

基于 β 参数的变步长 MPPT 控制研究

李星硕¹, 文辉清^{1,2}

(1. 西交利物浦大学电气与电子工程系, 江苏 苏州 215123;
2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 研究了当前光伏系统中最大功率点追踪技术(MPPT)的现状, 针对传统 MPPT 方法在稳态性能与动态性能之间存在的矛盾, 提出了一种改进的基于 β 参数的变步长算法。此算法基于对 β -V 曲线的分析, 对光照强度的上升和下降采用两种不同大小的比例系数, 从而在动态实现了快速追踪 MPP 并且避免了误判现象, 同时, 在稳态实现了零振荡。为了验证该算法的优越性, 基于 Matlab/Simulink 平台对主要 MPPT 方法进行仿真分析, 同时基于 dSPACE 和太阳能光伏阵列模拟器搭建实验样机并进行实验测试。仿真与实验结果验证了该算法的优越性, 即能实现稳态零振荡及动态过程的快速跟踪。

关键词: 最大点功率点追踪; 变步长; 快速追踪; 零振荡

Research on an improved β -based variable step MPPT algorithm

LI Xingshuo¹, WEN Huiqing^{1,2}

(1. Dept of Electrical & Electronic Engineering, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou 215123, China;
2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The current research on maximum power point tracking (MPPT) methods for photovoltaic power system application is reviewed. In order to solve the tradeoff between the steady-state efficiency and dynamic efficiency for the conventional MPPT algorithms, this paper proposes an improved β -based variable step MPPT method. Based on the curve of β -V, the proposed method utilizes two different scaling factors for the solar irradiation increasing and decreasing. Therefore, the proposed method realizes the fast tracking MPP and eliminates misjudgments during the transient stage. Furthermore, the proposed method also realizes zero oscillation during the steady-state stage. In order to show the advantages of the propose method, the simulation analysis of main MPPT methods is carried out in Matlab/Simulink. Furthermore, an experimental prototype by using dSPACE and Solar Array Emulator is built and tested. The simulation and experimental results verify the advantages of the proposed algorithm including zero oscillation in steady state and fast tracking for dynamics.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407145) and the State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (No. EIPE15203).

Key words: maximum power point tracking (MPPT); variable step; fast tracking MPP; zero oscillation

0 引言

太阳能被全世界广泛地认为是一种非常重要的可持续能源^[1-2]。但由于光伏阵列受到外界环境因素如光照强度或温度的影响, 其输出电压、电流呈现出明显的非线性特征^[1]。因此如何实时地调节光伏

模块的输出功率, 在任何外界环境下实现最大功率点跟踪(MPPT)显得十分重要^[3-5]。

文献系统分析比较了各种 MPPT 算法^[6], 根据其步长种类, 基本可以分成两类, 即定步长^[7-11]、变步长^[12-20]。对于定步长而言, 常见的有扰动观察法 (Perturb and Observe, P&O)^[7-9], 爬山法(Hill Climbing, HC)^[9]和电导增量法 (Incremental Conductance, INC)^[10-11]。定步长的优点主要体现在算法简单且易于实现, 但其缺点主要有以下三点: 1) 其算法存在动

基金项目: 国家自然科学基金(51407145); 电力设备电气绝缘国家重点实验室(EIPE15203)资助

态性能和稳态性能的矛盾; 2) 当系统达到稳定状态下时, 其仍在 MPP 附近振荡; 3) 当光照强度上升时, 其会发生误判^[11]。

对于变步长而言, 由于其步长大小可以根据光伏阵列的 P-D 曲线^[12-14]或者 P-V 曲线^[15-18]以及比例系数 N 实现自动调节, 从而解决了定步长在动态性能和稳态性能的矛盾。常见的有改进的自适应爬山法(Modified Adaptive Hill Climbing, MAHC)^[12]和变步长的电导增量法(Variable Step Size Incremental Conductance, VSSINC)^[15]。但是, 如何设置比例系数 N 是实现变步长算法的一个难题^[16]。如果 N 值过大, 会在 MPP 附近造成较大的扰动。因此, 稳态时常选取一个比较小的 N 值。但是, 当系统工作点靠近 MPP 时, 步长会变得非常的小从而影响收敛速度; 同时, 虽然稳态步长很小, 但是系统仍会在 MPP 附近扰动, 影响静态误差。另外, 当光照强度上升时, 其仍会发生误判^[11]。

为了能够克服定步长和变步长算法的缺点并有效利用其优点, 本文提出一种改进的基于 β 参数的变步长算法。此算法包括两个部分, 即改进的 Beta 法和改进的 P&O 法。相较于传统的 Beta 法^[19-20], 改进的 Beta 法基于对 β -V 曲线分析, 对光照强度上升和下降采用两种不同大小的比例系数 N , 从而实现快速的动态追踪并且避免误判现象。改进的 P&O 法基于传统的 P&O 法的三点振荡模式来确定三点的中值点并将其固定, 从而消除了扰动减少了功率损耗。

为了验证本算法的优越性, 本文首先在 Matlab/Simulink 平台下对本算法与传统的定步长的 P&O 法、传统的变步长 VSSINC 法以及传统的 Beta 法进行系统比较, 然后利用 dSPACE 和太阳能阵列模拟器搭建了实验平台。通过仿真和实验结果的分析对比, 验证了本算法的优越性。

1 基于 β 参数的 MPPT 算法原理

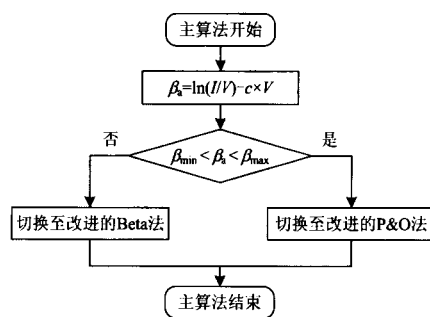
不同于一般的 MPPT 算法, 本文提出的 MPPT 算法是追踪一个中间变量 β 而不是功率的变化, 其如式(1)所示。

$$\beta = \ln(I/V) - c \times V \quad (1)$$

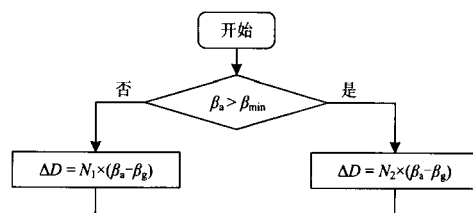
式中: V 、 I 分别为 PV 的输出电压和电流; c 是一个常数可通过 $c=q/(N_sAKT)$ 求出。其流程图如图 1 所示。

在主算法中, 首先根据式(1)求出 β 的值, 然后根据 β 的值判断是否在 β_{\min} 和 β_{\max} 的范围内, 流程如图 1(a)所示。如果 β 的值不在此范围内, 即说明此时

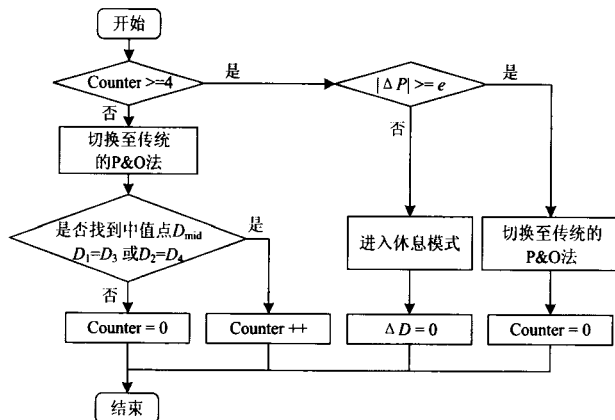
系统工作点远离 MPP, 则切换至改进的 Beta 法中, 如图 1(b)所示。反之即说明系统工作点靠近 MPP, 则算法切换至改进的 P&O 法中, 流程如图 1(c)所示。



(a) 算法流程



(b) 改进的Beta法



(c) 改进的P&O法

图 1 基于 β 参数的 MPPT 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the proposed MPPT algorithm

1.1 改进的 Beta 法

采用此 MPPT 算法时系统工作点随光照强度的变化如图 2 所示, 当光照强度稳定在 1000 W/m^2 , 系统工作在 MPP 点 A, 即负载线 1(load line 1)与 I-V 曲线上的交点。当光照强度突然下降到 400 W/m^2 时, 系统工作点应仍在负载线 1 上。此时系统工作点立即从点 A 切换到负载线 1 与光照强度在 400 W/m^2 所对应 I-V 曲线的交点 B 上。在其相对的 β -V 曲线, 此时点 B 的 β 值 β_B 要大于 β_{\max} , 即点 B 位于 β_{\min} 和 β_{\max} 的范围外。因此当光照强度下降时,

步长 ΔD 可计算为

$$\Delta D = N_1 \times (\beta_B - \beta_g) \quad (2)$$

同理，当光照强度从 400 W/m^2 上升到 1000 W/m^2 时，系统工作点将从点 C 立即切换到点 D，并且点 D 的 β 值 β_D 要小于 β_{\min} ，即点 D 位于 β_{\min} 和 β_{\max} 的范围外。因此当光照强度上升时，设置不同的比例系数 N_2 ，步长 ΔD 可计算为

$$\Delta D = N_2 \times (\beta_D - \beta_g) \quad (3)$$

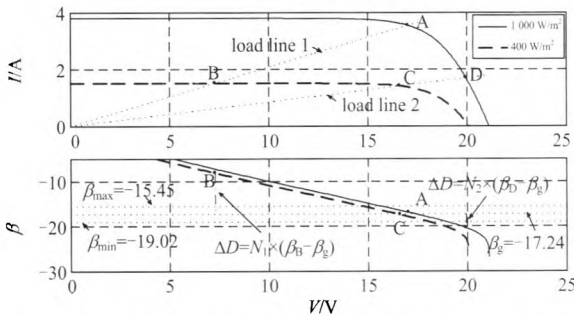


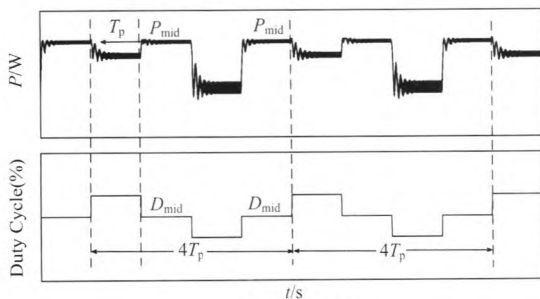
图2 在 I-V 曲线上的负载线和其对应的 β -V 曲线

Fig. 2 Load line on I-V curve and its corresponding β -V curve

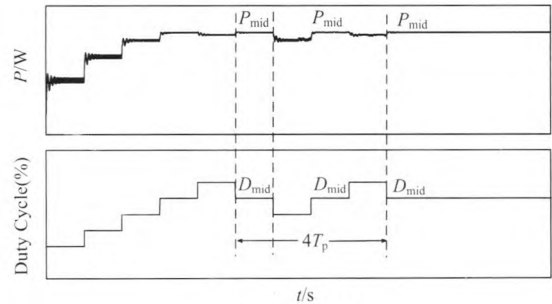
不同于传统的 Beta 法，改进的 Beta 法在光照强度下降和上升时分别使用了不同的步长比例系数，即 N_1 和 N_2 ，用来调节步长以避免步长过大或过小。因此改进的 Beta 法要比传统的 Beta 法追踪速度更快。同时，由于可以根据 β 值位置来判断光照强度上升还是下降，因而可以避免误判。

1.2 改进的 P&O 法

传统的 P&O 法在稳态呈现出三点振荡的模式，如图 3(a) 所示，其中 T_p 为系统采样周期，每 4 个 T_p 则为一个振荡周期。每个振荡周期中，最常出现的点即为中值点，如 D_{mid} 。同时，中值点所对应的功率 P_{mid} 是三点振荡中最大的一个。因此，改进的 P&O 法如图 3(b) 所示，其目的是在稳态找出三点振荡的中值点并将其固定，从而消除振荡使得输出功率维持在最大。



(a) 传统的 P&O 法



(b) 改进的 P&O 法

图3 传统的 P&O 法和改进的 P&O 法的比较

Fig. 3 Comparison between the traditional P&O method and the improved P&O method

为了能更好地理解改进的 P&O 法，其工作原理如图 4 所示。当系统未达到稳态时，计数器 Counter 一直为零。当系统首次发现中值点 D_{mid} ，即满足图 1(c) 中条件 $D_2 = D_4$ 或 $D_1 = D_3$ 时，计数器 Counter 自加同时继续扰动。当 Counter 大于等于 4 时，即认为系统达到稳定的三点振荡状态，故进入休息模式并停止扰动，即步长为零。

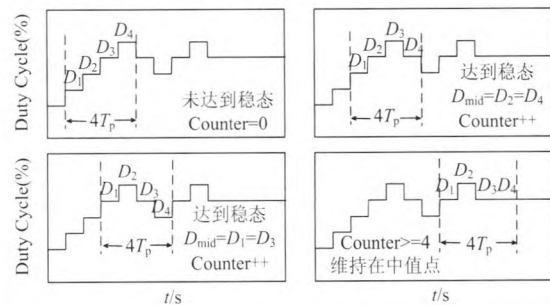


图4 改进的 P&O 法的原理

Fig. 4 Principle of the improved P&O method

当光照强度发生变化时，应停止休息模式并开始扰动。如果光照强度发生剧烈变化，系统工作点的 β 值将会在 β_{\min} 和 β_{\max} 的范围外，此时 Counter 会被清零从而跳出休息模式，如图 1(b) 所示。

由于实际中可能发生光照强度出现微小的变化或是采样出现误差，为了避免此类情况，在进入休息模式前，设置条件

$$|\Delta P| \geq e \quad (4)$$

式中： ΔP 为功率变化； e 为限制条件(threshold)。当条件(4)被满足时，则扰动重新开始并将 Counter 清零，否则仍维持在休息模式下。

2 仿真结果及分析

为了能够验证所提算法的优越性，基于仿真软

件 Matlab/Simulink 搭建了一个完整的带 MPPT 功能的光伏发电系统, 如图 5 所示, 其包括一个光伏组件、Boost 升压电路和 MPPT 算法模块。光伏组件选用 Solarex 公司的 MSX-60W。Boost 电路工作在连续模式下, 其输入电容为 470 μF , 电感 L 为 1 mH, 输出电容为 47 μF , 开关频率为 10 kHz, 负载为 30 Ω 。

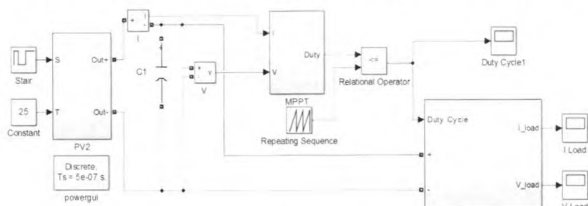
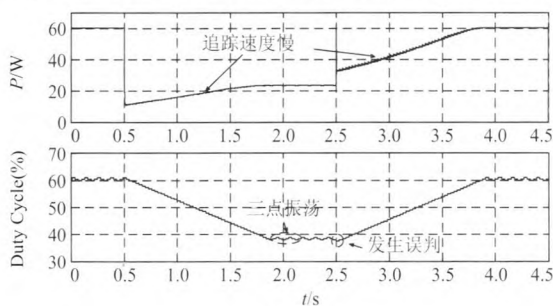


图 5 Matlab/Simulink 中带 MPPT 功能的光伏系统电路图

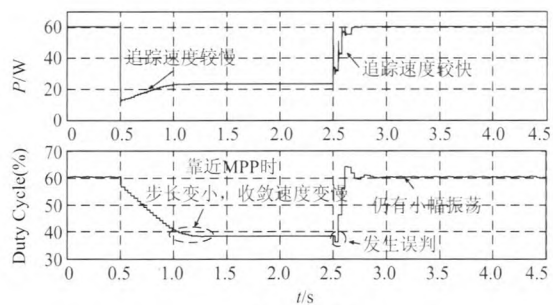
Fig. 5 Schematic of the PV system with MPPT function built in Matlab/Simulink

图 6 为仿真波形, 初始光照强度为 1 000 W/m^2 , 在 0.5 s 时光照强度下降到 400 W/m^2 , 然后在 2.5 s 再次上升到 1 000 W/m^2 。

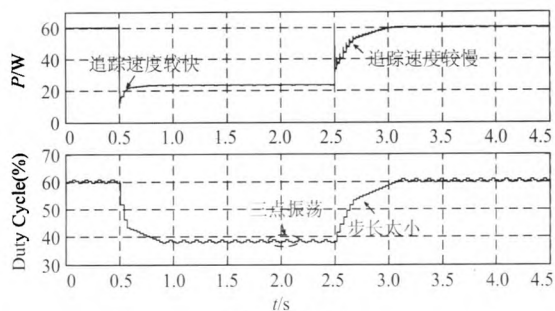
通过对图 6(a)~(d) 的比较可以发现, 传统的 P&O 法, 不仅动态追踪速度慢, 而且在光照强度上升时发生误判现象, 在稳态时占空比有明显振荡, 仿真结果如图 6(a) 所示。与传统的 P&O 法相比, VSSINC 法在光照强度上升时追踪速度较快, 且在稳态时占空比振荡较小, 仿真结果如图 6(b) 所示。但当系统工作点靠近 MPP 时, 其步长变小导致收敛速度变慢, 尤其体现在光照强度下降时。同时当光



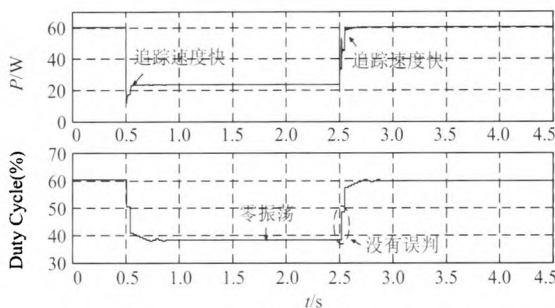
(a) 传统的P&O法



(b) VSSINC法



(c) 传统的Beta法



(d) 本文所提出的MPPT算法

图 6 仿真比较各种 MPPT 方法

Fig. 6 Simulation comparison of various MPPT

照强度上升时, 其仍会发生误判。传统的 Beta 法采用固定的比例系数, 步长较小, 因此追踪速度较慢, 如图 6(c) 所示。同时其在靠近 MPP 时采用传统的 P&O 法, 故在稳态时其仍有振荡。与上述方法相比, 本文提出的算法不仅追踪速度较快, 而且不会发生误判, 在稳态时也没有占空比和功率的振荡, 仿真结果如图 6(d) 所示。

3 实验结果及分析

图 7 为 MPPT 系统的实验样机, 其包括一个太阳能阵列模拟器, Boost 升压电路和 dSPACE 控制器。实验将全面系统地比较多个 MPPT 方法, 为保证所有 MPPT 方法都在同一个条件运行, 因此实验中采用 Chroma 公司的可编程直流电源 62000H 模拟光伏模块输出。dSPACE 作为 MPPT 算法的控制平台, 用来负责光伏电压电流采样以及 MPPT 算法实现。Boost 电路参数与仿真相同。

实验结果如图 8 所示, 其初始光照强度为 1 000 W/m^2 , 在 50 s 时光照强度下降到 400 W/m^2 , 然后在 250 s 再次上升到 1 000 W/m^2 。通过对图 8(a)~(d) 的比较可以发现, 实验结果验证了仿真得到的结果, 即本文所提出的 MPPT 算法不仅追踪速度快, 没有误判, 而且在稳态没有振荡。

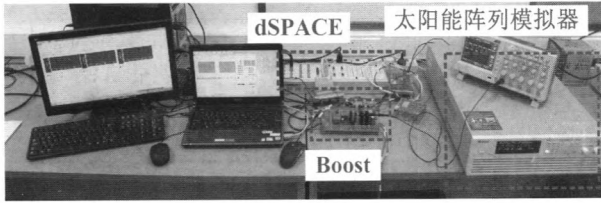
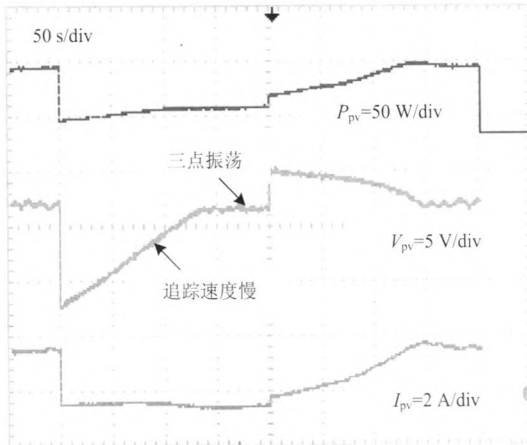
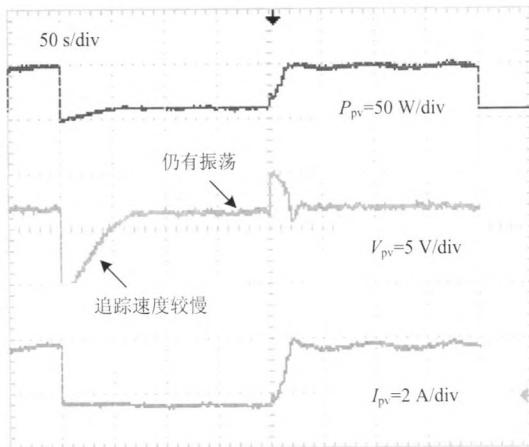


图 7 MPPT 系统的实验样机

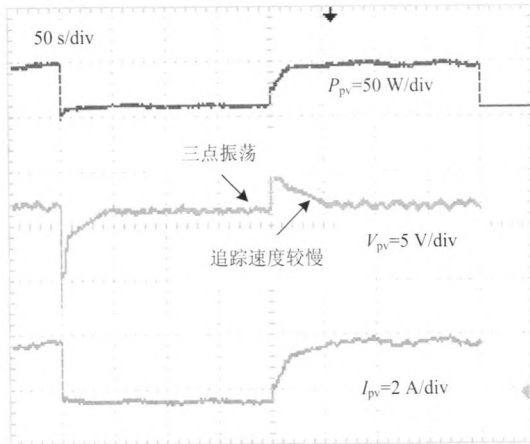
Fig. 7 Experimental prototype of MPPT system



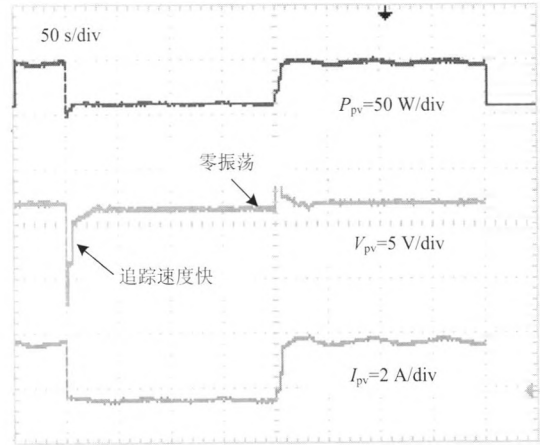
(a) 传统的P&O法



(b) VSSINC法



(c) 传统的Beta法



(d) 本文所提出的MPPT算法

图 8 实验比较各种 MPPT 方法

Fig. 8 Experimental comparison of various MPPT

4 结论

本文采用基于 β 参数的变步长 MPPT 算法，其包括改进的 Beta 法和改进的 P&O 法。当光照强度发生快速变化时，改进的 Beta 法可以实现快速的追踪。同时改进的 P&O 法可以在稳态找出三点振荡的中值点并将其固定，从而消除振荡使得输出功率维持在最大。通过对本算法与传统的定步长的 P&O 法、传统的变步长 VSSINC 法以及传统的 Beta 法进行仿真和实验结果的比较，证明了本算法的优越性。

参考文献

[1] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.

[2] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/ EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

[3] 邱培春, 葛宝明, 毕大强. 基于扰动观察和二次插值的光伏发电最大功率跟踪控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 62-67.
QIU Peichun, GE Baoming, BI Daqiang. MPPT control for PV power generation system based on P&O algorithms and quadratic interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 62-67.

- [4] 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.
- [5] 张晓燕, 席旸旸, 谢琳, 等. 基于 LSSVM 的光伏最大功率点跟踪算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 46-51. ZHANG Xiaoyan, XI Yangyang, XIE Lin, et al. Research on the MPPT algorithm of photovoltaic cell based on LSSVM[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 46-51.
- [6] BRITO M, GALOTTO L, SAMPAIO L, et al. Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3): 1156-1167.
- [7] 黄庆丰, 杨红培, 翟登辉. 基于 Simulink 的两级式单相光伏逆变器的系统仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 58-61. HUANG Qingfeng, YANG Hongpei, ZHAI Denghui. System simulation of double-stage single-phase photovoltaic inverter based on Simulink[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 58-61.
- [8] ELGENDY, MZAHAWI B, ATKINSON D. Operating characteristics of the P&O algorithm at high perturbation frequencies for standalone PV systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(1): 189-198.
- [9] KJAR S. Evaluation of the hill climbing and the incremental conductance maximum power point trackers for photovoltaic power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4): 922-929.
- [10] HSIEH G, HSIEH H, TSAI C, et al. Photovoltaic power increment aided incremental conductance MPPT with two-phased tracking[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2895-2911.
- [11] SOON T, MEKHILEF S. A fast-converging MPPT technique for photovoltaic system under fast-varying solar irradiation and load resistance[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(1): 176-186.
- [12] XIAO Weidong, DUNFORD W. A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems[C] // 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004, 3: 1957-1963.
- [13] 方波, 李明, 康龙云. 直接占空比扰动的新型光伏自适应爬山法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 30-34. FANG Bo, LI Ming, KANG Longyun. Novel adaptive hill climbing algorithm for PV power system with direct duty cycle perturbation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(9): 30-34.
- [14] 薛云灿, 李彬, 王思睿, 等. 基于功率二次微分的光伏系统改进 MPPT 算法研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 117-123. XUE Yuncan, LI Bin, WANG Sirui, et al. An improved MPPT algorithm based on power quadratic differential for photovoltaic system[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 117-123.
- [15] LIU Fangrui, DUAN Shanxu, LIU Fei, et al. A variable step size INC MPPT method for PV systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2622-2628.
- [16] MEI Q, SHAN M, LIU L, et al. A novel improved variable step-size incremental-resistance MPPT method for PV systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2427-2434.
- [17] 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): 110-114. HANG Fenghai, YANG Wei, ZHU Wenyan. Analysis and improvement of MPPT disturbance observer method for PV system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 110-114.
- [18] 党克, 杨维湘, 严干贵, 等. 光伏发电系统 MPPT 改进方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(4): 91-95. DANG Ke, YANG Weixiang, YAN Gangui, et al. An improved MPPT method in PV power system[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(4): 91-95.
- [19] JAIN S, AGARWAL V. A new algorithm for rapid tracking of approximate maximum power point in photovoltaic systems[J]. IEEE Power Electronics Letters, 2004, 2(1): 16-19.
- [20] LI Xingshuo, WEN Huiqing, ZHAO Chenhao. Improved beta parameter based MPPT method in photovoltaic system[C] // 9th IEEE Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), Seoul, South Korea, 2015: 1405-1412.

收稿日期: 2015-09-16; 修回日期: 2015-10-28

作者简介:

李星硕(1989-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子与光伏发电; E-mail: Xingshuo.Li@xjtlu.edu.cn

文辉清(1979-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电动汽车、电力电子变换及可再生能源技术。E-mail: Huiqing.Wen@xjtlu.edu.cn

(编辑 魏小丽)