

DOI: 10.7667/PSPC171445

基于超螺旋滑模控制光伏 MPPT 的实现

李正明, 单晓晨, 徐鹏坤

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 针对光伏发电过程中功率输出随机性的问题, 提出一种基于超螺旋(Super-Twisting)二阶滑模控制的 MPPT 实现方法。此方法基于 Boost 升压电路, 通过选取合适的滑模面将离散控制率转移到高阶, 使控制量在时间上连续, 从而设计了一种无抖颤滑模变换器, 以实现光伏输出最大功率跟踪, 并消除抖振的影响。为了验证算法的优越性, 在 Matlab/Simulink 中搭建光伏发电系统模型进行仿真实验。结果表明: 在光照强度和温度变化的条件下, 相比于传统的控制算法, 二阶滑模控制算法能快速实现最大功率跟踪, 具有很强的鲁棒性。

关键词: 光伏发电; MPPT; Boost; 二阶滑模; 无抖颤

Super-twisting sliding mode controller used in photovoltaic system MPPT

LI Zhengming, SHAN Xiaochen, XU Pengkun

(College of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Considering the random output of photovoltaic power generation in the process of generating electricity, a Super-Twisting sliding mode control algorithm for Maximum Power Point Tracking (MPPT) is proposed which is based on Boost circuit. By selecting appropriate sliding mode surface, the higher-order discrete control rate can be obtained, which leads to continuous control variables in time. Thus a chattering-free sliding mode converter is designed to achieve the MPPT, meanwhile, the influence of chattering is effectively eliminated. In order to verify the superiorities of the algorithm, a photovoltaic power generation system model is built in Matlab/Simulink to carry out simulation experiments. Compared with the traditional control algorithm, the results reveal that the proposed method can quickly achieve the MPPT under the disturbances of variable light and temperature, which exhibits strong robustness simultaneously.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477070) and PAPD (No. 20116).

Key words: photovoltaic power generation; MPPT; Boost; second order sliding mode control; chattering free

0 引言

太阳能是一种快速增长的能源形式, 在过去的十年里得到了长足发展, 作为新兴的能源技术, 它安全可靠无污染并且不受地域限制, 但其随机性离散性的特点也大大制约了其利用效率^[1], 为了充分利用太阳能, 提高光伏系统的发电量, 需要光伏系统的输出功率自动跟踪外部光强的变化, 因此人们提出了 MPPT(Maximum Power Point Tracking)控制思想, 包括爬山法^[2]、功率回馈法^[3]以及常用的扰动观察法^[4]、增量电导法^[5]等, 虽然这些方法都取得了一定的效果, 但仍存在效率低的缺陷, 同时

各种针对光伏输出功率的非线性算法也层出不穷, 如滑模控制、模糊控制、自适应控制等^[6]。

其中滑模控制以其结构简单、鲁棒性强、收敛速度快等优点得到了广泛应用。然而传统滑模控制由于控制律的离散性存在不可避免的抖振问题, 严重影响滑模控制的效果, 甚至损坏控制系统, 为了减弱抖振的影响, Aire Levant 首次提出了高阶滑模控制思想^[7], 通过将不连续项放在滑模面的高阶导数中, 使得低阶滑模面从本质上消除了抖振, 既保持了传统滑模的优点又克服了传统滑模的缺陷。

本文针对高阶滑模在光伏发电系统中应用较少的情况, 将超螺旋二阶滑模控制算法应用在光伏系统的前端 Boost 电路中, 利用光伏的功率电压输出特性, 选取合适的滑模面^[8], 设计了一种简单无抖振的超螺旋滑模 MPPT 控制器, 通过 PWM 驱动

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477070); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 PAPD(20116)

电路调节 Boost 的电路占空比, 在实验仿真中引入光照强度和温度的变化, 实现光伏最大功率输出, 并通过仿真验证。

1 太阳能电池的工作特性

1.1 太阳能电池的数学模型

当光伏电池工作时, 它的输出特性具有强烈的非线性特点, 而且电池的开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 很大程度上受外界温度和光照强度的影响, 这必然引起光生电的效率降低^[9]。

本文采用光伏电池数学模型为^[10]

$$I_{PV} = I_{sc} - I_{os} \left[\exp\left(\frac{q}{AKT} V_{PV}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式(1)是基于物理的最基本的解析表达式, 它常用于光能的理论分析, 式中的参数如表 1。

表 1 光伏电池等效电路参数表

| 参数名 | 描述 | 类型 |
|----------|---------|-------------------------------|
| I_{sc} | 光生电流 | 变量 |
| I_{os} | 饱和电流 | 常量 |
| q | 电子电荷量 | 常量 $1.6 \times 10^{-19} c$ |
| A | 理想因子 | 常量 1~2 |
| K | 尔兹曼常数 | 常量 $1.38 \times 10^{-23} J/K$ |
| T | 太阳能电池温度 | 常量 |

太阳能电池的输出特性主要涉及 $I-U$, $P-U$ 两种, 由于光伏发电系统属于非线性系统, 它的工作效率与内部特性、光照强度、温度等因素息息相关^[11], 从式(1)可以看出光照强度和温度是影响光伏系统功率输出的重要参数, 其输出特性曲线易受这些因素的影响产生相应的变化, 通过以往的经验可知, 只有在某一电压下才能输出最大功率, 即它存在唯一的一个最大功率工作点, 当系统工作在这个点时, 光生电系统能获得最大的转换效率^[12-13]。

1.2 Boost 变换器建模

Boost 变换器是一种升压型的 DC-DC 变换器, 用在光伏发电系统中不仅可用于提高输出电压, 也可以作为 MPPT 控制的载体^[14], 本文主电路采用 Boost 升压电路见图 1。

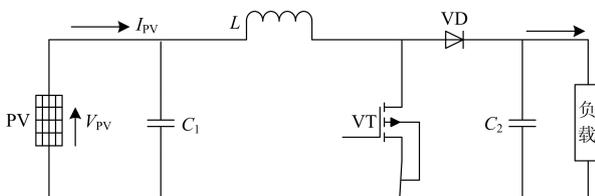


图 1 光伏电池最大功率跟踪系统拓扑结构图

Fig. 1 Structure chart of system for photovoltaics MPPT

图 1 中, 可控开关 VT 导通时, 二极管截止, 输入电压 V_{PV} 向能量传递电感充磁, 负载电压由滤波电容 C_2 维持; 可控开关 VT 关断时, 二极管导通, 电感 L 和 V_{PV} 同时给电容 C_2 和负载提供能量, 使输出电压高于电源电压 V_{PV} , 故称该电路为升压斩波电路。

采用开关函数建模: $u=1$ 代表开关合上, $u=0$ 代表开关断开。

系统的动态数学模型为

$$\begin{cases} \frac{dV_{PV}}{dt} = \frac{1}{C_1} I_{PV} - \frac{u}{C_1} I_L \\ \frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L} V_C + \frac{u}{L} (V_C + V_{PV}) \\ \frac{dV_C}{dt} = \frac{I_L - I_0}{C_2} - \frac{I_L}{C_2} u \end{cases} \quad (2)$$

基于 Boost 变换器的状态空间方程为

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (3)$$

式中:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{dV_{PV}}{dt} \\ \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix}; f(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} I_{PV} \\ -\frac{1}{L} V_C \\ \frac{I_L - I_0}{C_2} \end{bmatrix}; g(x) = \begin{bmatrix} -\frac{u}{C_1} I_L \\ \frac{V_C + V_{PV}}{L} \\ -\frac{I_L}{C_2} \end{bmatrix}。$$

2 MPPT 二阶滑模控制器设计

2.1 二阶滑模分析

二阶滑模控制法应用于变结构控制系统, 由于将离散控制律转移至更高阶的滑模面, 它消除了传统滑模控制中存在的抖振问题^[15]。本文采用的 Super-Twisting 控制算法由两部分组成, 第一部分为滑模面在时间上的积分, 第二部分为滑模面的一个连续函数^[16]。

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) \quad (4)$$

$$\dot{u} = \begin{cases} -u & |u| > u_{\max} \\ -w \text{sign}(s) & |u| \leq u_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

$$u_2 = \begin{cases} -\lambda |s_0|^\rho \text{sign}(s) & |s| > s_0 \\ -\lambda |s_0|^\rho \text{sign}(s) & |s| \leq s_0 \end{cases} \quad (6)$$

保证有限时间内收敛于滑模面原点的充分条件为^[17-18]

$$\begin{cases} w > \frac{\varphi}{\Gamma_M} \\ \lambda^2 \geq \frac{4\varphi\Gamma_M(w+\varphi)}{\Gamma_M^3(w-\varphi)} \\ 0 < \rho \leq 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

式中, w 、 ρ 、 λ 和 s_0 均为常数。当系统与控制律 u 相关度 $r \geq 1$ 时, 控制器可以简化为

$$\begin{cases} u = u_1 + u_2 \\ \dot{u} = -w \text{sign}(s) \\ u_1 = -\int w \text{sign}(s) dt \\ u_2 = -\lambda |s|^\rho \text{sign}(s) \end{cases} \quad (8)$$

Super-Twisting 算法并不需要任何有关滑模面在时间上的微分信息。如果在式(8)中 ρ 取 1, 系统将达到一个指数稳定的二阶滑动模态, 如果 ρ 取 0.5, 系统将最大可能实现二阶滑动模态。

2.2 MPPT 无抖振超螺旋滑模控制器设计

光伏电池的输出功率为

$$P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv} \quad (9)$$

由太阳能电池阵列的特性曲线可知, 太阳能电池阵列工作在最大输出功率状态时有 $\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = 0$, 即

$$\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} V_{pv} + I_{pv} = 0 \quad (10)$$

对于 Boost 变换器, 采用超螺旋二阶滑模算法进行控制, 分别设计 Boost 变换器的切换函数 $S(x)$ 和滑动模态控制率 $u(t)$ 。

滑模面切换函数可取为

$$s = \frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} V_{pv} + I_{pv} = 0 \quad (11)$$

将式(1)代入式(11)可得

$$s = I_{sc} + I_{os} - I_{os} \left(1 + \frac{qV_{pv}}{AKT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_{pv}}{AKT}\right)\right] \quad (12)$$

对式(11)求导可得

$$\dot{s} = \frac{1}{C_1} \times \frac{qI_{os}}{AKT} \exp\left(\frac{qI_{os}}{AKT}\right) (2 + \frac{qI_{os}}{AKT}) [I_L - I_{pv}] \quad (13)$$

对于其控制率, 有

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t)$$

即

$$u = \int w \text{sign}(s) dt - \lambda |s|^\rho \text{sign}(s)$$

所以控制算法为^[19]

$$u = \begin{cases} -\int w dt - \lambda |s|^\rho & s > 0 \\ \int w dt + \lambda |s|^\rho & s < 0 \end{cases} \quad (14)$$

为了证明系统满足滑模的可达性条件 $s \cdot \dot{s} < 0$, 本文取李雅普诺夫函数 $V = \frac{1}{2} s^2$, 根据李雅普诺夫稳定性判据^[20], 构造正定函数

$$V = \frac{1}{2} s^2 > 0 \quad (15)$$

对该函数求导, 可得

$$\dot{V} = s \cdot \dot{s} \quad (16)$$

当 $s > 0$ 时 $u = 0$, 电容 C_1 充电, $I_L u - I_{pv} < 0$ 代入式(12)可得 $\dot{s} < 0$ 。

当 $s < 0$ 时 $u = 1$, 电容 C_1 放电, $I_L - I_{pv} > 0$, 代入式(12)可得 $\dot{s} > 0$ 。

由此证得超螺旋二阶滑模算法在有限时间内是收敛的, 即系统工作于两种状态下, $s\dot{s} < 0$ 都成立, 即系统满足李雅普诺夫函数的到达条件。

3 仿真分析与实验验证

3.1 仿真结果与分析

在第 2、3 节的理论分析和控制器的设计基础上, 为了验证本文设计的控制算法的可行性, 利用 Matlab 中的 Simulink 模块搭建了光伏发电系统的仿真模型, 在工作温度和光照强度阶跃变化条件下, 利用传统的 MPPT 控制算法和超螺旋二阶滑模控制算法分别对光伏的输出特性进行了跟踪效果仿真分析。仿真所用参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真参数

| Table 2 Parameters of simulation system | |
|---|---------|
| 参数 | 数值 |
| Boost 输入电容 C_1/F | 0.006 8 |
| Boost 输出电容 C_2/F | 0.002 6 |
| 微分系数 K_d | 1 |
| 积分系数 K_i | 3.5 |
| 比例系数 K_p | 5 |
| Boost 变换器电感 L/H | 0.01 |
| 参数 w | 0.005 |
| 参数 ρ | 0.5 |
| 参数 λ | 0.002 |
| 参数 S_0 | 0 |

本文中系统仿真针对气候温度的多变性以及光照强度的变化进行研究。图 2 为启动阶段光伏系统输出功率仿真波形。图中红色实线表示传统控制器作用下的输出功率波形, 黑色实线表示二阶滑模

控制器作用下的输出功率波形。

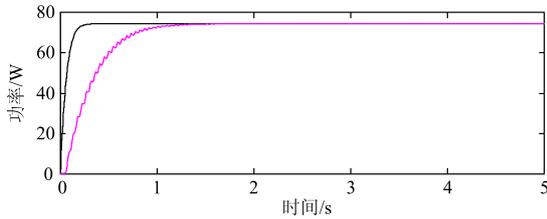


图 2 启动时光伏系统输出功率仿真波形

Fig. 2 Simulation waveform of output power when photovoltaic system starts

如图 2 中所示, 当给定温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光照强度为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 时, 传统 MPPT 控制系统在启动时直到 $1.5\ \text{s}$ 才实现最大功率输出且有明显的抖振现象, 当采用二阶滑模控制系统时, 系统能在极短的时间内跟踪到最大功率且输出特性曲线平滑。

为了验证二阶滑模控制的光伏系统在光照强度和温度发生突变的情况下, 系统具有较好的响应速度及稳定性, 本文对系统在光照强度和温度改变的情况下进行仿真验证。当温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 初始时刻光照强度为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$, 在 $2\ \text{s}$ 时突变到 $800\ \text{W}/\text{m}^2$, $4\ \text{s}$ 时又上升到 $600\ \text{W}/\text{m}^2$, 两种光伏系统 MPPT 控制仿真结果如图 3 所示。

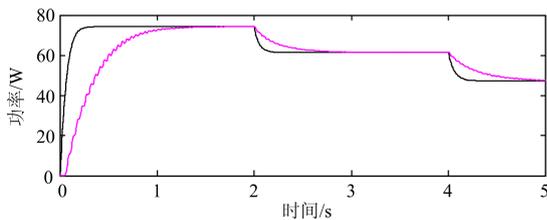


图 3 光照强度发生变化时输出功率仿真波形

Fig. 3 Simulation waveform of output power when intensity of the sunlight changes

由图 3 仿真结果可知, 当在 $2\ \text{s}$ 和 $4\ \text{s}$ 给系统模拟光照突变影响时, 相对于传统的 MPPT 控制算法, 二阶滑模控制系统能迅速地反应并跟踪到实时最大功率跟踪点, 且能实现平滑过渡, 无抖振现象。

保持光照强度为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$, 初始温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2\ \text{s}$ 时上升到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $4\ \text{s}$ 时下降至 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 仿真结果如图 4 所示。

由图 4 仿真结果可知, 当 $2\ \text{s}$ 和 $4\ \text{s}$ 温度发生阶跃突变时, 传统的 MPPT 控制器跟踪速度慢, 且在趋向稳态的过程中存在严重的抖振现象, 尤其在 $4\ \text{s}$ 时, 输出特性曲线失真明显, 而 MPPT 二阶滑模控制器能够迅速地反应并跟踪到光伏输出最大功率。

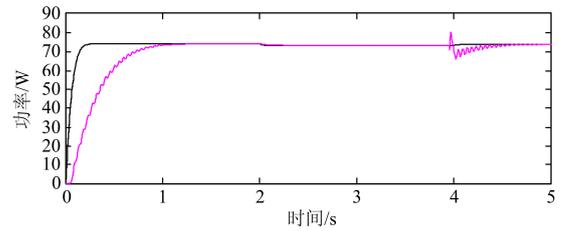


图 4 温度发生变化时输出功率仿真波形

Fig. 4 Simulation waveform of output power when temperature changes

综上, 用超螺旋滑模控制算法控制 Boost 变换电路可以更好地实现光伏最大功率跟踪, 反应速度快, 精度高, 且明显地改善了抖振现象。

3.2 实验验证

为了进一步验证超螺旋二阶滑模控制算法对光伏最大功率点的跟踪效果, 在光伏发电系统的基础上加入 DSP2812 芯片进行实验验证, 实验原理如图 5 所示。仿真参数如表 3。

表 3 仿真参数

Table 3 Parameters of simulation system

| 参数 | 数值 |
|---------------------|-------|
| 输入电容 C_1/F | 0.002 |
| 输出电容 C_2/F | 0.002 |
| 电感 L/H | 0.01 |
| 负载 R/Ω | 5 |

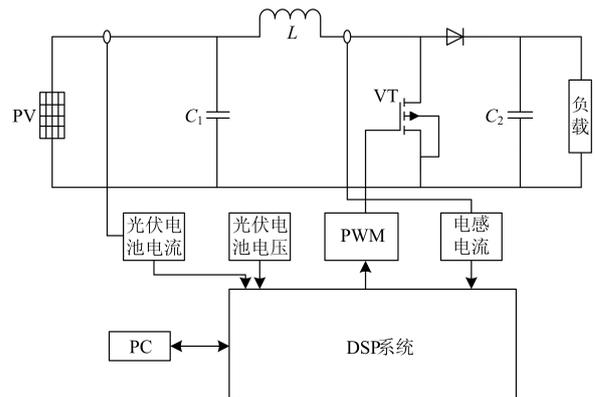
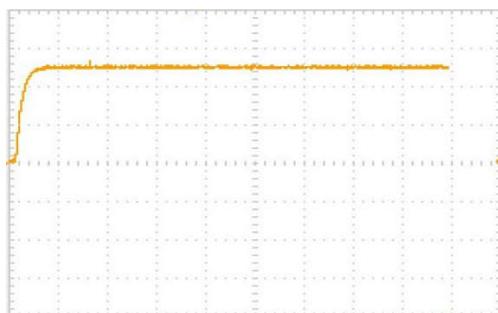


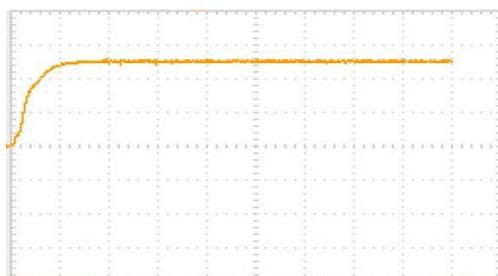
图 5 实验原理图

Fig. 5 Chart of experiment principle

对 MPPT 控制系统分别采用二阶滑模控制器和电导增量法, 二者的输出电压波形如图 6 和图 7 所示。图 6 表明, 当采用二阶滑模控制系统时, 系统能在更短的时间内跟踪到最大功率且输出特性曲线平滑。图 7 表明, 二阶滑模控制器面对外界环境的突变能快速响应找到新的最大功率工作点并稳定输出。



(a) 最大功率二阶滑模控制器启动时输出电压



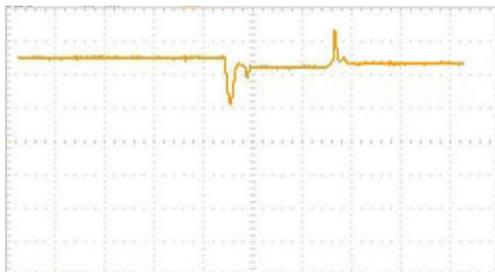
(b) 传统最大功率控制器启动时输出电压波形

图 6 系统启动时输出电压波形

Fig. 6 Waveform of output voltage when photovoltaic system starts



(a) 光照强度突变情况下最大功率二阶滑模控制器输出电压波形



(b) 光照强度突变情况下传统最大功率控制器输出电压波形

图 7 光照强度变化时输出电压波形

Fig. 7 Waveform of output voltage when intensity of the sunlight changes

4 结论

本文在 Boost 直流变换电路的基础上, 对光伏电池输出功率的 MPPT 进行了研究, 首先建立其数学模型, 并选择合适的滑模面, 利用超螺旋二阶滑

模控制实现光伏最大功率跟踪, 在仿真实验中将本文采用的方法与传统的 MPPT 控制算法相比较, 实验表明当外界光照强度和温度改变时, 滑模控制器系统可以快速捕获到光伏输出功率的最大值, 有效抑制了抖振现象。综上所述, 本文采纳的二阶滑模控制具有良好的 MPPT 控制效果。

参考文献

- [1] DABRA, PALIWAL K K, SHARMA P. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Power System Protection and Control, 2017, 2(2): 29-39. DOI: 10.1186/s41601-017-0036-2.
- [2] KJAR S B. Evaluation of “hill climbing” and the “incremental conductance” maximum power point trackers for photovoltaic power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 2(4): 922-929.
- [3] 余开江, 康龙云. 基于功率回馈的光伏系统 MPPT 控制器研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(10): 4-5, 8. YU Kaijiang, KANG Longyun. The photovoltaic power feedback system MPPT controller[J]. Power Electronics, 2010, 44(10): 4-5, 8.
- [4] 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. Two single-phase photovoltaic inverter Simulink system simulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 58-61.
- [5] 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.
- [6] 薛花, 李海霞, 王育飞. 基于非线性微分平滑方法的分布式光储直流供电系统电压稳定控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 46-53. XUE Hua, LI Haixia, WANG Yufei. Method of voltage stability control for distributed optical storage DC power supply system based on nonlinear differential smoothing method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 46-53.
- [7] LEVANT A. Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control[J]. International Journal of Control, 1993, 58(6): 1427-1263.
- [8] 朱晓荣, 刘世鹏, 张海宁. 不平衡电网电压下光伏并网逆变器滑模直接电压/功率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 133-140. ZHU Xiaorong, LIU Shipeng, ZHANG Haining. Sliding mode direct voltage or power control strategy for

- photovoltaic grid connected inverters under unbalanced grid voltage[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 133-140.
- [9] 李星硕, 文辉清. 基于 β 参数的变步长 MPPT 控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 58-63.
LI Xingshuo, WEN Huiqing. Research on power system protection and control parameter based on variable step size MPPT[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 58-63.
- [10] 孙航, 肖海伟, 李晓辉. 光伏电池模型综述[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 743-745.
SUN Hang, XIAO Haiwei, LI Xiaohui. Review of photovoltaic cell model[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(3): 743-745.
- [11] 孔祥雨, 徐永海, 曾雅文, 等. 一种求解光伏电池 5 参数模型的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 46-50.
KONG Xiangyu, XU Yonghai, ZENG Yawen, et al. A method for solving the 5 parameter model of photovoltaic cells[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 46-50.
- [12] 王丰, 孔鹏举, 卓放. 基于分布式最大功率跟踪的光伏系统输出特性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 127-134.
WANG Feng, KONG Pengju, ZHUO Fang. Analysis of output characteristics of PV system based on distributed maximum power tracking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 127-134.
- [13] 李瑞珂, 陈棋, 高文. 微型逆变 MPPT 跟踪策略的应用研究[J]. 电源技术, 2014, 38(12): 2356-2358.
LI Ruike, CHEN Qi, GAO Wen. Application research of micro inverter MPPT tracking strategy[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(12): 2356-2358.
- [14] 胡长武, 李宝国, 王兰梦. 基于 Boost 电路的光伏发电 MPPT 控制系统仿真研究[J]. 光电技术应用, 2014, 29(1): 84-88.
HU Changwu, LI Baoguo, WANG Lanmeng. Photovoltaic power MPPT based on Boost circuit control system simulation[J]. Electro-Optic Technology Application, 2014, 29(1): 84-88.
- [15] DING S, LI S, ZHENG W X. New approach to second-order sliding mode control design[J]. IET Control Theory & Applications, 2013, 7(18): 2188-2196.
- [16] 许佳妮. Boost 变换器滑膜控制器设计[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(16): 36-41.
XU Jiani. Design of synovial controller for Boost converter[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(16): 36-41.
- [17] LEANT A. Homogeneity approach to high-order sliding mode design[J]. Automatica, 2005, 41(5): 823-830.
- [18] LEANT A. Principles of 2-sliding mode design[J]. Automatica, 2007, 43(4): 576-586.
- [19] 皇甫宜耿, 吴宇, 马瑞卿. 一种鲁棒无抖颤滑模控制的 Buck-Boost 变换器[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(2): 285-289.
HUANGFU Yigeng, WU Yu, MA Ruiqing. A robust chattering free sliding mode control Buck-Boost converter[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014, 32(2): 285-289.
- [20] SHTESSEL Y B, ZINOBER A S I, SHKOLNIKOV I A. Sliding mode control of boost and buck-boost power converters using method of stable system centre[J]. Automatica, 2003, 39(6): 1061-1067.

收稿日期: 2017-09-27; 修回日期: 2018-01-27

作者简介:

李正明(1957—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为微电网电能质量分析与控制; E-mail: 12190011678@qq.com

单晓晨(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能电网与新能源;

徐鹏坤(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电网与新能源。

(编辑 周金梅)