصه ولتاژ - جریان و ولتاژ - توان است، شناسایی و حفظ این نقطه با استفاده از الگوریتم‌های MPPT نقش مهمی در افزایش بازده سامانه دارد [۱۶]. این الگوریتم‌ها معمولاً با همکاری یک مبدل DC-DC، نقطه کار پنل را حتی در شرایط متغیر تابش و دما در نزدیکی نقطه بیشینه توان نگه می‌دارند و از عوامل اصلی بهبود بهره‌وری سامانه‌های PV محسوب می‌شوند [۱۷].

مبدل DC-DC یکی از اجزای کلیدی در پیاده‌سازی MPPT است که با تنظیم ولتاژ و جریان خروجی، شرایط لازم برای دستیابی به نقطه حداکثر توان را فراهم می‌کند. این مبدل با بهره‌گیری از کلیدزنی و عنصر سلف، سطح ولتاژ مستقیم را بدون تغییر قطبیت تبدیل کرده و نسبت به منابع تغذیه خطی، بازده بالاتری ارائه می‌دهد؛ از این‌رو در اغلب منابع تغذیه کلیدزنی به کار گرفته می‌شود [۱۸-۱۹]. همچنین، کنترل ولتاژ خروجی در این مبدل‌ها بر پایه تنظیم زمان کلیدزنی و بازه‌های هدایت و قطع کلیدها انجام می‌شود.

۳.۲ کنترل‌کننده منطق فازی و PID

کنترل‌کننده منطق فازی بر پایه قواعد «اگر-آنگاه» عمل کرده و با بهره‌گیری از مفاهیم مجموعه‌های فازی، امکان تصمیم‌گیری در شرایط دارای عدم قطعیت و مقادیر مبهم را فراهم می‌سازد. این کنترل‌کننده از بخش‌هایی نظیر پایگاه قواعد، فازی‌سازی، پایگاه داده، واحد استنتاج و غیرفازی‌سازی تشکیل شده است که به‌صورت هماهنگ، ورودی‌های فازی را به خروجی مناسب تبدیل می‌کنند. به دلیل انعطاف‌پذیری و توانایی مدل‌سازی رفتار سامانه‌های پیچیده، منطق فازی به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در طراحی سامانه‌های کنترلی شناخته می‌شود [۲۰-۲۱].

کنترل‌کننده PID یکی از متداول‌ترین روش‌های کنترلی در کاربردهای صنعتی است که با ترکیب سه عملکرد تناسبی، انتگرالی و مشتقی، به‌ترتیب به خطای لحظه‌ای پاسخ داده، خطای ماندگار را کاهش داده و پایداری و پاسخ گذرای سامانه را بهبود می‌بخشد. با وجود سادگی ساختار و سهولت پیاده‌سازی، عملکرد PID کلاسیک در سامانه‌های غیرخطی یا متغیر با زمان ممکن است محدود شود؛ از این‌رو، نسخه‌های تطبیقی، هوشمند و غیرخطی آن برای افزایش استحکام، دفع اغتشاش و بهبود عملکرد رهگیری در سامانه‌های دینامیکی توسعه یافته‌اند [۲۲].

۳ شبیه‌سازی

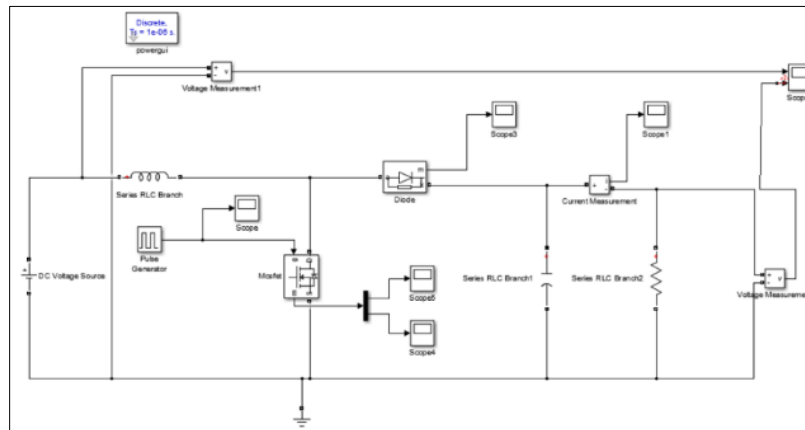
مراحل این پژوهش به بررسی روش‌ها، گام‌ها یا تکنیک‌های به‌کاررفته برای تحقق سامانه MPPT بر روی پنل‌های خورشیدی با استفاده از روش منطق فازی می‌پردازد. پیاده‌سازی این شبیه‌سازی با استفاده از نسخه R2015a نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. در این پژوهش، مدل پنل PV، مبدل افزایشنده، الگوریتم ردیابی نقطه توان بیشینه و کنترل‌کننده فازی در محیط Simulink پیاده‌سازی و عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف ارزیابی شد؛ سپس پارامترهایی نظیر ولتاژ، جریان، توان، زمان پاسخ، زمان نشست، ریپل خروجی و راندمان سیستم تحلیل و استخراج شدند. همچنین، پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱، پارامترهای مورد استفاده در Simulink

ردیف	پارامتر	نماد	مقدار	واحد	توضیح
۱	ولتاژ ورودی پنل	V_{pv}	۲۴/۳	V	ولتاژ نامی پنل در شرایط آزمون
۲	جریان ورودی پنل	I_{pv}	۸/۱۵	A	جریان تولیدی پنل
۳	توان ورودی پنل	P_{pv}	۱۹۸	W	توان تولیدی پنل خورشیدی
۴	ولتاژ خروجی مبدل	V_o	۴۸	V	ولتاژ تثبیت شده خروجی مبدل افزایشده
۵	جریان خروجی	I_o	۴	A	جریان خروجی مبدل افزایشده
۶	توان خروجی	P_o	۱۹۲/۵	W	توان تحویلی به بار
۷	ضریب وظیفه	D	۰/۴۹	-	Duty Cycle مقدار پایدار
۸	زمان صعود	t_r	۰/۰۱۸	s	زمان رسیدن خروجی از ۱۰ تا ۹۰ درصد
۹	زمان نشست	t_s	۰/۰۷۵	s	زمان ورود خروجی به محدوده $\pm 2\%$
۱۰	اضافه جهش	O_s	۱/۸	%	بیشترین افزایش نسبت به مقدار نهایی
۱۱	ریپل ولتاژ خروجی	ΔV	۰/۲	V	دامنه نوسان ولتاژ
۱۲	ریپل ولتاژ نسبی	-	۰/۴۲	%	درصد نوسان ولتاژ خروجی
۱۳	ریپل توان	ΔP	۱/۶	W	نوسان توان اطراف نقطه کار
۱۴	راندمان MPPT	η_{MPPT}	۹۸/۹	%	راندمان ردیابی
۱۵	راندمان مبدل افزایشده	η_{Boost}	۹۷/۲	%	راندمان مبدل افزایشده

۱.۳ شبیه‌سازی مبدل افزایشده

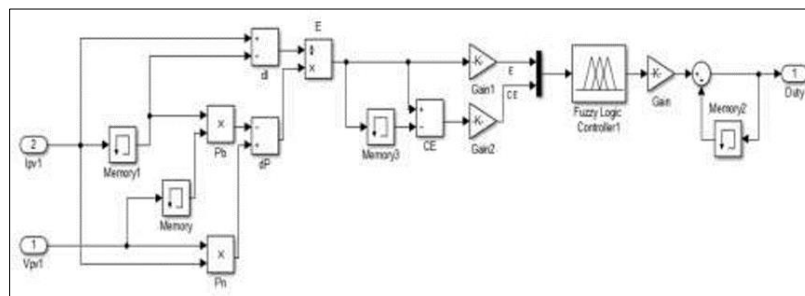
طراحی این مدار همچنین مستلزم تعیین پارامترهایی است که برای محاسبه میزان مقاومت، ظرفیت خازنی و اندوکتانس به کار می‌روند. این پارامترها بر اساس شبیه‌سازی انجام‌شده بر روی پنل خورشیدی تنظیم می‌شوند، به گونه‌ای که عملکرد مبدل افزایشده بتواند ولتاژ را از حداکثر ۲۱ ولت به ۴۰ ولت افزایش دهد. این مؤلفه‌ها نیز بر اساس کتابخانه معرفی‌شده در بخش پیشین و با استفاده از بلوک‌های پارامتری موجود در نرم‌افزار MATLAB، مطابق شکل زیر، تنظیم و تدوین می‌شوند.



شکل ۱، مدول مبدل افزایشنده در یک سیستم پنل خورشیدی

۲.۳ شبیه‌سازی سیستم کنترل فازی MPPT

بر اساس دیاگرام بلوکی در شکل ۳، فرایند عملکرد سامانه کنترل MPPT قابل توضیح است. منبع ولتاژ قابل کنترل از ولتاژ PV تأمین می‌شود و سپس FLC وظیفه کنترل مقدار سیکل وظیفه در مبدل را بر عهده دارد. پیش‌تر، برنامه الگوریتم FLC در محیط Simulink و با استفاده از روش ممدانی^{۱۳} پیاده‌سازی شده بود. نمایشگر در این بخش صرفاً برای نمایش ولتاژ ورودی (V) PV، توان (W)، جریان (A) و ولتاژ خروجی به کار می‌رود، همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۲، سامانه کنترل MPPT در یک سیستم پنل خورشیدی

۳.۳ شبیه‌سازی مدول پنل خورشیدی بر پایه سیستم MPPT

شبیه‌سازی‌ای که برای سامانه MPPT به صورت کلی طراحی خواهد شد، مجموعه‌ای از تمام بلوک‌های اصلی و پشتیبان است که طراحی و همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده، شبیه‌سازی خواهند شد.

¹³ Mamdani Inference Method



تمام زیرسامانه‌ها در یک سامانه MPPT یکپارچه شده و به سایر اجزا متصل می‌شوند. داده‌های مورد مشاهده شامل مقدار ولتاژ و جریان خروجی از پنل خورشیدی است تا از طریق کنترل FLC، مقدار سیکل وظیفه تعیین شده و مبدل افزایشدهنده به درستی کنترل شود. در این پژوهش، این سامانه در آزمون‌های مربوط به یک سیستم PV بدون MPPT و یک سیستم PV همراه با MPPT به کار گرفته خواهد شد. دو نوع داده ورودی برای استفاده در نظر گرفته شده است که هر یک دارای پارامترهای ورودی ثابت و متغیر به شرح زیر هستند:

الف) داده‌هایی با پارامتر متغیر به صورت تغییر مقدار بار، و داده‌هایی با پارامتر ثابت به صورت دمای ماژول و تابش.

ب) داده‌هایی با پارامتر متغیر به صورت تغییر مقدار تابش، و داده‌هایی با پارامتر ثابت به صورت دمای ماژول و بار.

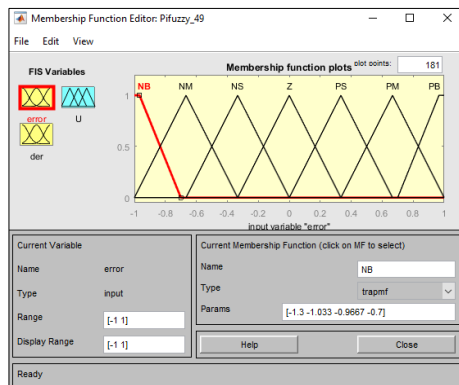
۴ طراحی کنترل کننده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی

۴.۱ طراحی کنترل کننده فازی

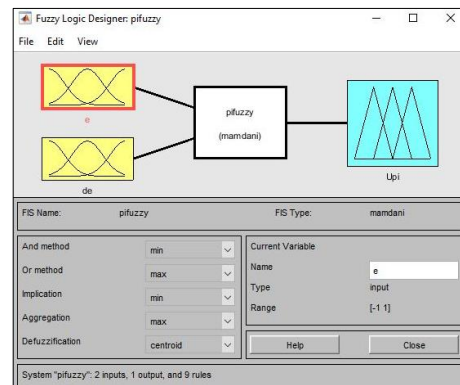
کنترل کننده فازی یک روش کنترلی مبتنی بر استدلال زبانی است که عملکرد آن مشابه تصمیم‌گیری یک اپراتور انسانی در مواجهه با شرایط مختلف سیستم می‌باشد. در این روش، اپراتور با مشاهده رفتار سیستم و بهره‌گیری از تجربیات و دانش موجود در پایگاه قواعد، فرمان کنترلی مناسب را تولید می‌کند. برخلاف روش‌های کلاسیک طراحی کنترل مانند مکان هندسی ریشه، پاسخ فرکانسی و جایابی قطب‌ها، طراحی کنترل کننده فازی بر پایه تعریف متغیرهای زبانی و قوانین استدلال استنتاجی صورت می‌گیرد. ساختار این کنترل کننده شامل چهار بخش اصلی فازی‌سازی، پایگاه قواعد و پایگاه داده فازی، موتور استنتاج و غیرفازی‌سازی است.

در مرحله فازی‌سازی، مقادیر واقعی متغیرهای سیستم به مجموعه‌های فازی تبدیل می‌شوند. در کنترل کننده پیشنهادی، خطا (E) و تغییرات خطا (CE) به عنوان ورودی‌های کنترل کننده و تغییرات سیکل کاری مبدل ΔD به عنوان خروجی در نظر گرفته شده‌اند. متغیرهای مذکور با استفاده از توابع عضویت و برچسب‌های زبانی نظیر منفی بزرگ (NB)، منفی کوچک (NS)، صفر (ZO)، مثبت کوچک (PS) و مثبت بزرگ (PB) فازی‌سازی می‌شوند. سپس موتور استنتاج با بهره‌گیری از پایگاه قواعد فازی، رابطه بین ورودی‌ها و خروجی را تعیین می‌کند. با فرض هفت تابع عضویت برای هر ورودی، تعداد قوانین فازی برابر با $(7 \times 7 = 49)$ قانون خواهد بود که تمامی حالات ممکن را پوشش می‌دهد. قواعد پایگاه داده در جدول ۲ نشان داده شده است. در نهایت، خروجی حاصل از فرآیند استنتاج که به صورت فازی بیان شده است، توسط بخش غیرفازی‌سازی به یک مقدار عددی دقیق تبدیل می‌شود تا به عنوان سیگنال کنترلی مورد استفاده قرار گیرد. از میان روش‌های متداول غیر فازی‌سازی، روش مرکز سطح^{۱۴} به دلیل دقت و عملکرد مناسب، برای محاسبه مقدار ΔD انتخاب شده است. بدین ترتیب، کنترل کننده فازی قادر خواهد بود با بهره‌گیری از دانش تجربی و بدون نیاز به مدل ریاضی دقیق سیستم، عملکرد مطلوبی را در شرایط مختلف کاری فراهم سازد. روند عملیات طراحی کنترل کننده فازی در شکل ۳ ارائه شده است.

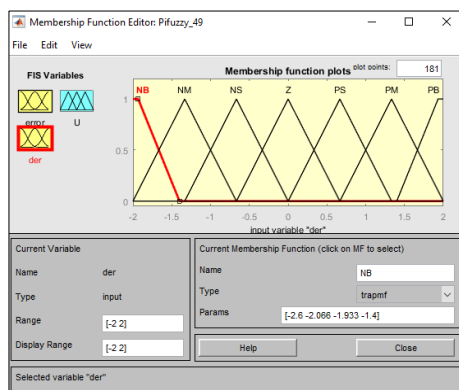
¹⁴ Center of Area



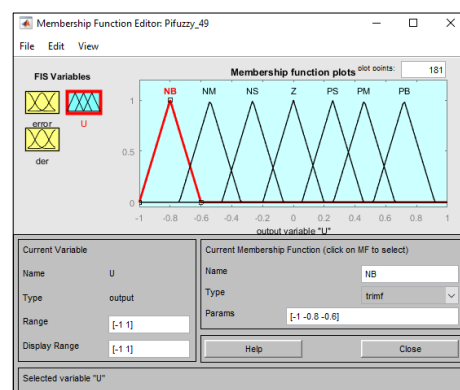
(ب) تابع عضویت خطا



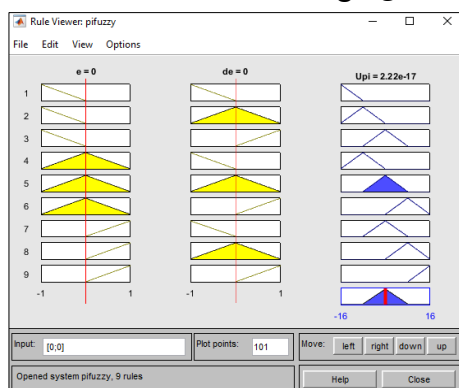
(الف) طراحی تابع اولیه



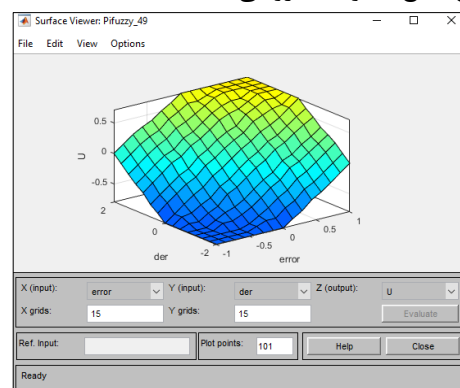
(د) مشتق تابع خطا



(ج) تابع عضویت خروجی



(و) فازی‌زدایی



(ه) رویه خارجی (توابع خطا، مشتق و خروجی)

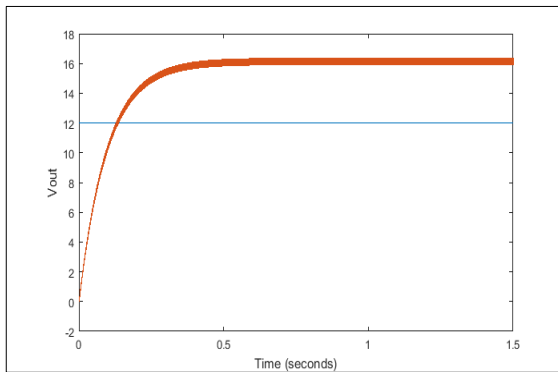
شکل ۳، الگوریتم منطق فازی و فازی‌زدایی در نرم‌افزار Simulink

جدول ۲، پایگاه داده فازسازی

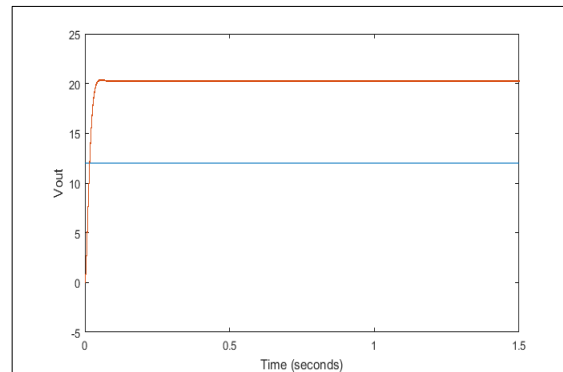
$E \downarrow / CE \rightarrow$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	ZE	ZE	ZE	NB	NB	NB	NB
NM	ZE	ZE	ZE	NM	NM	NM	NM
NS	NM	ZE	ZE	NS	NS	NS	NS
ZE	NM	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PM
PS	PM	PS	PS	PS	ZE	ZE	PS
PM	PM	PM	PM	PM	ZE	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	PB	ZE	ZE	ZE

۴.۲ نتایج شبیه سازی مبدل افزایشنده در حالت حلقه باز

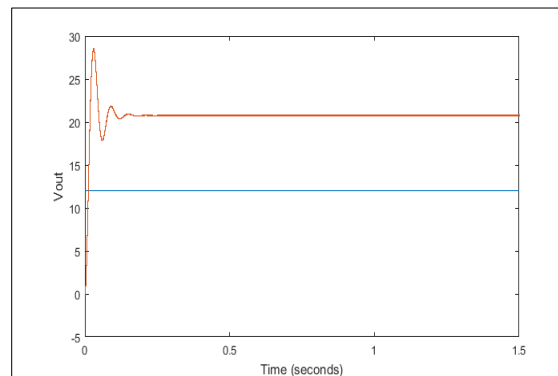
از آنجا که هدف اصلی این پژوهش، بررسی عملکرد روش ردیابی نقطه حداکثر توان در شرایط مختلف بار است، سایر پارامترهای سیستم ثابت در نظر گرفته شده‌اند. در این بخش، تأثیر تغییرات بار مقاومتی بر عملکرد مبدل افزایشنده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور، ابتدا ولتاژ خروجی مبدل برای بار مقاومتی اولیه محاسبه و تحلیل شده است. نتایج مربوط به عملکرد مبدل بدون اعمال کنترل، برای ولتاژ ورودی ۱۲ ولت و ولتاژ خروجی ۲۰ ولت، در شکل ۴ - الف ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در بار ۳۲۰۰ اهم، ولتاژ خروجی به مقدار مطلوب نزدیک می‌شود؛ از این رو، به منظور ارزیابی اثر کاهش مقاومت بار، مقدار آن به ۱۰۰۰ اهم کاهش یافته است. مطابق نتایج شکل ۴ - ب، کاهش مقاومت بار موجب افت ولتاژ خروجی می‌شود که ضرورت به کارگیری روش‌های کنترلی مناسب برای جبران این افت را نشان می‌دهد. در ادامه، با افزایش مقدار مقاومت بار و ثابت نگه داشتن چرخه کاری مبدل، رفتار ولتاژ خروجی مجدداً بررسی شده است. همان گونه که در شکل ۴ - ج، مشاهده می‌شود، با افزایش بار به ۱۰۰۰۰ اهم، ولتاژ خروجی در ابتدای بازه زمانی (کمتر از ۰.۵ ثانیه) دارای نوسان بوده و سپس به تدریج به مقدار پایدار حدود ۲۲ ولت همگرا می‌شود. این نتایج بیانگر تأثیر مستقیم تغییرات بار بر ولتاژ خروجی مبدل و لزوم استفاده از راهکارهای کنترلی برای حفظ پایداری ولتاژ در شرایط مختلف بار است.



ب) ولتاژ ورودی و خروجی با بار ۱۰۰۰ اهم



الف) ولتاژ ورودی و خروجی با بار ۳۲۰۰ اهم



ج) ولتاژ ورودی و خروجی با بار ۱۰۰۰۰ اهم

شکل ۴، ولتاژ ورودی و خروجی با بارهای مختلف در یک چرخه کار ثابت (۴۲/۵ درصد)

۴.۳ نتایج شبیه‌سازی با کنترل‌کننده PI

نتایج بخش قبل نشان داد که تغییرات بار مستقیماً بر ولتاژ خروجی مبدل افزاینده تأثیرگذار است، در حالی که هدف اصلی این پژوهش، دستیابی به ولتاژ خروجی ثابت در برابر تغییرات بار و ولتاژ ورودی است. به همین منظور، از کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی (PI) برای تنظیم چرخه کاری مبدل استفاده شده است. ضرایب این کنترل‌کننده به روش آزمون و خطا انتخاب شده‌اند. جدول ۳، روند آزمون و خطا را برای به دست آوردن این مقادیر نشان داده است. در این ساختار، تغییرات بار موجب تغییر جریان و در نتیجه تغییر شرایط کاری مبدل می‌شود. کنترل‌کننده PI با دریافت سیگنال فیدبک از خروجی و محاسبه سیگنال خطا، پالس‌های PWM^{۱۵} مورد نیاز برای کلیدزنی IGBT^{۱۶} را تولید کرده و از این طریق چرخه کاری را به صورت لحظه‌ای تنظیم می‌کند. در نتیجه، سیستم قادر خواهد بود با وجود تغییرات بار و ولتاژ ورودی، ولتاژ خروجی را در مقدار مرجع حفظ کرده و عملکرد پایدارتری نسبت به حالت بدون کنترل ارائه دهد.

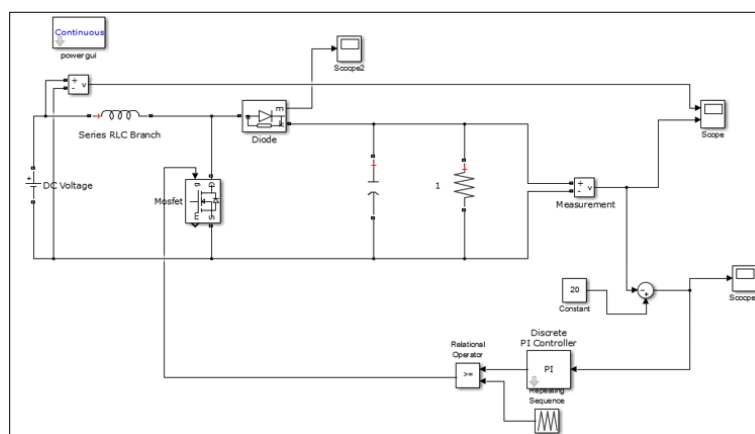
^{۱۶} Insulated Gate Bipolar Transistor

^{۱۵} Pulse – Width Modulation

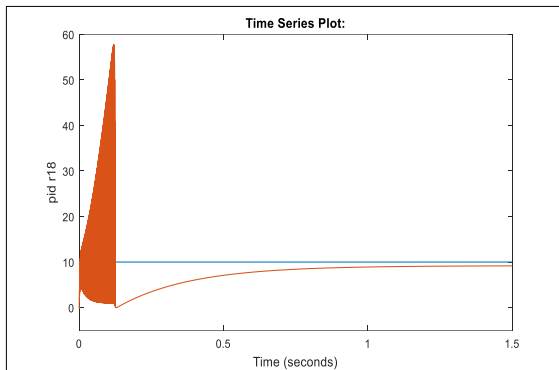
جدول ۳، نتایج آزمون و خطای انتخاب ضرایب کنترل کننده مشتقی - انتگرالی

آزمون	K_p	K_i	K_d	زمان پاسخ	ریپل خروجی	پایداری	نتیجه
۱	۲	۰/۲	۰/۰۲	کند	زیاد	متوسط	رد شد
۲	۵	۰/۳	۰/۰۲	متوسط	متوسط	خوب	قابل قبول
۳	۸	۰/۴	۰/۰۲	سریع	کم	خوب	مناسب
۴	۱۰	۰/۵	۰/۰۲	سریع	کم	بسیار خوب	انتخاب نهایی
۵	۱۲	۰/۷	۰/۰۲	بسیار سریع	افزایش نوسان	متوسط	رد شد

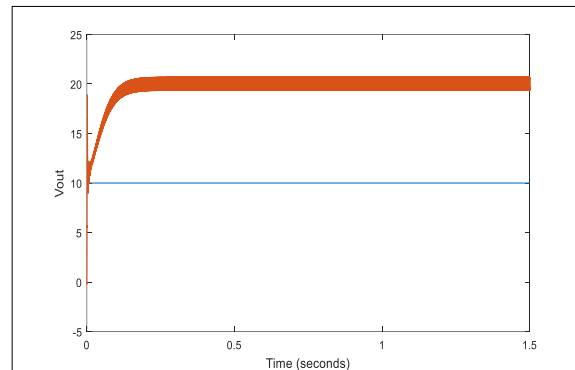
به منظور ارزیابی عملکرد کنترل کننده PI، شکل موج‌های ولتاژ خروجی برای ولتاژ ورودی ۱۰ ولت و ولتاژ مرجع ۲۰ ولت در بارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا عملکرد سیستم در بار ۳۲۰۰ اهم ارزیابی شده و سپس با کاهش بار تا یک سوم مقدار اولیه، پاسخ دینامیکی مبدل تحلیل شده است. شکل ۵، شبیه‌سازی کنترل کننده PI را در Simulink نشان داده است. همین طور، ولتاژهای ورودی و خروجی کنترل کننده در بارهای مختلف در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در تغییرات جزئی بار، کنترل کننده PI قادر به حفظ ولتاژ خروجی در مقدار مطلوب بوده و تنها ریپل اندکی در خروجی مشاهده می‌شود. با این حال، در بارهای بسیار پایین، از جمله ۱۸ اهم، ولتاژ خروجی کاهش یافته و رفتار آن به ولتاژ ورودی نزدیک می‌شود که بیانگر ورود مبدل به ناحیه هدایت گسسته و کاهش توانایی کنترل کننده در حفظ ولتاژ مرجع است. از سوی دیگر، با افزایش بار تا ۵۰۰۰ اهم، تنها در نیم‌ثانیه ابتدایی یک افت گذرا در ولتاژ خروجی مشاهده می‌شود و پس از آن ولتاژ به مقدار مرجع همگرا می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که کنترل کننده PI در بازه وسیعی از تغییرات بار، عملکرد مطلوبی در تثبیت ولتاژ خروجی داشته و تنها در شرایط بارهای بسیار سبک یا بسیار سنگین با محدودیت‌هایی مواجه می‌شود.



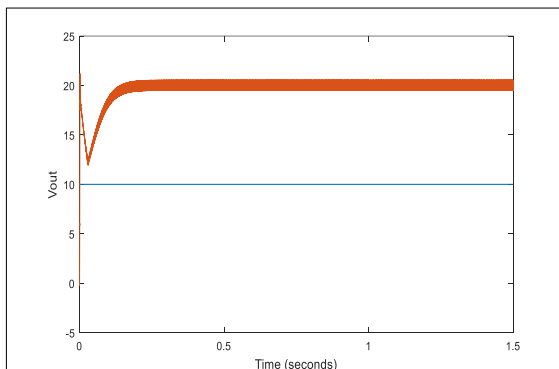
شکل ۵، کنترل کننده PI در یک سیستم پل خورشیدی



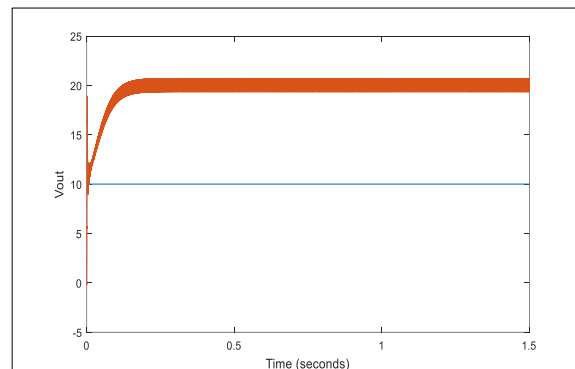
ب) ولتاژ ورودی و خروجی با کنترل کننده PI با بار ۱۸ اهم



الف) ولتاژ ورودی و خروجی کنترل کننده PI با بار ثابت



د) ولتاژ ورودی و خروجی با کنترل کننده PI با بار ۵۰۰۰ اهم

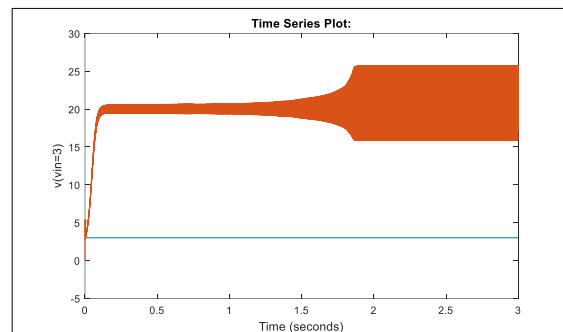
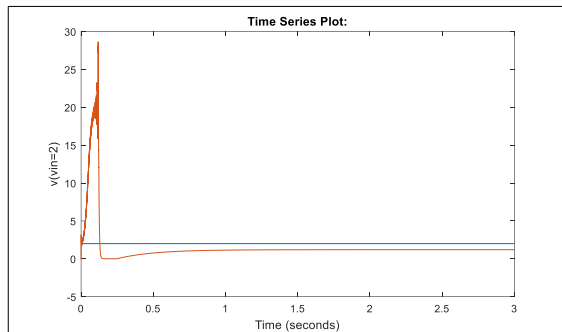


ج) ولتاژ ورودی و خروجی با کنترل کننده PI با بار ۳۲۰۰ اهم

شکل ۶، ولتاژ ورودی و خروجی کنترل کننده PI در بارهای مختلف

۴.۴ تاثیر مقدار ولتاژ ورودی بر ولتاژ خروجی

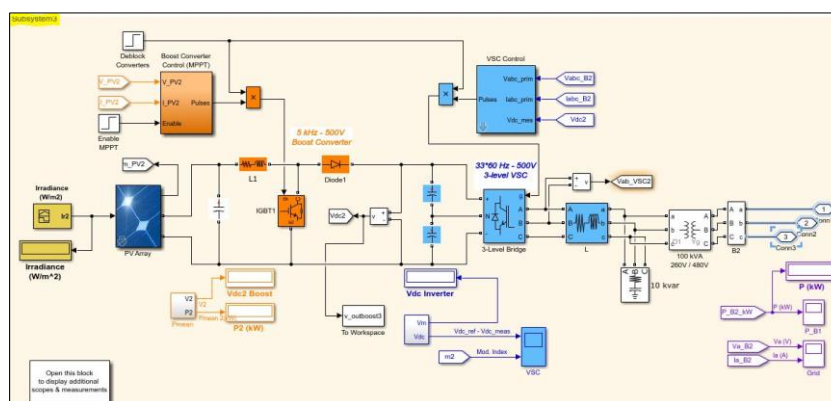
به منظور بررسی تأثیر تغییرات ولتاژ ورودی بر عملکرد مبدل افزایشدهنده مجهز به کنترل کننده PI، ولتاژ ورودی در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در صورتی که ولتاژ ورودی از مقدار ولتاژ مرجع خروجی بیشتر شود، مبدل افزایشدهنده دیگر قادر به کاهش ولتاژ نبوده و ولتاژ خروجی عملاً ولتاژ ورودی را دنبال می‌کند؛ به عبارت دیگر، مبدل در این شرایط عملکرد تقویت‌کنندگی خود را از دست می‌دهد. برای مثال، در سیستمی با ولتاژ مرجع خروجی ۲۰ ولت، اگر ولتاژ ورودی از ۲۰ ولت فراتر رود، حتی با وجود کنترل کننده PI، ولتاژ خروجی تقریباً برابر با ولتاژ ورودی خواهد بود. با این حال، در محدوده عملکرد مجاز مبدل، کنترل کننده PI با دریافت سیگنال فیدبک از خروجی و محاسبه سیگنال خطا، چرخه کاری مبدل را از طریق تولید پالس‌های PWM تنظیم می‌کند تا اثر تغییرات بار و ولتاژ ورودی بر خروجی به حداقل برسد. نتایج ارائه‌شده در شکل ۷، شامل پاسخ سیستم برای مقادیر مختلف ولتاژ ورودی، نشان می‌دهد که کنترل کننده PI در محدوده عملکرد مبدل قادر به حفظ پایداری ولتاژ خروجی است، اما با افزایش ولتاژ ورودی به مقادیری بالاتر از ولتاژ مرجع، محدودیت ذاتی مبدل افزایشدهنده آشکار شده و خروجی از ولتاژ ورودی تبعیت می‌کند.



الف) ولتاژ ورودی و خروجی با کنترل‌کننده PI با ولتاژ ورودی ۳ ولت (ب) ولتاژ ورودی و خروجی با کنترل‌کننده PI با ولتاژ ورودی ۲ ولت
شکل ۷، تاثیر ولتاژ ورودی بر ولتاژ خروجی در کنترل‌کننده PI

۴.۵ سیستم پنل خورشیدی سه فاز

پس از بررسی ساختار و عملکرد مبدل افزایشنده، به منظور ارزیابی عملکرد آن در یک کاربرد عملی، شبیه‌سازی سیستم PV متصل به مبدل افزایشنده انجام شده است. همان‌گونه که در شکل ۸ مشخص است، ساختار سیستم شامل آرایه خورشیدی، کنترل‌کننده ردیابی نقطه حداکثر توان و مبدل DC-DC از نوع افزایشنده است. با توجه به پایین بودن سطح ولتاژ خروجی سلول‌های خورشیدی، استفاده از مبدل افزایشنده به منظور افزایش ولتاژ و تطبیق امپدانس بین آرایه خورشیدی و بار ضروری است. علاوه بر افزایش ولتاژ، قابلیت تغییر مقاومت ورودی مبدل از طریق تنظیم چرخه کاری سیگنال PWM این امکان را فراهم می‌کند که نقطه کار آرایه خورشیدی به صورت پیوسته کنترل شود. در فرآیند شبیه‌سازی، ابتدا یک مدل دقیق از سلول خورشیدی با رفتار نزدیک به نمونه واقعی در محیط شبیه‌سازی پیاده‌سازی شده و سپس کنترل‌کننده MPPT به همراه مبدل افزایشنده به آن متصل شده است. الگوریتم MPPT با اندازه‌گیری لحظه‌ای ولتاژ و توان خروجی آرایه، شیب منحنی توان را محاسبه کرده و بر اساس آن، از طریق تغییر چرخه کاری سیگنال PWM، ولتاژ آرایه را افزایش یا کاهش می‌دهد. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که شیب منحنی توان به صفر رسیده و نقطه کار سیستم بر نقطه حداکثر توان (MPP) منطبق شود. در نتیجه، سیستم قادر خواهد بود با وجود تغییرات شرایط کاری، بیشترین توان قابل استخراج از آرایه خورشیدی را دریافت کرده و بازده کلی سامانه را بهبود بخشد.



شکل ۸، نمودار شماتیک اصلی و کلی مبدل افزایشنده در مدول پنل خورشیدی سه فاز



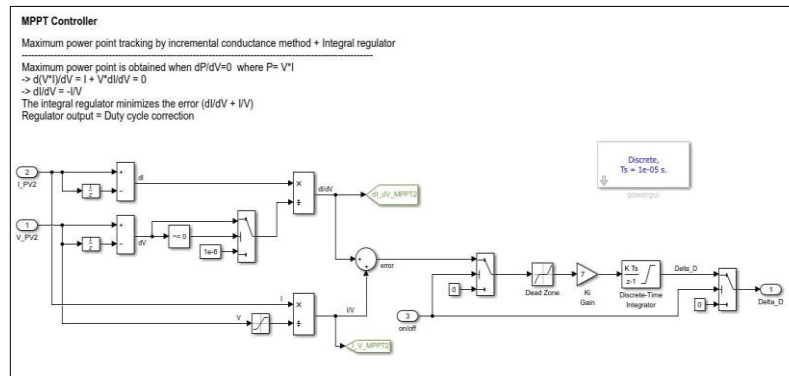
۴.۶ مقایسه ولتاژ پنل خورشیدی برای کنترل‌کننده PID و FLC

به‌منظور ارزیابی عملکرد روش‌های کنترلی در تثبیت ولتاژ آرایه فتوولتائیک، پاسخ دینامیکی سیستم با استفاده از کنترل‌کننده‌های PID و فازی (FLC) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. شکل‌های ۹ و ۱۰ به‌ترتیب ساختار کنترل‌کننده‌های PID و FLC و همچنین پاسخ ولتاژ خروجی آن‌ها را نشان می‌دهند. در این نمودارها، منحنی قرمز بیانگر عملکرد کنترل‌کننده PID و منحنی آبی نشان‌دهنده عملکرد کنترل‌کننده فازی است.

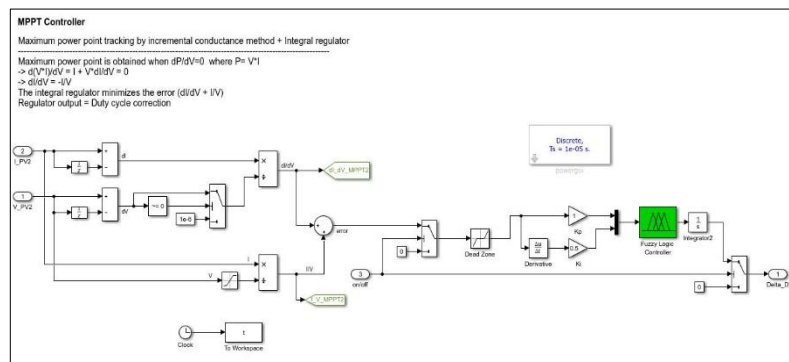
مطابق نتایج شبیه‌سازی، در هر دو روش کنترلی، در لحظه راه‌اندازی سیستم به دلیل شرایط گذرای اولیه و شارژ عناصر ذخیره‌کننده انرژی، نوسانات قابل توجهی در ولتاژ خروجی مشاهده می‌شود. با این وجود، دامنه این نوسانات به‌سرعت کاهش یافته و ولتاژ خروجی در مدت زمان کوتاهی به مقدار پایدار اولیه، در حدود ۸۵ ولت، همگرا می‌شود. این موضوع بیانگر توانایی هر دو کنترل‌کننده در حذف خطای حالت ماندگار و تثبیت ولتاژ در شرایط اولیه بهره‌برداری است.

در زمان حدود ۰/۴ ثانیه، به‌دنبال تغییر ناگهانی شرایط کاری سیستم، نظیر تغییر شدت تابش خورشیدی، تغییر بار یا جابه‌جایی نقطه کار آرایه، ولتاژ مرجع از حدود ۸۵ ولت به نزدیک ۲۷۵ ولت افزایش می‌یابد. در این شرایط، تفاوت عملکرد دو روش کنترلی به وضوح نمایان می‌شود. کنترل‌کننده PID با سرعت بالایی به تغییر مرجع پاسخ داده و ولتاژ خروجی را در مدت کوتاهی به مقدار جدید می‌رساند. با این حال، پس از رسیدن به مقدار مرجع، نوسانات و ریب‌ل محدودی در اطراف نقطه تنظیم مشاهده می‌شود که بیانگر حساسیت این کنترل‌کننده به تغییرات ناگهانی و وابستگی عملکرد آن به تنظیم دقیق ضرایب کنترلی است. هرچند این ویژگی موجب کاهش زمان پاسخ می‌شود، اما وجود نوسانات ماندگار می‌تواند کیفیت توان را کاهش داده، تنش الکتریکی وارد بر تجهیزات قدرت را افزایش دهد و در نهایت بر بازده عملیاتی سامانه اثر منفی بگذارد. در مقابل، کنترل‌کننده فازی افزایش ولتاژ را به‌صورت تدریجی و با شیب ملایم‌تری انجام می‌دهد. اگرچه زمان رسیدن به مقدار نهایی در این روش اندکی بیشتر از کنترل‌کننده PID است، اما پس از استقرار، ولتاژ خروجی با ریب‌ل بسیار ناچیز و تقریباً بدون نوسان حول مقدار مرجع تثبیت می‌شود. این رفتار نشان‌دهنده قابلیت بالای کنترل‌کننده فازی در کنترل سیستم‌های غیرخطی نظیر سامانه‌های PV است. بهره‌گیری از قوانین استنتاج فازی، بدون نیاز به مدل دقیق ریاضی سیستم، امکان مدیریت مناسب تغییرات لحظه‌ای را فراهم کرده و از ایجاد اضافه‌جهش و نوسانات اضافی جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، کاهش محسوس ریب‌ل ولتاژ خروجی موجب بهبود کیفیت توان، کاهش تنش و استهلاک کلیدهای قدرت و افزایش پایداری عملکرد مبدل DC-DC می‌شود.

به‌طور کلی، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که هر دو کنترل‌کننده قابلیت تثبیت ولتاژ آرایه فتوولتائیک و دنبال‌کردن تغییرات نقطه کار را دارا هستند. با این حال، کنترل‌کننده فازی از نظر پایداری، نرمی پاسخ و مقاومت در برابر تغییرات شرایط کاری عملکرد مطلوب‌تری ارائه می‌دهد. اگرچه کنترل‌کننده PID از لحاظ سرعت پاسخ اولیه برتری نسبی دارد، اما کنترل‌کننده فازی با کاهش نوسانات، ریب‌ل کمتر، پایداری بیشتر در حالت ماندگار و عملکرد مقاوم‌تر در برابر تغییرات محیطی، گزینه مناسب‌تری برای کاربردهای ردیابی نقطه حداکثر توان در سامانه‌های PV محسوب می‌شود. این ویژگی‌ها، به‌ویژه در شرایط تغییرات پیوسته شدت تابش خورشید و دمای محیط، موجب افزایش دقت ردیابی نقطه بیشینه توان و در نهایت بهبود بازده کلی سیستم تولید انرژی خورشیدی خواهند شد. نتایج کنترل‌کننده‌های PID و FLC در جدول ۴ مقایسه شده‌اند.

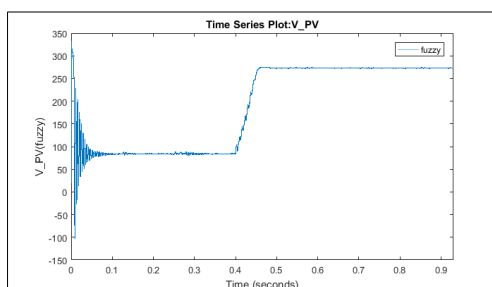


الف) مدول Simulink کنترل‌کننده بر پایه PID

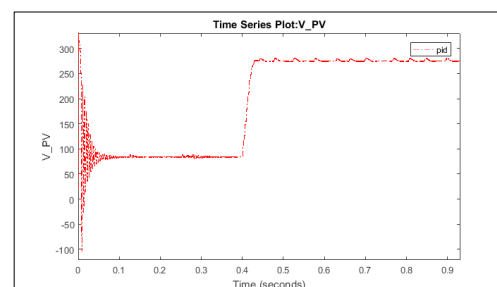


ب) مدول Simulink کنترل‌کننده بر پایه FLC

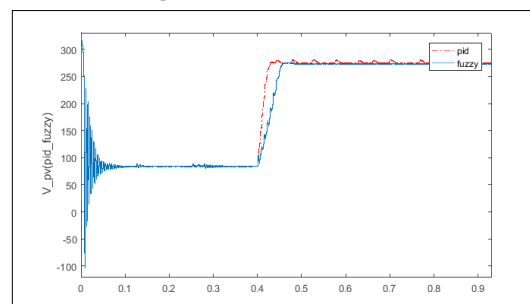
شکل ۹، مدول‌های کنترل‌کننده‌ها بر پایه PID و FLC



ب) خروجی ولتاژ کنترل‌کننده FLC



الف) خروجی ولتاژ کنترل‌کننده PID



ج) مقایسه خروجی ولتاژ کنترل‌کننده PID و FLC

شکل ۱۰، نمودارهای خروجی ولتاژ کنترل‌کننده‌های PID و FLC

جدول ۴، مقایسه عملکرد کنترل‌کننده PID و FLC

شاخص عملکرد	کنترل‌کننده PID	کنترل‌کننده FLC	نتیجه
زمان صعود ^{۱۷}	۰/۰۲۰ ثانیه	۰/۰۲۳ ثانیه	PID سریعتر
زمان نشست ^{۱۸}	۰/۰۸۲ ثانیه	۰/۰۶۱ ثانیه	FLC بهتر
فراجهش ^{۱۹}	۴/۵٪	۰/۸٪	FLC بهتر
خطای حالت ماندگار	کم	نسبتاً صفر	FLC بهتر
ریپل ولتاژ خروجی	۰/۴۲ ولت	۰/۱۷ ولت	FLC بهتر
نوسانات خروجی	نسبتاً زیاد	بسیار کم	FLC بهتر
مقاومت در برابر تغییرات تابش	متوسط	بسیار خوب	FLC بهتر
مقاومت در برابر تغییرات بار	خوب	بسیار خوب	FLC بهتر
راندمان ردیابی MPPT	۹۷/۶٪	۹۹/۱٪	FLC بهتر

۵ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد کنترل‌کننده منطق فازی و کنترل‌کننده PID در فرآیند ردیابی نقطه حداکثر توان سامانه PV مبتنی بر مبدل افزایشده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی در محیط Simulink نشان داد که هر دو کنترل‌کننده قادر به تثبیت ولتاژ خروجی و دنبال کردن تغییرات نقطه کار هستند، اما کنترل‌کننده منطق فازی در مواجهه با تغییرات ناگهانی شرایط بهره‌برداری، از جمله تغییرات تابش خورشیدی و بار، عملکرد مطلوب‌تری ارائه می‌دهد. این کنترل‌کننده با کاهش نوسانات و ریپل ولتاژ، افزایش پایداری در حالت ماندگار و حفظ دقت ردیابی نقطه حداکثر توان، توانست نسبت به کنترل‌کننده PID پاسخ نرم‌تر و مقاوم‌تری از خود نشان دهد. در مقابل، اگرچه کنترل‌کننده PID از سرعت پاسخ اولیه بالاتری برخوردار است، اما حساسیت بیشتر آن به تنظیم ضرایب کنترلی و بروز نوسانات پس از تغییرات ناگهانی، کارایی آن را در شرایط دینامیکی محدود می‌سازد. بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از کنترل‌کننده منطق فازی می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد سامانه‌های PV، افزایش بازده استخراج توان و ارتقای کیفیت توان خروجی در شرایط عملیاتی متغیر پیشنهاد شود. همچنین، توسعه این پژوهش با استفاده از روش‌های هوشمند تطبیقی و اعتبارسنجی نتایج در بسترهای آزمایشگاهی می‌تواند به عنوان مسیر مطالعات آتی مدنظر قرار گیرد.

¹⁹ Overshoot¹⁸ Settling Time¹⁷ Rise Time



۶. مراجع

1. Hernández-Callejo, L., Gallardo-Saavedra, S., & Alonso-Gómez, V. (2019). A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. *Solar Energy*, 188, 426–440.
2. Rajesh, R., & Mabel, M. C. (2015). A comprehensive review of photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 231–248.
3. Yang, W., Ding, L., & Nan, L. (2011). The application of fuzzy parameters self-tuning PID controller in MPPT of photovoltaic power system. In *Proceedings of IEEE Conference on Transport, Mechanical and Electrical Engineering* (pp. 1129–1132). Changchun, China.
4. Hui, J., & Sun, X. (2010). MPPT strategy of PV system based on adaptive fuzzy PID algorithm. In *Proceedings of International Conference on Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment* (pp. 220–228). Wuxi, China.
5. Salhi, M., & Bachtiri, R. (2011). A maximum power point tracking photovoltaic system using a proportional integral regulator. *Science Academy Transactions on Renewable Energy Systems Engineering and Technology*, 1(2), 37–44.
6. Shafy, A., & Nafeh, A. (2011). A modified MPPT control loop for PV/battery-charging system using PI controller optimally tuned with GA. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 24, 111–122. <https://doi.org/10.1002/jnm.764>
7. Besheer, A. H., & Adly, M. (2012). Ant colony system based PI maximum power point tracking for stand alone photovoltaic system. In *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology* (pp. 693–698). Athens, Greece.
8. Dounis, A. I., Kofinas, P., Alafodimos, C., & Tseles, D. (2013). Adaptive fuzzy gain scheduling PID controller for maximum power point tracking of photovoltaic system. *Renewable Energy*, 60, 202–214. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.04.014>
9. Park, J., Cho, H., & Kim, D. (2012). Neural PID based MPPT algorithm for photovoltaic generator system. *New & Renewable Energy*, 8(3), 14–22. <https://doi.org/10.7849/ksnre.2012.8.3.014>
10. Mahammad, A. K., Saon, S., & Chee, W. S. (2013). Development of optimum controller based on MPPT for photovoltaic system during shading condition. In *Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology* (Vol. 53, pp. 337–346).
11. Khateb, A. E., Rahim, N. A., Selvaraj, J., & Uddin, M. N. (2013). Maximum power point tracking of single-ended primary-inductor converter employing a novel optimization technique for proportional-integral-derivative controller. *IET Power Electronics*, 6(6), 1111–1121.
12. Xu, S., Shao, R., Cao, B., & Chang, L. (2021). Single-phase grid-connected PV system with golden section search-based MPPT algorithm. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 7(4), 25–36.
13. Uprety, S., & Lee, H. (2020). A 0.65-mW-to-1-W photovoltaic energy harvester with irradiance-aware auto-configurable hybrid MPPT achieving > 95% MPPT efficiency and 2.9-ms FOCV transient time. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 56(6), 1827–1836.



14. Sajadian, S., Ahmadi, R., & Zargarzadeh, H. (2018). Extremum seeking-based model predictive MPPT for grid-tied Z-source inverter for photovoltaic systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 7(1), 216–227.
15. Chang, M. C., & Liu, S. I. (2020). An indoor photovoltaic energy harvester using time-based MPPT and on-chip photovoltaic cell. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67(11), 2432–2436.
16. Jinpeng, W., Qinxue, Y., Bo, Z., & Xin, Z. (2023). Study on MPPT algorithm based on an efficient hybrid conjugate gradient method in a photovoltaic system. *IEEE Access*, 11, 4219–4227.
17. Padmanaban, S., Priyadarshi, N., Bhaskar, M. S., Holm-Nielsen, J. B., Ramachandaramurthy, V. K., & Hossain, E. (2019). A hybrid ANFIS-ABC based MPPT controller for PV system with anti-islanding grid protection: Experimental realization. *IEEE Access*, 7, 103377–103389.
18. Farah, L., Hussain, A., Kerrouche, A., Ieracitano, C., Ahmad, J., & Mahmud, M. (2020). A highly-efficient fuzzy-based controller with high reduction inputs and membership functions for a grid-connected photovoltaic system. *IEEE Access*, 8, 163225–163237.
19. Abdel-Rahim, O. (2020). A New High Gain DC-DC Converter with Model-Predictive-Control Based MPPT Technique for Photovoltaic Systems. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 5(2), 191–200. <https://doi.org/10.24295/CPSSSTPEA.2020.00016>
20. Li, H., Yang, D., Su, W., Lü, J., & Yu, X. (2018). An overall distribution particle swarm optimization MPPT algorithm for photovoltaic system under partial shading. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 265–275.
21. Ali, M. N., Mahmoud, K., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. (2021). An efficient fuzzy-logic based variable-step incremental conductance MPPT method for grid-connected PV systems. *IEEE Access*, 9, 26420–26430.
22. Çelik, D., Khosravi, N., Khan, M. A., Waseem, M., & Ahmed, H. (2026). Advancements in nonlinear PID controllers: A comprehensive review. *Computers and Electrical Engineering*, 129, 110775.