

# 光伏发电的最大功率跟踪算法研究

陈兴峰<sup>1,2</sup>, 曹志峰<sup>1</sup>, 许洪华<sup>1</sup>, 焦在强<sup>1</sup>

(1.中国科学院 电工研究所, 北京 100080; 2.中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 太阳能光伏阵列的输出特性受外界环境因素的影响,为了跟踪太阳能光伏阵列输出功率最大点,实现光伏阵列和负载的匹配,常在系统中加入最大功率跟踪器。准确跟踪太阳能光伏阵列的最大输出功率点依赖于有效的搜索算法。分析了传统的扰动观察法和增量电导法的特点,并提出了一种新的变步长寻优算法。通过验证表明,这种算法能够快速准确地跟踪最大功率点。

**关键词:** 光伏阵列; 最大功率跟踪; 扰动观察法; 增量电导法; 变步长寻优

中图分类号: TK51 文献标识码: A 文章编号: 1671-5292(2005)01-0008-04

## The study of the algorithm of maximum power point track in PV system

CHEN Xing-feng<sup>1,2</sup>, CAO Zhi-feng<sup>1</sup>, XU Hong-hua<sup>1</sup>, JIAO Zai-qiang<sup>1</sup>

(1.Institute of Electrical Engineering, Beijing 100080, China; 2.Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The output of photovoltaic (PV) array is influenced by the environmental factors such as irradiation and temperature. Maximum power point tracker (MPPT) is usually used in PV systems to track the maximum power point and match the array and the load. Exactly tracking the maximum power point depends on effective search algorithm. This paper analyzes the advantages and disadvantages of traditional perturb and observe (P&O) and incremental conductance (IncCond) algorithm, then proposed a novel varied step optimization algorithm which has been testified by MATLAB. Simulation results show this algorithm can fast and exactly track the maximum power point.

**Key words:** photovoltaic (PV) array; maximum power point track (MPPT); perturb and observe (P&O) algorithm; incremental conductance (IncCond) algorithm; varied step optimization

光伏发电是可再生能源利用的重要技术方式,光伏产业是近几年发展最快的产业之一。太阳能光伏阵列是典型的非稳定电源,输出特性受辐射强度和环境温度的影响。为了充分提高光伏阵列的整体效率,常在系统中使用最大功率跟踪器。

在最大功率跟踪算法中,使用最多的是自寻优的方法,即系统不直接检测光照和温度,而是根据光伏阵列本身的电压电流值来确定最大功率点。在自寻优的算法中,最典型的是扰动观察

法和增量电导法,本文利用太阳能光伏阵列的MATLAB数学模型,对这2种算法进行仿真,比较其优缺点,并在此基础上提出了一种新的快速跟踪算法。

### 1 太阳能光伏阵列的输出特性

#### 1.1 太阳能电池单体的数学模型

图1是太阳能电池单体的等效电路图。一个理想的太阳能电池,它的等效串联电阻 $R_s$ 很小,而等效并联电阻 $R_{sh}$ 很大,在一般性的分析中,二者都可忽略。文献[1]忽略了等效并联电阻 $R_{sh}$ ,对

收稿日期: 2004-06-23

作者简介: 陈兴峰(1980-),男,硕士研究生,主要从事新能源领域的电力电子技术研究。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

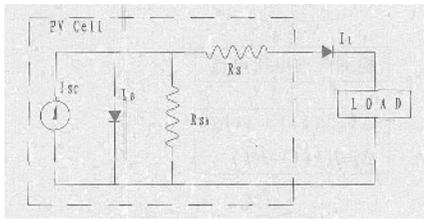


图 1 太阳能电池单体的等效电路图

太阳能电池进行了比较精确的建模,比较准确地反映了太阳能电池在不同辐射强度和温度下的输出特性。该模型的数学表达如下:

$$I = I_L - I_0 \left( e^{q(U+I R_s) / nkT} - 1 \right) \quad (1)$$

$$I_L = I_{L(T_1)} [1 + K_0 (T - T_1)] \quad (2)$$

$$I_{L(T_1)} = G \cdot I_{sc(T_1, nom)} / G_{(nom)} \quad (3)$$

$$K_0 = (I_{sc(T_2)} - I_{sc(T_1)}) / (T_2 - T_1) \quad (4)$$

$$I_0 = I_{0(T_1)} (T / T_1)^{3/n} \cdot e^{-q U_g / nk(1/T - 1/T_1)} \quad (5)$$

$$I_{0(T_1)} = I_{sc(T_1)} \left( e^{-q U_{oc}(T_1) / nkT_1} - 1 \right) \quad (6)$$

$$R_s = -dU / dI_{U_{oc}} - 1 / X_U \quad (7)$$

$$X_U = I_{0(T_1)} q / nkT_1 \cdot e^{-q U_{oc}(T_1) / nkT_1} \quad (8)$$

式中:  $I$  为太阳能电池输出电流;  $U$  为输出电压;  $I_L$  为短路电流;  $I_0$  是太阳电池在无光照时的饱和电流;  $n$  为二极管曲线因素;  $q$  为电子电荷;  $K$  为玻尔兹曼常数;  $G$  为太阳辐射强度;  $G_{(nom)}$  为标准辐射强度(一般为  $1000 \text{ W/m}^2$ );  $T_1$  为标准测试温度(一般为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $I_{sc(T_1, nom)}$  为温度为  $T_1$ 、辐射强度为标准辐射强度时的短路电流;  $I_{L(T_1)}$  是当温度为  $T_1$ 、辐射强度为  $G$  时的短路电流;  $U_{oc}$  为开路电压;  $U_g$  为禁带宽度(晶体硅的  $U_g$  一般为  $1.12 \text{ eV}$ )。

### 1.2 太阳光伏阵列输出功率最大点

利用上面的方程建立了 BPSX60 光伏阵列的模型,其详细参数可参见文献[4]。图 2 是 BPSX60 阵列在温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、辐射强度为  $1000 \text{ W/m}^2$  时的电压/电流曲线和电压/功率曲线。

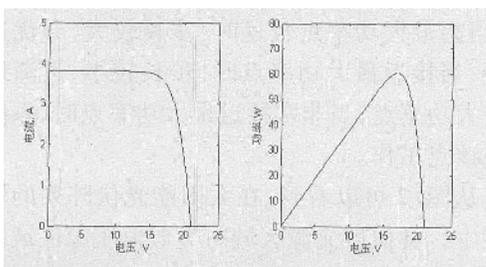


图 2 温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、辐射强度为  $1000 \text{ W/m}^2$  时的

电压/电流曲线和电压/功率曲线

当光伏阵列输出电压比较小时,随着电压的变化,输出电流的变化很小,光伏阵列类似为一个恒流源;当电压超过一定的临界值继续上升时,电流急剧下降,此时的太阳能光伏阵列类似为一个恒压源。太阳能光伏阵列的输出功率则随着输出电压的升高有一个先升后降的过程,在此过程中存在一个输出功率最大点,最大功率点一般位于  $0.75 \sim 0.9 U_{oc}$  (开路电压)或者  $0.85 \sim 0.95 I_{sc}$  (短路电流)。最大功率跟踪器(MPPT)的任务就是在温度和辐射强度都变化的环境里,通过改变光伏阵列所带的等效负载,调节光伏阵列的工作点,使光伏阵列工作在输出功率最大点。在具体实现时,一般需要 2 个步骤:一是通过搜索算法,找到最大功率点;二是通过控制手段,使它工作在最大功率点。本文将主要针对搜索算法进行研究。

## 2 扰动观察法和增量电导法

### 2.1 扰动观察法

扰动观察法(又称为爬山法)就是在光伏阵列正常工作时,不断地使它的工作电压进行很小的扰动,在电压变化的同时,检测功率也发生变化,根据功率的变化方向,决定下一步电压改变的方向(图 3)。

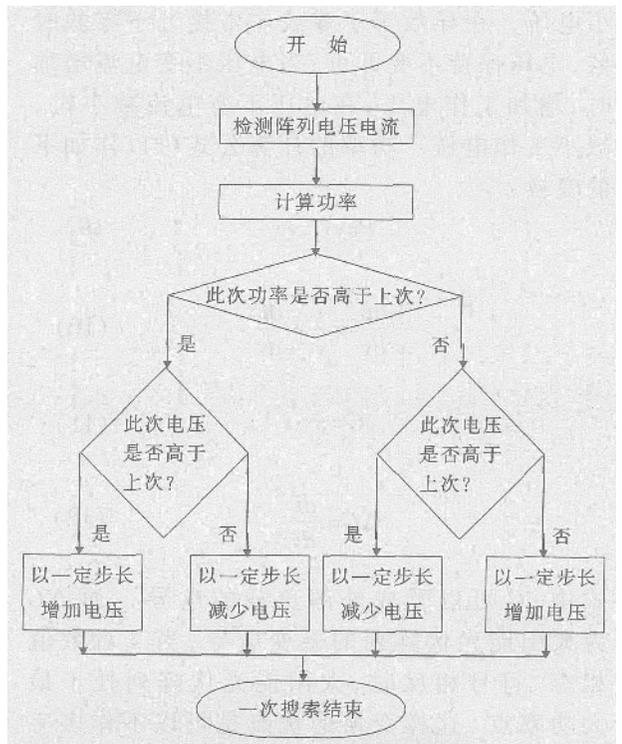


图 3 扰动观察法的流程图

扰动观察法的优点是简单可靠,容易实现。它的缺点在于:首先,系统必须引入扰动,寻优的最后结果是系统在最大功率点附近的很小范围内来回振荡;其次,难以选择合适的变化步长,步长过小,跟踪的速度缓慢,光伏阵列可能长时间工作于低功率输出区,步长过大,在最大功率点附近的震荡又加大了;另外,当外部环境变化,系统从一个稳态变换到另一个稳态的过程中,寻优的第一步,可能会发生方向错误(例如,系统正在温度为 25 °C,辐射强度为 800 W/m<sup>2</sup> 的环境下寻优,电压扰动的方向为减小,此时辐射强度变化为 1 000 W/m<sup>2</sup>,而温度没有变化,电压扰动后,计算的功率比前一次大,根据扰动观察法,下一步电压的变化方向还为减少,而此时实际的最大功率点的电压应该是增加的,即发生了误判断),好在系统在新的稳态下能够继续正确地寻优。

## 2.2 增量电导法

从图 2 可以看到,光伏阵列的电压功率曲线是一个单峰的曲线,在输出功率最大点,功率对电压的导数为零,要寻找最大功率点,只要在功率对电压的导数大于零的区域增加电压,在功率对电压的导数小于零的区域减小电压,在导数等于零或非常接近于零的时候,电压保持不变即可;当电压不变电流增加时,增加工作电压,在电压不变电流减小时,减小工作电压。功率的计算公式可以作如下的变换:

$$P=v \cdot i \quad (9)$$

$$\frac{1}{v} \frac{dp}{dv} = \frac{i}{v} + \frac{di}{dv} \quad (10)$$

$$G = \frac{i}{v} \quad (11)$$

$$\Delta G = \frac{di}{dv} \quad (12)$$

式中:G 可以看成外部负载的电导,而  $\Delta G$  为太阳能光伏阵列的微变电导,当二者数值相等、符号相反时,太阳能光伏阵列处于最大功率点。这样变换的优点是可以不作多字节的乘法和除法。其流程图见图 4。

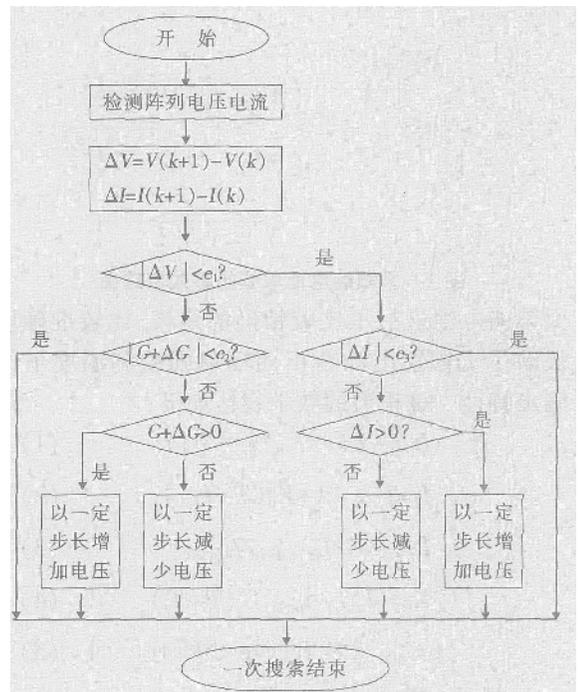


图 4 增量电导法的流程图

增量电导法通过设定一些很小的变化阈值  $e_1, e_2, e_3$ , 使太阳能光伏阵列最后稳定在最大功率点附近的某个点,而不是来回的跳动。当从一个稳态过渡到另外一个稳态时,增量电导法根据电流的变化就能够作出正确的判断,不会出现一次误判断的过程。增量电导法存在的问题:太阳能光伏阵列可能存在一个局部的功率最大点,这种算法可能导致系统稳定在一个局部的最优点工作。

扰动观察法和增量电导法的共同缺点:他们的步长都是固定的。步长过小,会使光伏阵列较长时间滞留在低功率输出区;步长过大,又会使系统振荡加剧。

## 3 变步长寻优

针对上述扰动观察法和增量电导法存在的缺点,本文提出变步长寻优的策略。我们期望的目标:当离最大功率点较远时,步长较大,寻优速度加快;当接近最大功率点时,步长较小,逐渐地逼近最大功率点;当非常接近最大功率点时,系统稳定在该点工作。

从图 2 可以看到,在太阳能光伏阵列的输出特性中,类似恒流源区域与类似恒压源区域范围的比例大约为 4:1。我们希望系统在类似恒流源的区域里快速动作,在类似恒压源的区域里,进行缓

慢的寻优。首先,通过检测电压变化时的电流变化率,判断出太阳光伏阵列所在的工作区域,在类似恒流源的区域,电流变化率很小,在类似恒压源的区域,电流变化率很大;然后,根据工作区域的不同可以设定不同的步长,在类似恒流源区域步长加大,在类似恒压源的区域步长减小;最后,利用增量电导法判断系统是否已经工作在最大功率点附近,如已经在最大功率点附近,就让系统稳定在那里工作。

本文在增量电导法的基础上加入了变步长寻优,设定当电流变化率低于 7% 时,此时光伏阵列工作于类似恒流源区,每次电压变化的步长为原来电压的 10%;当电流变化率高于 7% 时,光伏阵列工作在最大功率点附近或类似恒压源区,每次变化的步长为原来电压的 0.3%。图 5 和图 6 分别表示了特定环境条件下和环境条件变化时,用 MATLAB 仿真的变步长寻优过程,这种方法保留了增量电导法的稳定性的优点,在不改变精度的情况下,加快了寻优的速度。

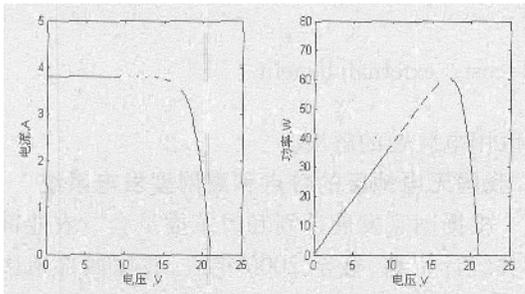


图 5 在温度为 25 °C,辐射强度为 1 000 W/m<sup>2</sup> 的条件下变步长寻优的搜索过程

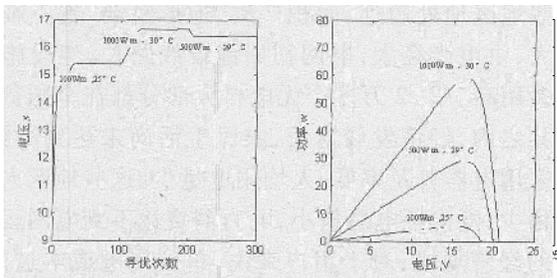


图 6 在环境条件变化时变步长寻优的搜索过程

#### 4 结论

本文通过建立太阳能光伏阵列的精确数学模型,对传统的最大功率跟踪算法进行了分析、比较和仿真。在增量电导法的基础上加入变步长寻优,根据光伏阵列电流变化的信息,确定光伏

阵列工作的不同区域,在不同的区域采用不同的寻优步长。仿真的结果表明,这种算法能够快速准确地跟踪最大功率点。

参考文献:

- [1] GEOFF WALKER. Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model [J]. *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 2001,21(1):49-56.
- [2] MAO H, ABU-QAHOUG J A, DENG S. Batarseh, DSP -Based Multiple Peak Power Tracking for Expandable Power System I [A]. *Applied Power Electronics Conference and Exposition 2003* [C]. APEC'03 18th Annual IEEE, 2003,(1):525-530.
- [3] CHIHCHIANG HUA, JONGRONG LIN, CHIHMING SHEN. Implementation of a DSP -controlled photovoltaic system with peak power tracking [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1998 45(1):99-107.
- [4] EFTICHIOS KOUTROULIS, KOSTAS KALAITZAKIS, NICHOLAS C,etal. Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System [J]. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 2001,16(1):46-54.

### 高效低耗的光伏电池

澳大利亚新南威尔士大学在太阳能利用的工艺技术方面取得了巨大的进展,使价格低廉的光伏电池完全能够与矿物燃料相媲美。该大学的光电设备和系统中心主任马丁·格林教授认为:能源供应完全能实现价格低廉,方便、清洁和取之不尽、用之不竭的目标。光电设备和系统中心已经掌握了这种工艺。

多年来,太阳能科研人员一直以高价格、高质量的半导体材料,来取得更大的效益。新南威尔士大学通过研制新型高效的格栅结构和比目前商用材料质量等级低的半导体材料而取得了这项突破。

新型光伏电池的研制工作依靠新南威尔士大学多年来完善的各种技术,其中最重要的是独特的激光刻线隐蔽触点技术。这是一片薄薄的金属导体,当电子被入射光激化后,它能够产生电流。

(胡建明)