

# 具高效率之相位比較式最大功率追蹤技術

## A High Efficiency Phase Comparison MPPT Technology

施宏澤 陳建宇 陳燦煌 莊凱翔  
Horng-Jzer Shih, Chien-Yu Chen, Tsan-Huang Chen, Kai-Cheung Juang

### 中文摘要

鑒於再生能源及可攜式裝置電源管理日益普及，功率轉換器及最大功率追蹤之應用亦日形重要。本文提出一新型最大功率追蹤技術，創新採用相位比較方式，只需針對功率轉換器之輸入電壓量測，擷取其漣波相位資訊以判斷最大功率點，此技術有別於傳統方法，不需使用數位訊號處理器 (DSP)、高階電壓電流感測器及類比數位轉換器 (ADC) 等元件，不僅降低系統成本，同時能有效提升追蹤範圍及精度，並且因擾動機制優化，追蹤性能亦同時提升。

### Abstract

In view of the increasing popularity of renewable energy and power management of the portable devices, power converters and the maximum power point tracking applications have become increasingly important. This paper presents a novel method for maximum power point tracking with innovative use of the phase comparison method, it only simply measure the input ripple voltage of the power converter and check their phase information to determine the maximum power point. This approach is different from traditional methods, without using digital signal processor (DSP), high-end voltage and current sensors and analog-to-digital converter (ADC). It can not only reduce system cost, but also improve tracking range and accuracy effectively. Due to the better disturbance mechanism, the tracking performance is also improved simultaneously.

### 關鍵詞(Key Words)

光伏(Photovoltaic ; PV)

微型變流器(Micro inverter)

相位比較(Phase comparison)

最大功率追蹤(Maximum Power Point Tracking ; MPPT)

### 1 · 前言

現今全球正面臨環保議題與節能減碳之需求，加以未來原油及其它傳統能源將逐漸短缺，使得再生能源之發展益顯其重要性與迫切

性[1][3]，進而利用功率轉換系統來善用低污染能源以提供家電、行動裝置或並網回饋電廠使用已成當前之趨勢。而今社會資訊蓬勃發展，物聯網 (IoT) 裝置及網絡建構亦為人類之共同願景，期藉由異質裝置間各自之資訊感測擷取

及通訊聯結，完成資源分散、資訊集中之系統以達到資料管理、分析及共享目的。為實現上述需求，則需有穩定、易取且高效率的電能供應管理技術。本文主要介紹一種新創的最大功率追蹤技術，輔以我們設計完成的功率轉換系統來驗證其效能，並與傳統方法之優劣作比較。

## 2 · 最大功率追蹤系統架構

### 2.1 傳統使用之系統架構

現今再生能源發電系統如太陽能發電系統使用太陽能板串並聯組成光伏陣列(Photo Voltaic Array)如圖1。而在太陽能板處於日照遮蔽或太陽能板電壓電流輸出不匹配等情況時，會造成光伏陣列輸出功率的衰減。因此在光伏控制系統中需加入最大功率點追蹤(MPPT)控制器，以實現光伏最大功率輸出。[4]

一般MPPT控制器大多採用DSP演算法、PWM電路以及DC/DC、DC/AC電路實現[3]，這些演算法包括擾動觀察法(Perturbation & Observation Method, P&O)[2][4][5] (圖2、圖3)、電導增量法(Incremental Conductance Method, INC)[2][5] (圖4、圖5)等，這些方法需精確地感測系統的輸入電壓和電流，再利用繁複的演算法計算比較，透過改變PWM電路占空比，以調節太陽能板的輸出功率，完成最大功率追蹤，然而傳統方法存在許多問題論述於後。

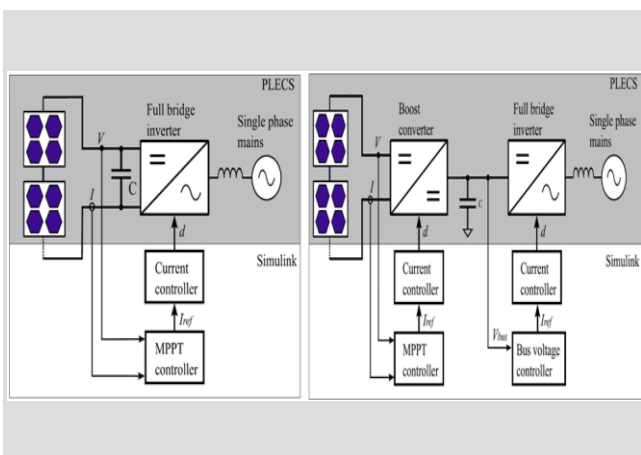


圖1 一級、二級太陽能系統架構 [1]

### 2.2 傳統習知之最大功率追蹤法

以下以擾動觀察法(P&O)及增量電導法(INC)為例說明傳統方法所遭遇的問題。

#### 2.2.1 擾動觀察法(P&O) (圖2)

如(圖2)所示，P&O方法需要不斷地偵測前後時間(k, k-1)之太陽能輸入電壓及電流，以計算其功率，並對前後電壓及功率作比較，其比較公式如下：

$$V1 < V_{mpp}, P(k) > P(k-1), \text{ increase } V; \\ V2 > V_{mpp}, P(k) < P(k-1), \text{ decrease } V$$

由比較結果對再生能源輸入電壓作擾動，重複此方式，以進行最大功率追蹤；由於重複

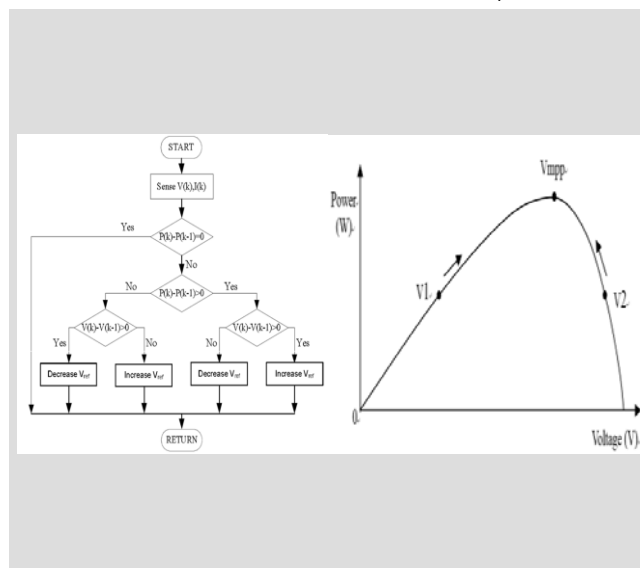


圖2 擾動觀察法流程圖及不同功率點電壓方向 [4][5]

不斷進行的擾動、觀察結果，此方法在最大功率點處會有明顯功率擺動現象，當追蹤速度較快時擾動量大，擺動現象亦較明顯。另外於低功率時因感測元件之靈敏度、解析度及漂移(offset)等限制，造成追蹤精度降低，同時軟體運算反應之延遲，亦將於再生能源環境驟變時造成追蹤方向誤判等問題。[2][4]

#### 2.2.2 增量電導法(INC)(圖4、圖5)

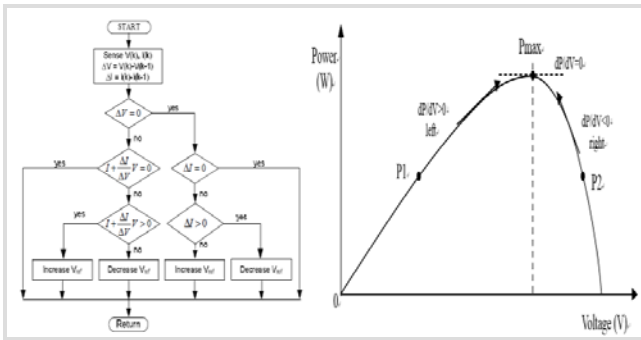


圖3 增量電導法流程圖及不同功率點之 $dP/dV$ 值 [2][3][4]

如(圖3)所示·INC方法亦需不斷地偵測前後時間( $k, k-1$ )之系統輸入電壓及電流·以計算 $dP/dV$ 或 $\Delta I/\Delta V$ 值·並據以作比較來針對再生能源之電壓進行擾動·其比較公式如下[2]:

$$V1 < V_{mpp}, dP/dV > 0, \text{ increase } V$$

$$V2 > V_{mpp}, dP/dV < 0, \text{ decrease } V$$

$$\text{Since } dP/dV = d(IV)/dV$$

$$= I + V(dI/dV) \approx I + V(\Delta I/\Delta V)$$

$$\Delta I/\Delta V = -I/V, \text{ at MPP}$$

$$\Delta I/\Delta V > -I/V, \text{ left of MPP}$$

$$\Delta I/\Delta V < -I/V, \text{ right of MPP}$$

由比較結果·來控制能源輸出電壓之增減·重複此方式·直到 $dP/dV=0$ 停止擾動·即完成最大功率追蹤。此方法改良P&O方法在最大功率點之功率擺動現象·然而因硬軟體架構所限·亦有P&O方法之其它問題。[4][6]

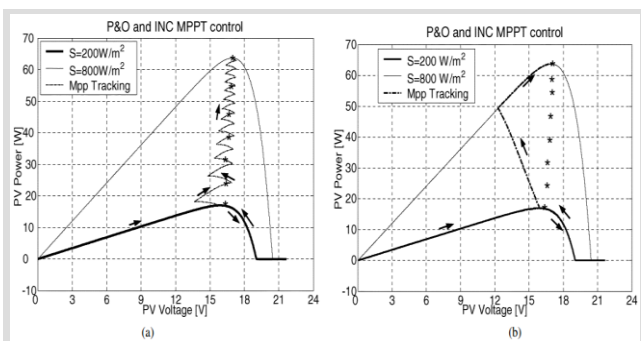


圖4 P&O及INC方法之追蹤路徑:  
(左)日照緩慢改變 ; (右)日照快速改變。 [8]

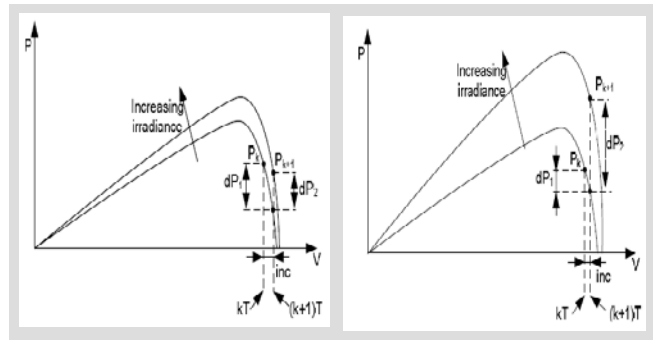


圖5 P&O及INC方法於不同日照變化之追蹤:  
(左)日照緩慢變化 ; (右)日照快速變化。 [4][7]

如圖4(左)、圖5(左)所示·以太陽能系統為例·當日照變化緩慢時·P&O及INC方法可以正確判斷追蹤方向·但日照變化快速時如圖4(右)·逆向變化量大於單次擾動量時·系統無法快速反應·因軟體計算時間延遲而造成追蹤方向誤判·如圖5(右)。

## 2.3 傳統最大功率追蹤技術之缺點 [2][4][5][6][7][8]

分析上述追蹤方法·其具有以下缺點:

- ◇ 成本較高: 需用較高階元件如超級電容、高靈敏度之 $V/I$  sensor、高解析度之ADC、昂貴的DSP及軟體開發維護成本。
- ◇ 精度變化: 低功率輸出時·受限訊號動態範圍·造成較低的追蹤精確度。
- ◇ 穩定問題: 因再生能源不穩定性·於能量劇烈變化下追蹤速度及可靠度降低。
- ◇ 擺動現象: 因擾動判斷機制所限·在最大功率點處有明顯功率擺動之現象。

為改善上述問題·本論文提出一種相位比較式最大功率追蹤技術·並依此方法完成相關設計·實現及量測。

## 3 · 新提出之最大功率追蹤架構

### 3.1 相位比較式最大功率追蹤系統架構

圖6 為我們規劃的一種微型逆變器 (Micro inverter) 系統架構·用來實現最大功率追蹤技術。它包含了返馳式轉換器 (Fly-back DC-DC) 和極性變換器 (DC-AC) 部分·控制電路部份有功率元件控制器 (Power

electronics controller)、電網同步控制器(Grid sync. Controller + MPD)、取樣比較電路(Sample and hold circuit)、比較器(Comparator)、計數器(Counter)及一個低階的數位類比轉換器(DAC)。功率元件控制器中也包含了一個類比訊號處理器(ASP)和可調增益控制器(AGC)等。

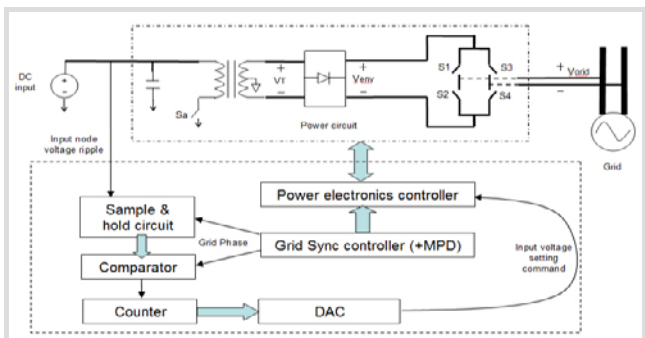


圖6 相位比較式最大功率追蹤系統架構(DC-AC)

在此系統中，由電網同步訊號(Grid Sync.)所施於系統輸入端之擾動作用，將會在輸入端產生漣波訊號，利用此漣波訊號之波形變化來作為最大功率之偵測源。

### 3.2 相位比較式最大功率追蹤方法

如圖7~9為本方法之輸入電壓漣波訊號相位示意圖。本方法針對系統輸入電壓之漣波作量測來完成最大功率點追蹤，免除高階電流感測及ADC元件。此漣波訊號(Vin-ripple)中具有時間資訊(Time information)，包括漣波相位(圖7、圖8)及漣波斜率變化(圖9)；在最大功率點(MPP)追蹤過程中，利用漣波相位變化來判斷功率點所處之位置，如圖8所示，P<sub>1</sub>點之相位與P<sub>2</sub>點之相位變化不同；再者利用漣波之上升波與下降波斜率之不同變化，提供是否為最大功率點臨界位置之資訊。

為免除使用DSP元件及複雜軟體演算，本方法採用取樣點設定及比較的方式，來完成各功率點漣波相位及斜率變化之判斷。實現設計時只需適當地調整取樣點，進行取樣電壓大小比較，即可完成最大功率追蹤。

如圖9所示，P<sub>1</sub>、P<sub>mpp</sub>、P<sub>2</sub>各代表三個不同的功率點，P<sub>mpp</sub>為最大功率點，P<sub>1</sub>點在P<sub>mpp</sub>右側，P<sub>2</sub>點在P<sub>mpp</sub>左側。觀察此三點的位置及其漣波特性，可以透過適當取樣來比較，以分辨其功率狀態；取樣點的設定依電網同步參考訊號(ACref)之峰點(peak)及谷點(valley)再加入一個適當的MPD值(MPPT Phase Delay)來設定，再依以下公式進行比較，即可明確判斷出不同功率點。

$$V_{ts1} < V_{ts2} \text{ COMPOb} = 0, @V_1, P_1$$

$$V_{ts1} > V_{ts2} \text{ COMPOb} = 1, @V_2, P_2$$

$$AS \quad V_{ts1} < = V_{ts2} \text{ COMPOb} = 0, @V_{mpp}, P_{mpp}$$

COMPOb為比較器(Comparator)之輸出

在最大功率臨界點(MPP threshold)時，其比較結果(COMPOb)會發生反轉，以此判定為最大功率點。這方法就只需針對系統之輸入電壓量測，對其漣波訊號之上升波及下降波設定取樣點，即能判讀其相位移及斜率變化等時間資訊，實現最大功率追蹤。

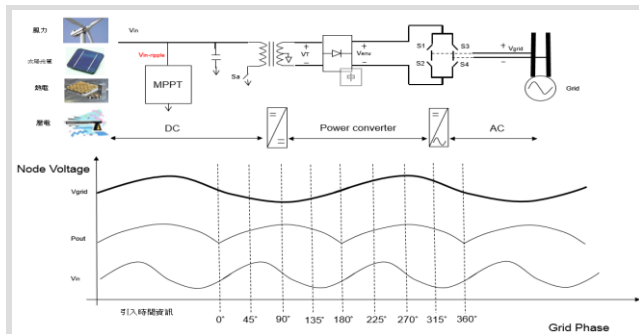


圖7 功率轉換系統及漣波訊號相位示意圖

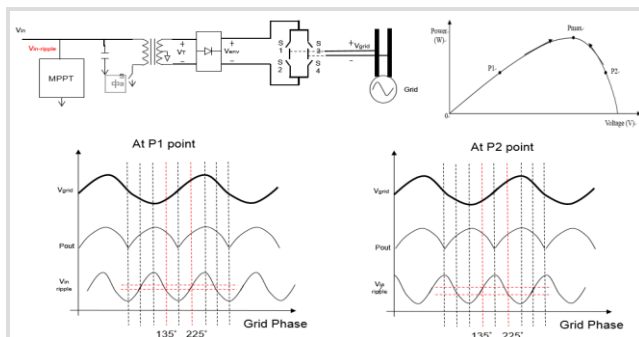


圖8 相對功率點及其漣波訊號相位示意圖

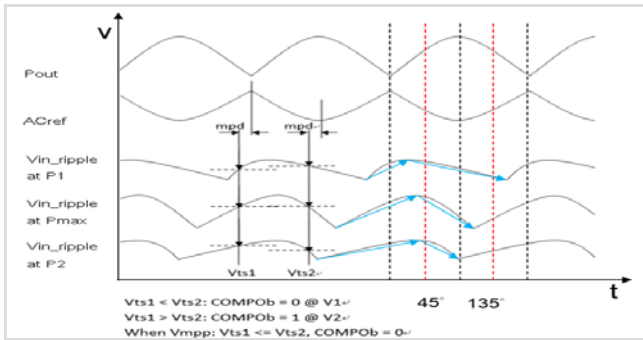


圖9 漣波訊號變化及取樣點設定比較示意圖

### 3.3 MPPT操作方法

以上述原理及公式為基礎建立系統設計流程圖，如圖10所示。詳細的操作方法說明如下：

- (1) 設定ACref (120Hz麥當勞波)之峰點及谷點作為輸入漣波訊號之取樣同步信號，再透過MPD值調整實際取樣點( $T_{SH1}$ 、 $T_{SH2}$ )，取樣點電壓準位分別為 $V_{ts1}$ 、 $V_{ts2}$ ，經由SH\_Comparator比較 $V_{ts1}$ 、 $V_{ts2}$ 大小，輸出結果為COMPOb。

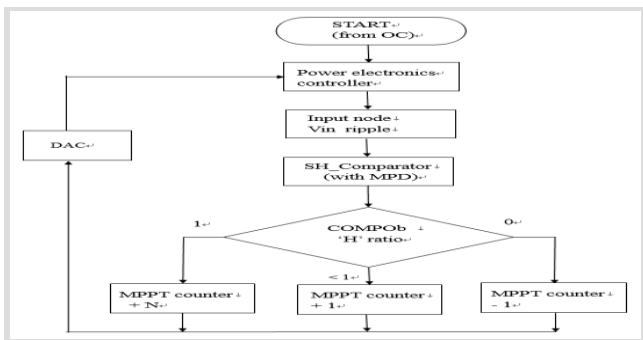


圖10 相位比較式最大功率追蹤系統設計流程圖

- (2) 本方法以太陽能輸入為例，由開路電壓(OC)開始進行追蹤，當 $V_{ts1} < V_{ts2}$ 時，COMPOb之輸出為Low；當 $V_{ts1} > V_{ts2}$ 時，COMPOb之輸出為High；當 $V_{ts2} = V_{ts1}$ 時，COMPOb之輸出保持不變。
- (3) 為避免雜訊影響，設定COMPOb之讀取次數M，取得M次讀取時間週期內COMPOb之'High'佔比('H' ratio)。

if 'H' ratio =  $1 \cdot \text{MPPT Counter} + N$ ,  
 else if 'H' ratio > 0 · MPPT Counter +1;  
 else if 'H' ratio = 0 · MPPT Counter -1;  
 MPPT Counter值經DAC轉換為Vdac輸出。

- (4) 藉由Vdac電壓變化以調整功率元件控制器(Power electronics controller)之自動增益控制(AGC)來改變電流命令(IPCon)信號(圖11)，控制系統輸出功率。當電流命令訊號逐漸變大時，輸出功率也逐漸變大，輸入漣波訊號因受到不同程度的擾動，取樣比較結果COMPOb的輸出狀態會依'H→HL→LH→L'(註1)轉變，當COMPOb的狀態轉變由'LH'進入'L'時，即是MPP臨界點。反之，若電流命令訊號逐漸變小時，輸出功率亦逐漸變小，COMPOb的狀態轉變程序將相反。

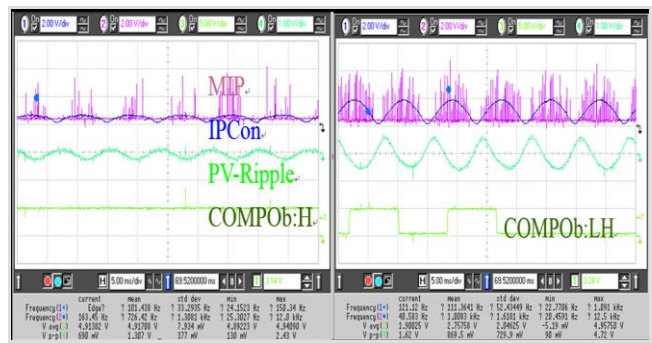


圖11 改變電流命令(IPCon)以調節系統輸出功率；左側：功率25W；右側：功率69W。

註1：上述'H'狀態指COMPOb波形 always High；'HL'狀態指波形上多數為High；'LH'狀態指波形上多數為Low；'L'狀態即波形 always Low之意。

### 3.4 設計與實現

依據圖6系統架構、運用圖10的設計流程做細部的IC電路設計，如圖16所示。其類比電路的部分包含比較器、8位元數位類比轉換器(DAC)、積分器(PB-AMP)、自動增益控制(AGC)

及類比訊號處理器(ASP)等。IC外接電路包含返馳式轉換器(DC-DC)和極性變換器(DC-AC)部分。前述功率元件控制器則是包含此AGC、ASP電路，其輸出為電流命令(IPCon)，用以調節功率轉換器之輸出功率。

圖13、圖14 為其數位電路設計，它包含電網同步訊號(Grid Sync., ACref + MPD)，用來產生谷點LO\_SAMP及峰點HI\_SAMP COMP訊號給類比電路去做類比電路取樣及拴鎖(latch)，隨後再發出一個trigger訊號(COMP)告訴比較器將取樣的PVin-ripple電壓值做比較，比較結果為COMPOb。數位MPPT Counter則接收COMPOb訊號，透過計數處理來決定DAC輸入值，再由Vdac驅動功率元件控制器。

實際系統中，考慮電路延遲因素，設計上增加一個相位延遲(MPPT Phase Delay, MPD)來修正取樣點，MPD可由外部做數值(0~255)控制，並依實際電路延遲時間來修正取樣點。圖14中紅色框的部分即是MPD控制。

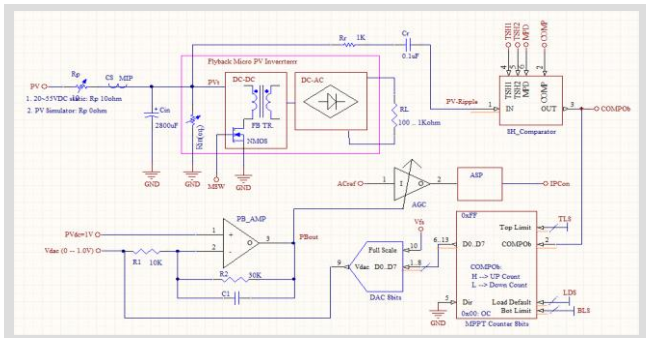


圖12 相位比較式最大功率追蹤電路設計

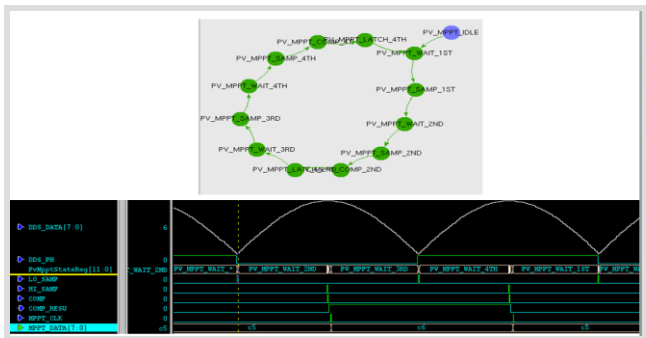


圖13 State Machine for MPPT

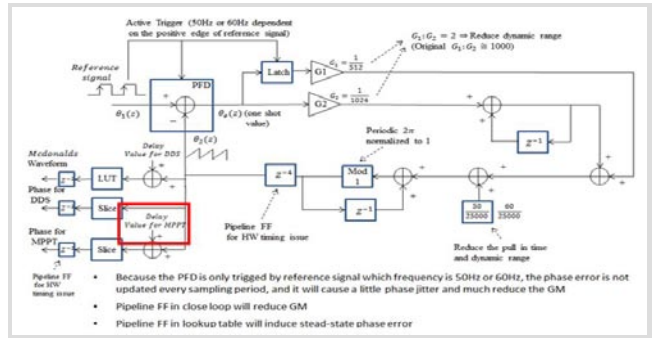


圖14 相位比較式最大功率追蹤數位電路設計

## 4 · 實現結果與量測

本論文實現以太陽能最大功率追蹤為例，在實驗室中以 PV Simulator (Kernel PVS01203)來模擬太陽能板輸入，設定最佳功率為70W。如圖15 所示功率由OC點開始追蹤，經歷ABCDEFGHIJK各功率點，比較器輸出COMPOb訊號及其'H' ratio值的變化可以反應功率追蹤情形。

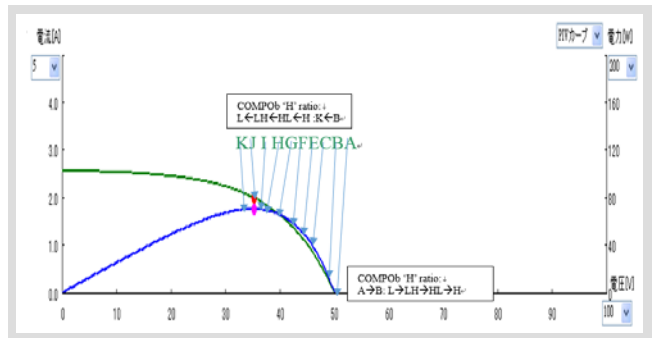


圖15 功率、電壓、電流曲線及追蹤中的各功率點

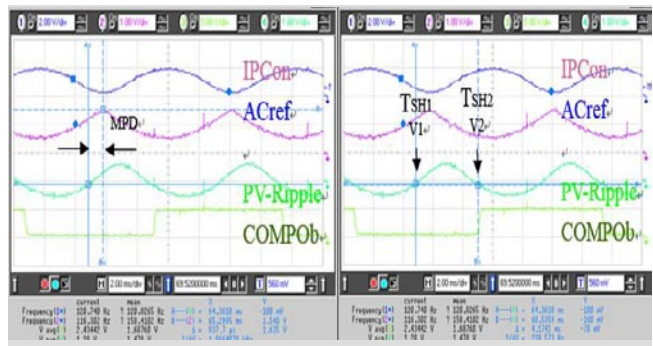


圖16 取樣點設定MPD修正；T<sub>SH1</sub>與T<sub>SH2</sub>間隔為120HZ AC波形之半週期時間

圖16 說明取樣點 $T_{SH1}$ 與 $T_{SH2}$ 設定於ACref波形之峰點及谷點加入MPD;本例中 $MPD = -937.7\mu S$ (為ACref之峰點與 $T_{SH1}$ 之時間差)· $T_{SH1}$ 與 $T_{SH2}$ 間隔為120Hz麥當勞波之半週期時間:

$$T_{SH2} - T_{SH1} = 4.17mS \quad [=(1/120Hz)/2]$$

if  $V1 < V2$  COMPOb = 'L'; else COMPOb = 'H'

圖17,18 用來代表此系統之訊號量測情況,對應圖20中之GHIJ各功率點,當追蹤至功率60W~69W(GHI功率點)時,其取樣點比較為 $V1 > V2$ ,使得COMPOb為High,而在J功率點時,其取樣比較結果發生反轉現象,因 $V1 < V2$ 使得COMPOb反轉為Low,此時亦為最大功率點70W。

圖 19,20 代表本系統於高功率 100W (100%滿載功率)及低功率 21W (約20%滿載功率)時之最大功率追蹤結果。功率強度乃依循日照強弱係數 $KW/M^2$ 來實現。由實測結果顯示在100W大功率追蹤時精確度達99.6%以上,而在低功率21W仍高達96.7%,遠優於傳統追蹤方法的表現。此方法經驗證皆可應用於不同PV模組、日照溫度及不同的線性、非線性負載。

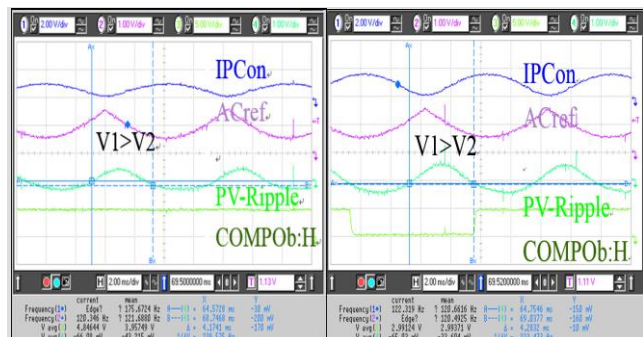


圖17 功率60W(左)、68W(右)之漣波相位取樣比較

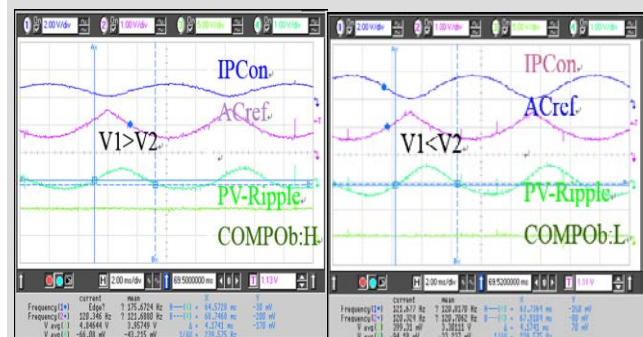


圖18 功率69W(左)、70W(右)之漣波相位取樣比較

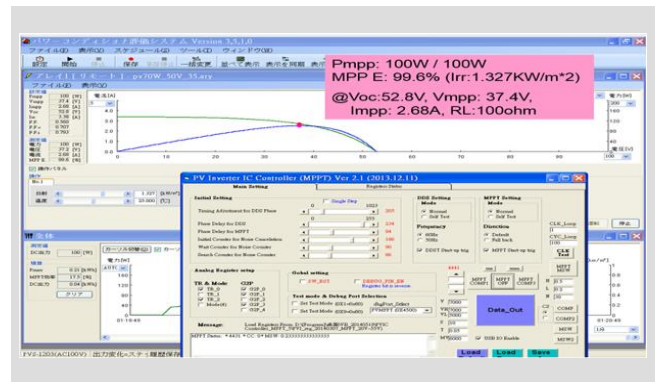


圖19 MPPT實測:精確度99.6%@滿功率100W

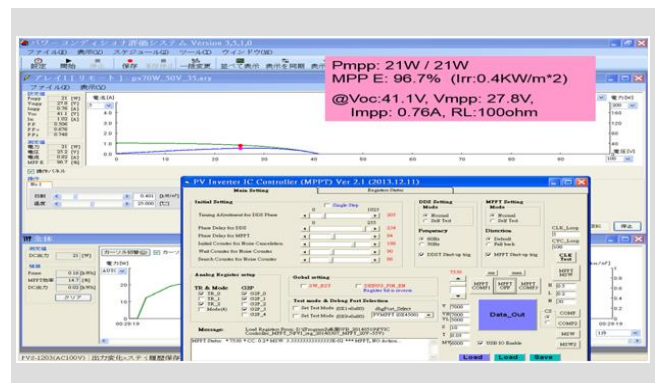


圖20 MPPT實測:精確度96.7%@輕功率21W

圖21 為本文提出之最大功率追蹤方法之技術分類及其改良之項目。依現存MPPT技術約可歸類為:A.直接測量調控及B.間接訊息調控,其優劣如圖所示。本文採用之方法即屬直接測量調控技術,同時亦針對A1.精度提升;A2.追蹤範圍提升;A3.降低成本;A4.擾動機制建立等部份得到了實現。



圖21 MPPT技術改良項目

綜述本方法其優點及改良項目如下：

1. 成本降低：習知方法皆針對傳統方法(P&O, INC等)作改良，但大多仍需使用高階電壓電流 sensor、高階ADC及昂貴的DSP等元件，本方法則完全不需要這些元件，因而能降低系統成本，並減少軟體開發費用。
2. 精度提升：傳統習知方法需針對電壓、電流作感測轉換計算，不僅演算法較複雜且有軟體計算響應延遲問題；本方法僅使用單一物理量Vin-ripple作量測，方法簡潔即時，高功率時追蹤精度可達99.6%以上。
3. 追蹤範圍提升：傳統習知方法因感測器及類比數位轉換器之動態範圍所限，在低功率時追蹤精度小於80%，雖有業界致力於此項改良，能達到90%，然而本方法免除元件訊號動態範圍限制，低功率時追蹤精度達到96.7%以上，因而可以提升追蹤範圍。
4. 穩定性較佳：傳統方法（如P&O、INC）等於再生能源環境變化大時（如日照驟變），其能源能量變化亦大，會造成追蹤方向錯誤之情形，應用本方法則能維持正確追蹤方向。
5. 良好的擾動機制：相較於傳統方法（如P&O之功率比較及擾動方式）較難兼顧追蹤速度及最大功率點功率擺動現象，本方法直接以同步訊號作為擾動源，加以利用漣波特性進行功率追蹤，除了能減少超級電容之使用外，由圖10系統設計流程圖及實測結果顯示本方法離MPP點較遠時可作快速追蹤，於MPP點時可收斂擺動。

## 5 · 結論

本文探討了一種新型的最大功率追蹤技術，並完成其系統設計及實現其效能，對於降低系統成本、追蹤精度範圍及穩度定等皆有顯著成效。因而此方法提供再生能源及功率轉換系統衍生之各種不同應用環境能有新的選擇及優化，並在整體系統設計上能進行完整考量。

## 參考文獻

- [1] R. ATTANASIO\*, M. CACCIATO, F. GENNARO\*, G. SCARCELLA “Review on Single-phase PV Inverters for Grid-connected Applications” (EEESD'08) Algarve, Portugal, June 11-13, 2008
- [2] Trishan Efram, and Patrick L. Chapman “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques” IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 22, NO. 2, JUNE 2007
- [3] Md. Ismail Hossain, Shakil Ahamed Khan, Md. Shafiullah, Mohammad Jakir Hossain “Design and Implementation of MPPT Controlled Grid Connected Photovoltaic System” 2011 IEEE Symposium on Computers & Informatics
- [4] Dezso Sera\*, Tamas Kerekes\*, Remus Teodorescu\* and Frede Blaabjerg\*, “Improved MPPT algorithms for rapidly changing environmental conditions”
- [5] Hohm D.P., Ropp M.E.: “Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms Using an Experimental, Programmable, Maximum Power Point Tracking Test Bed”. IEEE 15-22 Sept. 2000 Pages:1699 – 1702
- [6] Femia N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M.: “Optimizing sampling rate of P&O MPPT technique” *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004* IEEE 35th Annual Volume 3, 20-25 June 2004 Pages: 1945 - 1949 Vol.3
- [7] Hussein K.H., Muta I., Hoshino T., Osakada, M.: “Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions”. *eneration, Transmission and Distribution, IEE roceedings*-Volume 142 Issue 1, Jan. 1995 Pages: 59 – 64
- [8] Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, and Massimo Vitelli “Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method” IEEE RANSCTIONS ON



## 作者簡介

### 施宏澤



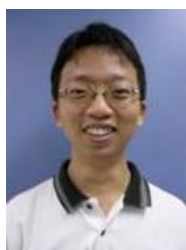
中央大學資訊工程所碩士  
現任工研院資通所綠能電子設計與應用部工程師  
專長為軟體工程程式設計、射頻與基頻通訊系統整合設計、混合式信號及電源應用模組設計。  
[E-mail: hjs@itri.org.tw](mailto:hjs@itri.org.tw)

### 陳建宇



交大電控所碩士  
現任工研院資通所綠能電子設計與應用部工程師  
專長為線性穩壓器設計、電流偵測、無線通訊訊號處理  
[E-mail: itri960290@itri.org.tw](mailto:itri960290@itri.org.tw)

### 陳燦煌



雲林科技大學電機工程碩士  
現任工研院資通所綠能電子設計與應用部工程師  
專長為數位信號處理、無線通訊  
[E-mail: th\\_chen@itri.org.tw](mailto:th_chen@itri.org.tw)

### 莊凱翔



交大電信所碩士  
現任工研院資通所綠能電子設計與應用部經理  
專長為類比積體電路設計  
[E-mail: KC\\_Juang@itri.org.tw](mailto:KC_Juang@itri.org.tw)