

交替式返馳轉換器於太陽能系統之應用 Interleaved Flyback Converter Applied to PV System

陳宏良 朱仁貴 簡靖陽

Hung-Liang Chen, Ren-Guey Chu, Ching-Yang Chien

黎明技術學院電機工程系

Department of Electrical Engineering, Lee-Ming Institute of Technology

摘 要

本論文提出一種適用於太陽能系統的交替式返馳轉換器，本轉換器採用定責任週期變頻控制之增量電導最大功率追蹤控制器。為實現一 1kW 獨立運轉型太陽能電池模組發電系統，交替式返馳轉換器採用變頻增量電導法以充分汲取太陽能電池模組所轉換的電能，達最大功率追蹤之目標。實測結果顯示，此控制器不但能在環境照度瞬間變化時作穩定的功率追蹤，更能快速的追蹤太陽能電池的最大功率點。

關鍵詞：太陽能系統，交替式返馳式轉換器，定責任週期變頻控制，增量電導，最大功率追蹤。

Abstract

A PV system realized by interleaved flyback topology is proposed. An incremental conductance (IC) derived MPPT is implemented by constant-duty variable frequency (CDVF) control strategy. The feasibility of proposal is assessed by a 1kW PV stand-alone DC bus system with interleaved energy supply. A power management for energy pump-in from PV and pump-out at output is presented under optimal energy distribution strategy. The CDVF-IC-MPPT control strategy achieves the ease of drawing energy from PV cell modules by the interleaved flyback converter. The IC MPPT tracking phenomenon for energy drawing from PV array to the load is so close to the predictions.

Key Words: PV System, Interleaved Flyback, Constant-Duty Variable Frequency (CDVF), Incremental Conductance (IC), MPPT.



1. 前言

工業快速發展，環境污染日益嚴重，再加上石油短缺，再生能源的發展已成為刻不容緩的課題，目前太陽能、風力能與生質能已成為主要的發展方向。太陽能電池為太陽能發電系統的基本也是主要元件，其輸出功率會受到光照情形及溫度影響。為了能完全汲取太陽能電池所轉換的能量，負載需適度的控制以獲取最大功率，目前有許多實踐的做法[1-12]。由於結構簡單，所需測量參數少，所以擾動觀察法最被廣泛使用。然而當追蹤到最大功率點時，擾動作法卻未停止。因此會造成部分功率損耗，而降低太陽能電池轉換效率。

為了解決上述問題，所以有增量電導法的提出。雖然其作法上類似擾動觀察法，但藉由改變邏輯判斷式，在近最大功率點時，可降低震盪情形。

一般而言，最大功率追蹤器多採用直流-直流轉換器以為媒介。若所採用的直流-直流轉換器，屬於降壓型轉換器或順向式轉換器，由於低照度時無法自太陽電池汲取足夠的能量以維繫負載所需電壓，故利用率較低。為充分利用光照轉換電力，可採用升壓型或返馳式轉換器[13-14]。雖然升壓型電路結構較為簡單，但太陽能電池與負載端並無隔離，且僅具有升壓特性，故應用層面有所限制。返馳式則就不同，由於採用變壓器作為能量轉換元件故具有隔離功能，且同時具有升壓及降壓特性可應用面較為廣泛，但返馳式轉換器一般並不適合用於大功率輸出，且僅單一開關控制功率，太陽能電池利用率較低。

本論文擬採用交替式返馳轉換器[15]作為功率控制轉換器，其特點是可以降低一次側與二次側峰值電流、降低功率元件散熱片需求及提高太陽電池利用率。本論文提出一種適用於太陽能系統的交替式返

馳轉換器，採用定責任週期變頻控制之增量電導最大功率追蹤控制器，即使在低光照情形下，這種方法也可以適度地調整頻率以汲取太陽能電池功率。

2. 交替式返馳轉換器

圖 1 所示為本論文所提之太陽能電池電能轉換系統，其中交替式返馳轉換器是設計來汲取太陽能電池模組所轉換的電能並提供給負載使用，同時藉由定週期變頻增量電導法以達太陽能電池最大功率追蹤的目標。

圖 2 及圖 3 所示為交替式返馳轉換器動作情形示意圖及相對於各點動作波形圖，每一開關週期電路動作情形可分成六種狀態，各狀態之動作說明如下：

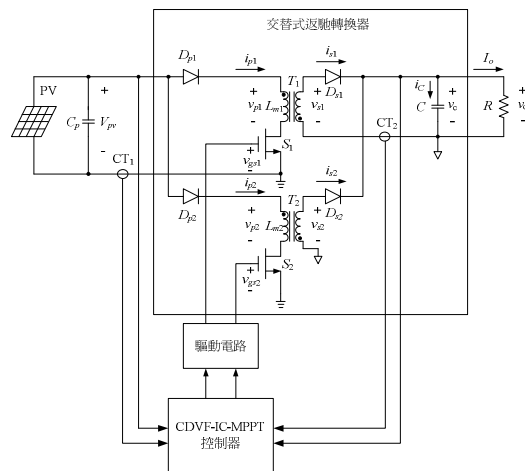
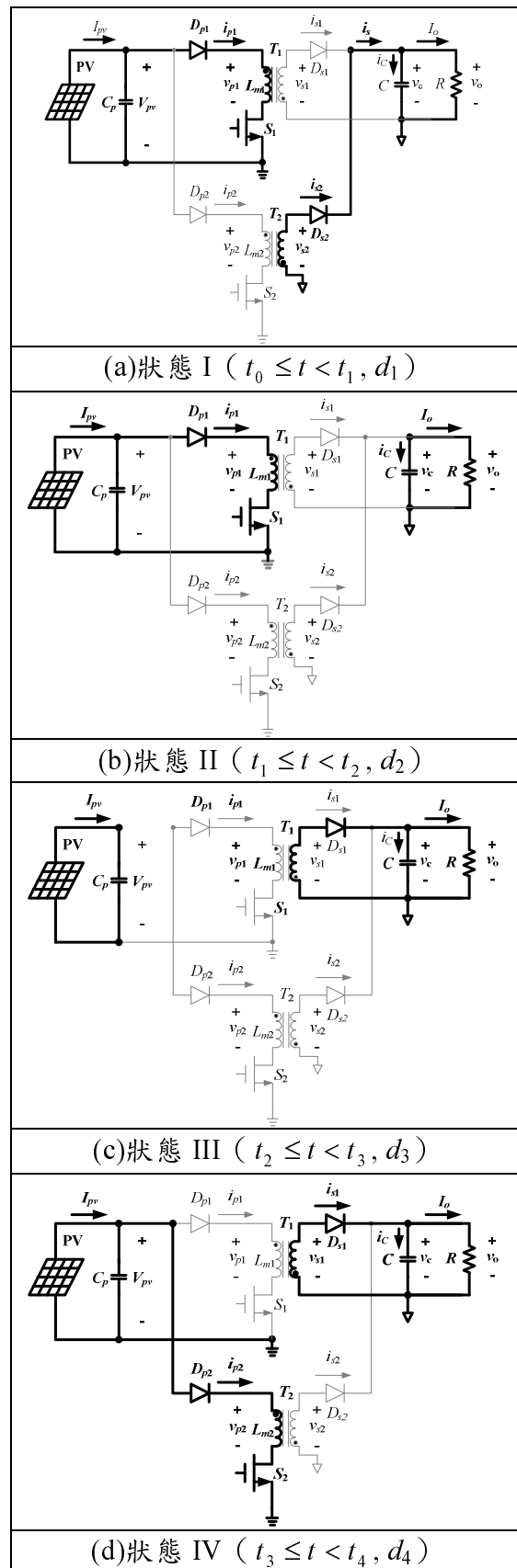


圖 1 太陽能電池電能轉換系統

- (1) 狀態 I ($t_0 \leq t < t_1, d_1$): 如圖 2(a) 所示，在此區間，開關 S_1 導通，開關 S_2 截止，二極體 D_{p1} 導通，二極體 D_{p2} 截止，二極體 D_{s1} 截止，二極體 D_{s2} 導通。太陽能電池所轉換電能藉由開關 S_1 對變壓器 T_1 儲能，而原來儲存於變壓器 T_2 的能量則於此時釋出以供應負載所需電力。



- (2) 狀態 II ($t_1 \leq t < t_2, d_2$): 如圖 2(b)所示, 在此區間, 開關 S_1 導通, 開關 S_2 截止, 二極體 D_{p1} 導通, 二極體 D_{p2} 截止, 二極體 D_{s1} 截止, 二極體 D_{s2} 截止。太陽能電池所轉換電能持續藉由開關 S_1 對變壓器 T_1 儲能, 儲存於變壓器 T_2 的能量於此時已釋出一空, 電容 C 開始對負載釋能以維持輸出電壓穩定。
- (3) 狀態 III ($t_2 \leq t < t_3, d_3$): 如圖 2(c)所示, 在此區間, 開關 S_1 截止, 開關 S_2 截止, 二極體 D_{p1} 截止, 二極體 D_{p2} 導通, 二極體 D_{s1} 導通, 二極體 D_{s2} 截止。儲存於變壓器 T_1 的能量於此時開始釋出以供應負載所需電力。
- (4) 狀態 IV ($t_3 \leq t < t_4, d_4$): 如圖 2(d)所示, 在此區間, 開關 S_1 截止, 開關 S_2 導通, 二極體 D_{p1} 截止, 二極體 D_{p2} 導通, 二極體 D_{s1} 導通, 二極體 D_{s2} 截止。太陽能電池所轉換電能藉由開關 S_2 對變壓器 T_2 儲能, 而儲存於變壓器 T_1 的能量持續釋出以供應負載所需電力。
- (5) 狀態 V ($t_4 \leq t < t_5, d_5$): 如圖 2(e)所示, 在此區間, 開關 S_1 截止, 開關 S_2 導通, 二極體 D_{p1} 截止, 二極體 D_{p2} 導通, 二極體 D_{s1} 截止, 二極體 D_{s2} 截止。太陽能電池所轉換電能持續藉由開關 S_2 對變壓器 T_2 儲能, 而儲存於變壓器 T_1 的能量於此時已釋出一空, 電容 C 開始對負載釋能以維持輸出電壓穩定。
- (6) 狀態 VI ($t_5 \leq t < t_6, d_6$): 如圖 2(f)所示, 在此區間, 開關 S_1 截止, 開關 S_2 截止, 二極體 D_{p1} 截止, 二極體 D_{p2} 截止, 二極體 D_{s1} 截止, 二極體 D_{s2} 導通。儲存於變壓器 T_2 的能量於此時開始釋出以供應負載所需電力。



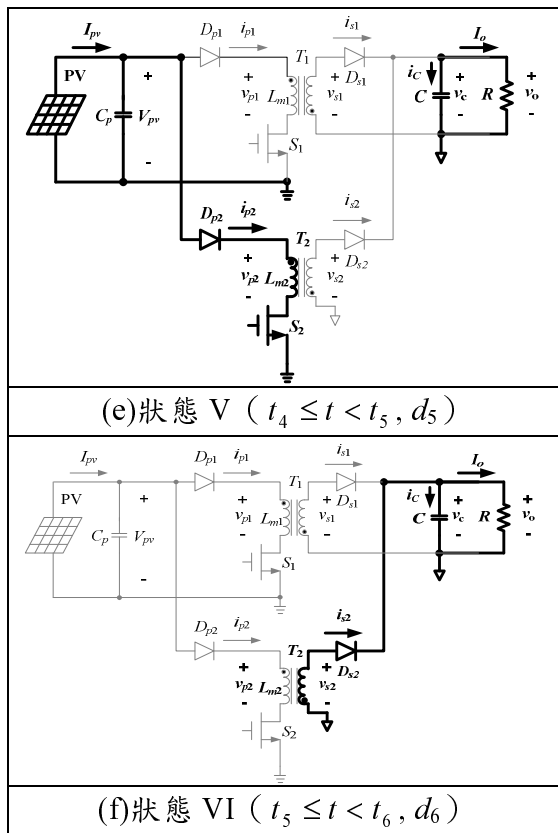


圖 2 交替式返馳轉換器動作示意圖

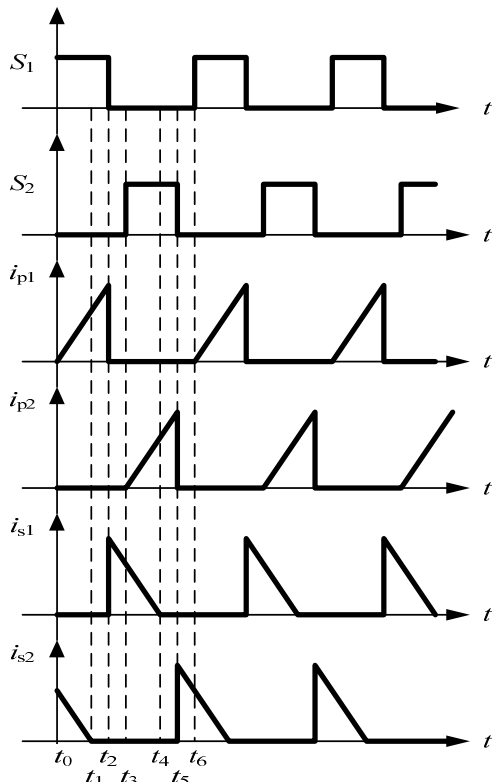


圖 3 交替式返馳轉換器動作波形圖

3. 定週期變頻增量電導最大功率追蹤

如圖4所示為太陽能電池的 P-V 及 I-V 曲線對應圖，圖形顯示最大功率點的左側呈現輸出功率與輸出電壓成正比關係，同時輸出電壓改變情形下輸出電流變化不大，可視為定電流區。反之，最大功率點的右側則呈現輸出功率與輸出電壓成反比關係，同時輸出電流改變時輸出電壓反而變化不大，其特性近似定電壓。根據極值定理，當太陽能電池輸出功率達到最大時，則斜率 $dP/dV = 0$ ，即為

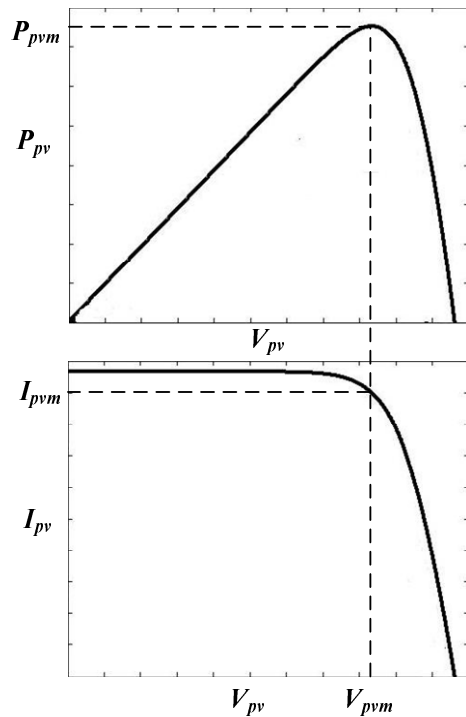


圖 4 太陽能電池 P-V 和 I-V 曲線對應圖

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (1)$$

因此，在最大功率點的瞬間電導可表示為

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (2)$$



為簡化分析，同時避免程式設計時可能衍生之大量的判斷與演算需求，以增量概念表示時，可進一步改寫成

$$V_{pv}\Delta I_{pv} + I_{pv}\Delta V_{pv} = 0 \quad (3)$$

最大功率追蹤器一般採用高頻直流-直流轉換器，透過高頻切換將太陽能電池產生之直流電轉換至負載。傳統實踐最大功率追蹤的方法多採用責任週期控制，藉由定頻脈波寬度調變控制以汲取太陽能電池所轉換的電能。這種作法在低光照情形下不易獲取電能，為解決上述問題，本文採用定週期變頻式增量電導法如圖 5 所示，並以返馳式轉換器為能量轉換架構，這種作法即使在低光照情形下也能輕易汲取太陽能電池所轉換的電能，同時不但能在環境照度瞬間變化時作穩定的功率追蹤，更能快速的追蹤太陽能電池的最大功率點。

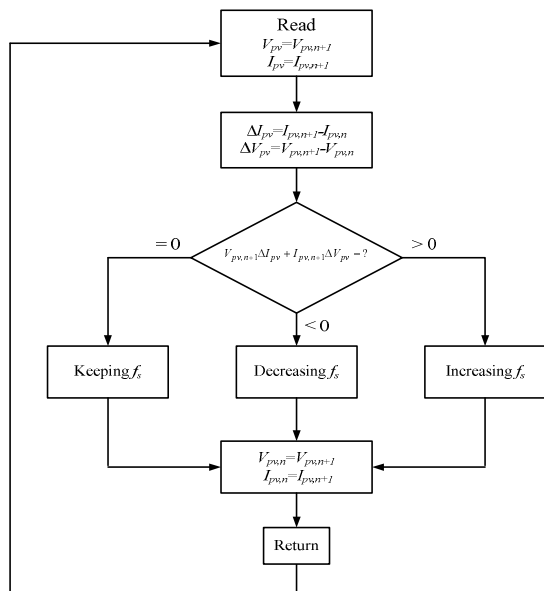


圖 5 定責任週期變頻增量電導法

本研究利用改變頻率固定責任週期的方式切換功率開關，以改變返馳轉換器的輸入阻抗特性，也等於改變太陽能電池的

輸出阻抗，達到控制太陽能電池的工作點。當 $V_{pv}\Delta I_{pv} + I_{pv}\Delta V_{pv} > 0$ 時，表示工作點處在最大功率點左側，應增加頻率以趨近最大功率。反之，若 $V_{pv}\Delta I_{pv} + I_{pv}\Delta V_{pv} < 0$ 時，表示工作點處在最大功率點右側，應降低頻率以趨近最大功率。當 $V_{pv}\Delta I_{pv} + I_{pv}\Delta V_{pv} = 0$ 時，表示已達到最大功率點。

4. 實作與測量

為驗證所提之交替式返馳轉換器適用於太陽能系統，本研究實際研製一定責任週期變頻增量電導最大功率追蹤之交替式返馳轉換器太陽能電池電能轉換系統。採用最大功率為 1kW 的太陽能模組，如圖 6 所示。維持責任週期為 0.45，開關頻率介於 20kHz 至 100kHz 之間，實際量測輸出 1kW、500W 與 200W 轉換器之輸入與輸出特性之波形如圖 7-圖 9 所示。



圖 6 太陽能模組實體

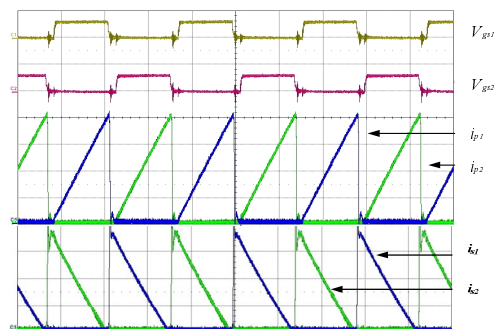


圖 7 輸出功率 1kW 時，交替式返馳轉換器輸出入波形 (Ver: 20V/div for v_{gs1} and v_{gs2} , 10A/div for i_{p1} , i_{p2} , i_{s1} , i_{s2} , Hor: 10μs/div)



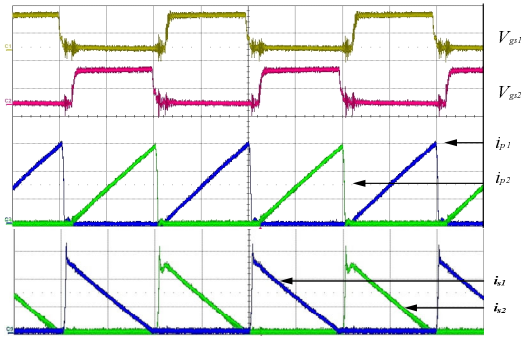


圖 8 輸出功率 500W 時，交替式返馳轉換器輸出入波形(Ver:10V/div for v_{gs1} and v_{gs2} , 10A/div for i_{p1} , i_{p2} , i_{s1} , i_{s2} , Hor:5 μ s/div)

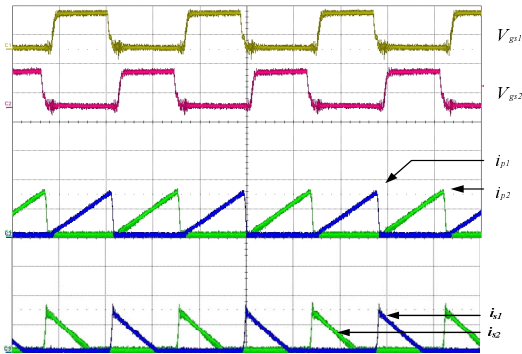


圖 9 輸出功率 200W 時，交替式返馳轉換器輸出入波形(Ver:10V/div for v_{gs1} and v_{gs2} , 10A/div for i_{p1} , i_{p2} , i_{s1} , i_{s2} , Hor:5 μ s/div)

在光照為 500W/m² 情形下，當開關頻率操作在 100kHz 時，太陽能模組輸出功率為 391W。啟動最大功率追蹤後，逐步調整頻率，依定週期變頻增量電導法則，頻率降低則輸出功率增加，當頻率降低至 64kHz 時，太陽能模組輸出功率達 420W。若繼續調降頻率，輸出功率反而減少。至 40kHz 時，太陽能模組輸出功率則降為 378W。顯而易見地，420W 已達該光照時之太陽能模組輸出之最大功率。輸出最大功率追蹤實際情況如圖 10-圖 13 所示，測量結果符合預期。

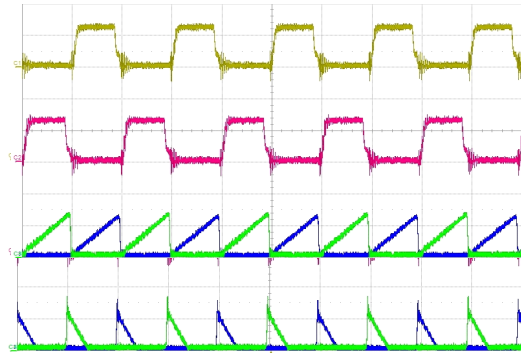


圖 10 光照 500W/m² 時，開關頻率 100kHz，太陽能模組輸出功率 391W，交替式返馳轉換器輸出入波形 (Ver:10V/div for v_{gs1} and v_{gs2} , 10A/div for i_{p1} , i_{p2} , i_{s1} , i_{s2} , Hor:5 μ s/div)

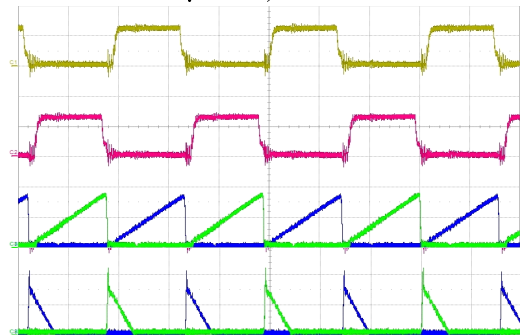


圖 11 光照 500W/m² 時，開關頻率 64kHz，太陽能模組輸出功率 420W(最大功率)，交替式返馳轉換器輸入出波形(Ver:10V/div for v_{gs1} and v_{gs2} , 10A/div for i_{p1} , i_{p2} , i_{s1} , i_{s2} , Hor:5 μ s/div)

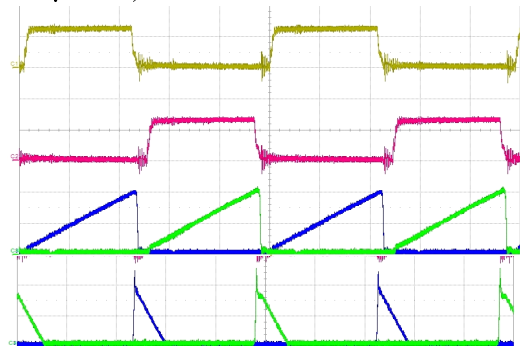


圖 12 光照 500W/m² 時，開關頻率 40kHz，太陽能模組輸出功率 378W，交替式返馳轉換器輸出入波形 (Ver:10V/div for v_{gs1} and v_{gs2} , 10A/div for i_{p1} , i_{p2} , i_{s1} , i_{s2} , Hor:5 μ s/div)



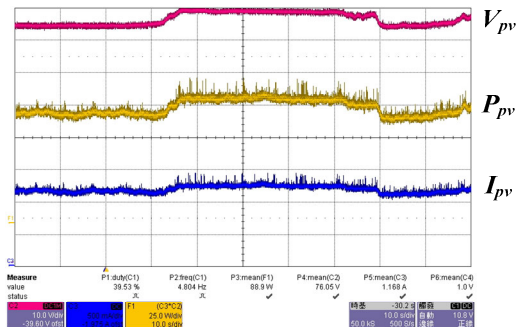


圖 13 光照條件變化快速追蹤情形

5. 結論

本論文所提交替式返馳轉換器之太陽能電池電能轉換系統，以定週期變頻增量電導法則進行最大功率追蹤。為驗證所提，本研究實際研製一部 1kW 太陽能模組最大功率追蹤控制轉換器。實驗結果顯示，系統在多變的環境中，能迅速反應並追蹤獲得太陽能電池模組最大功率，符合預期。

6. 致謝

本文之研究承國科會計畫編號：101-3113-P-033-003 之計畫經費支持，僅此感謝。

參考文獻

1. O. Wasynczuk, "Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power System," *IEEE Trans. Power Apparatus and Syst.*, vol. PAS-102, no.9, pp. 3301-3307, Sep. 1983.
2. Z. Salameh, F. Dagher, and W. A. Lynch, "Step-Down Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System," *Solar Energy* vol. 46, no. 5, pp. 279-282, 1991.
3. M. Bodur and M. Ermis, "Maximum Power Point Tracking for Low Power Photovoltaic Solar Pannels," *IEEE Trans.*

4. K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric," *IEE Proc-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 142, no.1, pp. 59-64. January 1995.
5. P. Midya, P. T. Kerin, R. J. Turnbull, R. Reppa, and J. Kimball, "Dynamic Maximum Power Tracker for Photovoltaic Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 2, pp. 1710-1716, 1996.
6. S. J. Chiang, K. T. Chang, and C. Y. Yen, "Residential Photovoltaic Energy Storage System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no.3, pp. 385-394, 1998.
7. C. Hua and C. Shen, "Study of Maximum Power Point Tracking Techniques and Control of DC/DC Converter for Photovoltaic Power System," in *IEEE PESC*, vol. 1, pp. 86-93, Fukuoka, Japan, 1998.
8. M. Matsui, T. Kitano, D. H. Xu, and Z. Q. Yang, "A New Maximum Photovoltaic Power Point Tracking Control Scheme Based on Power Equilibrium at DC Link," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 1, pp. 804-809, 1999.
9. C. T. Pan, J. Y. Chen, C. P. Chu, and Y. S. Huang, "A Fast Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power Systems," *IEEE IECON'99*, vol. 1, no. 29, pp. 390-393, Nov. 1999.

10. T. Markvart, *Solar Electricity*, 2nd ed., New York: John Wiley, 2000.
11. E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Development of a Microcontroller-Based Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 16, no.1, pp. 46-54, Jan. 2001.
12. Y. C. Kuo and T. J. Liang, "Novel Maximum Power Point Tracking Controller for Photovoltaic Energy Conversion System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 3, pp. 594-601, 2001.
13. Guan-Chyun Hsieh, Hung-Liang Chen, Yaohwa Chen, Chee-Ming Tsai, and Shian-Shing Shyu, "Variable Frequency Controlled Incremental Conductance Derived MPPT Photovoltaic Stand-Along DC Bus System," *IEEE APEC 2008*, pp.1849-1854, 24-28 Feb. 2008.
14. 謝冠群、陳宏良、張家源和高猛祥<適用於太陽能轉換之變頻式增量電導最大功率追蹤控制器>，中華民國第二十九屆電力工程研討會論文集，民國 97 年 12 月 5-6 日。
15. Guan-Chyun Hsieh, and Hung-Liang Chen, "Energy Management for Interleaved PV Stand-Along System with Incremental Conductance MPPT," *TENCON 2009*, 23-26 Nov. 2009.

