

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.09.021

一种适用于单峰光伏曲线的 MPPT 方法^{*}

王一蒙¹, 李玉玲^{1*}, 吴健儿², 王管建¹

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 杭州市电力局, 浙江 杭州 310009)

摘要:针对传统单峰光伏曲线 MPPT 方法跟踪速度慢, 寻优精度不高的问题, 提出了一种基于抛物线预测的功率闭环最大功率跟踪 (MPPT) 方法。该方法通过用光伏特性曲线上的 3 个点来拟合一个二次函数, 用函数驻点的实际功率值来迭代地预测和修正最大功率点 (MPP) 的位置, 最终使得光伏系统工作在最大功率点。此外, 针对光伏系统采用合理的初始点选取策略, 提升了 MPPT 的速度。给出了光伏系统的 MPPT 控制框图, 搭建了基于 Buck-Boost 电路的直流光伏系统硬件平台。使用抛物线预测法进行了光伏电池组件的最大功率跟踪, 与变步长扰动观察法 MPPT 结果进行了比较, 验证了该方法的可行性和实用性。研究结果表明: 这种基于抛物线预测的单峰值 MPPT 方法具有跟踪速度快, 稳态无振荡的优良性能。

关键词:光伏系统; 最大功率跟踪; 抛物线预测; 功率闭环

中图分类号: TM914

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)09-1060-05

MPPT scheme applicable to photovoltaic single-peak curve

WANG Yi-meng¹, LI Yu-ling¹, WU Jian-er², WANG Guan-jian¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Hangzhou Municipal Electric Power Bureau, Hangzhou 310009, China)

Abstract: Aiming at the problem that traditional single-peak PV curve MPPT method has low tracking speed and low precision, a para-curve predictive power close-loop maximum power point tracking (MPPT) method was proposed. By quadratic fitting, the actual power value at the stationary point of the fitting function was considered to predict and revise the position of maximum power point, making PV system work on the maximum power point. Initial points were chosen reasonably to speed up MPPT. Schematics of photovoltaic control system with MPPT were presented, and the hardware platform of DC photovoltaic system based on Buck-Boost circuit was built. The algorithm proposed was implemented in experimental prototype and compared with variable-step perturbation and observation method, which proved the feasibility and effectiveness of the scheme. The results indicate that the single-peak MPPT scheme proposed has good performance with high tracking speed and favorable stability.

Key words: photovoltaic system; maximum power point tracking (MPPT); para-curve predictive; power closed loop

0 引言

在正常状况下, 光伏电池的功率电压 ($P-U$) 输出

特性曲线为单峰函数。光伏电池与普通二极管一样, 具有非线性的输出特性。它的输出电压和电流受光照强度和电池温度的影响, 当光照强度、温度等

收稿日期: 2017-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51277164)

作者简介: 王一蒙 (1994-), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事光伏太阳能发电方面的研究. E-mail: wangym307@163.com

通信联系人: 李玉玲, 女, 副教授, 硕士生导师. E-mail: liyl@zju.edu.cn

环境条件改变时,光伏电池组件的输出特性和输出功率也会发生改变,最大功率点的位置也随之改变。最大功率点跟踪技术能增加光伏模块的输出^[1-2],提升发电效率。

传统的 MPPT 寻优方法有恒定电压法^[3]、电导增量法^[4]、扰动观察法^[5]、PSO 法等^[6]。恒定电压法虽然能使得系统稳定工作,但无法保证精确地工作在最大功率点,由此造成功率损耗;电导增量法和扰动观察法属于闭环控制方法,能使光伏系统工作在最大功率点附近,但在稳定后有波动,仍产生持续的功率损耗;PSO 算法实现复杂,收敛速度过慢。

本研究将针对光伏电池的输出特性曲线提出一种基于抛物线预测的功率闭环最大功率跟踪策略,并通过实验以验证该方法是否具有收敛快速、稳定后无波动的优良特性。

1 光伏电池输出特性曲线分析

光伏电池实际上是一个 PN 结,PN 结在光照下产生电动势的现象称为光生伏打效应。PN 结受到光的激发将产生电子——空穴对,从而产生势垒电场,电子在势垒电场的作用下会向 N 区移动,而空穴会向 P 区移动,PN 结附近就形成与势垒电场相反的光生电动势 E 。 E 的一部分与势垒电场抵消,另一部分使 N 区带负电,P 区带正电,这样就产生了光生伏打效应。光伏电池等效模型如图 1 所示。

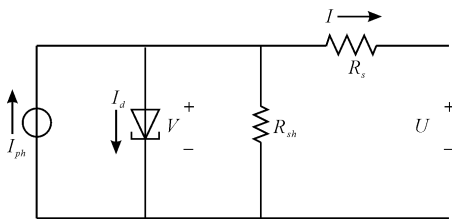


图 1 光伏电池模型等效电路

光伏电池的伏安特性曲线是二极管在黑暗时的伏安特性曲线与光生电流的叠加^[7],为:

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

式中: n —二极管的理想系数; q —单位电荷量, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; k —玻尔兹曼常数; T —绝对温度; I_0 —二极管反向饱和电流; I_{ph} —光生电流; V —二极管两端的电压; U —光伏电池端电压。

其中 $V = U + IR_s$,又因为 R_s 为低阻值,一般数量级为 $\text{m}\Omega$, R_{sh} 为高阻值,一般数量级为 $\text{k}\Omega$,所以可将 R_s 看做短路, $U = V$, R_{sh} 看做开路, V/R_{sh} 忽略不计。则伏安特性曲线方程为:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (2)$$

由于一个太阳能电池只能产生约 0.5 V 的电压,为满足实际应用的需要,通常将一定数量的太阳能电池连接成组件。在确定的温度和光照条件下,某光伏电池组件的输出特性曲线如图 2 所示。

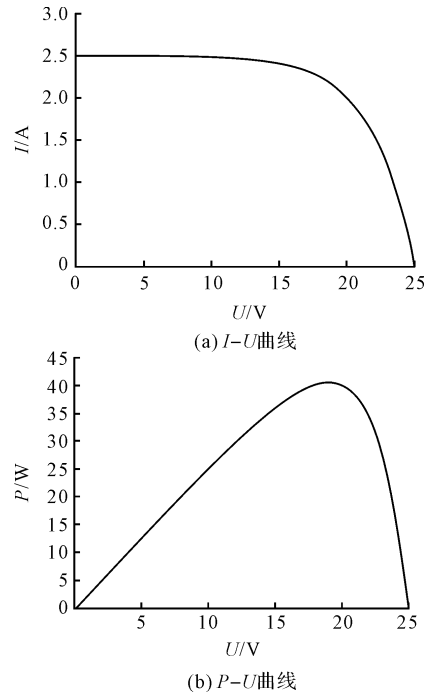


图 2 确定温度和光照下光伏电池的 $I-U$ 曲线和 $P-U$ 线

可以看出, $P-U$ 曲线是一个拥有极大值的单峰函数。

2 抛物线预测法在光伏系统中的应用

2.1 抛物线预测法原理

抛物线预测法的基本思想是,在极大点附近,用二次三项式 $\varphi(x)$ 逼近目标函数 $f(x)$,令 $\varphi(x)$ 与 $f(x)$ 在三点 $x_1 < x_2 < x_3$ 处有相同的函数值,并假设 $f(x_1) < f(x_2)$, $f(x_2) > f(x_3)$ 。

令:

$$\varphi(x) = a + bx + cx^2 \quad (3)$$

又令:

$$\varphi(x_1) = a + bx_1 + cx_1^2 = f(x_1) \quad (4)$$

$$\varphi(x_2) = a + bx_2 + cx_2^2 = f(x_2) \quad (5)$$

$$\varphi(x_3) = a + bx_3 + cx_3^2 = f(x_3) \quad (6)$$

解方程组,求二次逼近函数的系数 b 和 c 。为了书写方便,记做:

$$B_1 = (x_2^2 - x_3^2)f(x_1) \quad (7)$$

$$B_2 = (x_3^2 - x_1^2)f(x_2) \quad (8)$$

$$B_3 = (x_1^2 - x_2^2)f(x_3) \quad (9)$$

$$C_1 = (x_2 - x_3)f(x_1) \quad (10)$$

$$C_2 = (x_3 - x_1)f(x_2) \quad (11)$$

$$C_3 = (x_1 - x_2)f(x_3) \quad (12)$$

$$D = (x_1 - x_2)(x_2 - x_3)(x_3 - x_1) \quad (13)$$

则由方程可以得到:

$$a = f(x_1) - \frac{B_1 + B_2 + B_3}{D}x_1 + \frac{C_1 + C_2 + C_3}{D}x_1^2 \quad (14)$$

$$b = \frac{B_1 + B_2 + B_3}{D} \quad (15)$$

$$c = -\frac{C_1 + C_2 + C_3}{D} \quad (16)$$

为求 $\varphi(x)$ 的极大点,令:

$$\varphi'(x) = b + 2cx = 0 \quad (17)$$

由此解得:

$$x = -\frac{b}{2c} \quad (18)$$

把 $\varphi(x)$ 的驻点 x 记作 x_k :

$$x_k = \frac{B_1 + B_2 + B_3}{2(C_1 + C_2 + C_3)} \quad (19)$$

这样,把 x_k 作为 $f(x)$ 的极大点的一个估计值,再从 x_1, x_2, x_3, x_k 中选择目标函数最大的点及其左右两点,给予相应的上标,求出极大点的新的估计值 x_k ,以此类推,产生点列,在一定条件下,由 x_k 组成的点列将收敛于极值点,在求解实际问题时只要达到所需要的精度即可终止迭代,迭代终止条件一般用 $f(x)$ 的下降量来控制,即当:

$$\frac{|f(x_{k+1}) - f(x_k)|}{f(x)^k} < \varepsilon, \text{ 终止迭代。}$$

2.2 抛物线预测法在光伏 MPPT 中的应用

由于在正常情况下,光伏系统的功率 - 电压特性曲线是单峰值函数 $f(x)$,其中: x — P - U 光伏特性曲线中的 U , $f(x)$ — P - U 曲线中的 P 。所以可以用该抛物线预测法来进行单峰曲线的最大功率跟踪。基本思想是用初始的 3 个点 $(U_1, P_1), (U_2, P_2), (U_3, P_3)$ (其中中

心点 2 的功率值 $P_2 > P_1, P_2 > P_3$) 来拟合出一个二次函数 $\varphi(x)$,按式 (19) 求出该二次函数 $\varphi(x)$ 的驻点 x_k ,其中 $x_1 = U_1, x_2 = U_2, x_3 = U_3, f(x_1) = P_1, f(x_2) = P_2, f(x_3) = P_3, U_k = x_k$ 。将驻点电压值 U_k 代入光伏系统中测量出反馈回来的实际功率值 P_k 。这样就得到了光伏 P - U 特性曲线上的 4 个点 $(U_1, P_1), (U_2, P_2), (U_3, P_3)$ 和 (U_k, P_k) ,通过比较 P_k 与原来 3 个点中最大功率点 P_2 的大小以及 U_1 和 U_k 来确定新的 3 个拟合点。即这 4 个点中功率最大的点成为新的中心点 (U_2, P_2) ,其左右两个点分别成为新的 (U_1, P_1) 和 (U_3, P_3) ,剩下的一个点舍去。即:

若 $P_k > P_2$ 且 $U_k > U_2$,则 $U_1 = U_2, U_2 = U_k, U_3 = U_3$;

若 $P_k > P_2$ 且 $U_k < U_2$,则 $U_1 = U_1, U_3 = U_2, U_2 = U_k$;

若 $P_k < P_2$ 且 $U_k > U_2$,则 $U_1 = U_1, U_2 = U_2, U_3 = U_k$;

若 $P_k < P_2$ 且 $U_k < U_2$,则 $U_1 = U_k, U_2 = U_2, U_3 = U_3$ 。

新的 P_1, P_2, P_3 仍为 U_1, U_2, U_3 所对应的 P - U 特性曲线上的功率值。以此 3 点继续进行计算迭代,直至满足收敛条件 $|P_k - P_2|/P_2 < 0.01$,此时的 (U_2, P_2) 即为我们需要寻找的最大功率点。

抛物线预测法的流程图如图 3 所示。

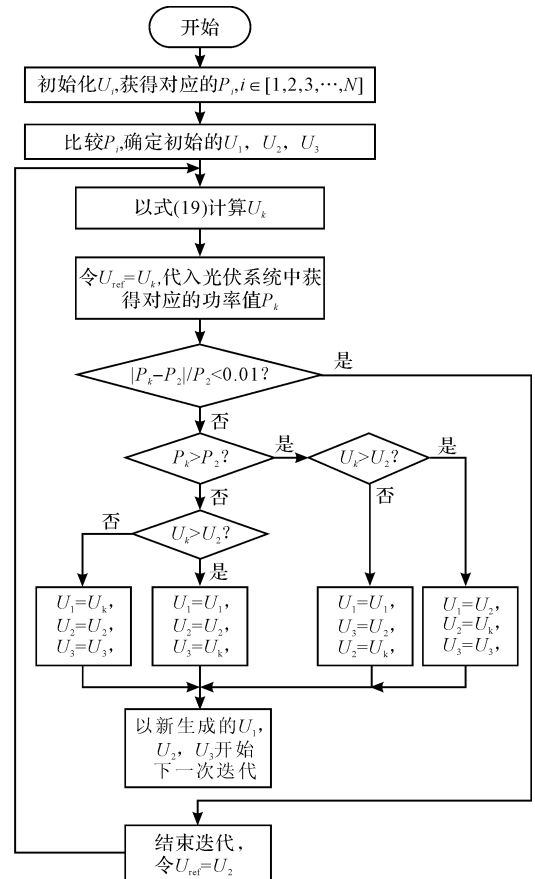


图 3 基于抛物线预测法的光伏 MPPT 流程图

由于功率反馈环的存在, U_1 、 U_2 、 U_3 所包含的电压区间 $[U_1, U_3]$ 始终将最大功率点电压包含在内, 最终收敛的最大功率点是可靠的。

2.3 初始点的选取

在实际的光伏系统中, 采用抛物线预测法, 首先需要确定 3 个初始点。为了兼顾效率与精度, 本研究采用均匀撒点并比较功率值的方法来确定初始点。由于初始点需要满足 $U_1 < U_2 < U_3$ 且 $P_2 > P_1, P_2 > P_3$, 本研究首先在光伏电池组件输出电压 U_{pv} 为 $0 \sim U_{oc}$ 的区间上等间隔地选取 N (可取 4 ~ 8 之间的整数) 个点, 测量出其对应的功率值 P_{pv} , 在这 N 个点 $(U_i, P_i) (i = 1, 2, \dots, N)$ 中功率最大的点作为初始的中心点 (U_2, P_2) , 其左右相邻的两个点分别作为 (U_1, P_1) 和 (U_3, P_3) 。然后本研究进行开始迭代, 计算出拟合的二次函数的驻点 U_k , 作为对最大功率点电压值的估计值, 将 U_k 作为 U_{ref} 代入光伏系统中, 测量出反馈的 P_k , 然后比较 P_2 与 P_k 的大小及 U_k 与 U_2 的大小, 来确定新的 $(U_1, P_1), (U_2, P_2), (U_3, P_3)$ 。如此迭代, 直至收敛到最大功率点。

3 实验与分析

3.1 实验平台介绍

为验证抛物线预测法在光伏 MPPT 的有效性和可行性, 本研究搭建了基于 Buck-Boost 变换器的光伏系统实验平台^[8]。光伏模拟器输出电压 U_{pv} 的参考电压 U_{ref} 的 PI 调节周期为 1 ms, Buck-Boost 变换器的 MOSFET 由 TI 公司生产的 TMS320F28335 接驱动电路控制开断, 负载为直流电子负载, 设置为固定电压模式。为了保证每次改变 U_{ref} 的值时光伏模拟器输出电压已经达到稳定, 设置 MPPT 调节周期为 100 ms (远大于 PI 调节周期 1 ms), 即每 100 ms 改变一次 U_{ref} 的值。

基于抛物线预测法的光伏阵列 MPPT 如图 4 所示。

光伏电池组件经 Buck-Boost 变换器输出电压 U_o , 为方便控制, 设置负载为恒压负载 $U_o = 80$ V, 通过改变 PWM 控制信号的占空比 d 即可改变 U_{pv} ^[9]。实际工作中如果为非恒压的电阻负载, 通过改变占空比 d 亦可改变 U_{pv} , 实现 MPPT。

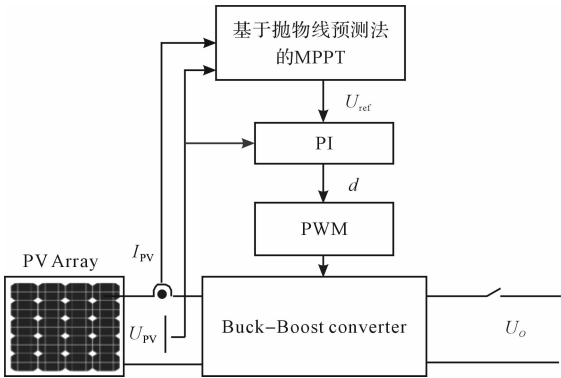


图4 带有 MPPT 的光伏系统框图

3.2 实验结果

为了验证抛物线预测法在光伏 MPPT 的实用性, 本研究在搭建的实验平台上对光伏特性曲线进行试验, 光伏特性曲线如图 5 所示。

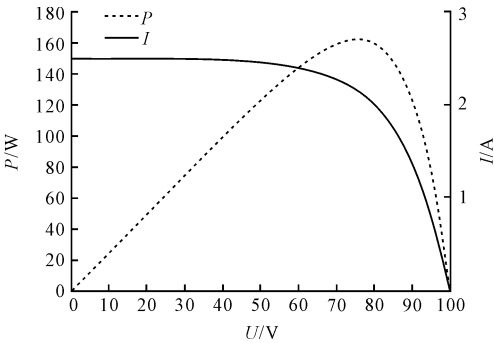
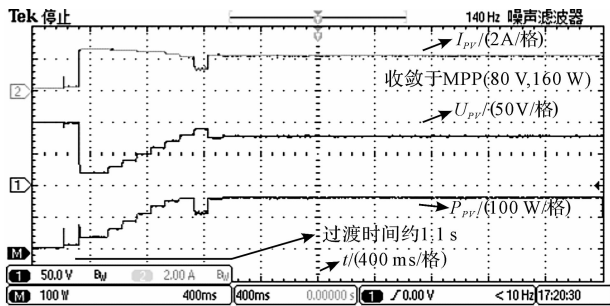


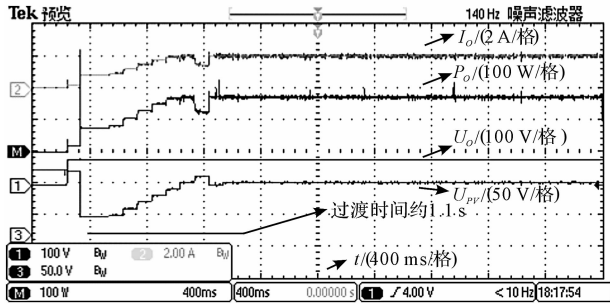
图5 光伏特性曲线图

开路电压 100 V, 最大功率点电压 80 V, 短路电流 2.5 A, 最大功率点电流 2.0 A。实验得到抛物线预测法光伏 MPPT 的波形如图 6(a) 所示。扰动观察法 MPPT 波形图如图 6(c) 所示。通过改变 U_{pv} 的值, 并检测反馈回来的对应 P_{pv} 的大小来决定 U_{pv} 的下一步的变化方向, 最终使电路工作在最大功率点附近。

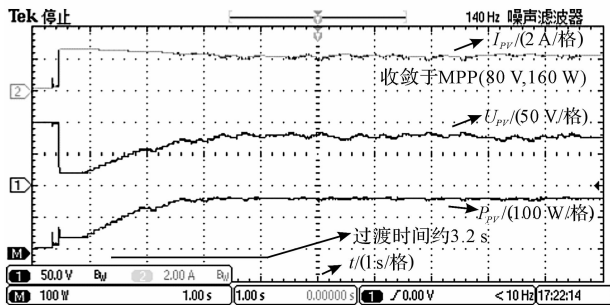
通过实验结果可以看出, 本研究每 100 ms 调整一次参考电压值 U_{ref} , 抛物线预测法仅需十几个 MPPT 周期 (100 ms) 共计 1 s 多, 即可收敛到最大功率点, 而且稳定后无功率振荡; 而变步长扰动观察法需要 30 多个 MPPT 周期共计 3 s 多才能收敛到最大功率点, 并且因扰动步长大小不同有不同程度的功率振荡。这说明抛物线预测法在单峰值光伏 MPPT 中具有十分明显的优势和实用性。由图 6(b) 光伏负载波形图可以看到负载的输入波形, 即 Buck-Boost 的输出波形, 开始工作后 U_o 一直维持在 80 V, P_o 稳定后大小约为 160 W。



(a) 抛物线预测法光伏MPPT



(b) 抛物线预测法光伏MPPT负载波形



(c) 扰动观察法光伏MPPT

图 6 MPPT 试验结果图

4 结束语

本研究围绕光伏电池组件的非线性输出特性展开研究,提出了一种基于抛物线预测的 MPPT 方法,能够使得光伏电池组件工作在输出功率最大的位置。通过搭建基于 Buck-Boost 电路的光伏硬件平台进行试验,采用抛物线预测法和变步长扰动观察法进行光伏电池

的最大功率跟踪,结果验证了抛物线预测法的有效性和实用性。并且,该方法相较于传统的扰动观测法,具有收敛速度快,稳态无波动的优良特性。该方法在现有光伏发电系统中仍有大量的应用空间,还可推广于其他单峰值最大功率寻优场景。

参考文献 (References):

- [1] 苏秀蓉,王正仕,马进红,等. 基于 MPPT 的太阳能智能充电控制器[J]. 机电工程,2013,30(9):1133-1136.
- [2] 崔海亭,李 宁,赵华丽,等. 太阳能热发电系统蓄热装置的模拟研究[J]. 流体机械,2016,44(5):77-82.
- [3] 李俊良,王新涛,史 吏,等. 恒定电压法与变步长滞环比较法结合的 MPPT 算法研究[J]. 陕西电力,2013,41(7):55-58.
- [4] TEY K S, MEKHILEF S. Modified incremental conductance algorithm for photovoltaic system under partial shading conditions and load variation[J]. **Industrial Electronics IEEE Transactions on**,2014,61(10):5384-5392.
- [5] 刘邦银,段善旭,刘 飞,等. 基于改进扰动观察法的光伏阵列最大功率点跟踪[J]. 电工技术学报,2009,24(6):91-94.
- [6] 李善寿,张 兴,张鸿恺,等. 基于功率闭环控制与 PSO 算法的全局 MPPT 方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(28):4809-4816.
- [7] 张贵涛,夏向阳,王锦澧,等. 光伏系统中全局最大功率点的优化[J]. 中南大学学报:自然科学版,2015,46(11):4077-4082.
- [8] 谢文涛,张 东,吕征宇. 光伏发电系统中前端 DC/DC 变换器的设计[J]. 机电工程,2007,24(9):101-104.
- [9] 周 廷. PWM 光伏逆变电源 DC-DC 电路及最大功率点跟踪技术的研究[D]. 济南:山东大学电气工程学院,2006.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

王一蒙,李玉玲,吴健儿,等. 一种适用于单峰光伏曲线的 MPPT 方法[J]. 机电工程,2017,34(9):1060-1064.

WANG Yi-meng, LI Yu-ling, WU Jian-er, et al. MPPT scheme applicable to photovoltaic single-peak curve[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(9):1060-1064.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>