

# 短路电流结合扰动观察法在光伏发电 最大功率点跟踪控制中的应用

张超, 何湘宁

(浙江大学电力电子研究所, 浙江省 杭州市 310027)

## Short-current Combined With Perturbation and Observation Maximum-power-point Tracking Method for Photovoltaic Power Systems

ZHANG Chao, HE Xiang-ning

(Power Electronics Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** The output power of PV module varies with module temperature, solar insolation and loads, so it is necessary to track MPP of the PV array all the time. In past years, many MPP control algorithms were presented to draw maximum power from the solar array. A novel online short circuit current method is presented. This method can track MPP changes rapidly without disturbing PV system. On the basis of this method, P&O(perturbation and observation) method with optimized perturbation step was proposed to reduce the power oscillation around MPP. Simulations and experimental results show that the PV generation system has good steady state and transient characteristics with the proposed MPPT control method.

**KEY WORDS:** photovoltaic; maximum power point tracking; short circuit control; perturbation and observation control

**摘要:** 光伏电池输出功率随外部环境和负载的变化而变化, 为充分发挥光伏器件的效能, 需采用最大功率点跟踪电路。对于最大功率点跟踪电路的控制已经提出了许多方法, 其中短路电流法和扰动观察法因其具有简单有效的优点而得到广泛应用。针对短路电流法的缺点, 该文提出一种新的在线短路电流控制方法。该方法在不干扰系统正常工作的情况下, 能迅速感知外部环境变化, 但该方法效率不高。为充分发挥光伏电池的效能, 在线短路电流控制方法的基础上再引入扰动观察法。该文扰动观察法的扰动步长针对最大功率点处稳态特性进行优化, 优化后, 扰动观察法可有效消除光伏器件输出功率在最大功率点的振荡现象, 从而提高系统效率。仿真和实验研究证明, 该方法可以快速跟踪外部环境变化, 并消除系统在最大功率点的振荡现象。

基金项目: 国家教育部博士点基金项目(20050335059)。

**关键词:** 光伏; 最大功率点跟踪; 短路电流法; 扰动观察法

## 0 引言

光伏发电作为一种具有广阔前景的绿色能源已成为国、内外学术界和工业界研究的热点<sup>[1-2]</sup>。光伏电池输出功率与外界环境和负载情况有关, 为充分发挥光伏电池的功效, 需在光伏器件和负载之间串联最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)电路<sup>[3-4]</sup>。MPPT 电路常用的控制方法有固定参数法(如固定电压法、固定电流法)、扰动观察法及增加电导法等<sup>[5]</sup>。

固定参数法利用在最大功率点工作时光伏器件工作电压、电流与器件开路电压、短路电流的近似比例关系进行控制, 此方法只需一个检测参数, 控制简单易行, 但获取开路电压或短路电流要中断系统正常工作, 对系统运行存在干扰, 此外所采用的控制关系是近似关系, 不能实现最优控制, 因此该方法控制精度低, 仅适用于小功率场合。扰动观察法根据光伏器件在最大功率点处 $\Delta P/\Delta U=0$ 的特性进行最大功率点跟踪控制, 以左侧为例说明该方法具体工作过程: 在系统稳定工作情况下, 假设增大最大功率点跟踪电路功率器件的占空比, 控制器对占空比调节前后的光伏器件输出功率、输出电压进行采样计算, 如果输出功率与输出电压为 $\Delta P/\Delta U > 0$ , 则表明系统工作在最大功率点左侧, 应继续增加占空比, 直到 $\Delta P/\Delta U = 0$ , 具体工作中, 由于扰动观测法需要比较占空比变化前后的功率、电压, 因此光伏输出功率会在最大功率点两次反复变化, 严重时

还会出现功率振荡现象,降低系统效率。增加电导法是对扰动观察法的改进,根据 $\Delta P/\Delta U=0$ 可以得到 $dI/dU=-I/U$ ,当系统满足该关系式时,表明系统工作在最大功率点,由于它不需要比较占空比变化前后的功率、电压变化情况,因此可以消除扰动观测法在最大功率点附近的功率振荡现象,但该方法需高精度的检测器件,虽然理论上可以消除稳态时的功率振荡,但由于计算误差和检测元件精度限制,实际工作中还是存在一定的功率波动,且算法较复杂,需较多的计算时间,因而对外部环境变化的响应速度变慢<sup>[6-7]</sup>。此外模糊控制、滑模控制等方法也可用于扰动观察法以减弱最大功率点的振荡现象,但是同样对硬件的要求太高,控制较为复杂<sup>[8-9]</sup>。

本文在分析光伏电池特性的基础上,提出了一种新的 MPPT 控制方法,该方法根据光伏电池工作状态,分别采用短路电路法和扰动观察法以实现光伏电池最大功率点的跟踪。短路电流通过在线计算获取,避免了传统短路电流检测方法对系统运行的干扰,提高了系统效率。在此基础上,为进一步提高对光伏器件的利用,当系统工作在最大功率点附近时采用小步长扰动观察法,可有效消除系统在最大功率点的振荡。该方法不仅可以快速跟踪外部环境的变化,还可有效减轻系统输出功率在 MPP 的振荡现象,从而提高对光伏器件的利用率。实验结果证明该方法可以快速有效的跟踪日照变化,提高对光伏电池的利用率。

## 1 光伏电池特性

光伏电池输出功率的函数为

$$P = I_s U - I_0 U \left\{ \exp\left[\frac{q}{AKT} U\right] - 1 \right\} \quad (1)$$

式中:  $I_s$ 、 $I_0$  分别为光伏电池输出电流、光伏电池短路电流和光伏电池反向饱和电流,  $I_s$  由日照强度决定;  $q$  为电荷常数;  $A$  为光伏电池中半导体器件的  $p$ - $n$  结系数;  $K$  为 Boltzman 常数;  $T$  为绝对温度;  $U$  为光伏电池输出电压。

电池输出功率对输出电压的导数关系为

$$dP/dU = I_s - I_0 \cdot \exp\left[\frac{q}{AKT} U\right] \cdot \left[1 + \frac{q}{AKT} U\right] - I_0 \quad (2)$$

图 1 为该导数与光伏电池输出电压的关系曲线。图 1 表明该导数随光伏电池输出电压的增加连续单调递减。在该曲线 A 点光伏电池处于短路状态,电池输出电压为零,  $dP/dU$  大小等于电池短路电流,输出功率为零;随电池输出电压的增加,该值缓慢

下降,在 A-B 区间该值近似等于电池短路电流,输出功率随输出电压的上升逐步增加;从点 B 到最大功率点  $D_{MPP}$  这一段,该值下降速度加快,从近似等于电池短路电流快速下降到零,电池仍工作在最大功率点左侧,输出功率进一步增加;当  $dP/dU=0$  表明系统输出最大功率;随着输出电压进一步增加,  $dP/dU$  变为负值,该值随输出电压的增加快速下降,输出功率随输出电压的进一步上升而快速减小<sup>[10]</sup>。

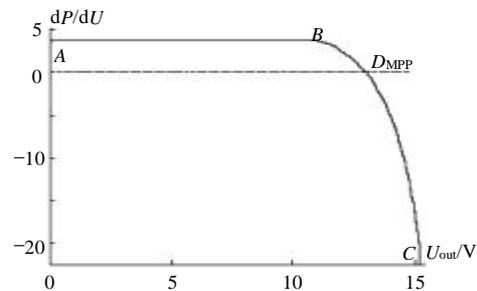


图 1 光伏电池  $dP/dU$ - $U$  特性曲线

Fig. 1  $dP/dU$ - $U$  characteristic curves of PV module

图 2 为外部环境稳定情况下光伏电池输出功率、输出电流与输出电压特性曲线。从电流-电压曲线可知在 A-B 区间光伏电池输出电流基本相等,可近似认为在最大功率点左侧光伏电池输出特性为电流源。由上述分析可知光伏电池在最大功率左侧特性类似于电流源,电池输出电流基本不变。

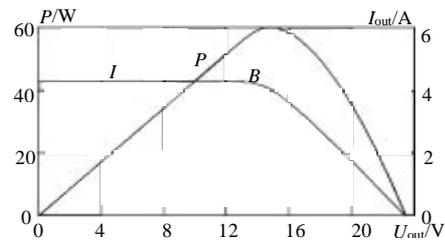


图 2 光伏模块输出功率、电流特性曲线  
Fig. 2 PV module characteristics for fixed ambient conditions

## 2 MPPT 工作原理

光伏器件输出最大功率时,它的输出电流  $I_0$  与电池短路电流  $I_s$  有一个近似比例关系:  $I_0=0.92I_s$ 。因此如果知道电池的短路电流就可以控制系统,使其近似工作在最大功率点。但此比例关系仅是一个近似值,它会随着外部环境、电池型号及电池使用时间而变化不同,因此该方法控制精度低,通常用于小功率场合。

扰动观察法是 MPPT 控制中的一种常用方法,该方法控制思路如下:假设增加 MPP 电路开关的

占空比,若光伏电池输出功率增加,则占空比继续增加,直到输出功率下降;反之占空比减少。占空比的改变值称为扰动步长 $\Delta d$ ,在扰动观察法中扰动步长 $\Delta d$ 为定值,步长的选取要兼顾光伏发电系统动态响应速度及稳定状态下的控制精度。 $\Delta d$ 较大时,对外界环境变化响应速度快,但在最大功率点附近有较大的功率振荡; $\Delta d$ 较小时,最大功率点附近的功率振荡会减弱,但系统对外界环境变化的响应能力变差。图3是扰动观察法的控制仿真波形,从该波形可以看出系统响应速度能满足日照变化条件下的动态响应,但在日照稳定的情况下输出功率有较大的波动<sup>[11]</sup>。

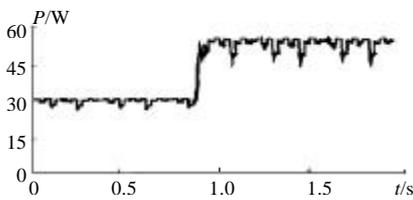


图3 扰动观察法MPPT仿真波形

Fig. 3 The simulation waveform of P&O MPPT algorithm

从第2部分分析可知,在最大功率点左侧 $dP/dU$ 的值基本等于短路电流,只有在最大功率点附近该值才显著变化。因此可认为图1中A-B区间的 $dP/dU$ 为常量,大小近似等于短路电流,那么在此区间如果知道占空比变化前后的功率、电压,就可得到光伏器件的短路电流,从而实现系统的控制。该方法通过检测电池的输出电压、输出电流,计算出电池的短路电流,克服了传统电流短路法在运行过程中对系统正常运行的干扰<sup>[12-13]</sup>,提高了系统稳定性及工作效率。但是短路电流法本身是一种近似关系,

在该方法控制下光伏器件输出功率不可能达到最大功率点,只能在最大功率点附近工作。为了充分发挥光伏器件的效能,当系统实现短路电流法的控制目标后,可在最大功率点附近采用扰动观察法进行下一步工作。与传统扰动观察法不同,当外部环境发生变化时最大功率点跟踪控制由短路电流控制方法实现,因此本文扰动观察法以最大功率点附近的稳定性为主要控制目标,扰动步长根据最大功率点的稳定性要求进行选取。由于该步长远小于传统扰动观察法中的扰动步长,因此稳态时可有效消除系统在最大功率点附近的振荡现象<sup>[14-15]</sup>。

该方法控制流程图如图4所示。定义系统任一工作时刻为 $T$ ,系统根据光伏电池的输出电压、输出电流判断系统工作状态:①计算在时刻 $T$ 光伏电池的输出功率,并和 $T-1$ 时的输出功率、输出电压进行比较,判断系统是否工作在最大功率点左侧,即是否处于电流源模式;②若系统不处于电流源模式,则调整MPP电路开关的占空比使系统工作在电流源模式;③如果系统工作在电流源模式,通过电池输出电压、输出电流可计算得出 $T$ 时刻 $I_T = \Delta P_T / \Delta U_T$ 及 $T+1$ 时刻 $I_{T+1} = \Delta P_{T+1} / \Delta U_{T+1}$ ,比较 $I_T$ 、 $I_{T+1}$ ,如果两者差值在误差范围内,则 $I_T$ 值可认为等于短路电流,将该电流用于MPP的短路电流控制;④如果 $I_T$ 、 $I_{T+1}$ 差值超出规定范围,同时系统工作在最大功率点左侧,则可以推断系统工作在最大功率点附近,此时MPP控制方法由扰动观察法实现。该过程不断重复直到 $\Delta P$ 近似等于零,此时系统工作在最大功率点。

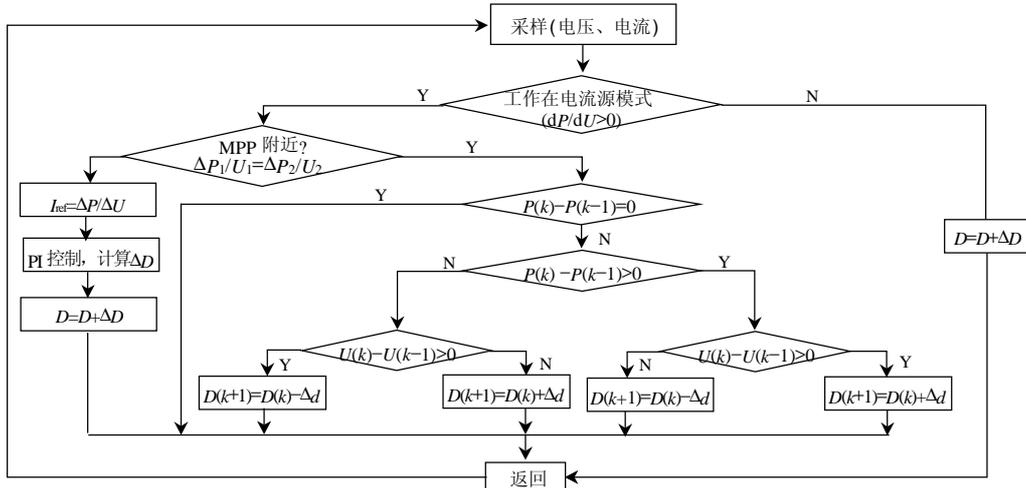


图4 控制框图

Fig. 4 The control flow chart of two-mode MPPT method

### 3 仿真和实验

为了验证所提出方法的有效性,在 Matlab 软件下对该方法进行了仿真。仿真对象为最大输出功率 60W 的光伏电池,该电池最大开路电压为 21V,最大短路电流为 4.2A。当光伏电池输出最大功率 60W 时,它的工作电压为 17V,工作电流为 3.5A。图 3 是传统扰动观察法的仿真结果,图 5 是应用本方法得出的光伏电池输出功率仿真结果。设定光伏电池初始输出功率为 30W,另一个稳定情况下输出功率为 50W,当电池外部环境发生变化时,电池输出功率经过动态过程后达到稳定。从图 3、图 5 中可以看出,两者对外部环境变化的响应速度基本相同,但是当系统处于稳定工作状态时,两种方法有明显的不同:扰动观察法存在较严重的功率振荡现象,随光伏电池输出功率的增加,振荡现象加剧;而本文提出的方法在稳定状态下,输出功率仅有微小的波动。

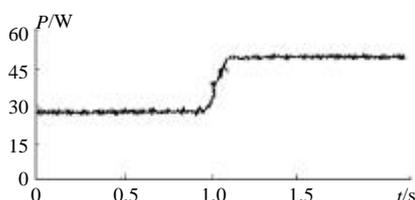
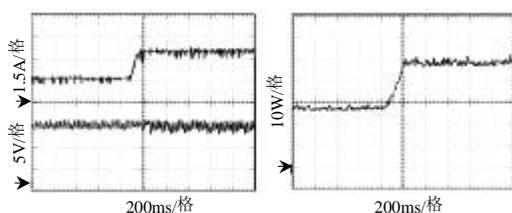


图 5 短路电流结合扰动观察控制方法仿真波形  
Fig. 5 Simulation result of novel control method

图 6 是实验结果,本实验所用光伏模块参数如下:开路电压:19.0V;最大输出功率点对应输出电压 14.50V;短路电流 4.6A;最大输出功率点对应输出电流 4.2A;最大输出功率 60W。



(a) 光伏模块输出电压、电流波形 (b) 光伏模块输出功率波形

图 6 日照强度突变实验波形

Fig. 6 The experimental results of abrupt change of illuminance

从实验结果可知:在外界环境相对稳定的情况下,光伏发电系统具有良好的稳定性。在输出功率 50W 情况下,功率最大波动值为 5W,系统能稳定工作在 MPP;当外部环境突变情况下,能快速、准确的跟踪 MPP 的变化,具有良好的快速性。表 1 是比较本文方法和传统扰动观察法在电池不同输出

功率情况下的功率最大波动值。从该表可以看出,本文提出的方法在相同输出功率情况下,最大功率波动远低于传统的扰动观察法。实验结果表明:短路电流结合小步长扰动观察法具有良好的动态性能和稳态性能,明显优于传统的扰动观察法和短路电流法。

表 1 输出功率稳定条件下的最大波动量

Tab. 1 Comparative of power fluctuation

输出功率	最大波动量/%	
	本文方法	扰动观察法
稳态输出功率 30W	6	9
稳态输出功率 50W	10	21

### 4 结论

对短路电流法和扰动观察法的优缺点进行了分析比较,并对光伏电池输出特性进行分析,在此基础上提出了一种光伏电池短路电流在线检测新方法,该方法可以在线计算出短路电流法控制所需的电池短路电流,避免传统短路电流检测方法对系统正常工作的干扰。同时为了提高系统的效率,减轻系统在稳态时的功率振荡,当系统接近最大功率点时采用小步长扰动的扰动观察法,仿真和实验结果均表明,在该方法下系统输出功率能有效消除功率振荡现象,快速跟踪外部环境的变化,具有较好的实用价值。值得注意的是该方法中扰动观察法的扰动步长一定要合理选择,否则在最大功率点寻优过程中会导致功率振荡现象出现。

#### 致谢

本文工作受台达电力电子科教发展基金资助(DREG 2005010),特此致谢。

### 参考文献

- 王飞,余世杰,苏建徽. 太阳能光伏并网发电系统的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 72-74.  
Wang Fei, Yu Shijie, Su Jianhui. Research on photovoltaic grid-connected power system[J]. Transaction of CES, 2005, 20(5): 72-74(in Chinese).
- 郑诗程,丁明,苏建徽. 户用光伏发电并网系统的研究与设计[J]. 电力电子技术, 2005, 39(1): 55-57.  
Zheng Shicheng, Ding Ming, Su Jianhui, et al. Research and design of residential photovoltaic grid-connected generation system[J]. Power Electronics, 2005, 39(1): 55-57(in Chinese).
- 张淼,吴捷,侯聪玲. 自适应算法在光伏发电系统最大功率追踪中的应用[J]. 电力电子技术, 2005, 39(2): 50-52.  
Zhang Miao, Wu Jie, Hou Congling, et al. Application of adaptive algorithm in maximum power point tracking of the photovoltaic [J]. Power Electronics, 2005, 39(2): 50-52(in Chinese).
- 戴欣平,马广,杨晓红. 太阳能发电变频器驱动系统的最大功率控制法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 95-99.

- Dai XinPing, Ma Guang, Yang Xiaohong. A control method for maximum power tracing of photovoltaic generation system [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 95-99(in Chinese).
- [5] Hohm D P, Ropp M E. Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed[C]. IEEE 28th Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, 2000.
- [6] Kim TaeYeop, Ahn HoGyun, Park EungKyu, et al. A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation[C]. Proc. IEEE Conf. International Symposium on Industria Electronics, ISIE'01, Pusan, 2001.
- [7] Yong ji H, Deheng L. A new method for optimal output of a solar cell array[C]. Proc IEEE Conf International Symposium on Industria Electronics, ISIE'92, Xi'an, 1992.
- [8] Simoes M G, Franceschetti N N, Friedhofer M. Fuzzy logic based photovoltaic peak power tracking control[C]. Proc. IEEE Conf. International Symposium on Industria Electronics, ISIE'98, Pretoria, 1998.
- [9] Senjyu T, Uezato K. Maximum power point tracker using fuzzy control for photovoltaic arrays[C]. IEEE International Conference on Industrial Technology, Guangzhou, 1994.
- [10] Sugimoto H, Dong H. A new scheme for maximum photovoltaic power tracking control[C]. Power Conversion Conference, Nagaoka, 1997.
- [11] Chiang MaoLin, Hua ChihChiang, Lin JongRong. Direct power control for distributed PV power system[C]. Power Conversion Conference, Osaka, 2002.
- [12] 王江, 王静, 费向阳. 永磁同步电动机的非线性 PI 速度控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 125-130.
- Wang Jiang, Wang Jing, Fei Xiangyang. Nonlinear PI speed control of permanent magnetic synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 125-130(in Chinese).
- [13] 林维明, 黄是鹏. 具有快速负载动态响应的 DC/DC 开关变换器开环控制新策略[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 78-81.
- Lin Weiming, Huang Shipeng. A new open-loop control strategy for a DC-DC switching converter with fast load transient response [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 78-81(in Chinese).
- [14] 顾丹珍, 艾芊, 陈陈, 等. 适用于快速暂态稳定计算的新型负荷模型和参数辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 78-85.
- Gu Danzhen, Ai Qian, Chen Chen, et al. New load models for fast transient stability calculations and parameter identification method [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 78-85(in Chinese).
- [15] 夏长亮, 郭培健, 史婷娜, 等. 基于模糊遗传算法的无刷直流电机自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 129-133.
- Xia Changliang, Gu Peijian, Shi Tingna, et al. Control of brushless DC motor using genetic algorithm based fuzzy controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 129-133(in Chinese).

收稿日期: 2006-05-27。

作者简介:

张超(1973—), 男, 博士研究生, 研究方向为光伏发电系统新型逆变器研究, [superarc@zju.edu.cn](mailto:superarc@zju.edu.cn);

何湘宁(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力电子技术及其在工业应用方面的研究。

(编辑 王剑乔)