

ارائه یک سیستم کنترلی MRAC-PI در یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

امیرحسین آزاد، حسین شاطری

دانشگاه صنعتی اراک

اراک، ایران

a.azad@arakut.ac.ir, h.shateri@arakut.ac.ir

۱. مقدمه

در دو دهه اخیر، به دلیل محدودیت‌های زیست‌محیطی و افزایش بهای سوخت‌های فسیلی از یک‌سو، و از سوی دیگر افزایش تقاضا در مناطق دور از دسترس، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر سیستم‌های فتوولتائیک (PV)، با رشد چشم‌گیری مواجه شدند [۱].

سیستم‌های فتوولتائیک حضور گسترده‌ای در سیستم‌های متصل به شبکه، و منفصل از شبکه دارند، با این حال بازده این سیستم‌ها به طور چشمگیری به دما و میزان تابش نور خورشید بستگی دارد [۲]، [۳]. به همین منظور روش‌های گوناگونی جهت دریافت بیشینه توان توسط پنل‌های PV در مقالات ارائه گردیده است. از پرکاربردترین روش‌های کنترل MPPT می‌توان به روش تغییر و مشاهده (P&O: Perturb & Observe)، روش افزایش رسانایی (IC) و روش کنترلی مبتنی بر منطق فازی اشاره نمود. مزایا و معایب هر کدام از کنترل‌کننده‌ها در مراجع [۴]، [۵] ارائه گردیده است.

جریان سینوسی، ضریب قدرت قابل کنترل و کیفیت بالای ولتاژ لینک dc از ویژگی‌های مطلوب اینورتر منبع ولتاژ متصل به شبکه (GC-VSI) می‌باشد [۶]. در مقالات ارائه شده تاکنون، سیستم‌های کنترلی مختلفی نظیر کنترل‌کننده PI [۷]، کنترل‌کننده تناسبی رزونانسی (PR) [۸]، کنترل‌کننده مد لغزشی (SMC) [۹]، [۱۰]، کنترل‌کننده خطی‌سازی فیدبک (FL) [۱۱]، کنترل‌کننده تطبیقی [۱۲]، [۱۳] و روش‌های کنترلی دیگر ارائه گردیده است. در [۷] و [۸]، به ترتیب از کنترل‌کننده‌های PI و PR در کنترل جریان شبکه و از کنترل‌کننده PI در کنترل ولتاژ لینک dc یک سیستم PV متصل به شبکه

چکیده — در این مقاله یک سیستم کنترلی جدید به منظور کنترل سیستم فتوولتائیک (PV) متصل به شبکه ارائه گردیده است. سیستم کنترلی پیشنهادی از سه قسمت کنترل مبدل بوست جهت انتقال بیشینه توان تولیدی (MPPT) توسط آرایه‌های سیستم فتوولتائیک، تنظیم ولتاژ لینک dc و کنترل جریان مولفه‌های d و q شبکه تشکیل شده است. در این سیستم از الگوریتم مشاهده و تغییر (P&O) جهت دریافت بیشینه توان تولیدی توسط آرایه‌های سیستم فتوولتائیک استفاده گردیده است. همچنین به منظور کنترل ولتاژ لینک dc و جریان سینوسی تزریقی به شبکه از کنترل‌کننده تطبیقی PI مبتنی بر روش (MRAC-PI) استفاده شده است. در روش کنترلی MRAC-PI پیشنهادی، ضرایب کنترل کننده‌های PI بر اساس قانون MIT به نحوی تخمین زده می‌شوند که خطای بین متغیرهای کنترلی و مقادیر مرجع در نظر گرفته شده به سمت صفر میل نماید. سیستم کنترلی پیشنهادی، عملکرد مناسبی را در هنگام تغییرات میزان تابش نور خورشید از خود به نمایش می‌گذارد. نتایج بدست آمده از سیستم کنترلی پیشنهادی (MRAC-PI) در مقایسه با کنترل‌کننده‌های PI کلاسیک کارآمدی این روش را در بهبود عملکرد سیستم در حالت‌های گذار و دائم تایید می‌نماید. همچنین نتایج مقاوم بودن سیستم کنترلی پیشنهادی را تایید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی — "سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه"، "الگوریتم

"P&O"، "کنترل‌کننده MRAC-PI"، "قانون MIT".

۲. مدل‌سازی ریاضی سیستم PV متصل به شبکه

در شکل ۱، یک سیستم PV متصل به شبکه نمایش داده شده است. مشخصه توان - ولتاژ آرایه‌های PV بر اساس مدل ارائه شده برای یک آرایه PV با N_p ماژول موازی و N_p ماژول سری در رابطه (۱) آورده شده است:

$$P_{PV} = N_p V_{PV} I_{ph} - N_p V_{PV} I_s \left[\exp\left(\frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{N_s V_t}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{PV}^2 + R_s I_{PV} V_{PV}}{R_p} \right) \quad (1)$$

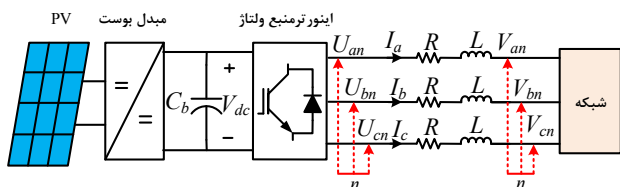
در این رابطه، V_{PV} ، I_{PV} ، R_s ، R_p ، I_{ph} ، V_t به ترتیب بیانگر ولتاژ و جریانی خروجی PV، جریانی تولیدی ناشی از برخورد نور به سطح هر کدام از سلول‌ها، مقاومت سری، مقاومت موازی و ولتاژ حرارتی می‌باشند. معادلات دینامیکی اینورتر سه‌فاز متصل به شبکه در قاب abc در رابطه (۲) و در قاب dq در رابطه (۳) ارائه گردیده است:

$$\begin{cases} L \frac{dI_a}{dt} = -RI_a - V_a + U_a \\ L \frac{dI_b}{dt} = -RI_b - V_b + U_b \\ L \frac{dI_c}{dt} = -RI_c - V_c + U_c \\ C_b \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c}{V_{dc}} \end{cases} \quad (2)$$

با تعریف $U_{dc} = \frac{C_b V_{dc}^2}{3V_d}$ و صفر بودن ولتاژ مولفه q شبکه، معادله دینامیکی ولتاژ لینک dc به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{-R}{L} I_d + \omega I_q + \frac{U_d}{L} - \frac{V_d}{L} \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{-R}{L} I_q - \omega I_d + \frac{U_q}{L} - \frac{V_q}{L} \\ \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} \frac{V_d I_d + V_q I_q}{C_b V_{dc}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = -\frac{2}{C_b} U_{dc} + I_d \quad (4)$$



شکل ۱: ساختار سیستم PV متصل به شبکه

استفاده شده است. با وجود استفاده گسترده از کنترل‌کننده‌های PI و PR به دلیل سادگی در طراحی، عملکرد این کنترل‌کننده‌ها در شرایط غیرخطی و در حضور عدم قطعیت با مشکل مواجه است. در [۶]، به منظور کنترل جریان‌های مولفه d و q شبکه از روش کنترلی SMC و برای کنترل ولتاژ لینک dc از کنترل‌کننده PI در یک مبدل سه‌فاز متصل به شبکه استفاده شده است. فراهم آوردن پاسخ‌های مناسب، سادگی طراحی، مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت‌ها از مزیت‌های این کنترل‌کننده محسوب می‌شوند. با این حال، وجود پدیده چترینگ در ورودی کنترلی باعث محدودیت در استفاده از این کنترل‌کننده گردیده است. در [۱۱]، یک کنترل‌کننده FL مقاوم برای کنترل جریان شبکه و ولتاژ لینک dc اینورتر یک سیستم PV متصل به شبکه ارائه شده است. با حذف مولفه‌های غیرخطی از سیستم متصل به شبکه توسط این کنترل‌کننده، یک کنترل‌کننده خطی PI به سیستم اعمال گشته است. پیچیدگی طراحی این کنترل‌کننده و وابستگی این روش به پارامترهای سیستم PV مانع از استفاده گسترده این کنترل‌کننده شده است. در [۱۴]، یک روش کنترلی تطبیقی برای کنترل ولتاژ لینک dc و در [۱۵]، از یک کنترل‌کننده تطبیقی برای کنترل ضریب قدرت شبکه در یک مبدل سه‌فاز متصل به شبکه که به عنوان یک جبران‌ساز توان راکتیو (SVC) عمل می‌کند، استفاده شده است. با وجود عملکرد کنترلی مقاوم و انعطاف‌پذیری روش کنترلی تطبیقی مشکلاتی نظیر پیچیدگی طراحی در سیستم‌های مرتبه بالا، عدم وجود یک مسیر حل تئوری مشخص و انتخاب دقیق ثابت‌های کنترلی باعث محدودیت استفاده از این روش کنترلی موثر در اینورترهای منبع ولتاژ متصل به شبکه شده است. اگرچه سیستم‌های کنترلی ذکر شده در بالا عملکرد کنترل‌کننده‌های PI را بهبود می‌دهند، اما بیشتر آن‌ها از مشکل پیچیدگی طراحی و تنظیم ثابت‌های کنترلی رنج می‌برند [۱۷].

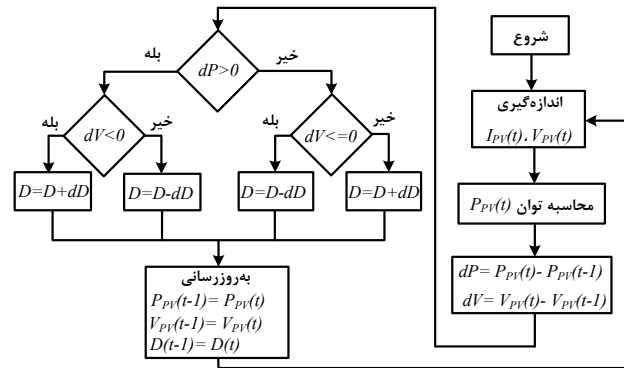
سیستم کنترلی نوین ارائه شده در این مقاله از سه قسمت کنترلی MPPT، کنترل ولتاژ لینک dc (V_{dc}) و کنترل جریان‌های مولفه d و q شبکه (I_d ، I_q) تشکیل شده است. به منظور دستیابی به بیشینه توان تولیدی توسط آرایه‌های سیستم PV از روش P&O استفاده گردیده است. همچنین به منظور کنترل V_{dc} و کنترل جریان مولفه‌های (I_d و I_q) شبکه از روش کنترلی (MRAC-PI: Model Reference Adaptive Control-PI) بهره گرفته شده است. در روش نوین کنترلی ارائه شده، ضرایب کنترل‌کننده PI به صورت آنلاین با استفاده از قانون MIT به نحوی تخمین زده می‌شوند که خطای حالت ماندگار سه متغیر کنترلی V_{dc} ، I_d و I_q صفر گردند. از مزایای سیستم کنترلی طراحی شده می‌توان به پاسخ مناسب در حالت‌های گذرا و ماندگار در حضور تغییرات میزان تابش نور خورشید اشاره نمود.

۳. طراحی سیستم کنترلی

در سیستم PV متصل به شبکه نمایش شده در شکل ۱، انتقال بیشینه توان تولیدی توسط آرایه‌های PV، کنترل ولتاژ لینک dc و تزریق جریان سینوسی به شبکه، با استفاده از کنترل‌کننده‌های مناسب محقق شده است که در ادامه شرح داده می‌شود.

۱.۳ الگوریتم کنترلی MPPT

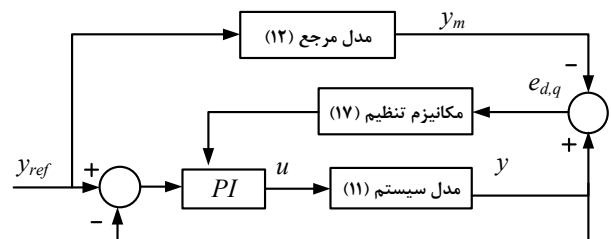
به منظور دستیابی به بیشینه توان تولیدی توسط آرایه‌های PV، از الگوریتم (P&O) ارائه شده در [۱۸] استفاده شده است. اساس این الگوریتم، اندازه‌گیری ولتاژ و جریان خروجی آرایه‌های PV و مقایسه آن‌ها با مقادیر قبلی متناظر می‌باشد. شکل ۲ ساختار این الگوریتم را نشان می‌دهد.



شکل ۲: الگوریتم کنترلی تغییر و مشاهده (P&O) [۱۸]

۲.۳ کنترل اینورتر متصل به شبکه

به منظور کنترل جریان شبکه و V_{dc} اینورتر، از کنترل‌کننده MRAC-PI مبتنی بر قانون MIT استفاده شده است. ساختار این کنترل‌کننده در شکل ۳ نمایش داده شده است. در شکل ۳، y, y_m, e, y_{ref} و u به ترتیب بیانگر خروجی مدل سیستم، خروجی مدل مرجع، خطای بین مدل‌ها، مقدار مرجع در نظر گرفته شده و ورودی اعمالی به تابع تبدیل می‌باشد.



شکل ۳: ساختار کنترل‌کننده پیشنهادی MRAC-PI مبتنی بر قانون MIT

برای طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی، معادلات دینامیکی جریان شبکه در قالب dq را که در رابطه (۳) آورده شده است، به صورت رابطه (۵) بازنویسی شده است:

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{-R}{L} I_d + u_d \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{-R}{L} I_q + u_q \end{cases} \quad (5)$$

در این رابطه u_d, u_q به ترتیب خروجی‌های کنترل‌کننده‌های MRAC-PI در راستای d و q هستند و مطابق رابطه (۶) تعریف می‌گردد:

$$\begin{cases} u_d = +\omega I_q + \frac{U_d}{L} - \frac{V_d}{L} \\ u_q = -\omega I_d + \frac{U_q}{L} - \frac{V_q}{L} \end{cases} \quad (6)$$

خروجی کنترل‌کننده‌های MRAC-PI به صورت رابطه (۷) نیز بیان می‌گردد:

$$\begin{cases} u_d = K_{P,d}(I_{d,ref} - I_d) + K_{I,d} \int (I_{d,ref} - I_d) dt \\ u_q = K_{P,q}(I_{q,ref} - I_q) + K_{I,q} \int (I_{q,ref} - I_q) dt \end{cases} \quad (7)$$

با توجه به رابطه‌های (۵) و (۷)، تابع تبدیل دینامیک‌های جریان شبکه در راستای محور d در رابطه (۸) و در راستای q رابطه (۹) آورده شده‌اند:

$$\frac{I_d}{I_{d,ref}} = \frac{K_{P,d}s + K_{I,d}}{s^2 + \left(\frac{R}{L} + K_{P,d}\right)s + K_{I,d}} \quad (8)$$

$$\frac{I_q}{I_{q,ref}} = \frac{K_{P,q}s + K_{I,q}}{s^2 + \left(\frac{R}{L} + K_{P,q}\right)s + K_{I,q}} \quad (9)$$

خروجی کنترل‌کننده PI لینک dc، I_d است. همچنین می‌توان خروجی این کنترل‌کننده را به صورت رابطه (۱۰) نیز بیان کرد:

$$I_d = K_{P,vdc}(V_{dc,ref} - V_{dc}) + K_{I,vdc} \int (V_{dc,ref} - V_{dc}) dt \quad (10)$$

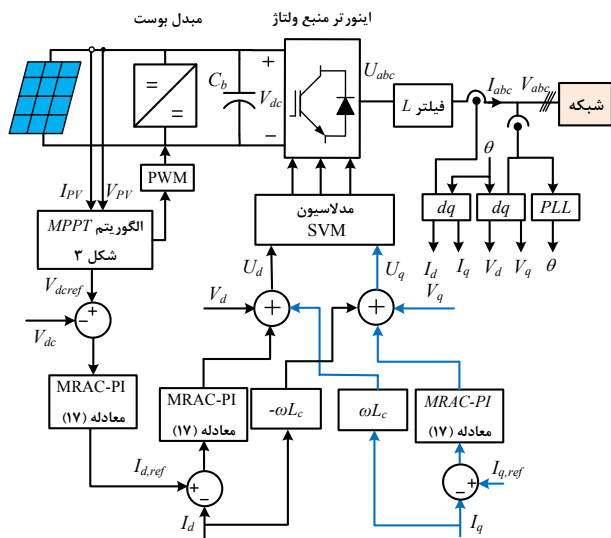
رابطه (۱۱) تابع تبدیل دینامیک V_{dc} را با توجه به رابطه (۴) و رابطه (۱۰) نشان می‌دهد:

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc,ref}} = \frac{K_{P,vdc}s + K_{I,vdc}}{s^2 + \left(\frac{2}{C_b} + K_{P,vdc}\right)s + K_{I,vdc}} \quad (11)$$

با توجه به برابر بودن مرتبه و درجه نسبی توابع تبدیل حلقه بسته I_d, V_{dc} ، توابع تبدیل حلقه بسته آن‌ها به فرم رابطه (۱۲) نوشته می‌شوند و مدل مرجع هم‌مرتبه متناظر با آن به صورت رابطه (۱۳) نوشته می‌شود. پارامترهای مدل مرجع برای هر کدام از متغیرهای کنترلی (I_q, I_d, V_{dc}) با توجه به یک پاسخ زمانی مطلوب به دست آمده‌اند.

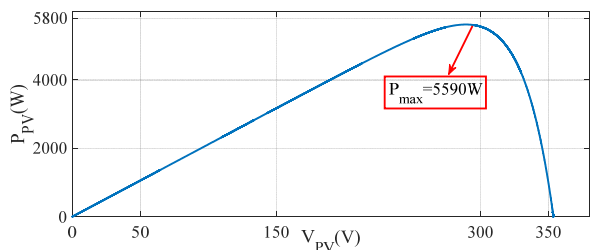
۴. شبیه‌سازی و نتایج

ساختار الگوریتم کنترلی پیشنهادی در شکل ۴ نمایش داده شده است. عملکرد سیستم PV متصل به شبکه (شکل ۱) تحت سیستم کنترلی پیشنهادی در نرم‌افزار متلب مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با روش PI ارائه شده در مرجع [۷] مقایسه گردیده است.



شکل ۴: الگوریتم کنترلی سیستم PV متصل به شبکه

در شکل ۵ منحنی مشخصه توان-ولتاژ آرایه‌های PV مورد استفاده در سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه نمایش داده شده است.



شکل ۵: منحنی مشخصه توان-ولتاژ آرایه‌های فتوولتائیک

در جدول ۱ پارامترهای آرایه‌های سیستم PV نمونه و در جدول ۲ پارامترهای سیستم PV متصل به شبکه بیان شده است. ضرایب کنترل‌کننده پیشنهادی (MRAC-PI) به نحوی تعیین گردیده است که در پاسخ حالت گذرا، فراجش از ۱۰٪ فراتر نرفته و زمان نشست کمتر از ۰٫۱۵ ثانیه برای هر سه متغیر کنترلی I_d ، I_q و V_{dc} حاصل گردد. نتایج شبیه‌سازی سیستم PV متصل به شبکه در حضور تغییرات میزان تابش نور خورشید از مقدار 1000 W/m^2 به 300 W/m^2 در زمان ۰٫۵ ثانیه نمایش داده شده است.

رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) به صورت زیر مطرح می‌گردد:

$$\frac{y}{u} = \frac{b_p(K_p s + K_I)}{a_0 s^2 + (a_1 + b_p K_p)s + b_p K_I} \quad (12)$$

$$\frac{y_m}{u_m} = \frac{b_{m1}s + b_{m2}}{a_{m0}s^2 + a_{m1}s + a_{m2}} \quad (13)$$

اساس قانون MIT، بر پایه کمینه کردن تابع هزینه تعریف شده برای خطای بین مدل واقعی و مدل مرجع استوار است. رابطه (۱۴) این امر را بیان می‌نماید:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (14)$$

در این رابطه θ بیانگر پارامترهای کنترلی است.

برای مینیمم کردن J باید θ در جهت منفی گرادینان J مطابق با رابطه (۱۵) تغییر داده شود:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \cdot \frac{de}{d\theta} \quad (15)$$

با توجه به رابطه (۱۵)، قوانین به‌روزرسانی ضرایب PI سیستم بیان شده در رابطه (۱۳)، به صورت رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد:

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_{KP} \cdot \frac{dJ}{dK_p} = -\gamma_{KP} \cdot \frac{dJ}{de} \cdot \frac{de}{dy} \cdot \frac{dy}{dK_p} = -\gamma_{KP} \cdot e \cdot \frac{dy}{dK_p} \quad (16)$$

$$\frac{dK_I}{dt} = -\gamma_{KI} \cdot \frac{dJ}{dK_I} = -\gamma_{KI} \cdot \frac{dJ}{de} \cdot \frac{de}{dy} \cdot \frac{dy}{dK_I} = -\gamma_{KI} \cdot e \cdot \frac{dy}{dK_I}$$

در رابطه (۱۶)، $\frac{dy}{dK_p}$ و $\frac{dy}{dK_I}$ به کمک روابط رابطه (۱۷) محاسبه می‌گردند:

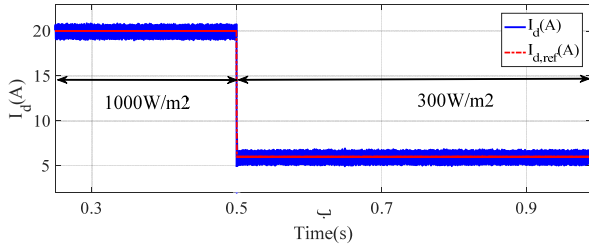
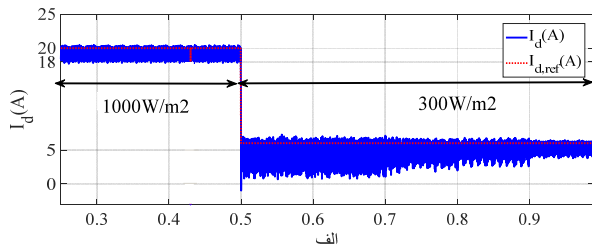
$$\frac{dy}{dK_p} = \left[\frac{b_p s}{s^2 + (a_1 + b_p K_p)s + b_p K_I} \right] [y_{ref} - y]$$

$$\frac{dy}{dK_I} = \left[\frac{b_p}{s^2 + (a_1 + b_p K_p)s + b_p K_I} \right] [y_{ref} - y]$$

با توجه به مشخص نبودن ضرایب b_p و a_1 در رابطه (۱۷)، لازم است که ضرایب تابع تبدیل اصلی بر اساس تابع تبدیل واقعی تخمین زده شوند. با جایگذاری رابطه (۱۷) در رابطه (۱۶)، معادلات به‌روزرسانی PI از رابطه (۱۸) حاصل می‌گردد:

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_{KP} \cdot e \cdot \left[\frac{b_p s}{s^2 + (a_1 + b_p K_p)s + b_p K_I} \right] [y_{ref} - y]$$

$$\frac{dK_I}{dt} = -\gamma_{KI} \cdot b_p \cdot e \cdot \left[\frac{y_{ref} - y}{s^2 + (a_1 + b_p K_p)s + b_p K_I} \right]$$

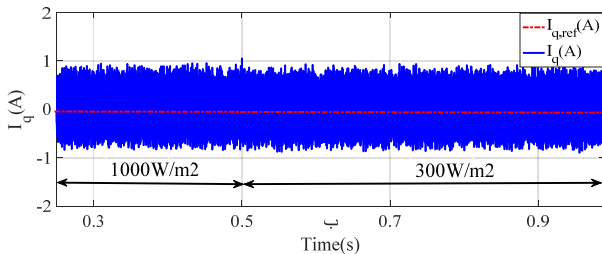
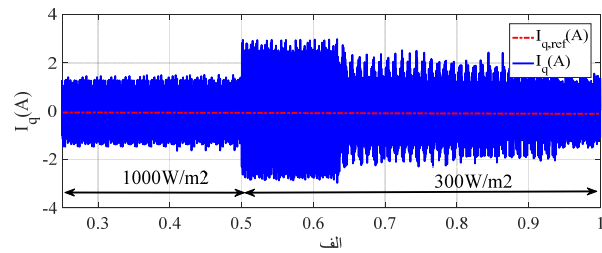


شکل ۷: الف) جریان مولفه d شبکه با کنترل کننده PI؛

ب) جریان مولفه d شبکه با کنترل کننده MRAC-PI

نتایج بدست آمده در شکل ۷ عملکرد مقاوم و مناسب کنترل کننده پیشنهادی (MRAC-PI) را نسبت به کنترل کننده PI در تغییر میزان تابش از مقدار 1000 W/m^2 به 300 W/m^2 در زمان ۰٫۵ ثانیه را تایید می‌نمایند.

در شکل ۸ جریان محور عمودی (I_q) کنترل شده با کنترل کننده PI و کنترل کننده پیشنهادی (MRAC-PI) نمایش داده شده است.



شکل ۸: الف) جریان مولفه q شبکه با کنترل کننده PI؛

ب) جریان مولفه q شبکه با کنترل کننده MRAC-PI

هر دو کنترل کننده پاسخ حالت ماندگار مناسبی را در زمانی که میزان تابش نور خورشید به یک مقدار ثابت رسیده است، فراهم نموده‌اند. با این حال، در زمان ۰٫۵ ثانیه که میزان تابش نور خورشید از مقدار 1000 W/m^2 به

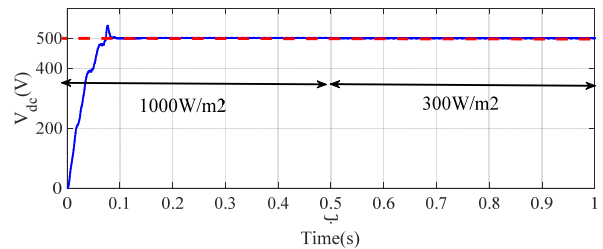
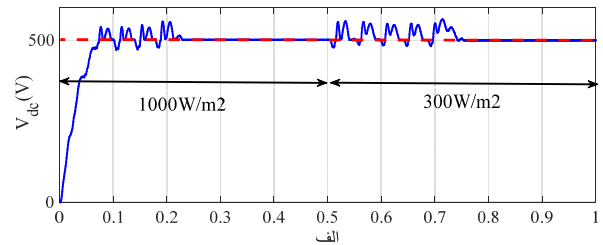
جدول ۱: پارامترهای آرایه‌های سیستم PV نمونه

مقادیر	پارامتر	مقادیر	پارامتر
۲۸۳۷	ولتاژ ماکزیمم آرایه PV	۲۵° C	دما
۱۹٫۸۸	جریان ماکزیمم آرایه PV	1000 W/m^2	میزان تابش نور خورشید
۱	تعداد سلول‌های موازی	۳۵۳۷	ولتاژ مدار باز آرایه PV
۱	تعداد سلول‌های سری	۲۱٫۱۶A	جریان اتصال کوتاه آرایه PV

جدول ۲: پارامترهای سیستم PV متصل به شبکه

مقادیر	پارامتر	مقادیر	پارامتر
۵mH	سلف میدل بوست	۲۲۰V	ولتاژ شبکه
۳۳mH	اندوکتانس شبکه	۵۰Hz	فرکانس شبکه
۱۵۰۰۰ Hz	فرکانس کلیدزنی اینورتر	۳٫۳mf	خازن لینک dc
۰٫۰۵Ω	مقاومت فیلتر	۵۰۰V	ولتاژ لینک dc

در شکل ۶ ولتاژ لینک dc کنترل شده با کنترل کننده PI و کنترل کننده پیشنهادی (MRAC-PI) نمایش داده شده است.

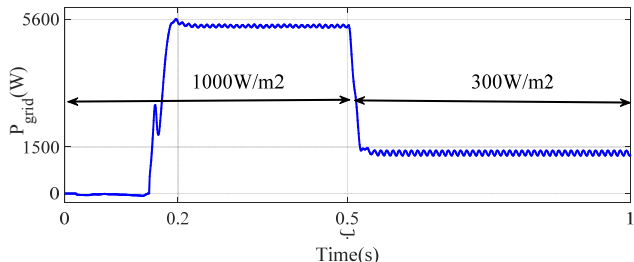
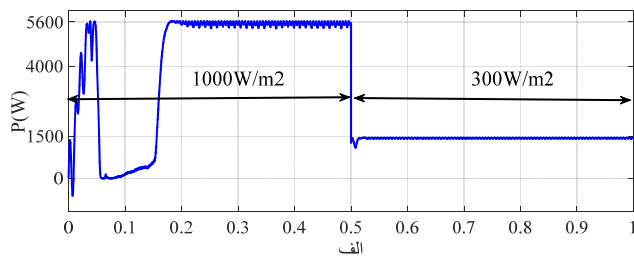


شکل ۶: الف) ولتاژ لینک dc با کنترل کننده PI؛

ب) ولتاژ لینک dc با کنترل کننده MRAC-PI

در حالت گذار در کنترل کننده پیشنهادی (MRAC-PI) نسبت به کنترل کننده PI پاسخ سیستم بهبود یافته است. همچنین در کنترل کننده پیشنهادی سیستم در مقابل تغییرات تابش مقاوم است. در حالت ماندگار نیز خطای حالت ماندگار سیستم بهبود یافته است.

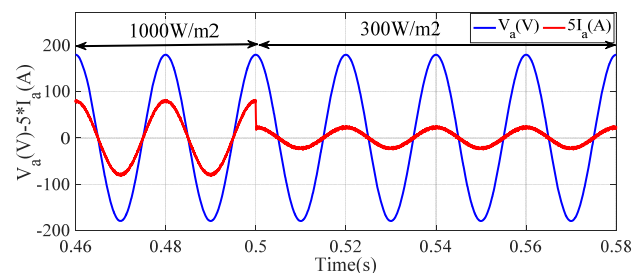
در شکل ۷ شکل موج‌های جریان محور افقی (I_d) در حضور کنترل کننده PI و کنترل کننده پیشنهادی MRAC-PI در تغییر میزان تابش از مقدار 1000 W/m^2 به 300 W/m^2 در زمان ۰٫۵ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰: الف) توان خروجی آرایه‌های PV

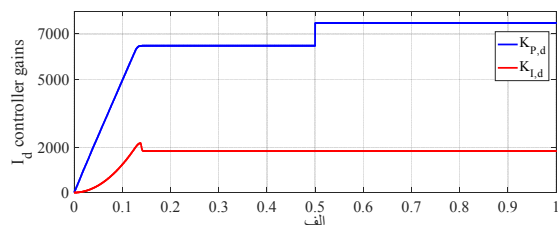
ب) توان تزریق شده به شبکه

در شکل ۱۱ ولتاژ فاز و جریان فاز شبکه نمایش داده شده است. ضریب قدرت واحد شبکه در سطوح تابش مختلف عملکرد مقاوم کنترل‌کننده پیشنهادی (MRAC-PI) را نمایش می‌دهد.



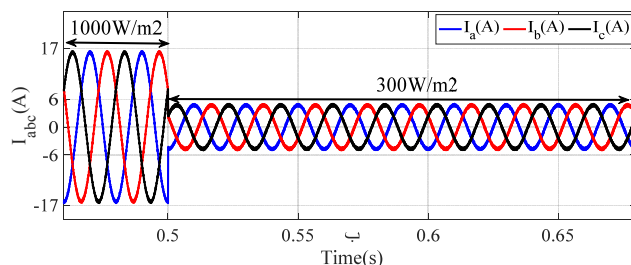
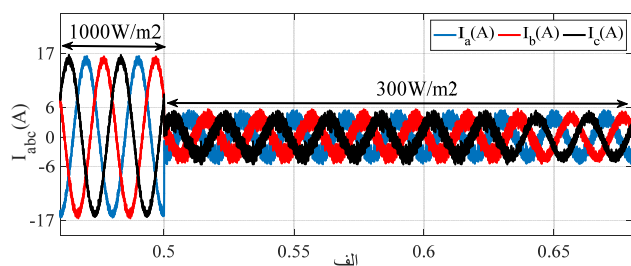
شکل ۱۱: ولتاژ شبکه (ولت) - جریان شبکه (آمپر)

در شکل ۱۲ ضرایب به‌روزرسانی شده کنترل‌کننده‌های پیشنهادی (MRAC-PI) برای متغیرهای کنترلی I_d و V_{dc} نمایش داده شده است. ضرایب سیستم کنترلی MRAC-PI به نحوی به‌روز می‌شوند که مقادیر مرجع در نظر گرفته شده برای متغیرهای کنترلی I_d و V_{dc} مطابق با مدل مرجع (۱۳) حاصل گردد.



300 W/m^2 تغییر می‌نماید، تا زمان 0.8 ثانیه پاسخ حالت ماندگار I_q در هنگام استفاده از کنترل‌کننده PI دچار خطای ردیابی بیشتری شده است.

با استفاده از تحلیل محتوای هارمونیک جریانی شبکه (THD)، در زمان بهره‌گیری از کنترل‌کننده PI به منظور کنترل جریان شبکه، در زمان‌های اولیه تغییر میزان تابش، میزان THD جریانی شبکه بالای ۵ درصد مشاهده شده است، اما در زمان به کارگیری کنترل‌کننده پیشنهادی (MRAC-PI) برای کنترل جریان شبکه، میزان THD جریانی شبکه به کمتر از ۳ درصد (در زمانی که میزان تابش نور خورشید برابر 1000 W/m^2 است، میزان THD جریانی شبکه ۲.۰۵٪ و در زمانی که میزان تابش برابر 300 W/m^2 است، میزان THD جریانی شبکه ۲.۵۵٪ است) در تمام بازه زمانی شبیه‌سازی برای جریان شبکه محدود شده است.



شکل ۹: الف) جریان سه فاز شبکه با کنترل‌کننده PI

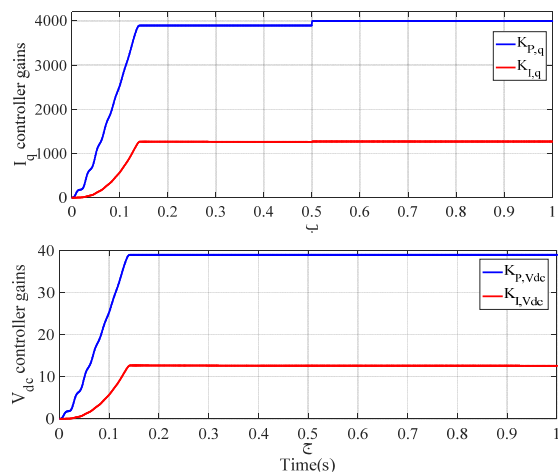
ب) جریان سه فاز شبکه با کنترل‌کننده MRAC-PI

در شکل ۱۰ توان اکتیو خروجی آرایه‌های PV و توان اکتیو تزریقی به شبکه نمایش داده شده است.

در زمان 0.5 ثانیه میزان تابش نور خورشید از 1000 W/m^2 به 300 W/m^2 تغییر می‌نماید. با توجه به شکل ۱۰، کنترل‌کننده اعمالی به مبدل پوست بر اساس الگوریتم P&O، عملکرد حالت گذرای مناسبی را در جهت یافتن بیشینه توان منحنی مشخصه شکل ۵ فراهم می‌نماید. برابر بودن توان اکتیو خروجی آرایه‌های PV (شکل ۱۰ الف)) و توان اکتیو تزریقی به شبکه (شکل ۱۰ ب))، بیانگر اعمال کنترل‌کننده‌های مناسب اعمالی بر روی مبدل پوست و اینورتر می‌باشد.

منابع

- [1] S. Kouro, J. I. Leon, D. Vinnikov, and L. G. Franquelo, "Grid-Connected Photovoltaic Systems: An Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 47-61, Mar. 2015.
- [2] H. Báez-Fernández, N. D. Ramírez-Beltrán, and M. I. Méndez-Piñero, "Selection and configuration of inverters and modules for a photovoltaic system to minimize costs," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 16-22, May 2016.
- [3] J. A. Cortajarena, O. Barambones, P. Alkorta, and J. De Marcos, "Sliding mode control of grid-tied single-phase inverter in a photovoltaic MPPT application," *Sol. Energy*, vol. 155, pp. 793-804, Oct. 2017.
- [4] Y. Cheddadi, F. Errahimi, and N. Es-sbai, "Design and verification of photovoltaic MPPT algorithm as an automotive-based embedded software," *Sol. Energy*, vol. 171, pp. 414-425, Sep. 2018.
- [5] N. Priyadarshi, P. Sanjeevikumar, M. Bhaskar Ranjana, F. Blaabjerg, and A. Sharma, "A Fuzzy SVPWM Based Inverter Control Realization of Grid Integrated PV-Wind System with FPSO MPPT Algorithm for a Grid-Connected PV/Wind Power Generation System: Hardware Implementation," *IET Electr. Power Appl.*, Mar. 2018.
- [6] W. M. Naouar, A. Hemdani, E. Monmasson, I. Slama Belkhdja, L. Idkhajine, and M. Dagbagi, "Indirect sliding mode power control for three phase grid connected power converter," *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 6, pp. 977-985, Jun. 2015.
- [7] G. Tsenegens and G. Adamidis, "A multi-function grid connected PV system with three level NPC inverter and voltage oriented control," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 11, pp. 2595-2610, Nov. 2011.
- [8] Althobaiti, M. Armstrong, M. A. Elgendy, and F. Mulolani, "Three-phase grid connected PV inverters using the proportional resonance controller," 2016, pp. 1-6.
- [9] J. Yang, S. Li, and X. Yu, "Sliding-Mode Control for Systems with Mismatched Uncertainties via a Disturbance Observer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, pp. 160-169, Jan. 2013.
- [10] J. Hu, L. Shang, Y. He, and Z. Q. Zhu, "Direct Active and Reactive Power Regulation of Grid-Connected DC/AC Converters Using Sliding Mode Control Approach," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 1, pp. 210-222, Jan. 2011.
- [11] M. A. Mahmud, M. J. Hossain, H. R. Pota, and N. K. Roy, "Robust Nonlinear Controller Design for Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems Under Structured Uncertainties," *IEEE Trans. Power Deli.*, vol. 29, no. 3, pp. 1221-1230, Jun. 2014.
- [12] J. R. Massing, M. Stefanello, H. A. Grundling, and H. Pinheiro, "Adaptive Current Control for Grid-Connected Converters with LCL Filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 12, pp. 4681-4693, Dec. 2012.
- [13] R. V. Tambara, J. M. Kaniecki, J. R. Massing, M. Stefanello, and H. A. Grundling, "A Discrete-Time Robust Adaptive Controller Applied to Grid-Connected Converters with LCL Filter," *J. Control Autom. Electr. Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 371-379, Jun. 2017.
- [14] S. Eren, M. Pahlevani, A. Bakhshai, and P. Jain, "An Adaptive Droop DC-Bus Voltage Controller for a Grid-Connected Voltage Source Inverter with LCL Filter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 2, pp. 547-560, Feb. 2015.
- [15] R. M. Milasi, A. F. Lynch, and Y. W. Li, "Adaptive Control of a Voltage Source Converter for Power Factor Correction," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 10, pp. 4767-4779, Oct. 2013.
- [16] A. Anzalchi and A. Sarwat, "Overview of technical specifications for grid-connected photovoltaic systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 152, pp. 312-327, Nov. 2017.
- [17] S. Oncu and S. Nacar, "Soft switching maximum power point tracker with resonant switch in PV system," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, no. 29, pp. 12477-12484, Aug. 2016.



شکل ۱۲: الف) ضرایب کنترل‌کننده MRAC-PI جریان راستای d

ب) ضرایب کنترل‌کننده MRAC-PI جریان راستای q

ج) ضرایب کنترل‌کننده MRAC-PI ولتاژ لینک dc

تغییر ضرایب هر سه متغیر کنترلی کنترل‌کننده‌های MRAC-PI در

زمان ۰٫۵ باعث ایجاد عملکرد مقاوم سیستم گردیده است.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، الگوریتم کنترلی MRAC-PI شکل ۳ برای کنترل سه متغیر کنترلی جریان‌های مولفه d و مولفه q شبکه و ولتاژ لینک dc اینورتر در سیستم PV متصل به شبکه شکل ۱ تدوین شده است. در سیستم PV متصل به شبکه جهت تزریق بیشینه توان تولیدی توسط آرایه‌های PV به شبکه از الگوریتم P&O شکل ۲ استفاده شده است. سیستم کنترلی MRAC-PI پیشنهادی با ساختاری ساده و مبتنی بر قانون MIT ضرایب کنترل‌کننده PI را به صورت آنلاین تخمین می‌زند. برای بررسی عملکرد سیستم کنترلی MRAC-PI پیشنهادی، ساختار کنترلی شکل ۴ در زمانی که میزان تابش تغییر می‌کند، شبیه‌سازی شده است. سپس نتایج حاصل از این شبیه‌سازی، با حالتی که در کنترل این سه متغیر کنترلی از کنترل‌کننده PI استفاده می‌شود، مقایسه گردیده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، سیستم کنترلی مبتنی بر روش MRAC-PI، باعث مشاهده THD جریان شبکه طبق استاندارد IEEE519، تنظیم دقیق ضریب قدرت شبکه، افزایش سرعت حالت گذرا، فراهم نمودن یک زمان همگرایی سریع برای پارامترهای کنترل‌کننده PI و عملکرد پایدار و مقاوم در زمان تغییر میزان تابش نور خورشید شده است و عملکرد کنترل‌کننده‌های PI را بهبود بخشیده است. الگوریتم P&O ارائه شده در این مقاله، به طور موثری در یافتن بیشینه تولیدی توسط آرایه‌های PV و انتقال آن به شبکه عمل کرده است.