

# A Fuzzy-Based Algorithm to Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System

Ruey-Hsun Liang, Jhin-Fan Jhou, Yie-Tone Chen, Wan-Tsun Tseng

Department of Electrical Engineering, National Yunlin University of Science and Technology, Yunlin  
Email: liangrh@yuntech.edu.tw, m10012205@yuntech.edu.tw, chenyt@yuntech.edu.tw, tsengwt@yuntech.edu.tw

Received: Mar. 25<sup>th</sup>, 2013; revised: Mar. 28<sup>th</sup>, 2013; accepted: Apr. 27<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Ruey-Hsun Liang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** This paper presents a fuzzy-based tracking algorithm to maximum power point tracking (MPPT) for photovoltaic (PV) system. The proposed fuzzy-based tracking algorithm can let the PV cell to work fast and stably on the maximum power point that makes the load can obtain the highest power. In the MPPT of the PV system, the sunlight intensity and load are uncertain factors. This advantage of the fuzzy-method is to deal with the uncertainty. The proposed fuzzy-based tracking algorithm is used to get a solution to adjust the duty cycle of the switch of the boost converter. The structure of the MPPT of the PV system is mainly composed of PV array, dc-dc Z-source boost converter and digital signal processor. A digital signal processor (TMS320LF2407A) is used for the system control that can reduce hardware components. It is found from the results that the proposed method can effectively achieve maximum power point and significantly improve the tracking efficiency.

**Keywords:** Photovoltaic System; Boost Converter; Fuzzy Theorem; Maximum Power Point Tracking

## 应用模糊为基础的方法于太阳能光伏系统之最大功率追踪

梁瑞勋, 周智帆, 陈一通, 曾万存

国立云林科技大学电机工程系, 云林  
Email: liangrh@yuntech.edu.tw, m10012205@yuntech.edu.tw, chenyt@yuntech.edu.tw, tsengwt@yuntech.edu.tw

收稿日期: 2013年3月25日; 修回日期: 2013年3月28日; 录用日期: 2013年4月27日

**摘要:** 本文提出以模糊理论为基础的方法应用于太阳能光伏系统之最大功率追踪, 此方法可以较快速及稳定的使太阳能光伏板工作在最大功率点, 以便于供给负载所需, 让整个太阳能光伏发电系统达到最大效率以减少能源损失。模糊理论的优势为可以面对不确定性, 而在太阳能光伏板之最大功率追踪方面, 需面对日照强度和负载等因素变动的不确定性。以模糊为基础的方法去进行最大功率追踪, 可以经由输入模糊化、模糊推论及解模糊化的过程, 求得其适当的输出解, 再利用其输出解, 适当的调整开关责任周期, 进而驱使电路, 使太阳能光伏板能更快速且更稳定的搜寻到最大功率点。本文的太阳能光伏系统最大功率追踪架构主要有太阳能光伏阵列、直流-直流 Z-源升压型转换器与数位处理器所组成, 并以数位信号处理器(TMS320LF2407A)作为数位控制的核心, 进而减少许多电子电路元件。由实际量测的结果可知, 本文所采用之方法确实可以达到最大功率追踪之目的。

**关键词:** 太阳能光伏系统; 升压型转换器; 模糊理论; 最大功率追踪

## 1. 前言

现今科技蓬勃发展，人类对电力的需求也相对的提高。目前仍以石化能源作为主要电力来源，如石油、煤，燃烧用于发电，但在全球能源短缺及环保意识高涨下，石化能源的有限性及核能发电的不确定性，使替代能源的寻求与研究已成为各先进国家所关注的议题。替代能源基本上是指煤、石油、天然气、核能以外的能源，包括了风能、太阳能、地热、海水温差、波浪、潮汐、黑潮、生物质能及燃料电池等。

台湾每年平均日照量相当丰富，太阳能这种具备无污染且取之不尽、用之不竭及不受任何国家垄断、控制的免费资源是在石化能源逐渐短缺及环保意识抬头的现今，是作为替代能源之最佳方案之一。而太阳能光伏发电系统发展至今已有五十余年，目前发电成本仍然偏高，主要是太阳能光伏板原料上的限制，导致太阳能光伏板本身转换太阳光效率不高，因此目前除了研究新的太阳能光伏板材料外，只能不断研发各种相关技术，借以提高系统电路效率以降低太阳能光伏发电系统成本<sup>[1]</sup>。

太阳能光伏发电系统中，若要达到高效率的电能转换，除了高效率转换器之外，还需要快速且稳定的最大功率追踪，因此太阳能光伏板的最大功率追踪，就成为一个最重要的课题，于是许多的最大功率追踪法则相继被提出来研究探讨。其中以扰动观察法<sup>[2]</sup>较为多人所运用与实现，其优点为控制法则简单且容易实现，不过缺点为容易于最大功率点附近左右震荡，造成能量的损耗，降低太阳能光伏板的效率。而为了改善扰动观察法在最大功率点左右震荡造成能量损耗的缺点，故以此法为基础，进一步发展出了三点权位法<sup>[3]</sup>。三点权位法的优点是在其最大功率点左右震荡的幅度非常小，以至于可以说是很稳定的搜寻到最大功率点，但在环境条件的快速变化下，三点权位法的搜寻速度和其他许多的最大功率追踪法则比较起来，是相对缓慢许多。另外，如功率回授法<sup>[4]</sup>、电压回授法<sup>[5]</sup>、增量电导法<sup>[6]</sup>、直线近似法<sup>[7]</sup>及实际量测法<sup>[8]</sup>等方法用于最大功率追踪。

本文为了改善传统扰动观察法责任周期调整量固定以及在最大功率点附近扰动等问题，以模糊为基础的方法去进行最大功率追踪，利用输入模糊化、模糊推论及解模糊化的过程，产生一输出值，去调整责任周期扰动量大小。若离最大功率点远时，责任周期

的调整量会较大，因而快速的往最大功率点移动；而当靠近最大功率点时，责任周期的调整量会减小，因而准确的追踪至最大功率点。因此采用模糊为基础的最大功率追踪法，可以适时的调整责任周期扰动量大小，让最大功率追踪有较快的追踪速度以及较准确的追踪至最大功率点。

在实验中，首先建立一个太阳能光伏系统最大功率追踪架构，利用德仪公司的数位信号处理器作为控制核心，来驱动电路，并以模糊理论为基础的最大功率追踪演算法来决定开关责任周期大小。经由实验结果可知，本文采用的方法，确实可以达到最大功率追踪之目的。

## 2. 太阳能光伏系统最大功率追踪架构

太阳能光伏系统最大功率追踪架构如图 1 所示，主要包含以下三个部份：

1) 光伏阵列：本文采用三片 280G6S 之太阳能光伏板，组合而成。

2) 直流 - 直流 Z-源升压型转换器：直流 - 直流 Z-源升压型转换器<sup>[9]</sup>，如图 2 所示。此转换器作为光伏阵列与负载串接之功率级，并利用最大功率追踪法来控制开关  $S_1$ ，进而完成最大功率追踪。此 Z-源升压型转换器的升压特性方程式为<sup>[9]</sup>：

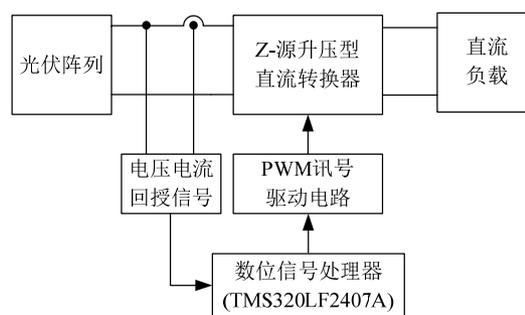


Figure 1. Structure of the MPPT of the PV system  
图 1. 太阳能光伏系统最大功率追踪架构

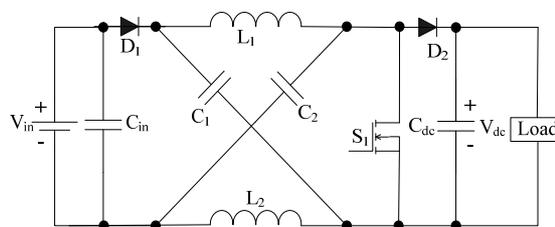


Figure 2. DC-DC Z-source boost converter  
图 2. 直流 - 直流 Z-源升压型转换器

$$B = \frac{V_{dc}}{V_{in}} = \frac{1}{1-2D}, \quad 0 \leq D < 0.5 \quad (1)$$

其中  $B$  为转换器的输出与输入的升压比;  $D$  为开关的责任周期。

升压比与责任周期的关系也可以改写成

$$D = \frac{B-1}{2B}, \quad B \geq 1 \quad (2)$$

3) 数位信号处理器: 本文采用德州仪器制造之微处理器 TMS320LF2407A<sup>[10]</sup>, 其功能具有 16 个 16 位元 PWM 通道、16 个 10 位元的类比/数位转换器及 6 个捕捉单元, 可实现复杂的数位控制并减少硬体电路。

### 3. 最大功率追踪

当大气状态改变时, 会使得太阳日照强度及太阳能光伏板表面温度跟着改变, 因此太阳能光伏板的之功率也会随之改变, 如图 3 所示。图 3(a) 为太阳能光伏板表面温度在 41.5°C、不同照度下的 P-I 特性曲线; 图 3(b) 为太阳能光伏板表面温度在 29.5°C、不同照度下的 P-I 特性曲线。从图 3 可知, 在温度或者日照不同情形下, 每条曲线皆有最大功率点, 因此太阳能最大功率追踪技术旨在不同日照、温度情形下, 皆能使太阳能光伏板操作在最大功率点。如前言所述, 目前已经有许多文献提出各种最大功率追踪的方法, 其中以扰动观察法较为多人所运用及实现, 所以本文首先将针对扰动观察法做进一步的探讨, 接着提出本文所采用的方法。

#### 3.1. 传统扰动观察法

由于传统扰动观察法的控制法则简单, 只需量测输入电压与电流就可进行最大功率追踪, 所以他被普遍的应用在太阳能光伏板的最大功率追踪上。借着周期性的增加或减少开关导通周期的大小, 以改变太阳能光伏板的端电压及输出功率, 并观察、比较开关导通周期变动前后的输出电压及输出功率大小。假使输出功率较变动前大, 则将朝同一方向变动; 反之, 若输出功率较变动前小的话, 则表示需要在下一周期改变变动的方向。如此反复的扰动、观察及比较, 使太阳能光伏板达到其最大功率点。

传统扰动观察法在进行最大功率追踪时, 其责任

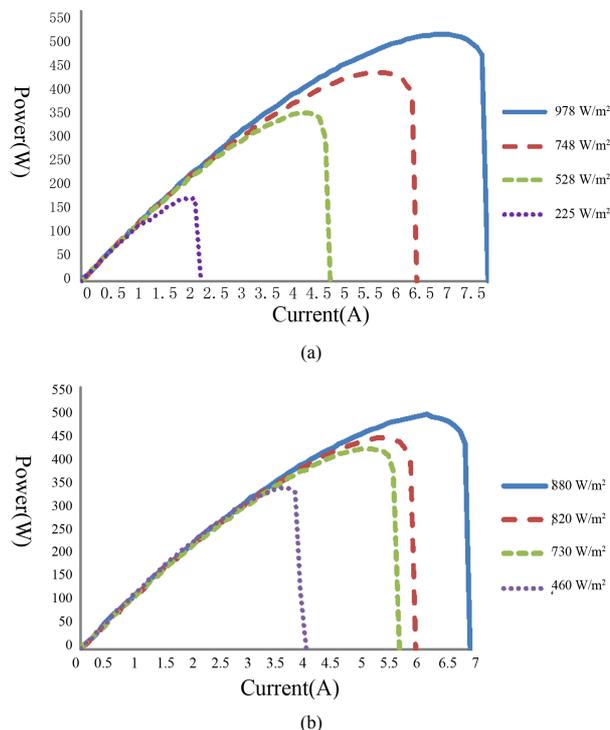


Figure 3. (a) P-I characteristic curve under different sunlight intensity as PV surface temperature at 41.5°C; (b) P-I characteristic curve under different sunlight intensity as PV surface temperature at 29.5°C; Relationship of PV power output, sunlight intensity and PV surface temperature  
图 3. (a) 光伏板表面温度在 41.5°C 不同照度下的 P-I 特性曲线; (b) 光伏板表面温度在 29.5°C 不同照度下的 P-I 特性曲线; 太阳能光伏板之输出功率与日照强度及光伏板表面温度之关系

周期变化量是固定的, 这将导致系统的追踪速度与在最大功率点时的扰动量无法调整。如图 4 所示, 当责任周期变化量较小时, 需要花较多时间才能追踪至最大功率点, 但最大功率点的扰动变化量  $\Delta P_{pv}$  相对较小; 反之, 当责任周期变化量较大时, 可以花较少时间追踪到最大功率点, 但缺点是达最大功率点后的扰动变化量  $\Delta P_{pv}$  较大<sup>[11,12]</sup>。

#### 3.2. 本文采用之方法

由上述可知, 传统扰动观察法在进行最大功率追踪时, 其责任周期变化量是固定的, 无法适时的调整。因此本文提出了斜率追踪法以及模糊为基础的追踪法两种方法来解决, 其责任周期变化量无法适时调整的问题。

##### 3.2.1. 斜率追踪法

斜率追踪法是以斜率大小乘以一固定值来决定升压比的调整量, 其控制流程, 如图 5 所示。其

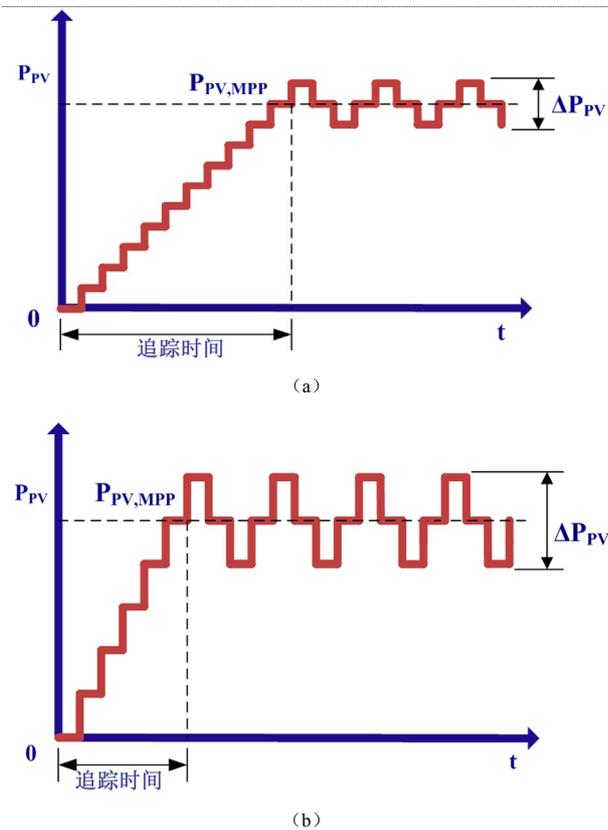


Figure 4. (a) When a small change in duty cycle; (b) When a large change in duty cycle; Tracking diagram of traditional perturbation and observation (P&O) algorithm

图 4. (a) 当责任周期变化量较小; (b) 当责任周期变化量较大; 传统扰动观察法追踪示意图

作法是当每一工作周期时, 侦测太阳能光伏板输出电压( $V_{PV}$ )与电流( $I_{PV}$ ), 计算出此周期与前周期输出功率变化量( $\Delta P_k = P_k - P_{k-1}$ ), 并计算太阳能光伏板输出电流变化量( $\Delta I_k = I_k - I_{k-1}$ ), 求取斜率( $S = \Delta P_k / \Delta I_k$ ), 以此斜率乘以一个固定值( $C$ ), 来决定下一个周期, 升压比( $B$ )调整量需增加或者减少, 并利公式(2)计算出责任周期大小, 进而控制电路开关。

此方法在越接近最大功率点时, 斜率的变化会越来越小, 升压比改变的值也会跟着变小, 因而追踪至最大功率点。在此考虑到, 若一开始斜率变化量太大, 容易导致其升压比变化量过大, 因而超越其最大功率点, 容易在最大功率点附近扰动变化, 因此乘上一个固定值( $C$ )让其责任周期调整量变化不至于过于剧烈。但是, 如果乘上的固定值( $C$ )太大, 升压比调整量还是会变化较为剧烈, 但若乘上的固定值太小, 会导致其追踪时间太长, 而无法即时的追

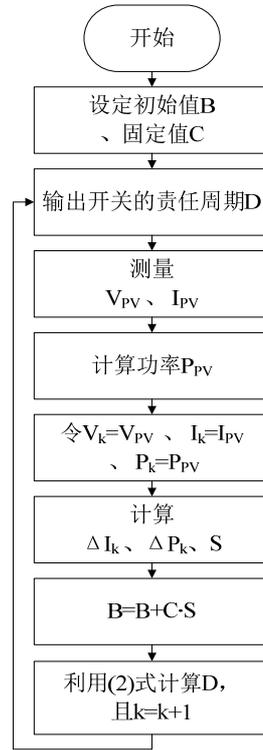


Figure 5. Flowchart of the slope tracking algorithm  
图 5. 斜率追踪法之流程图

踪至最大功率点, 就如上述的传统扰动观察法一样, 只是两者最大差别在于扰动观察法的升压比调整量大小是固定的, 而斜率追踪法的升压比调整量大小是随着斜率的大小作改变。因此为了改善斜率追踪法, 乘上一固定值的缺点, 本文利用模糊推论的方式, 来决定此值在每一工作周期的量, 应该为多少。如此一来, 此值不再是固定的, 而是由模糊方法推论得出, 这样可以让最大功率追踪较快速且稳定。

### 3.2.2. 模糊为基础的追踪法

模糊理论<sup>[13,14]</sup>的优势为可面对不确定性和不准确性, 而在太阳能光伏板之最大功率追踪方面, 需面对日照强度和负载等因素变动的不确定性。本文提出以模糊为基础的追踪法来进行最大功率追踪, 利用模糊控制策略可以有效的解决上述的缺点。此模糊控制策略分为三个部分: 模糊化、模糊推论引擎、解模糊化。

1) 模糊化: 模糊化主要的目地是将输入讯号以适当的比例转换到所定义之论域的数值, 利用口语化变数来描述所测量的物理量, 并且依照适合的语言值求得所测之相对的归属度, 模糊语言描述为: 最小(VS),

小(S), 中间(M), 大(L), 最大(VL)。而本文的输入为双输入的方式, 输入分别为功率调整率及斜率绝对值, 其模糊归属函数, 如图 6 所示。其中功率调整率 (PR)定义为:

$$PR = \frac{|P_k - P_{k-1}|}{\max\{P_k, P_{k-1}\}} \quad (3)$$

2) 模糊推论引擎:模糊推论引擎为整个模糊控制策略的核心, 其拥有模拟人类模糊思考的推论, 运用模糊逻辑和模糊推论法则来推论出所对应的模糊控制动作。表 1 为本文所使用的双输入单输出的模糊控制法则。

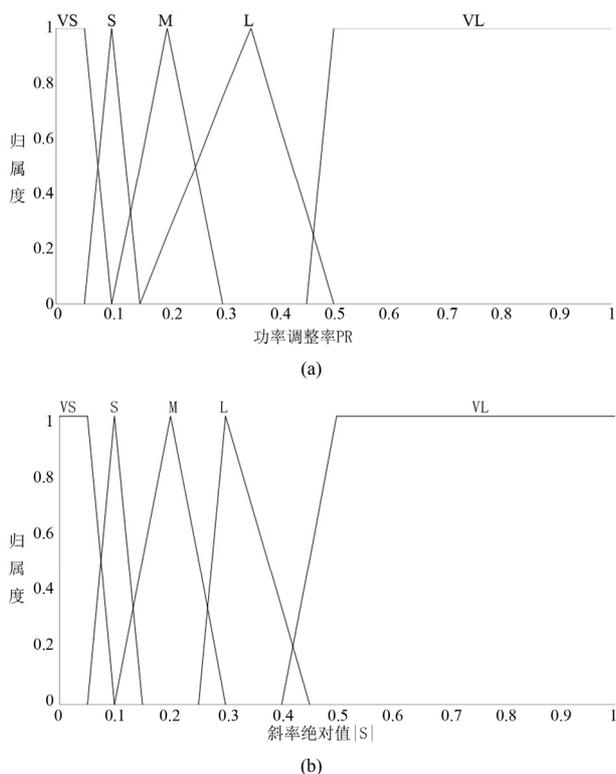


Figure 6. (a) Membership function for power regulation (PR); (b) Membership function for magnitude of the slope; Input fuzzy membership functions

图 6. (a) 功率调整率的归属函数; (b) 斜率绝对值的归属函数; 输入的模糊归属函数

Table 1. Double-input single-output fuzzy control rules  
表 1. 双输入单输出的模糊控制法则

| 模糊规则     | 功率调整率 |   |    |    |    |
|----------|-------|---|----|----|----|
|          | VS    | S | M  | L  | VL |
| 斜率绝对值 VS | VS    | S | S  | S  | S  |
| 斜率绝对值 S  | VS    | S | S  | M  | M  |
| 斜率绝对值 M  | S     | M | M  | M  | L  |
| 斜率绝对值 L  | S     | M | L  | L  | VL |
| 斜率绝对值 VL | S     | M | VL | VL | VL |

3) 解模糊化:解模糊化为将模糊推论引擎的输出映射到明确值上。解模糊化包含下列部分:

a) 控制法则推论输出的归属函数, 如图 7 所示, 本文采单输出方式。

b) 目前较常用的解模糊化方式为重心法及最大值法, 而本文采用的解模糊化方式为重心法。将推论引擎所推论出的归属函数, 求得总面积的重心, 其公式表示如下:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i X_i}{\sum_{i=1}^n Y_i} \quad (4)$$

其中

F: 模糊控制策略的输出量。

$X_i$ : 第  $i$  个控制规则的适合程度。

$Y_i$ : 第  $i$  个控制规则的归属函数中心点对应值。

此模糊控制策略, 可以使其输出值(F)跟随其当时双输入的斜率绝对值与功率调整率的大小, 来进行适当的调整。图 8 是模糊为基础的追踪法之流程图。如图 8 所示, 升压比(B)的调整量为模糊输出值(F)乘上斜率(S), 此模糊输出值(F), 不再是固定的, 而是每一工作周期都会进行调整, 这样就能在离最大功率点较远时, 升压比调整量较大, 使其加快追踪速度。而当接近最大功率点时, 斜率值会减小, 模糊的输出值也会跟着变小, 而当两者相乘之后, 其升压比的调整量也会大幅减小。此模糊为基础的追踪法就不会出现像斜率追踪法情况, 当斜率乘上较大的固定值时, 容易超越最大功率点而导致在其最大功率点附近扰动, 而当斜率乘上较小的固定值时, 容易造成一开始追踪速度过慢的缺点。

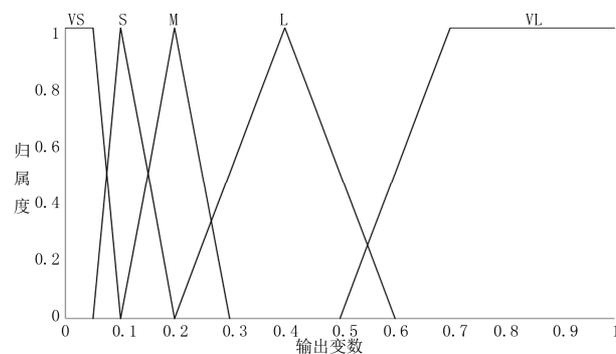


Figure 7. Membership functions for inference output of the control rules

图 7. 控制法则推论输出的归属函数

### 4. 实验结果及分析

为了实现最大功率追踪系统，本文以实作方式，利用三片型号为 280G6S 的太阳能光伏板结合而成光伏阵列。以太能模组测试仪(PROVA 210)测量此太阳能光伏板的 V-I 及 P-I 曲线，如图 9 所示，当日照强度在  $820 \text{ W/m}^2$ 、太阳能光伏板表面温度  $29.5^\circ\text{C}$  时，最大功率点功率为  $439.2 \text{ W}$ 。以三种方法，包含扰动观察法、斜率追踪法及模糊为基础的追踪法作测试实验，测试时的日照强度及光伏板表面温度皆为  $820 \text{ W/m}^2$  及  $29.5^\circ\text{C}$ 。此实验的控制核心是采用德州仪器公司生产的数位信号处理器(TMS320LF2407A)，作最大功率追踪运算。

首先利用扰动观察法做最大功率追踪测试，结果



Figure 8 Flowchart of the fuzzy-based tracking algorithm  
图 8. 模糊为基础的追踪法之流程图

如图 10 所示。图 10(a)为责任周期变化量较小时，示波器显示的电压( $V_{PV}$ )、电流( $I_{PV}$ )及功率( $P_{PV}$ )波形。由图 10(a)的结果可知，当责任周期变化量较小时，追踪速度较慢，但当达到最大功率点时，其扰动的功率变化量较小。图 10(b)为责任周期变化量较大时，示波器显示的波形。由图 10(b)的结果可知，当责任周期变化

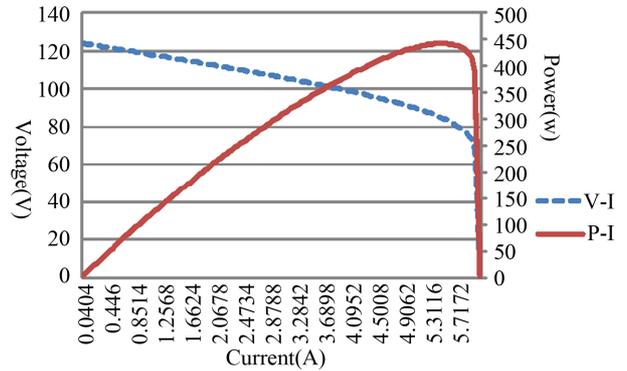
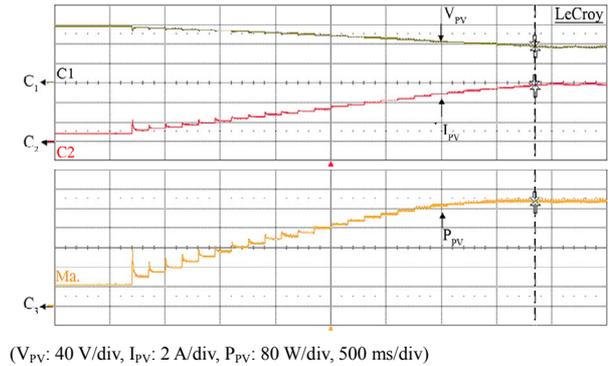
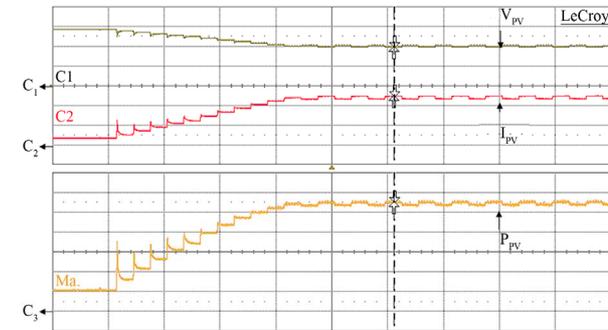


Figure 9. V-I and P-I curves of the PV array under sunlight intensity at  $820 \text{ W/m}^2$   
图 9. 在日照  $820 \text{ W/m}^2$  情形下太阳能光伏板 V-I 及 P-I 曲线图



( $V_{PV}$ : 40 V/div,  $I_{PV}$ : 2 A/div,  $P_{PV}$ : 80 W/div, 500 ms/div)

(a)



( $V_{PV}$ : 40 V/div,  $I_{PV}$ : 2 A/div,  $P_{PV}$ : 80 W/div, 500 ms/div)

(b)

Figure 10. (a) When a small change in duty cycle; (b) When a large change in duty cycle; Test results of the P&O algorithm  
图 10. (a) 责任周期变化量较小; (b) 责任周期变化量较大; 使用扰动观察法之测试结果

量较大时，追踪速度较快，但当达到最大功率点时，其扰动的功率变化量较大。综合图 10(a)及图 10(b)的结果可知，当责任周期变化量较小时，其追踪至最大功率点所花的时间明显多于责任周期变化量较大的时间。而两者于最大功率点时之扰动功率变化情形，可以发现责任周期变化量较大，虽然可以较快追踪至最大功率点，但是其扰动功率变化量相对较大，这显示扰动观察法的缺点。

接着使用斜率追踪法进行最大功率追踪测试，结果如图 11 所示。图 11(a)为斜率乘以固定值较小情况下，示波器显示的波形。由图 11(a)的结果可知，当固定值较小情况下，追踪速度较慢，但当达到最大功率点时，其扰动的功率变化量较小。图 11(b)为固定值较大情况下，示波器显示的波形。由图 11(b)的结果可知，当固定值较大情况下时，追踪速度较快，但当达到最大功率点时，其扰动的功率变化量较大。综合图 11(a)

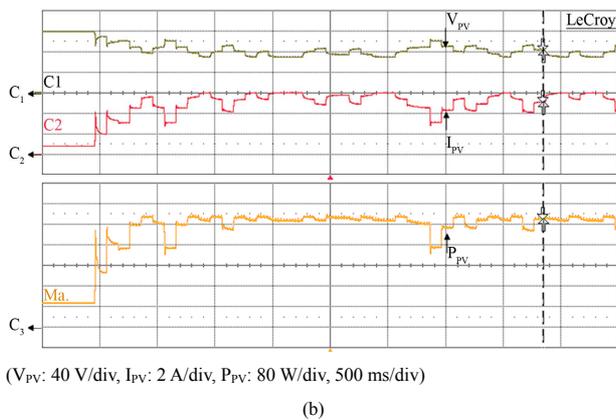
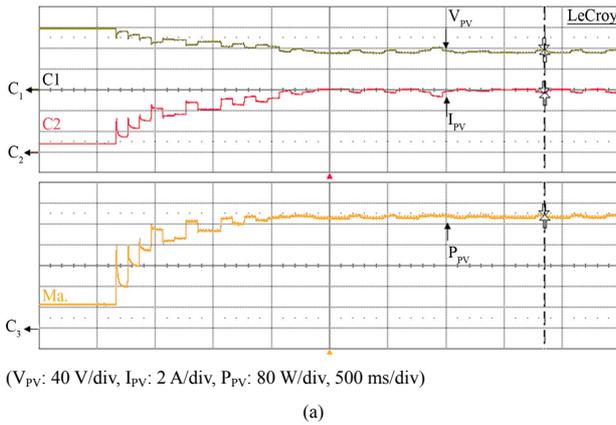


Figure 11. (a) Case in slope multiplied by a smaller fixed value; (b) Case in slope multiplied by a larger fixed value; Test results of the slope tracking algorithm

图 11. (a) 斜率乘以较小固定值情况下; (b) 斜率乘以较大固定值情况下; 使用斜率追踪法之测试结果

及图 11(b)的结果可知，当固定值较小情况下，其追踪至最大功率点所花的时间明显多于固定值较大情况下的时间。而两者于最大功率点时之扰动功率变化情形，可以发现固定值较大情况下，虽然可以较快追踪至最大功率点，但是其扰动功率变化量相对较大，这显示斜率追踪法的缺点。与传统扰动观察法比较，由于斜率追踪法，在每一工作周期，其扰动量大小，都会随着斜率的大小进行调整，因此其追踪速度明显快于传统扰动观察法。

最后使用模糊为基础的追踪法进行最大功率追踪测试，结果如图 12 所示。图 12 为示波器显示的波形，由图 12 的结果可知，当开始使用模糊为基础的追踪法时，模糊输入的功率调整率及斜率绝对值较大，因此其输出值(F)较大，因此一开始追踪速度会较快，而当越接近最大功率点时，因模糊输入的功率调整率及斜率绝对值变小，因此其输出值(F)较小，使其责任周期调整量相对较小，因此在最大功率点附近的功率扰动量会相对较小。

另外，以不同的型式展示最大功率追踪的结果。图 13、14 及 15 分别为使用扰动观察法、斜率追踪法及模糊为基础的追踪法，所得出之追踪次数与功率的关系。由图 13 及图 14，可以看出斜率追踪法因为调整量不是固定的，而是随着斜率加以调整，所以追踪次数明显少于扰动观察法，但是也会与扰动观察法一样，出现在最大功率点附近扰动的情况。而由图 15 可看出，模糊为基础的追踪法其追踪次数比扰动观察法与斜率追踪法来得少，以及达到最大功率点时的稳定性都明显比其他两种方法还要好，显示可以较快速及稳定的追踪到最大功率点。

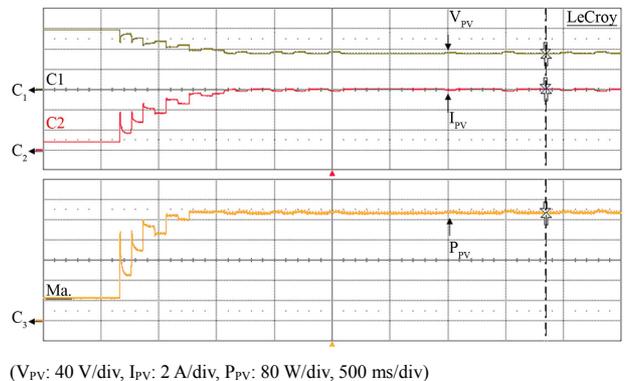
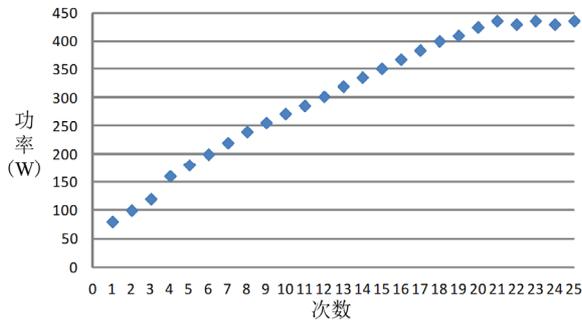
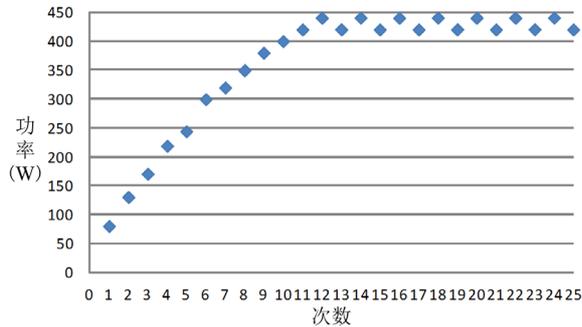


Figure 12. Test results of the fuzzy-based tracking algorithm  
图 12. 使用模糊为基础的追踪法之测试结果

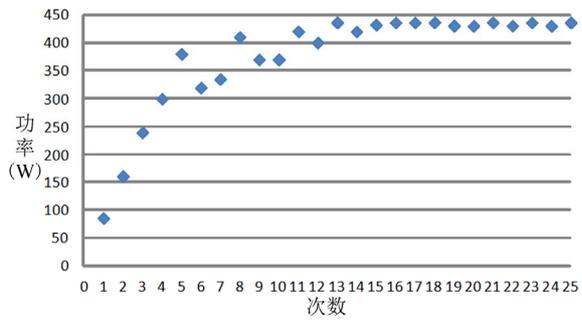


(a)

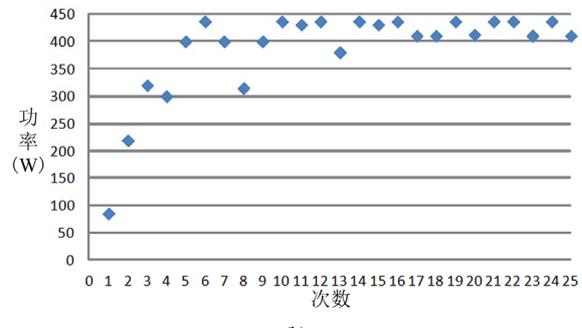


(b)

Figure 13. (a) A small change in duty cycle; (b) A large change in duty cycle; Results of the P&O algorithm  
图 13. (a) 责任周期变化量较小; (b) 责任周期变化量较大; 使用扰动观察法之结果



(a)



(b)

Figure 14. (a) Case in slope multiplied by a smaller fixed value case; (b) Case in slope multiplied by a larger fixed value; Results of the slope tracking algorithm  
图 14. (a) 斜率乘以较小固定值情况下; (b) 斜率乘以较大固定值情况下; 使用斜率追踪法之结果

图 16 为负载变动时, 使用模糊为基础的最大功率追踪法之示波器显示的波形结果。由图 16 可知当负载阻抗未变动时, 功率( $P_{PV}$ )已在最大功率点, 而当负载阻抗从  $100\ \Omega$  下降至  $50\ \Omega$  或者  $50\ \Omega$  上升到  $80\ \Omega$  时, 以模糊为基础的最大功率追踪法, 都会在最短的时间内, 将光伏板的输出功率( $P_{PV}$ )稳定在最大功率点。

图 17 为负载固定, 而日照遮蔽时, 使用模糊为

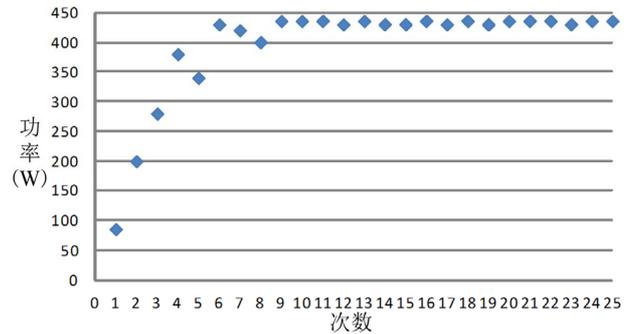
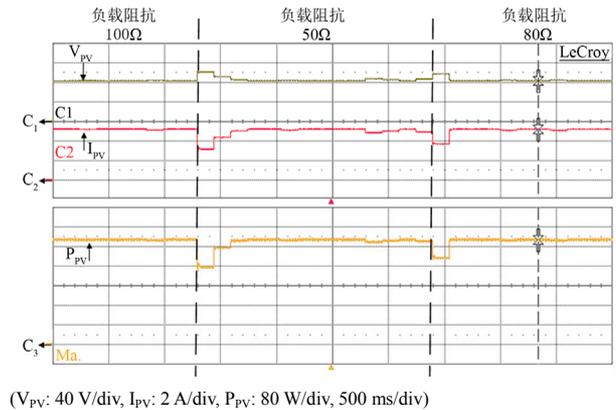
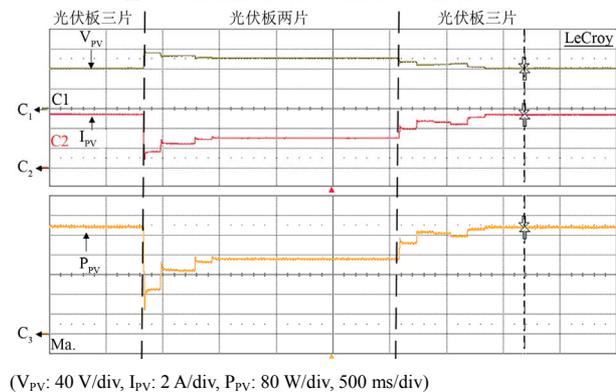


Figure 15. Results of the fuzzy-based tracking algorithm  
图 15. 使用模糊为基础的追踪法之结果



( $V_{PV}$ : 40 V/div,  $I_{PV}$ : 2 A/div,  $P_{PV}$ : 80 W/div, 500 ms/div)

Figure 16. MPPT results under load changes  
图 16. 负载变动情况下最大功率追踪结果



( $V_{PV}$ : 40 V/div,  $I_{PV}$ : 2 A/div,  $P_{PV}$ : 80 W/div, 500 ms/div)

Figure 17. MPPT results under partial shadowing  
图 17. 日照遮蔽情况下最大功率追踪结果

基础的最大功率追踪法之示波器显示的波形结果。图 17 为未遮蔽时，功率( $P_{PV}$ )已在最大功率点，而当光伏板遮蔽掉一片变为两片时或者把遮蔽移除从两片变为三片时，以模糊为基础的最大功率追踪法，都会在最短的时间内，将光伏板的输出功率( $P_{PV}$ )稳定在最大功率点。

## 5. 结论

本文提出一个以模糊为基础的最大功率追踪法，以功率调整率及斜率绝对值为模糊控制的输入，经由模糊推论得出一输出值，来决定升压比需增加或减少，再利用升压比与责任周期关系式，计算出责任周期大小，去调整开关责任周期，使追踪可以快速往最大功率点移动，而当接近最大功率点时，升压比变化量会减少，以达到稳定在最大功率点，以降低功率损失。为了验证本文所提最大功率追踪法，本文建立一个太阳能光伏板最大功率追踪系统，利用数位信号处理器做为本系统的控制核心，而电路是由直流 - 直流 Z - 源升压型转换器，配合使用模糊为基础的最大功率追踪法，进行测试。经实验测试可知，使用模糊为基础的最大功率追踪法，可以改善其追踪速度与最大功率点之扰动的功率变化量，让太阳能光伏板的功率输出最大，可使能源作最大的利用。

## 参考文献 (References)

- [1] E. Román, R. Alonso, P. Ibañez, S. Elorduizaparietxe and D. Goitia. Intelligent PV module for grid-connected PV systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1066-1073.
- [2] C. C. Hua, J. G. Lin and C. M. Shen. Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(1): 99-107.
- [3] 陈家宏. 太阳能电池最大功率点追踪之设计与制作[D]. 淡江大学, 2001.
- [4] W. Xiao, W. G. Dunford. A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 22-25 June 2004, 3: 1957-1963.
- [5] D. Sera, R. Teodorescu, J. Hantschel and M. Knoll. Optimized power point tracker for fast-changing environmental conditions. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2629-2637.
- [6] I. S. Kim, M. B. Kim and M. J. Youn. New maximum power tracker using sliding-mode observer for estimation of solar array current in the grid-connected photovoltaic system. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1027-1035.
- [7] E. V. Solodovnik, S. Liu and R. A. Dougal. Power controller design for maximum power tracking in solar installations. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1295-1304.
- [8] 李思贤. 数位式单相低功率太阳光电转换系统[D]. 国立中山大学, 2003.
- [9] 梁瑞勋, 周智帆, 曾万存. 采用 Z-源结构的光伏发电电力转换系统之研制[A]. 2012 第十一届台湾电力电子研讨会暨展览会, TPECE002, 2012.
- [10] 董胜源. DSP TMS320LF2407 与 C 语言控制实习. 上海: 长高科技图书, 2004.
- [11] K. S. M. Raza, H. Goto, H. J. Guo and O. Ichinokura. A novel speed-sensorless adaptive hill climbing algorithm for fast and efficient maximum power point tracking of wind energy conversion systems. IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, 24-27 November 2008: 628-633.
- [12] H. Al-Atrash, I. Batarseh, and K. Rustom. Effect of measurement noise and bias on hill-climbing MPPT algorithms. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(2): 745-760.
- [13] 杨英魁. 模糊控制理论与技术[M]. 新北: 全华出版社, 1996.
- [14] 万绚, 林明毅, 陈宏杰. 模糊理论应用与实务[M]. 台北: 儒林出版社, 2006.
- [1] E. Román, R. Alonso, P. Ibañez, S. Elorduizaparietxe and D. Goitia. Intelligent PV module for grid-connected PV systems.