

光伏电池建模及 MPPT 控制策略

杨永恒 周克亮

(东南大学电气工程学院 南京 210096)

摘要 提出了一种求取光伏电池模型等效电阻的方法, 并利用 Matlab 的 S-函数构建了光伏电池的仿真模型。在对光伏系统常用的扰动观测法和电导增量法这两种 MPPT 算法进行了深入地分析和比较的基础上, 针对扰动观测法的不足, 提出了一种改进扰动观测 MPPT 方案。最后, 通过仿真和实验对这三种 MPPT 算法进行了测试和比较。结果表明, 所建立的光伏电池模型能够较好地模拟实际光伏模块的特性, 且调试简单, 便于数字实现; 所提出的改进扰动观测 MPPT 算法在一定程度上弥补了传统方法的不足, 与理论分析一致。

关键词: 光伏建模 S-函数 MPPT 扰动观测法 电导增量法

中图分类号: TM615

Photovoltaic Cell Modeling and MPPT Control Strategies

Yang Yongheng Zhou Keliang

(Southeast University Nanjing 210096)

Abstract In this paper, a novel solution to the equivalent resistances of a photovoltaic (PV) cell was developed. The simulation model of a PV array is established using a matlab/s-function. In addition, popular MPPT algorithms for PV systems-perturb and observe algorithm (P&O) and incremental conductance algorithm (INC) are investigated. A modified P&O algorithm is proposed for the improvement of P&O algorithm. Both simulation results and experimental results demonstrate the validity of the model of PV array and the advantages of the proposed P&O MPPT algorithm.

Keywords: PV cell modeling, S-function, MPPT, P&O algorithm, INC algorithm

1 引言

太阳能作为清洁能源之一而得到广泛应用, 但大部分太阳能电池厂家通常仅为用户提供产品在标准测试条件(温度为 25℃, 光照强度为 1000W/m²)下的短路电流 I_{scn} 、开路电压 V_{ocn} 、最大功率点电流 I_{mnp} 、最大功率点电压 V_{mnp} 、最大功率 P_{maxn} 、电流

国家自然科学基金(50977013)、高等学校博士点基金(20070286013)和江苏省六大人才高峰计划(2008116)资助项目。

温度系数 K_I 和电压温度系数 K_V 等值。如何根据这些数据来获得仿真模型, 是光伏电池建模工作需要考虑的重点问题之一。

另一方面, 对于分布式发电系统, 必须适时追

踪最大功率点以最大限度利用能量, 也就是我们所熟知的最大功率点追踪问题(Maximum Power Point Tracking, MPPT)。当前, 有两种基本的 MPPT 方法: 扰动观察法(P&O)和电导增量法(INC)。其中, 扰动观察法结构简单、被测参数少, 而电导增量法在外界环境发生迅速变化时, 其动态性能和跟踪特性方面比扰动观察法好^[2-3]。此外还有神经网络法、恒定电压法和恒定电流法等。

本文提出了一种求取光伏电池模型等效电阻的方法, 并在 Matlab/Simulink 环境下, 建立了光伏电池的仿真模型。在此基础上, 重点分析比较了 P&O 方法和 INC 方法, 并针对 P&O 方法的不足, 提出一种改进方案。最后, 通过仿真和实验验证了所提出的方法能有效地改善 MPPT 性能。

2 光伏电池建模

2.1 数学模型

光伏电池的等效电路如图 1 所示, 根据电子电路理论可得光伏电池 $I-V$ 方程^[1,4]

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nkTN_s/q}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

式中, I_{ph} 为光伏电池的光电流; I_0 为二极管反向饱和电流; R_s 为等效串联电阻; R_p 为等效并联电阻; n 为二极管理想因子 ($1 \leq n \leq 2$)。 q 为电荷量, $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$; k 为波尔兹曼常量, $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{J/K}$; N_s 为串联光伏单元个数; T 为电池温度 ($^{\circ}\text{F}$)。

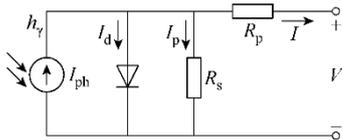


图 1 光伏电池的等效电路

Fig.1 The equivalent circuit of a PV cell

为求解式 (1) 而获得光伏电池的 $I-V$ 曲线, 需要知道 I_{ph} 、 I_0 、 R_s 、 R_p 和 N_s 等值及它们与光伏电池的温度和光照强度的关系。

2.1.1 短路情况

在短路情况下, 忽略二极管电流^[3] I_d 和流经并联等效电阻的电流 I_p , 得任意温度任意光照下的光电流

$$I_{ph} = [I_{scn} + K_1(T - T_{ref})] \frac{S}{S_{ref}} \quad (2)$$

式中, S 为光照强度; T_{ref} 为参考温度, $T_{ref} = 298.15^{\circ}\text{F}$; S_{ref} 为参考光照强度, $S_{ref} = 1000 \text{W/m}^2$ 。

2.1.2 开路情况

标准测试条件下, 开路时二极管的电压 $V_d = V_{ocn}$, 且开路电压仅和电池温度有关^[3,5,6]。那么, 任意温度下的开路电压为

$$V_{oc} = V_{ocn} + K_V(T - T_{ref}) \quad (3)$$

2.1.3 最大功率点

由式 (1) 可得最大功率方程

$$P_{max} = V_m I_m = V_m \left\{ I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{nkTN_s/q}\right) - 1 \right] - \frac{V_m + I_m R_s}{R_p} \right\}$$

(4)

式中, V_m 和 I_m 分别为最大功率点 P_{max} 对应的电压和电流。

2.1.4 反向饱和电流和二极管理想因子

反向饱和电流与温度的关系可由下式给出^[1,4,5]

$$I_0 = I_{0n} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} \exp\left(\frac{E_g}{nk} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)\right) \quad (5)$$

式中, E_g 为半导体带能 (对于多晶硅, 在 25°C 时的带能 $E_g = 1.12 \text{eV}$); I_{0n} 是在标准测试条件下的二极管反向饱和电流^[1], 由下式给出

$$I_{0n} = \frac{I_{scn}}{\exp\left[\frac{qV_{ocn}}{nkT_{ref}N_s}\right] - 1} \quad (6)$$

关于二极管的理想因子 n , 文献^[1,3]讨论了 n 的估算方法。本文直接给出 $n = 1.3$, 如果有必要, 可再进行模型的修正以确定最佳值。

2.1.5 等效电阻

在标准测试条件下, 由式 (4) 可得 R_s 与 R_p 之间的关系

$$R_p = g(R_s) = V_{mn} (V_{mn} + I_{mn} R_s) \div \left\{ V_{mn} I_{scn} - V_{mn} I_{0n} \left[\exp\left(\frac{V_{mn} + I_{mn} R_s}{nkT_{ref}N_s/q}\right) - 1 \right] - P_{maxn} \right\} \quad (7)$$

显然, 对于每一个 R_s 都有一个 R_p 与之相对应^[1], 但有且仅有一组电阻满足 $P_{max} = P_{maxn}$, 即在标准测试条件下所建立的模型的最大功率与产品实际的最大功率相匹配。参考文献^[1]给出了求解的迭代算法。

由 (7) 式可得 R_p-R_s 曲线, 如图 2 所示。可知, R_s 选取过大会导致 R_p 出现负值。与参考文献^[1]不同, 在求取 R_s 时应在 R_p 的极点附近迭代, 这样可以很快的求得最佳解。求得的 R_p 较大, 符合实际太阳能光伏电池的特点: $R_p \gg R_s$ 。本文利用图 2 求得 R_s 和 R_p 。

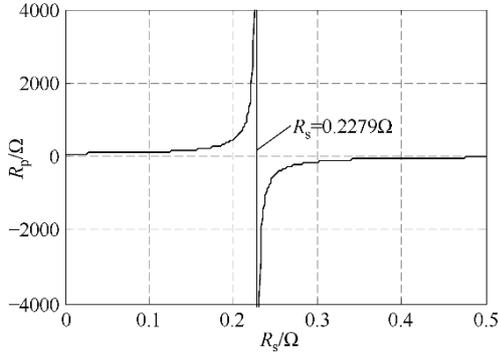
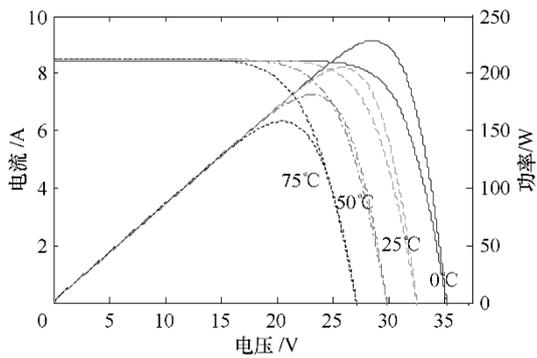


图 2 R_p - R_s 曲线
Fig.2 R_p - R_s curve

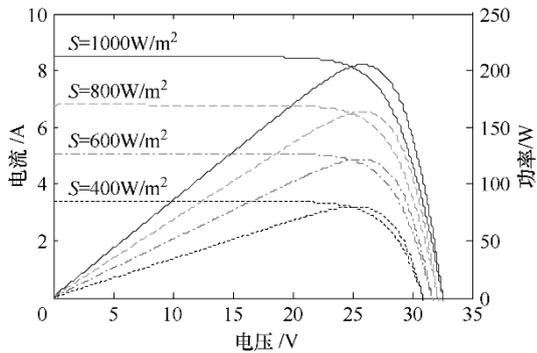
2.2 仿真模型示例

以 Solar Power Inc. 的 SP205 太阳电池模块为例。在 Matlab 中利用上述数学模型建立了基于 S -函数的仿真模型，求得的仿真模型在标准测试条件下的参数为：短路电流 $I_{scn}=8.486A$ ，开路电压 $V_{ocn}=32.610V$ ，最大功率点电流 $I_{mn}=7.888A$ ，最大功率点电压 $V_{mn}=25.989V$ ，最大功率 $P_{maxn}=205.090W$ ，等效电阻 $R_s=0.227\Omega$ 和 $R_p=12.81k\Omega$ 。

对比 SP205 的用户手册可知，所建模型能较好的模拟实际光伏电池。可利用此模型得到太阳能光伏电池在不同温度、不同光照强度下的 $I-V$ 和 $P-V$ 特性曲线，如图 3 所示。



(a) 不同温度 ($S=1000W/m^2$)



(b) 不同光照 ($T=25^\circ C$)

图 3 SP205 仿真模型 $I-V/P-V$ 曲线

Fig.3 $I-V/P-V$ curves of SP205 simulation model

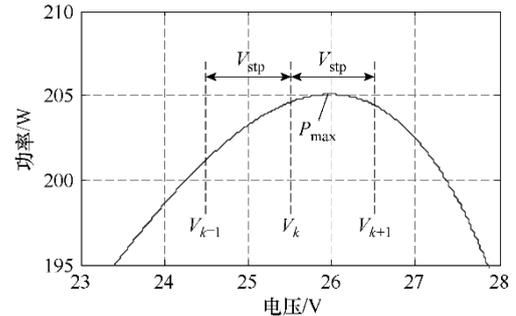
3 MPPT 控制

根据光伏电池的特性，其输出功率会随着温度和光照强度的变化而变化；在一定的温度和光照强度下其输出功率会随着工作点的变化而变化且存在最大功率点。要充分利用光能发电，光伏系统需采用最大功率追踪 (MPPT) 控制。最常用的 MPPT 方法有扰动观测 (P&O) 法和电导增量 (INC) 法。

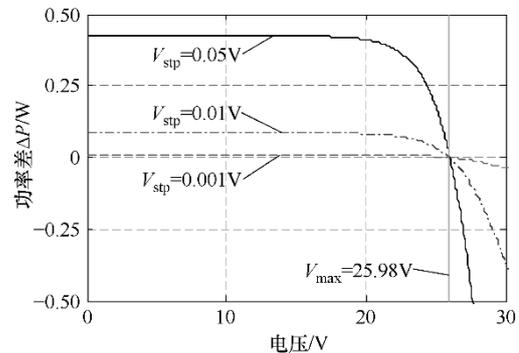
3.1 扰动观测法

扰动观测方法又称爬山法，有电流型和电压型两种。以电压型为例，其控制原理为：给电池电压一定的扰动 V_{stp} ，采样电池的输出电压和电流，并计算电压和功率变化量 $\Delta V=V_k-V_{k-1}$ 和 $\Delta P=V_k I_k-V_{k-1} I_{k-1}$ ，根据 ΔV 和 ΔP 的变化方向，不断地对光伏电池的工作电压进行扰动，逐步靠近最大功率点。

由扰动观测方法的原理可知，在稳态时，定扰动步长的扰动观测法，工作点电压会在最大功率点附近摆动，由图 4a 可知。电压的波动，必然造成功率损耗，这是扰动观测法最主要的缺点 [9]。同时由图 4 可知功率损耗以及扰动观测方法的跟踪效果和扰动步长有直接的关系。



(a)



(b)

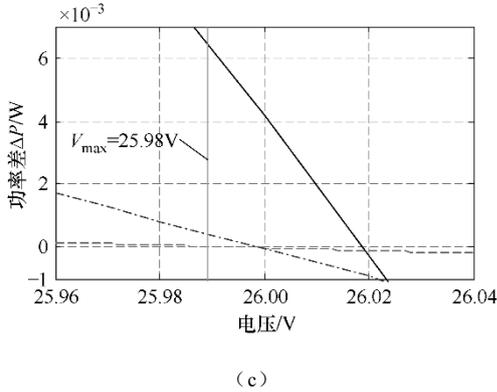


图4 功率差与扰动步长关系

Fig.4 Relationship between ΔP and perturbing step

(1) $\Delta P=f(V)$ 的零点即为所获得的最大功率点的电压,如图 4c 所示,扰动步长越大,该零点距最大功率点电压越远,跟踪误差变大。

(2) 扰动步长越大,跟踪速度越快。

(3) 当外界环境变化剧烈时,扰动观察法有可能会产生电压或者电流崩溃现象,从而导致判断错误和引起误动作^[10]。这可由图 3 得知,电压型扰动观测法能够承受较大的光照变化,较大的环境温度变化会使其崩溃,而电流型与其相反。

考虑上述因素,对扰动观测法进行改善,具体的措施为:当 $|\Delta P|>P_{th}$ 时,扰动为固定步长 V_{stp1} ;当 $|\Delta P|\leq P_{th}$ 时,扰动为固定步长 V_{stp2} ,这样可以使得跟踪速度相对较快,功率损耗较小。其算法流程图如图 5 所示。

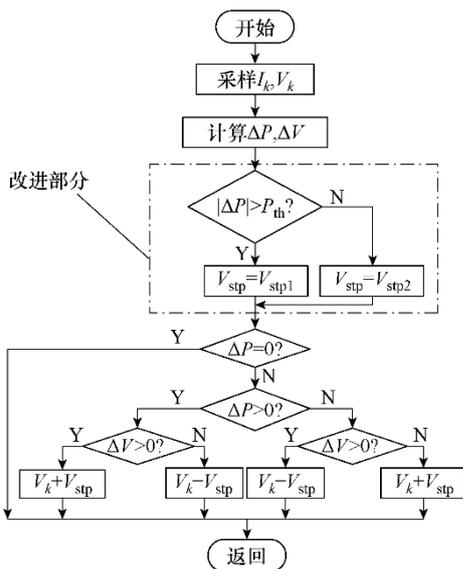


图5 改进的 P&O 控制流程图

Fig.5 Flowchart of modified P&O algorithm

3.2 电导增量法

由图 3 和图 4a 可知,在最大功率点满足 $P=IV$, 对其求微分并整理得到

$$dPV @ \frac{dP}{dV} = I + \frac{dI}{dV} V @ I + \frac{\Delta I}{\Delta V} V \quad (8)$$

于是,可由 dPV 实现最大功率点的跟踪,其工作原理描述为:当 $dPV < 0$ 时,最大功率点在参考电压左侧,减小参考电压;当 $dPV = 0$ 时,不进行扰动,电池即工作在最大功率点处;当 $dPV > 0$ 时,最大功率点在参考电压右侧,增大参考电压。可见,电导增量法是电压型扰动观测法的一个变形^[10]。

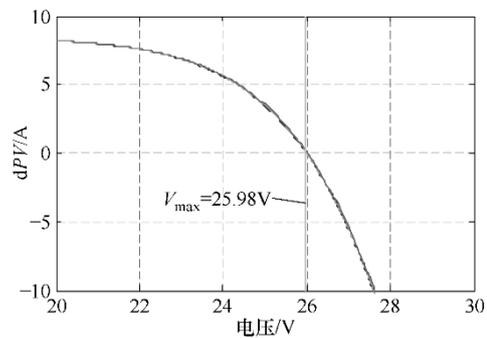
由工作原理知,INC 方法存在和 P&O 方法一样的问题:稳态时,电压会在最大功率点附近摆动,造成功率损耗,且功率损耗与扰动步长有直接关系,如图 6 所示。分析可得如下结论:

(1) 步长越大,跟踪误差越大,功率损耗越大。

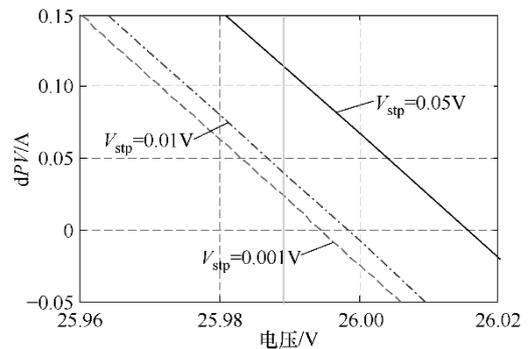
(2) 对于不同的扰动步长,电导增量法的跟踪速度差别不大,如图 6b 所示。

(3) INC 算法较复杂,并且用数字方法实现时,对最大功率点的判断容易出现误差。另外这一跟踪法的实现要借助微处理器或数字信号处理器

(DSP),从而增加了整个系统的复杂性及费用^[9]。



(a)



(b)

图 6 dPV 和扰动步长关系

Fig.6 Relationship between dPV and perturbing step

3.3 算法比较

通过上述分析有

$$dPV = I + \frac{\Delta I}{\Delta V} V \quad (9)$$

$$\Delta P = (I + \Delta I)(V + \Delta V) - IV = dPV\Delta V + \Delta I\Delta V \quad (10)$$

那么，当 INC 方法跟踪到最大功率点时， $dPV=0$ ，而此时 $\Delta P \neq 0$ ，即 P&O 方法还未寻到最大功率点。这正是 INC 方法的优点，能够快速跟踪最大功率点。同样，根据式 (10) 可知，在相同扰动步长下，电导增量法的功率损耗要小于扰动观察法的功率损耗。

3.4 仿真分析

太阳能光伏系统的结构图如图 7 所示。分别对三种 MPPT 算法（一般的扰动观测法、改进的扰动观测法及电导增量法）进行仿真，以比较验证三者的优缺点。利用 Matlab/Simulink 建立仿真模型，MPPT 控制模块采用 S-函数实现。

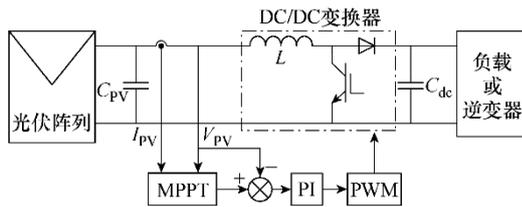


图 7 太阳能光伏系统结构图

Fig.7 Diagram of the PV energy conversion system

仿真模型的参数： $L=7\text{mH}$ ， $C_{PV}=47\mu\text{F}$ ， $C_{dc}=1100\mu\text{F}$ ，负载为纯电阻负载 $R=100\Omega$ ，PWM 开关频率 $f_k=10\text{kHz}$ ，PI 控制器比例增益 $k_p=5$ ，积分增益 $k_i=10$ 。仿真结果如图 8 所示，其中光照强度在 $t=1.5\text{s}$ 时由 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 变为 $600\text{W}/\text{m}^2$ ，改进的 P&O 方法的步长为 $V_{\text{stp}1}=0.01\text{V}$ 和 $V_{\text{stp}2}=0.001\text{V}$ 。

对比可知，改进的 P&O 方法较常规 P&O 方法一定程度上能加快寻优速度，使功率波动也较小，损耗较小，但不是很明显，这和仿真采样步长以及功率阈值有一定关系，有待进一步改善。

4 实验结果

实验利用 Dspace 系统实现 MPPT 数字控制并采样实时数据，光伏阵列采用 Agilent E4350B Solar Array Simulator 仿真设备，太阳电池的额定参数为 $I_{sc}=8\text{A}$ ， $I_m=7.5\text{A}$ ， $V_m=25.8\text{V}$ ， $V_{oc}=32.6\text{V}$ ， $P_{max}=193.5\text{W}$ 。其他实验参数： $L=7\text{mH}$ ， $C_{dc}=1100\mu\text{F}$ ， $R=100\Omega$ ，PI 控制器比例增益 $k_p=0.5$ ，积分增益 $k_i=10$ 。实验结果如图 9 所示，电池的光照强度在 $t=10\text{s}$ 左右发生跳变，10s 后回到标准测试条件的工作状态，改进的 P&O 方法的步长为 $V_{\text{stp}1}=0.01\text{V}$ 和 $V_{\text{stp}2}=0.001\text{V}$ 。

比较输出功率进入稳态的时间，可得 $\Delta t_1 > \Delta t_2$ ，而 Δt_2 和 Δt_3 差别不大，改进的 P&O 方法能够加快寻优速度。由于电路损耗、采样频率和扰动步长等影响，三种方法都存在误差，可通过减小采样步长得到改善，不再赘述。

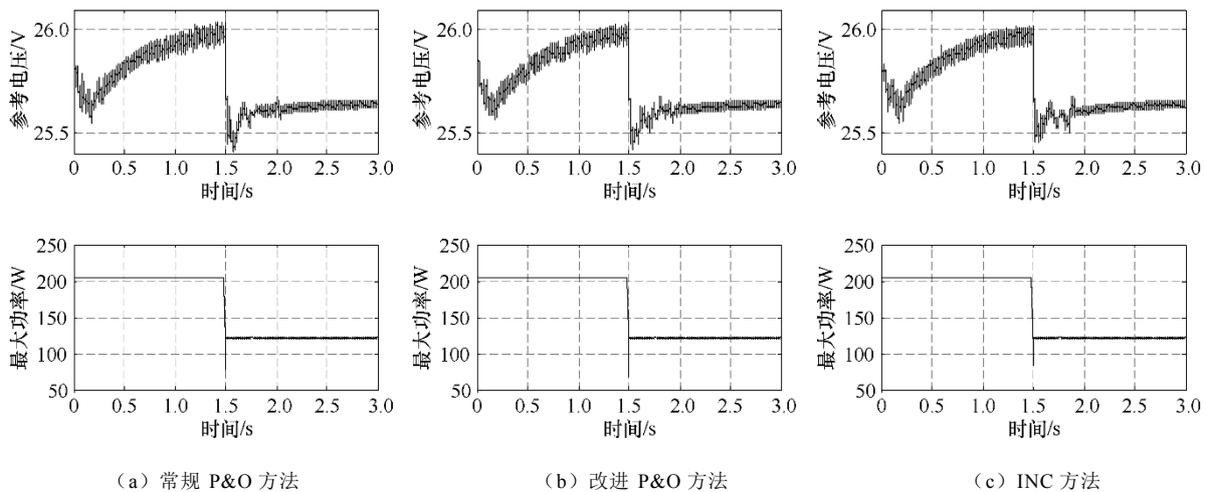
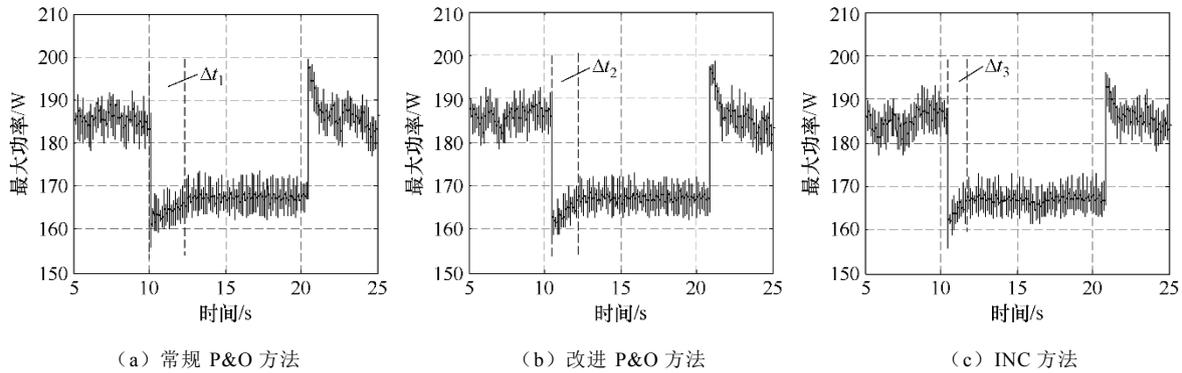


图 8 光伏电池输出功率和参考电压 ($V_{\text{stp}}=0.001\text{V}$)

Fig.8 PV array output power and reference voltage ($V_{\text{stp}}=0.001\text{V}$)

图9 实验结果 ($V_{stp}=0.001V$)Fig.9 Experimental results ($V_{stp}=0.001V$)

5 结论

本文分析了光伏电池的建模及其 MPPT 跟踪等问题, 提出了一种求取光伏电池等效电阻的方法。利用所建立的仿真模型, 论文重点分析讨论了电压型扰动观测法和电导增量法两种常用 MPPT 算法的优缺点。针对扰动观测法的不足, 提出了改善方案。仿真和实验结果均表明所建立的模型和提出的改进方案是合理的, 可运用到其他光伏发电系统中。例如, 光伏并网发电系统和分布式发电的孤岛效应检测等。后续工作可对电压型和电流型扰动观测法做详细分析论证。

参考文献

- [1] Villalva M G, Gazoli J R, Filho E R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2009, 24(5): 1198-1208.
- [2] Gow J A, Manning C D. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies [J]. IEE Processing Electronics Power Applications, 1999, 146(2): 193-200.
- [3] Xiao W, Dunford W G, Capel A. A novel modeling method for photovoltaic cells [C]. 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004, 3: 1950-1956.
- [4] Ramaprabha R, Mathur B L, Sharanya M. Solar array modeling and simulation of MPPT using neural network[C]. Proceeding of International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conversion, 2009: 1-5.
- [5] Rauschenbach H S. Solar cell array design handbook[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1980.
- [6] Hu Chenming, White Richard M. Solar Cells [M]. New York: McGraw-Hill, 1983.
- [7] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电实用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [8] Solar Power Inc. SP Series Solar Module Model SP205 Datasheet. 2010.
- [9] Femia N, Petrone G, Spagnuolo G, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4): 963-973.
- [10] 王岩. 光伏发电系统 MPPT 控制方法的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- [11] 龚菲. 太阳能光伏路灯系统中 MPPT 控制器的研究与控制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [12] Azevedo G M S, Cavalcanti M C, Oliveira K C, et al. Evaluation of maximum power point tracking methods for grid connected photovoltaic systems[C]. Power Electronics Specialists Conference, 2008: 1456-1462.
- [13] Ropp M E, Gonzalez S. Development of a Matlab/Simulink model of a single-phase grid-connected photovoltaic system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1): 195-202.
- [14] Ciobotaru M, Teodorescu R, Blaabjerg F. Control of single-stage single-phase PV inverter[C]. European Conference on Power Electronics and Applications, 2005: 1-10.
- [15] Wu Libo, Zhao Zhengming, Liu Jianzheng, et al. Modified MPPT strategy applied in single-stage grid-connected photovoltaic system[C]. Proceedings of the

Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005, 2: 1027-1030.

- [16] Luo Fang, Xu Pengwei, Duan Shangxu, et al. A variable step maximum power point tracking method using differential equation solution[C]. 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and

Applications, 2007: 2259-2263.

作者简介:杨永恒 男, 1987年生, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动、新能源发电技术。周克亮 男, 1970年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、新能源发电技术、控制理论与应用等。