

基于三段式变步长电导增量法的最大功率点跟踪策略

刘春娟¹, 孙赞赞^{1*}, 穆洲¹, 马占书²

¹兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070;

²通号工程局集团北京研究设计实验中心有限公司, 北京 100070

摘要 提出了一种三段式变步长电导增量算法,通过设定步长调整系数的上、下限阈值,将工作步长分为三种模式,保证了在光照强度剧烈变化的情况下,系统仍能以较大步长运行,避免了传统电导增量法动态响应速度慢的问题。仿真结果表明,该算法可将系统的动态响应时间缩短至5~6 ms,且最大功率点附近的功率振荡明显减弱,系统的功率损失降低,跟踪精度得到提高。

关键词 光学器件; 光伏阵列; 最大功率点跟踪; 电导增量算法; 变步长

中图分类号 TM721 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.072301

Tracking Strategy of Maximum Power Point Based on Three-Stage Variable Step-Size Incremental Conductance Algorithm

Liu Chunjuan¹, Sun Yunyun¹, Mu Zhou¹, Ma Zhanshu²

¹ School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

² Beijing Center of Research Design & Test Co. Ltd., China Railway Signal & Communication Engineering Bureau Group, Beijing 100070, China

Abstract A three-stage variable step-size incremental conductance algorithm is proposed, which divides the operating steps into three modes by setting the upper and lower thresholds of the step-adjustment coefficients to ensure that the whole system can still operate with a relatively large step size when the illumination intensity changes drastically. The problem of a slow dynamic response speed for the traditional conductance incremental method is avoided. The simulation results show that, this algorithm can shorten the dynamic response time of this system to 5-6 ms. Moreover, the power oscillation near to the maximum power point is obviously weakened, the power loss of this system is also reduced, and the tracking accuracy is enhanced.

Key words optical devices; photovoltaic array; maximum power point tracking; incremental conductance algorithm; variable step-size

OCIS codes 230.0250; 000.4430; 000.3860; 350.6050

1 引言

太阳能电池是一种能量转换器件,可将接收到的太阳能转换成电能^[1-2]。太阳能电池的输出功率受光照强度、温度的影响较大,且输出功率与二者呈非线性关系^[3-4]。为了提高光伏电池的光电输出效率,需要利用最大功率点跟踪控制技术^[5]。近年来,

大量的峰值功率跟踪方法被提出并得到应用^[6]。爬山法和扰动观测法因其原理简单且易于实现^[7-8],被广泛应用于光伏发电系统中。爬山法是对变换器的占空比进行扰动,扰动观测法则主要扰动光伏阵列的工作电压。在光伏电池最大功率点周围采用较大扰动会增加系统稳态时的损耗,而较小的扰动会影响外界条件快速变化时的动态特性。因此,对于这

收稿日期: 2017-11-29; 收到修改稿日期: 2017-12-27

基金项目: 甘肃省自然科学基金(1610RJZA046)、甘肃省建设科技攻关项目(JK2016-7)、兰州交通大学实验教改项目(201707)

作者简介: 刘春娟(1973—),女,硕士,副教授,主要从事半导体器件和集成光学器件方面的研究。E-mail: liuchj@mail.lzjtu.cn

* 通信联系人。E-mail: 945720579@qq.com

两种方法,要想达到理想的控制效果,必须在选择调节参数(如占空比或参考电压)的增值时进行折中处理。开路电压^[9]和短路电流法^[10]是获得峰值功率的简单有效的方法。然而,在测量开路电压或短路电流时,需要对光伏电池进行周期性断路或短路,这将带来一定的瞬时功率损耗^[11]。

此外,模糊逻辑控制法^[12]和神经网络法^[13]被很好地用于处理非线性问题。在不同的大气条件下,采用模糊逻辑控制法和神经网络法的光伏系统,不仅动态响应速度快,而且在最大功率点附近功率曲线的波动小,即系统的动态和稳态性能都较好^[14]。但是,由于光伏电池的种类很多,不同类型的光伏电池所对应的参数也不相同,因此神经网络就需要对不同的光伏电池系统进行各自有针对性的训练,不仅训练过程长,而且在训练中需要大量的输入、输出样本数据。模糊逻辑控制算法的设计复杂、实验周期较长,在实际应用中需要性能更高的控制器,增加了相应的硬件成本。

电导增量法^[15-16]是通过比较光伏电池的瞬时电导和电导的变化量对光伏电池的工作电压进行扰动,最终实现最大功率点跟踪的算法。传统的电导增量算法通常具有固定的步长,步长的大小决定了系统的稳态响应精度和动态跟踪速度^[17]。因此,稳态响应精度和动态跟踪速度之间的权衡必须通过相应的设计来解决。为了解决设计困难,本文提出了一种基于三段式步长调整规则的可变步长电导增量法。该算法提供了三种不同的步长模式,在大气条件变化的情况下,系统可自动在三种步长模式之间进行切换,从而减小光照强度变化对系统输出功率的影响,缩短系统的动态响应时间,提高光伏系统的稳定性。

2 光伏电池模型

2.1 光伏电池工程模型

光伏电池的工程模型方程^[18]为

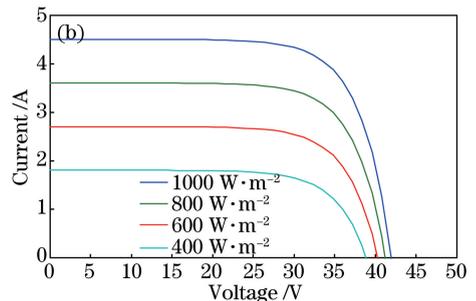
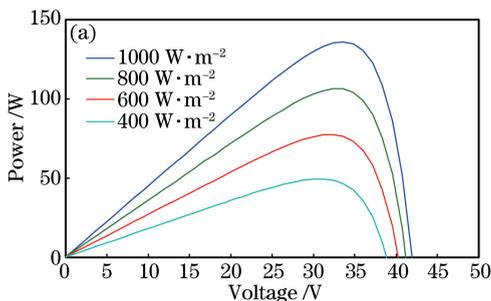


图1 不同光照强度下光伏电池的输出特性曲线。(a)电压-功率;(b)电压-电流

Fig. 1 Output characteristics of photovoltaic cells under different illumination intensities.

(a) Voltage-power; (b) voltage-current

$$I = I'_{sc} \cdot \{1 - C_1 \{ \exp[U / (C_2 U'_{oc})] - 1 \} \}, \quad (1)$$

式中 I 为输出电流, U 为输出电压, U'_{oc} 为开路电压, C_1 、 C_2 为修正系数。

$$\begin{cases} C_1 = \left(1 - \frac{I'_m}{I'_{sc}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{U'_m}{C_2 U'_{oc}}\right) \\ C_2 = \left(\frac{U'_m}{U'_{oc}} - 1\right) \cdot \left[\ln\left(1 - \frac{I'_m}{I'_{sc}}\right)\right]^{-1} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 I'_{sc} 、 I'_m 、 U'_m 分别为任意光强 S 和温度 T 时所对应的短路电流、最大功率点电流和最大功率点电压,分别表示为

$$\begin{cases} I'_{sc} = I_{sc} \cdot \frac{S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T) \\ U'_{oc} = U_{oc} \cdot \ln(e + b \Delta S) \cdot (1 - c \Delta T) \\ I'_m = I_m \cdot \frac{S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T) \\ U'_m = U_m \cdot \ln(e + b \Delta S) \cdot (1 - c \Delta T) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 I_{sc} 、 U_{oc} 、 I_m 、 U_m 分别为光强 1000 W/m^2 和温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时所对应的短路电流、开路电压、最大功率点电流和最大功率点电压, e 为自然对数底数,通常取系数 $a = 0.0025$, $b = 0.0005$, $c = 0.00288$; $\Delta T = T - T_{ref}$ 为实际光伏电池温度与参考温度 T_{ref} 的差值; $\Delta S = S - S_{ref}$ 为实际光强与参考光强 S_{ref} 的差值。

2.2 输出特性

根据(1)~(3)式,基于光伏阵列工程模型,可以得到光照强度对光伏电池的输出特性的影响。设定温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 不变,图1(a)、(b)所示分别为不同光照强度下光伏电池的输出电压-功率特性($P-U$)曲线和电压-电流特性($I-U$)曲线。由图1(a)可以看出,随着光照强度的增大,最大功率点向上移。由图1(b)可以看出,光照强度增大时,短路电流增大,开路电压略增大。故短路电流受光照强度的影响较大,开路电压所受影响较小^[19]。

3 三段式变步长电导增量法的实现

电导增量法的步长调整系数 $S(k)$ ^[20] 可表示为

$$S(k) = \frac{1}{I(k)} \left| \frac{\Delta P}{\Delta U} \right| = 1 + \frac{U(k)}{I(k)} \left| \frac{\Delta I}{\Delta U} \right|, \quad (4)$$

式中 $U(k)$ 、 $I(k)$ 分别为 k 时刻光伏电池输出的电压和电流, P 为输出功率, ΔI 为电流变化量, ΔU 为电压变化量。

为了保证系统工作的变步长范围最优, 为 $S(k)$ 设定一个阈值上限 N_{\max} 和一个阈值下限 N_{\min} , 采用三段式步长扰动的方法, 步长选取规则如下。若 $S(k) \geq N_{\max}$, 步长选为 ΔU_{\max} ; 若 $N_{\min} < S(k) < N_{\max}$, 步长选为 ΔU ; 若 $S(k) \leq N_{\min}$, 采用变步长, 步长选为 $S(k)\Delta U$, 其中 ΔU_{\max} 为步长的上限值, ΔU 为扰动定步长, $S(k)\Delta U$ 为变步长。图 2 所示为 $S(k)$ 与 P - U 曲线关系的示意图。

可以看出, 当 P - U 曲线到达最大功率点 A 处时, $S(k)$ 的值变为 0, 即图 2 中点 B ; 随着电压的增大, 在 P - U 曲线斜率大于 0 的部分, $S(k)$ 的值首先近似为 N_{\max} , 随后逐渐减小至 N_{\min} 并在靠近最大功率点处急剧减小至 0; 随着电压的继续增大, 在 P - U 曲线斜率小于 0 的部分, $S(k)$ 曲线开始回升。以最

大功率点为分界点将功率曲线分为左、右两部分, 其中每部分依据 $S(k)$ 的大小划分为 I、II、III 三段, 每一段采用不同的步长扰动方式。为了保证该算法在最大功率点右侧的收敛性, $S(k)$ 的上限值 N_{\max} 需设置为 1^[20], 下限值 N_{\min} 需要权衡光伏系统的动态响应时间和稳态精度进行确定。对搭建的光伏系统进行多次模拟后, 最终确定下限值 N_{\min} 为 0.5 时, 系统的响应时间最快且稳态精度较高。

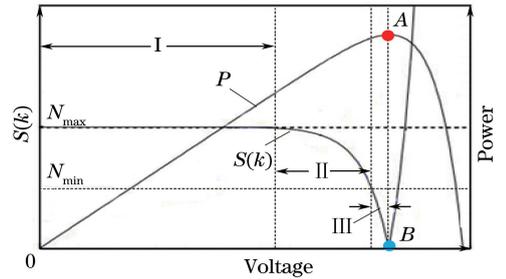


图 2 三段式变步长电导增量法的示意图

Fig. 2 Schematic of three-stage variable step-size incremental conductance algorithm

三段式变步长电导增量法的控制流程如图 3 所示, 其中 abs 代表求绝对值, $G(k)$ 为电导与电导增量的和, S_{tep} 为工作步长。

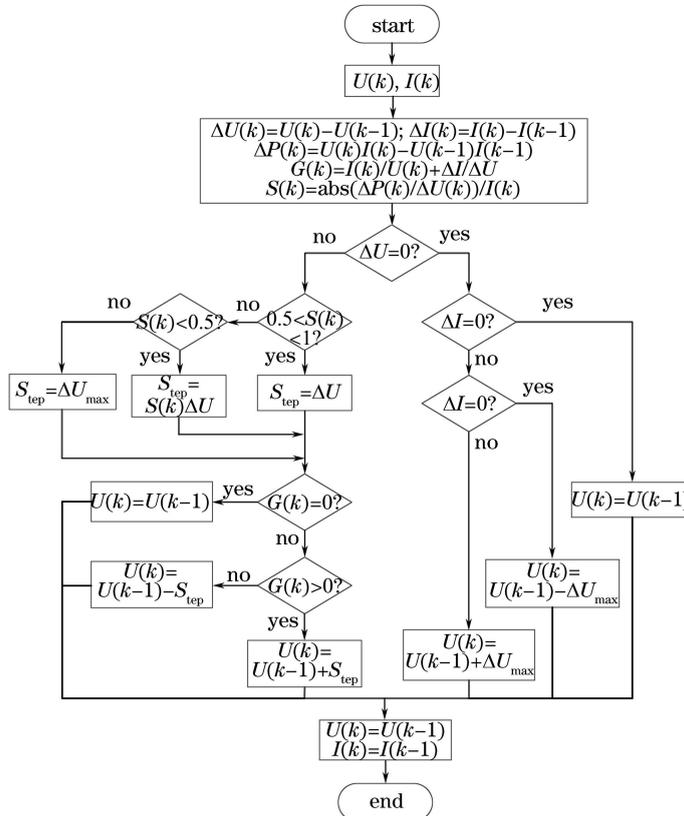


图 3 控制算法流程图

Fig. 3 Flow chart of control algorithm

4 仿真结果与讨论

4.1 仿真结果

为了验证三段式可变速长电导增量算法的合理性,依据(1)~(3)式给出的光伏电池工程模型,在MATLAB/SIMULINK软件中建立了图4所示的光伏系统结构模型,主要包括光伏电池、最大功率点跟踪(MPPT)控制器、BOOST变换电路和脉冲宽度调制(PWM)驱动电路等。其中 D 为变换器的占空比,VT为开关管,VD为二极管, C_1 、 C_2 分别为输入、输出电容, L 为储能电感, R 为负载。光伏电池的额定参数为:开路电压 $U_{oc}=42\text{ V}$,短路电流 $I_{sc}=4.5\text{ A}$,最大功率点电压 $U_m=34\text{ V}$,最大功率点电流 $I_m=4\text{ A}$ 。BOOST变换器的参数为:输入滤波电容 $C_1=165\text{ }\mu\text{F}$,储能电感 $L=1\text{ mH}$,输出滤波电容 $C_2=2500\text{ }\mu\text{F}$,开关频率 $f=20\text{ kHz}$,负载 $R=100\text{ }\Omega$ 。调节光照强度使其在 0.1 s 时从 1000 W/m^2 跳变到 400 W/m^2 ,在 0.3 s 时又回到 1000 W/m^2 ,温度保持 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 不变,仿真时长为 0.4 s 。为了对比三段式可变速长电导增量算法的可靠性,在相同的条件下,对文献[19]、[20]分别提出的基于功率-电压微分的变步长电导增量法和改进型算法进行了仿真。

图5(a)、(b)、(c)所示分别为在相同仿真条件下,变步长电导增量法、改进型电导增量法及三段式变步长电导增量法的输出功率仿真波形,其中 N 为

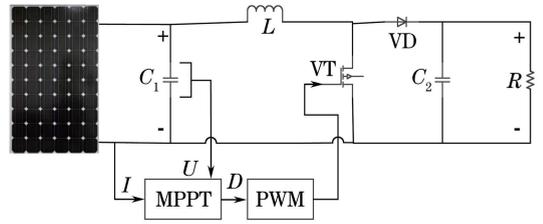


图4 光伏系统的结构图

Fig. 4 Structural diagram of photovoltaic system

调整步长比例因子。可以看出,尽管三种算法均可以追踪到最大功率点,但是其响应时间与跟踪精度有明显的差别。当光照强度从 1000 W/m^2 跃变到 400 W/m^2 时,变步长算法能在较短的时间追踪到最大功率,但在最大功率处出现了明显的波动,且从开始追踪到趋于平稳的响应时间为 22 ms 。改进型变步长电导增量法虽然将响应时间缩短为 18 ms ,但在第一次达到最大功率后功率也出现了较大的波动。而三段式变步长电导增量法在追踪到最大功率过程中功率没有出现波动,且响应时间仅为 5 ms 。当光照强度从 400 W/m^2 增大到 1000 W/m^2 时,变步长算法的系统响应时间长达 20 ms ,而且在追踪到最大功率后,输出功率出现了大幅度的下降,平均下降幅度为 14.5 W 。改进型算法将系统的响应时间缩短为 17 ms ,但在第一次追踪到最大功率后功率依旧出现了较大幅度的下降,平均下降幅度为 6.5 W 。三段式算法不仅大大缩短了系统的响应时间,且在追踪到最大功率后没有出现功率大幅度下降的现象。

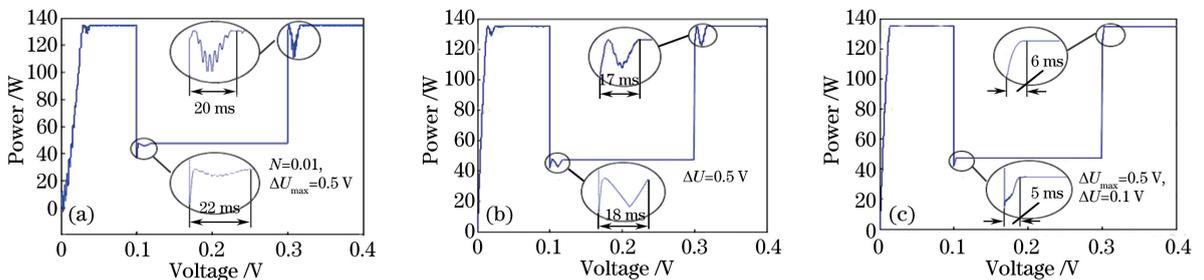


图5 不同控制算法的仿真结果。(a)变步长电导增量法;(b)改进型电导增量法;(c)三段式电导增量法

Fig. 5 Simulation results for different control algorithms. (a) Variable step-size incremental conductance algorithm;

(b) modified incremental conductance method; (c) three-stage incremental conductance method

无论光照强度如何变化,变步长算法输出的结果在最大功率附近会出现较大的功率振荡,造成功率率的损失。而三段式变步长算法产生的振荡较小,因此功率损耗也很小。光照强度为 1000 W/m^2 时,三段式电导增量法的平均输出功率为 135.0 W ,相比于变步长算法的 134.0 W ,可将算法的跟踪精度由 98.6% 提升到 99.3% 。光照强度为 400 W/m^2 时,三段式算法

的平均功率为 47.3 W ,算法精度由变步长算法的 98.7% 提升到 99.4% 。改进型算法的系统响应时间较变步长算法的缩短了 $3\sim 4\text{ ms}$,说明改进型算法的动态跟踪速度较快。三段式变步长算法的响应时间远比改进型算法的小,动态跟踪速度有了明显提升。

4.2 仿真结果讨论

为了进一步验证三段式变步长电导增量算法的

可靠性,将其与文献[19-20]提出的算法进行比较。

文献[19]提出的变步长算法示意图如图6所示,其中 P_1 和 P_2 曲线是外界温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、光照强度分别为 400 W/m^2 和 1000 W/m^2 时对应的输出功率曲线。当环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、光照强度为 400 W/m^2 时,选取固定的调整步长比例因子 N_1 和可变步长的上限值 $\Delta D_{\max 1}$,由此确定的变步长范围为 d_1 。当环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、光照强度为 1000 W/m^2 时,系统对应的比例因子为 N_2 ,可变步长的上限值为 $\Delta D_{\max 2}$,由此确定的变步长范围为 d_3 [19]。若环境温度与光照强度不变时,采用此算法的光伏系统的跟踪速度和稳态精度表现良好;若温度不变,光照强度由 400 W/m^2 增大到 1000 W/m^2 时,保持 N_1 和 $\Delta D_{\max 1}$ 不变,变步长范围由 d_1 变为 d_2 ,由于 P_2 曲线的最大功率点既在 d_3 范围内也在 d_2 范围内,且 d_3 比 d_2 大,因此使用变步长的范围减小了,系统跟踪速度变快的同时出现了功率振荡。相反,若温度保持不变,光照强度由 1000 W/m^2 减小到 400 W/m^2 时,保持 N_2 和 $\Delta D_{\max 2}$ 不变,此时系统选择变步长模式工作,变步长使用范围太大导致系统的响应速度减慢。因此,在大气条件变化的情况下,利用变步长算法无法找到一组合适的调整步长比例因子 N 和最大扰动步长 ΔD_{\max} 。从图5的仿真结果也可以看出,光照强度上升时的系统响应时间比光照强度下降时的快 2 ms 。而三段式控制策略采用 $S(k)$ 作为步长调整系数,其值在光照强度变化时不会发生太大变化,因此不会出现变步长范围过大的现象,加快了系统的动态响应速度。

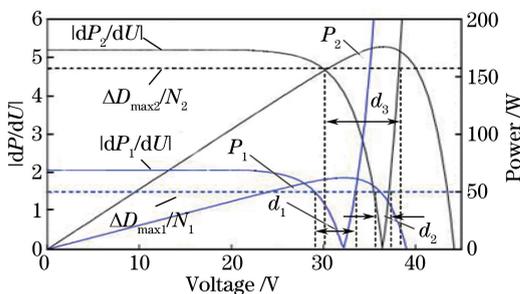


图6 变步长算法的示意图

Fig. 6 Schematic of variable step-size algorithm

在文献[20]提出的改进型变步长算法中,在最大功率点左侧,光伏系统工作在变步长的范围较大,系统的动态跟踪速度会降低。图7所示为温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、光照强度为 1000 W/m^2 时 $S(k)$ 的变化曲线。图7中 C 点为最大功率点, D 点为 $S(k)$ 等于0的点, E 点为最大功率点右侧 $S(k)$ 等于1的点。该

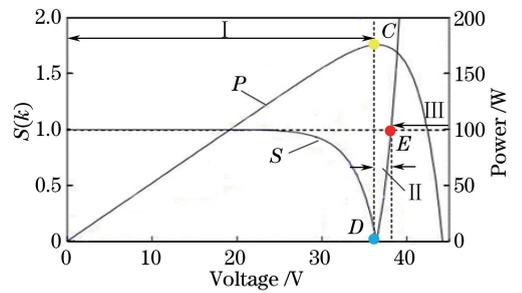


图7 温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、光照强度为 $1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 条件下 $S(k)$ 的变化曲线

Fig. 7 Variance of $S(k)$ when temperature is $25\text{ }^\circ\text{C}$ and illumination intensity is $1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

算法通过 $S(k)$ 曲线的变化特点将步长变化范围分为I、II和III三个区域,最大功率点左侧为I区域,在该区域,系统工作在变步长模式,且电压扰动方向为正方向(即电压增大)。II区域是最大功率点右侧且 $0 < S(k) < 1$ 的区域,即图7中点 D 到点 E 之间的区域,在II区域,系统采用变步长模式,且电压扰动方向为负方向(即电压减小)。III区域是图7中点 E 的右侧区域,在该区域,系统工作于步长为 ΔU 的定步长模式。文献[20]提出的方法在 $0.5 < S(k) < 1$ 的范围采用变步长模式,步长大小为 $S(k)\Delta U$;而三段式算法在该范围使用固定步长 ΔU ,即令 $S(k)=1$,选取了 $S(k)\Delta U$ 在 $0.5 < S(k) < 1$ 范围内的最大值。这样既可以加快追踪光伏系统最大功率点的速度,又可以减小算法的运算量。而且变步长范围也大大缩短,光伏系统在最大功率点处的稳态精度提高,相应的功率振荡减小。

5 结论

为了优化步长选取与动态响应速度、稳态跟踪精度之间的关系,提出了一种三段式变步长电导增量控制策略。仿真结果表明,在最大功率点附近采用变步长方式,避免了因选取固定步长而引起的动态响应速度与稳态跟踪精度之间的矛盾,提高稳态跟踪精度的同时加快了动态响应速度。通过三段式步长变化,减小了步长变化范围,提高了光照强度跃变时系统的动态响应速度。三段式变步长电导增量法逻辑简单、精度高、系统计算量小且对运算控制器的要求不高,易于实现。

参考文献

- [1] Gao L X, Lu K Q, Zhao C, *et al.* Study on sequence of odd and even gap solitons in self-focusing photovoltaic-photorefractive crystals[J]. Chinese

- Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0908001.
- 高立许, 卢克清, 赵冲, 等. 自聚焦光伏光折变晶体中奇偶间隙孤子序列研究[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0908001.
- [2] Cai L, Dai N N, Zhu H T, *et al.* Test system for power generation characteristics of photovoltaic modules based on real-time parameters[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 112301.
- 蔡黎, 代妮娜, 朱海涛, 等. 基于实时参数的光伏组件发电特性测试系统[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 112301.
- [3] Chen J D, Huang S H. Simulation of photovoltaic module characteristics in arbitrary solar radiation and temperature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 022303.
- 陈建东, 黄仕华. 任意辐照强度和温度下的光伏组件输出特性模拟仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 022303.
- [4] Xie B S, Dai P, Luo X D, *et al.* IV characteristics and analysis for GaAs based single junction solar cells with different back surface field[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0223002.
- 谢波实, 代盼, 罗向东, 等. 不同背场的 GaAs 基单结太阳能电池伏安特性及分析[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0223002.
- [5] Chen Y T, Lai Z H, Liang R H. A novel auto-scaling variable step-size MPPT method for a PV system[J]. Solar Energy, 2014, 102(4): 247-256.
- [6] Nie X H, Lai J J. A Survey on Tracking and control approaches for global maximum power point of photovoltaic arrays in partially shaded environment [J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3279-3285.
- 聂晓华, 赖家俊. 局部阴影下光伏阵列全局最大功率点跟踪控制方法综述[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3279-3285.
- [7] Rong D S, Liu F. Application of improved perturbation and observation method to photovoltaic MPPT [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(3): 102-110.
- 荣德生, 刘凤. 改进型扰动观察法在光伏 MPPT 中的研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(3): 102-110.
- [8] Wang S Z, Li X Y. Application of a novel adaptive perturbation and observation method in MPPT strategy for photovoltaic power system [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(9): 2393-2400.
- 王书征, 李先允. 一种新型自适应扰动观察法在光伏发电 MPPT 策略中的应用 [J]. 太阳能学报, 2016, 37(9): 2393-2400.
- [9] Zhong C Y, Kang L Y, Nie H T, *et al.* Maximum power point tracker based on open-circuit voltage method[J]. Power Electronics, 2011, 45(7): 103-105.
- 钟长艺, 康龙云, 聂红陶, 等. 基于开路电压法光伏电池最大功率跟踪器 [J]. 电力电子技术, 2011, 45(7): 103-105.
- [10] Zhang C, He X N. Short-current combined with perturbation and observation maximum power point [J]. Proceeding of the CSEE, 2006, 26(20): 98-102.
- 张超, 何湘宁. 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 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 98-102.
- [11] Zhang F, Chen J. Maximum power point tracking control for photovoltaic array under partially shaded conditions[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(11): 64-72.
- 张芳, 陈嘉. 部分遮挡条件下光伏阵列全局最大功率点跟踪控制 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(11): 64-72.
- [12] Su H B, Wang G Z, Wang J D. The maximum power point tracking algorithm for photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 215-218, 226.
- 苏海滨, 王光政, 王继东. 基于模糊逻辑双环控制的光伏发电系统最大功率跟踪算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 215-218, 226.
- [13] Hossain M K, Ali M H. Fuzzy logic controlled power balancing for low voltage ride-through capability enhancement of large-scale grid-connected PV plants[C]. Power & Energy Conference, 2017: 1-6.
- [14] Zainuri M A, Radzi M A, Soh A C, *et al.* Development of adaptive perturb and observe-fuzzy control maximum power point tracking for photovoltaic boost DC-DC converter[J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(2): 183-194.
- [15] Yang X H, He C J, Wang Y Z, *et al.* MPPT implementation strategy based on improved incremental conductance method[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(5): 803-805.
- 杨旭红, 何超杰, 王毅舟, 等. 一种改进的电导增量法的 MPPT 实现策略 [J]. 电源技术, 2017, 41(5): 803-805.
- [16] Halder T. A maximum power point tracker (MPPT) using the incremental conductance (INC) technique

- [C]. India International Conference on Power Electronics, 2016: 1-6.
- [17] Mei Q, Shan M, Liu L, *et al.* A novel improved variable step-size incremental-resistance MPPT method for PV system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2427-2434.
- [18] Jiao Y, Song Q, Liu W H. Practical simulation model of photovoltaic cells in photovoltaic generation system and simulation[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 198-202.
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.
- [19] Liu F, Duan S, Liu F, *et al.* A variable step size INC MPPT method for PV systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2622-2628.
- [20] Zhou D B, Chen Y R. Maximum power point tracking strategy based on modified variable step-size incremental conductance algorithm[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1491-1498.
周东宝, 陈渊睿. 基于改进型变步长电导增量法的最大功率点跟踪策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1491-1498.