

# ارائه روش جدید در ردیابی نقطه حداکثر توان سلول‌های خورشیدی بر اساس سیستم استخراج نقطه اکسترمم

حامد حیدری دوست‌آباد

دانشکده مهندسی برق

دانشگاه فردوسی مشهد

مشهد، ایران

رضا کی‌پور

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دانشگاه سمنان

سمنان، ایران

**چکیده** — در این مقاله، به بررسی سیستم استخراج نقطه اکسترمم در ردیابی نقطه حداکثر توان در سلول‌های خورشیدی پرداخته شده و سیستم بهبود یافته‌ای بدین منظور ارائه می‌شود که نسبت به سیستم کلاسیک دارای سرعت پاسخ بسیار بالاتری می‌باشد. همچنین سیستم پیشنهادی در این مقاله دارای ویژگی ساده بودن نیز می‌باشد که منجر به پیاده سازی با سادگی و صرفه اقتصادی خواهد شد. صحت عملکرد سیستم پیشنهادی در این مقاله با استفاده از شبیه سازی و همچنین پیاده سازی آزمایشگاهی مورد تحقیق قرار گرفته است.

**واژه‌های کلیدی** — استخراج نقطه اکسترمم؛ بهره‌سازی آزمایشگاهی؛ ردیابی نقطه حداکثر توان؛ آرایه خورشیدی؛

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از منابع انرژی نو به ویژه انرژی باد و خورشید بسیار مورد توجه کشورهای پیشرفته قرار گرفته است. در کشور ما نیز استفاده از این منابع پاک انرژی و تبدیل آن به انرژی الکتریکی رو به رشد می‌باشد. مزیت‌های اصلی استفاده از انرژی‌های نو شامل تجدید پذیر بودن، پایان ناپذیری، سازگاری با محیط زیست و در طول زمان نیز دارای صرفه اقتصادی خواهد بود.

یکی از انواع انرژی نو، انرژی خورشیدی است که بوسیله ابزاری با نام سلول‌های خورشیدی (PV) می‌توان آنرا به انرژی الکتریکی تبدیل کرد.

مقدار انرژی دریافتی از سلول‌های خورشیدی به عوامل زیادی همچون زاویه قرار گیری پنل‌ها، شرایط جوی، میزان تابش، دما و ... وابسته است. در مورد وضعیت قرار گیری صفحات خورشیدی، باید بیان کرد که بهینه سازی این پارامتر وابسته به عوامل مکانیکی و مستلزم هزینه‌های زیادی می‌باشد. یکی از کم هزینه ترین در عین حال مؤثرترین روش‌های دریافت بیشترین توان از صفحات خورشیدی، ردیابی الکتریکی نقطه حداکثر توان می‌باشد که در شرایط جوی مختلف سعی در دریافت بیشترین توان ممکن از سلول را دارد.

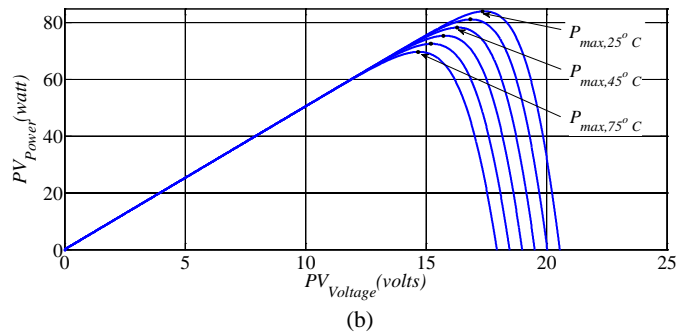
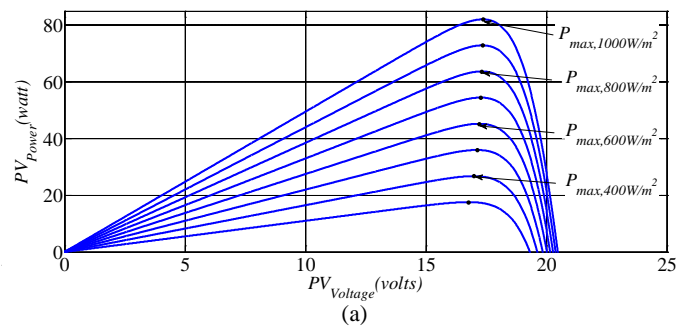
با توجه به غیر خطی بودن مشخصه‌های ولتاژ-جریان و توان-جریان آرایه‌های خورشیدی، توان دریافتی از آن‌ها وابستگی به نقطه کار خواهد داشت، به این معنا که به ازای هر تابش و دمای خاص یک نقطه کار دارای حداکثر توان می‌باشد. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، به ازای هر تغییر در میزان تابش یا دما، اقداماتی جهت دستیابی به نقطه کار بیشینه لازم است صورت گیرد. این اقدامات، ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT) <sup>۱</sup> نامیده می‌شود. MPPT توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت صورت می‌گیرد تا با اعمال ولتاژ مطلوب به دو سر آرایه خورشیدی، حداکثر توان الکتریکی را از آرایه دریافت نماید. در واقع هدف از MPPT اعمال ولتاژ مناسب به دو سر آرایه خورشیدی برای دریافت بیشترین جریان از آرایه است. تا کنون روش‌های بسیاری برای هرچه بهینه کردن سیستم MPPT ارائه شده که بیان مختصری از کلیات این روش‌ها می‌پردازیم.

<sup>2</sup> Maximum Power Point Tracking

<sup>1</sup> Photovoltaic cell

یافته<sup>۶</sup> استفاده می‌شود [۷ و ۸]. در روش هدایت افزایش یافته ولتاژ یا جریان خروجی آرایه PV به گونه‌ای تنظیم می‌شود که نسبت جریان به ولتاژ خروجی PV برابر هدایت افزایشی  $dl/dV$  شود. با مشاهده هر گونه انحراف، نسبت جریان به ولتاژ به گونه‌ای تغییر می‌کند که این نسبت برابر  $dl/dV$  شود زیرا در این نقطه حداکثر توان حاصل می‌شود [۹ و ۱۰]. روش دیگر در مواجهه با تغییرات نقطه حداکثر توان، روش مقایسه سه نقطه وزن‌دار<sup>۷</sup> می‌باشد. در روش مقایسه سه نقطه وزن‌دار، سه نقطه اندازه‌گیری، مقایسه و وزن‌دهی می‌شوند. به محض آنکه وزن‌دهی منجر به دریافت توان بیشتری از آرایه PV شود، وزن‌ها ثابت می‌شوند. در این روش روند سیستم کنترل پیچیده و در نتیجه پاسخ سیستم دارای سرعت پایین است [۱۱ و ۱۲]. در روش تقریب خطی<sup>۸</sup> ردیابی نقطه حداکثر توان با دنبال کردن خط مستقیم تقریبی بین نقاط حداکثر توان در شرایط مختلف تابش، انجام می‌شود. در این روش ردیابی نقطه حداکثر توان با سرعت بیشتر ولی با دقت کمتری همراه است همچنین تأثیر دما در تغییر نقطه حداکثر توان در نظر گرفته نشده‌است. در روش‌های شبکه‌های عصبی و الگوریتم کنترل فازی به صورت کامل کنترل MPPT با در نظر گرفتن شرایط مختلف جوی و پارامترهای سلول PV انجام می‌شود، اما محاسبات پیچیده و نیاز به میکروکنترلر در این روش‌ها دیده می‌شود. الگوریتم تقریب دو خطی<sup>۹</sup> که در مرجع [۱۳] به آن اشاره شده توانایی ردیابی نقطه حداکثر توان به صورت آبی و با امکان پیاده‌سازی آسان را دارا می‌باشد. این روش بر اساس تخمین مسیرهای نقطه حداکثر توان تغییرات تابش و دما به صورت خطی می‌باشد.

در مقاله پیش رو روشی بر اساس استخراج اکسترمم (ESC) توان ارائه شده که علاوه بر پاسخ بسیار سریع به تغییرات، دارای دقت بسیار مطلوبی نیز می‌باشد. این روش بر اساس استفاده از بسط سری تیلور سیگنال‌های پیوسته در تعیین نقطه بیشینه می‌باشد. در این گفتار مقایسه‌ای بین عملکرد سیستم پیشنهادی در این مقاله، با روش‌های آشوب و مشاهده و همچنین هدایت افزایش یافته انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی شده و همچنین نتایج آزمایشگاهی گواهی بر صحت عملکرد روش ارائه شده در این مقاله می‌باشد.



شکل ۱: منحنی توان بر حسب ولتاژ سلول خورشیدی (a. بر اساس تغییر میزان تابش، b. بر اساس تغییر دما).

مرجع [۱] روش الگوریتم پس‌خور ولتاژ آسان‌ترین سیستم MPPT بیان کرده که در این سیستم ولتاژ پایانه‌های آرایه PV در نقطه‌ای که بیشترین توان را دارا باشد، تنظیم می‌شود. این روش برای سیستم‌های خورشیدی که دارای شرایط تابشی و دمایی ثابتی هستند، مناسب‌تر است. در مرجع [۲ و ۳] روش پس‌خور توان<sup>۳</sup> از مشتق  $dP/dV$  به عنوان مرجع سیستم کنترل استفاده می‌شود. در این سیستم کنترل، ولتاژ خروجی کنترل شده به گونه‌ای تنظیم می‌شود که مشتق معرفی شده به صفر نزدیک شود، بیشترین توان در این زمان حاصل می‌شود. این در حالی است که این سیستم با محاسبات پیچیده همراه است که دستیابی به MPPT را با سختی همراه می‌سازد.

روش آشوب و مشاهده<sup>۴</sup> به صورت گسترده در ردیابی‌های توان سلول‌های PV استفاده می‌شود که دلیل آن سادگی سیستم کنترل و تعداد کم پارامترهای اندازه‌گیری، می‌باشد [۴ و ۵]. با وجود این که ردیابی نقطه حداکثر توان بوسیله روش آشوب و مشاهده حاصل می‌شود، اما همچنان این نقاط حالت بهینه ندارد و آرایه PV دارای تلفات است، همچنین در این روش لازم است شرایط جوی ثابت یا با تغییرات آهسته همراه باشد [۶]. برای چیره شدن بر تلفات روش آشوب و مشاهده از روش هدایت افزایش

<sup>6</sup> Incremental Conductance Method

<sup>7</sup> 3-point Weight Comparison Method

<sup>8</sup> Linear Approximation Method

<sup>9</sup> Double-Linear Approximation Algorithm

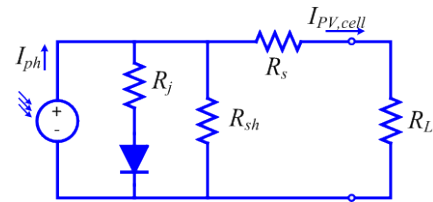
<sup>3</sup> Voltage Feedback Method

<sup>4</sup> Power Feedback Method

<sup>5</sup> Perturb and Observe Method

## ۲. مدل سازی سلول‌های خورشیدی

یک پنل خورشیدی مجموعه‌ای از سلول‌های خورشیدی است که به صورت سری و/یا موازی با یکدیگر اتصال یافته‌اند. هر سلول PV یک پیوند نیمه هادی  $p-n$  می‌باشد که انرژی تابشی خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. یک نمونه مدار معادل برای سلول PV در شکل ۲ نشان داده شده که  $I_{ph}$  بیانگر جریان دیود حساس به نور،  $R_j$ ،  $R_{sh}$  و  $R_s$  امپدانس غیرخطی پیوند  $p-n$  مقاومت موازی ذاتی و مقاومت سری درونی سلول می‌باشد. مقاومت  $R_s$  بسیار کوچک و مقاومت  $R_{sh}$  بسیار بزرگ می‌باشد در نتیجه برای ساده‌سازی مدار می‌توان از این دو صرف نظر کرد.



شکل ۲: مدار معادل یک سلول خورشیدی.

با توجه به مدار معادل سلول PV، جریان خروجی آرایه PV به صورت زیر می‌باشد:

$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{q}{nkT} \frac{V_{PV}}{N_s}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

که  $I_{PV}$  و  $V_{PV}$  جریان و ولتاژ آرایه PV،  $N_p$  و  $N_s$  تعداد سلول سری و موازی آرایه،  $q$  بار هر الکترون ( $1.6 \times 10^{-19}$  کولمب)،  $k$  ثابت بولتزمن ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )،  $T$  دمای آرایه PV ( $^{\circ}\text{K}$ ) و  $n$  ضریب ایده‌آل پیوند  $p-n$  (بین ۱ تا ۵) می‌باشد [۱۹]. همچنین  $I_{sat}$  اشاره به جریان اشباع معکوس سلول PV دارد که وابسته به دمای آرایه PV می‌باشد و با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$I_{sat} = I_s \times \left(\frac{T}{T_s}\right)^{\frac{r}{n}} \times \exp\left[\frac{qE_{gap}}{nk} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (2)$$

که  $T_0$  دمای مرجع سلول،  $I_0$  جریان اشباع معکوس سلول در دمای  $T_0$  و  $E_{gap}$  ولتاژ فاصله هوایی نیمه هادی در آرایه PV می‌باشد. در رابطه (۱)،  $I_{ph}$  با تغییر مقادیر تابش  $S_i$  و دمای آرایه  $T$  تغییر می‌کند که به صورت زیر قابل بررسی است:

$$I_{ph} = I_{sc,T} \times S_i + K_i (T - T_0) \quad (3)$$

که  $I_{sc,T_0}$  جریان اتصال کوتاه آرایه در دمای  $T_0$  و  $K_i$  ضریب دمایی می‌باشد. بر اساس رابطه (۱) توان خروجی آرایه PV به صورت زیر قابل تعیین است:

$$P_{PV} = I_{PV} V_{PV} = \quad (4)$$

$$N_p I_{ph} V_{PV} - N_p I_{sat} V_{PV} \left[ \exp\left(\frac{q}{nkT} \frac{V_{PV}}{N_s}\right) - 1 \right]$$

که این رابطه نشان می‌دهد مقدار توان تولیدی  $P_{PV}$  وابستگی به میزان تابش  $S_i$  و دمای  $T$  آرایه PV دارد.

پنل خورشیدی استفاده شده در این مقاله از نوع BP 3220N ساخت شرکت BP Solar می‌باشد که مشخصات این پنل در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱: مشخصات آرایه خورشیدی BP3220N

مقدار	مشخصه
۲۲۰ وات	توان بیشینه ( $P_{max}$ ):
۱۳.۲ درصد	بازده ماژول:
۲۹.۰ ولت	ولتاژ در $P_{max}$ ( $V_{mpp}$ ):
۷.۶ آمپر	جریان در $P_{max}$ ( $I_{mpp}$ ):
۸.۴ آمپر	جریان اتصال کوتاه ( $I_{sc}$ ):
۳۶.۲ ولت	ولتاژ مدار باز ( $V_{oc}$ ):
$(0.065 \pm 0.015) \% / K$	ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه:
$-(0.36 \pm 0.05) \% / K$	ضریب دمایی ولتاژ مدار باز:
$-(0.5 \pm 0.05) \% / K$	ضریب دمایی توان بیشینه:

## ۳. سیستم کنترل استخراج نقطه اکسترمم

سیستم کنترل استخراج نقطه اکسترمم دارای بیشینه‌ای طولانی است، برای اولین بار این روش در سال ۱۹۵۱ در مراجع [۲۰ و ۲۱] قرار گرفته است. اساس این روش استفاده از تجزیه یک سیگنال به مجموعه‌ای از جملات سینوسی و کسینوسی است که با عبور از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر توانایی استخراج نقطه اکسترمم هر تابعی را دارا می‌باشد.

### ۳.۱. ESC کلاسیک

بر اساس رابطه سری تیلور، یک سیگنال را می‌توان حول نقطه دلخواه به صورت مجموعه‌ای از مشتقات آن نوشت. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، می‌توان خروجی  $I$  را به صورت تابعی از ورودی یعنی

### ۳.۲. ESC بهبود یافته

$y=f(x)$  و مقدار  $x$  را نیز می‌توان به صورت مجموعی از مقدار ثابت  $u$  و مقدار متناوبی با فرکانس  $\omega_0$  یعنی  $x=u+u_0\sin(\omega_0t)$  بیان کرد. در نتیجه:

$$y = f(u + u \cdot \sin(\omega t)) \quad (5)$$

بر اساس سری تیلور رابطه (۵) را می‌توان به این صورت باز نویسی کرد:

$$y \approx f(u) + \frac{df(u)}{du} u \cdot \sin(\omega t) + \frac{1}{2} \frac{d^2 f(u)}{du^2} u^2 \sin^2(\omega t) + \dots \quad (6)$$

با ساده سازی و صرف نظر از جملات با توان بالا خواهیم داشت:

$$y \approx f(u) + \frac{df(u)}{du} u \cdot \sin(\omega t) + \frac{1}{4} \frac{d^2 f(u)}{du^2} u^2 - \quad (7)$$

$$\frac{1}{4} \frac{d^2 f(u)}{du^2} u^2 \cos(2\omega t)$$

با عبور رابطه (۷) از فیلتر بالاگذر داریم:

$$y_{hpf} \approx \frac{df(u)}{du} u \cdot \sin(\omega t) - \frac{1}{4} \frac{d^2 f(u)}{du^2} u^2 \cos(2\omega t) \quad (8)$$

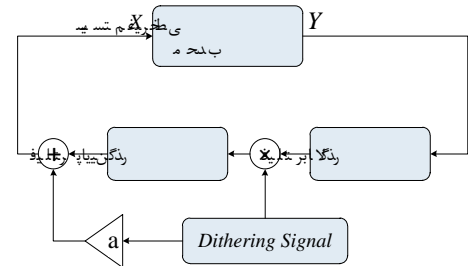
با ضرب رابطه (۸) در سیگنال  $\sin(\omega_0 t)$  و عبور از فیلتر پایین گذر داریم:

$$y_{lpf} \approx \frac{1}{2} \frac{df(u)}{du} u. \quad (9)$$

در نهایت حاصل جمع  $y_{lpf}$  و  $\sin(\omega_0 t)$  داریم:

$$z = y_{lpf} + a \sin(\omega t) \quad (10)$$

در واقع خروجی سیستم ESC مشتق خروجی سیستم غیرخطی است، از این ویژگی می‌توان برای تعیین نقطه مشتق استفاده کرد به عبارت دیگر هر گاه خروجی سیستم ESC صفر شد نقطه تحدب را یافته‌ایم زیرا همانطور که می‌دانیم مشتق نقطه تحدب برابر صفر است.

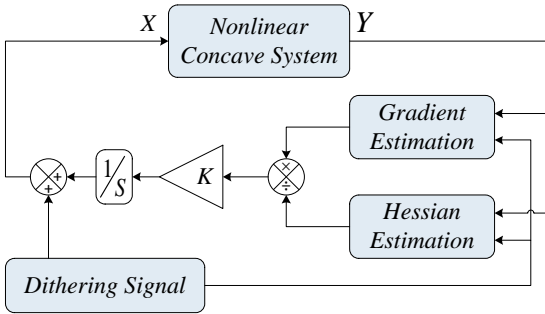


شکل ۳: سیستم استخراج نقطه حداکثر توان.

در این مقاله روش جدیدی براساس سیستم استخراج نقطه حداکثر

توان پیشنهاد می‌شود. در روش ارائه شده در این مقاله، همانطور که در

شکل ۴ مشاهده می‌شود، مشاهده می‌شود که توان خروجی پیل از قسمتی با فرکانس پایین ساخته شده که همراه با هارمونیک‌هایی با فرکانس‌های  $\omega$  و  $2\omega$  است. سپس با استفاده از یک فیلتر بالا گذر خروجی به صورت زی حاصل می‌شود:



شکل ۴: سیستم ESC بهبود یافته پیشنهادی.

$$y_f \approx \frac{df(u)}{du} u \cdot \sin(\omega t) - \frac{1}{4} \frac{d^2 f(u)}{du^2} u^2 \cos(2\omega t) \quad (11)$$

حاصل ضرب خروجی فیلتر در عبارت  $u^2 \cos^2(\omega t)$  به صورت زی خواهد شد:

$$y_p \approx \frac{1}{2} \frac{df(u)}{du} u^2 \sin(\omega t) + \frac{1}{4} \frac{df(u)}{du} u^2 \sin(3\omega t) \quad (12)$$

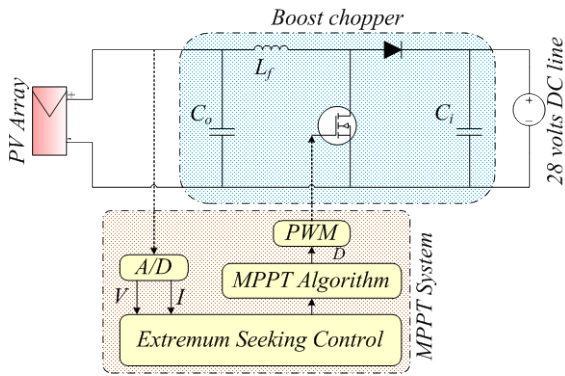
$$- \frac{1}{4} \frac{df(u)}{du} u^2 \sin(\omega t) - \frac{1}{8} \frac{d^2 f(u)}{du^2} u^2 \cos(2\omega t)$$

$$- \frac{1}{16} \frac{d^2 f(u)}{du^2} u^4 - \frac{1}{16} \frac{d^2 f(u)}{du^2} u^4 \cos(4\omega t)$$

با عبور  $y_p$  از یک فیلتر پایین گذر خروجی سیستم ESC به صورت زی نمایش می‌شود:

$$y_{est.} \approx - \frac{1}{16} \frac{d^2 f(u)}{du^2} u^4 \quad (13)$$

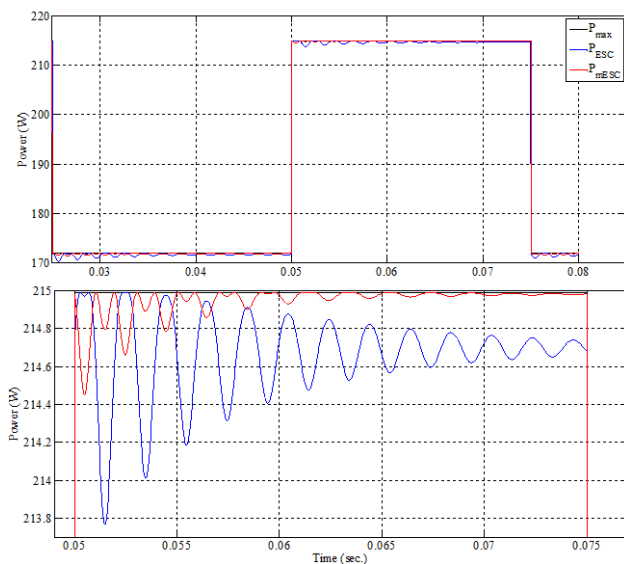
نمودار بلوکی تخمین‌گرهای سیستم ESC در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، سیستم ESC شامل دو تخمین‌گر گرادیان و هسیان می‌باشد. تخمین‌گر گرادیان شامل یک سیگنال لرزان با فرکانس  $f$  و یک فیلتر پایین گذر می‌باشد که خروجی این تخمین‌گر بر خروجی سیستم هسیان تقسیم خواهد شد. تخمین‌گر هسیان متشکل از فیلترهای بالاگذر و پایین گذر و همچنین سیگنال لرزان با فرکانس  $2f$  است.



شکل ۶: نمودار بلوکی سیستم شبیه سازی شده.

## ۴. نتایج شبیه سازی

به منظور بررسی عملکرد صحیح سیستم پیشنهادی در این مقاله، در این قسمت به شبیه سازی مدل ارائه شده با استفاده از نرم افزار *Matlab/Simulink* پرداخته می‌شود. برای شبیه سازی میزان تابش خورشید را مورد تغییر قرار می‌دهیم. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با تغییر میزان تابش از ۲۰۰ به ۸۰۰ وات بر مترمربع سیستم ESC پیشنهاد شده در این مقاله دارای بازده ۹۹٪ است و این در حالی است که سیستم ESC کلاسیک دارای بازده ۹۵٪ است



شکل ۷: نتایج حاصل از شبیه سازی.

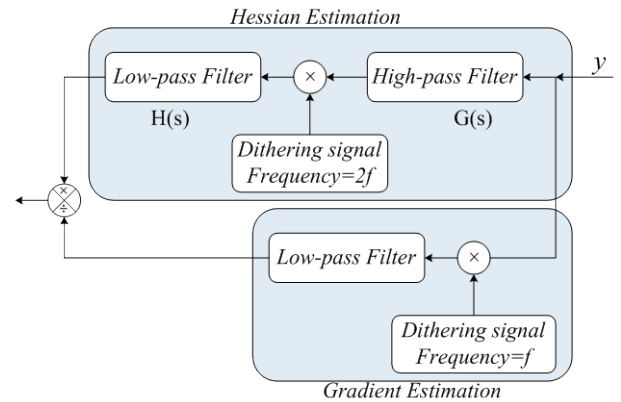
## ۵. نتایج آزمایشگاهی

به منظور بررسی صحت سیستم طراحی شده در این قسمت به طراحی و ساخت سیستم آنالوگ برای بررسی نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است.

فیلتر پایین گذر و بالا گذر تخمینگر هسیان به صورت تابع تبدیل مرتبه دوم در رابطه (۱۴) نمایش داده شده است.

$$H(s) = \frac{H_0}{s^2 + 2\xi_H \omega_H s + \omega_H^2} \quad (14)$$

$$G(s) = \frac{G_0 s^2}{s^2 + 2\xi_G \omega_G s + \omega_G^2}$$



شکل ۵: تخمینگرهای استفاده شده در سیستم پیشنهادی.

مزیت سیستم بهبود یافته ESC که در این مقاله ارائه شده در این است که خروجی سیستم پیشنهادی دارای مشتق مرتبه دوم است که دقت بیشتری در تعیین نقطه اکسترمم خواهد داشت.

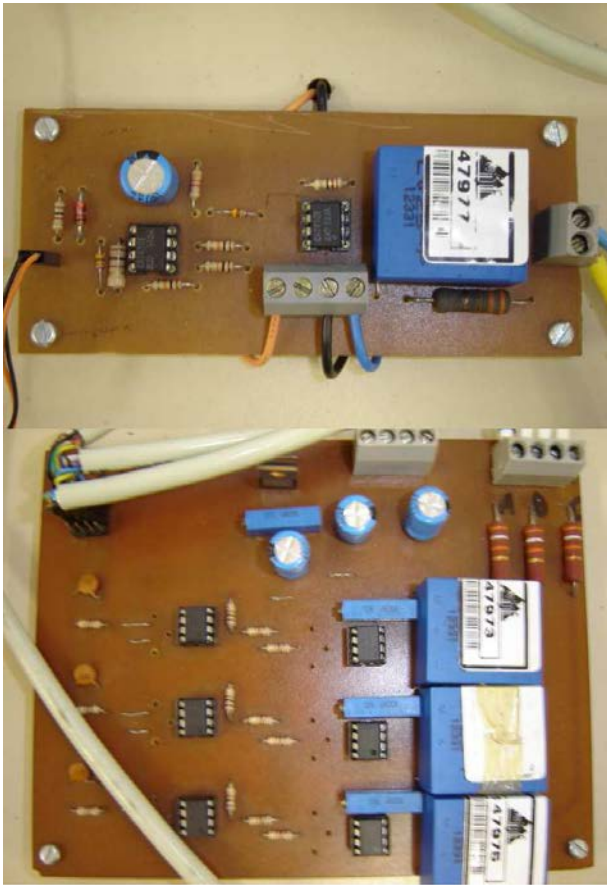
به منظور تطبیق بار با پنل خورشیدی برای جذب حداکثر توان، در این مقاله از مبدل کل‌چیزی بوست به عنوان پردازشگر توان استفاده شده است. رابطه ولتاژ خروجی و ولتاژ ورودی در این مبدل به صورت زیر می‌باشد که  $D$  چلن کننده دوره وظیفه کل‌چیزی سیستم است.

$$V_{out} = \frac{1}{1-D} V_{in} \quad (15)$$

در این مقاله تنظیم دوره کار کل‌چیزی مدولاسیون پهنای پالس (PWM) به عهده سیستم ESC می‌باشد در واقع ESC برای دستیابی به MPP دوره کاری مناسب را تنظیم می‌کند و به سیستم چارپ بوست ارسال می‌کند.

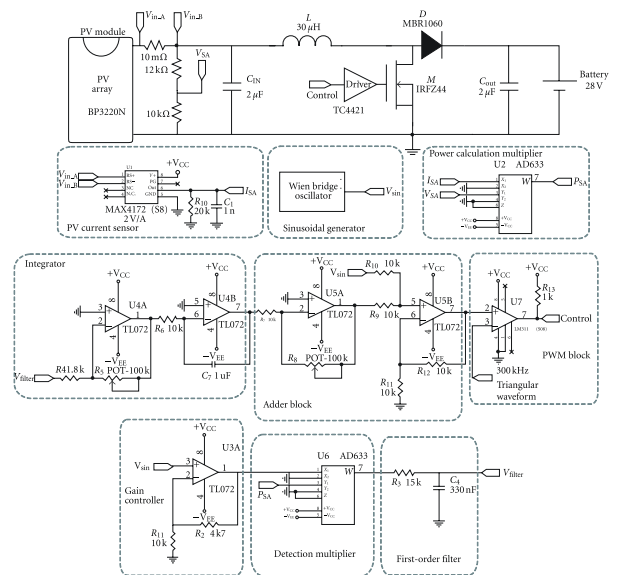
لازم به توضیح است که انواع دیگر چارپرها از جمله چارپهای ای‌وله شده در مقدار سرعت نهایی پاسخ، اثری ندارند و فقط از جهت ای‌وله سازی شبکه از سیستم حائز اهمیت اند. شمای کلی روش‌های کلاسیک ESC به صورت نمودار بلوکی در شکل ۶ نمایش داده شده است.





شکل ۹: پروتوتایپ سیستم پیشنهادی در این مقاله.

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، سیستم پیشنهادی در این مقاله را می‌توان با استفاده از مدارهای آنالوگ پیاده سازی کرد یکی از مزیت‌های سیستم پیشنهادی سادگی پیاده سازی آن است. پروتوتایپ سیستم پیشنهادی نیز در شکل ۹ مشاهده می‌شود سیستم پیشنهادی با استفاده از مدارهای آنالوگ پیاده سازی شده است. در شکل ۱۰ نیز نتایج حاصل از پیاده سازی آزمایشگاهی با تغییر پله‌ای میزان تابش نمایش داده شده است. همانطور که از نتایج حاصل از پیاده سازی عملی پیداست سیستم پیشنهادی در این مقاله دارای سرعت پاسخ بسیار بالایی است که این سرعت را نیز می‌توان با استفاده از مدارهای آنالوگ با پهنای باند بیشتر، افزایش داد، همچنین باید توجه داشت که علت اختلاف بین سیستم شبیه سازی شده با سیستم آزمایشگاهی ایده‌آل نبودن المان‌های استفاده شده در بحث پیاده سازی است.



شکل ۸: مدار آنالوگ پیشنهادی برای پیاده سازی سیستم مورد نظر.



شکل ۱۰: نتایج حاصل از پیاده سازی آزمایشگاهی.

## ۶. نتیجه گیری

همانطور که اشاره شد، سیستم پیشنهادی در این مقاله بر اساس سیستم استخراج حداکثر توان می‌باشد که با اضافه کردن تخمینگر دوم و سیگنال لرزان با فرکانس دو برابر تخمینگر اول سرعت عملکرد و پاسخ گویی آن بسیار افزایش یافته است. از دیگر ویژگی‌های سیستم پیشنهادی سادگی در پیاده سازی آن می‌باشد و با استفاده از مدارهای ساده و آنالوگی جواب مطلوبی حاصل شده است. باید توجه داشت که این سیستم دارای ویژگی تطبیق پذیری نیز می‌باشد و با تغییر نوع سلول خورشیدی این قابلیت را دارا می‌باشد که خود را با شرایط موجود وفق دهد. سیستم آزمایشگاهی پیاده سازی شده نیز علاوه بر سادگی، بسیار مقرون به صرفه بوده و با استفاده از مدارهای شامل المان‌های آنالوگ دارای پاسخ بسیار مطلوب می‌باشد. البته استفاده از مدارهای دیجیتال در پیاده سازی باعث افزایش سرعت پاسخ می‌شود که در مطالعات بعدی ارائه خواهد شد.

## منابع

- [۱۱] سجاد موسوی و گئورگ قره‌پتیان، "بهبود روش هدایت افزایشی در دنبال کننده‌های حداکثر توان مولدهای فتوولتائیک،" *سیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۸۹.*
- [۱۲] امین روح‌الامینی و روح‌الله فدایی نژاد، "بهبود روش هدایت افزایشی به منظور دریافت بیشترین توان از مولدهای فتوولتائیک،" *سیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۹۰.*
- [13] M. C. Wu, K. J. Lin, and C. R. Lin, "Analysis and research maximum power point tracking of photovoltaic array," in *In Proceedings of the International Conference on Computer Communication Control and Automation, Tainan, Taiwan, 2010*, pp. 196–200.
- [14] Y. T. Hsiao and C. H. Chen, "Maximum power tracking for photovoltaic power system," in *In Proceedings of the 2002 IEEE Industry Applications Conference, Pittsburgh, PA, USA, 2002*, pp. 1035–1040.
- [15] C. T. Pan, J. Y. Chen, C. P. Chu, and Y. S. Huang, "A fast maximum power point tracker for photovoltaic power systems," in *In Proceedings of the 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, San Jose, CA, USA, 1999*, pp. 390–393.
- [16] W. M. Lin, C. M. Hong, and C. H. Chen, "Neural-network-based MPPT control of a stand-alone hybrid power generation system," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 26, pp. 3571–3581, 2011.
- [17] K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, "Fuzzy-logic-control approach of a modified hill-climbing method for maximum power point in microgrid standalone photovoltaic system," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 26, pp. 1022–1030, 2011.
- [18] C. S. Chiu, "T-S fuzzy maximum power point tracking control of solar power generation systems," *IEEE Trans. on Energy Convers.*, vol. 25, pp. 1123–1132, 2010.
- [۱۹] جاوید خراسانی، ع لی اکبر قره‌ویسی، م سعود رشیدی نژاد و علی م راد خواجه‌زاد، "بهبود سرعت ردیابی نقطه ماکزیمم توان در سیستم های فتوولتائیک با استفاده از منطق فازی،" *سیستین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، پژوهشگاه نیرو، ۲۰۰۵.*
- [20] C. S. Draper and Y. T. Li, "Principles of optimizing control systems and an application to the internal combustion engine," ASME Publications, Sep. 1951.
- [21] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: An algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 142, pp. 59–64, 1995.
- [1] Z. Salameh, F. Dagher, and W. A. Lynch, "Step-down maximum power point tracker for photovoltaic system," *Sol. Energy*, vol. 46, pp. 278–282, 1991.
- [2] Z. Salameh, F. Dagher, and W. A. Lynch, "Step-down maximum power point tracker for photovoltaic system," *Sol. Energy*, vol. 46, pp. 278–282, 1991.
- [3] K. Harada and G. Zhao, "Controlled power interface between solar cells and AC source," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 8, pp. 654–662, 1993.
- [4] F. Harashima, H. Inaba, S. Kondo, and N. Takashima, "Microprocessor-controlled SIT inverter for solar energy system," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, pp. 50–55, 1987.
- [5] O. Waszynek, "Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power Systems," *IEEE Trans. on Power Appar. Syst.*, pp. 3031–3037, 1983.
- [6] N. Patcharaprakiti and S. Premrudeepreechacharn, "Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system," in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, NY, USA, 2002*, pp. 372–377.
- [7] C. C. Hua, J. R. Lin, and C. M. Shen, "Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 45, pp. 99–107, 1998.
- [8] Z. Salameh and D. Taylor, "Step-up Maximum power point tracker for photovoltaic arrays," *Sol. Energy*, vol. 44, pp. 57–61, 1990.
- [9] Y. C. Kuo, T. J. Liang, and J. F. Chen, "Novel Maximum-power-point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 48, pp. 594–601, 2001.
- [10] F. R. Liu, S. X. Duan, F. Liu, B. Y. Liu, and Y. Kang, "A variable step size INC MPPT method for PV Systems," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 55, pp. 2622–2628, 2008.