

# کنترل هوشمند غیرخطی مرتبه کسری برای اینورترهای فتوولتائیک

هادی دلاوری و سارا ارجمندپور

ویژگی‌های آن است. گرایش فزاینده صنعت برق به استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک به پژوهش‌های گسترده‌ای در این حوزه منجر شده است. در مواجهه با سیستم‌های فتوولتائیک، تغییر شرایط جوی و سایه جزئی شرایط چالش‌برانگیزی هستند و منجر به تولید توان کمتری می‌شوند؛ به همین سبب نیاز است سیستم‌های فتوولتائیک به گونه‌ای کنترل شوند که همواره بتوانند در نقطه حداکثر توان خود تحت شرایط جوی مختلف کار کنند. از این رو در مقالات مختلف از تکنیک‌های متفاوتی برای رسیدن به نقطه حداکثر توان استفاده گردیده است. در [۱] از یک کنترل کننده غیرخطی مرتبه کسری بهره‌برده شده برای ردیابی نقطه حداکثر توان استفاده گردیده است. در [۲] بر پایه وجود رابطه بین شدت تابش و ولتاژ نقطه حداکثر توان، روشی به منظور ردیابی حداکثر توان در صفحات خورشیدی بر پایه منطق فازی ارائه شده است. در [۳] یک کنترل کننده غیرخطی مد لغزشی برای بهره‌برداری مولد فتوولتائیک در نقطه حداکثر توان تولیدی ارائه شده است. سطح لغزش به صورت مشتق توان نسبت به ولتاژ تعریف گردیده و سیگنال کنترلی اعمالی به سیستم با توجه به سطح لغزش انتخاب شده، استخراج گردیده است. برای دستیابی به نقطه حداکثر توان الگوریتم‌های متفاوتی وجود دارند؛ مانند الگوریتم تپه‌نوردی<sup>۴</sup> (HIL)، الگوریتم اختلال و مشاهده<sup>۵</sup> (P&O) [۴]، الگوریتم هدایت افزایشی<sup>۶</sup> (INC) [۵] و الگوریتم‌های هوشمند. این الگوریتم‌ها سطوح مختلفی از سادگی، سرعت همگرایی و پیاده‌سازی سخت‌افزاری را دارند. در [۶] از روش کنترل غیرخطی مرتبه کسری غیرمستقیم فازی برای ردیابی نقطه حداکثر توان استفاده شده است. در [۷] یک روش جدید برای دنبال کردن نقطه بیشینه توان معرفی شده که بر پایه روش هدایت افزایشی (یکی از روش‌های پایه و اولیه) و روش گرادیان کاهشی است.

حسابان کسری در سال‌های اخیر به یکی از مسائل مورد تحقیق در زمینه مهندسی کنترل تبدیل گردیده که از آن برای مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک نیز استفاده شده است. در طبیعت بیشتر مدل‌های فیزیکی ذاتاً با استفاده از تئوری حسابان کسری بهتر و دقیق‌تر مدل‌سازی و توصیف می‌شوند. مقالات گوناگونی از حسابان کسری در طراحی کنترل کننده‌های مختلفی همچون کنترل کننده PID مرتبه کسری<sup>۷</sup> (FOPID) [۸]، کنترل کننده فازی مرتبه کسری<sup>۸</sup> (FOFLC) [۹] و کنترل مد لغزشی مرتبه کسری<sup>۹</sup> (FSMC) [۱۰] برای کنترل سیستم‌های فتوولتائیک، توربین بادی و ... استفاده نموده‌اند. همچنین با توجه به وجود اغتشاشات خارجی و عدم قطعیت‌های سیستم در بسیاری از مسائل کاربردی، بهتر

چکیده: در زمان حاضر با رشد چشم‌گیر مصرف انرژی، افزایش گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های محیطی، انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر مورد توجه و اقبال عمومی قرار گرفته‌اند. این انرژی‌ها شامل انرژی بادی، انرژی فتوولتائیک و ... می‌شوند. از برتری‌های انرژی فتوولتائیک می‌توان به گستردگی و دسترسی ساده، کمک به حفظ محیط زیست، تطبیق‌پذیری با شبکه‌های قدرت توزیع شده، کم‌صدابودن، راه‌اندازی سریع و ... اشاره کرد. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در مواجهه با سیستم‌های فتوولتائیک، تغییر شرایط اقلیمی (تغییرات دما، تابش و ...) و تغییر پارامترهای سیستم است که بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارد. در این مقاله برای رفع این مشکلات و همچنین به منظور ردیابی نقطه حداکثر توان در یک سیستم خورشیدی، یک کنترل کننده مد لغزشی مرتبه کسری فازی مبتنی بر رویکرد اغتشاش و تخمینگر نامعینی با استفاده از شبکه عصبی طراحی شده است. شبکه عصبی برای تخمین نامعینی‌های سیستم، بلوک فازی برای تخمین ضریب تابع علامت در قانون کنترل، حسابان کسری برای کاهش چترینگ و رویکرد اغتشاش برای تقریب اغتشاشات سیستم استفاده شده‌اند. همچنین پایداری روش کنترلی پیشنهادی با استفاده از روش لیاپانوف به اثبات رسیده است. نتایج شبیه‌سازی نیز کارایی روش پیشنهادی را تأیید می‌کند و عملکرد رضایت‌بخشی را نشان می‌دهند.

کلیدواژه: تخمینگر شبکه عصبی، ردیابی نقطه حداکثر توان، رویکرد اغتشاش، کنترل مد لغزشی مرتبه کسری، کنترل فازی.

## ۱- مقدمه

پیشرفت پرشتاب علم و صنعت و در معرض خطر قرار گرفتن محیط زیست به علت افزایش بیش از حد آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای، بشر را واداشته که در جهت مرتفع‌نمودن مشکلات فوق، تلاش‌های وافر را در زمینه دستیابی به منابع جدید به کار بندد. از جمله می‌توان استفاده از انرژی خورشید، باد، زمین‌گرمایی<sup>۱</sup>، موج، زیست‌توده<sup>۲</sup> و ... را نام برد که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه بوده و با محیط زیست نیز سازگاری بهتری دارند. در سالیان اخیر، انرژی فتوولتائیک<sup>۳</sup> (PV) نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر مورد توجه و اقبال عمومی قرار گرفته است؛ چرا که انرژی خورشید تمام‌نشدنی است. همچنین گستردگی، دسترسی آسان، کم‌صدابودن، تطبیق با شبکه‌های قدرت توزیع شده، حفظ محیط زیست، راه‌اندازی سریع و قیمت تمام‌شده پایین‌تر نسبت به سایر انرژی‌ها از دیگر

این مقاله در تاریخ ۸ شهریور ماه ۱۴۰۲ دریافت و در تاریخ ۲۶ اردیبهشت ماه ۱۴۰۳ بازنگری شد.

هادی دلاوری (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران، (email: delavari@hut.ac.ir).

سارا ارجمندپور، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران، (email: s.arjmand@stu.hut.ac.ir).

4. Hill-Climbing
5. Perturb & Observe
6. Incremental Conductance
7. Fractional Order PID
8. Fractional Order Fuzzy Logic Control
9. Fractional Sliding Mode Control

1. Geothermal
2. Biomass
3. Photovoltaic

مسکونی هوشمند (خورشیدی+بادی) ارائه می‌کند. کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی/تناسبی-انتگرالی-مشتقی با مرتبه کسری بر روی یک قاب سنکرون برای یک مبدل منبع ولتاژ سه‌فاز مبتنی بر مدولاسیون عرض پالس در سیستم پنل خورشیدی و توربین‌های بادی مجتمع مسکونی (ساختمان) در این مقاله پیشنهاد شده است. در [۲۲] به جای استفاده از مبدل تقویت‌کننده معمولی، از مبدل تقویت‌کننده سه‌سطحی استفاده شده است. با این حال، معمولاً مبدل تقویت‌کننده معمولی در سیستم‌های فتوولتائیک به‌عنوان رابط بین پنل فتوولتائیک و مصرف‌کننده استفاده می‌شود. مبدل تقویت‌کننده سه‌سطحی، وزن و هزینه کمتری نسبت به مبدل تقویت‌کننده معمولی دارد. علاوه بر این، هدف اصلی این مقاله کاهش وزن سیستم و استفاده از مبدل تقویت‌کننده سه‌سطحی با ردیابی نقطه حداکثر توان برای کنترل توان خروجی بدون نوسان است. نتایج شبیه‌سازی در Matlab دقت و عملکرد سیستم را نشان می‌دهد. در [۲۳] یک جبران‌کننده جدید تناسبی-انتگرالی-مشتقی با مرتبه کسری تطبیقی با مرتبه کسری خودتنظیم برای استخراج حداکثر توان از یک سیستم فتوولتائیک مستقل با تغییر شرایط محیطی پیشنهاد شده و در آن، ولتاژ مرجع با استفاده از یک شبکه عصبی پیش‌خور تولید می‌گردد. مقاله [۲۴] مروری بر مبدل‌های DC-DC غیرایزوله تقویت‌کننده‌های ولتاژ ارائه می‌کند. جزئیات بررسی مربوط در مورد توپولوژی مبدل‌ها از جمله تقویت، تقویت هیبریدی، تقویت سه‌سطحی، تقویت‌کننده چندسطحی و مبدل‌های ترکیبی سه سطح که بیشتر در سیستم‌های فتوولتائیک استفاده می‌شوند، ارائه شده است. نهایتاً چندین تقویت‌کننده سطح ولتاژ نیز وجود دارند که می‌توانند جایگزین مبدل‌های ارائه‌شده در سیستم‌های فتوولتائیک شوند. چالش دیگری که در سیستم فتوولتائیک وجود دارد، اغتشاش موجود در سیستم است که دامنه نامشخصی دارد و نمی‌توان آن را برای سیستم‌های واقعی اندازه‌گیری کرد [۲۵] و [۲۶]؛ بنابراین نیاز به یک رویکرد وجود دارد که بتواند اغتشاش را تخمین بزند. در این مقاله از یک رویکرد اغتشاش برای این منظور بهره گرفته شده است. برخی از نوآوری‌ها و مزایای این مقاله شامل موارد زیر است:

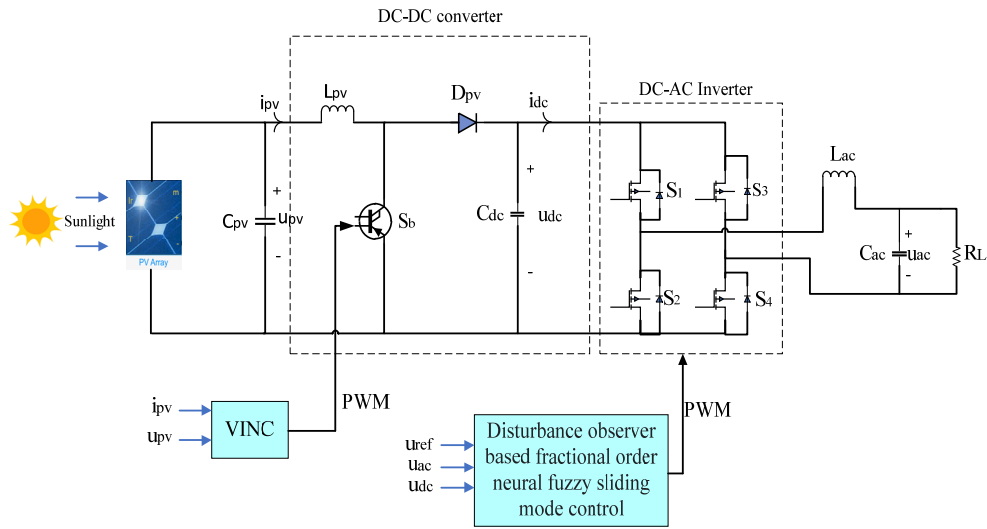
- تعریف یک سطح لغزش مرتبه کسری جدید
  - تخمین نامعینی‌های سیستم فتوولتائیک با استفاده از شبکه عصبی
  - تخمین اغتشاشات سیستم فتوولتائیک با استفاده از رویکرد اغتشاش
  - اثبات پایداری سیستم حلقه بسته با در نظر گرفتن همزمان رویکرد اغتشاش، تخمین‌گر شبکه عصبی جهت تخمین نامعینی و منطق فازی با استفاده از تئوری لیاپانوف
  - حذف چترینگ با استفاده از سطح لغزش مرتبه کسری و منطق فازی
  - افزایش قوام سیستم در مقابله با نامعینی‌ها و اغتشاشات و تغییر پارامترهای سیستم فتوولتائیک
- در بخش ۲ این مقاله به معرفی مدل سیستم فتوولتائیک پرداخته می‌شود و در بخش ۳ الگوریتم INC با گام متغیر به‌منظور ردیابی نقطه حداکثر توان برای مبدل DC-DC طراحی می‌گردد. در بخش ۴ به طراحی روش کنترلی پیشنهادی یعنی طراحی کنترل‌کننده مد لغزش مرتبه کسری فازی مبتنی بر رویکرد اغتشاش و تخمین‌گر شبکه عصبی برای اینورترهای فتوولتائیک پرداخته می‌شود و پایداری کنترل‌کننده پیشنهادی با روش لیاپانوف به اثبات می‌رسد. در بخش ۵ خروجی‌های شبیه‌سازی روش پیشنهادی ارائه می‌شوند و شاخص عملکرد روش پیشنهادی با سایر روش‌های کنترلی مقایسه می‌گردد. نهایتاً در بخش ۶ به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی نهایی پرداخته خواهد شد.

است که کنترل‌کننده‌هایی مقاوم طراحی و اعمال شوند. کنترل مد لغزشی، ابزاری قدرتمند برای کنترل مقاوم سیستم‌ها است [۱۱] و به دلیل طراحی ساده و مقاوم بودن آن در برابر عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات خارجی، توجه زیادی را در میان کنترل‌کننده‌های غیرخطی به خود جلب کرده و در مقالات گوناگون به‌طور گسترده بررسی شده است [۱۲].

یکی از نواقص کنترل‌کننده‌های مد لغزشی، پدیده لرزش سیگنال (چترینگ<sup>۱</sup>) است که برای رفع این مشکل می‌توان آن را با حسابان کسری ترکیب کرد. این استراتژی کنترلی، مزایای هر دو کنترل‌کننده مرتبه کسری و کنترل‌کننده مد لغزشی را دارد. ایده‌ای که در استفاده از کنترل مد لغزشی مرتبه کسری وجود دارد، استفاده از سطح لغزش مرتبه کسری به جای سطح لغزش سنتی مرتبه صحیح است که نهایتاً عملکرد بهتر و پایداری بیشتری را در مقایسه با روش‌های سنتی کنترل مد لغزشی ایجاد می‌کند [۱۳] تا [۱۵].

همچنین در این مقاله برای بهبود عملکرد سیستم از یک شبکه عصبی تابع پایه شعاعی<sup>۲</sup> (RBF) و کنترل‌کننده فازی برای کنترل سیستم فتوولتائیک بهره گرفته شده که شبکه عصبی، توانایی تخمین نامعینی‌ها را دارد [۱۶] و بلوک فازی هم برای تخمین ضریب تابع علامت<sup>۳</sup> موجود در قانون کنترل به کار رفته است. به دلیل آنکه اگر این ضریب به درستی تعیین نشود می‌تواند باعث افزایش چترینگ سیستم شود، نیاز است که با نزدیک شدن به سطح لغزش این ضریب کوچک باشد و با فاصله گرفتن از سطح لغزش این ضریب بزرگ باشد تا حالت‌های سیستم، سریع به سطح لغزش برسند و سرعت همگرایی بالا برود. بنابراین نمی‌توان یک عدد ثابت را برای ضریب تابع علامت در نظر گرفت و بهتر است یک سیستم هوشمند بر اساس میزان فاصله با سطح لغزش آن را تعیین کند [۱۷]. در [۱۸]، روش درون‌یابی ریاضی ترکیب‌شده با الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان کلاسیک برای سیستم فتوولتائیک اعمال می‌شود و ردیابی راندمان بالا با استفاده از ساختار سیستم ساده حاصل می‌گردد که برای توسعه سیستم فتوولتائیک و نیز ردیابی توان از اهمیت زیادی برخوردار است. در [۱۹]، یک الگوریتم یادگیری تقویتی عمیق مبتنی بر بهینه‌ساز قاصدک جدید برای ردیابی نقطه حداکثر توان سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه پیشنهاد شده و روش پیشنهادی را برای یک نیروگاه فتوولتائیک ۱۰۰ مگاواتی متصل به یک سیستم توزیع ۳۳ کیلوولت ارزیابی می‌کند. تکنیک یادگیری تقویتی عمیق پیشنهادی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی خط مشی پروگرامال (PPO) و گرادیان خط مشی قطعی عمیق (DDPG) برای حالات پیوسته و فضاهای عمل گسسته یا پیوسته استفاده می‌کند. ردیابی نقطه حداکثر توان به روش اختلال و مشاهده به دلیل سادگی و قابلیت اطمینان، گسترده در سیستم‌های فتوولتائیک استفاده می‌شود. برای بهینه‌سازی عملکرد باید بین راندمان استاتیک و دینامیکی تعادل ایجاد شود. در [۲۰]، یک مدل تحلیلی بر اساس اصول عملیات برای ارائه ویژگی‌های واضح شاخص‌های کلیدی (مثلاً راندمان استاتیک و دینامیکی و نیاز محدوده ولتاژ DC)، ایجاد و تأثیر پارامترها بر بارده آشکار می‌شود. متعاقباً یک طراحی قوی برای طراحی بهینه پیشنهاد می‌گردد که می‌تواند پارامترهای کلیدی را تنظیم کند و به دقت ردیابی نسبتاً بالایی دست یابد. مرجع [۲۱] یک سیستم کنترل ولتاژ را با استفاده از اپراتورهای مرتبه کسری در نیروگاه برق تجدیدپذیر هیبریدی یکپارچه

1. Chattering
2. Radial Basis Function
3. Sign



شکل ۱: دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی روی سیستم فتوولتائیک.

$$\frac{d^{\gamma} u_{ac}}{dt^{\gamma}} = -\left(\frac{1}{R_L C_{ac}} + \Delta_r\right) \frac{du_{ac}}{dt} - \left(\frac{1}{L_{ac} C_{ac}} + \Delta_r\right) u_{ac} + \left(\frac{\gamma D - 1}{L_{ac} C_{ac}} + \Delta_r\right) u_{dc} + g(t) \quad (7)$$

که  $\Delta_r$  و  $\Delta_r$  پارامترهای متغیر،  $\Delta_r$  عدم قطعیت ناشی از  $u_{dc}$  و  $g(t)$  نامعینی سیستم است.  $d(t)$  به صورت (۸) تعریف می‌شود

$$d(t) = -\Delta_r \frac{du_{ac}}{dt} - \Delta_r u_{ac} - \Delta_r u_{dc} \quad (8)$$

برای قسمت شبیه‌سازی نامعینی نیز به صورت (۹) در نظر گرفته می‌شود

$$g(t) = 0.7(u_{ac} - u_{ref}) + \cos(100\pi t) \quad (9)$$

با بازنویسی (۶)، (۱۰) حاصل می‌شود که توصیف‌کننده مدل اینورتر است

$$\frac{d^{\gamma} u_{ac}}{dt^{\gamma}} = -\frac{1}{R_L C_{ac}} \frac{du_{ac}}{dt} - \frac{1}{L_{ac} C_{ac}} u_{ac} + \frac{\gamma D - 1}{L_{ac} C_{ac}} u_{dc} + d(t) + g(t) \quad (10)$$

### ۳- طراحی الگوریتم اندازه گام متغیر مبتنی بر INC برای ردیابی نقطه حداکثر توان

سیستم‌های فتوولتائیک به دلیل ویژگی ذاتی‌شان، بازدهی پایینی دارند و باید همیشه در نقطه حداکثر توان خروجی کار کنند [۲۷] و [۲۸]. بر اساس نمودار جریان-ولتاژ (I-V) و نمودار توان-ولتاژ (P-V)، دمای بالاتر منجر به نقطه حداکثر توان کمتری می‌شود؛ در حالی که تابش خورشیدی بالاتر منجر به نقطه حداکثر توان بیشتری خواهد شد.

الگوریتم‌های مرسوم ردیابی نقطه حداکثر توان به دلیل سادگی‌شان کاربردی هستند و در این مقاله از الگوریتم INC با گام متغیر [۲۹] برای ردیابی نقطه حداکثر توان تحت شرایط جوی مختلف و تغییر پارامترها به شرح زیر بهره گرفته شده است

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0, & \text{in MPP} \\ \frac{dP}{dV} > 0, & \text{in left side of MPP} \\ \frac{dP}{dV} < 0, & \text{in right side of MPP} \end{cases} \quad (11)$$

### ۲- توصیف مدل سیستم فتوولتائیک

شکل ۱ دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی روی سیستم فتوولتائیک را نشان می‌دهد که به‌طور عمده شامل یک ماژول فتوولتائیک، یک مبدل DC-DC و یک اینورتر DC-AC است. بر اساس قوانین KVL و KCL می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد: زمانی که  $S_1$  و  $S_2$  روشن باشند

$$\begin{cases} C_{ac} \frac{du_{ac}}{dt} + \frac{1}{R_L} u_{ac} - i_{ac} = 0 \\ L_{ac} \frac{di_{ac}}{dt} - u_{dc} + u_{ac} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

زمانی که  $S_3$  و  $S_4$  روشن باشند

$$\begin{cases} C_{ac} \frac{du_{ac}}{dt} + \frac{1}{R_L} u_{ac} - i_{ac} = 0 \\ L_{ac} \frac{di_{ac}}{dt} + u_{dc} + u_{ac} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

که  $D$  دیوتی سائیکل  $S_1$  و  $S_3$  است، سپس دیوتی سائیکل  $S_2$  و  $S_4$  برابر است با  $1-D$ . از ترکیب (۱) و (۲)، (۳) و (۴) حاصل خواهند شد

$$L_{ac} \frac{di_{ac}}{dt} = (\gamma D - 1) u_{dc} - u_{ac} \quad (3)$$

$$C_{ac} \frac{du_{ac}}{dt} = i_{ac} - \frac{1}{R_L} u_{ac} \quad (4)$$

که با مشتق‌گیری از (۴)، (۵) به دست می‌آید

$$\frac{d^{\gamma} u_{ac}}{dt^{\gamma}} = \frac{1}{C_{ac}} \frac{di_{ac}}{dt} - \frac{1}{R_L C_{ac}} \frac{du_{ac}}{dt} \quad (5)$$

با جایگذاری (۳) در (۵)، (۶) حاصل می‌شود

$$\frac{d^{\gamma} u_{ac}}{dt^{\gamma}} = -\frac{1}{R_L C_{ac}} \frac{du_{ac}}{dt} - \frac{1}{L_{ac} C_{ac}} u_{ac} + \frac{\gamma D - 1}{L_{ac} C_{ac}} u_{dc} \quad (6)$$

که اگر غیرخطی‌های سیستم در (۶) اعمال شوند، آنگاه این معادله به صورت (۷) به دست می‌آید

پس به طور کلی رُویتگر اغتشاش به صورت زیر طراحی می شود

$$\begin{cases} \dot{z} = r\left(\frac{1}{R_L C_{ac}} \dot{u}_{ac} + \frac{1}{L_{ac} C_{ac}} u_{ac} - \frac{2D-1}{L_{ac} C_{ac}} u_{dc} - \hat{d}\right) \\ \hat{d} = z + r\dot{u}_{ac} \end{cases} \quad (17)$$

همان طور که در (۱۷) مشاهده می شود، رُویتگر اغتشاش ارائه شده در این مقاله دیگر به اطلاعات مشتق دوم ولتاژ AC نیازی ندارد و این به معنای کاربردی بودن طراحی پیشنهادی است.

#### ۴-۲ طراحی کنترل مد لغزشی مبتنی بر رُویتگر اغتشاش

در این قسمت از مقاله به طراحی کنترل مد لغزشی برای سیستم های فتوولتائیک پرداخته می شود. از مزایای کنترل مد لغزشی می توان به مقاومت آن در برابر اغتشاشات و نامعینی های پارامتری سیستم و طراحی و پیاده سازی ساده آن در کاربردهای عملی اشاره کرد [۳۱].

ابتدا خطای ردیابی به عنوان اختلاف بین ولتاژ خروجی اینورتر و ولتاژ مرجع به صورت  $e = u_{ac} - u_{ref}$  تعریف می شود. اگر  $c$  یک ثابت مثبت باشد، آنگاه سطح لغزش مرتبه صحیح مرسوم به صورت (۱۸) است

$$s = ce + \dot{e} \quad (18)$$

که در آن  $c$  یک عدد ثابت مثبت،  $e$  خطای ردیابی ولتاژ و  $\dot{e}$  مشتق خطای ردیابی است. سپس قانون کنترل به صورت (۱۹) خواهد بود که در آن، قانون کنترل سوئیچینگ (کلیدزنی) به صورت  $-\eta \text{sign}(s) - ks$  انتخاب شده که علاوه بر کلیدزنی در هنگام تغییر علامت سطح لغزش با استفاده از بخش  $-ks$ ، پایداری بیشتر سیستم حلقه بسته را نیز در پی خواهد داشت

$$D = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{L_{ac} C_{ac}}{u_{dc}} (-\eta \text{sign}(s) - ks - \hat{d} - c\dot{e} + \frac{1}{R_L C_{ac}} \dot{u}_{ac} + \frac{1}{L_{ac} C_{ac}} u_{ac} + \ddot{u}_{ref}) \right] \quad (19)$$

که در آن  $k$  یک عدد ثابت مثبت و  $\hat{d}$  مقدار رُویتگر شده اغتشاشات است که توسط رُویتگر اغتشاش محاسبه می شود.  $\eta$  حد بالای اختلاف خطای رُویت  $\hat{d}$  و نامعینی  $g$  است و برای هر عدد مثبت کوچک  $\varepsilon^*$  به صورت (۲۰) در نظر گرفته می شود

$$\eta - |g - \hat{d}| > \varepsilon^* \quad (20)$$

خطای رُویتگر نیز به صورت (۲۱) تعریف می شود

$$\tilde{d} = d - \hat{d} \quad (21)$$

اگر از (۱۸) مشتق گرفته شود، آنگاه  $\dot{s}$  به صورت (۲۲) خواهد بود

$$\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} = c\dot{e} + \ddot{u}_{ac} - \ddot{u}_{ref} = c\dot{e} - \ddot{u}_{ref} - \frac{1}{R_L C_{ac}} \dot{u}_{ac} - \frac{1}{L_{ac} C_{ac}} u_{ac} + \frac{2D-1}{L_{ac} C_{ac}} u_{dc} + \dot{d} \quad (22)$$

که با جایگذاری (۱۹) در آن،  $\dot{s}$  به صورت (۲۳) ساده می شود

$$\dot{s} = \tilde{d} - ks - \eta \text{sign}(s) \quad (23)$$

حال یک سطح لغزش مرتبه کسری به صورت (۲۴) پیشنهاد می شود. در این سطح لغزش به جای استفاده از مشتق مرتبه صحیح خطا از مشتق مرتبه کسری خطا استفاده شده است. استفاده از مشتق مرتبه کسری باعث افزودن درجه آزادی بیشتر به کنترل کننده می شود. همچنین مشتقات مرتبه کسری برخلاف مشتقات مرتبه صحیح دارای حافظه بلندمدت

با توجه به این که توان خروجی از رابطه  $P = VI$  به دست می آید، پس (۱۱) به صورت (۱۲) نتیجه می دهد

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} \approx \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \end{cases} \quad (12)$$

که  $\Delta I/\Delta V$  بیانگر رسانایی افزایشی و  $I/V$  بیانگر رسانایی لحظه ای است. نقطه حداکثر توان را می توان از طریق مقایسه  $I/V$  با  $\Delta I/\Delta V$  از طریق (۱۳) پیدا کرد

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}, \text{ in MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}, \text{ in left side of MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}, \text{ in right side of MPP} \end{cases} \quad (13)$$

ورودی های کنترل کننده برای ردیابی نقطه حداکثر توان ولتاژ و جریان آرایه فتوولتائیک هستند؛ در حالی که خروجی آن ولتاژ مرجع مورد استفاده برای مدولاسیون پهنای پالس فضای برداری (SVPWM) در کنترل مبدل DC-DC متصل به آرایه فتوولتائیک است [۳۰].

#### ۴-۳ طراحی کنترل کننده مد لغزشی فازی مبتنی بر رُویتگر اغتشاش و استفاده از تخمینگر شبکه عصبی

#### ۴-۱ طراحی رُویتگر اغتشاش برای سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

اینورتر DC-AC در سیستم فتوولتائیک ممکن است که تحت تأثیر اغتشاشات ناشناخته قرار گیرد. به همین دلیل برای جبران اثر نامطلوب اغتشاشات بر روی ولتاژ خروجی اینورتر فتوولتائیک، یک رُویتگر اغتشاش برای سیستم طراحی شده است. عدم قطعیت های سیستم به صورت (۱۴) توصیف می گردد

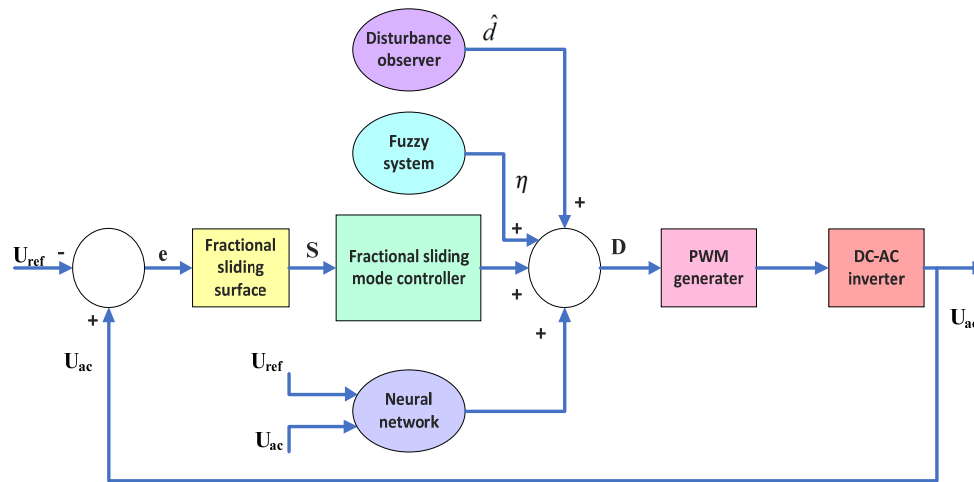
$$d = \ddot{u}_{ac} + \frac{1}{R_L C_{ac}} \dot{u}_{ac} + \frac{1}{L_{ac} C_{ac}} u_{ac} - \frac{2D-1}{L_{ac} C_{ac}} u_{dc} \quad (14)$$

با تعریف  $\hat{d}$  به عنوان خروجی رُویتگر اغتشاش، مقدار آن از رابطه زیر محاسبه می شود

$$\hat{d} = r(d - \hat{d}) = r\left(\ddot{u}_{ac} + \frac{1}{R_L C_{ac}} \dot{u}_{ac} + \frac{1}{L_{ac} C_{ac}} u_{ac} - \frac{2D-1}{L_{ac} C_{ac}} u_{dc} - \hat{d}\right) \quad (15)$$

که  $r$  یک ثابت مثبت در نظر گرفته می شود. رابطه (۱۵) بیان کننده یک رُویتگر است؛ ولی به اطلاعات مشتق دوم ولتاژ سمت AC احتیاج دارد که در کاربردهای عملی به دلیل سوارشدن نویز بر روی سیگنال ها کاری دشوار خواهد بود. بنابراین یک رُویتگر جدید با معرفی یک متغیر ابزاری به عنوان  $z = \hat{d} - r\dot{u}_{ac}$  ایجاد می شود که مشتق آن به صورت (۱۶) است

$$\dot{z} = \dot{\hat{d}} - r\ddot{u}_{ac} = r\left(\frac{1}{R_L C_{ac}} \dot{u}_{ac} + \frac{1}{L_{ac} C_{ac}} u_{ac} - \frac{2D-1}{L_{ac} C_{ac}} u_{dc} - \hat{d}\right) \quad (16)$$



شکل ۲: دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی برای اینورتر DC-AC.

$$\eta = \frac{\sum w_i \times \mu_i}{\sum \mu_i} = w^T \xi \quad (27)$$

که در آن  $\eta$  توسط منطق فازی تخمین زده می‌شود،  $w$  یک بردار قابل تنظیم است که می‌تواند بر اساس قوانین تطبیقی به‌روزرسانی شود و  $\xi$  یک بردار تابع فازی است و توسط (۲۸) تعریف می‌شود

$$\xi_i = \frac{\mu_i}{\sum \mu_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (28)$$

که  $m$  تعداد توابع عضویت است.

**فرض ۱:** مطابق اصل تقریب سراسری برای هر عدد مثبت کوچک  $\varepsilon^*$  و تابع پیوسته  $\eta(t)$ ، پارامتر بهینه  $w^*$  به نحوی وجود دارد که خروجی سیستم فازی، رابطه (۲۹) را ارضا کند

$$|\eta(t) - (w^*)^T \xi| < \varepsilon^* \quad (29)$$

پارامتر  $w$  هم توسط قانون تطبیقی بیان شده در (۳۰) به‌روزرسانی می‌شود

$$\dot{w} = \rho \xi |s| \quad (30)$$

که در آن  $\rho$  یک ثابت مثبت،  $s$  سطح لغزش و  $\xi$  بردار پایه فازی است. با توجه به (۳۰)، پارامترهای تخمینگر شبکه عصبی شامل وزن‌ها برای دستیابی به عملکرد بهتر ثابت در نظر گرفته نشده است؛ بلکه توسط یک قانون تطبیق به‌دست می‌آید. در نتیجه با تغییر پارامترهای سیستم فتولتائیک یا مبدل و اغتشاش و ...، تخمینگر شبکه عصبی می‌تواند وزن‌های خود را به‌صورت تطبیقی به‌روز نماید و این یک نقطه قوت برای این تخمینگر است. در شکل ۲ بلوک دیاگرام کنترل‌کننده پیشنهادی نشان داده شده است.

#### ۴-۴ اثبات پایداری روش پیشنهادی

$\tilde{w}$  به‌عنوان خطای بین  $w$  و پارامتر بهینه  $w^*$  به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود

$$\tilde{w} = w - w^* \quad (31)$$

یک تابع معین مثبت مطابق با رابطه زیر برای تابع لیاپانوف در نظر گرفته می‌شود

$$v = \frac{1}{\gamma} s^2 + \frac{1}{\gamma} \tilde{d}^2 + \frac{1}{\gamma} \rho \tilde{w}^T \tilde{w} \quad (32)$$

اگر از تابع لیاپانوف مشتق گرفته شود، آنگاه به (۳۳) منجر خواهد شد

هستند و این موضوع باعث پایداری بیشتر سیستم خواهد شد. همچنین استفاده از مشتقات مرتبه کسری می‌تواند در کاهش پدیده چترینگ (لرزش سیگنال کنترل) نیز مؤثر باشد

$$s = ce + D^\alpha e \quad (24)$$

که در آن  $c$  یک عدد ثابت مثبت،  $e$  خطای ردیابی ولتاژ و  $\alpha$  مرتبه مشتق کسری است. سپس قانون کنترل برای سطح لغزش مرتبه کسری پیشنهادی به‌صورت (۲۵) طراحی می‌شود

$$D = \frac{1}{\gamma} \left[ 1 + \frac{L_{ac} C_{ac}}{u_{dc}} (-\eta \text{sign}(ce + D^\alpha e) - kD^{-\alpha+1}(ce + D^\alpha e) - \hat{d} - cD^{-\alpha+1}\dot{e} + \frac{1}{R_L C_{ac}} \dot{u}_{ac} + \frac{1}{L_{ac} C_{ac}} u_{ac} + \ddot{u}_{ref}) \right] \quad (25)$$

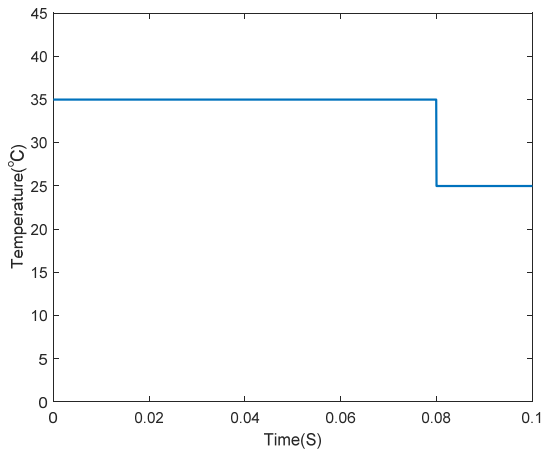
#### ۴-۳ طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه کسری فازی مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش و تخمینگر شبکه عصبی

در عصر حاضر، شبکه‌های عصبی به حدی در زندگی روزمره بشر کاربرد پیدا کرده‌اند که نمی‌توان آنها را نادیده گرفت و قطعاً در آینده‌ای نزدیک، پیشرفت‌های قابل توجه و چشم‌گیر خواهند داشت. در سال‌های اخیر نیز مقالات زیادی از شبکه‌های عصبی برای کنترل سیستم‌های فتولتائیک به چاپ رسیده‌اند [۳۲] و [۳۳]. در این مقاله با استفاده از شبکه عصبی تابع پایه شعاعی، نامعینی‌های موجود در سیستم تخمین زده می‌شوند و قانون کنترل به‌صورت (۲۶) پیشنهاد می‌گردد

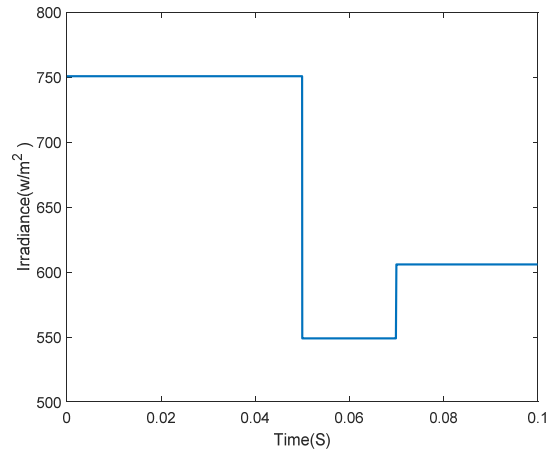
$$D = \frac{1}{\gamma} \left[ 1 + \frac{L_{ac} C_{ac}}{u_{dc}} (-\eta \text{sign}(ce + D^\alpha e) - kD^{-\alpha+1}(ce + D^\alpha e) - \hat{d} - g - cD^{-\alpha+1}\dot{e} + \frac{1}{R_L C_{ac}} \dot{u}_{ac} + \frac{1}{L_{ac} C_{ac}} u_{ac} + \ddot{u}_{ref}) \right] \quad (26)$$

که  $\hat{d}$  مقدار اغتشاش رؤیت‌شده و  $\eta$  حد بالای خطای رؤیتگر و نامعینی است که توسط سیستم فازی تخمین زده می‌شود. همچنین  $k$  یک ثابت مثبت و  $g$  خروجی شبکه عصبی است.

با استفاده از استراتژی فازی‌سازی منفرد، موتور استنتاج حاصل ضرب و دیفازی‌سازی میانگین مراکز خروجی سیستم فازی به‌صورت (۲۷) ارائه خواهد شد



شکل ۴: نمودار تغییرات دمای محیط.



شکل ۳: نمودار تغییرات تابش خورشیدی.

می‌شوند. سپس سیستم فتوولتائیک تحت تغییر شرایط محیطی (تابش‌ها و دماهای مختلف) و با در نظر گرفتن سطح لغزش مرتبه صحیح و سطح لغزش مرتبه کسری، تحت شرایط تغییر بار مورد بررسی قرار می‌گیرد و در هر مرحله شاخص‌های عملکرد اندازه‌گیری می‌شوند. طبق شکل ۳ و ۴، مقدار تابش خورشیدی در ۰/۰۵ ثانیه از ۷۵۰ w/m<sup>2</sup> به ۵۵۰ w/m<sup>2</sup> و در زمان ۰/۰۷ ثانیه از ۵۵۰ w/m<sup>2</sup> به ۶۰۰ w/m<sup>2</sup> تغییر می‌کند. دمای محیط نیز در زمان ۰/۰۸ ثانیه از ۳۵ °C به ۲۵ °C کاهش می‌یابد.

شکل‌های ۵ تا ۷ به ترتیب نمودارهای توان، ولتاژ و جریان مازول فتوولتائیک را تحت تغییرات دما و تابش نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌شود در لحظه ۰/۰۸ ثانیه که دما از ۳۵ °C به ۲۵ °C کاهش یافته و در لحظات ۰/۰۵ ثانیه و ۰/۰۷ ثانیه که مقدار تابش تغییر کرده است، الگوریتم طراحی شده برای ردیابی نقطه حداکثر توان، مجدداً نقطه حداکثر توان را ردگیری می‌کند. شکل ۸ سیگنال خروجی بلوک شبکه عصبی تابع پایه شعاعی را در مقایسه با نامعینی موجود در سیستم برای شرایطی که بار تغییر می‌کند، نشان می‌دهد که در آن خط نقطه‌چین قرمز بیان‌کننده سیگنال خروجی شبکه و خط ممتد آبی بیان‌کننده نامعینی موجود در سیستم است. همان طور که مشاهده می‌شود سیگنال خروجی شبکه عصبی تابع پایه شعاعی، توانایی خوبی در تخمین نامعینی‌ها دارد. شکل ۹ سیگنال اغتشاش را در شرایطی که بار شبکه تغییر می‌کند، در مقایسه با اغتشاش تخمین زده شده توسط رویکرد اغتشاش نشان می‌دهد که در محیط شبیه‌سازی اغتشاش روییت شده در قانون کنترل اعمال می‌شود تا تأثیر اغتشاشات ناخواسته را از سیستم بکاهد.

### ۵-۱ نتایج شبیه‌سازی برای سطح لغزش مرتبه صحیح

ولتاژ خروجی و خطای ردیابی با استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه صحیح فازی مبتنی بر رویکرد اغتشاش و تخمینگر شبکه عصبی برای شرایطی که مقاومت بار در لحظه ۰/۰۶ ثانیه از ۳۰۰ اهم به ۱۵۰ اهم کاهش می‌یابد، به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده‌اند. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود خروجی اینورتر DC-AC با اعمال تغییرات ایجاد شده در مقاومت بار، قادر است ولتاژ مرجع را ردیابی کند. همچنین از منحنی خطا می‌توان دریافت که خطای ردیابی به صفر همگرا می‌شود.

شکل ۱۲ منحنی سطح لغزش مرتبه صحیح را بعد از پیاده‌سازی کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه صحیح فازی مبتنی بر رویکرد اغتشاش و

جدول ۱: پارامترهای سیستم‌ها برای شبیه‌سازی.

پارامتر	مقادیر
$U_{Ref}$	$220\sqrt{2}\sin(100\pi t)$
$C_{ac}$	$2.82 \times 10^{-3} F$
$L_{ac}$	$0.48 H$
$L_{pv}$	$3 \times 10^{-4} H$
$C_{pv}$	$10^{-6} F$
$C_{dc}$	$10^{-6} F$
$C, K$	$10^4, 5 \times 10^4$
$R_L$	$300 \Omega$
$\Phi$	$60$

$$\dot{v} = s\dot{s} + \ddot{d} + \frac{1}{\rho} \tilde{w}^T \dot{w} = s(\ddot{d} - ks - \eta \text{sign}(s) - g) - \quad (33)$$

$$\ddot{d} + \tilde{w}^T \xi |s| = -ks^2 - \ddot{d} + s(\ddot{d} - g) - \eta |s| + \tilde{w}^T \xi |s|$$

با جایگذاری قانون تطبیقی بیان شده در (۳۰)، (۳۴) به دست خواهد آمد

$$\dot{v} = -ks^2 - \ddot{d} + s(\ddot{d} - g) - w^T \xi |s| + \quad (34)$$

$$(w^T - (w^*)^T) \xi |s| \Rightarrow \dot{v} = -ks^2 - \ddot{d} + s(\ddot{d} - g) - \quad (35)$$

$$\dot{v} = -ks^2 - \ddot{d} - [(\eta - \varepsilon^*) - |\ddot{d} - g|] |s| \quad (35)$$

برای اینکه سیستم پایدار باشد، کافی است (۳۶) برقرار شود

$$\dot{v} = -ks^2 - \ddot{d} - (\eta - \varepsilon^* - |\ddot{d} - g|) |s| \leq 0. \quad (36)$$

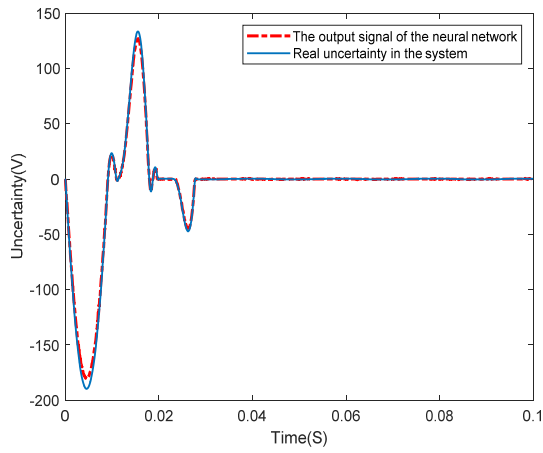
پس باید  $\eta - \varepsilon^* - |\ddot{d} - g| \geq 0$  برقرار باشد و در نتیجه، شرط پایداری به صورت (۳۷) خلاصه می‌شود

$$\eta \geq |\ddot{d} - g| + \varepsilon^* \quad (37)$$

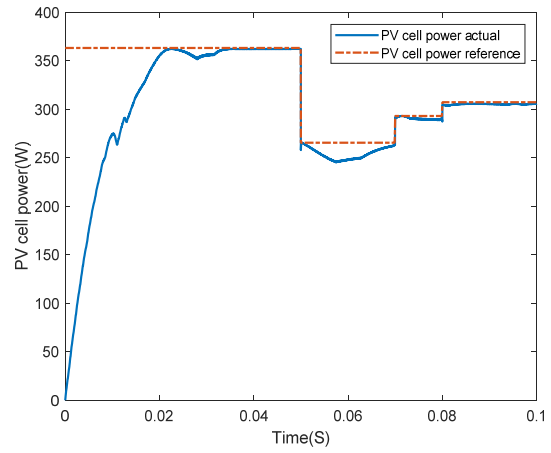
چون  $\eta$  حد بالای اختلاف خطای رویکرد نامعینی در نظر گرفته شده بود و  $\varepsilon^*$  هم یک عدد مثبت کوچک است، پس این رابطه همواره برقرار و سیستم پایدار است.

### ۵- نتایج شبیه‌سازی

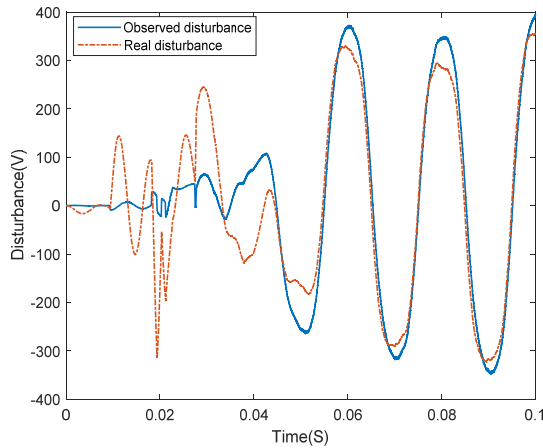
در ابتدا مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی مطابق جدول ۱ در نظر گرفته و در محیط سیمولینک نرم‌افزار Matlab برای شبیه‌سازی به سیستم اعمال



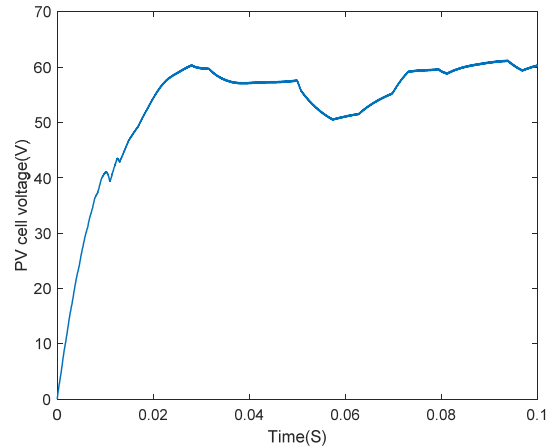
شکل ۸: مقایسه نامعینی تخمین زده شده توسط شبکه عصبی با نامعینی واقعی.



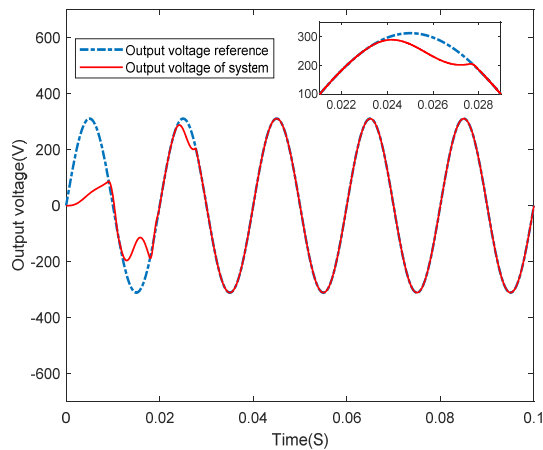
شکل ۵: نمودار توان ماژول فتولتائیک تحت تغییر شرایط جوی مختلف.



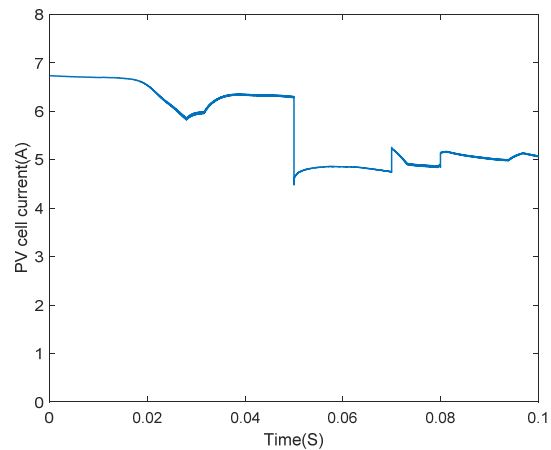
شکل ۹: مقایسه سیگنال خروجی رویتگر اغتشاش و اغتشاش سیستم.



شکل ۶: نمودار ولتاژ ماژول فتولتائیک تحت تغییر شرایط جوی مختلف.



شکل ۱۰: ولتاژ خروجی شبکه با اعمال تغییر در مقاومت بار برای حالت سطح لغزش مرتبه صحیح.



شکل ۷: نمودار جریان ماژول فتولتائیک تحت تغییر شرایط جوی مختلف.

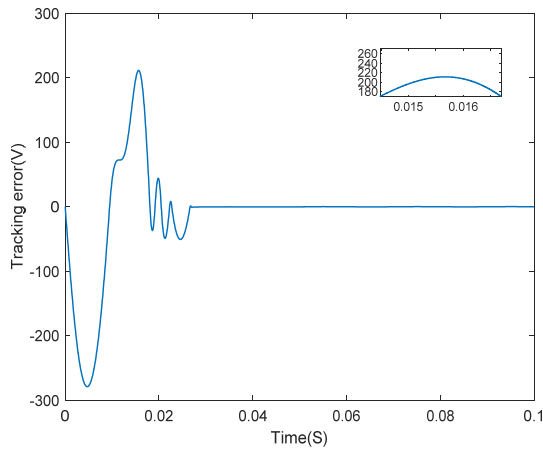
شبکه عصبی برای شرایطی که مقاومت بار در لحظه  $0.06$  ثانیه از  $300$  اهم به  $150$  اهم تغییر می‌کند به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمایش داده شده‌اند.

مقاوم‌بودن سیستم فتولتائیک تحت شرایط مختلف، یک مسأله ضروری است؛ زیرا توان خروجی سیستم فتولتائیک تحت شرایط جوی مختلف تغییر خواهد کرد. یک استراتژی خوب کنترلی باید توانایی تطبیق با شرایط جوی مختلف، اغتشاشات و نامعینی‌ها و تغییر بار شبکه را داشته باشد. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ عملکرد طرح کنترلی پیشنهادی را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود خروجی اینورتر DC-AC با

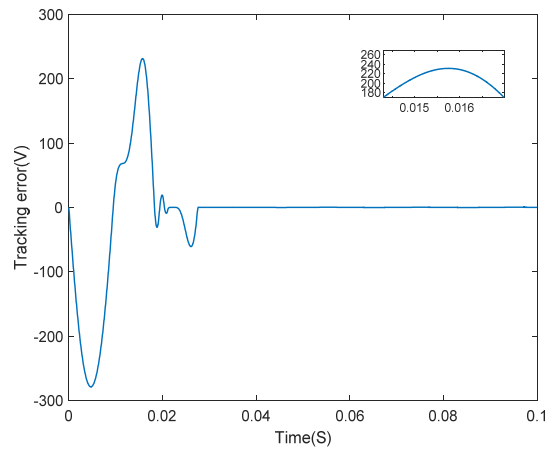
تخمینگر نامعینی با استفاده از شبکه عصبی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ابتدا که در سیستم خطای قابل ملاحظه‌ای هست، نوسان سطح لغزش دامنه بزرگ‌تری دارد و بعد از گذشت مدت زمانی محدود که کنترل‌کننده غیرخطی پیشنهادی، خطای ردیابی ولتاژ را کاهش می‌دهد، سطح لغزش نیز به سمت صفر میل می‌کند؛ اما دارای نوسانات کوچک (چترینگ) است.

## ۵-۲ نتایج شبیه‌سازی برای سطح لغزش مرتبه کسری

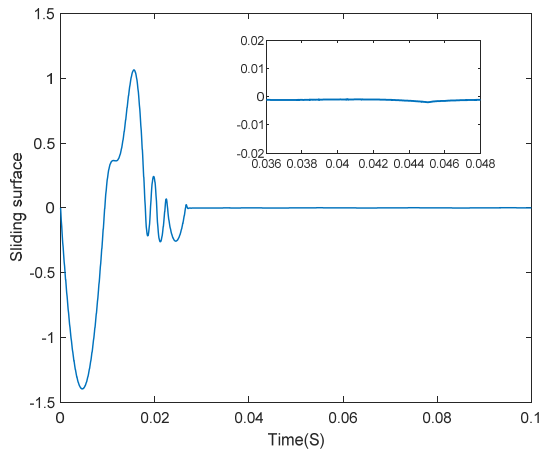
ولتاژ خروجی و خطای ردیابی با اعمال کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه کسری فازی مبتنی بر رویتگر اغتشاش و تخمینگر نامعینی با استفاده از



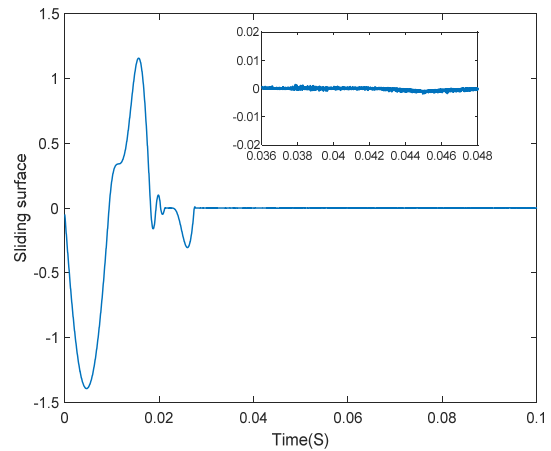
شکل ۱۴: خطای ردیابی ولتاژ با اعمال تغییر در مقاومت بار برای حالت سطح لغزش مرتبه کسری.



شکل ۱۱: خطای ردیابی ولتاژ با اعمال تغییر در بار شبکه برای حالت سطح لغزش مرتبه صحیح.



شکل ۱۵: نمودار سطح لغزش مرتبه کسری با اعمال تغییر در مقاومت بار.



شکل ۱۲: نمودار سطح لغزش مرتبه صحیح با اعمال تغییر در مقاومت بار.

محدود که کنترل کننده غیرخطی پیشنهادی، خطای ردیابی ولتاژ را کاهش می‌دهد، سطح لغزش مرتبه کسری نیز به صفر میل می‌کند. همچنین با توجه به انتخاب سطح لغزش مرتبه کسری، منحنی سطح لغزش چترینگ (لرزش سیگنال) کمی دارد و این یک مزیت نسبت به سایر روش‌های کنترلی است.

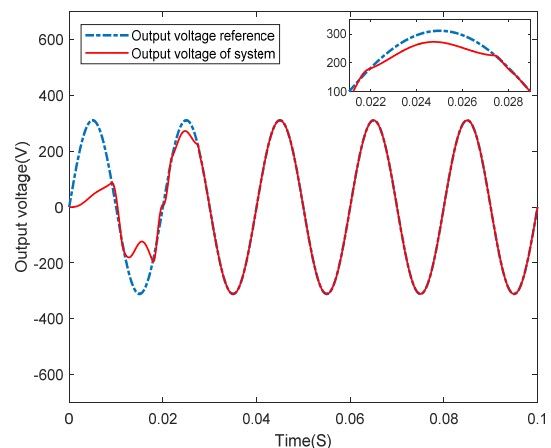
### ۳-۵ مقایسه روش کنترلی پیشنهادی با سایر روش‌های کنترلی

برای بررسی عملکرد روش کنترلی پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های کنترلی و مقایسه دقیق‌تر و کمی روش‌ها با یکدیگر، معیار شاخص عملکرد یا همان تابع هزینه در هر مرحله از شبیه‌سازی محاسبه شده است؛ به طوری که هرچه این شاخص کمتر باشد، سیستم کنترلی بهتر خواهد بود. انتگرال قدرمطلق خطا<sup>۱</sup> (IAE)، انتگرال زمان ضربدر قدرمطلق خطا<sup>۲</sup> (ITAE) و انتگرال مربع خطا<sup>۳</sup> (ISE) نمونه‌هایی از شاخص‌های عملکرد هستند که به ترتیب در (۳۸) تا (۴۰) معرفی شده‌اند

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad (38)$$

$$ITAE = \int t |e(t)| dt \quad (39)$$

1. Integral of the Absolute Magnitude of Error
2. Integral of Time Multiplied by Absolute Error
3. Integral of Square of Error



شکل ۱۳: ولتاژ خروجی با اعمال تغییر در مقاومت بار برای حالت سطح لغزش مرتبه کسری.

اعمال تغییرات ایجاد شده در مقاومت بار، قادر است ولتاژ مرجع را در مدت کوتاهی ردیابی کند. همچنین از منحنی خطا می‌توان دریافت که خطای ردیابی در زمان محدودی به صفر همگرا می‌شود.

شکل ۱۵ منحنی سطح لغزش مرتبه کسری را بعد از پیاده‌سازی روش کنترلی مد لغزشی مرتبه کسری فازی مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش و تخمینگر نامعینی با استفاده از شبکه عصبی نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، ابتدا که در سیستم خطای قابل ملاحظه‌ای وجود دارد، نوسان سطح لغزش دامنه بزرگ‌تری دارد و بعد از گذشت مدت زمانی



جدول ۲: مقایسه نتایج در حالت تغییر مقاومت بار.

مرتبه صحیح	مرتبه کسری	مرتبه صحیح	مرتبه کسری
$IAE = ۳۱۰۷۹۱$	$IAE = ۲۹۹۳۳$	بدون اعمال کنترل کننده	
$ITAE = ۰٫۰۳۱۲$	$ITAE = ۰٫۰۲۹۴$	فازی و عصبی	
$ISE = ۵۷۲٫۸۰۰۱$	$ISE = ۵۳۷٫۶۹۱۴$	با اعمال کنترل کننده فازی	
$IAE = ۳۱۰۳۴۸$	$IAE = ۲۹۷۲۳$		
$ITAE = ۰٫۰۳۰۲$	$ITAE = ۰٫۰۲۸۹$		
$ISE = ۵۶۵٫۲۸۳۲$	$ISE = ۵۳۴٫۴۶۰۴$		
$IAE = ۲۹۷۲۴$	$IAE = ۲۹۶۵۷$	با اعمال کنترل کننده	
$ITAE = ۰٫۰۲۸۸$	$ITAE = ۰٫۰۲۸۹$	فازی و عصبی	
$ISE = ۵۵۷٫۱۲۵۱$	$ISE = ۵۳۲٫۱۲۹۰$		

جدول ۳: مقایسه نتایج برای حالت تغییر مقاومت بار و تغییر خازن.

مرتبه صحیح	مرتبه کسری	مرتبه صحیح	مرتبه کسری
$IAE = ۳۱۰۷۹۸$	$IAE = ۲۹۹۳۵$	بدون اعمال کنترل کننده	
$ITAE = ۰٫۰۳۱۲$	$ITAE = ۰٫۰۲۹۴$	فازی و عصبی	
$ISE = ۵۷۲٫۸۰۰۴$	$ISE = ۵۳۷٫۶۹۱۶$	با اعمال کنترل کننده فازی	
$IAE = ۳۱۰۳۵۳$	$IAE = ۲۹۷۲۵$		
$ITAE = ۰٫۰۳۰۳$	$ITAE = ۰٫۰۲۸۹$		
$ISE = ۵۶۵٫۲۸۳۴$	$ISE = ۵۳۴٫۴۶۰۶$		
$IAE = ۲۹۷۲۶$	$IAE = ۲۹۶۵۹$	با اعمال کنترل کننده	
$ITAE = ۰٫۰۲۸۸$	$ITAE = ۰٫۰۲۸۹$	فازی و عصبی	
$ISE = ۵۵۷٫۱۵۸۹$	$ISE = ۵۳۲٫۱۲۹۲$		

متن نهایی قبل از چاپ مقاله کمال تشکر و قدردانی را دارند.

$$ISE = \int e(t)^2 dt \quad (۴۰)$$

که  $e(t)$  بیانگر خطای ردیابی ولتاژ است.

در جدول ۲ نتایج برای حالتی که مقاومت شبکه در لحظه  $۰٫۰۶$  ثانیه از  $۳۰۰$  اهم به  $۱۵۰$  اهم تغییر می‌کند، آورده شده است.  $IAE = ۲۹۹۳۳$  همچنین با تغییر مقاومت شبکه در لحظه  $۰٫۰۶$  ثانیه از  $۳۰۰$  اهم به  $۱۵۰$  اهم و تغییر خازن فیلتر خروجی سیستم فتوولتائیک در لحظه  $۰٫۰۳$  ثانیه از  $۲٫۸۲ \times 10^{-6} F$  به  $۲٫۳۲ \times 10^{-6} F$ ، نتایج به صورت جدول ۳ خواهد بود. همان طور که از جداول مذکور برداشت می‌شود، توابع هزینه کنترل کننده مرتبه کسری نسبت به کنترل کننده مرتبه صحیح مقادیر کمتری دارند. همچنین در مراحل که هر دو کنترل کننده فازی و شبکه عصبی به سیستم اضافه شده‌اند مقادیر خطا کمتر شده و بهترین عملکرد مربوط به کنترل کننده مد لغزشی مرتبه کسری فازی و تخمینگر شبکه عصبی است که روش کنترلی پیشنهادی این مقاله می‌باشد.

## ۶- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله، کنترل کننده مد لغزشی مرتبه کسری فازی مبتنی بر رویکرد اغتشاش و تخمینگر نامعینی با استفاده از شبکه عصبی بر روی اینورتر سیستم فتوولتائیک اعمال گردید. در مرحله اول، یک سطح لغزش مرتبه کسری برای سیستم فتوولتائیک در نظر گرفته شد تا مقاومت سیستم نسبت به اغتشاشات و نامعینی‌ها افزایش یابد. سپس یک رویکرد اغتشاش برای تخمین اغتشاشات سیستم طراحی گردید. ثابت بودن ضریب تابع علامت در قانون کنترل، چترینگ (لرزش سیگنال) را افزایش می‌دهد و به همین دلیل، یک کنترل کننده فازی برای تعیین برخط ضریب تابع علامت در نظر گرفته شد. همچنین یک شبکه عصبی تابع پایه شعاعی برای تخمین نامعینی‌های سیستمی طراحی گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که با اعمال روش پیشنهادی روی سیستم فتوولتائیک، هنگامی که شرایط محیطی (دما و تابش) یا پارامترهای سیستم (مقاومت بار یا ظرفیت خازن) تغییر می‌کند، اینورتر همچنان ولتاژ خروجی را ردیابی می‌نماید و سطح لغزش در زمانی محدود و بدون لرزش سیگنال به سمت صفر میل می‌کند؛ در نتیجه سیستم کنترلی پایدار باقی می‌ماند. نتایج شبیه‌سازی انجام شده بیانگر این است که روش پیشنهادی در حضور غیرخطی‌های سیستم، مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد و شاخص‌های عملکرد (تابع هزینه)، برتری روش کنترلی پیشنهادی را نسبت به سایر روش‌های کنترلی تأیید می‌کنند.

## ۷- تشکر و قدردانی

بدین وسیله نویسندگان مقاله از زحمات آقای امیر ویسی در ویرایش

## مراجع

- [1] M. M. Farag, et al., "An optimized fractional nonlinear synergic controller for maximum power point tracking of photovoltaic array under abrupt irradiance change," *IEEE J. of Photovoltaics*, vol. 13, no. 2, pp. 305-314, Mar. 2023.
- [۲] ح. ایجاد و ا. حاجی‌زاده، "ردیابی حداکثر توان در سیستم تولید توان خورشیدی بر پایه تقریبگر فازی تابع ولتاژ نقطه کار با شدت تابش،" *هوش محاسباتی در مهندسی برق*، جلد ۳، شماره ۲، صص. ۸۶-۷۳، شهریور ۱۳۹۱.
- [۳] م. صوفی و ع. حاتمی، "ارائه روش جدید کنترلی مبتنی بر مد لغزشی برای ردیابی نقطه حداکثر توان تولیدی مولدهای فتوولتائیک،" *هوش محاسباتی در مهندسی برق*، جلد ۱۰، شماره ۴، صص. ۱۴-۱، دی ۱۳۹۸.
- [4] J. Ahmed and Z. Salam, "An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency," *Applied Energy*, vol. 150, pp. 97-108, 15 Jul. 2015.
- [5] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu, and Y. Kang, "A variable step size INC MPPT method for PV systems," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 7, pp. 2622-2628, Jul. 2008.
- [6] H. Delavari and M. Zolfi, "Maximum power point tracking in photovoltaic systems using indirect adaptive fuzzy robust controller," *Soft Computing*, vol. 25, no. 16, pp. 10969-10985, Aug. 2011.
- [۷] س. عظیمی سردری، ب. میرزاییان دهکردی و م. نیرومندی، "ارائه روش هدایت افزایشی با گام تطبیقی بر مبنای کنترل کننده عاطفی در دنبال کننده‌های پیشینه توان سلول‌های خورشیدی،" *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران*، الف- مهندسی برق، جلد ۱۵، شماره ۲، صص. ۱۲۰-۱۱۴، تابستان ۱۳۹۶.
- [8] R. Ebead, B. Abo-Zalam, and E. Nabil, "System identification of photovoltaic system based on fractional-order model," *J. Comput. Electron.*, vol. 22, pp. 471-484, 2023.
- [9] P. Shah and S. Agashe, "Review of fractional PID controller, Mechatronics," *Mechatronics*, vol. 38, pp. 29-41, Sept. 2016.
- [10] S. Tang, et al., "An enhanced MPPT method combining fractional-order and fuzzy logic control," *IEEE J. of Photovoltaics*, vol. 7, no. 2, pp. 640-650, Mar. 2017.
- [11] B. Yang, T. Yu, et al., "Perturbation observer based fractional-order sliding-mode controller for MPPT of grid-connected PV inverters: design and real-time implementation," *Control Engineering Practice*, vol. 79, pp. 105-125, Oct. 2018.
- [12] J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Englewood Cliffs NJ: Prentice Hall, 1991.
- [۱۳] ه. دلاوری و م. محدث‌زاده، "کنترل آشوب در سیستم انتقال چرخ‌دنده با استفاده از روش کنترل مود لغزشی ترمینال تطبیقی جدید با عامل غیرخطی در ورودی کنترلی،" *مجله کنترل*، جلد ۱۰، شماره ۴، صص. ۵۳-۴۵، زمستان ۱۳۹۵.
- [14] S. Das, *Kindergarten of Fractional Calculus*, Cambridge Scholars Publishing, 2020.
- [15] H. Delavari and S. Naderian, "Backstepping fractional terminal sliding mode voltage control of an islanded microgrid," in *Proc. 5th Int. Conf. on Control, Instrumentation, and Automation, ICCIA'17*, pp. 167-172, Shiraz, Iran, 21-23 Nov. 2017.

- [27] E. Kandemir, N. S. Cetin, and S. Borekci, "A comprehensive overview of maximum power extraction methods for PV systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 93-112, Oct. 2017.
- [28] M. Al-Dhaifallah, A. M. Nassef, H. Rezk, and K. S. Nisar, "Optimal parameter design of fractional order control based INC-MPPT for PV system," *Solar Energy*, vol. 159, pp. 650-664, Jan. 2018.
- [29] G. Li and H. A. Wang, "A novel stand-alone PV generation system based on variable step size INC MPPT and SVPWM control," in *Proc. IEEE 6th Int. Power Electronics and Motion Control Conf.*, pp. 2155-2160, Wuhan, China, 17-20 May 2009.
- [30] L. Dong and S. K. Nguang, *Consensus Tracking of Multi-Agent Systems with Switching Topologies*, Elsevier Science, Academic Press, 2020.
- [31] L. Bouselham, M. Hajji, B. Hajji, and H. Bouali, "A new MPPT-based ANN for photovoltaic system under partial shading conditions," *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 924-933, Mar. 2017.
- [32] M. Ding, L. Wang, and R. Bi, "An ANN-based approach for forecasting the power output of photovoltaic system," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 11, pt. C, pp. 1308-1315, 2011.
- [33] Y. Zhu and J. Fei, "Adaptive global fast terminal sliding mode control of grid-connected photovoltaic system using fuzzy neural network approach," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 9476-9484, 2017.
- [۱۶] هد دلاوری و ز. رشیدنژاد حیدری، "طراحی کنترل کننده مد لغزشی ترمینال تطبیقی مرتبه کسری برای ردیابی نقطه حداکثر توان در یک سلول خورشیدی تحت شرایط عادی و شرایط سایه جزئی،" *سامانه‌های غیرخطی در مهندسی برق*، جلد ۵، شماره ۲، صص. ۲۲-۴، پاییز و زمستان ۱۳۹۷.
- [17] H. Delavari and S. Naderian, "Design and HIL implementation of a new robust fractional sliding mode control of microgrids," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 14, no. 26, pp. 6690-6702, Dec. 2020.
- [18] C. Yuan, J. Xia, F. Huang, P. Zhao, and L. Kong, "A novel hermite interpolation-based MPPT technique for photovoltaic systems under partial shading conditions," *IEEE Photonics J.*, vol. 16, no. 2, Article ID: 8400110, 10 pp., Apr. 2024.
- [19] G. A. Ghazi, et al., "Dandelion optimizer-based reinforcement learning techniques for MPPT of grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 42932-42948, 2024.
- [20] R. Liv, Y. Zhu, and Y. Yang, "Robust design of perturb & observe maximum power point tracking for photovoltaic systems," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 60, no. 4, pp. 6547-6558, Jul./Aug. 2024.
- [21] O. Gül and N. Tan, "Application of fractional-order voltage controller in building-integrated photovoltaic and wind turbine system," *Measurement and Control*, vol. 52, no. 7-8, pp. 1145-1158, Sept./Oct. 2019.
- [22] M. Samadi and S. M. Rakhtala, "Reducing cost and size in photovoltaic systems using three-level boost converter based on fuzzy logic controller," *Iran J. Sci. Technol. Trans. Electr. Eng.*, vol. 43, pp. 313-323, 2019.
- [23] O. Saleem, S. Ali, and J. Iqbal, "Robust MPPT control of stand-alone photovoltaic systems via adaptive self-adjusting fractional order PID controller," *Energies*, vol. 16, no. 13, Article ID: 5039, 20 pp., 2023.
- [24] M. Samadi, S. M. Rakhtala, and M. Ahmadian Alashti, "Boost converter topologies, hybrid boost and new topologies of voltage multiplier in photovoltaic systems," *J. of Solar Energy Research*, vol. 4, no. 4, pp. 287-299, Autumn 2019.
- [25] A. Messai, A. Mellit, A. Guessoum, and S. A. Kalogirou, "Maximum power point tracking using a GA optimized fuzzy logic controller and its FPGA implementation," *Solar Energy*, vol. 85, no. 2, pp. 265-277, Feb. 2011.
- [26] Y. Zhu and J. Fei, "Disturbance observer based fuzzy sliding mode control of PV grid connected inverter," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 21202-21211, 2018.

**هادی دلاوری** مدارک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۲، ۱۳۸۴ و ۱۳۹۰ اخذ کرد. وی از سال ۱۳۸۷ به بعد با گروه مهندسی برق دانشگاه صنعتی همدان همکاری داشته و در این دانشگاه به‌عنوان عضو هیئت علمی دانشیار مشغول به همکاری است. وی در حال حاضر عضو ارشد IEEE است و بیش از ۱۵۰ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر داخلی و بین‌المللی و ۷ فصل کتاب و یک کتاب تصنیفی منتشر کرده است. تحقیقات او بر حوزه‌های مختلفی از جمله هوش مصنوعی، نظریه کنترل غیرخطی و کاربردهای عملی آن، کنترل مرتبه کسری، سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، رباتیک و ... متمرکز است.

**سارا ارجمندیور** مقطع کارشناسی خود را در گرایش کنترل دانشگاه صنعتی همدان به پایان رساند و همچنین در مقطع کارشناسی ارشد کنترل، دانشجوی دانشگاه صنعتی همدان است. زمینه‌های علاقه‌مندی ایشان کنترل غیرخطی، سیستم‌های فتوولتائیک و منطق فازی و شبکه‌های عصبی است.