

# 几种光伏系统 MPPT 方法的分析与比较

## Analysis and Comparison of Several MPPT Methods for PV System

华中科技大学 徐鹏威, 段善旭, 刘飞, 刘邦银 Email:xcolder@yahoo.com.cn  
Huazhong University of Science and Technology Xu Pengwei, Duan Shanxu, Liu Fei, Liu Bangyin

**摘要:** 在太阳能发电的系统中需要对太阳能电池的最大功率点进行跟踪。本文分析了四种常见的最大功率跟踪方法, 比较了其优缺点, 为不同的系统选择不同的跟踪方法提供了理论依据。

**Abstract:** The photovoltaic (PV) system must contain a maximum power point tracking (MPPT) function. The advantages and weaknesses of four existing MPPT methods are compared and analyzed in this paper, and the basic rules for choosing the MPPT method are proposed.

**关键词:** 光伏系统; 最大功率跟踪; 分析比较

**Keywords:** PV system; MPPT; Analysis and comparison

## 1 引言

当前, 由于全球性能源危机, 世界主要发达国家都开始重视可再生能源的利用研究。在所有可再生能源利用中, 光伏发电是其中一项重要的方案。但是, 由于太阳能电池具有明显的非线性特性, 因此, 为了实现光伏发电系统的功率输出最大化, 需要对太阳能电池的输出最大功率点进行跟踪。目前, 最大功率点跟踪 (MPPT: Maximum Power Point Tracking) 的方法有很多, 如恒定电压控制法, 扰动观测法, 导纳增量法, 模糊控制法, 基于预测数据的最大功率跟踪方法[1][2][3][4]等等。但不同的方法有不同的控制效果和不同的优劣, 有必要对目前光伏系统的MPPT方法进行研究。

## 2 系统原理

### 2.1 太阳能电池等效模型

太阳能电池组件其 I-V 特性与日射强度 S 和电池温度 T 有极大关系, 即  $I=f(V, S, T)$ 。根据电子学理论, 太阳能电池的等效数学模型为<sup>[5]</sup>

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + R_s g)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s g}{R_{sh}} \quad (1)$$

其中:

$I$  - 光伏电池输出电流 (工作电流)

$V$  - 光伏电池输出电压 (工作电压)

$I_{ph}$  - 光生电流

$I_0$  - 二极管饱和电流

- $q$  - 电子的电荷量 ( $1.6 \times 10^{19} C$ )
- $R_s$  - 光伏电池的串联电阻
- $n$  - 二极管特性因子
- $k$  - 玻耳兹曼常数 ( $1.38 \times 10^{-23} J / K$ )
- $T$  - 光伏电池温度
- $R_{sh}$  - 光伏电池的并联电阻

其等效电路图:

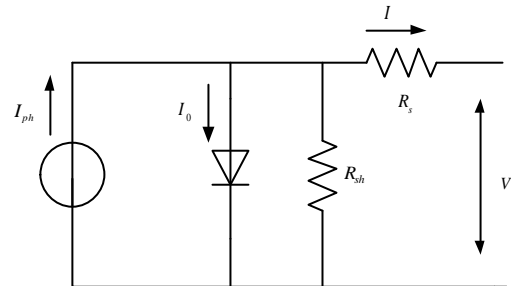


图1、太阳能电池等效电路图

### 2.2 太阳能电池的电气特性

由以上数学模型及等效电路图可以得到太阳能电池在不同太阳辐射强度 S 以及不同温度 T 条件下的 I - V 特性曲线图如图 2, 图 3 所示:

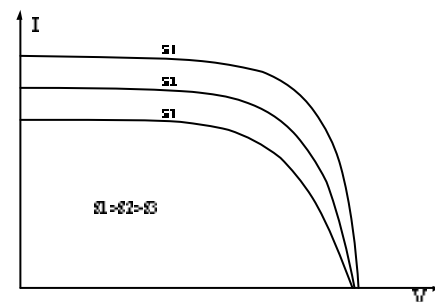


图2、在相同温度不同太阳辐射强度下太阳能电池的 I - V特性曲线

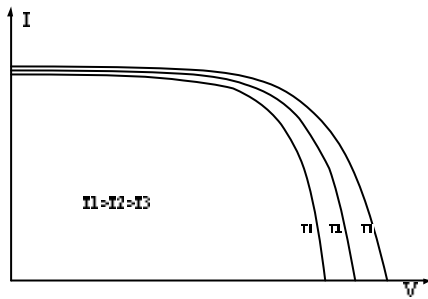


图3、在相同太阳辐射强度不同温度条件下太阳能电池的 I - V特性曲线

在不同太阳辐射及不同温度下的功率电压曲线如图4，图5所示。

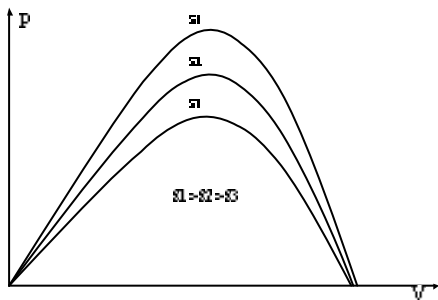


图4、在相同温度不同太阳辐射强度下太阳能电池的 P - V特性曲线

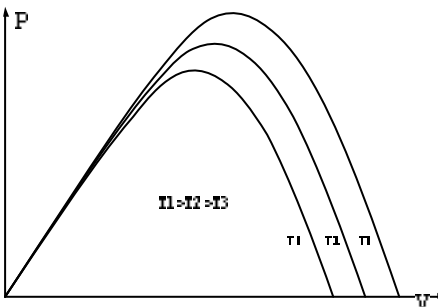


图5、在相同太阳辐射强度不同温度条件下太阳能电池的 P - V特性曲线

### 3 光伏系统 MPPT 算法比较

在本文中，主要对目前常见的四中方法进行研究：(1)恒定电压控制法 CVT (Constant Voltage Control)；(2)扰动观测法 P&O (Perturbation and Observation method)；(3)导纳增量法 IncCond (Incremental conductance method)；(4)基于梯度变步长的导纳增量法。

#### 3.1 恒定电压控制法CVT

#### 3.1.1 原理及流程图

通过分析图 4 可以看出，在太阳能电池温度变化不大时，太阳能电池的输出 P—V 曲线上的最大功率点几乎分布于一条垂直直线的两侧。因此，若能将太阳能电池输出电压控制在其最大功率点时的电压处，这时太阳能电池将工作在最大功率点，控制流程图如图 6 所示，仿真结果图如图 7 所示。

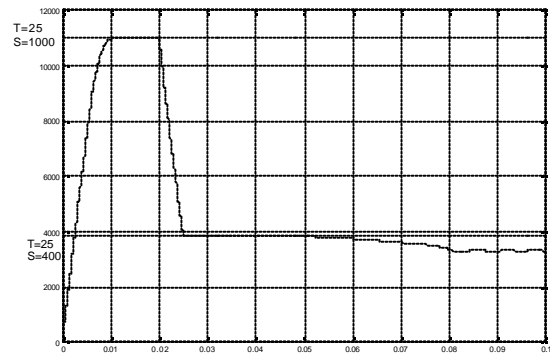
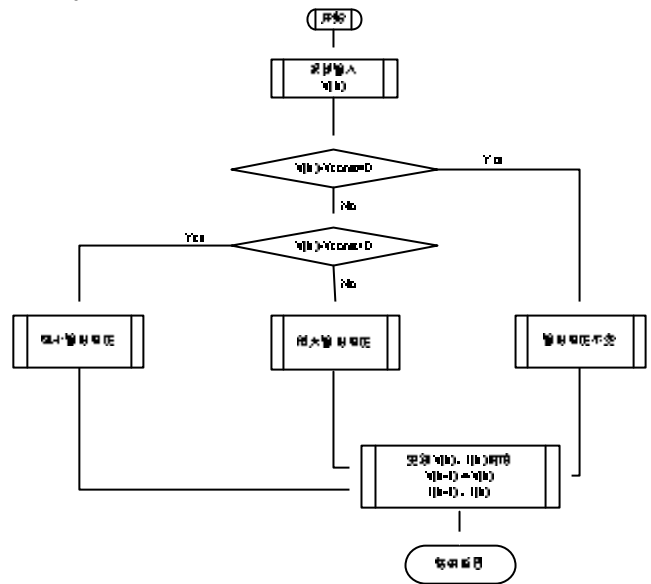


图 7、采用 CVT 控制的输出功率曲线图

图中太阳能辐射强度从 0.02s 开始经过 0.005s 由

$1000W / m^2$  变化为  $400W / m^2$ 。

#### 3.1.2 控制方法优点分析

采用 CVT 控制具有以下优点：

- 1) 控制简单，控制易实现；
- 2) 系统不会出现因控制电压给定剧烈变化而引起振荡，具有良好的稳定性。

#### 3.1.3 控制方法缺点分析

采用 CVT 控制具有以下缺点：

- 1) 控制精度差，系统最大功率的跟踪的精度

取决于给定电压值选择的合理性；

2) 控制的适应性差，当系统外界环境，如太阳辐射强度，太阳能电池板温度发生改变时系统难以进行准确的最大功率点跟踪。如图 7 所示。

### 3.1.4 跟踪误差分析

由于太阳能电池的输出功率曲线在不同的温度以及不同的太阳辐射强度下具有不同的最大功率值，如图 8 所示。

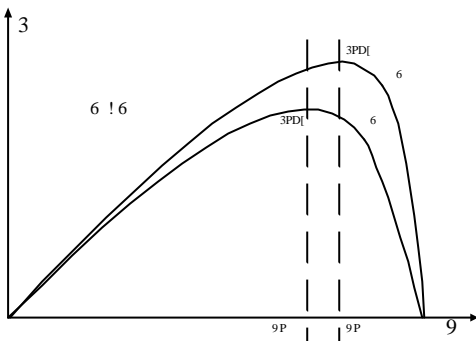


图 8、在不同太阳辐射强度下太阳能电池的 P - V 特性曲线

可以看出，当系统外界环境条件改变时，系统的最大功率点电压发生改变，系统的最大功率跟踪就会产生稳定的误差，误差的大小取决于最大功率点电压的偏移大小。

### 3.1.5 提高跟踪效率策略

1) 通过人工干预的方法，定时根据季节的变化调整系统的控制电压给定值  $V_{const}$ ；

2) 在系统中设计太阳能电池组件温度检测装置以及太阳能辐射强度检测装置，根据检测到的外界环境数据自动调整系统控制电压的给定值。

## 3.2 扰动观测法P&O

### 3.2.1 原理、流程图及仿真

扰动观测法的原理是目前实现 MPPT 的常用方法之一。其原理是先在上一时刻控制电压给定值  $U(k-1)$  的基础上进行扰动，将  $(U(k-1)+dU)$  作为此时刻输出电压给定值，再检测输出电流值  $I(k)$ ，计算当前的输出功率  $P(k)$  后，将此时的功率同上一时刻的功率值  $P(k-1)$  相比，若功率增加，则表示扰动方向正确，可朝同一方向继续扰动。若功率值减小，则说明扰动方向错误，需向相反的方向进行扰动。控制流程图如图 9 所示，仿真结果图如图 10 所示。

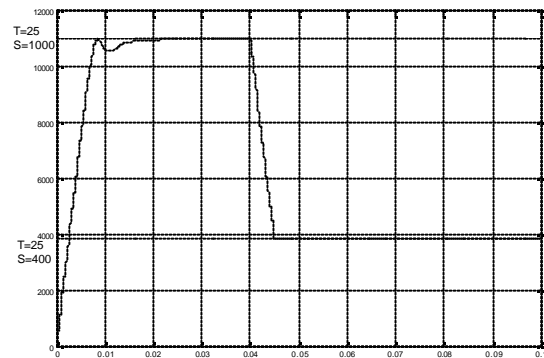
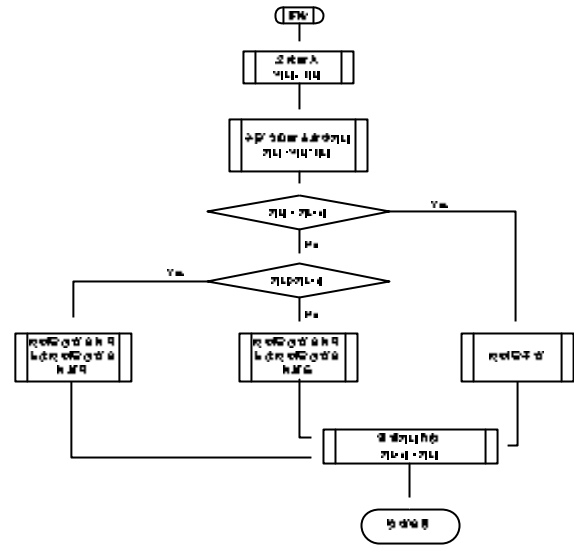


图 10、采用扰动观测法控制的输出功率曲线图  
图中太阳能辐射强度从 0.04s 开始经过 0.005s 由

$1000W / m^2$  变化为  $400W / m^2$ 。

### 3.2.2 控制方法优点分析

采用扰动观测法 P&O 的优点：

- 1) 控制思路简单，实现较为方便；
- 2) 可实现最大功率点的动态跟踪，提高系统的利用效率。

### 3.2.3 控制方法缺点分析

采用扰动观测法 P&O 的缺点：跟踪稳定时，只能在最大功率点附近振荡运行。

### 3.2.4 跟踪误差分析

扰动观测法产生控制误差的原因有两种：

- 1) 由于功率变化过程中的非单调性造成的误差。

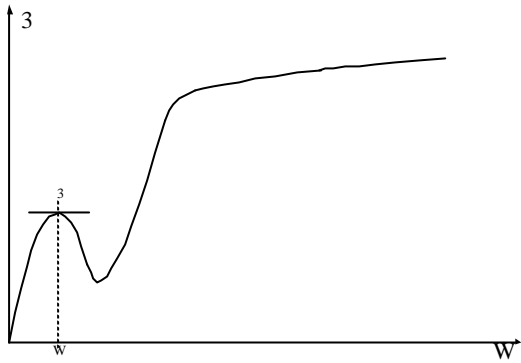


图 11、情况一：功率上升时功率 - 时间曲线图

由图 11 可以看出，扰动观测法是利用功率与时间的函数关系去跟踪功率时间曲线的极值，但是在实际系统中，由于功率随时间的曲线受到系统其他因素的影响而并非一定为一个单极值曲线，因此采用扰动观测法控制时系统在功率时间曲线上的极值点（如图 11 中  $t_1$ ）处将产生跟踪失效。从而造成系统功率输出的损失。

2) 由于扰动观测法自身算法上的不严谨造成的误差。

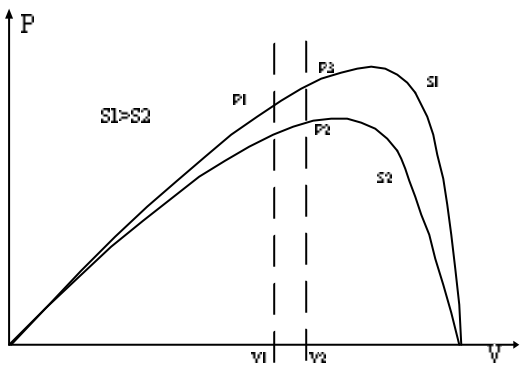


图 12、情况二：外界环境情况变化时功率 - 电压曲线图

由图 12 可以看出，由于一天之中，日照强度是时刻变化的，因此太阳能电池组件的 P-V 曲线也在时刻变化。假设系统已经工作在最大功率点附近，如图 12 中 P1 点处，此时工作电压记为  $V_1$ ，组件输出功率记为  $P_1$ ，当电压扰动方向向右移动到  $V_2$  时，若此时日照强度继续下降，则对应输出功率可能为  $P_2$ ，系统误判扰动方向错误，从而控制工作电压往左移动回到点  $V_1$ ，如果日照强度持续下降，则可能会出现控制系统不断误判，使输出电压不断向左移动，使组件输出功率不断下降，最大功率点跟踪失败。

### 3.2.5 提高跟踪效率策略

由于扰动观测法是利用功率与时间的函数关

系去跟踪功率时间曲线的极值，因此只能通过增加扰动频率和减小扰动步长来改善跟踪效果，减小误判盲区范围。

### 3.3 导纳增量法 (IncCond)

#### 3.3.1 原理、流程图及仿真

由太阳能电池的 P-V 曲线可以看出，在最大功率点处有  $dP/dV=0$ ，通过简单的数学推导可以得出在最大功率点处有以下式子成立：

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2)$$

因此，可以将此式作为判定光伏电池是否工作在最大功率点的依据并对系统进行相应的控制，则可以实现最大功率跟踪。控制流程图如图 13 所示，仿真结果图如图 14 所示。

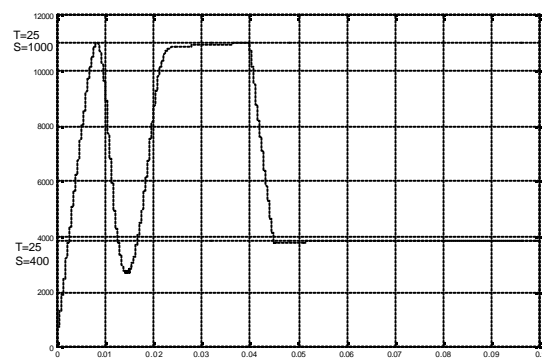
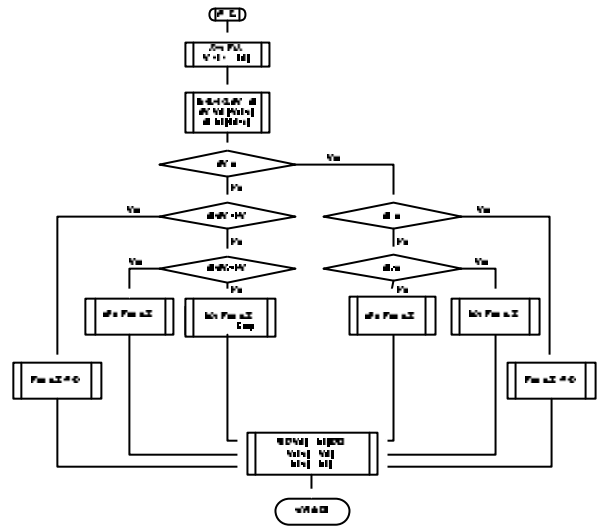


图 14、采用导纳增量法控制的输出功率曲线图

图中太阳能辐射强度从 0.04s 开始经过 0.005s 由

$$1000W/m^2 \text{ 变化为 } 400W/m^2$$

由图 14 可以看出，在启动过程中由于占空比从 0 开始增长的速度慢于功率的变化速度，从而产生较大的功率损失。

### 3.3.2 控制方法优点分析

采用导纳增量法的优点：

- 1) 控制效果好；
- 2) 控制稳定度高，当外部环境参数变化时系统能平稳的追踪其变化，且与太阳能电池组件的特性及参数无关。

### 3.3.3 控制方法缺点分析

采用导纳增量法的缺点：

- 1) 控制算法较复杂，对控制系统要求较高；
- 2) 控制电压初始化参数对系统启动过程中的跟踪性能有较大影响，若设置不当则可能产生较大的功率损失。

### 3.3.4 跟踪误差分析

导纳增量法的数学依据是在最大功率点处功率对电压的导数为0。由于P-V曲线为一单峰曲线，因此采用导纳增量法进行最大功率跟踪时并无原理性误差，为一个较理想的MPPT跟踪方法。

### 3.3.5 提高跟踪效率策略

由于导数的运算是采用差分近似的方法，因此在最大功率跟踪中所产生的误差是由于控制算法中近似计算以及A/D采样误差所产生的，可通过采用数值微分的三点计算公式来计算导数，提高导数的计算精度以及同时通过提高A/D采样精度来提高系统的跟踪精度。

## 3.4 基于梯度变步长的导纳增量法

### 3.4.1 原理、流程图及仿真

由太阳能电池的 P—V 特性曲线图可以看出，在整个电压范围内功率曲线为一单峰函数，在功率最大值  $V_m$  处  $dP/dV=0$ ，在  $V_m$  两端  $dP/dV$  均不为0。若令  $Step = A \times \text{abs}(dP/dV)$ <sup>[6]</sup> 作为导纳增量法中的步长数据，在  $V$  离最大功率点  $V_m$  较远时，跟踪的步长较大；当  $V$  离  $V_m$  较近时，系统跟踪的步长变小。通过设置合适的  $A$ ，同时结合导纳增量法跟踪精度高的优点，可以实现在最大功率的跟踪过程中的变步长跟踪。控制流程图如图 15 所示，仿真结果图如图 16 所示。

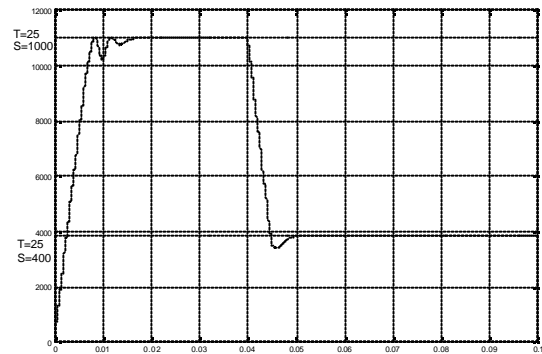
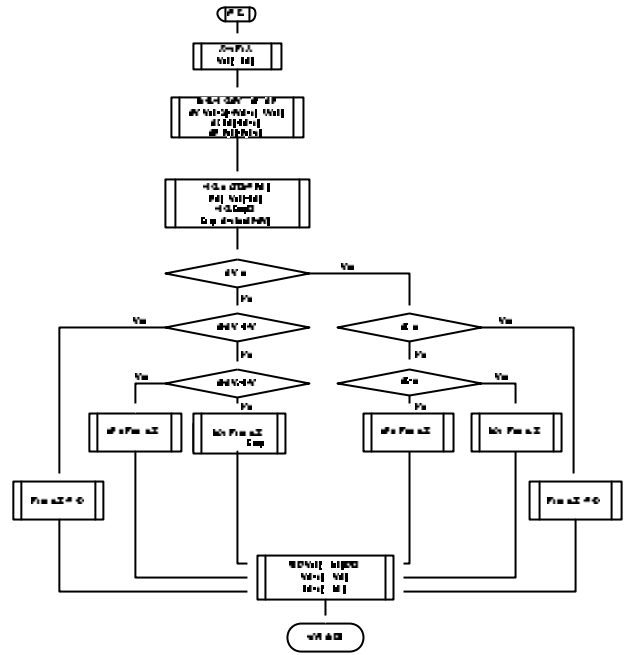


图 16、采用基于梯度变步长的导纳增量法的输出功率曲线图  
图中太阳能辐射强度从 0.04s 开始经过 0.005s 由

$1000W/m^2$  变化为  $400W/m^2$ 。

由图 16 可以看出，在与定步长导纳增量法相同的条件下，变步长的导纳增量法在启动时功率损失大为减少。

### 3.4.2 控制方法优点分析

基于梯度变步长的导纳增量法的优点：

- 1) 控制效果好；
- 2) 控制稳定度高，当外部环境参数变化时系统能平稳的追踪其变化，且与太阳能电池组件的特性及参数无关；
- 3) 控制电压初始化参数对系统跟踪性能影响较小，在系统启动过程中可以实现快速跟踪。

### 3.4.3 控制方法缺点分析

基于梯度变步长的导纳增量法的缺点：

- 1) 在外界环境条件发生改变时，由于是通过

数值微分的方法近似求的梯度，可能出现系统控制量的突变，以及输出功率的波动；

2) 控制算法较复杂。

#### 3.4.4 跟踪误差分析

由于基于梯度变步长的导纳增量法的数学依据仍然是在最大功率点处功率对电压的导数为0。因此采用基于梯度变步长的导纳增量法也无原理性误差。

#### 3.4.5 提高跟踪效率策略

基于梯度变步长的导纳增量法除了可以采用所有导纳增量法的改进方案以外。还可以采用求数值微分的三点公式(3)来近似求解对系统控制电压波动影响较大的电压导数 $dV$ ，这样可以起到对 $dV$ 的滤波作用，减小 $dV$ 的变化率。同时，在求 $dP$ 的数值微分时，为了提高控制系统对功率变化的敏感性，采用两点公式(4)进行 $dP$ 的求解。

$$dV = [V(k-2) - 4V(k-1) + 3V(k)] \quad (3)$$

$$dP = [P(k) - P(k-1)] \quad (4)$$

## 4 结论

综上所述，通过以上几种MPPT方法的比较研究可以看出，CVT控制法在外界环境改变时会产生较大的误差，而其他几种法在一定程度上均能跟踪最大功率点的漂移。进一步分析可以看出，在需要经常重复启动光伏系统以及需要对系统功率跟踪的快速性要求较高的场合适合选用基于梯度变步长的导纳增量法。而在需要稳定长时间运行的光伏系统以及系统的外界环境参数变化较缓慢的场合，则适合选用扰动观测法或者定步长导纳增量法控制，在要求不高的情况下也可以采用CVT控制。

## 5 致谢

本研究受到台达教育发展基金的支持，基金号DREK200501，特此致谢！

on Power Electronics, VOL.20, NO.4. 2005.7:963-973

[3] Nobuyoshi Mutoh, Takatoshi Matuo, Kazuhito Okada, Masahiro Sakai. Prediction-Data-Based Maximum-Power-Point - Tracking Method for Photovoltaic Power Generation Systems. Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual Volume 3, 23-27 June 2002 Page(s):1489 - 1494 vol.3

[4] Chung-Yuen Won, Duk-Heon Kim, Sei-Chan Kim, Won-Sam Kim, Hack-Sung Kim. A New Maximum Power Point Tracker of Photovoltaic Arrays Using Fuzzy Controller. Power Electronics Specialists Conference, PESC '94 Record. 25th Annual IEEE 20-25 June 1994 Page(s):396 - 403 vol.1

[5] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 吴敏达, 沈玉梁, 何慧若. 硅太阳能电池工程用数学模型. 太阳能学报. 2001[4]:409-412.

[6] Weidong Xiao, William G. Dunford. A Modified Adaptive Hill Climbing MPPT Method for Photovoltaic Power Systems. Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual. Volume 3, 20-25 June 2004 Page(s):1957 - 1963 Vol.3

作者简介：

徐鹏威：男，1979年12月生，硕士生，研究方向为电力电子技术。

段善旭：男，1970年生，教授，博士生导师，目前主要研究方向为新能源发电及电能质量控制。

刘飞：男，1977年生，博士生，主要研究方向：电力电子技术。

刘邦银：男，1979年生，博士生，主要研究方向：电力电子技术。

参考文献：

[1] 赵为. 太阳能光伏并网发电系统的研究. 合肥工业大学博士学位论文. 2003:25-44

[2] Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, Massimo Vitelli. Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. IEEE Transactions