

結合多項式預測與模糊控制之小功率太陽能模組之最大功率點追蹤

Simulation of Fuzzy Control and Polynomial Prediction (FPP) Based MPPT for Small-Scaled PV System

廖梨君 博士
朝陽科技大學
lcliao@cyut.edu.tw

曾立尹
朝陽科技大學
s9927628@cyut.edu.tw

摘要

本篇論文提出針對太陽能模組之最大功率追蹤演算法，根據 6 個取樣點分為兩條二元一次方程式曲線，並利用這兩條多項式曲線來估測下一點功率值，將預測之功率值做為根據並結合模糊系統邏輯來控制轉換器開關，進而達到最大功率追蹤之效果。由使用 MATLAB/Simulink 環境之模擬結果可知，本論文提出之 FPP(Fuzzy Control and Polynomial Prediction) 最大功率追蹤演算法可使太陽能模組於光照度或是溫度等外在環境因素變化下，仍然可以讓太陽能模組保持最大功率輸出。

關鍵詞：最大功率點追蹤、直流升壓轉換器、太陽能模組、模糊演算法、多項式預測法

Abstract

In this paper, we proposed a Fuzzy control and Polynomial Prediction (FPP) based MPPT algorithm for small-scaled PV system. The MPPT control demand was determined by the fuzzy controller and prediction polynomials. We used 6 sampling points to map two polynomials and predict the possible operating point in the next. According to the predictive power value, maximum output power of the PV module can be tracked more quickly. As compare with fuzzy controller and P&O method, using the proposed FPP method, the maximum power output of PV module can be obtained faster and more stably even though the solar irradiation or temperature are changed.

Keyword : MPPT, DC-DC boost converter, PV module, Fuzzy algorithm、polynomial prediction

1. 前言

近年來，由於石油產量不斷減少，價格也不斷攀升，因此許多學者正不斷尋找可以替代的再生能源，而太陽能便是其中之一。太陽能具有無污染、

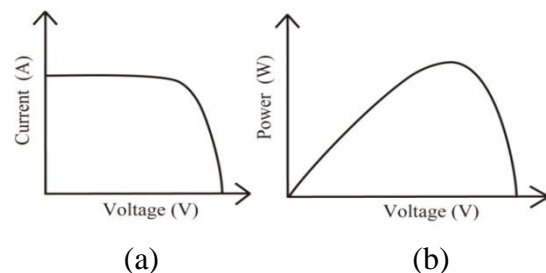


圖 1 太陽能模組特性曲線(a)電流-電壓特性曲線(b)功率-電壓特性曲線

而且在世界各地，只要有太陽便可以使用。然而太陽能模組具有非線性的特徵曲線(圖 1)。當光照度及溫度改變時，太陽能模組就可能無法操作至最大輸出功率，因此大部分的使用者會在太陽能模組及負載之間連接一直流轉換器，經由控制器控制轉換器的開關之工作週期使之與太陽能模組之阻抗匹配，使得太陽能模組能夠以最大功率輸出。而最大功率點追蹤技術最大功率點追蹤(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制技術已經廣泛應用在太陽能發電系統以及風力發電系統上面。

其中最大功率點控制技術中包含有爬山法(Hill Climbing)[1-3]、擾動觀察法(Perturbation and Observation)[4-8]，雖然這兩種方法架構簡單、容易執行，但在穩態時會因為擾動而持續的震盪。增量電導法(Incremental and Conductance) [9-12]在邏輯判斷式及量測參數的取捨，使得在效率上比前兩種方法好，但需要較精準的檢測器以及複雜的架構，成本自然就高，這三種方法目前都被廣泛的使用。另外還有一些人工智慧的演算法，包括模糊控制法(Fuzzy)[13-15]以及類神經網路演算法(Neural Network)[16-17]也相繼被提出。

本篇論文提出模糊演算法(Fuzzy algorithm)結合多項式預測系統來追蹤太陽能模組的最大功率點，我們使用模糊演算法控制太陽能模組，再根據實際的電壓功率取樣點，建構出兩條曲線，並以二階多項式來預測下一步功率點並預先輸出適當之控制命令，藉此估測下一步的狀況去做調整，這樣的結果會使得在光照度或是溫度變化時，可以更迅速的讓太陽能模組達到最大功率點。

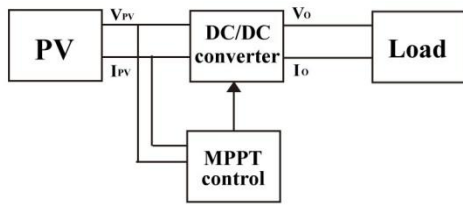


圖 2 太陽能系統架構

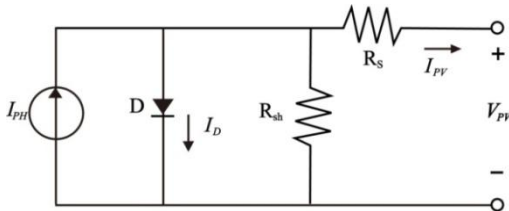


圖 3 太陽能模組等效電路圖

本論文的内容架構如下:在第二節,我們將介紹整個太陽能系統包括太陽能模組及直流升壓轉換器。在第三節,將會介紹我們所提出的模糊演算法及多項式預測法(Fuzzy Polynomial Prediction, FPP)。最後,提出模擬結果以證明本論文所提之FPP的最大功率點追蹤效果,並做簡單的結論。

2. 系統架構

本篇論文所使用的太陽能系統架構可由圖2所示,其包含太陽能模組、直流升壓轉換器、最大功率追蹤控制器以及負載。從圖2可知,最大功率追蹤控制器擷取太陽能模組的輸出電流及電壓數值,並計算出最佳之開關工作週期,藉此調整負載阻抗與太陽能模組阻抗相匹配,讓太陽能模組保持最大輸出。接下來將簡單介紹太陽能板以及直流升壓轉換器的特性。

2.1 太陽能模組

太陽能模組是由許多串並聯的太陽能電池組成,模組是依據光伏效應來產生電流,其太陽能模組等效電路圖可如圖3所示,而太陽能板輸出電流如公式(1)所示。

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{kT_c A}\right) - 1 \right] - \frac{(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

I_{ph} 為光電流, I_s 為飽和電流,就是所謂的暗電流, q 為一個電子電荷量(約為 1.6×10^{-19} C), k 為波茲曼(Boltzmann)常數(約為 1.38×10^{-23} J/°K), T_c 為太陽能電池的絕對溫度(單位為 °K), A 為一個理想因數(通常為 1~2), R_s 為太陽能模組內部的等效串聯電阻, R_{sh} 為太陽能模組內部的等效並聯電阻。光電流可以成公式(2)表示之:

$$I_{ph} = [I_{SC} + K_I(T_c - T_{ref})]\lambda \quad (2)$$

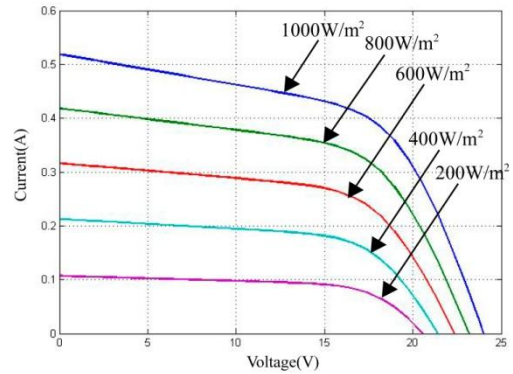


圖 4 太陽能模組不同光照度之電流-電壓特性曲線

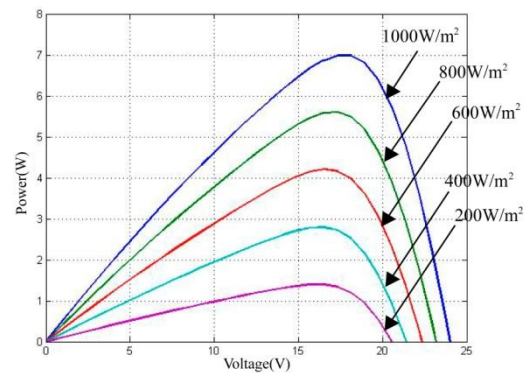


圖 5 太陽能模組不同光照度之功率-電壓特性曲線

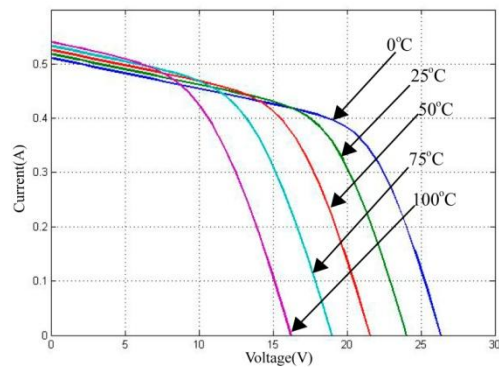


圖 6 太陽能模組不同溫度之電流-電壓特性曲線

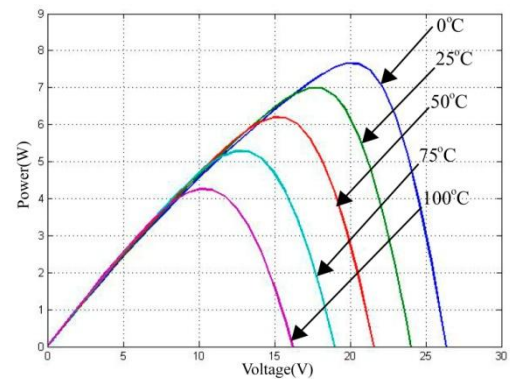


圖 7 太陽能模組不同溫度之功率-電壓特性曲線

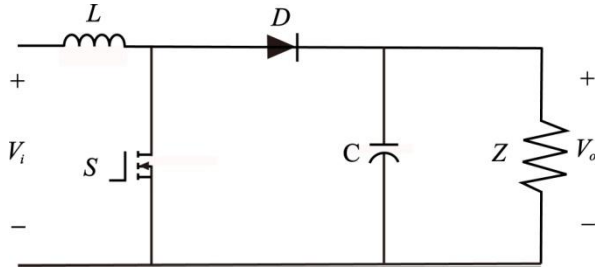


圖 8 直流-直流升壓轉換器電路圖

太陽能模組的短路電流 I_{sc} (規格設定溫度為 25°C , 光照度為 $1000\text{W}/\text{m}^2$), K_I 為短路電流的溫度係數, T_{ref} 為參考溫度(為 25°C), λ 為光照度(單位為 kW/m^2)。暗電流可以表示成公式(3)

$$I_S = I_{RS} \left(\frac{T_C}{T_{ref}} \right)^3 \exp\left(\frac{qE_G \left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_{ref}} \right)}{kA} \right) \quad (3)$$

其中 I_{RS} 為逆向飽和電流, E_G 為半導體內的帶隙能量。

本論文參考[18]所提之公式去模擬一個約 7W 的小功率太陽能板模組, 在不同光照度及溫度條件下, 此太陽能模組之電流-電壓特性曲線與功率-電壓特性曲線可如圖 4-7 所示。

2.2 直流升壓轉換器

本論文使用直流升壓轉換器[19], 由電感、電容、二極體及電晶體所組成, 電路圖如圖 8 所示。本論文只探討直流升壓轉換器於連續導通模式狀態下。

升壓轉換器在連續導通模式下的狀態, 其公式(4)-(6)所示, D 為升壓轉換器開關 S 之工作週期, V_o 和 V_i 分別是輸出端電壓及輸入端電壓, I_o 和 I_i 為輸出端電流及輸入端電流。

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (4)$$

$$\frac{I_o}{I_i} = 1-D \quad (5)$$

3. FPP 最大功率點追蹤控制策略

根據太陽能模組的電流-電壓及功率-電壓特性曲線, 我們知道太陽能板在不同的光照度及溫度條件下, 其最大功率點皆不相同, 因此最大功率點追蹤控制的重點在於如何在不同光照度及溫度條件下, 使太陽能模組仍然可以操作在輸出最大功率。

流程架構如圖 9 所示, 一開始我們先對電壓及電流做取樣, 之後分為兩部分運算。(1)經由電壓 $v(k)$ 及電流 $i(k)$ 的取樣值, 並根據我們定義之模糊邏輯, 由模糊控制計算出工作週期的改變量 Δd_f 。

(2)由多項式預測藉由電壓 $v(k)$ 及電流 $i(k)$ 之取樣值, 取樣值由電壓為 X 軸、功率為 Y 軸平面上呈現, 6 個取樣點依序為 $v(k-5) \dots v(k)$, 將這 6 點取樣分為兩條二元一次方程式曲線, 第一條為取樣點 $v(k-5)$ 、 $v(k-3)$ 及 $v(k-1)$ 組成, 第二條為 $v(k-4)$ 、 $v(k-2)$ 及 $v(k)$ 組成, 之後利用這兩條曲線來計算出預測電壓值 (v_{pre}) 並計算出預測出功率值 (p_{pre}), 如果這個預測的功率值 P_{pre} 合理(不趨近於零或無限大), 那麼就藉由預測與實測的功率差及電壓差來知道我們應該是增加或是減少估測工作週期比 Δd_p 。最後以 Δd_f 占 70%, Δd_p 占 30% 來當作總預測變化量。

3.1 模糊控制器設計算法

模糊演算法具有簡化設計系統的複雜性, 適用於非線性以及模型不完全的系統, 但設計者必須了解輸入輸出隸屬函數及模糊規則, 經驗不足可能會導致系統的不穩。

我們設計的模糊控制有兩個輸入變數, 分別是功率的變化 (Δp) 及功率變化除以電壓的變化 ($\Delta p/\Delta v$), 如公式(6-7)所示。而輸出變數為一個, 為工作週期的變化 (Δd_f)。

$$\Delta p = p(k) - p(k-1) \quad (6)$$

$$\frac{\Delta p}{\Delta v} = \frac{p(k) - p(k-1)}{v(k) - v(k-1)} \quad (7)$$

這裡模糊規則推論法是使用 Mamdani 法, 如表一所示, NB(Negative Big)代表為大幅減少工作週期值變化, 而 NS(Negative Small)、ZE(Zero)、PS(Positive Small)、PB(Positive Big)則以此類推其工作週期之變化。最後的解模糊化是使用重心法 (centre-of-gravity method) 來得到輸出的結果, 舉個例子, 假設 Δp 為 NS, $\Delta p/\Delta v$ 為 PS 時, 這時工作週期的變化就應該為 NS(小幅減少工作週期比), 進而達到功率最大值。

表一 模糊規則表

$\Delta p / \Delta v \backslash \Delta p$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PS	PS	PS	PB
NS	PS	PS	PS	PS	PS
ZE	PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS	NS	NS	NS	NS	NS
PB	NB	NS	NS	NS	NB

3.2 多項式預測法

本論文提出的多項式預測法是為了可以更快的讓太陽能模組輸出功率達到最大值, 尤其是在光照度及溫度的變化下, 更需要預先知道工作週期的變化, 因此經過太陽能板的電流及電壓取樣, 我

們依照如圖 10(a)所示的取樣點，圖 10(a)的 1 到 6 號依序為取樣點的時序(k-5)...(k)，因此編號 1 到 6 分別為 $v(k-5)...v(k)$ 及 $p(k-5)...p(k)$ 。之後如圖 10(b)所示，計算出兩條多項式曲線，我們稱做 f_1 以及 f_2 ，其二元一次方程式，公式如(8)-(9)。

$$f_1(v) = a_1v^2 + b_1v + c_1 = p_{7i} \quad (8)$$

$$f_2(v) = a_2v^2 + b_2v + c_2 = p_{7j} \quad (9)$$

為了不讓這兩條二元一次方程式曲線有不合理的地方，因此我們在電壓取樣點上做了限制，如公式(10)-(11)，這個限制是為了不讓取樣點連接成不合理的方程式曲線，因而造成預測的功率點可能會發生錯誤，所以沒有滿足這兩個條件就不做預測。

$$v_5 > v_3 > v_1 \text{ or } v_5 < v_3 < v_1 \quad (10)$$

$$v_6 > v_4 > v_2 \text{ or } v_6 < v_4 < v_2 \quad (11)$$

接下來如圖 10(c)所示，為了要預測下一點可能的功率值，首先我們根據取樣點去定義出 X 軸(電壓)，所以我們經由取樣點之間的間距平均值去估測下一點電壓值，但由於估測間距越大，誤差也越大，因此我們取間距平均值的一半來當作估測電壓值，公式如(12-13)所示。

$$v_{7i} = v_5 + [0.25((v_5 - v_3) + (v_3 - v_1))] \quad (12)$$

$$v_{7j} = v_6 + [0.25((v_6 - v_4) + (v_4 - v_2))] \quad (13)$$

$$v_{pre} = 0.5(v_{7i} + v_{7j}) \quad (14)$$

v_{7i} 為方程式 f_1 所預估的第 7 點電壓值， v_{7j} 為 f_2 方程式的第 7 點電壓，之後我們根據公式 14 所示，來得到我們最後所需要的第 7 點電壓，我們稱作 v_7 。之後將再 v_7 代入 f_1, f_2 兩條方程式計算出其相關功率值， p_{7i} 及 p_{7j} 。接下來如公式 15 所示，我們將會得到最後可能的功率值 p_{pre} 。

$$p_{pre} = 0.5(p_{7i} + p_{7j}) \quad (15)$$

我們依據預測到的功率值(p_{pre})與實際測量到的功率值($p(k)$)去做評估。如圖 9 架構圖所示，我們知道多項式預測法跟模糊控制法是同步進行的。模糊控制法是針對當前時序(k)所進行的控制行為，而多項式預測法是針對下一個時序(k+1)可能的變化趨勢來增加或減少預測工作週期變化值(Δd_p)，下面將對預測功率及測量功率的變化趨勢分為兩種情況。

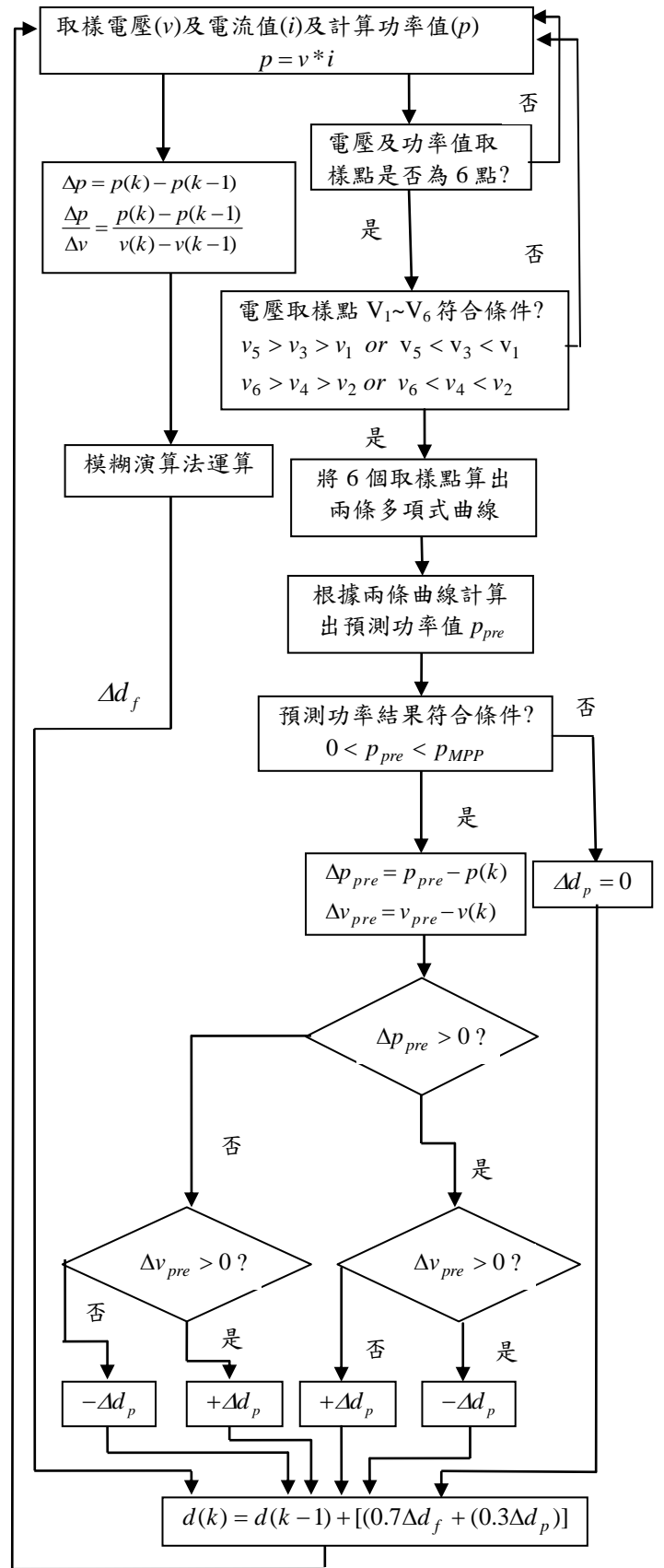


圖 9 太陽能模組最大功率點追蹤流程圖

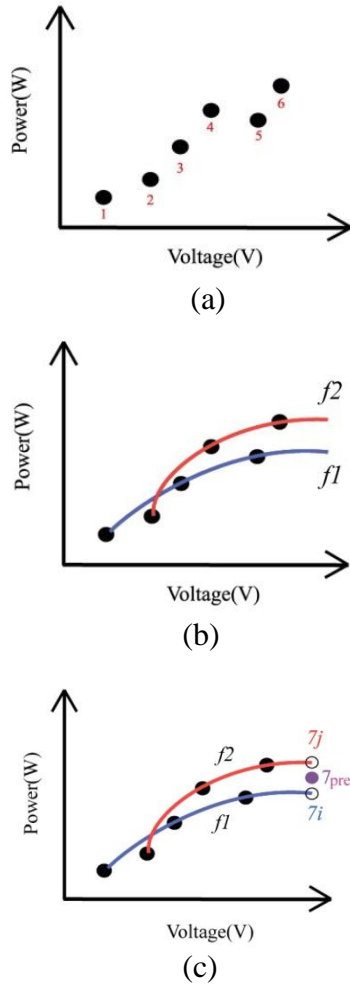


圖 10 多項式預測法的執行順序(a)取樣6點取樣點。(b)根據取樣點計算出兩條多項式(c)根據這兩條計算式去算出預估的功率點。

Case 1: 預測功率大於測量功率 ($p_{pre} > p(k)$)

如果預測的功率值大於測量的功率值，基於功率-電壓曲線，那我們就加速該方向追蹤的速度，讓太陽能模組可以更快達到最大功率值，情況如圖 11(a)，11(b)所示，在圖 11(a)，我們可以看到預測出來的功率大於測出來的功率值，為了要保持同樣的追蹤方向到達功率最大點，因此我們這裡就減少預測工作週期比 ($-\Delta d_p$)，同理，圖 11(b)所示則是增加預測功率比 ($+\Delta d_p$)。

Case 2: 預測功率小於測量功率 ($p_{pre} < p(k)$)

另一種情況為當預測的功率值低於測量值時，那我們追蹤方向就相反追蹤，情況如圖 11(c)，當預測功率值小於測量值時，那我們同樣就減少預測工作週期比 ($-\Delta d_p$)，同理圖 11(d)，則是增加預測工作週期比 ($+\Delta d_p$)。

最後的工作週期變化為結合模糊控制結果之輸出與預測工作週期變化之輸出，如圖 9 最後結果所示。

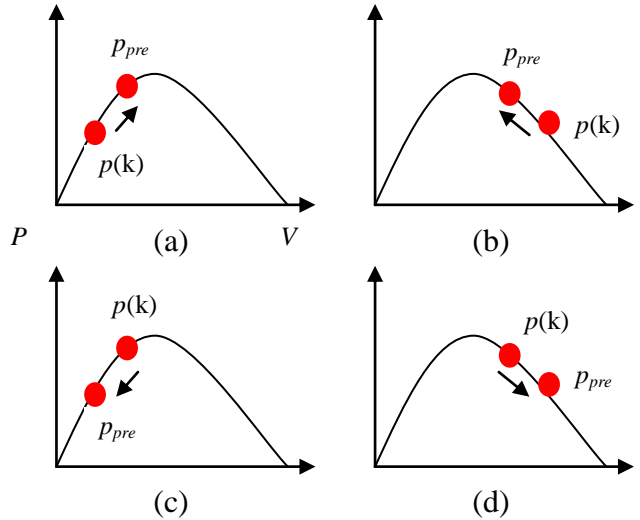


圖 11 實際測量功率值 $p(k)$ 與預測功率值 p_{pre} 的各種可能工作關係圖

4. 模擬結果

本論文使用 MATLAB/SIMULINK 來模擬所提出之 FPP 和 Fuzzy 及 P&O 法三種不同方法之比較，P&O 法則是根據 [4-8] 如公式 16 所示，每當功率變化值 Δp 小於 0， Δd 就會反方向正負變化進而達當最大功率追蹤。取樣時間均為 0.01 秒。所模擬之太陽能板模組規格模組如表二所述。

$$d(k) = d(k-1) \pm \Delta d \tag{16}$$

表二 太陽能模組在溫度 25°C 及光照度 1000W/m² 下的規格特性表

特性名稱	規格
短路電流值 (I_{SC})	0.52A
開路電壓值 (V_{OC})	24V
最大功率電壓值 (V_{MPP})	18V
最大功率電流值 (I_{MPP})	0.38A
最大功率值 (P_{MPP})	7W

Case 1: 光照度變化

於 0.4 秒時，太陽能板的光照度從 1000W/m² 下降為 600W/m²，在 0.7 秒時，太陽能模組的光照度又從 600W/m² 上升到 1000W/m² 時太陽能板輸出功率的變化可如圖 12 所示。

而圖 13 為太陽能模組開始啟動時的輸出功率波形。由模擬結果可知，使用 FPP 方法比 Fuzzy 法更快達到功率最大值，而 P&O 法雖然沒有比較大的震盪，但在追蹤功率最大值的速度上效果明顯比較慢。

圖 14(a) 則為光照度在 0.4 秒從 1000W/m² 下降為 600W/m² 的太陽能模組輸出功率的暫態變化。從圖 14(b) 我們可以看到在光照度下降時，使用 FPP

的方法比較模糊演算法較快達到功率最大值，雖然 P&O 在暫態上比另兩種較好，但由圖 14(b)穩態的狀態可知，P&O 在收斂穩態上有較大的震盪。

圖 15(a)為光照度在 0.7 秒從的從 $600\text{W}/\text{m}^2$ 上升到 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 為太陽能模組輸出功率的暫態變化，我們可以看到光照度回到原本的強度時，使用 FPP 方法在效率上比使用另外兩種方法佳；而由圖 15(b)穩態的狀態所知，P&O 在收斂穩態仍有較大的震盪。

Case 2: 溫度變化

圖 16 為溫度在 0.5 秒時從 25°C 持續上升到 50°C ，再從 1 秒從 50°C 持續下降為 25°C 的太陽能模組的輸出功率。

由圖 17(a)及圖 17(b)可以得知，使用 FPP 方法跟 Fuzzy 法不管在溫度持續上升及持續下降時，FPP 法跟 Fuzzy 法都可保持其穩定度去追蹤功率最大值，而 P&O 法的效率則不及另兩種方法，而且仍有較大的震盪。

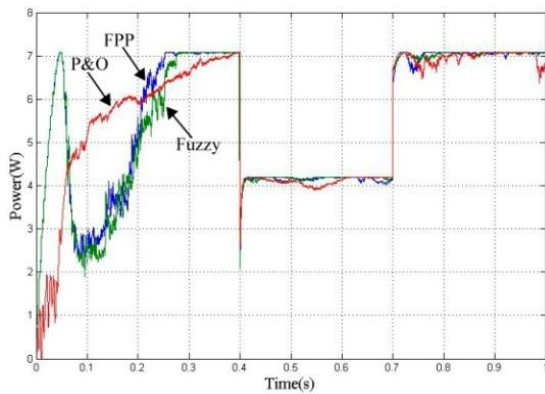


圖 12 以 FPP、Fuzzy 及 P&O 三種不同方法在光照度下之模擬波形在 0.4 秒從 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 下降為 $600\text{W}/\text{m}^2$ 及在 0.7 秒從 $600\text{W}/\text{m}^2$ 上升到 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 的太陽能模組輸出功率。

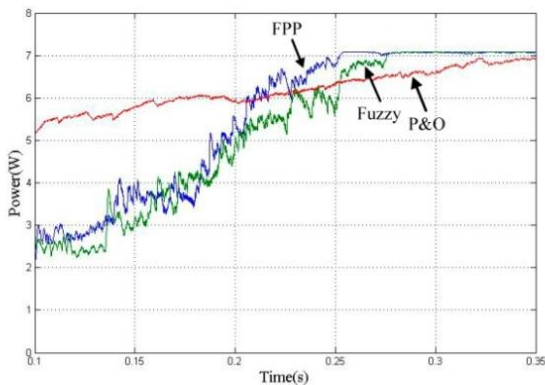
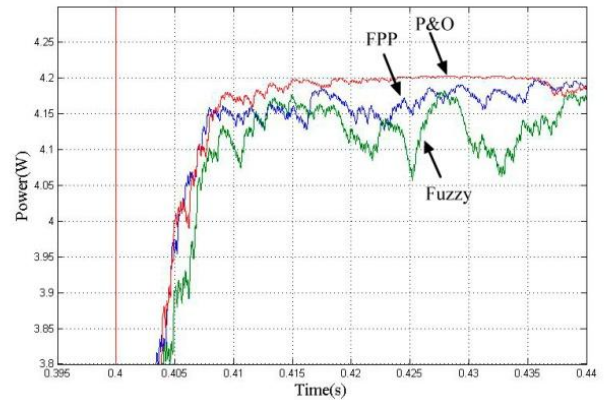
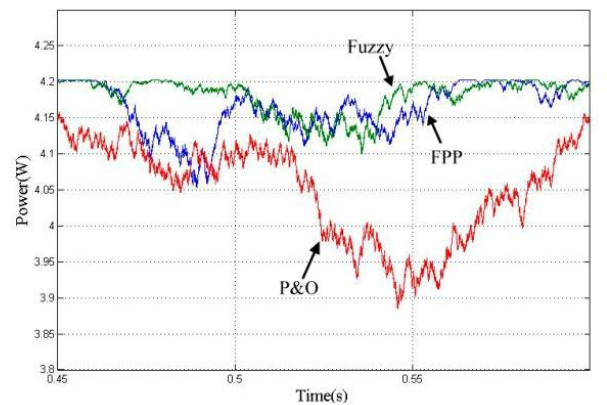


圖 13 太陽能模組啟動時三種不同的方法對太陽能模組輸出功率在 0.1 秒到 0.35 秒之模擬波形。

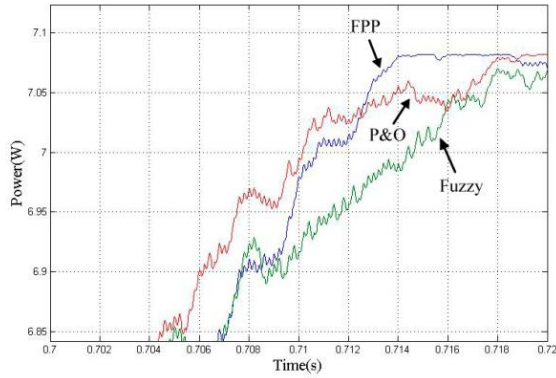


(a)

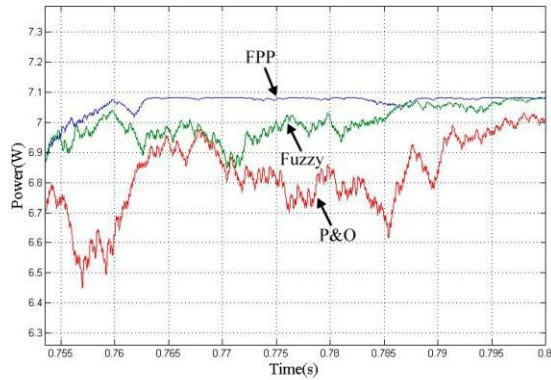


(b)

圖 14 (a) 以 FPP、Fuzzy 及 P&O 三種不同方法在光照度 0.4 秒從 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 下降為 $600\text{W}/\text{m}^2$ 的太陽能模組輸出功率模擬波形。(b) 太陽能模組輸出功率在光照度下降時之模擬波形。

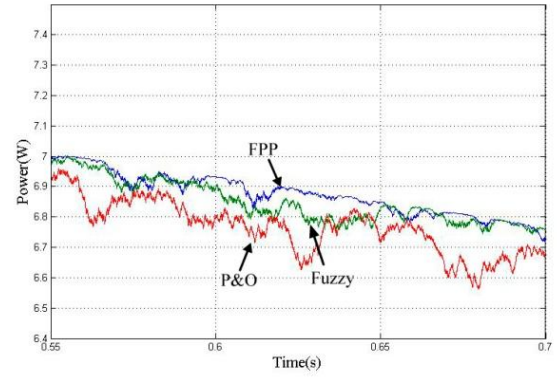


(a)

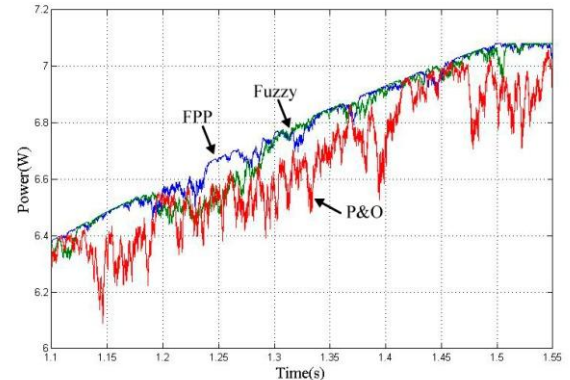


(b)

圖 15 (a)以 FPP、Fuzzy 及 P&O 三種不同方法在光照度 0.7 秒從 $600\text{W}/\text{m}^2$ 上升為 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 之太陽能模組輸出功率之模擬波形。(b)太陽能模組輸出功率在光照度上升時的模擬波形。



(a)



(b)

圖 17 (a) FPP、Fuzzy 及 P&O 三種不同方法在溫度 0.5 秒 25°C 持續上升為 50°C 及在 1 秒從 50°C 持續下降為 25°C 之太陽能模組輸出功率在 0.55 秒到 0.7 秒之模擬波形。(b)太陽能模組輸出功率在 1.1 秒到 1.55 秒之間之模擬波形。

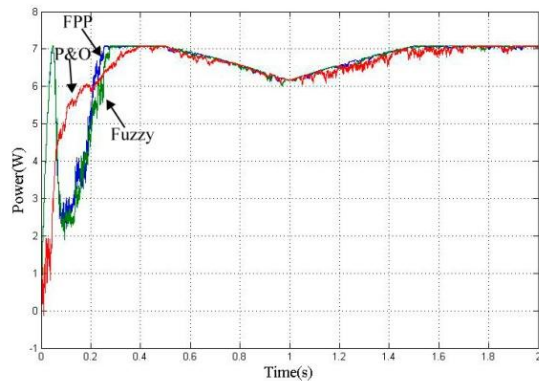


圖 16 溫度在 0.5 秒時從 25°C 持續上升到 50°C ，再從 1 秒從 50°C 持續下降為 25°C 之太陽能模組輸出功率之模擬波形

5. 結論

本篇論文提出 FPP 最大功率追蹤策略，我們利用取樣的值去計算出兩條二元一次方程式，並利用這兩條方程式去做預測的動作，同時也結合模糊演算法來調整升壓轉換器的工作週期，使之在溫度以及光照度急速變化時，仍能使太陽能模組保持最大功率輸出。

但是當光照度急速變化時，預測效果可能會比不如預期，原因在於暫態的變化無法由趨勢變化預知，因此，此時便由模糊控制為主要控制輸出。由模擬結果與比較其他方法後可知，FPP 最大功率追蹤法使太陽能模組輸出功率不管在光照度的及溫度的可變化下，都有不錯的成效。

參考文獻

- [1] Hashimoto, T. Shimizu, and G. Kimura, "A novel high performance utility interactive

- photovoltaic inverter system,” in Conf. Record 2000 IEEE Ind. Applicat. Conf., 2000, pp. 2255–2260.
- [2] M. Veerachary, T. Senjyu, and K. Uezato, “Maximum power point tracking control of IDB converter supplied PV system,” in IEE Proc. Elect. Power Applicat., 2001, pp. 494–502.
- [3] W. Xiao and W. G. Dunford, “A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems,” in Proc. 35th Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 2004, pp. 1957–1963.
- [4] N. S. D’Souza, L. A. C. Lopes, and X. Liu, “An intelligent maximum power point tracker using peak current control,” in Proc. 36th Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 2005, pp. 172–177.
- [5] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “A technique for improving P&O MPPT performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems,” IEEE Trans. Ind. Electron., Nov. 2009, vol. 56, no. 11, pp. 4473–4482.
- [6] R. Alonso, P. Ibáñez, V. Martínez, E. Román, and A. Sanz, “An innovative perturb, observe and check algorithm for partially shaded PV systems,” presented at the 13th Eur. Conf. Power Electronics and Applications (EPE’09), Barcelona, Spain, 2009.
- [7] W. T. Chee, T. C. Green, and A. H.-A. Carlos, “Analysis of perturb and observe maximum power point tracking algorithm for photovoltaic applications,” presented at the 2008 IEEE 2nd Int. Power and Energy Conf. (PECon 2008), Johor Bahru, Malaysia, 2008.
- [8] C. W. Tan, T. C. Green, and C.A.Hernandez-Aramburo, “A current mode controlled maximum power point tracking converter for building integrated photovoltaics,” presented at the 2007 Eur. Conf. Power Electronics and Applications (EPE), Aalborg, Denmark, 2007.
- [9] T.-Y. Kim, H.-G. Ahn, S. K. Park, and Y.-K. Lee, “A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation,” in IEEE Int. Symp. Ind. Electron., 2001, pp. 1011–1014.
- [10] G. J. Yu, Y. S. Jung, J. Y. Choi, and G. S. Kim, “A novel two-mode MPPT control algorithm based” on comparative study of existing algorithms,” Sol Energy, VOL. 76, NO. 4, Apr. 2004, pp. 455–463
- [11] N.Femia, D.Granozio, G.Petrone, G.Spagnuolo, M.Vitelli, Optimized One-Cycle Control in Photovoltaic Grid Connected Applications, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., VOL. 2, NO 3, July 2006.
- [12] Fangrui Liu, Shanxu Duan, Fei Liu, Bangyin Liu, and Yong Kang,” A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems.” IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 55, NO. 7, JULY 2008, pp. 2622–2628.
- [13] B. M. Wilamowski and X. Li, “Fuzzy system based maximum power point tracking for PV system,” in Proc. 28th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., 2002, pp. 3280–3284.
- [14] N. Khaehintung, K. Pramotung, B. Tuvirat, and P. Sirisuk, “RISCmicrocontroller built-in fuzzy logic controller of maximum power point tracking for solar-powered light-flasher applications,” in 30th Annual Conf. of IEEE Ind. Electron. Society, 2004, pp. 2673–2678.
- [15] N. Mazouz, A. Midoun” Control of a DC/DC converter by fuzzy controller for a solar pumping” VOL. 33, Issue 10, December 2011, pp. 1623–1630.
- [16] T. Hiyama, S. Kouzuma, and T. Imakubo, “Identification of optimal operating point of PV modules using neural network for real time maximum power tracking control,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 10, no. 2, Jun. 1995, pp. 360–367.
- [17] L. Zhang, Y. Bai, and A. Al-Amoudi, “GA-RBF neural network based maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic systems,” in Proc. Int. Conf. Power Electron., Machines and Drives, 2002, pp. 18–23.
- [18] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, Member, IAENG,”Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK”, WCECS 2008, October 22 - 24, 2008, San Francisco, USA.
- [19] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, *Power Electronics Converters, Applications and Design*, 3rd ed. United States of America: 2003 John Wiley & Sons, Inc.