

# 改进自适应变步长光伏系统最大功率跟踪

王军成, 杨旭红, 王严龙

(上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090)

## Modified Adaptive Variable Step of Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System

WANG Juncheng, YANG Xuhong, WANG Yanlong

(Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**摘 要:** 为提高对太阳能的利用率, 减少能量的损失, 需要对光伏电池的输出进行最大功率跟踪。文章建立了通用的太阳能电池数学模型, 结合太阳能电池的功率-电压和电流-电压输出曲线特性及两者之间的数学关系, 提出了一种基于 Boost 电路的变步长电导增量法。该方法能根据外界环境的变化, 简单快速计算出此刻外界环境下唯一一个特殊点的值作为自适应变步长, 比传统的变步长或者固定步长方法更合理, 同时减少了参数确定的人为因素对于仿真结果的影响, 可以快速精确地实现最大功率跟踪。

**关键词:** 自适应变步长; 最大功率跟踪; 电导增量法; Boost 电路

**Abstract:** In order to improve the utilization of solar energy and reduce energy loss, the maximum power point tracking (MPPT) is required to adjust the output of PV cells. Firstly, the mathematical model of solar cell is built in this paper. Then a variable step incremental conductance method based on Boost circuit is proposed by considering output characteristic of power versus voltage and current versus voltage for the solar cell and their mathematical relationships. Furthermore, the only one special point value can be calculated simply and rapidly according to the change of external environment, and the special point value is used as adaptive variable step size, which is more reasonable than that of traditional fixed step or variable step size method. In addition, the influence of artificial factors on simulation results is reduced, and the MPPT can be achieved quickly and accurately.

**Keywords:** adaptive variable step; MPPT; incremental conductance method; Boost circuit; Boost circuit

## 0 引 言

资源的大量消耗使得人们越来越重视对太阳

能, 风能等的高效利用; 光伏发电有很多优点, 但是目前存在转换效率低, 成本高等问题。太阳能电池输出具有较强的非线性特性<sup>[1]</sup>, 光照强度及温度是影响电池输出的两个主要因素, 因此可从这两个方面考虑对其最大功率 (maximum power point, MPP) 跟踪方法进行改进, 提高其输出效率。目前人们对 MPP 的跟踪进行了很多研究, 文献 [2-3] 介绍了多种 MPP 跟踪方法及不同特点, 比较常用的是扰动观测法、电导增量法。

本文基于两种常用方法的优缺点, 结合 Boost 电路, 提出一种步长随着外界环境改变而自适应的变步长电导增量法, 该方法可以根据外界条件的改变简单迅速计算出步长, 并且实现 MPP 的快速跟踪, 该方法无论外界环境变化快慢与否都能兼顾跟踪的速度和精度。

## 1 光伏电池的模型输出特性

当前对于光伏电池通用模型的研究很多, 文献 [4] 建立了物理学中的平抛运动学模型, 文献 [5] 忽略了建模过程中某些不太重要的影响因素, 建立了简单通用的模型。两种模型都能满足工程精度要求。本文使用文献 [5] 中的方法在 Matlab/Simulink 中进行建模, 光伏电池的等效电路如图 1 所示<sup>[5]</sup>。

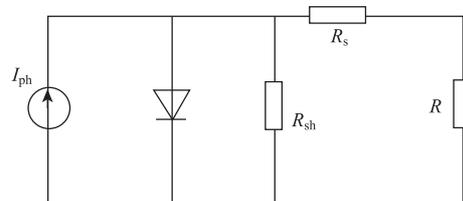


图 1 太阳能电池等效电路

等效数学模型为

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61203224); 上海市自然科学基金资助项目(13ZR1417800)

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[ 1 - \exp\left(\frac{U + \Phi}{C_2 U_{oc}}\right) \right] \right\} + D_1 \quad (1)$$

式中：

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left(-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}\right) \quad (2)$$

$$C_2 = \left( \frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) / \ln\left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \quad (3)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (4)$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \quad (5)$$

$$D_1 = I_{sc} \Delta S + a \Delta T (1 + \Delta S) \quad (6)$$

$$\Phi = b \Delta T + D_1 R_s \quad (7)$$

式中： $U_m$ 、 $I_m$ 、 $U_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 分别为标准参考条件下的最大功率点的电压及电流、开路电压和短路电流； $S_{ref}$ 、 $T_{ref}$ 为标准测试下的参考光照强度和温度，其值分别为  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ ， $25^\circ\text{C}$ ； $S$ 、 $T$ 为当前时刻光照强度和温度； $\Delta S$ 、 $\Delta T$ 、 $D_1$ 、 $\Phi$ 为中间量； $a$ 、 $b$ 为无量纲补偿系数，其值分别为  $0.005\ 4$ 、 $0.21$ ； $R_s$ 串联电阻，这里为  $0.05\ \Omega$  [5]。

所建模型仿真的电流电压以及功率电压曲线如图 2 所示。图 2 中光照强度的单位为  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

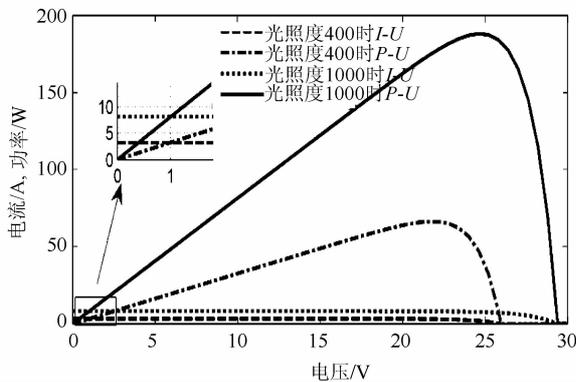


图 2 电流-电压以及功率-电压曲线

## 2 最大功率的追踪

实现最大功率跟踪 (MPPT) 的方法多种多样，文献 [6] 利用 Matlab 中的 S-函数编写了能够实时求解在不同光照强度和温度下的最大功率点对应的电压和电程序；文献 [7-9] 将 Boost 电路作为光伏电池的负载，通过推导得到公式 (8)(9)，通过调节占空比或者开关的频率实现对等效电阻  $R_{eq}$  与太阳能电池内电阻的动态匹配 [7]。

文献 [3, 10] 详细叙述了 Buck, Boost 电路各自的特点及选择 Boost 电路作为 MPPT 实现的

理由，从文中可以看到使用 Boost 电路简单有效，仿真参数除了直流电容选用  $300\ \mu\text{F}$  外，其他参数选用文献 [3]。

$$R_{eq} = R_L (1 - D)^2 \quad (8)$$

$$R_{eq} = R_L (1 - T_{on} f)^2 \quad (9)$$

式中： $R_{eq}$ 、 $R_L$ 、 $T_{on}$ 、 $D$ 、 $f$  分别是 Boost 电路的等效电阻、负载、开关开通时间、占空比、开关频率。

## 3 常规方法步长的选择

常用的扰动观察法实现简单，但存在着在最大功率点来回振荡的问题，特别是当扰动步长选择不合适，振荡有可能很严重，造成能量的严重损失。电导增量法与扰动观察法本质是相同的，仅仅是判断的方法和参数测量存在着差别 [2]，两种方法都存在步长的选择问题。

电导增量法的基本原理是利用如图 2 中所示的光伏电池  $P-U$  曲线是单峰值函数的特点，若要取得最大功率，需要满足式 (10)~(14) 才能在功率减小或增大的趋势下实现追踪到最大功率点处 [11]。

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(IU)}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \quad (11)$$

$$\frac{dP}{dU} > 0, \frac{dI}{dU} > -\frac{I}{U} \quad (12)$$

$$\frac{dP}{dU} < 0, \frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U} \quad (13)$$

文献 [8-9] 及文献 [12-14] 基本都利用相关特性曲线的关系，例如存在的近似比例关系、或是不同点处斜率不同、或者是跟踪与稳态模式的不同来确定跟踪的变步长，取得了不错的效果；但有的变步长计算量大，有的则因取值选择对结果影响比较大。

## 4 改进方法的步长选择

本文针对电导增量法中存在跟踪速度与精度的矛盾，结合图 2 所示的光伏电池  $I-U$ 、 $P-U$  曲线及相关公式与曲线的数学意义，提出了步长随着外界光照强度和温度不同而实时改变的变步长，由图 2 及公式 (14) 可看出， $P-U$  曲线一定过两个特定点  $(0, 0)$ 、 $(I, 1)$ ，此处的  $I$  可以根据式 (1) 简单迅速计算出来，即在  $U=1$  处有  $P=I$ ，而此两点间斜率满足式子 (15)。

$$P = UI \quad (14)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta U} = I \quad (15)$$

式(15)的值表明了此外界环境下离最大功率点的远近,从 $P-U$ 曲线可以看出在不同数值点的斜率是非线性的,但是曲线是光滑的,其值越大则在 $(I, 1)$ 点对应的 $dP/dU$ 的值越大,则离式(10)表示的斜率为0的距离越远<sup>[1]</sup>,距最大功率点也越远。

由图2中的 $I-U$ 曲线图在开始阶段到接近最大功率点的这段曲线,输出电流的变化是很小的,可以近似看成是一条直线,根据式(14),可近似看

成功率与电压成比例关系的,在 $U=1$ 处的电流值反映了电压每改变一单位功率改变的大小,因此以式(15)计算出的值能以最合理的步长快速跟踪到最大功率点处,即外界条件改变时,功率变大则以大步长跟踪,功率变小则以小步长跟踪,实现了步长随外界环境变化而自适应改变。同时在仿真过程中,由于式(15)计算出的值较大,为了更精确进行跟踪采样,将其与一不影响步长自适应计算的常数 $k=10^{-6}$ 相乘作为最后的步长。在改进方法的基础上进行仿真验证所提方法的合理性。

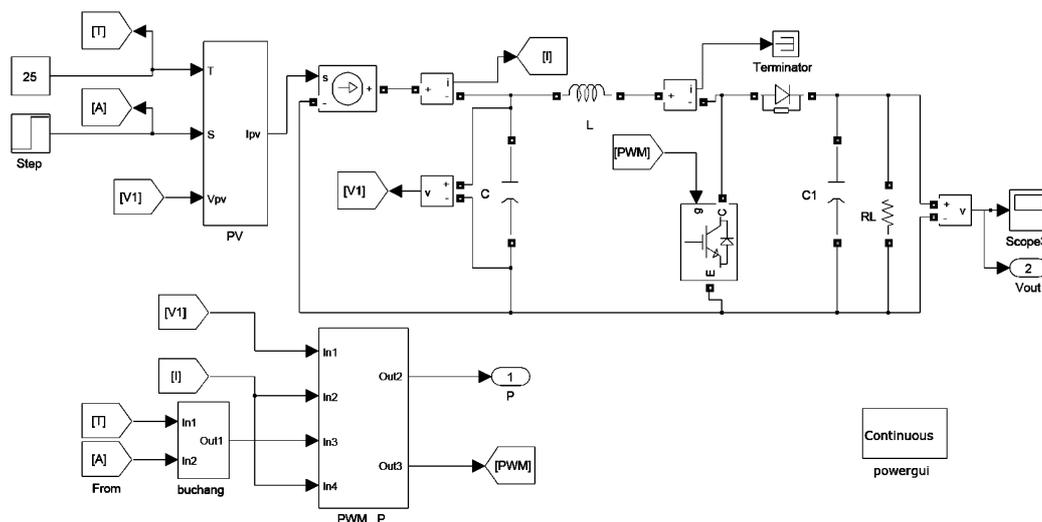


图3 基于 Boost 电路的仿真系统

## 5 仿真参数及结果对比

### 5.1 仿真参数

仿真参数如下:设置三角波为 $[-0.5, 0.5]$ ,零阶采样保持器采样时间为 $10\mu\text{s}$ 。仿真采用ode23tb算法,光照度分别从 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 突变到 $400\text{W}/\text{m}^2$ 及从 $700\text{W}/\text{m}^2$ 突变到 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 进行仿真,其他电路参数参考文献[3]。

### 5.2 仿真结果对比

①由图4或者图5中的局部图形(1)可以看出,选用的固定步长与自适应步长相近时,跟踪速度和最大功率的波动性相差不大;但是由图4可以看出在光照强度变大时,自适应步长能以更快的速度跟踪到最大功率,其中的局部放大图(2)可以清楚地看到两者所用时间相差 $0.01\text{s}$ 左右,按照达到稳定的最大功率相差时间可以计算出自适应步长比固定步长在单位时间内损失的功率少约 $188\text{W}$ ;由图5可以看出在光照度突然变小时,虽然自适应步长

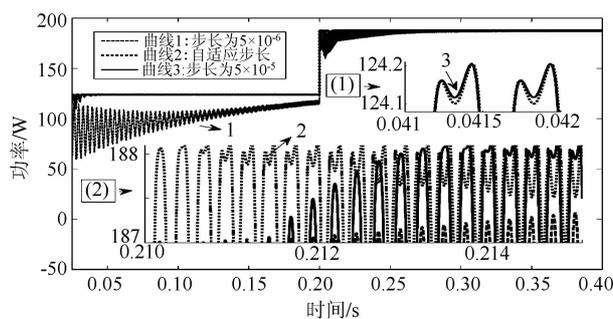


图4 光照从 $700\text{W}/\text{m}^2$ 突变到 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 时的MPPT

跟踪的速度稍慢,比选定的固定步长晚 $0.02\text{s}$ 左右(局部图(2)),但是其波动性更小(局部图(3)),而且由于此时最大功率比较小,自适应步长比选定的固定步长在单位时间内损失的能量多约 $66.2\text{W}$ 。

②由图4、图5在光照度突变的对比结果可知,即使选定的固定步长在参考光照度条件下的跟踪效果与本文提出的自适应步长基本相同,但是光照度突然变大时,跟踪速度明显变慢,损失

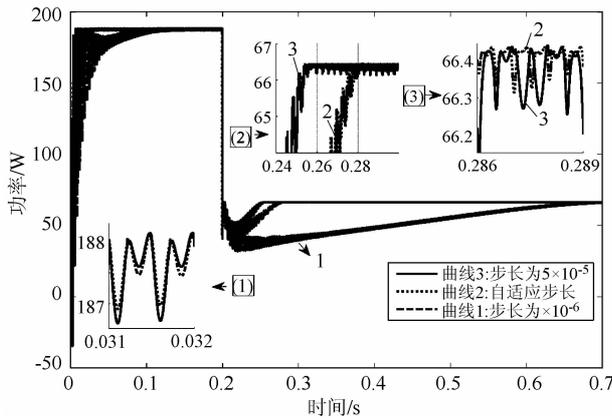


图5 光照从 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 突变到 $400\text{W}/\text{m}^2$ 时的MPPT

的能量比光照度突然变小时要多很多;相反的,虽然自适应步长在光照强度突然变小时跟踪速度稍慢,但是其波动性更小,损失的能量也比较小;同时要说明的是,如图4、图5中标注所示,仿真采用的数量级分别是 $10^{-5}$ 、 $10^{-6}$ 、 $10^{-6}$ ,而图4、图5局部图形都是在相差1个数量级的基础上跟踪效果的对比,这在精度上是相差比较大的;当选定的步长与自适应步长在相同数量级上,则无论在跟踪的速度还是波动性上都比所提出的自适应步长要差很多,从而所提出的自适应步长在一定程度上也提高了跟踪的精度。

③从以上分析结果可看出,太阳能电池输出功率大时,跟踪到最大功率点的时间较小,输出功率小时,跟踪时间稍大;从计算的单位时间内损失的功率可看出这是合理的,因为若输出功率较大时跟踪时间过长,则损失的功率很多,较小的输出功率虽然跟踪时间稍长,但损失的功率在较小范围内,综合考虑,这在一定程度上提高了太阳能电池输出功率的利用,减少了能量的损失。

## 6 结论

对最大功率的跟踪问题,不管是用何种方法,归根到底是步长的选取问题,即使是使用变步长也存在较大人为因素确定变步长的条件,本文完全根据外界条件的变化确定步长,不仅计算简单,而且大大减少了人为因素对结果的影响,使得最终的结果更准确。仿真结果表明,在同等条件下,本文确定的自适应变步长能较准确迅速实现对最大功率的跟踪,效果比固定步长方法要好很多,而且在环境突变时较好地解决了最大功率跟踪存在的速度和精度矛盾,减少了能量的损失,提高

了光伏电池输出利用率,在一定程度上提高了光伏电池使用的经济性。

## 参考文献

- [1] 郭力,王成山.含多种分布式电源的微网动态仿真[J].电力系统自动化,2009,33(2):82-86.
- [2] 程启明,程尹曼,汪明媚,等.光伏电池最大功率点的跟踪方法[J].上海电力学院学报,2009,25(4):346-352.
- [3] 李京,胡仁杰.光伏电池在Boost电路中的最大功率跟踪[J].电气技术,2013(4):21-24.
- [4] 傅望,周林,郭珂,等.光伏电池工程用数学模型研究[J].电工技术学报,2011,26(10):211-216.
- [5] 杨金孝,朱琳.基于Matlab/Simulink光伏电池模型的研究[J].现代电子技术,2011,34(24):192-194,198.
- [6] 茆美琴,余世杰,苏建徽.带有MPPT功能的光伏阵列Matlab通用仿真模型[J].系统仿真学报,2005,17(5):1248-1251.
- [7] 杨秀,陈洁,朱兰,等.基于经济调度的微网储能优化配置[J].电力系统保护与控制,2013,41(1):53-60.
- [8] 于波,王成山,肖峻,等.平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[C]//第十三届中国科协年会第15分会场一大规模储能技术的发展与应用研讨会论文集,2011.
- [9] 王成山,于波,肖峻,等.平滑微电网联络线功率波动的储能系统容量优化方法[J].电力系统自动化,2013,37(3):12-17.
- [10] 陈健,王成山,赵波,等.考虑储能系统特性的独立微电网系统经济运行优化[J].电力系统自动化,2012,36(20):25-31.
- [11] 李劲彬,李元林,吴明.可持续能源发电系统中储能系统的容量评估计算[J].陕西电力,2012,30(11):26-29.
- [12] 付周兴,靳海亮,李忠.一种基于Boost电路的光伏最大功率跟踪方法[J].半导体光电,2013,34(1):141-144.
- [13] 李金,任稷林,祁承超,等.一种改进的太阳能电池MPPT技术[J].通信电源技术,2012,29(4):13-15.
- [14] 路晓,秦立军.自适应扰动观察法在光伏MPPT中的应用与仿真[J].现代电力,2011,28(1):80-84.

收稿日期:2013-12-18

作者简介:王军成(1986-),男,硕士研究生,研究方向为太阳能、风能及储能装置的容量优化,E-mail:wangjc2009@sina.com. (责任编辑:杨秋霞)