

DOI: 10.7667/PSPC161905

# 基于功率预测的新型变步长电导增量法 最大功率点跟踪策略

盛四清, 陈玉良

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 光伏电池的输出特性具有强烈的非线性, 最大功率点跟踪技术能够提高光伏系统的效率。常规定步长算法在选取步长时在响应速度和稳态精度之间无法兼顾。变步长算法在同一光照强度具有良好性能, 但在光照突变时存在最大功率点跟踪死区的情况。提出了基于功率预测的新型变步长电导增量法。该方法采用一种新的步长调整系数, 能够根据外界条件的变化调节步长, 解决了跟踪速度与稳态精度之间的矛盾。并且当光照剧烈变化时, 确保扰动前后的判断是基于同一功率曲线进行的, 避免误判现象的发生。仿真验证了该算法的有效性。

**关键词:** 最大功率点跟踪; 变步长; 电导增量法; 功率预测; 步长调整系数

## Maximum power point tracking strategy based on power predication for a novel variable step-size incremental conductance algorithm

SHENG Siqing, CHEN Yuliang

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The output characteristics of photovoltaic cells are strongly nonlinear, and the maximum power point tracking technique can improve the efficiency of photovoltaic systems. Traditional fixed step-size algorithm must take a compromise between the steady-state accuracy and the response speed in selecting step. Variable step-size algorithm has good performance at the same light intensity, while it exists dead zone of maximum power point tracing when the external conditions change drastically. A new variable step-size incremental conductance method based on power prediction is proposed. This method adopts a new step-size adjustment coefficient. It can adjust the step size according to the change of external conditions and solve the contradiction between tracking speed and steady-state precision. When the illumination changes drastically, the algorithm ensures that the judgments before and after the disturbance are carried out on the same power curve to avoid the occurrence of misjudgment. Simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** maximum power point tracking; variable step-size; incremental conductance; power prediction; step adjustment factor

## 0 引言

随着全球工业化进程的快速发展, 人们的生活质量得到了极大的提高, 同时全球能源消耗也在快速增长。大规模、无节制地开发化石燃料不仅加快了这些能源的枯竭速度, 同时也产生了日益严重的环境问题。因此, 改变能源结构以及积极开发利用可再生能源已经成为当今社会发展的必然趋势。太阳能作为一种广泛存在的清洁能源, 具有巨大的潜力。

光伏发电是目前太阳能最重要的一种利用形式, 但由于光照和温度等因素的影响, 光伏电池的输出电压和输出电流具有强烈的非线性特征。在特定的光照强度和温度下存在唯一的最大功率输出点, 为了提高输出效率, 使得光伏电池始终工作在最大功率点, 最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制成为光伏发电系统一个必不可少的环节。目前 MPPT 方法有很多种<sup>[1-7]</sup>, 根据控制对象以及控制算法的特征不同, MPPT 技术可以分为基于优化数学模型的控制方法、基于扰动自寻优的控制方法<sup>[8]</sup>以及基于智能处理方法和其

非线性控制策略的控制方法<sup>[9-11]</sup>等。扰动观测法和爬山法是目前应用最广泛的两种最大功率点跟踪方法。对于上述两种方法来说, 扰动步长的选取十分重要。若选取的步长较大, 系统的动态响应速度较快, 但是在 MPP 附近会出现明显的振荡现象, 稳态功率损失较大; 若选取较小的步长, 跟踪精度得到很大的保障, 但跟踪速率较低。对于定步长的扰动观测法和电导增量法必须在响应速度和稳态精度之间取一个折中。文献[12-13]分别提出了一种变步长算法。上述方法在环境条件不变时相比固定步长算法具有良好的稳态精度; 当光照发生突变时, 其步长因子在不同辐射强度下差别很大, 导致该算法的瞬态响应速度受到很大的影响, 并且在光照剧烈变化时, 光伏阵列输出曲线并非处于一条单峰值曲线上, 因此会发生误判的现象。文献[14]指出,  $|dP/dU|$  曲线在不同光照强度的差异主要由光伏阵列的输出电流引起的, 为了消除这种差异, 提出了以  $\frac{1}{I(k)} \left| \frac{dP}{dU} \right|$  为步长调整系数, 该算法的瞬态响应速度与稳态精度都比较优异, 但其计算量较大, 对软件和硬件的要求较高。

论文中提出的新型变步长电导增量法, 能够根据外界条件的变化调节步长, 解决了跟踪速度与稳态精度之间的矛盾, 同时为了消除误判现象, 确保扰动前后的判断是在同一条功率曲线上进行的, 将功率预测算法与该新型变步长算法相结合。在 Simulink 进行仿真验证, 结果表明, 该方法能够有效避免误判现象的发生, 具有良好的动态和稳态性能。

## 1 光伏电池数学模型及仿真

光伏电池是利用光伏效应将光能转化为电能的器件, 根据光伏电池的内部结构以及输出特性得到光伏电池的等效电路如图 1 所示。光伏电池电动势产生的光电流为  $I_{ph}$ , 其值受到光照强度和温度等因素的影响;  $I_d$  为 PN 结正向电流;  $I_{sh}$  为因 PN 结缺陷产生的漏电流。

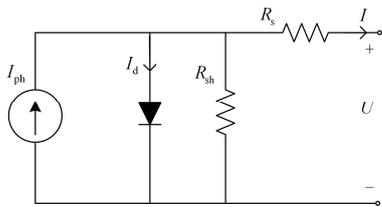


图 1 光伏电池等效电路

Fig. 1 Photovoltaic battery equivalent circuit

根据等效电路图可知光伏电池的输出电流为

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(U + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中:  $I_{ph}$  为光生电流;  $I$  为光伏电池输出电流;  $U$  为输出电压;  $R_s$  为串联电阻;  $R_{sh}$  为并联电阻;  $q$  为电子电荷常数;  $A$  为二极管常数因子;  $K$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度。

由上式可知, 该方程属于超越方程, 求解困难。因此需要对上述公式进行化简以得到工程实用的数学模型。工程实际中提供了在标准测试条件下的开路电压  $U_{oc}$ 、短路电流  $I_{sc}$ 、光伏最大功率点输出电压  $U_m$  以及最大功率点电流  $I_m$ , 对式(1)进行化简得到:

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp \left( \frac{U}{C_2 U_{oc}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

其中, 根据开路条件以及当系统位于最大功率点时的相关约束得到:

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp \left( \frac{-U_m}{C_2 U_{oc}} \right) \quad (3)$$

$$C_2 = \left( \frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \left[ \ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

公式(2)描述的是在标准温度  $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$ 、标准辐射强度  $S_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$  情况下的特性曲线, 而辐射强度和环境温度与光伏电池特性曲线有着密切的关系, 所以对模型进行修正。考虑到辐射强度对光伏阵列表面温度的影响, 对温度  $T$  进行修正, 有

$$T(^{\circ}\text{C}) = T_{air}(^{\circ}\text{C}) + K(^{\circ}\text{C} \times \text{m}^2/\text{W}) \cdot S(\text{W}/\text{m}^2) \quad (5)$$

实际情况与标准条件相比的辐射强度差  $\Delta S$  和环境温度差  $\Delta T$  分别为

$$\begin{cases} \Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \\ \Delta T = T - T_{ref} \end{cases} \quad (6)$$

应用式(6)对上述式(2)中的  $I_{sc}$ 、 $U_{oc}$ 、 $I_m$ 、 $U_m$  进行修正, 得到

$$\begin{cases} I_{sc}^* = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \\ U_{oc}^* = U_{oc} (1 - \gamma \Delta T) \ln(1 + \beta \Delta S) \\ I_m^* = I_m \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \\ U_m^* = U_m (1 - \gamma \Delta T) \ln(1 + \beta \Delta S) \end{cases} \quad (7)$$

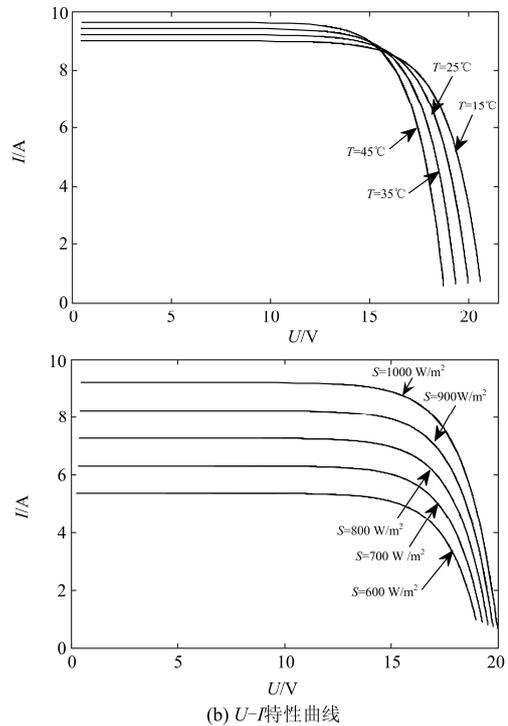
式中:  $\alpha = 0.0025^\circ\text{C}$ ;  $\beta = 0.5^\circ\text{C}$ ;  $\gamma = 0.00288^\circ\text{C}$ 。

将修正后的  $I_{sc}^*$ 、 $U_{oc}^*$ 、 $I_m^*$ 、 $U_m^*$  代入式(3)、式(4)即可得到  $C_1$ 、 $C_2$  表达式, 再将  $C_1$ 、 $C_2$  代入式(2)

即可得到受环境温度以及辐射强度影响的光伏电池特性曲线。

根据式(2)一式(7)，在 Matlab/Simulink 中建立工程实际的光伏电池数学模型。光伏阵列输出电流为数学信号，为了实现数学信号和物理信号的转变，将受控电流源与光伏电池输出电流相连接，再通过电压测量模块将光伏阵列输出电压作为自变量反馈到输入端。光伏阵列的输出受到诸多因素的影响，环境温度、光照强度和负载特性都会使得最大功率点的位置发生变化。为了使光伏电池尽可能实时输出最大功率，需明确外界温度和光照强度对光伏电池输出特性的影响。图 2 设定环境温度分别为 15°C、25°C、35°C 和 45°C；设定光照强度分别为 600 W/m<sup>2</sup>、700 W/m<sup>2</sup>、800 W/m<sup>2</sup>、900 W/m<sup>2</sup> 以及 1000 W/m<sup>2</sup>。不同温度和光照强度下的 U-I (电压—电流)、P-U (有功—电压)曲线如图 2 所示。

图 2 表明，光伏阵列的输出电流与电压呈非线性关系，并且温度和光照强度对光伏电池的输出特性影响很大。在相同光照下，随着温度的上升，开路电压向左偏移，短路电流变化不大，随着温度的增加，短路电流只是略有增加，最大功率点向下偏移，表明光伏系统具有负的温度系数；在相同温度下，随着光照强度的增加，开路电压缓慢增加，短路电流显著增加，最大功率点向上偏移。



(b) U-I特性曲线

图 2 不同温度、光照强度光伏电池输出特性

Fig. 2 Photovoltaic cell output characteristics under different temperatures and light intensities

## 2 最大功率点跟踪算法

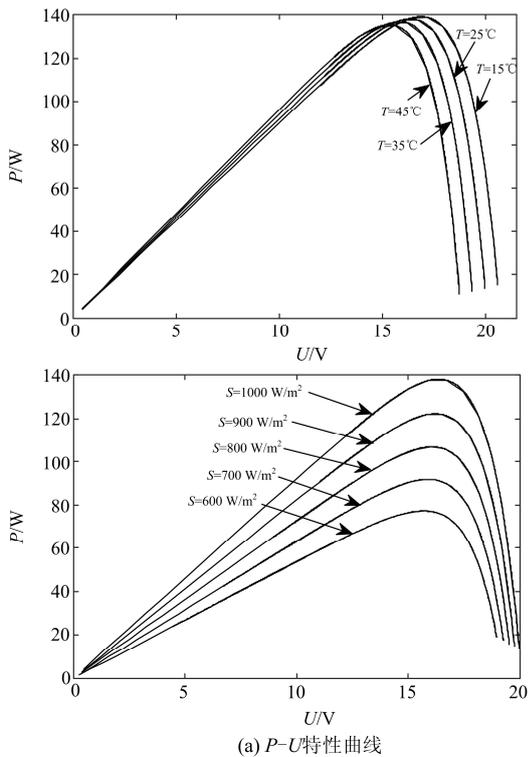
### 2.1 变步长电导增量法

由于常规电导增量法的步长为固定步长，因此在响应速度和稳态精度之间无法兼顾<sup>[15-17]</sup>。当选取较大的步长时跟踪速度得到提高，但稳态功率损失较多；选取较小的步长时跟踪精度得到保障，但跟踪速度下降。为了解决稳态精度和响应速度之间的矛盾，提出了变步长电导增量法，其步长更新规则为

$$U(k) = U(k-1) \pm N \cdot \left| \frac{dP}{dU - dI} \right| \quad (8)$$

式中：N 为采样周期内调整步长的缩放因子；U(k)、U(k-1) 分别为 k 时刻以及 (k-1) 时刻的电压值。在向最大功率点寻优的过程中，扰动功率 dP 的值不断减小，从而扰动电压的步长也不断缩小，在最大功率点附近时，扰动电压步长趋近于 0，从而实现最大功率点跟踪的目的。图 3 为新型变步长电导增量法流程图。

在光照强度剧烈变化时，光伏电池特性曲线会随光照强度相应发生剧烈变化，而 MPPT 装置的数字采样频率是有限的，环境条件变化后，采样得到的功率值和电压值是来自不同的功率—电压曲线上的数值，利用上述数值计算得到的步长因子来调节光伏输出时会发生振荡以及误判现象<sup>[18]</sup>。如图 4 所



(a) P-U特性曲线

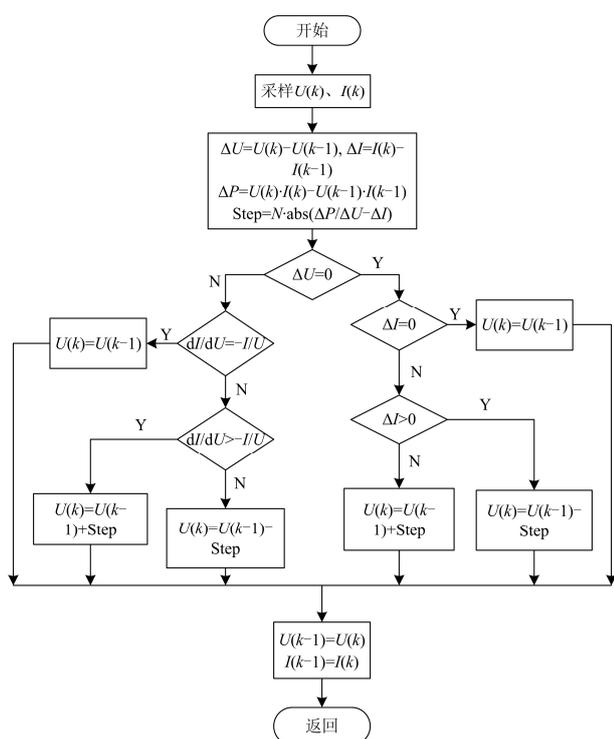


图3 新型变步长电导增量法流程图

Fig. 3 Flowchart of the variable step size incremental conductance algorithm

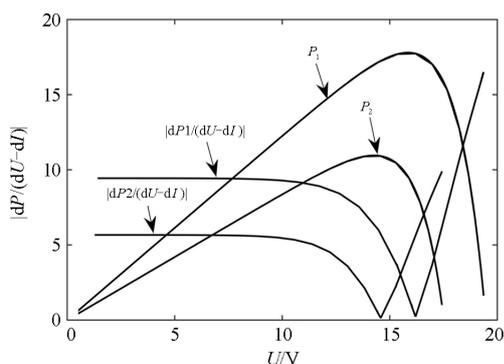


图4 干扰步长关系曲线

Fig. 4 Interference step relationship curve

示, 变步长电导增量法中的缩放因子  $N$  一旦确定, 无法再改变。曲线  $P_1$ 、 $P_2$  分别为在光照强度为  $1200 \text{ W/m}^2$ 、 $800 \text{ W/m}^2$  时光伏阵列的输出功率曲线。在功率曲线  $P_1$  的条件下, 其缩放因子以及干扰步长分别为  $N_1$  和  $|dP_1/(dU - dI)|$ 。在功率曲线  $P_1$  对应的光照强度下具有良好的精度和动态响应速度。然而当光照强度突然变化时, 系统功率曲线由  $P_1$  变为  $P_2$ , 因采样频率有限, 此时以上述采样值计算得到的干扰步长来调节输出时就会造成功率曲线  $P_2$

的干扰步长很大, 出现振荡现象, 稳态精度达不到要求。反之, 在功率曲线  $P_2$  的条件下, 当发生光照突变时, 就会导致功率曲线  $P_1$  的干扰步长很小, 造成系统启动以及动态响应速度变慢的现象。在光照突变时, 光伏阵列输出曲线并非处于一条单峰值曲线上, 因此无法找到一组缩放因子  $N$  和干扰步长  $|dP/(dU - dI)|$  同时满足不同光照条件下最大功率跟踪控制, 导致 MPPT 跟踪失败。在此基础上加入功率预测算法<sup>[19]</sup>, 以此来保证扰动前后判断是在同一条功率曲线上进行的, 从而消除误判现象。

## 2.2 功率预测算法

图5为功率预测原理图。假设光伏电池温度保持不变, 在第  $k$  时刻的控制电压为  $U(k)$ , 采样得到的光伏电池功率为  $P(k)$ 。在  $k+1$  时刻加入扰动后控制电压为  $U(k+1)$ , 由于光照强度发生变化, 此时的功率采样值为  $P(k+1)$ 。 $P(k)$ 、 $P(k+1)$  分别为不同光照条件下的电压-功率曲线上的值, 用该值进行跟踪控制就会导致发生误判。为了解决上述问题, 在  $k$  和  $k+1$  采样时刻中间, 控制电压保持不变, 增加一次功率检测。如图5虚线所示, 得到该曲线功率记为  $P'(k+1/2)$ , 假设光照强度均匀变化, 则光伏电池输出电流与光照强度成正比, 得到下一周期的预测功率为

$$P'(k) = 2P(k+1/2) - P(k) \quad (9)$$

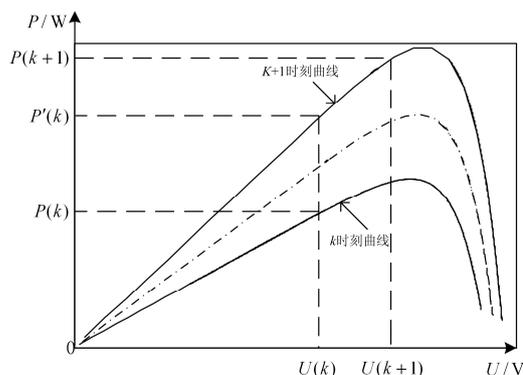


图5 功率预测原理图

Fig. 5 Diagram of power prediction

在  $k+1$  时刻测得的功率值为  $P(k+1)$ ,  $P'(k)$  和  $P(k+1)$  在理论上是同一光照强度下的功率值, 因而不存在误判的情况。

## 3 仿真实验

为比较常规电导增量法与基于功率预测的变步长电导增量法的优劣, 在 Simulink 中建立光伏系统数学模型, 设定环境温度为  $25^\circ\text{C}$ , 仿真时间为  $1 \text{ s}$ 。仿真时间  $0 \sim 0.5 \text{ s}$  时, 光照强度为  $1000 \text{ W/m}^2$ ; 仿

真时间为 0.5~1 s 时, 光照强度变为 800 W/m<sup>2</sup>。提出了三个能够反映算法暂态以及稳态性能的指标, 分别为: 光照强度由 1000 W/m<sup>2</sup> 突变为 800 W/m<sup>2</sup> 时追踪到 MPP 所用的时间  $t$ ; 光照强度为 1000 W/m<sup>2</sup> 时稳态功率振荡  $\Delta p$ ; 光照为正弦变化时在 0~0.65 s 输出能量的大小  $W$ 。性能对比如表 1 所示。

表 1 性能对比分析表

Table 1 Performance comparison analysis table

性能指标	控制算法	
	常规电导增量法	所提算法
$t/s$	0.15	0.07
$\Delta p/W$	4.2	1
$W/J$	62.7	66

由图 6 可以看出, 基于功率预测的变步长电导增量法与常规电导增量法相比, 加入功率预测的变步长电导增量法响应时间得到明显的改善。定步长电导增量法在最大功率点具有明显的振荡现象, 并且在光照强度发生变化时, 常规电导增量法的响应时间较长。表明新型变步长电导增量法能够使得最大功率点跟踪的准确性和快速性得到提高。

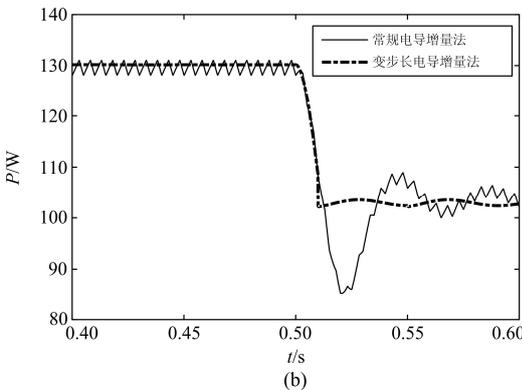
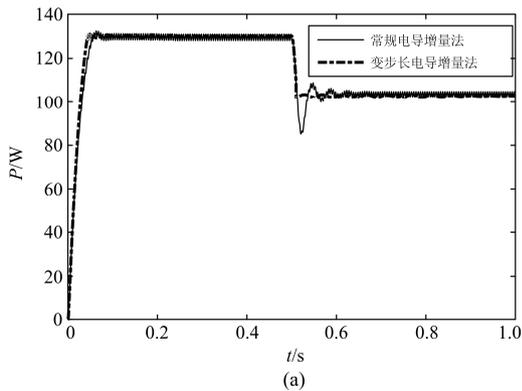


图 6 光照突变时光伏电池输出功率曲线

Fig. 6 Curve of output power change when lighting mutation

为了消除误判现象, 在新型变步长电导增量法的基础上增加功率预测算法。图 7 为基于功率预测的变步长电导增量法的仿真波形。

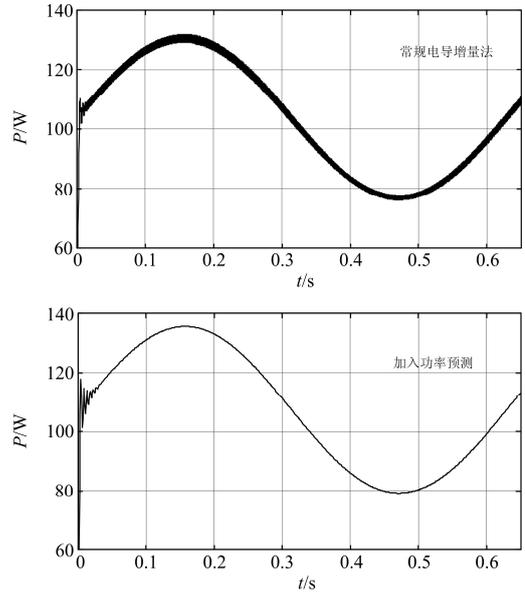


图 7 基于功率预测的变步长电导增量法仿真波形

Fig. 7 Variable step size incremental conductance simulation waveform based on power prediction

由图 7 和表 1 分析得知, 当所加光照为正弦变化时: 单纯采用电导增量法, 当光照强度达到最大值附近时, 光伏电池输出功率出现明显的振荡现象, 并且存在一定的功率损失; 当采用基于功率预测的变步长电导增量法时, 在整个自动寻优的过程中曲线比较光滑, 不存在明显的振荡现象。仿真结果表明, 与功率预测算法相结合的变步长算法能够有效解决误判问题。

### 4 结论

针对传统定步长寻优算法选取步长时在响应速度和稳态精度之间无法兼顾、变步长算法在同一光照强度具有良好性能, 但在光照突变时存在最大功率点跟踪死区的情况, 提出了基于功率预测的新型变步长电导增量法, 通过仿真, 得出以下结论:

1) 该变步长寻优算法能够解决传统定步长算法中响应速度和稳态精度无法兼顾的问题, 在保证响应速度的前提下减小稳态时功率振荡, 减少功率损失。

2) 在光照强度突变的条件下, 为解决变步长算法存在跟踪死区, 避免发生误判的情况, 在变步长算法的基础上加入功率预测算法, 进一步完善变步长寻优算法。

仿真结果表明, 该算法具有较好的稳态和动态性能, 具有实际意义。

### 参考文献

- [1] 高金辉, 李国成. 一种开路电压和短路电流相结合的 MPPT 算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 96-100.  
GAO Jinhui, LI Guocheng. Research on MPPT algorithm in combination with open circuit voltage and short circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 96-100.
- [2] 闫凯, 张保会, 霍继平, 等. 光伏发电系统暂态建模与等效[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 1-8.  
YAN Kai, ZHANG Baohui, HUO Jiping, et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 1-8.
- [3] 孙航, 杜海江, 季迎旭, 等. 光伏分布式 MPPT 机理分析与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 48-54.  
SUN Hang, DU Haijiang, JI Yingxu, et al. Photovoltaic distributed MPPT mechanism analysis and simulation study[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 48-54.
- [4] 程时润, 万钧力, 刘浩. 基于 LabVIEW 的光伏电池建模与仿真[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 17-21.  
CHENG Shirun, WAN Junli, LIU Hao. Modeling and simulation of photovoltaic cells based on LabVIEW[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 17-21.
- [5] 王琦, 郑丹丹, 温正庚. 局部阴影下光伏阵列建模对比分析与改进[J]. 陕西电力, 2017, 45(5): 13-21.  
WANG Qi, ZHENG Dandan, WEN Zhengeng. Modeling analysis and improvement of photovoltaic array under partially shaded condition[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(5): 13-21.
- [6] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0019-8
- [7] 周林, 武剑, 栗秋华, 等. 光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1145-1154.  
ZHOU Lin, WU Jian, LI Qihua, et al. Survey of maximum power point tracking techniques for photovoltaic array[J]. High Voltage Technology, 2008, 34(6): 1145-1154.
- [8] 徐鹏飞, 马高峰, 高金辉. 微元步长自适应增量电导法实现 MPPT 的控制[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 59-62.  
XU Pengfei, MA Gaofeng, GAO Jinhui. Infinitesimal step adaptive incremental conductance method MPPT control[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 59-62.
- [9] 李彬, 薛云灿, 王思睿, 等. 基于自适应模糊 PID 控制的最大功率点跟踪技术研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 7-10.  
LI Bin, XUE Yuncan, WANG Sirui, et al. Study on maximum power point tracking technology based on adaptive fuzzy PID control[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 7-10.
- [10] 陈亚爱, 周京华, 李津, 等. 梯度式变步长 MPPT 算法在光伏系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3156-3161.  
CHEN Yaai, ZHOU Jinghua, LI Jin, et al. Application of gradient variable step size MPPT algorithm in photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3156-3161.
- [11] 张开, 石季英, 林济铿, 等. 基于自适应滑模层极值搜索的光伏发电最大功率跟踪方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 33-37.  
ZHANG Kai, SHI Jiying, LIN Jikeng, et al. Maximum power point tracking method for photovoltaic systems using adaptive extremum seeking control based on sliding layer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 33-37.
- [12] LOUKRIZ A, HADDADI M, MESSALTI S. Simulation and experimental design of a new advanced variable step size incremental conductance MPPT algorithm for PV systems[J]. Isa Transactions, 2016, 62(1): 30-38.
- [13] ABDELSALAM A K, MASSOUD A M, AHMED S, et al. High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1010-1021.
- [14] 周东宝, 陈渊睿. 基于改进型变步长电导增量法最大功率点跟踪策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1491-1498.  
ZHOU Dongbao, CHEN Yuanrui. Maximum power point tracking strategy based on modified variable step-size incremental conductance algorithm[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1491-1498.
- [15] 朱铭炼, 李臣松, 陈新, 等. 一种应用于光伏系统 MPPT 的变步长扰动观察法[J]. 电力电子技术, 2010, 44(1): 20-22.  
ZHU Minglian, LI Chensong, CHEN Xin, et al. A variable

- step size P&O MPPT method for PV systems[J]. Power Electronics, 2010, 44(1): 20-22.
- [16] 杨勇, 朱彬彬, 赵方平, 等. 一种电流预测控制的自适应变步长最大功率跟踪方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 855-862.  
YANG Yong, ZHU Binbin, ZHAO Fangping, et al. An adaptive and variable step MPPT method based on current predictive controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 855-862.
- [17] 唐磊, 曾成碧, 徐伟, 等. 一种新颖的光伏自适应变步长最大功率点跟踪算法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 128-133.  
TANG Lei, ZENG Chengbi, XU Wei, et al. Variable-step adaptive MPPT algorithm for photovoltaic system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 128-133.
- [18] 廖志帆, 祁新梅, 郑寿森, 等. 光照强度快速变化时光伏系统稳定性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 60-65.  
LIAO Zhifan, QI Xinmei, ZHENG Shousen, et al. Stability analysis of photovoltaic generation system under rapid change of light intensity[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 60-65.
- [19] 徐红伟, 张立彬, 胥芳, 等. 基于功率预测和电压补偿的光伏电池 MPPT 方法研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(9): 1599-1605.  
XU Hongwei, ZHANG Libin, XU Fang, et al. Study on PV MPPT method based on power forecasts and voltage compensation[J]. ACTA Energiac Solaris Sinca, 2013, 34(9): 1599-1605.

---

收稿日期: 2016-11-15; 修回日期: 2017-02-01

作者简介:

盛四清(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行、分析与控制, 配电网规划; E-mail: hdbdssq@163.com

陈玉良(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: chen\_yl3@163.com

(编辑 葛艳娜)