一种开路电压和短路电流相结合的 MPPT 算法研究

高金辉，李国成

(河南师范大学物理与电子工程学院，河南 新乡 453007)

摘要：为了能够有效地提高光伏发电系统的最大输出功率，根据光伏电池的输出特性和数学模型，提出了一种新型 MPPT 算法，即开路电压和短路电流相结合的 MPPT 算法。利用开路电压、短路电流和 S-function 函数快速解得最大功率点。针对不断变化的外界环境会给引入该算法的光伏系统带来频繁扰动，以及该算法在理论推导过程中采用了大量的估算算法，因此在该算法中引入阈值电流ΔI和微变步长扰动法。阈值电流ΔI降低了系统的扰动，减少能量的损失，微变步长扰动法进一步的修正了系统的最大功率点，解决了因理论估算而带来的误差问题。实验证明，引入了阈值电流和微变步长扰动法的开路电压和短路电流相结合的 MPPT 算法能快速、准确的跟踪最大功率点，提高转换效率。

关键词：最大功率；开路电压；短路电流；S-function；阈值电流；微变步长扰动法

Research on MPPT algorithm in combination with open circuit voltage and short circuit current

GAO Jinhui, LI Guocheng

(Institute of Physics and Electronic Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: In order to effectively improve the max output power of photovoltaic power generation system, according to the output characteristics of PV and mathematical model, this paper proposes a new MPPT algorithm combining open circuit voltage and short circuit current, which uses open voltage, short circuit current and the S-function for MPPT. As the external environment constant changes will disturb frequently the PV system that introduces the algorithm, and the algorithm uses a lot of estimation algorithms in the process of theoretical derivation, thus threshold current and micro perturbation variable step length method are introduced in the algorithm. Current threshold reduces the disturbance of the system and energy losses. Micro perturbation variable step length method further corrects maximum power point of the system and solves the error problem brought by theory estimation. Experiments show that the open circuit voltage and short circuit current combined method after introducing the threshold current and micro step perturbation method can quickly and accurately track the maximum power point and improve the conversion efficiency.

Key words: maximum power output; open circuit voltage; short circuit current; S-function; threshold current; micro variable step length disturbance

中图分类号： TM651 文章编号： 1674-3415(2015)24-0096-05

0 引言

光伏电池的输出电压和输出电流会随着光照和温度等外界环境的变化而变化。因此, 在光伏发电系统中, 实现最大功率跟踪是提高光伏发电系统效率的有效途径之一。在实际的光伏发电系统中, 应采取适当的算法动态的找出最大功率点，并根据外界环境的变化做出自适应的调整, 从而保证系统输出最大的功率。目前为提高光能利用效率最常用的方法就是对光伏系统进行最大功率跟踪。工程上较为常用的方法有扰动观察法(P&O)、电导增量法(INC)、模糊理论的 MPPT 算法等[1-2]。

其中，微变步长扰动法是通过 Δd 不断的改变步长来实现最大功率的追踪，在一定程度上完成了最大功率跟踪[3-5]，但是微变步长扰动法震荡大、追踪速度慢等问题仍然存在。因此，本文根据光伏电池的输出特性和数学模型，提出了开路电压和短路电流相结合的 MPPT 算法，并引入阈值电流 ΔI 和微变步长扰动法。在外界环境变化时，通过开路电压和短路电流相相结的 MPPT 算法，让系统能够快

速的追踪到最大功率点，阈值电流 ΔI 的引入解决了光伏系统的频繁扰动，在已经获得的最大功率点上继续引用微变步长扰动法，进一步的修正最大功率点，以便真正实现最大功率的输出。通过这种方法不仅解决了微变步长扰动法震荡大、追踪速度慢等问题，而且提高了光伏系统精确性、可靠性。

1　光伏电池的数学模型及特性

光伏电池是利用半导体材料的光伏效应制成，根据光伏电池的等效电路可知光伏电池的数学模型为[6-7]

$$I_{\mathrm{o}}=I_{\mathrm{sc}}-I_{\mathrm{sat}}\left\{\exp\left(\frac{q\left(U_{\mathrm{o}}+I_{\mathrm{o}}R_{\mathrm{s}}\right)}{AKT}\right)-1\right\}-\left\{\frac{U_{\mathrm{o}}+I_{\mathrm{o}}R_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{sh}}}\right\} \quad (1)$$

式中：U_{o}、I_{o} 分别为光伏电池的输出电压和输出电流；I_{sc} 为光伏电流；I_{sat} 为反向饱和电流；R_{s} 为串联电阻；R_{sh} 为并联电阻；A 为光伏电池的p-n结系数；K 为玻尔兹曼常数；T 为光伏电池的温度；q 为电子电量。一般光伏电池的并联电阻 R_{sh} 很大，串联电阻 R_{s} 很小，所以在进行计算时可以将式(1)近似为

$$I_{\mathrm{o}}=I_{\mathrm{sc}}-I_{\mathrm{sat}}\left\{\exp\left(\frac{q\left(U_{\mathrm{o}}+I_{\mathrm{o}}R_{\mathrm{s}}\right)}{AKT}\right)-1\right\} \quad (2)$$

所以电池的输出功率 P_{o} 近似为

$$P_{\mathrm{o}}=U_{\mathrm{o}}I_{\mathrm{sc}}-U_{\mathrm{o}}I_{\mathrm{sat}}\left\{\exp\left(\frac{q\left(U_{\mathrm{o}}+I_{\mathrm{o}}R_{\mathrm{s}}\right)}{AKT}\right)-1\right\} \quad (3)$$

在开路状态下，$I-U$ 的关系可以表示为

$$U_{\mathrm{oc}}\cong\frac{AKT}{q}\ln\left(\frac{I_{\mathrm{sc}}}{I_{\mathrm{sat}}}+1\right) \quad (4)$$

式中，U_{oc} 为开路电压。

2　开路电压和短路电流相结合的 MPPT 理论推导

由 $P-U$ 的特性曲线可知当 $\frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}U_{\mathrm{o}}}=0$ 时，光伏系统能获得最大的输出功率，因此对式(3)进行求导后可得式(5)

$$\frac{I_{\mathrm{sc}}}{I_{\mathrm{sat}}}+1=\exp\left(\frac{q}{AKT}\left(U_{\mathrm{mpp}}+I_{\mathrm{mpp}}R_{\mathrm{s}}\right)\right)\left(1+\frac{q}{AKT}U_{\mathrm{mpp}}\right) \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)可以得到式(6)

$$U_{\mathrm{mpp}}=U_{\mathrm{oc}}-I_{\mathrm{mpp}}R_{\mathrm{s}}-\frac{AKT}{q}\ln\left(1+\frac{q}{AKT}U_{\mathrm{mpp}}\right) \quad (6)$$

式中：U_{mpp} 为最大功率点的电压值；I_{mpp} 为最大功率点的电流值。

为算法实现的方便，需对式(6)中的第二项式和第三项式进行估算。当光伏电池模型处于短路状态下，式(2)对电压 U_{o} 求导并化简得到式(7)

$$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}U_{\mathrm{o}}}\Big|_{\substack{U_{\mathrm{o}}=0\\I_{\mathrm{o}}=I_{\mathrm{sc}}}}=-\frac{\frac{q}{AKT}I_{\mathrm{sat}}\exp\left(\frac{q}{AKT}I_{\mathrm{sc}}R_{\mathrm{s}}\right)+\frac{1}{R_{\mathrm{sh}}}}{1+\frac{R_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{sh}}}+\frac{q}{AKT}I_{\mathrm{sat}}\exp\left(\frac{q}{AKT}I_{\mathrm{sc}}R_{\mathrm{s}}\right)} \quad (7)$$

由于 $\frac{q}{AKT}I_{\mathrm{sat}}\exp\left(\frac{q}{AKT}I_{\mathrm{sc}}R_{\mathrm{s}}\right)\ll\frac{1}{R_{\mathrm{sh}}}$ 和 $\frac{q}{AKT}I_{\mathrm{sat}}\exp\left(\frac{q}{AKT}I_{\mathrm{sc}}R_{\mathrm{s}}\right)\ll\frac{R_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{sh}}}\ll1$ 恒成立，所以式(7)化简为式(8)：

$$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}U_{\mathrm{o}}}\Big|_{\substack{U_{\mathrm{o}}=0\\I_{\mathrm{o}}=I_{\mathrm{sc}}}}=-\frac{1}{R_{\mathrm{sh}}}<0 \quad (8)$$

由式(8)并结合 $I-U$ 曲线可得式(9)

$$I_{\mathrm{int}}=I_{\mathrm{sc}}-\frac{U_{\mathrm{oc}}}{R_{\mathrm{sh}}}\approx I_{\mathrm{mpp}} \quad (9)$$

式中，I_{int} 为光伏电池的实际输出电流，近似等于 I_{mpp}，并且与 I_{sc} 和 U_{oc} 有关。

当电池模型处于开路状态下，式(2)对电压 U_{o} 求导并化简得式(10)

$$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}U_{\mathrm{o}}}\Big|_{\substack{U_{\mathrm{o}}=U_{\mathrm{oc}}\\I_{\mathrm{o}}=0}}=-\frac{\frac{q}{AKT}I_{\mathrm{sat}}\exp\left(\frac{q}{AKT}U_{\mathrm{oc}}\right)+\frac{1}{R_{\mathrm{sh}}}}{1+\frac{R_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{sh}}}+\frac{q}{AKT}I_{\mathrm{sat}}R_{\mathrm{s}}\exp\left(\frac{q}{AKT}U_{\mathrm{oc}}\right)} \quad (10)$$

因为 $1\ll\left(\frac{R_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{sh}}}+\frac{q}{AKT}I_{\mathrm{sat}}R_{\mathrm{s}}\exp\left(\frac{q}{AKT}U_{\mathrm{oc}}\right)\right)$，所以式(10)可以简化为式(11)

$$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{o}}}{\mathrm{d}U_{\mathrm{o}}}\Big|_{\substack{U_{\mathrm{o}}=U_{\mathrm{oc}}\\I_{\mathrm{o}}=0}}=-\frac{1}{R_{\mathrm{s}}}<0 \quad (11)$$

由式(11)并结合 $I-U$ 曲线可得式(12)

$$U_{\mathrm{int}}=U_{\mathrm{oc}}-I_{\mathrm{int}}R_{\mathrm{s}}\approx U_{\mathrm{mpp}} \quad (12)$$

式中，U_{int} 为光伏电池的实际输出电压，近似等于 U_{mpp}，并且与 I_{sc} 和 U_{oc} 有关。将式(9)和式(12)代入式(6)可以得到式(13)

$$U_{\mathrm{mpp}}=U_{\mathrm{oc}}-I_{\mathrm{int}}R_{\mathrm{s}}-\frac{AKT}{q}\ln\left(\frac{q}{AKT}U_{\mathrm{int}}\right) \quad (13)$$

开路电压和短路电流相结合的MPPT算法主要

是通过式(9)、式(12)和式(13)来求得最大功率点，如图 1 所示就是利用上述三个式子求解最大功率点的过程，图中$\left(U_{\mathrm{mpp}}^{'},I_{\mathrm{mpp}}^{'}\right)$就是采用开路电压和短路电流相结合求得的最大功率点。

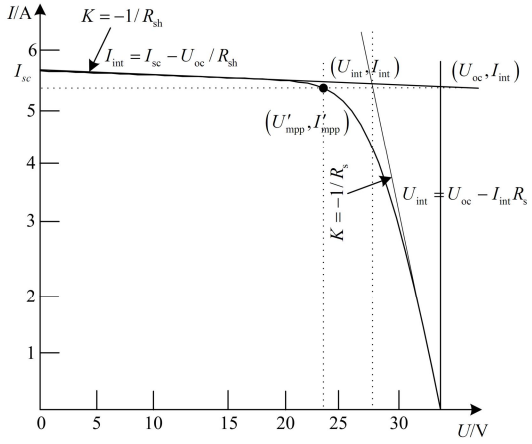

图 1 开路电压和短路电流结合法的 MPPT

Fig. 1 Open circuit voltage and short circuit current combined method for MPPT

基于开路电压和短路电流相结合的 MPPT 理论，在应用过程中要不断的进行短路和断路以便获取I_{sc}和U_{oc}，这样会带来大量的能量损失，因此引入电流阈值ΔI，如图 2 所示。系统中不断的检测电流的变化量，当电流的变化量大于ΔI，进行短路和断路的操作得到I_{sc}和U_{oc}，这样可以避免频繁的扰动，进而提高能量的输出。同时考虑到开路电压和短路电流相结合法在推导过程采用大量的工程估算，因此该算法不能保证光伏电池的输出功率真正的达到最大，如图 2 中的$\left(U'_{\mathrm{mpp}},I'_{\mathrm{mpp}}\right)$。为了充分利用光伏电池的输出功率，当系统完成开路电压和短路电流相结合的 MPPT 算法后，在引入微变步长扰动观察法来寻找最优的最大功率点得到图 2 中的$\left(U_{\mathrm{m}},I_{\mathrm{m}}\right)$[8-11]。其中以微元步长$\Delta d=a_{\mathrm{k}}\Delta P(i)/\Delta U(i)$作为调整量($a_{\mathrm{k}}$ 变步长控制因子，为非负常数)。其控制流程图如图 3 所示。

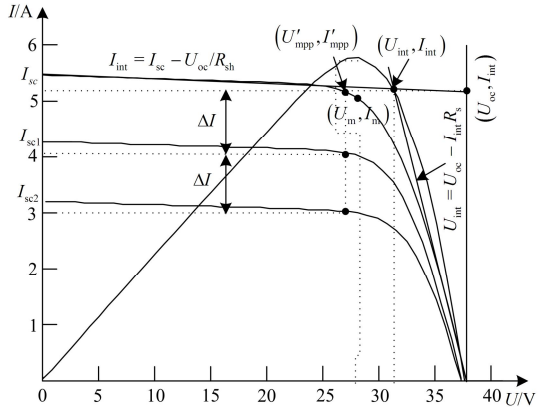

图 2 引入阈值电流的开路电压和短路电流结合法的 MPPT

Fig. 2 Open circuit voltage and short circuit current combined method with introduction of the threshold current for MPPT

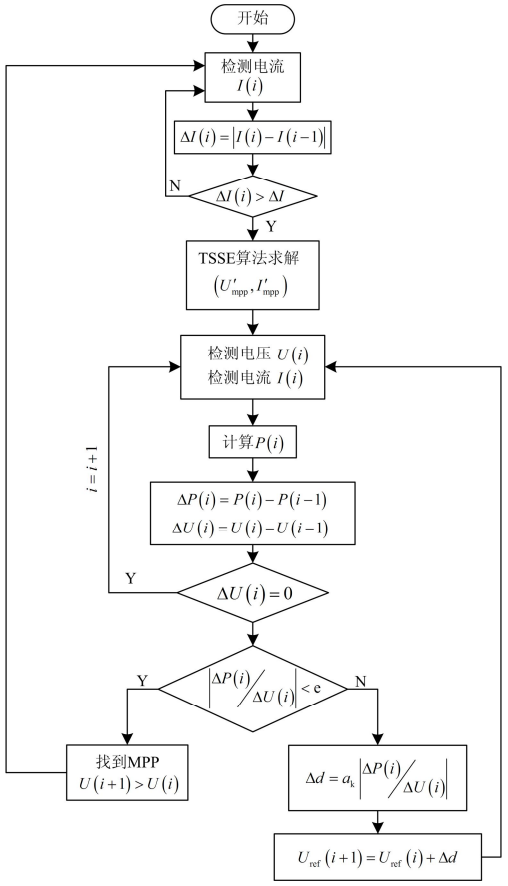

图 3 开路电压和短路电流结合法的 MPPT 流程

Fig. 3 Flow chart of open circuit voltage and short circuit current method for MPPT

系统先经过开路电压和短路电流相结合算法求得在 i 时刻的最大功率点$\left(U'_{\mathrm{mpp}},I'_{\mathrm{mpp}}\right)$，然后进行电压和电流的检测，根据$\Delta P(i)/\Delta U(i)$与 e 的比较判断系统的工作状态：

a. 如果光伏电池的$\Delta P(i)/\Delta U(i)<\mathrm{e}$时，开路电压和短路电流结合法已经找到最大功率点，此时不进行扰动，电压保持不变。

b. 如果光伏电池的$\Delta P(i)/\Delta U(i)>\mathrm{e}$时，开路电压和短路电流结合法找到的功率点是在实际功率点附近，进行微变步长扰动操作。

c. 在执行微变步长扰动操作时，通过微元步长$\Delta d=a_{\mathrm{k}}\Delta P(i)/\Delta U(i)$不断地修改步长，以寻求实际的最大功率点。

3　建模与仿真

为了验证方法的精确性和可靠性，在 Matlab/Simulink 建立了含微变步长的开路电压和短路电流相结合的 MPPT 仿真模型图 4，通过 MPPT1 模块检测电流的变化量，并且与设定的阈值电流作比较决定，当电流的变化量小于阈值电流时 IGBT1 和 IGBT2 端口分别输出低电平和高电平，当电流的变化量大于阈值电流时，使 IGBT2 端口输出低电平获得开口电压U_{oc}，然后使 IGBT1 端口的输出高电平获得短路电流I_{sc}，在获得U_{oc}和I_{sc}后在使 IGBT1 和 IGBT2 端口分别输出低电平和高电平，使电路正常工作。其中 MPPT1 模块中含有由式(9)、式(12)、式(13)编写的 S-function 程序，利用U_{oc}和I_{sc}获得最大功率点$\left(U'_{mpp},I'_{mpp}\right)$。MPPT2 模块主要是用来实现微变步长扰动观察法[12-15]，对$\left(U'_{mpp},I'_{mpp}\right)$进行修正。设定仿真参数：日照强度在系统工作的 0.25s 时突然从 800W/m^{2}增加到 1000W/m^2，温度 25℃，仿真时长为 1s，运行得到相应的$P-t$特性曲线图如图 5 所示。并分别对微变步长估算 MPPT、不含微变步长的开路电压和短路电流相结合的 MPPT，运行得到相应的$P-t$特性曲线图如图 5 所示，从图中可以看出，微变步长估算 MPPT 虽能实现最大功率的输出，但是所用时间过长，震荡的问题比较突出，而采用开路电压和短路电流相结合算法可以快速的追踪到最大功率点，在此基础上利用微变步长的方法进一步对最大功率点进行修正，提高了功率的输出，使开路电压和短路电流结合法更加的可靠和准确。

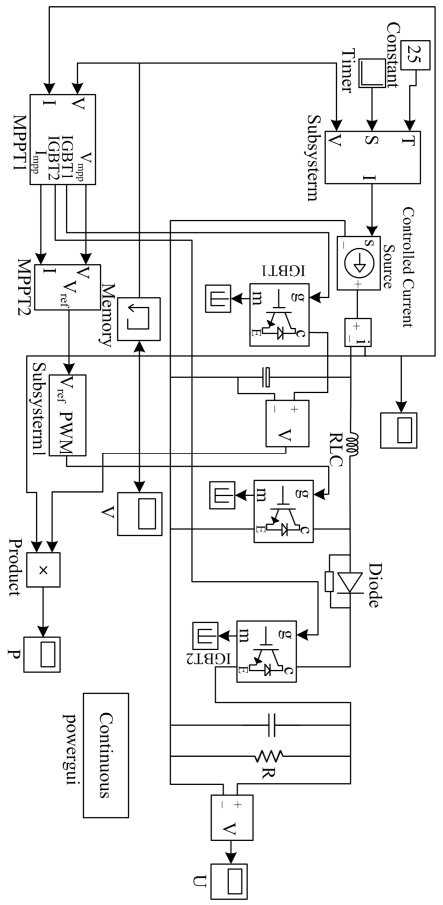

图 4 开路电压和短路电流结合法的 MPPT 仿真图

Fig. 4 Simulation of open circuit voltage and short circuit current method for MPPT

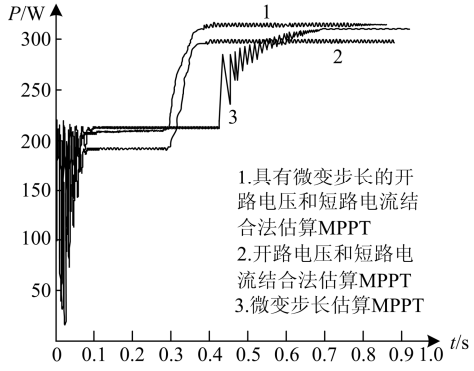

图 5 $P-t$ 特性曲线

Fig. 5 Character graph of *P-t*

4　结论

本文根据光伏电池的输出特性和数学模型，提出了开路电压和短路电流结合法的 MPPT，引入阈值电流解决了外界环境微弱变化带来的扰动，在已经获得的最大功率点上结合微变步长扰动法对最大功率点进行修正，以便真正的实现最大功率的输出。经过对该算法进行仿真验证，结果表明该算法在引入阈值电流和微变步长扰动法的优化下，当外界环境突变的情况时，系统能够保持同步变化，快速、精准的跟踪最大功率点，输出稳定的功率，有效的抑制了在最大功率点附近的震荡现象，而且提高了光伏系统精确性、可靠性。

参考文献

[1] 刘兴杰, 郭栋. 基于电气外特性的光伏发电系统模型等效方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 231-240.
LIU Xingjie, GUO Dong. Equivalent modeling method for PV system based on its electric external characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 231-240.

[2] 孙航, 杜海江. 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. Photovoltaic distributed MPPT mechanism analysis and simulation study[J]. Power

System Protection and Control, 2015, 43(2): 48-54.

[3] 杭凤海, 杨伟, 朱文艳. 光伏系统MPPT的扰动观测法分析与改进[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 111-114.
HANG Fenghai, YANG Wei, ZHU Wenyan. Analysis and improvement of maximum power point tracking disturbance observer method for PV system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 111-114.

[4] 王久和, 慕小斌. 光伏并网逆变器最大功率传输控制研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 49-56.
WANG Jiuhe, MU Xiaobin. Research on Maximum Power Transfer Control of Photovoltaic Grid Connected Inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 49-56.

[5] 高志强, 纪延超, 谭光慧. 一种快速的光伏最大功率点跟踪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 105-109.
GAO Zhiqiang, JI Yanchao, TAN Guanghui. A fast method of MPPT for PV[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 105-109.

[6] RAJ J S C M, JEYAKUMAR A E. A two stage success estimation based maximum power point tracking technique for photovoltaic modules[J]. Solar Energy, 2014, 103(6): 43-61.

[7] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[8] 徐晓淳, 刘春生. 光伏系统 MPPT 的改进模糊控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 81-84.
XU Xiaochun, LIU Chunsheng. Improved fuzzy control on MPPT method of solar system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(9): 81-84.

[9] 麦瑞坤, 陆立文, 李勇. 一种采用最小电压与最大电流跟踪的 IPT 系统动态调谐方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 32-38.
MAI Ruikun, LU Liwen, LI Yong. Dynamic Resonant Compensation Approach Based on Minimum Voltage and Maximum Current Tracking for IPT System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(19): 32-38.

[10] 朱彬彬, 杨勇. 基于光伏阵列建模的阴影多峰值电压估算[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 145-151.
ZHU Binbin, YANG Yong. A multi-peak voltage estimation method based on a universal model of PV arrays under partial shading conditions[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11): 145-151.

[11] 李继川, 王则杰, 王洪霞. 利用自然法则实现光伏组件智能管理[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 77-81.
LI Jichuan, WANG Zejie, WANG Hongxia. Intelligent management of PV modules using law of nature[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 77-81.

[12] ORIOLIA, DIGANGIA. A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data[J]. Applied Energy, 2013, 102: 1160-1177.

[13] LIU Yihua, HUANG Jiawei. A fast and low cost analog maximum power point tracking method for low power photovoltaic systems[J]. Solar Energy, 2011, 85(11): 2771-2780.

[14] 唐磊, 曾成碧. 基于蒙特卡洛的光伏多峰最大功率跟踪控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 170-176.
TANG Lei. ZHENG Chengbi. A Novel Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Under Partially Shaded Conditions Based on Monte Carlo Algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 170-176.

[15] 陈志刚, 郭磊. 光伏系统最大功率跟踪的设计与仿真实现[J]. 电力电子技术, 2012, 45(10): 73-75.
CHEN Zhigang, GUO Lei. Maximum power tracking of photovoltaic system design and simulation implementation[J]. Power Electronics, 2012, 45(10): 73-75.

收稿日期：2015-03-04； 修回日期：2015-07-22

作者简介：

高金辉(1962-)，男，教授，硕士生导师，主要从事光伏并网发电相关技术的研究；E-mail: gjh@htu.cn

李国成(1989-)，男，通信作者，硕士研究生，研究方向为太阳能光伏并网发电及逆变控制。E-mail: 2378392960@qq.com

(编辑 张爱琴)