

بررسی عملکرد دو روش ردیابی P&O و InC در سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

آرزومیربلوچ زهی^۱ و فرامر زفقیهی^۲

^۱دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زاهدان، گروه برق، زاهدان، ایران Arezou.mirbalouchzahi@yahoo.com

^۲دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه برق، تهران، ایران Faramarz_faghihi@hotmail.com

چکیده - استفاده از انرژی فتوولتائیک در جهان، با نرخ قابل توجهی رو به افزایش است. مطالعه چشم‌اندازهای صنعت فتوولتائیک بر تداوم و تسریع نرخ توسعه این صنعت دلالت دارد. نقطه حداکثر توان پنل‌های خورشیدی با تغییرات تابش و دما تغییر پیدامی کند از اینرو استفاده از الگوریتم‌های ردیابی حداکثر توان امری ضروری است. از میان تمامی الگوریتم‌ها، الگوریتم P&O و InC بدلیل پیاده‌سازی آسان رایج تر هستند. در این مقاله یک بررسی مقایسه‌ای بین دو الگوریتم ردیابی حداکثر توان (P&O و InC) در یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه با استفاده از نرم افزار Matlab/Simulink انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد سرعت عملکرد ردیابی حداکثر توان توسط الگوریتم InC نسبت به الگوریتم P&O در تغییرات دما و تابش بیش تر است. کلید واژه - الگوریتم ردیابی حداکثر توان، سیستم فتوولتائیک، سرعت عملکرد ردیابی، شبکه.

در اجراء عملکرد وجود دارد [۲]. بهترین روش‌های کلاسیک شناخته شده، روش‌های آشوب و مشاهده^۳ و رسانش افزایشی^۴ هستند. این الگوریتم‌ها برای تکنولوژی یکسانی هستند، تنظیم ولتاژ آرایه PV با توجه به نقطه کار آرایه که در آن توان حداکثر است انجام می‌شود [۳]. در این مقاله به تجزیه تحلیل مقایسه‌ای بین دو روش ردیابی حداکثر توان در یک سیستم متصل به شبکه جهت دستیابی به یک الگوریتم بهینه و مناسب پرداخته شده است.

۱- مقدمه

سیستم‌های فتوولتائیک^۱، انرژی خورشیدی را به صورت مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند و در مقایسه با سیستم‌های سنتی تولید انرژی، باعث آلودگی محیط زیست نمی‌گردند. معمولاً زمانی که یک آرایه فتوولتائیک مستقیماً به یک بار متصل می‌شود به ندرت نقطه عملکردش در نقطه حداکثر قرار می‌گیرد [۱]. ردیاب نقطه حداکثر توان در ترکیب با مبدل DC-DC قدرت به تولیدکننده فتوولتائیک اجازه می‌دهد تا بطور پیوسته توان ماکزیمی را بدون توجه به شرایط اندازه‌گیری دما و تابش تولید کند. حداقل ۱۹ روش مختلف کنترل ردیابی حداکثر توان MPPT^۲ با روش‌های مختلف

^۲ Perturb and Observe Method

^۴ Incremental Conductance Method

^۱ Photovoltaic Systems

^۲ Maximum Power Point Tracking

(۱) نشان داده شده، سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه یک آرایه ۱۰kw است که از ترکیب موازی ۵ ماژول سری و ۷ ماژول موازی ایجاد شده است.

جدول ۱: مشخصات ماژول شبیه سازی

۲- ساختار
سیستم
تولید

مشخصات ماژول شبیه سازی شده	مقدار واقعی
توان ماکزیمم (P _{MPP})	305.2W
ولتاژ در توان ماکزیمم (V _{MPP})	54.7V
جریان در توان ماکزیمم (I _{MPP})	5.58A
جریان اتصال کوتاه (I _{SCM})	5.96A
ولتاژ مدار باز (V _{OCM})	64.2V
ضریب دمایی در ولتاژ اتصال کوتاه (K _I)	0.0035A/°C

د توان خورشیدی

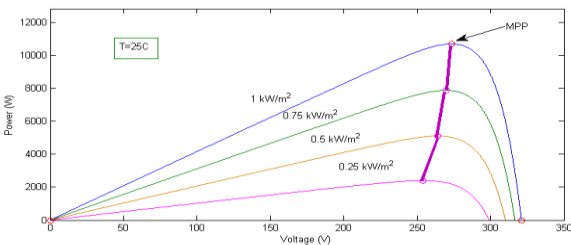
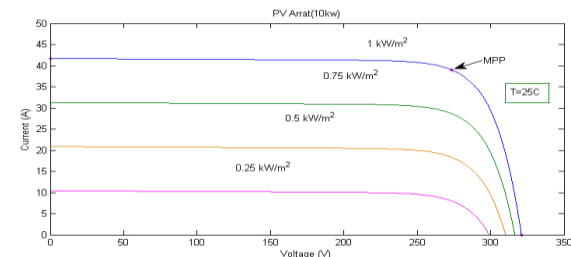
۲-۱ مدل آرایه خورشیدی

باتوجه به مشخصات ماژول مقدار I_{SC} و V_{OC} آرایه به صورت زیر محاسبه می شود:

$$V_{oc} = n_s \times V_{ocm} = 5 \times 64.2 = 321 \quad (2)$$

$$I_{sc} = n_p \times I_{scm} = 7 \times 5.96 = 41.72$$

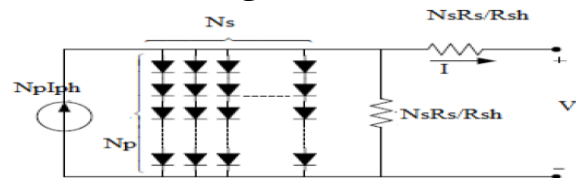
مشخصه های جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ خروجی آرایه تحت تغییرات تابش و دمای ثابت ۲۵°C و همچنین تغییرات دما و تابش ثابت ۱kW/m² در شکل های (۲) و (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲: مشخصه جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ آرایه ۱۰kw تحت تغییرات تابش

یک سلول فتوولتائیک کوچک نیرویی در حدود ۱ تا ۲ وات تولید می کند. برای بالا بردن انرژی سلول ها، بایستی آن ها را به هم وصل کرد تا واحد بزرگی که ماژول نامیده می شود شکل بگیرد. متأسفانه ولتاژ خروجی ماژول ها نسبتاً پایین است. با اتصال ماژول ها به هم، واحد بزرگ تری به نام آرایه تشکیل می شود که می تواند انرژی بیشتری تولید کند. برای دستیابی به ولتاژ بالا، پیکره بندی اتصال سری ماژول ها، راه حل متعارفی است. مدار معادل ماژول خورشیدی با آرایش n_p سلول موازی و n_s سلول سری در شکل (۱) نشان داده شده است [۴].

I_{ph} جریان تولید شده در نتیجه نور، I_s جریان اشباع معکوس سلول (C = 1.6 × 10⁻¹⁹) بار الکترون، k ثابت بولتزمن، T_c دمای کار سلول خورشیدی، A ضریب ایده آل، R_{sh} مقاومت موازی و R_s مقاومت سری سلول خورشیدی می باشد.



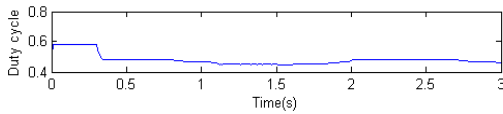
شکل ۱: مدار معادل ماژول خورشیدی

معادله جریان خروجی ماژول عبارت است از:

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V}{n_s} + \frac{I R_s}{n_p}\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (1)$$

ماژول خورشیدی به کاررفته در شبیه سازی SPR-305-WHT محصول شرکت sun power، که مشخصات فنی آن در جدول

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

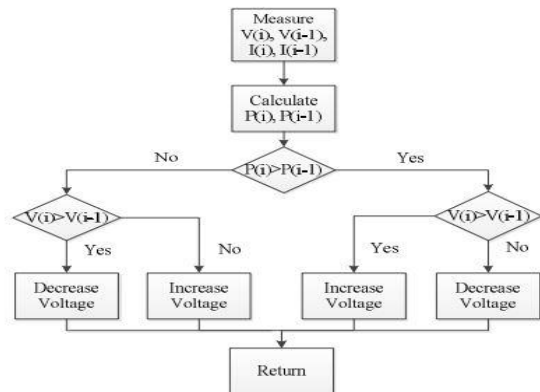


شکل ۵: ولتاژ خروجی آرایه، مبدل و دوره عملکرد مبدل

۲-۳ - ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT)

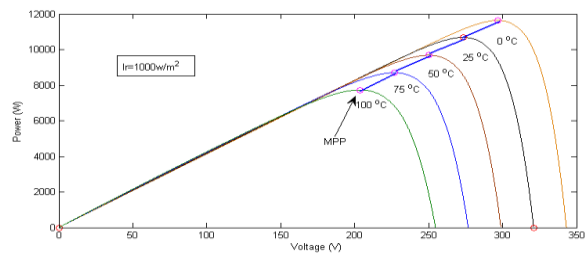
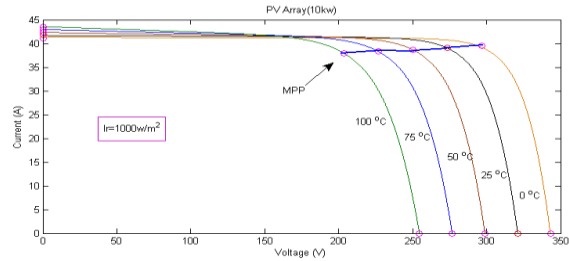
روش آشوب و مشاهده:

این روش بطور گسترده ای به دلیل اجرای ساده، تعداد کم پارامترها، هزینه پایین و محاسبات کم در مقایسه با سایر روش ها بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. ایده اصلی P&O این است که مشتق ولتاژ به توان در نقطه حداکثر توان صفر شود. با ایجاد آشفتگی در ولتاژ عملکرد آرایه باعث افزایش یا کاهش توان خروجی شده و با نگهداشتن یا معکوس کردن آشفتگی بعدی به نقطه MPP نزدیک می شود. در این روش با تغییر دوره کار به طور پریودیک نقطه کار پنل را تغییر داده و توان تولیدی توسط پنل را در شرایط جدید بدست می آورد. سپس با مقایسه مقدار جدید توان خروجی پنل با مقدار قبلی آن، نسبت به انتخاب دوره کار مناسب برای داشتن حداکثر توان اقدام می کند. روش P&O را می توان به دو صورت دونقطه ای و سه نقطه ای پیاده سازی نمود. در این روش اگر اندازه اغتشاش بزرگ باشد حول نقطه MPP نوسان می کند و اگر اندازه اغتشاش کوچک باشد ردیابی MPP کند می شود. برای حل این مشکل از الگوریتم دومرحله ای استفاده کرده بصورتی که در مرحله اول ردیابی سریع انجام شده و در مرحله دوم پالایش ردیابی انجام می شود. فلوجارت روش در شکل (۶) نشان داده شده است [۵].



شکل ۶: الگوریتم آشوب و مشاهده

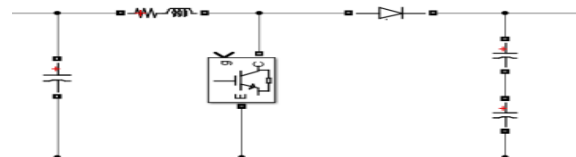
روش رسانش افزایشی:



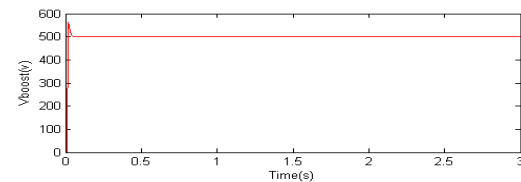
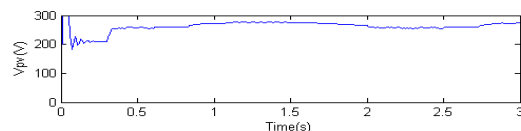
شکل ۳: مشخصه جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ آرایه ۱۰kW تحت تغییرات دما

۲-۲ - مبدل DC-DC افزایشنده

مبدل ولتاژ DC به DC به منظور بالا بردن سطح ولتاژ و تثبیت آن در یک ولتاژ مرجع مورد استفاده قرار می گیرد. مبدل مورد استفاده ولتاژ ۳۰۰Vdc آرایه فتوولتائیک رادرفرکانس سوئیچینگ ۵kHz به ولتاژ ۵۰۰Vdc تبدیل می کند تنظیم دوره کار مبدل بار دیاب حداکثر توان انجام می شود. مدل مداری مبدل در شکل (۴) و ولتاژ خروجی آرایه و مبدل و دوره عملکرد مبدل در شکل (۵) نشان داده شده است.

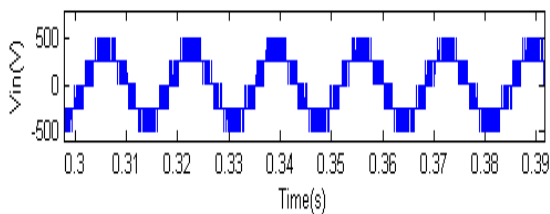


شکل ۴: مبدل DC-DC افزایشنده



۲-۴- اینورتر منبع ولتاژ^۵

وظیفه اینورتر تبدیل ولتاژ dc به ولتاژ خروجی ac با دامنه و فرکانس مطلوب است. ضریب بهره اینورتر نسبت ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی است ولتاژ خروجی می تواند در یک فرکانس ثابت و یا متغیر باشد در صورتیکه ولتاژ dc ورودی تغییر نماید و ضریب بهره ثابت بماند ولتاژ خروجی متغیر حاصل می شود از طرف دیگر ولتاژ dc ورودی ثابت بماند و قابل کنترل نباشد با تغییر ضریب بهره اینورتر که معمولاً با روش مدولاسیون پهنای پالس PWM انجام می گیرد ولتاژ خروجی متغیر حاصل می شود. در این مقاله اینورتر ولتاژ لینک dc را در ۵۰۰V تنظیم و سپس به ولتاژ ۲۶۰Vac تبدیل می کند و ضریب توان را در یک نگه می دارد دو حالت کنترلی برای اینورترهای متصل به شبکه وجود دارد: الف) کنترل جریان ثابت وب) کنترل توان ثابت، در این مقاله کنترل اینورتر خورشیدی از طریق کنترل جریان ثابت با استفاده از حلقه قفل فاز PLL صورت گرفته است [۶]. در شکل (۸) ولتاژ خروجی اینورتر نشان داده شده است. به دلیل سوییچینگ، شکل موج دارای هارمونیک است.



شکل ۸: ولتاژ خروجی اینورتر

۲-۵- فیلتر LC

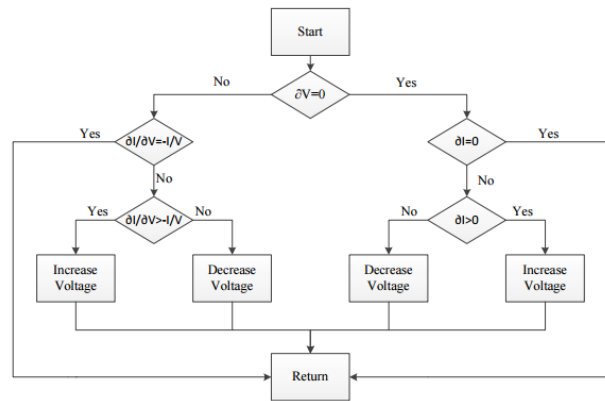
شکل موج ولتاژ ac بدست آمده به صورت موج پله ای است از این رو برای تبدیل شکل موج پله ای به شکل موج سینوسی خالص از فیلتر LC سه فاز استفاده شده است. اندوکتانس فیلتر برابر ۲۰۰mH همراه با مقاومت سری ۰.۰۲Ω و بانک خازنی

روش InC در سیستم هایی که دقت بالا نیاز دارند مانند صنایع فضایی مورد استفاده قرار می گیرند. پایه این روش این است که شیب منحنی توان-ولتاژ در نقطه MPP برابر صفر و در سمت چپ این نقطه مثبت و در سمت راست این نقطه منفی باشد یعنی داریم:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial (VI)}{\partial V} = I \frac{\partial V}{\partial V} + V \frac{\partial I}{\partial V} = I + V \frac{\partial I}{\partial V} \quad (۲)$$

$$(۳) \begin{cases} \frac{\partial P}{\partial V} = 0, V = V_{mpp} & \text{نقطه حداکثر توان} \\ \frac{\partial P}{\partial V} > 0, V < V_{mpp} & \text{سمت چپ نقطه حداکثر توان} \\ \frac{\partial P}{\partial V} < 0, V > V_{mpp} & \text{سمت راست نقطه حداکثر توان} \end{cases}$$

شکل (۷) الگوریتم روش رسانش افزایشی را نشان می دهد. اگر تغییرات جریان و ولتاژ صفر باشد در عین حال، نیازی به افزایش یا کاهش ولتاژ مرجع نیست اگر تغییرات ولتاژ زمانی که تغییرات جریان مثبت است نداشته باشیم، ولتاژ مرجع باید افزایش پیدا کند. بطور مشابه، اگر تغییرات ولتاژ هنگامی که تغییرات جریان منفی است صفر باشد، ولتاژ مرجع باید کاهش پیدا کند [۵].



شکل ۷: الگوریتم رسانش افزایشی

^۵ Voltage Source Inverter

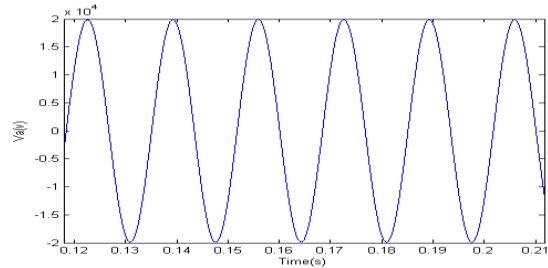
^۶ Phase Locked Loop

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۲-۶- ترانسفورماتور و شبکه

برای اتصال سیستم به شبکه (۲۵۰۰MVA, ۲۵KV) از یک ترانسفورماتور ۱۰ KVA با اتصال Δ -Y استفاده شده است. که سطح ولتاژ ۲۶۰Vac خروجی این ترانس را به سطح ولتاژ ۲۵KV شبکه تبدیل و از تزریق جریان DC به شبکه جلوگیری می کند.

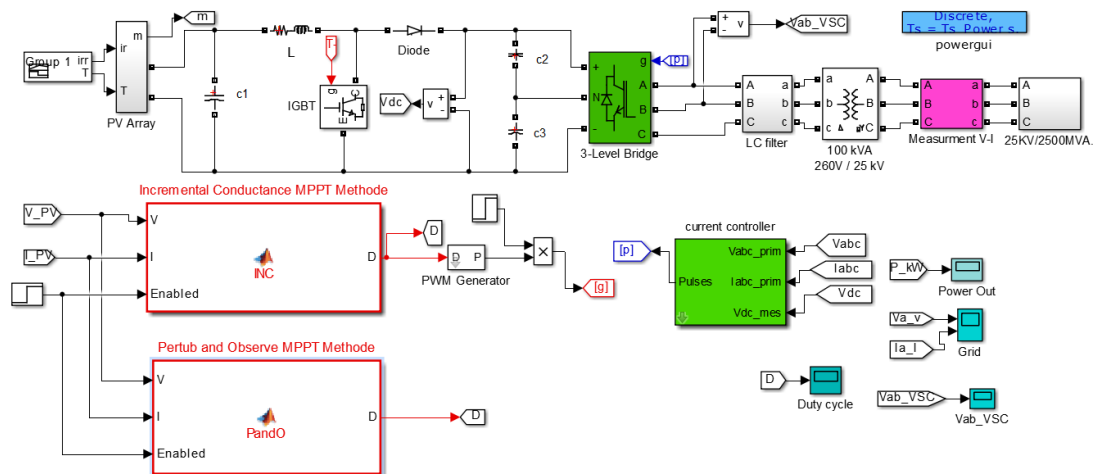
۵KVA استفاده شده است. برای حل مشکل رزونانس و جذب ریپل فرکانس سوئیچینگ از یک مقاومت میرایی 2Ω به صورت سری در مجموعه بانک خازنی استفاده شده است محاسبه پارامترهای فیلتر با استفاده از مرجع [۷] و [۸] انجام شده است. شکل موج ولتاژ بعد از فیلتر گذاری در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹: ولتاژ خروجی بعد از فیلتر گذاری

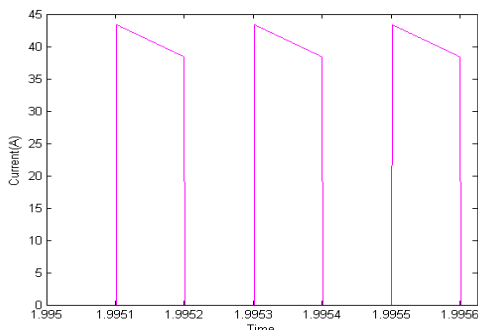
۳- شبیه سازی و نتایج

شبیه سازی سیستم در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



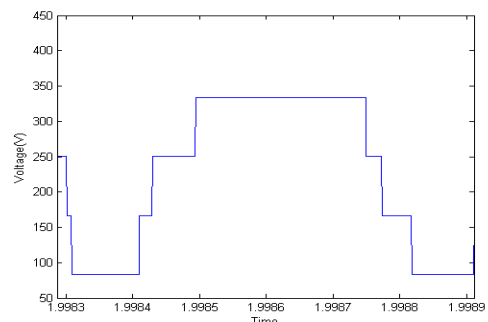
شکل ۱۰: شبیه سازی سیستم فتوولتائیک به همراه روش ردیابی InC و P&O

شکل ۱۱: ولتاژ خروجی با استفاده از روش InC

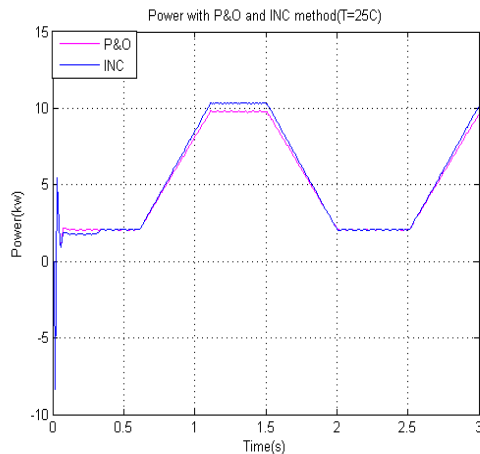


شکل ۱۲: جریان خروجی با استفاده از روش InC

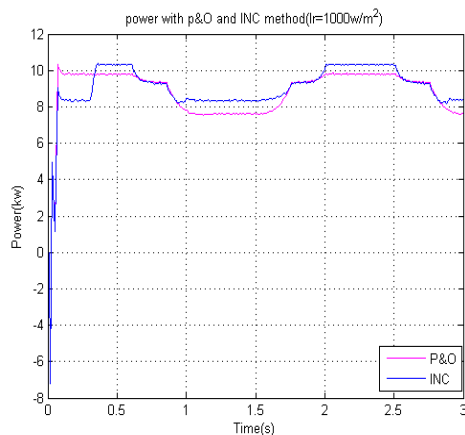
در شکل های ۱۱ تا ۱۴ مشخصه های ، جریان و ولتاژ آرایه با در روش P&O و InC تحت دمای ۲۵C و تابش $1\text{kw}/\text{m}^2$ نشان داده شده است.



۲۵۰ تا 1000 w/m^2 و دمای ثابت 25°C و شکل ۱۷ توان خروجی در تغییرات دما 25°C تا 75°C و تابش 1000 w/m^2 می باشد.

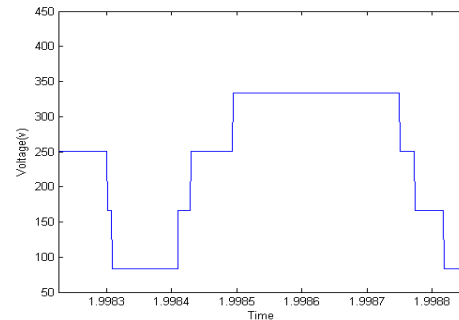


شکل ۱۶: توان خروجی آرایه در تغییرات تابش و دمای ثابت

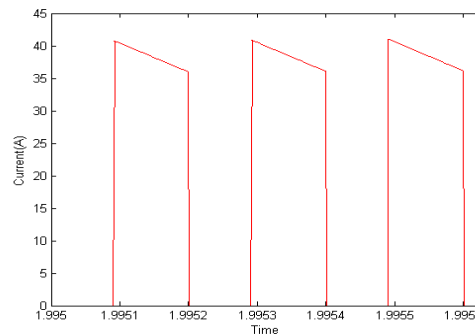


شکل ۱۷: توان خروجی آرایه در تغییرات دما و تابش ثابت

در شکل (۱۵) که شرایط ثابت در نظر گرفته شده عملکرد الگوریتم INC و الگوریتم P&O یکسان است. در شکل (۱۶) که تغییرات تابش و دمای ثابت داریم توان خروجی آرایه متناسب با تابش تغییر پیدا می کند در این شرایط الگوریتم P&O سریعتر از INC به اولین نقطه MPP می رسد. در شکل (۱۷) که تغییرات دما و تابش ثابت داریم توان خروجی بادما رابطه عکس دارد چنانچه دما کاهش یابد توان افزایش می یابد در این شرایط عملکرد ردیابی توسط الگوریتم INC نسبت به الگوریتم P&O بهتر بوده و با سرعت و دقت بهتری ردیابی نقطه حداکثر توان را در لحظاتی که تغییر دما وجود دارد انجام می دهد الگوریتم P&O در تغییرات جوی انحراف از

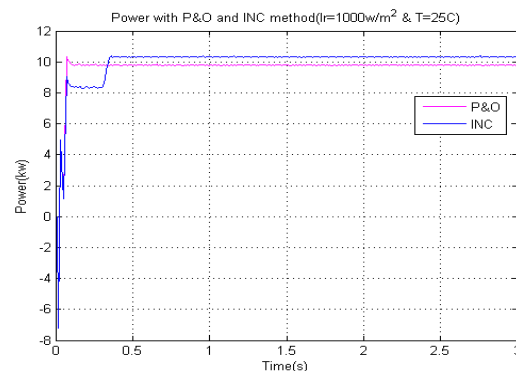


شکل ۱۳: ولتاژ خروجی با استفاده از روش P&O



شکل ۱۴: جریان خروجی با استفاده از روش P&O

میزان جریان و ولتاژ سیستم باروش INC بیشتر از روش P&O است. در شکل (۱۵) توان خروجی آرایه بادوروش P&O و INC تحت دمای 25°C و تابش 1 kw/m^2 نشان داده شده است.



شکل ۱۰: توان خروجی آرایه در دما و تابش ثابت

هر دوروش ردیابی در تابش و دمای ثابت عملکرد یکسانی داشته اند. شکل ۱۶ توان خروجی آرایه تحت تغییرات تابش از w/m^2

استفاده از الگوریتم InC در سیستم های فتوولتائیک نسبت به الگوریتم P&O بیشتر است.

مراجع

- [1] D. Rekioua and E. Matagne, "Optimization of Photovoltaic Power System, Modelization, Simulation and Control", Springer, 2012.
- [2] L. Viorel Banu and R. Beniuga, "Comparative Analysis of the Perturb and Observe and Incremental Conductance MPPT Methods", *The 8th international SYMPOSIUM on Advanced Topics in Electrical Engineering*, pp. 23-25, 2013.
- [3] T. ESRAM and P. Chapman, "Comparison of Photovoltaic array Maximum Power Point Tracking Techniques", *IEEE Transaction Energy Convers*, Vol. 22, no. 2, pp. 439-449, 2007.
- [4] M.G. Villalvag, J.R. Gazoli, and E.R. Filho, "Modeling and circuit based Simulation of Photovoltaic arrays", *Power Electronics Conference, IEEE*, pp. 1244-1255, 2009.
- [5] M. Abdulkadir, A. Samosir, and A. Yatim, "Modeling and Simulation of Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic System in Simulink", *IEEE international Conference on Power and Energy*, pp. 325-330, 2012.
- [6] S. Meshram, G. Agnihtori, and S. Gupta, "Performance Analysis of Grid Integrated Hydro and Solar Based Hybrid Systems", *Hindawi, Advanced in Power Electronics*, Vol. 2013, pp. 7, 2013.
- [7] M. Azari and N.A. Rahim, "Design Analysis of Low-Pass LC Passive Filter in Single-Phase Grid Connected Transformerless Inverter", *International Journal of Renewable Energy Resource*, pp. 25-31, 2011.

MPPT	جریان خروجی	ولتاژ خروجی	توان خروجی	دقت
P&O	۳۶,۰۹A	۲۵۰,۳۴V	۹,۰۳۴Kw	کمتر
InC	۳۹,۴۶A	۲۵۰,۳۷V	۹,۸۷۹Kw	دقیق

- [8] L. Michels, L. Schuch, and H. Pinheiro, "Design of a LCL filter for Leakage Current reduction in Transformerless PV Grid-Connected three-level Inverter", *Power Electronic Conference Exposition (APEC), IEEE*, 2015.

ردیابی نقطه حداکثر توان دارد و به خوبی نمی تواند ردیابی را انجام دهد. در جدول (۲) نتایج بدست آمده ردیابی توان توسط هر دو الگوریتم در ماه های مختلف و تابش ثابت نشان داده شده است.

جدول ۲: نتایج الگوریتم های ردیابی در تغییرات دم

در جدول (۳) با استفاده از نتایج عددی، هر دو الگوریتم در شرایط دما و تابش ثابت الگوریتم P&O با InC مقایسه شده است.

جدول ۳: مقایسه الگوریتم InC با P&O

باتوجه به جداول ۲ و ۳ مشاهده می کنیم در هنگام استفاده از الگوریتم P&O توان خروجی دارای تلفات می باشد و مقدار آن کمتر از مقدار واقعی توان سیستم و مقدار توان خروجی حاصل از ردیابی باروش InC است. مقدار توان خروجی با استفاده از روش InC به مقدار توان واقعی نزدیکتر است این نشان دهنده دقت بیشتری الگوریتم در یافتن نقطه حداکثر توان نسبت به الگوریتم P&O است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک سیستم فتوولتائیک ۱۰kw به همراه مبدل افزایش دهنده بوست، و یک اینورتر منبع ولتاژ جهت اتصال به شبکه پیاده سازی شد. هدف این مقاله مطالعه و بررسی دوروش ردیابی حداکثر نقطه توان رایج P&O و InC و مقایسه عملکردشان با یکدیگر در تغییرات جوی (دما و تابش) ثابت یا آهسته در سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه است. نتایج نشان می دهد، در شرایط جوی ثابت هر دو الگوریتم عملکرد تقریباً یکسانی خواهند داشت. اما در تغییرات جوی آهسته، InC عملکرد بهتری داشته و با دقت بالایی به ردیابی نقطه حداکثر توان می پردازد. اما الگوریتم P&O با تغییرات جوی در زمان ردیابی حول نقطه حداکثر توان شروع به نوسان می کند حال آنکه ممکن است نقطه توان محلی باشد. همچنین نتایج نشان می دهد بازده سیستم در هنگام



چهارمین کنفرانس ملی ایده های نو در مهندسی برق



۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد صغمان (خراسان)