استفاده از اینورتر چندسطحی با کنترل‌کننده غیرخطی مستقیم برای اتصال مزرعه خورشیدی به شبکه

حمیدرضا تودجی

استادیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه یزد- یزد- ایران

toodeji@yazd.ac.ir

چکیده : مزرعه خورشیدی مبتنی بر سلول‌های فتوولتاییک (PV) برای تحویل انرژی DC تولیدی خود به شبکه AC نیاز به اینورتر دارد. در میان انواع اینورترهای موجود، اینورترهای چندسطحی پل H به دلیل ویژگی‌هایی نظیر نیاز به منابع DC مستقل و نیز کوچکتر بودن فیلتر خروجی به دلیل هارمونیک‌های تولیدی کمتر، مناسب برای کاربرد در مزرعه خورشیدی می‌باشند. در مقاله حاضر، روش کنترل غیرخطی مستقیم برای این دسته از اینورترها با فیلتر خروجی LCL برای کاربرد در مزرعه خورشیدی ارائه می‌شود. در روش کنترل پیشنهادی می‌توان ولتاژ پایانه‌های DC اینورتر چندسطحی را به صورت مستقل از یکدیگر کنترل نمود. با استفاده از این قابلیت، هم می‌توان با تقسیم مزرعه خورشیدی به نواحی مجزا و کنترل مستقل هر ناحیه که به یکی از پایانه‌های DC اینورتر چندسطحی متصل شده، حداکثر توان از مزرعه خورشیدی را به دست آورد و هم می‌توان مبدل‌های DC-DC که به منظور تنظیم نقطه کار آرایه‌های خورشیدی در نقطه کار بهینه استفاده می‌شوند را حذف نمود. در کنترل‌کننده پیشنهادی، امکان کنترل توان راکتیو تبادل شده با شبکه نیز وجود دارد. در این مقاله، کارایی سیستم پیشنهادی توسط نتایج شبیه‌سازی یک سیستم نمونه در نرم‌افزار MATLAB نشان داده می‌شود.

کلمات کلیدی: روش کنترل غیرخطی مستقیم، اینورتر چند سطحی پل H، مزرعه خورشیدی فتوولتاییک، فیلتر LCL ، استخراج حداکثر توان.

تاریخ ارسال مقاله ۱۳۹۴/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴ /۰۹ / ۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حمیدرضا تودجی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – یزد – صفاییه – بلوار دانشگاه – دانشگاه یزد – دانشکده‌ی مهندسی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.7.5]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، تمایل زیادی در سطح جهانی برای کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، کاهش آلودگی هوا و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی مشاهده می‌شود. واحدهای تولید پراکنده (DG) راه‌حل مناسبی برای دستیابی به این اهداف بوده و از این رو، منجر به گسترش کاربرد واحدهای تولید پراکنده در سیستم قدرت شده است [۱، ۲]. انرژی خورشیدی یکی از منابع مهم انرژی برای واحدهای تولید پراکنده بوده و می‌توان این انرژی را به کمک روش‌های مختلفی از جمله استفاده از سلول‌های فتوولتاییک به انرژی الکتریکی تبدیل نمود. هر سلول فتوولتاییک، توان اندکی را در ولتاژی پایین تولید می‌کند و از این رو برای دستیابی به سطح قابل قبولی از توان و ولتاژ، تعداد زیادی از این سلول‌ها را به صورت سری و موازی به یکدیگر متصل کرده و آرایه‌های خورشیدی را می‌سازند.

برای استحصال حداکثر توان از سلول خورشیدی، استفاده از یک سیستم کنترل دقیق بر روی ولتاژ و یا جریان پایانه‌های سلول ضرورت دارد. به این منظور، الگوریتم‌های مختلفی برای دنبال کردن نقطه کار متناظر با توان حداکثر (MPPT) پیشنهاد شده است [۳، ۴]. اگر توان حداکثر از سلول فتوولتاییک استحصال نشود، تأثیر منفی بر بازده کل سیستم خورشیدی می‌گذارد [۵]. لازم به ذکر است که در اغلب کارهای قبلی، مبدل‌های DC-DC جزیی جدایی‌ناپذیر برای استخراج حداکثر توان بوده است [۳، ۶، ۷].

برای اتصال خروجی DC آرایه‌های خورشیدی به شبکه AC استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت ضرورت دارد. تحقیقات جدید نشان داده است که اتصال چند واحد تولید پراکنده نظیر آرایه‌های خورشیدی به ورودی‌های DC اینورتر چند سطحی، به نتایج بهتری در مقایسه با اینورترهای معمولی منجر می‌شود [۸]. در کنار سایر مزایای اینورترهای چند سطحی، امکان حذف مبدل DC-DC با استفاده از یک کنترل‌کننده مناسب، مزیتی مهم به شمار می‌آید.

تمام انواع اینورترها کم و بیش، هارمونیک‌های ناخواسته‌ای ایجاد کرده و بنابراین انواع مختلفی از فیلترهای غیرفعال برای تضعیف این هارمونیک‌ها استفاده می‌شود. سلف، ساده‌ترین ساختار برای یک فیلتر است که به دلیل مشکلاتی از قبیل کاهش ولتاژ سمت DC اینورتر، کاهش کارایی دینامیکی مبدل، افزایش هزینه و اندازه مدار، معمولاً برای مبدل‌های توان متوسط و توان بالا استفاده نمی‌شود [۹]. فیلتر LCL راه‌حلی جذاب برای غلبه بر مشکلات ذکر شده است که با بهبود وضعیت هارمونیکی، امکان کار مبدل در فرکانس کلیدزنی پایین‌تر را فراهم می‌کند [۱۰].

برای کنترل اینورترهای چندسطحی، روش‌های کنترل مختلفی ارائه شده است که آن‌ها را می‌توان در دو دسته روش‌های کنترل خطی [۱۱] و غیرخطی [۱۲] طبقه‌بندی نمود. مقایسه بین این دو دسته روش در [۱۳،۱۴] نشان داده است که روش‌های کنترل غیرخطی به دلیل ماهیت غیرخطی عناصر کلیدزنی مورد استفاده در مبدل‌ها، موثرتر هستند. به عنوان روش کنترل غیرخطی، کنترل‌کننده تک ورودی - تک خروجی (SISO) در [۱۲] مورد توجه قرار گرفته است. در این کنترل‌کننده، جریان محور q در مختصات $dq0$ به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شده و اختلاف زاویه بین ولتاژ خروجی اینورتر چند سطحی و ولتاژ نقطه اتصال اینورتر به شبکه (PCC) نقش متغیر ورودی را ایفا می‌کنند. کنترل‌کننده چند ورودی – چند خروجی (MIMO) در [۱۵] به کمک شاخص مدولاسیون و زاویه δ، به ترتیب ولتاژ سمت DC و جریان محور q که نماینده توان راکتیو است را کنترل می‌نماید. از طرف دیگر، کنترل‌کننده‌های غیرخطی روش موثری برای کنترل واحدهای تولید پراکنده‌ای هستند که به اینورترهای چندسطحی متصل می‌شوند [۱۵، ۱۶].

مقاله حاضر، سیستم کنترل غیرخطی مستقیم بر مبنای خطی‌سازی فیدبک [۱۷] را برای اینورتر چندسطحی پل H با فیلتر خروجی LCL که آرایه‌های خورشیدی را به شبکه متصل می‌کند، اجرا می‌کند. نشان داده می‌شود که ساختار پیشنهادی به همراه روش کنترلی توسعه داده شده به نتایج مطلوبتری منتهی می‌شود. پاسخ سریع و دقیق به تغییرات ناگهانی در شرایط محیطی مزرعه خورشیدی از مزایای دیگر سیستم پیشنهادی است. کنترل‌کننده پیشنهادی همچنین قادر است ولتاژ سمت DC هر طبقه از اینورتر چندسطحی را مستقل از طبقات دیگر و با توجه به نقطه کار بهینه آرایه خورشیدی متصل به آن طبقه، تنظیم نماید. از مزایای دیگر سیستم پیشنهادی، امکان کنترل توان راکتیو تبادل شده با شبکه می‌باشد.

در مقاله حاضر، ابتدا اجزای اصلی سیستم پیشنهادی معرفی شده و مدل فضای حالت آن به دست آورده می‌شود. در قسمت بعد، روش کنترل غیرخطی مستقیم برای اینورتر چندسطحی در سیستم پیشنهادی توسعه داده شده و در نهایت، مزایای سیستم پیشنهادی به همراه کنترل‌کننده غیرخطی آن به کمک شبیه‌سازی شبکه نمونه در نرم‌افزار MATLAB نشان داده می‌شود.

۲- اجزای سیستم پیشنهادی

۲-۱- سلول فتوولتاییک

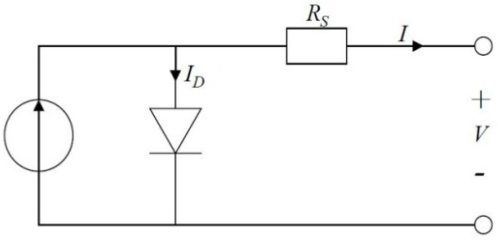
مدل تک دیودی یک سلول فتوولتاییک در شکل (۱) نشان داده شده است. این مدل از یک دیود، یک منبع جریان و مقاومت سری تشکیل شده است که مقاومت سری، مدل کننده مقاومت داخلی سلول و مقاومت اتصال اهمی می‌باشد. جریان خالص خروجی سلول توسط رابطه (۱) قابل محاسبه است:

$$I = I_{ph} - I_0\left(\exp\left(\frac{e(V+IR_S)}{mkT_C}\right)-1\right) \qquad (۱)$$

در این رابطه، m ضریب ایده‌آل سازی، I_{ph} مقدار منبع جریان، k ثابت بولتزمان، T_c دمای مطلق سلول، e بار الکترون، V ولتاژ ترمینال

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.7.5]

سلول و I_0 جریان اشباع تاریکی می‌باشد [۱۸].



شکل (۱): مدل مداری یک سلول فتوولتاییک

برای ساختن یک ماژول، تعداد زیادی سلول به صورت سری و موازی به یکدیگر متصل می‌شوند که در این حالت می‌توان از رابطه (۲) برای توصیف ارتباط غیرخطی ولتاژ و جریان ترمینال ماژول استفاده نمود.

$$I^M = I_{SC}^M \left[1 - \exp\left(\frac{V^M - V_{OC}^M + R_S^M . I^M}{V_t^M}\right)\right] \quad (۲)$$

کارایی سیستم فتوولتاییک به سه عامل سطح تابش خورشید، پروفیل بار و دمای محیط وابسته است [۳]. تغییرات نقطه کار بهینه یک ماژول فتوولتاییک عمدتا تابعی از سطح تابش و دما است به گونه‌ای که افزایش دما باعث کاهش توان ماکزیمم تولیدی و ولتاژ متناظر با نقطه توان بهینه شده و مقدار جریان اتصال کوتاه ماژول را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. در مقابل، افزایش سطح تابش، توان ماکزیمم تولیدی را افزایش داده و منجر به کاهش ولتاژ متناظر با نقطه توان بهینه می‌شود.

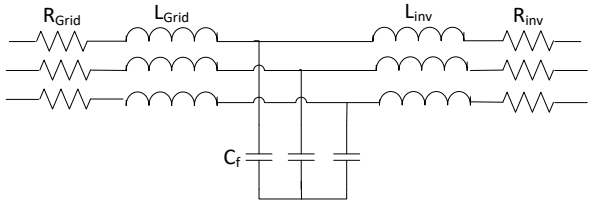
در عمل، هر دو عامل دما و سطح تابش در معرض تغییر بوده و از این رو دائما باید نقطه کار ماژول را در مقدار بهینه جدید تنظیم نمود. با وجودی که روش‌های پیچیده متعددی برای دنبال کردن نقطه کار بهینه در شرایط مختلف پیشنهاد شده است ولی چون مقاله حاضر بر ساختار و کنترل اینورتر چندسطحی تمرکز دارد بنابراین نقطه کار بهینه با توجه به مشخصات سلول و با استفاده از روش ساده مشتق‌گیری به دست آورده می‌شود [۳].

۲-۲- اینورتر چند سطحی پل H

اینورترهای چندسطحی ساختارهای متنوعی از قبیل پل H ، خازن شناور و دیود کلمپ دارند [۱۹] که ساختار پل H به دلیل مزایای نسبی، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۲۰]. برای کلیدزنی مبدل‌های چندسطحی نیز روش‌های مختلفی از قبیل مدولاسیون سینوسی عرض پالس (SPWM)، کلیدزنی در فرکانس پایه، مدولاسیون بردار فضایی و ... پیشنهاد شده است [۱۹، ۲۱]. در مقاله حاضر از یک اینورتر ۷ سطحی از نوع پل H با الگوریتم کلیدزنی مدولاسیون سینوسی عرض پالس استفاده می‌شود.

۳-۲- فیلتر LCL

معمولاً برای حذف هارمونیک‌های تولیدی اینورتر از فیلترهای غیرفعال در خروجی اینورتر استفاده می‌شود. در میان ساختارهای مختلف پیشنهادی برای فیلتر، ساختار LCL به دلیل حذف هارمونیک‌های بیشتر، امکان دستیابی به کیفیت توان استاندارد را در فرکانس‌های کلیدزنی پایین‌تر فراهم می‌کند [۲۲]. ساختار نمونه یک فیلتر LCL که از سه عدد سلف در سمت مبدل L_{inv}، سه عدد سلف در سمت شبکه L_{Grid} و یک مجموعه خازنی با اتصال ستاره بین این دو مجموعه سلف تشکیل می‌شود در شکل (۲) نشان داده شده است. روشن است که در نظر گرفتن مقاومت داخلی سلف‌ها، نتایج واقعی‌تری را به دست می‌دهد.



شکل (۲): ساختار نمونه یک فیلتر LCL سه فاز

روش‌های مختلفی از جمله روش سعی و خطا برای طراحی فیلتر LCL پیشنهاد شده است [۹] ولی روش جامع‌تری که در [۲۳] معرفی شده سعی می‌کند مقادیر پارامترهای فیلتر را به گونه‌ای محاسبه کند که انرژی ذخیره شده در عناصر فیلتر را حداقل سازد. در مقاله حاضر، فیلتر LCL معرفی شده در [۲۳] و با مقادیر بیان شده در جدول (۱) مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که چون از مدل فاقد هارمونیک برای اینورتر چندسطحی که به عنوان مدل متوسط شناخته می‌شود [۲۴، ۲۵] استفاده شده است، نمی‌توان تأثیر مقادیر مختلف عناصر فیلتر را بر روی هارمونیک‌ها ارزیابی نمود.

۳- مدل‌سازی سیستم پیشنهادی

همانگونه که در شکل (۳) نشان داده شده است، اینورتر چندسطحی از سه اینورتر منبع ولتاژ پل H در هر فاز تشکیل شده که هرکدام از این اینورترهای منبع ولتاژ توسط شاخص مدولاسیون m و زاویه فاز δ کنترل می‌شوند. خروجی اینورتر چندسطحی از طریق فیلتر LCL به شبکه AC متصل شده و سلف نشتی ترانسفورمر خروجی می‌تواند نقش سلف سمت شبکه فیلتر را ایفا کند. مقاومت R_{Grid} می‌تواند علاوه بر مقاومت داخلی سلف، مقاومت ترانسفورمر را نیز مدل کرده و مقاومت R_{inv} نیز می‌تواند همزمان، مدل کننده مقاومت سلف و تلفات اینورتر باشد. امپدانس تونن در محل اتصال به شبکه نیز می‌تواند در امپدانس سمت شبکه فیلتر LCL ترکیب شود.

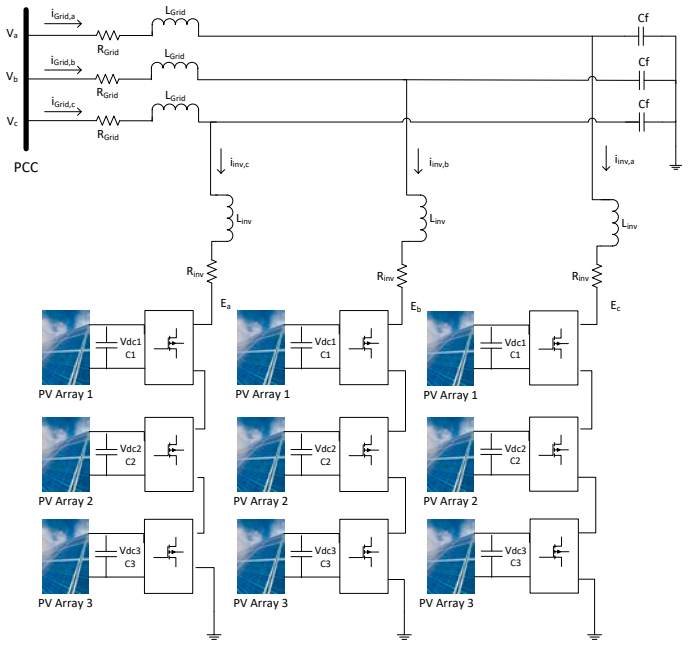
لازم به ذکر است که V_a, V_b, V_c ولتاژ فاز شبکه و E_a, E_b, E_c مولفه اصلی ولتاژ فاز خروجی اینورتر می‌باشند. در این ساختار،

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.7.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

آرایه‌های فتوولتاییکی که به سطوح یکسانی در هر فاز وصل شده‌اند را "*سطر*" می‌نامیم. مثلاً آرایه‌هایی که با شماره ۱ در شکل مشخص شده‌اند، سطر شماره ۱ نامگذاری می‌شود و بنابراین در شکل شماره (۳)، سه سطر وجود دارد. در اینجا فرض شده است که آرایه‌های هر سطر دارای وضعیت تابشی و دمایی مشابهی بوده و هر سطر می‌تواند وضعیت متفاوتی نسبت به دوسطر دیگر داشته باشد.

با کنترل شاخص مدولاسیون هر طبقه (m_1, m_2, m_3) و زاویه فاز خروجی می‌توان ولتاژ DC هر طبقه ($V_{dc,i}$) را در مقدار دلخواه تنظیم نمود. در نتیجه بدون نیاز به مبدل DC-DC می‌توان ولتاژ آرایه فتوولتاییک متصل به هر طبقه را در مقدار بهینه تنظیم نمود. در مقاله حاضر، از روش کنترل غیرخطی استفاده می‌شود و بنابراین نیاز است ابتدا مدل فضای حالت سیستم به دست آورده شود. به این منظور فرض می‌شود که تلفات اینورتر در مقاومت R_{inv} مدل شده و بنابراین اینورتر فاقد تلفات بوده و توان اکتیو سمت AC و DC آن با هم برابر هستند.

با نوشتن KVL و KCL در مدار شکل (۳)، معادلات (۳) حاصل شده و با انتقال این معادلات از دستگاه مختصات *abc* به دستگاه *dq0* و مرتب‌کردن آن‌ها در قالب ماتریسی، معادلات حالت (۴) به دست می‌آید.



شکل (۳): ساختار اینورتر چندسطحی پل H برای اتصال آرایه‌های فتوولتاییک به شبکه

$$
\begin{cases}
-v_a + L_{Grid}\dfrac{di_{Grid,a}}{dt} + R_{Grid} i_{Grid,a} + v_{C_f,a} = 0 \\
-v_b + L_{Grid}\dfrac{di_{Grid,b}}{dt} + R_{Grid} i_{Grid,b} + v_{C_f,b} = 0 \\
-v_c + L_{Grid}\dfrac{di_{Grid,c}}{dt} + R_{Grid} i_{Grid,c} + v_{C_f,c} = 0
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
-v_{C_f,a} + L_{inv}\dfrac{di_{inv,a}}{dt} + R_{inv} i_{inv,a} + E_a = 0\ ,\ \ i_{Grid,a} - i_{inv,a} = C_f \dfrac{dv_{C_f,a}}{dt} \\
-v_{C_f,b} + L_{inv}\dfrac{di_{inv,b}}{dt} + R_{inv} i_{inv,b} + E_b = 0\ ,\ \ i_{Grid,b} - i_{inv,b} = C_f \dfrac{dv_{C_f,b}}{dt} \\
-v_{C_f,c} + L_{inv}\dfrac{di_{inv,c}}{dt} + R_{inv} i_{inv,c} + E_c = 0\ ,\ \ i_{Grid,c} - i_{inv,c} = C_f \dfrac{dv_{C_f,c}}{dt}
\end{cases}
\qquad (۳)
$$

$$
\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} I_{Grid,d} \\ I_{Grid,q} \\ I_{inv,d} \\ I_{inv,q} \\ V_{C_f,d} \\ V_{C_f,q} \end{bmatrix} =
\begin{bmatrix}
-\dfrac{R_{Grid}}{L_{Grid}} & \omega & 0 & 0 & -\dfrac{1}{L_{Grid}} & 0 \\
-\omega & -\dfrac{R_{Grid}}{L_{Grid}} & 0 & 0 & 0 & -\dfrac{1}{L_{Grid}} \\
0 & 0 & -\dfrac{R_{inv}}{L_{inv}} & \omega & \dfrac{1}{L_{inv}} & 0 \\
0 & 0 & -\omega & -\dfrac{R_{inv}}{L_{inv}} & 0 & \dfrac{1}{L_{inv}} \\
\dfrac{1}{C_f} & 0 & -\dfrac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega \\
0 & \dfrac{1}{C_f} & 0 & -\dfrac{1}{C_f} & -\omega & 0
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} I_{Grid,d} \\ I_{Grid,q} \\ I_{inv,d} \\ I_{inv,q} \\ V_{C_f,d} \\ V_{C_f,q} \end{bmatrix} +
\begin{bmatrix}
\dfrac{|V|}{L_{Grid}} \\ 0 \\ -\dfrac{E_{d1}-E_{d2}-E_{d3}}{L_{inv}} \\ -\dfrac{E_{q1}-E_{q2}-E_{q3}}{L_{inv}} \\ 0 \\ 0
\end{bmatrix}
\qquad (۴)
$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.7.5]

در معادلات حالت (۴)، ω فرکانس زاویه‌ای، E_{di} و E_{qi} به ترتیب مولفه‌های محور d و q ولتاژ خروجی هر سطر از اینورتر، I_d و I_q به ترتیب مولفه‌های محور d و q جریان و $|V|$ دامنه ولتاژ فاز در محل اتصال به شبکه است. V_a هم‌فاز با محور d در نظر گرفته شده و بنابراین $V_q = 0$ و $V_d = V_S$به دست می‌آید. متوسط‌گیری، روشی موثر برای تحلیل و نیز طراحی کنترل‌کننده برای مبدل‌های با الگوریتم کلیدزنی PWM می‌باشد [۲۴، ۲۵] و اثر هارمونیک‌ها را نیز که در اینجا مورد مطالعه ما نیستند حذف می‌کند. متوسط‌گیری از مقادیر AC به معادله (۵) منتهی می‌شود:

$$\begin{cases} |E_i| = \sqrt{E_{di}^2 + E_{qi}^2} \\ |E_i| = m_i V_{dci} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_{di} = m_i . V_{dci} \cos\delta \\ E_{qi} = m_i . V_{dci} \sin\delta \end{cases} , \; i = 1,2,3 \qquad (۵)$$

در این رابطه، V_{dci} ولتاژ خازن سمت DC اینورترهای سطر i ام می‌باشد. رابطه (۶) بیانگر تعادل توان اکتیو در طرفین هر طبقه از اینورتر بوده و $I_{pv,i}$ جریان تزریقی توسط آرایه فتوولتاییک می‌باشد [۱۶]. لازم به ذکر است که در سمت DC اینورتر از مدل واقعی آرایه فتوولتاییک استفاده شده است.

$$\begin{aligned} 3.\left(C_1 . \frac{dV_{dc1}}{dt} V_{dc1} + I_{pv1} V_{dc1}\right) &= \frac{3}{2}\left(E_{1d} . I_{inv,d} + E_{1q} . I_{inv,q}\right) \\ 3.\left(C_2 . \frac{dV_{dc2}}{dt} V_{dc2} + I_{pv2} V_{dc2}\right) &= \frac{3}{2}\left(E_{2d} . I_{inv,d} + E_{2q} . I_{inv,q}\right) \\ 3.\left(C_3 . \frac{dV_{dc3}}{dt} V_{dc3} + I_{pv3} V_{dc3}\right) &= \frac{3}{2}\left(E_{3d} . I_{inv,d} + E_{3q} . I_{inv,q}\right) \end{aligned} \qquad (۶)$$

با جایگزینی رابطه (۵) در (۶)، روابط (۷) به دست می‌آیند که شامل متغیرهای کنترلی m_i و δ می‌باشند. در نهایت با جایگذاری روابط (۷) در روابط (۴) مدل فضای حالت سیستم به صورت معادلات (۸) به دست می‌آید.

همانگونه که در شکل (۳) نشان داده شده است، منابع DC و خازن‌هایشان در هر فاز باید از فازهای دیگر ایزوله شوند چون در غیر این‌صورت، در برخی حالت‌های کلیدزنی مشکل اتصال کوتاه رخ می‌دهد. در ادامه در مورد طراحی کنترل‌کننده غیرخطی برای مدل پیوسته فضای حالت سیستم بحث می‌شود.

$$\begin{aligned} \frac{dV_{dc1}}{dt} &= \frac{1}{2}\frac{m_1\cos\delta}{C_1} I_{inv,d} + \frac{1}{2}\frac{m_1\sin\delta}{C_1} I_{inv,q} + \frac{I_{pv1}}{C_1} \\ \frac{dV_{dc2}}{dt} &= \frac{1}{2}\frac{m_2\cos\delta}{C_2} I_{inv,d} + \frac{1}{2}\frac{m_2\sin\delta}{C_2} I_{inv,q} + \frac{I_{pv2}}{C_2} \\ \frac{dV_{dc3}}{dt} &= \frac{1}{2}\frac{m_3\cos\delta}{C_3} I_{inv,d} + \frac{1}{2}\frac{m_3\sin\delta}{C_3} I_{inv,q} + \frac{I_{pv3}}{C_3} \end{aligned} \qquad (۷)$$

۴- کنترل‌کننده غیرخطی مستقیم

سیستمی که توسط معادلات حالت (۸) توصیف می‌شود دارای ماهیت غیرخطی بوده و در نتیجه، برای دستیابی به بهترین پاسخ باید از کنترل‌کننده غیرخطی استفاده نمود. در اینجا از قانون کنترل غیرخطی مبتنی بر خطی‌سازی از طریق فیدبک استفاده می‌شود [۲۱]. هدف اصلی کنترل‌کننده غیرخطی پیشنهادی، تنظیم مستقل ولتاژ خازن‌های DC بوده و به عنوان اولین گام باید معادلات حالت (۸) را به شکل استاندارد (۹) بازنویسی نمود:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^{n} [g_i(x) . u_i] \\ y_i = h_i(x) \end{cases} \qquad (۹)$$

در این رابطه، u_i نشان‌دهنده i امین ورودی کنترلی از میان n ورودی کنترل، y_i بیانگر i امین خروجی کنترل و x بردار حالت می‌باشد. سیستم دارای چهار ورودی کنترل بوده (یک δ و سه تا m_i) و بنابراین باید چهار متغیر از میان ۹ درایه بردار حالت انتخاب شود. چون کنترل ولتاژ DC هدف اصلی است بنابراین ولتاژ سه خازن (V_{dci}) به عنوان ورودی‌های کنترلی انتخاب می‌شوند. کنترل توان راکتیو مبدل نیز هدف دیگری است که منجر به انتخاب $I_{inv,q}$ به عنوان ورودی کنترلی چهارم می‌شود.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} I_{Grid,d} \\ I_{Grid,q} \\ I_{inv,d} \\ I_{inv,q} \\ V_{C_f,d} \\ V_{C_f,q} \\ V_{dc1} \\ V_{dc2} \\ V_{dc3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{Grid}}{L_{Grid}} & \omega & 0 & 0 & -\frac{1}{L_{Grid}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{Grid}}{L_{Grid}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_{Grid}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{inv}}{L_{inv}} & \omega & \frac{1}{L_{inv}} & 0 & -\frac{m_1\cos\delta}{L_{inv}} & -\frac{m_2\cos\delta}{L_{inv}} & -\frac{m_3\cos\delta}{L_{inv}} \\ 0 & 0 & -\omega & -\frac{R_{inv}}{L_{inv}} & 0 & \frac{1}{L_{inv}} & -\frac{m_1\sin\delta}{L_{inv}} & -\frac{m_2\sin\delta}{L_{inv}} & -\frac{m_3\sin\delta}{L_{inv}} \\ \frac{1}{C_f} & 0 & -\frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & -\frac{1}{C_f} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\frac{m_1\cos\delta}{C_1} & \frac{1}{2}\frac{m_1\sin\delta}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\frac{m_2\cos\delta}{C_2} & \frac{1}{2}\frac{m_2\sin\delta}{C_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\frac{m_3\cos\delta}{C_3} & \frac{1}{2}\frac{m_3\sin\delta}{C_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Grid,d} \\ I_{Grid,q} \\ I_{inv,d} \\ I_{inv,q} \\ V_{C_f,d} \\ V_{C_f,q} \\ V_{dc1} \\ V_{dc2} \\ V_{dc3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{|V|}{L_{Grid}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{I_{pv1}}{C_1} \\ \frac{I_{pv2}}{C_2} \\ \frac{I_{pv3}}{C_3} \end{bmatrix} \qquad (۸)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.7.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

برای رعایت شکل استاندارد معادلات، بردار ورودی کنترل به صورت رابطه (۱۰) بازنویسی می‌شود:

$$U=\begin{bmatrix}u_1\\u_2\\u_3\\u_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cot(\delta)\\m_1\sin(\delta)\\m_2\sin(\delta)\\m_3\sin(\delta)\end{bmatrix} \qquad (۱۰)$$

بردار متغیرهای خروجی کنترل توسط رابطه (۱۱) نشان داده شده است :

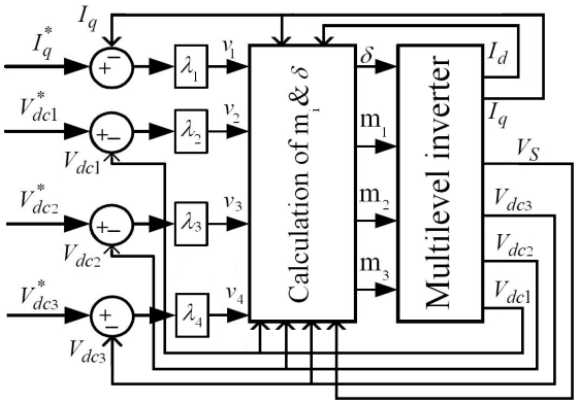
$$Y=\begin{bmatrix}h_1(x)\\h_2(x)\\h_3(x)\\h_4(x)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_4\\x_7\\x_8\\x_9\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}I_{inv,q}\\V_{dc1}\\V_{dc2}\\V_{dc3}\end{bmatrix} \qquad (۱۱)$$

با استفاده از روابط (۱۰) ، (۱۱)، معادلات فضای حالت به صورت روابط (۱۲) نوشته می‌شود. روابط (۱۳) بردار ورودی U را که با تعریف متغیرهای ورودی جدید v_i، از روابط (۱۲) و با استفاده از قانون خطی‌سازی فیدبک محاسبه می‌شود نشان می‌دهد [۱۷، ۲۶].

لازم به ذکر است که مدل واقعی آرایه فتوولتاییک در اینجا استفاده شده و جریان اندازه‌گیری‌شده آن به صورت یک منبع جریان موازی با خازن DC مدل می‌شود. با این کار می‌توان از وارد شدن ارتباط غیرخطی ولتاژ و جریان آرایه فتوولتاییک که توسط روابط (۱) و (۲) توصیف می‌شود به معادلات حالت سیستم و پیچیده‌تر شدن معادلات، جلوگیری کرد.

$$\begin{aligned}
u_2&=\frac{v_1+\omega x_3+\frac{R_{inv}}{L_{inv}}x_4-\frac{x_6}{L_{inv}}}{-\frac{x_7}{L_{inv}}-\frac{x_8}{L_{inv}}\times\left(\frac{C_2v_3-I_{pv2}}{C_1v_2-I_{pv1}}\right)-\frac{x_9}{L_{inv}}\times\left(\frac{C_3v_4-I_{pv3}}{C_1v_2-I_{pv1}}\right)}\\
u_1&=\frac{C_1v_2-I_{pv1}}{\frac{1}{2}x_3u_2}-\frac{x_4}{x_3}\\
u_3&=\frac{C_2v_3-I_{pv2}}{C_1v_2-I_{pv1}}u_2\\
u_4&=\frac{C_3v_4-I_{pv3}}{C_1v_2-I_{pv1}}u_2
\end{aligned} \qquad (۱۳)$$

در بلوک دیاگرام کنترل‌کننده پیشنهادی که در شکل (۴) نشان داده شده است، مقدار واقعی ولتاژهای DC و جریان محور q با مقادیر مرجعشان مقایسه می‌شوند. خطاهای حاصل از مقایسه، از تعدادی کنترل‌کننده تناسبی که برای بهبود رفتار دینامیکی استفاده شده‌اند عبور داده می‌شوند. خروجی این کنترل‌کننده‌ها به همراه فیدبک‌های سیستم به کنترل‌کننده غیرخطی توصیف شده توسط روابط (۹) تا (۱۳) داده می‌شود. در نهایت، شاخص‌های مدولاسیون و زاویه فاز مورد نیاز برای اینورترهای چندسطحی حاصل می‌شود.



شکل (۴): کنترل‌کننده غیرخطی مستقیم پیشنهادی

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\\dot{x}_2\\\dot{x}_3\\\dot{x}_4\\\dot{x}_5\\\dot{x}_6\\\dot{x}_7\\\dot{x}_8\\\dot{x}_9\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{R_{Grid}}{L_{Grid}}x_1+\omega x_2-\frac{1}{L_{Grid}}x_5+\frac{|V|}{L_{Grid}}\\-\omega x_1-\frac{R}{L_{Grid}}x_2-\frac{1}{L_{Grid}}x_5\\-\frac{R_{inv}}{L_{inv}}x_3+\omega x_4+\frac{1}{L_{inv}}x_5\\-\omega x_3-\frac{R_{inv}}{L_{inv}}x_4+\frac{1}{L_{inv}}x_6\\\frac{x_1}{C_{inv}}-\frac{x_3}{C_{inv}}+\omega x_6\\\frac{x_2}{C_{inv}}-\frac{x_4}{C_{inv}}-\omega x_5\\\frac{I_{pv1}}{C_1}\\\frac{I_{pv2}}{C_2}\\\frac{I_{pv3}}{C_3}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\0\\-\frac{x_7}{L_{inv}}u_1\\-\frac{x_7}{L_{inv}}\\0\\0\\\frac{1}{2}\left(\frac{x_3}{C_1}u_1+\frac{x_4}{C_1}\right)\\0\\0\end{bmatrix}u_2+\begin{bmatrix}0\\0\\-\frac{x_8}{L_{inv}}u_1\\-\frac{x_8}{L_{inv}}\\0\\0\\0\\\frac{1}{2}\left(\frac{x_3}{C_2}u_1+\frac{x_4}{C_2}\right)\\0\end{bmatrix}u_3+\begin{bmatrix}0\\0\\-\frac{x_9}{L_{inv}}u_1\\-\frac{x_9}{L_{inv}}\\0\\0\\0\\0\\\frac{1}{2}\left(\frac{x_3}{C_3}u_1+\frac{x_4}{C_3}\right)\end{bmatrix}u_4 \qquad (۱۲)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.7.5]

با جایگذاری روابط (۱۳) در (۱۲)، معادله (۱۴) حاصل می گردد که ارتباط بردار V را با پارامترهای کنترلی بیان می‌کند. این بردار می‌تواند به عنوان بردار خطای کنترلی فرض شود که توسط کنترل‌کننده غیرخطی مستقیم به صورت مجانبی به صفر میل داده می‌شود.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_4 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{inv,q} \\ \dot{V}_{dc1} \\ \dot{V}_{dc2} \\ \dot{V}_{dc3} \end{bmatrix} \quad (۱۴)$$

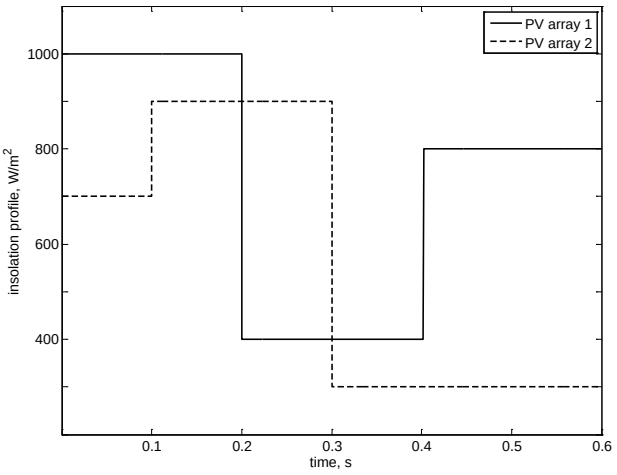
۵- نتایج شبیه‌سازی

سیستم مورد مطالعه در مقاله حاضر که در شکل (۳) نشان داده شده و توسط نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی می‌شود، از ۹ آرایه فتوولتاییک که به سمت DC اینورتر ۷ سطحی سه فاز پل H متصل شده‌اند، تشکیل شده است. در مورد انتخاب تعداد سطوح اینورتر چندسطحی باید دقت نمود که افزایش تعداد سطوح با وجود مزایایی که به دنبال دارد ولی منجر به افزایش تعداد کلیدها می‌شود. یکی از مزایای سیستم پیشنهادی، ایفای نقش مبدل DC-DC توسط اینورتر چندسطحی می‌باشد. هر طبقه از اینورتر، ولتاژ ترمینال DC خود را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که ولتاژ آرایه فتوولتاییک برابر با $N_{se}\times V_{MPP}$ شود که N_{se} تعداد سلول‌های سری در آرایه و V_{MPP} ولتاژ بهینه می‌باشد. مقدار پارامترهای سیستم و پارامترهای آرایه فتوولتاییک مورد استفاده که از مدل SPR-200-BLK [۲۷] می‌باشد در جدول (۱) آورده شده است. هر آرایه ۲۰۰ وات توان در شرایط استاندارد ۱۰۰۰ وات بر مترمربع و ۲۵ درجه سانتیگراد تولید کرده و برای ساختن واحد ۲۰۰۰ واتی، ۱۰ عدد آرایه در کنار یکدیگر قرارداده می‌شود.

جدول (۱): مقدار پارامترهای سیستم مورد مطالعه

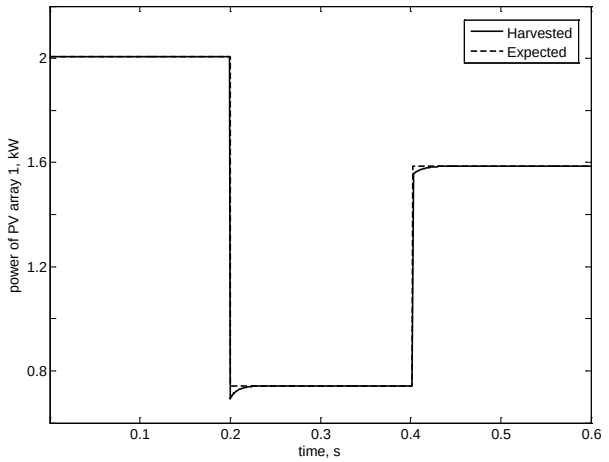
شبکه	ولتاژ	۱۱۰ ولت، ۵۰ هرتز
آرایه فتوولتاییک	تعداد ماژول‌های موازی	۱۰
	تعداد ماژول‌های سری	۱
	ولتاژ مدار باز ماژول	۴۷/۸ ولت
	جریان اتصال کوتاه ماژول	۵/۴ آمپر
	توان نامی ماژول	۲۰۰ وات
اینورتر چندسطحی	$C_1 = C_2 = C_3$	۵ mF
کنترل‌کننده غیرخطی	$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4$	۵۰
فیلتر LCL	امپدانس سمت شبکه	۱/۵ mH ، ۵/۵ mΩ
	امپدانس سمت اینورتر	۰/۳ mH ، ۱/۱ mΩ
	مقدار خازن	۸۸ μF

تغییر در سطح تابش و نیز دمای محیط می‌تواند توان در دسترس آرایه فتوولتاییک را تغییر دهد. برای جلوگیری از تعداد زیاد شکل‌های تکراری، تغییرات سطح تابش در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود. اگر سیستم پیشنهادی بتواند در شرایط تابش متغیر، رفتار قابل قبولی نشان دهد آنگاه به ازای تغییرات دما نیز رفتار رضایت‌بخشی خواهد داشت. آرایه‌های فتوولتاییک مربوط به هر سطر در معرض تغییرات تابش مشابهی قرار دارند. چون هر آرایه فتوولتاییک مربوط به بخشی از مزرعه خورشیدی می‌باشد بنابراین فرض تغییرات متفاوت تابش برای هر سطر به دلیل عواملی نظیر اثر سایه، قابل پذیرش خواهد بود.



شکل (۵): تغییرات سطح تابش برای آرایه‌های فتوولتاییک ۱ و ۲

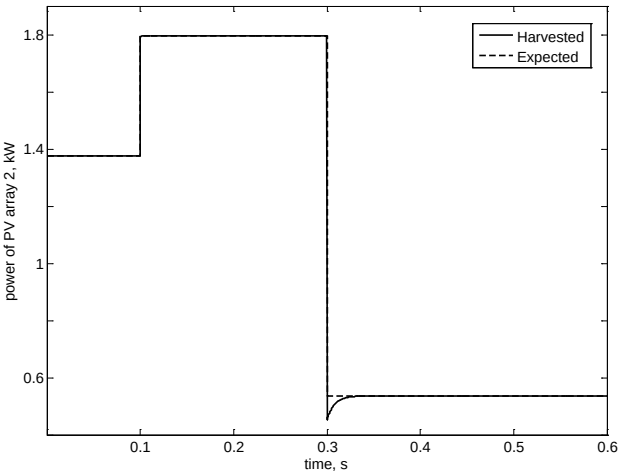
هرچند که تغییرات شدید و ناگهانی نشان‌داده شده در شکل (۵) غیرمحتمل است ولی می‌تواند توانایی کنترل‌کننده پیشنهادی را در بدترین شرایط به نمایش بگذارد. برای کاهش تعداد شکل‌ها، تغییرات آرایه‌های فتوولتاییک شماره ۲ و ۳ یکسان فرض شده است. شکل‌های شماره (۶) و (۷) توان در دسترس مورد انتظار (Expected) و توان استحصال شده (Harvested) از آرایه‌های فتوولتاییک شماره ۱، ۲ و ۳ را در شرایط تابش شکل (۵) نشان می‌دهد.



شکل (۶): توان مورد انتظار و توان استحصال شده از آرایه فتوولتاییک شماره ۱

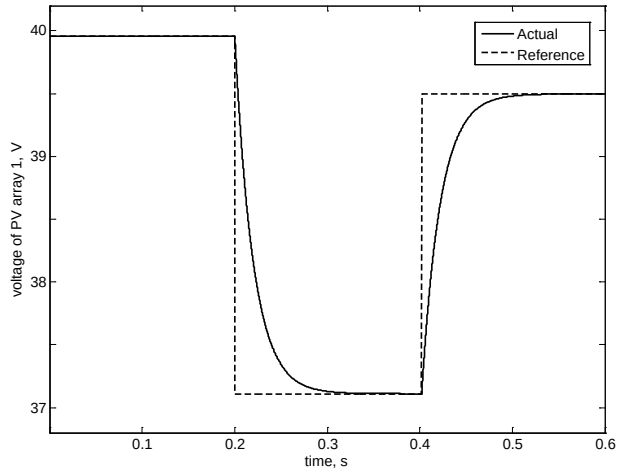
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.7.5]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

از این شکل‌ها دیده می‌شود که کنترل‌کننده، نقطه کار متناظر با حداکثر توان را با دقت خوبی دنبال کرده است. اگر در این شرایط فقط نقطه کار بهینه یکی از آرایه‌ها به عنوان مرجع کنترل‌کننده در نظر گرفته شده بود، از بقیه آرایه‌ها در نقطه کار غیر بهینه‌ای بهره‌برداری شده و در نتیجه، توان کل استحصال شده از مزرعه خورشیدی کاهش می‌یافت. وجود چندین ترمینال در اینورتر چندسطحی پیشنهادی و کنترل مستقل هر ترمینال، امکان تقسیم مزرعه خورشیدی به نواحی جداگانه و در نتیجه، استحصال توان بالاتر را فراهم می‌آورد.



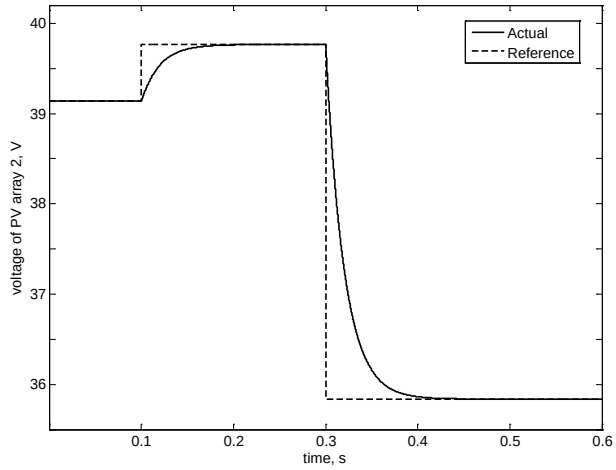
شکل (۷): توان مورد انتظار و توان استحصال شده از آرایه فتوولتاییک شماره ۲ و ۳

ولتاژ مرجع (Reference) آرایه‌های فتوولتاییک برای دستیابی به توان حداکثر به همراه ولتاژهای واقعی (Actual) که از شبیه‌سازی به دست آمده در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. دیده می‌شود که کنترل‌کننده پیشنهادی به سرعت و بدون هیچ‌گونه بالازدگی توانسته است ولتاژ آرایه‌های فتوولتاییک را در مقدار ولتاژ بهینه تنظیم کند؛ بنابراین نیازی به استفاده از مبدل DC-DC برای دنبال کردن نقطه کار بهینه وجود ندارد. روشن است که با تنظیم ولتاژ ترمینال هر آرایه فتوولتاییک در مقدار بهینه، توان حداکثر حاصل می‌شود.



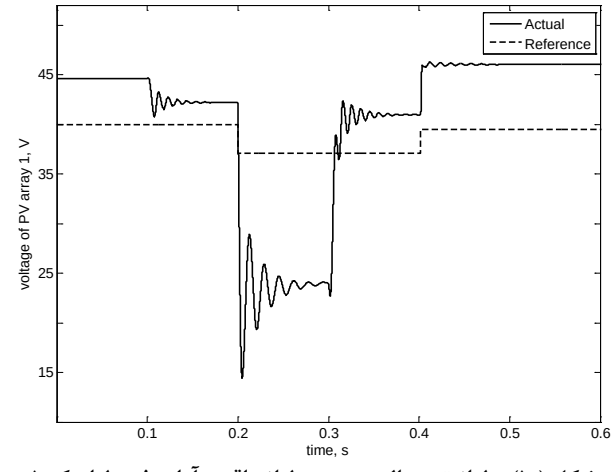
شکل (۸): ولتاژ ترمینال بهینه و ولتاژ واقعی آرایه فتوولتاییک ۱

برای نشان دادن برتری کنترل‌کننده پیشنهادی، کنترل‌کننده غیرخطی غیرمستقیم معرفی شده در [۲۸] در سیستم مورد مطالعه استفاده می‌شود. این کنترل‌کننده فقط دو متغیر کنترلی دارد که یکی به کنترل توان راکتیو از طریق کنترل جریان محور q و دیگری به تنظیم ولتاژ DC اختصاص داده می‌شود. چون سه ولتاژ DC بهینه مستقل و تنها یک متغیر کنترلی برای تنظیم این سه ولتاژ DC وجود دارد بنابراین از میانگین ولتاژهای بهینه DC به عنوان مرجع ولتاژ کنترل‌کننده غیرخطی غیرمستقیم استفاده می‌گردد. در اینجا فرض شده است که تغییرات سطح تابش برای آرایه‌های فتوولتاییک همانند شکل (۵) باشد.



شکل (۹): ولتاژ ترمینال بهینه و ولتاژ واقعی آرایه فتوولتاییک ۲ و ۳

ولتاژ بهینه آرایه فتوولتاییک شماره ۱ به همراه ولتاژ واقعی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. متوسط ولتاژ، تفاوت قابل ملاحظه‌ای با ولتاژ بهینه این آرایه داشته و در نتیجه، توان حداکثر از این آرایه استحصال نمی‌شود. این موضوع در مورد آرایه‌های فتوولتاییک شماره ۲ و ۳ نیز صادق می‌باشد.



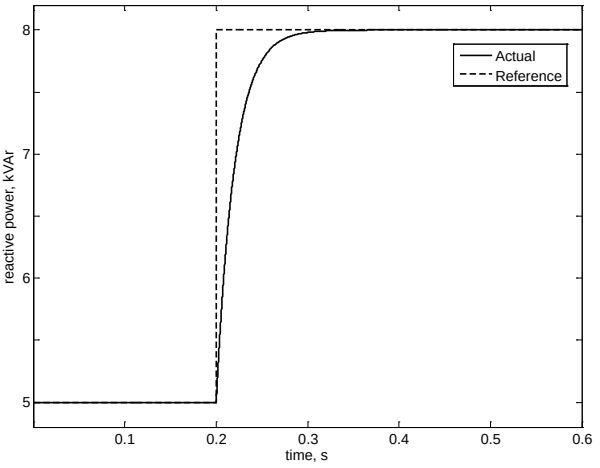
شکل (۱۰): ولتاژ ترمینال بهینه و ولتاژ واقعی آرایه فتوولتاییک ۱

اشکال دیگر کنترل‌کننده غیرخطی غیرمستقیم، پاسخ نوسانی میراشونده آن است که بعد از هر تغییر ناگهانی در مقدار مرجع ولتاژ

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.7.5]

مشاهده می‌شود. دلیل این نوع پاسخ، وجود کنترل‌کننده انتگرال – تناسبی (PI) در ساختار کنترل‌کننده غیرخطی غیرمستقیم است که حذف آن در کنترل‌کننده پیشنهادی منجر به پاسخ سریع، دقیق و زیر میرای نشان داده شده در شکل‌های (۸) و (۹) شده است.

مقدار مرجع توان راکتیو به همراه توان راکتیو واقعی تبادل شده با شبکه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی قابلیت کنترل توان راکتیو را حتی با وجود تغییرات شدید و ناگهانی دارد. البته باید به این نکته اشاره کرد که واحد انتگرال – تناسبی در مسیر کنترل جریان محور q در کنترل‌کننده غیر خطی غیرمستقیم نیز وجود ندارد. به همین دلیل، هر دو کنترل‌کننده مستقیم و غیرمستقیم، پاسخ توان راکتیو مشابهی را دارند.



شکل (۱۱): توان راکتیو تبادل شده با شبکه

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ساختاری جدید برای اتصال مزرعه خورشیدی به شبکه پیشنهاد گردید. در این ساختار می‌توان مزرعه خورشیدی را به چند ناحیه تقسیم‌بندی نموده و با اتصال هر ناحیه به یک طبقه از اینورتر چندسطحی پل H و کنترل مستقل آن ناحیه، توان بیشتری را از مزرعه خورشیدی استحصال نمود. در خروجی اینورتر چندسطحی از یک فیلتر LCL استفاده شده است که امکان کار در فرکانس کلیدزنی پایین‌تر را برای مبدل فراهم کرده، هارمونیک‌های بیشتری را تضعیف نموده و پاسخ دینامیکی بهتری را به نمایش می‌گذارد.

برای دستیابی به پاسخ سریع و دقیق در ساختار پیشنهادی، یک کنترل‌کننده غیرخطی مستقیم توسعه داده شد. در ساختار پیشنهادی، نیازی به استفاده از مبدل DC-DC که غالباً برای استحصال توان حداکثر استفاده می‌شود نیست. علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با استفاده از کنترل‌کننده غیرخطی ارائه شده، هر بخش از مزرعه خورشیدی می‌تواند تغییرات نقطه کار بهینه را سریع و با کمترین خطا دنبال کند. برتری روش کنترل توسعه داده شده بر روش کنترل غیرخطی غیرمستقیم نیز به کمک شبیه‌سازی نشان داده شد. همچنین قابلیت سیستم پیشنهادی در کنترل دقیق و سریع توان راکتیو تبادل شده با شبکه توسط نتایج شبیه‌سازی تأیید گردید.

مراجع

[1] Jadid, S., Homaee, O., Zakariazadeh, A., "Voltage Control Approach in Smart Distribution Network with Renewable Distributed generation", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 10, no. 2, pp. 11-22, 2013.

[2] Alizadeh Shabestary, S.M., Saeedmanesh, M., Rahimi-Kian, A., Jalalabadi, E., "Real-Time Frequency and Voltage Control of an Islanded Mode Microgrid", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 12, no. 3, pp. 9-14, 2016.

[3] Subudhi, B., Pradhan, R., "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems", IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 4, no. 1, pp. 89-98, 2013.

[4] Tousi, S.M.R., Moradi, M.H., Saadat Basir, N., Nemati, M., "A Function Based Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 3, pp. 2120-2128, 2016.

[5] Agbossou, K., Kolhe, M., Hamelin, J., Bose, T.K., "Performance of Standalone Renewable Energy System Based on Energy Storage as Hydrogen", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 3, pp. 633–640, 2004.

[6] Carrasco, J.M., Franquelo, L.G., Bialasiewicz, J.T., et al, "Power Electronic Systems For The Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1002-1016, 2006.

[7] Xiao, W., Ozog, N., Dunford, W.G., "Topology Study of Photovoltaic Interface for Maximum Power Point Tracking", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 3, pp. 1696-1704, 2007.

[8] Villanueva, E., Correa, P., Rodrigues, J., Pacas, M., "Control of A Single-Phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter for Grid-Connected Photovoltaic Systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, pp. 4399-4406, 2009.

[9] Liserre, M., Blaabjerg, F., Hansen, S., "Design and Control of an LCL Filter-Based Three-Phase Active Rectifier", IEEE Transactions on of Industrial Application, vol. 41, no. 5, pp. 1281–1291, 2005.

[10] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), pp. 1-29, 2014.

[11] Du, S., Liu, J., Lin, J., He, Y., "A Novel DC Voltage Control Method for STATCOM Based on Hybrid Multilevel H-Bridge Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 1, pp. 101-111, 2013.

[12] Soto, D., Pena, R., "Nonlinear Control Strategies for Cascaded Multilevel STATCOMs", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1919-1927, 2004.

[13] Yazdani, A., Crow, M.L., Guo, J., "A Comparison of Linear and Nonlinear STATCOM Control For Power Quality Enhancement", IEEE Power and Energy Society General Meeting Conference, Pittsburgh, PA, USA , pp. 1–6, 20-24 July 2008.

[14] Josh, K., Behalf, A., Jain, A.K., Mohan, N., "A Comparative Study of Control Strategies for Fast Voltage Regulation With STATCOMs", 30th Annual Conference

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.7.5]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

زیرنویس‌ها

[1] Photovoltaic
[2] Distributed Generation
[3] Maximum Power Point Tracking
[4] Single Input Single Output
[5] Point of Common Coupling
[6] Multiple Input Multiple Output
[7] Sinusoidal Pulse Width Modulation

of IEEE Industrial Electronics Society, Busan, South Korea, pp. 187-192, 2-6 Nov. 2004.

[15] Yuan, A., Song, Q., Liu, W., Yu, Q., "Nonlinear Controller For Cascaded H-Bridge Inverter-Based STATCOM", IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Dalian, China, pp. 1-5, 18 Aug. 2005.

[16] Farokhnia, N., Fathi, S.H., Toodeji, H., "Direct Nonlinear Control for Individual DC Voltage Balancing in Cascaded Multilevel DSTATCOM", International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Sharjah, UAE, pp. 1-8, 10-12 Nov. 2009.

[17] Sastry, S., Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control, Springer Science & Business Media, 2013.

[18] Kirubakaran, A., Jain, S., Nema, R.K., "A Review on Fuel Cell Technologies And Power Electronic Interface", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, no. 9, pp. 2430 -2440, 2009.

[19] Khumfoi, S., Tolbert, L.M., "Multilevel Power Converters", in Rashid, M.H., Power Electronics Handbook: Devices, Circuits And Applications, 3rd ed., Butterworth-Heinemann Press, Elsevier Publishing, 2011, pp. 454-486.

[20] Malinowksi, M., Gopakumar, K., Rodrigues, J., Peresz, M., "A Survey on Cascaded Multilevel Inverters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 1, pp. 2197 – 2206, 2010.

[21] Rodrigues, J., Bernet, S., Wu, B., Pontt, J.O., Kouro, S., "Multilevel Voltage Source Converter Topologies for Industrial Medium Voltage Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 6, pp. 2930-2945, 2007.

[22] Dannehl, J., Liserre, M., Fuchs, F.W., "Filter-Based Active Damping of Voltage Source Converters With LCL Filters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 8, pp. 3623-3633, 2011.

[23] Jalili, K., Bernet, S., "Design of LCL Filters of Active-Front-End Two-Level Voltage Source Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 5, pp. 1674-1689, 2009.

[24] Emadi, A., "Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems Using The Generalized State-Space Averaging Method", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, no. 5, pp. 992-1000, 2004.

[25] Ghadimi, A.A, Rastegar, H., Keyhani, A., "Development of Average Model for Control of a Full Bridge PWM DC-DC Converter", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 4, no. 2, pp. 52-59, 2007.

[26] Matas, J., Garcia de Vicuna, L., Miret, J., Guerrero J.M., Castilla, M., "Feedback Linearization of a Single-Phase Active Power Filter via Sliding Mode Control," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 1, pp. 116-125, 2008.

[27] www.rectifier.co.za/Solar/sunpower/pdf/sp_200blk_en_a4_p_ds.pdf, Accessed: October 2015.

[28] Song, Q., Liu, W., Yuan, Z., "Multilevel Optimal Modulation and Dynamic Control Strategies for STATCOMs Using Cascaded Multilevel Inverters", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, pp. 1937-1946, 2007.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.7.5]