

光伏电池的一种自适应最大功率跟踪算法

姚晓君 赵剑锋 施 超

(东南大学 电气工程学院 江苏 南京 210096)

[摘要] 针对光伏电池输出功率最大跟踪控制算法中扰动观察法步长难以选择的问题,提出了一种自适应的最大功率跟踪算法,该算法依据功率的变化进行扰动观察生成电压扰动值,根据电压指令对 DC/DC 变换器的占空比进行 PI 调节控制。仿真结果表明,该算法可以很好地实现变步长,满足快速性与效率性的要求,比起传统的定步长和简单变步长的扰动观察法拥有更好的性能。

[关键词] 光伏电池,最大功率跟踪,扰动观察法, S-函数

[中图分类号] TM914 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2012)03-0010-08

An Efficient and Adaptive Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Cell

Yao Xiaojun, Zhao Jianfeng, Shi Chao

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to solve the problem that MPPT method which is difficult to decide has a great influence on the controlling effect, an efficient and adaptive MPPT algorithm was put forward in this paper. The change of power was observed to generate the perturbation of voltage which is used to control the duty of DC/DC convert with a PI controller. The result of simulation proves that this algorithm is able to give variable steps which can ensure the rapidity and efficiency, thus, the algorithm is better than traditional fixed-step P&O algorithm and simply variable-step P&O algorithm.

Key words: photovoltaic cell, MPPT, Perturb and Observe Method, S-Function

随着石油、天然气、煤炭等不可再生资源的日益枯竭及其使用过程中带来的环境污染与温室效应,可再生资源的开发利用正变得越来越迫切与重要。而太阳能发电技术以低能耗、无污染、应用范围广等优势成为近年来研究的热门。其中光伏太阳能发电技术的研究更是重点。但是由于光伏电池输出的非线性特征,使得对光伏电池的输出功率进行调整从而实现最大功率跟踪 MPPT(Maximum Power Point Tracking),成为光伏电池发电研究中的重点与难点所在^[1-3]。

当前最常见的最大功率跟踪(MPPT)技术主要有恒定电压跟踪法、扰动观察法、导纳增量法、以模糊控制为代表的人工智能方法等^[4-5]。其中恒定电压法容易实现,控制简单,但是无法适应变化的外部环境(例如光照、温度等)而容易造成跟踪失败。导纳增量法虽然拥有较好的控制效果,但是对控制系统的测量与运算提出了较高的要求,成本高。同样基于人工智能的控制方法其控制器设计复杂、实现困难,成本较高。

扰动观察法的算法拥有容易实现,并且光伏电池的电气特性与参数无关、跟踪效率高的特点,而得到了广泛应用,但是其扰动步长的选取十分重要,直接影响了控制的快速性和稳定性^[6-7]。

本文提出了一种自适应的变步长扰动观察法 MPPT 方法,并将其控制效果与传统定步长的扰动观察法以及普通变步长方法进行对比,通过 Matlab/Simulink 进行仿真证明了该技术的优越性。

1 自适应变步长扰动观察法

1.1 光伏电池输出特性

光伏电池的非线性输出特性是进行 MPPT 的重要原因。设在参考条件下, I_{sc} 为短路电流, V_{oc} 为开路电

收稿日期: 2012-07-11.

通讯联系人: 赵剑锋,教授,博士生导师,研究方向: 电力电子技术及其在电力系统中的应用. E-mail: jianfeng_zhao@seu.edu.cn

压 I_m, V_m 为最大功率点时的输出电流和电压, 则光伏电池其输出电流可以用如下的数学模型公式来表示^[8-10]:

$$I = I_{sc} (1 - C_1 (e^{\frac{V-DV}{C_2 V_{oc}}} - 1)) + DI \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} DI = \alpha \cdot \beta / S_{ref} \cdot DT + (S / S_{ref} - 1) \cdot I_{sc} \\ DV = -\beta \cdot DT - R_s \cdot DI \\ DT = T - T_{ref} \\ C_1 = (1 - I_m / I_{sc}) e^{-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}} \\ C_2 = (V_m / V_{oc} - 1) / \ln(1 - I_m / I_{sc}) \end{cases} \quad (2)$$

I 表示光伏电池的输出电流; V 表示光伏电池的输出电压; S_{ref} 为太阳光照强度的参考值, 一般取为 1 kW/m^2 ; S 为太阳光照强度的实际值; T_{ref} 为光伏电池温度的参考值, 一般取为 25°C ; T 为光伏电池温度的实际值; α 为在参考日照下, 电流变化温度系数 ($\text{A}/^\circ\text{C}$); β 为在参考日照下, 电压变化温度系数 ($\text{V}/^\circ\text{C}$); R_s 为光伏电池的串联电阻。

根据光伏电池的模型公式, 本文搭建了一个 Simulink 中的光伏电池模型。该光伏电池模型是通过 S-Function 根据光伏电池的输出电压计算其输出电流指定值, 控制一个可控电流源来模拟实现的。其主要的特性参数如表 1:

表 1 光伏电池的主要特性参数

Table 1 Main characteristics of PV model

参数	值
短路电流 I_{sc}	8.16 A
开路电压 V_{oc}	61.5 V
最大功率点电流 I_m	6.528 A
最大功率点电压 V_m	49.2 V
电流温度系数 α	0.015 A/ $^\circ\text{C}$
电压温度系数 β	0.7 V/ $^\circ\text{C}$
串联内阻 R_s	2 Ω

在上述的模型参数情况下, 画出了该光伏电池的输出特性曲线。光照不同情况下 ($S = 1.2 \text{ kW/m}^2$ 、 $S = 1 \text{ kW/m}^2$ 、 $S = 0.8 \text{ kW/m}^2$) 光伏电池的输出电流 - 电压曲线如图 1(a) 所示, 与功率 - 电压曲线如图 1(b) 所示, 温度不同情况下 ($T = 30^\circ\text{C}$ 、 $T = 25^\circ\text{C}$ 、 $T = 20^\circ\text{C}$) 的电流 - 电压曲线如图 1(c) 所示, 与功率 - 电压曲线如图 1(d) 所示。

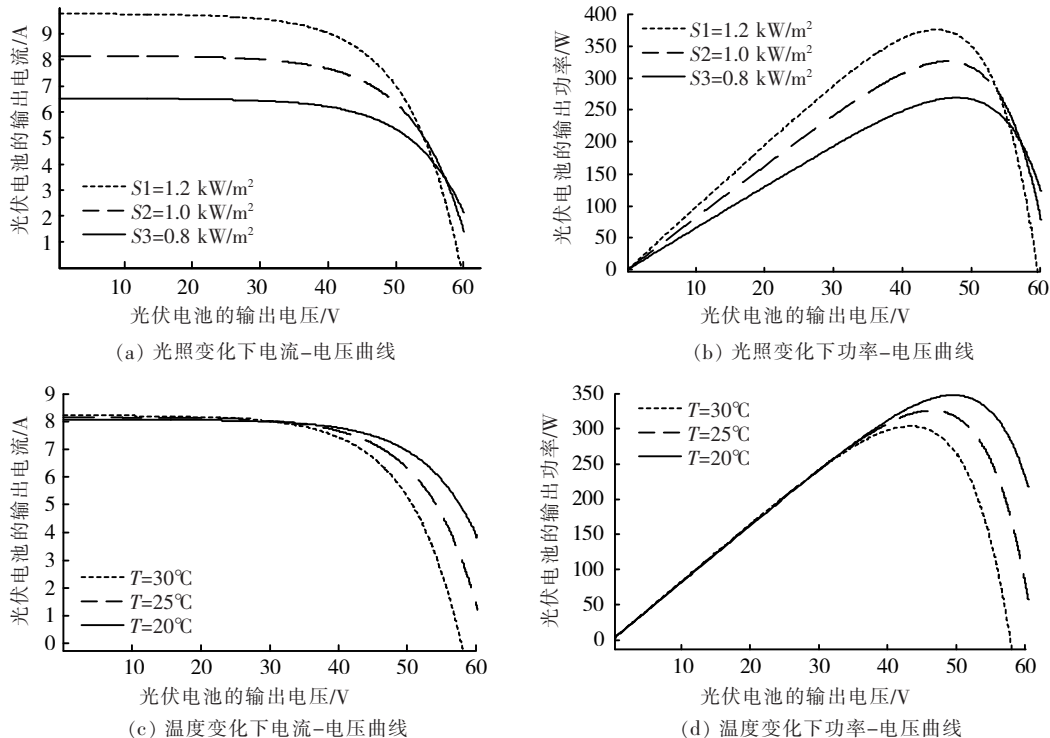


图 1 不同环境下光伏电池的输出特性曲线

Fig.1 PV characteristics in different environment

从其输出的功率特性曲线上可以看出, 光伏电池的输出功率存在一个最大的点, 而这个点会随着光伏电池的光照条件、温度条件的变化而变化。

1.2 定步长、变步长法的对比分析

扰动观察法(P&O 法)的原理是给光伏电池的输出电压一个人为的扰动,根据扰动前后光伏电池系统输出功率的变化情况,依据使其输出功率变大的原则来对光伏电池进行控制,从而使其输出功率达到最大值的方法。如图 2 所示,假设光伏电池初始输出电压为 U_1 ,对应的输出功率为 P_1 。给了一个人为的扰动 ΔU 使其输出电压为 U_2 ,则其输出功率变为 P_2 ,上述过程称为扰动; P_2 比 P_1 大,则可以确定输出电压的调节方向,即电压应该增大才能有更大的输出功率,这个过程称为观察。多次扰动观察后,光伏电池的输出功率将工作在最大功率 P_{\max} 附近,实际工作点在 P_{\max} 附近震荡。

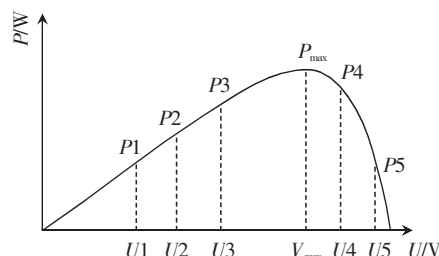
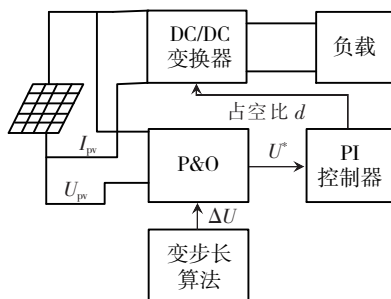


图 2 P&O 法示意图

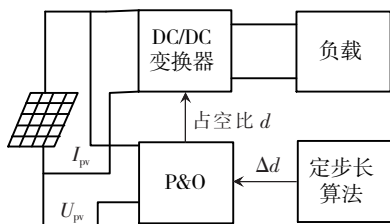
Fig.2 P&O diagrammatic sketch

P&O 法的控制思想简单,实现方便,无需额外的设备就能够提高太阳能的利用率。P&O 法的缺点是,稳态时会在最大功率点附近振荡运行,扰动时的步长难以确定等^[11-15]。定步长的 P&O 法步长越短,光伏电池在最大功率点附近振幅越小,能量损失越小,但达到最大功率点的跟踪时间也越长,步长越大跟踪速度越快,但在最大功率点附近振幅越大,能量损失越大。定步长的 P&O 法其控制结构如图 3(a) 所示。

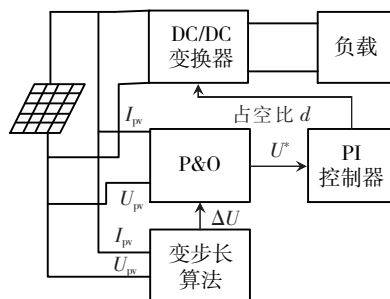
通常光伏电池的并网或独立运行,都是使用 DC/DC 变换器再逆变实现的。DC/DC 变换器的实现方法是多样的,大部分为 BUCK/BOOST 电路,随着高频变压器的发展,现在也有很多采用移相全桥调压^[16,17]的高频逆变器是经过升压变压器升压和隔离,然后通过不控整流得到直流电压的。无论采用何种 DC/DC 变换器,在 P&O 法中对输出电压的调整实际上是通过调整 DC/DC 变换器中的占空比 d 来调整光伏电池的等效负载,从而实现输出电压的调整。因此也有直接通过扰动占空比、观察功率变化来实现最大功率跟踪。其控制结构如图 3(b)。如果根据实际需求改变扰动步长,则可以获得较好的跟踪效果,兼顾快速性与稳定性。因此变步长的 P&O 法应运而生。一般的变步长 P&O 法控制结构图如图 3(c) 所示。



(a) 定步长 P&O 法控制结构图



(b) 直接占空比定步长 P&O 法控制结构图



(c) 一般变步长 P&O 法控制结构图

图 3 各种 P&O 算法的结构图

Fig.3 Structures of different P&O algorithm

对于变步长的 P&O 法,典型的有步长分级法、步长递减法等^[18,19]。步长分级法即在调整过程中,根据功率的变化 ΔP (或 $\Delta P/\Delta U$) 的大小,把对应的步长 Δd (或 ΔU) 分成多个等级。当 ΔP (或 $\Delta P/\Delta U$) 较大时, Δd (或 ΔU) 也较大,用于快速跟踪。当 ΔP (或 $\Delta P/\Delta U$) 较小时, Δd (或 ΔU) 也较小,用于减小在最大功率点附近的振荡。步长递减法即调节过程中每次步长与上次调节的步长存在一个比例关系,逐渐减小,从而减小在最大功率点附近的振荡。也有把步长分级连续化的变步长 P&O 法。

变步长 P&O 法可以较好的克服定步长 P&O 法面临的快速性与效率性不可兼得的弱点,因而成为了 P&O 法 MPPT 技术研究的热点。

2 自适应变步长算法

以上介绍的算法相对于定步长 P&O 法有较大的提升,但它们却存在不同程度的缺陷,它们并非真正的自适应或复杂程度及成本较高或难以适应不同的系统、通用性能差等。

因此,本文提出了一种自适应 P&O 法,该方法拥有更优的性能、易于实现、成本低,且其核心算法具有

普遍适用性.

该方法需要由滤波后的电池输出电压、电流信号计算出光伏电池输出的功率. 根据功率信号的变化生成自适应扰动值. 在 P&O 法的初始阶段较大的扰动可以让系统快速到达最大功率点附近, 而后再逐渐减小扰动的大小, 可以减小或避免系统在最大功率点处的功率振荡.

而从光伏特性曲线上可以看出, 初始阶段, 连续功率计算值之间的变化较大, 越接近最大功率点附近, 该变化会越小. 因此, 可以利用功率的变化量来形成扰动信号, 从而可以得到变步长的扰动. 在控制中需使该扰动在稳态运行时候尽可能小, 同时尽量避免系统发生超调, 消除稳态时的振荡. 为实现这样的控制目标, 最简单有效的方法是用一个 PI 调节器, 功率计算值之间的变化形成误差信号 ΔP_{pv} , 再经过该 PI 调节器产生自适应的扰动电压值 ΔU^*_{pv} , 通过扰动观察来产生光伏电池电压的指令值. 为了使光伏电池能够准确跟踪指令电压, 再使用一个 PI 调节器, 由实际值和参考值的误差产生占空比信号 d , 从而控制光伏电池的等效负载.

该方法的控制结构如图 4 所示:

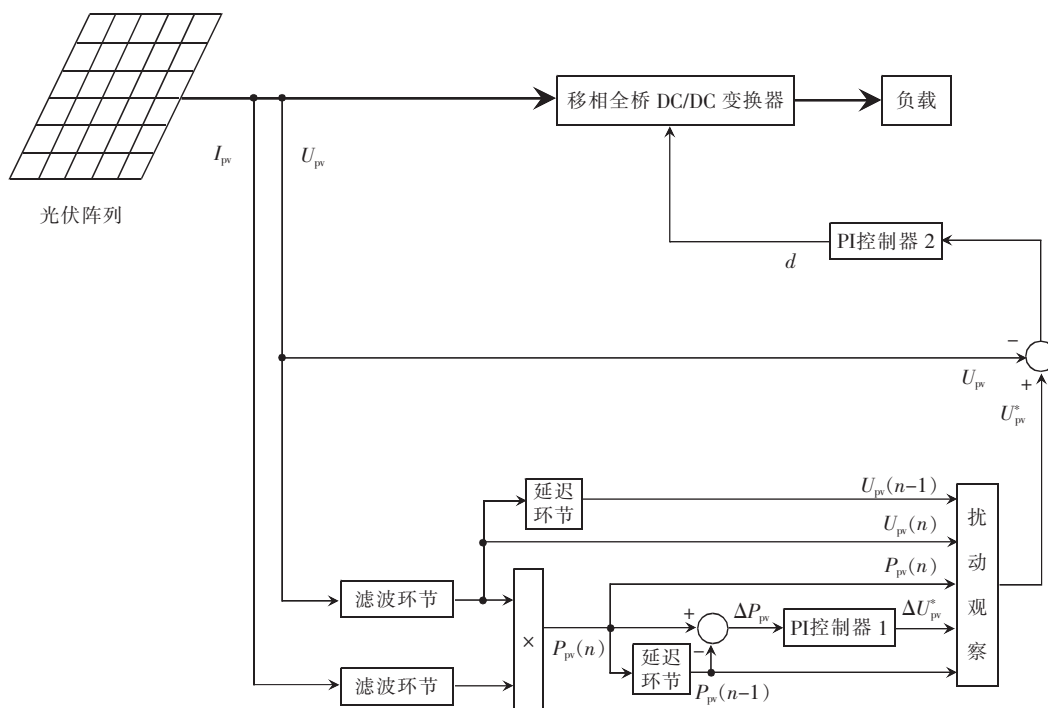


图 4 自适应扰动观察法原理图

Fig.4 Schematic of the efficient and adaptive P&O algorithm

自适应扰动观察法的运作原理可分为以下几个步骤:

(1) 首先读取当前时刻的光伏阵列电压和电流信号; 为了减小测量过程中的噪声信号, 将采样得到的电压、电流信号进行平均值滤波;

(2) 根据滤波后的电压、电流值计算得到光伏阵列的输出功率信号:

$$P_{pv}(n) = U_{pv}(n) \times I_{pv}(n). \quad (3)$$

(3) 计算两个连续的功率信号之间的变化, 得到功率误差信号:

$$\Delta P_{pv}(n) = P_{pv}(n) - P_{pv}(n-1). \quad (4)$$

该方法的核心就是将功率误差信号通过 PI 控制器来产生扰动信号, 因此扰动值的大小既非固定值又不依赖于设计者, 而是直接随系统的功率变化而变化.

(4) 根据 PI 调节器计算光伏阵列参考电压的扰动大小:

$$\Delta U^*_{pv}(n) = \Delta U^*_{pv}(n-1) + K_{p1} [\Delta P_{pv}(n) - \Delta P_{pv}(n-1)] + K_{i1} \Delta T_s \Delta P_{pv}(n), \quad (5)$$

上式中 K_{p1} 、 K_{i1} 分别为 PI 调节器 1 的比例和积分常数; ΔT_s 为采样间隔(PI 调节器的输出被限制在光伏阵列在标准光照情况下开路电压的 $\pm 10\%$).

(6) 根据扰动观察法的基本原理,计算光伏阵列的参考电压:

$$U_{pv}^*(n) = \begin{cases} U_{pv}^*(n-1) + |\Delta U_{pv}^*(n)| & \Delta P \times \Delta U > 0 \\ U_{pv}^*(n-1) - |\Delta U_{pv}^*(n)| & \Delta P \times \Delta U < 0 \end{cases} \quad (6)$$

(7) 计算光伏阵列电压参考值和实际值之间的误差:

$$e_{pv}(n) = U_{pv}^*(n) - U_{pv}(n). \quad (7)$$

(8) 根据 $e_{pv}(n)$ 由 PI 调节器 2 产生功率变换器的占空比信号:

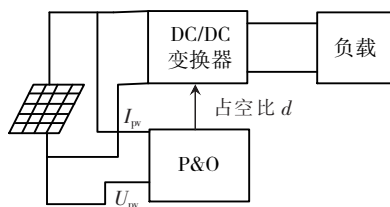
$$d(n) = d(n-1) + K_{p2} [e_{pv}(n) - e_{pv}(n-1)] + K_{i2} \Delta T_s e_{pv}(n), \quad (8)$$

上式中 K_{p2} 、 K_{i2} 分别为 PI 调节器 2 的比例和积分常数 d 为 DC/DC 变换器的占空比. 由于本文实际采用的是移相全桥电路,控制信号还需要将占空比 d 转换成移相角.

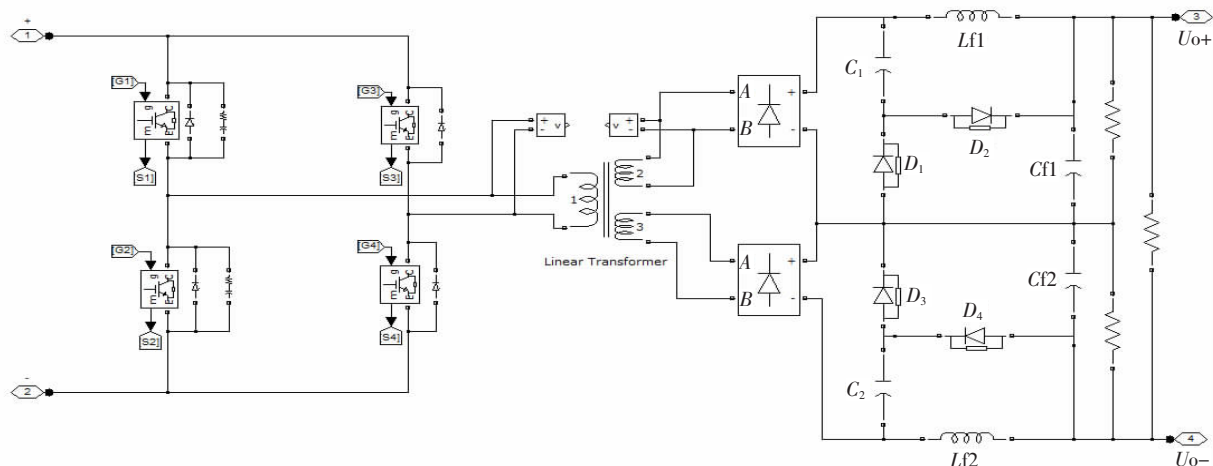
3 仿真与对比

3.1 仿真电路与算法流程图

总的仿真电路如图 5(a) 所示. 仿真使用基于移相全桥高频逆变器技术的 DC/DC 变换器,负载为电阻,设定值为 23Ω . DC/DC 变换器与负载的电路展开后如图 5(b) 所示.



(a) 仿真原理图



(b) DC/DC 变换器电路图

图 5 仿真电路图

Fig.5 Circuit diagrams of simulation

仿真针对定步长、经典变步长、自适应变步长 3 种方法进行. 控制算法全部由 S-Function 实现. 其中定步长算法又分别采用短步长 (2.7%) 与长步长 (4.4%) 实现. 经典变步长算法是将步长分级连续化. 自适应算法的思想上节已经介绍.

上述的 MPPT 控制均采用 Simulink 中 S-Function 实现. 使用不同的控制算法时,只要更改 S-Function 中调用的函数名即可实现算法切换.

3.2 光照突变情况下的仿真对比

为了对比不同的 P&O 算法的控制效果,仿真中模拟了一次光照突变. 光照的情况是: $0 \sim 0.3 \text{ s}$, 光照强

表 2 不同光照下光伏电池的最大输出功率

Table 2 The maximum power of PV cell with different illumination

光照强度/ kW/m^2	实际可输出最大功率/W
1.0	326.260 4
1.2	375.790 7

度为 1 kW/m^2 。0.3 ~ 0.5 s 为 1.2 kW/m^2 , 即在 0.3 s 时发生了光照的突变。

所有的算法都是从 0.05 s 时开始进行控制的。控制周期都是 0.018 s。其中自适应算法是双闭环 PI 控制器, 外环控制周期 0.018 s, 内环 0.0018 s。仿真的功率波形图如图 6 所示。

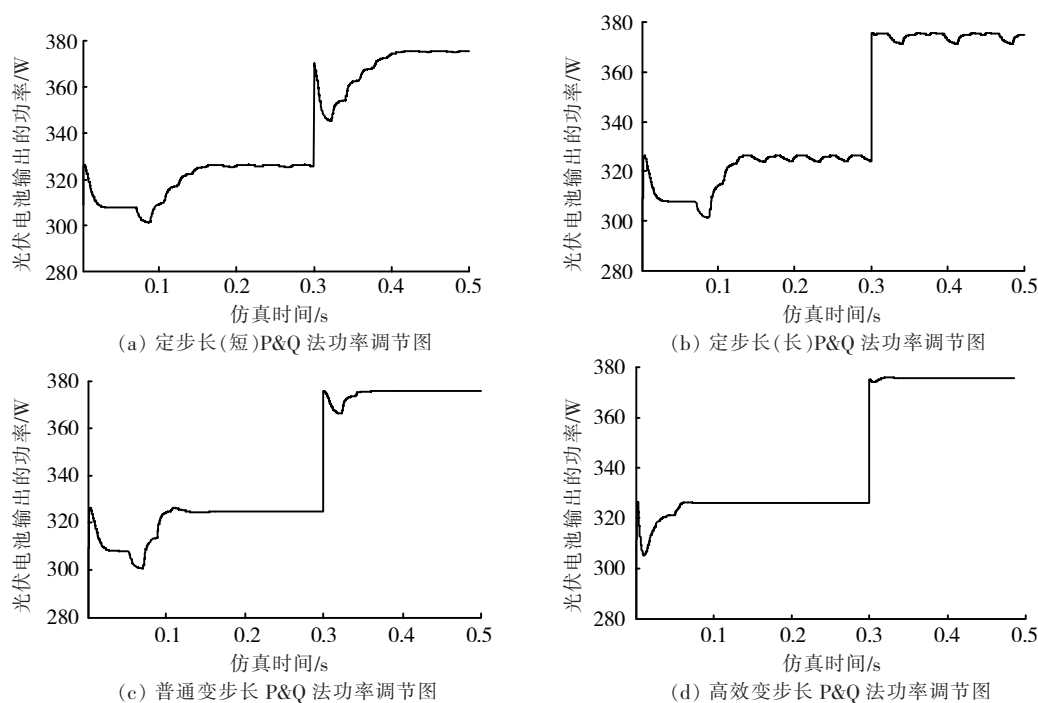


图 6 各算法仿真的功率波形图

Fig.6 Curve of power with different algorithms

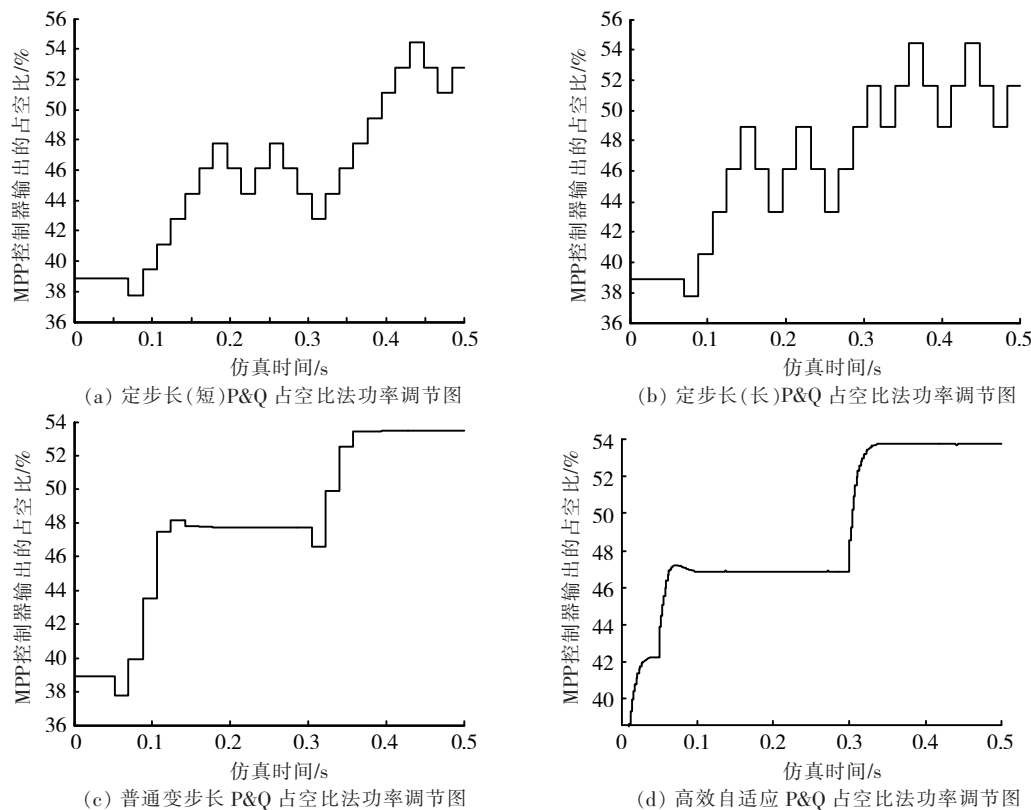


图 7 各算法控制的占空比调节图

Fig.7 Curve of duty ratio with different algorithms

3.3 仿真结果对比与分析

将仿真图中的重要信息整理成表3.

表3 各P&O算法的调节效果对比图
Table 3 The comparison of different algorithms

	定步长(短)	定步长(长)	普通变步长	自适应
启动后调节时间/s	0.11	0.065	0.08	0.05
突变后调节时间/s	0.1	0.04	0.06	0.04
最大功率点附近震荡/W	± 0.5	± 1.5	约为0	约为0

从0.05 s(启动调节器)之后的调节情况来看,定步长的P&O算法,最终都不可避免存在一定的振荡,步长越大,振荡越大,但是其调节速度也相对越快.这点与理论相符.而变步长的P&O算法,都可以较快地调节至最大功率点,最后也可以较好地稳定在最大功率附近,其振荡很小.自适应的P&O法调节速度是相对最快的.

在0.3 s光照条件突变之后,各算法都能立即响应.虽然定步长(长)的P&O法调节速度很快,但是其振荡很大,无法稳定在最大功率点.而自适应的P&O法速度依然很快,且振荡很小.

从对比中我们可以发现,变步长的P&O法对最大功率的跟踪效果要明显好于定步长的算法,而本文提出的自适应P&O算法的跟踪效果优于普通的简单变步长算法.更能够适应环境条件迅速变化的复杂情况.

4 结论

分析了各种扰动观察法(P&O法)在光伏电池最大功率跟踪(MPPT)方面的优劣,针对定步长算法的不足,提出了一种自适应的P&O算法.该算法以光伏电池的输出功率变化为扰动产生源,结合最大功率跟踪的动态特征,通过电压与占空比的双闭环实现了扰动观察法的变步长调节.仿真结果表明,该算法能同时满足MPPT的快速性与效率性要求.

[参考文献](References)

- [1] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000:31-35.
Wang Zhaoan, Huang Jun. Power Electronics Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 31-35. (in Chinese)
- [2] 冯垛生,王飞. 太阳能光伏发电技术图解指南[M]. 北京:人民邮电出版社,2011:82-88.
Feng Duosheng, Wang Fei. Illustrated Guide of Solar Photovoltaic Technology[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2011: 82-88. (in Chinese)
- [3] 范莉平. 光伏发电逆变技术的发展趋势及其解决方案[J]. 电气技术, 2008(8): 153-156.
Fan Liping. Photovoltaic power inverter technology development trend and its solutions[J]. Electrical Engineering, 2008(8): 153-156. (in Chinese)
- [4] Ahmed K Abdelsalam, Ahmed M Massoud, Shehab Ahmed, et al. High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1 010-1 019. (in Chinese)
- [5] 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): 1 248-1 251.
Mao Meiqin, Yu Shijie, Su Jianhui. Versatile matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2005, 17(5): 1 248-1 251. (in Chinese)
- [6] 李炜,朱新坚. 光伏系统最大功率点跟踪控制仿真模型[J]. 计算机仿真, 2006, 23(6): 239-243.
Li Wei, Zhu Xinjian. The maximum power point tracking control of a photovoltaic power system[J]. Computer Simulation, 2006, 23(6): 239-243. (in Chinese)
- [7] 李小燕,王新,郑飞,等. 光伏并网发电系统的MPPT改进算法及其在光照突变时的仿真[J]. 能源技术, 2009, 30(5): 272-279.
Li Xiaoyan, Wang Xin, Zheng Fei, et al. The MPPT improved algorithm and simulation under changing irradiance of grid-connected PV systems[J]. Energy Technology, 2009, 30(5): 272-279. (in Chinese)
- [8] 刘春美. 光伏发电系统移相全桥DC/DC变换器及控制方法研究[D]. 西安:西安理工大学自动化与信息工程学院,

- 2010: 41-51.
- Liu Chunmei. The Design of Phase-Shifted Full-Bridge DC/DC Converter and Control Method in Photovoltaic Power Generation System[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology Automatic and Information Engineering College, 2010: 41-51. (in Chinese)
- [9] 王宝忠, 刘卫法, 付宁宁, 等. 光伏并网发电系统 MPPT 算法研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(34): 8 432-8 438.
Wang Baozhong, Liu Weifa, Fu Ningning, et al. Research on MPPT control algorithms for grid-connected PV system[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(34): 8 432-8 438. (in Chinese)
- [10] 李冬辉, 王鹤雄, 朱晓丹, 等. 光伏并网发电系统几个关键问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 208-214.
Li Donghui, Wang Hexiong, Zhu Xiaodan, et al. Research on several critical problems of photovoltaic grid-connected generation system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 208-214. (in Chinese)
- [11] 焦阳, 宋强, 刘文华. 光伏电池实用仿真模型及光伏发电系统仿真[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 198-202.
Jiao Yang, Song Qiang, Liu Wenhua. Practical simulation model of photovoltaic cells in photovoltaic generation system and simulation[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 198-202. (in Chinese)
- [12] 张超, 何湘宁, 赵德安. 光伏发电系统变步长 MPPT 控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 47-49.
Zhang Chao, He Xiangning, Zhao Dean. Research on variable perturb step MPPT control of photovoltaic system[J]. Power Electronics, 2009, 43(10): 47-49. (in Chinese)
- [13] 任碧莹, 申明, 孙向东. 一种新颖的光伏电池最大功率点跟踪方法[J]. 电力电子技术, 2010, 44(11): 10-12.
Ren Biying, Shen Ming, Sun Xiangdong. A novel maximum power point tracking method for photovoltaic cell[J]. Power Electronics, 2010, 44(11): 10-12. (in Chinese)
- [14] 朱湘临, 廖志凌, 刘国海. 太阳能电池 MPPT 方法的初值问题及其实验研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(2): 7-9.
Zhu Xianglin, Liao Zhiling, Liu Guohai. Research on the initial values of MPPT algorithm for solar cell[J]. Power Electronics, 2010, 44(2): 7-9. (in Chinese)
- [15] 陈剑, 赵争鸣, 袁立强, 等. 光伏系统最大功率点跟踪技术的比较[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(5): 700-704.
Chen Jian, Zhao Zhengming, Yuan Liqiang, et al. Comparison of maximum power point tracking technologies for photovoltaic power systems[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(5): 700-704. (in Chinese)
- [16] Eftichios Koutroulis, Kostas Kalaitzakis, Nicholas C Voulgaris. Development of a microcontroller-based photovoltaic maximum power point tracking control system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(1): 46-54.
- [17] Mei Qiang, Shan Mingwei, Liu Liying, et al. A novel improved variable step-size incremental-resistance MPPT method for PV systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 58(6): 2 427-2 434.
- [18] Hairul Nissah Zainudin, Saad Mekhilef. Comparison Study of Maximum Power Point Tracker Techniques for PV Systems[C]// The 14th International Middle East Power Systems Conference. Egypt, 2010: 750-755.
- [19] Durgadevi A, Arulselvi S, Natarajan S P. Study and Implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Algorithm for Photovoltaic Systems[C]// International Conference on Electrical Energy Systems. Newport Beach, 2011: 240-245.

[责任编辑: 刘 健]