

基于扰动观察和二次插值的光伏发电最大功率跟踪控制

邱培春¹, 葛宝明¹, 毕大强²

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 电力系统国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京 100084)

摘要: 提出了一种改进的光伏发电最大功率跟踪方法, 由扰动观察法和二次插值法相结合, 搜索到最大功率点, 通过恒电压法使光伏阵列工作在该点。该方法综合了以上三种方法的优点, 可以避免扰动观察法控制时电压震荡造成的功率损失, 以及恒电压法控制时不能随环境条件实时调整工作电压的缺陷。在 Matlab/Simulink 平台上进行了建模仿真, 并研制了一台控制器, 以验证所提出方法的有效性。仿真和实验结果表明, 采用所提出的控制方法, 能快速精确地搜索到光伏阵列的最大功率点, 工作电压稳定。

关键词: 光伏发电; 最大功率跟踪; 扰动观察法; 二次插值法; 恒电压法

MPPT control for PV power generation system based on P&O algorithms and quadratic interpolation

QIU Pei-chun¹, GE Bao-ming¹, BI Da-qiang²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An improved maximum power point tracking method for PV power generation system is proposed. The maximum power point is sought through perturb & observe algorithms and quadratic interpolation method, then, the PV panel will be forced to operate at the maximum power point through constant voltage tracking. As a result, taking the advantage of the above three methods, the new method avoids the power loss caused by voltage oscillation when using P&O algorithm and overcomes the shortcomings that operation voltage can not be adjusted with environment change when using constant voltage tracking. The whole system is modeled and simulated on MATLAB/Simulink and a controller is developed. Simulation and experimental results validate that the proposed method can search the maximum power point of PV array precisely and fast, and the operation voltage is stable.

Key words: PV power generation; MPPT; perturb & observe algorithms; quadratic interpolation method; constant voltage tracking

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0062-06

0 引言

光伏电池具有强非线性特征, 受光照和温度影响大, 在某一光照和温度下只有一个最大功率点 (MPP)。为了提高发电效率, 常采用最大功率跟踪控制 (Maximum Power Point Tracking, MPPT), 使光伏电池工作在最大功率点, 方法包括恒电压法^[1]、扰动观察法^[2]、二次插值法^[3-4]、电导增量法^[5-6]、间歇扫描法^[6]、模糊控制法^[7-8]等。恒电压法, 使光伏阵列工作在最大功率点电压附近, 这种方法简单、容易实现, 而且系统稳定; 但是, 由于恒电压法是一种近似的最大功率跟踪方法, 特别是当温度变化较大时, 最大功率点电压变化较大,

跟踪效率不高。扰动观察法, 是目前最常用的方法; 但是, 光伏阵列只能在最大功率点附近震荡工作, 会造成一部分功率损失。二次插值法, 通过拟合二次曲线求出最大功率点电压, 可以避免扰动观察法电压震荡造成的功率损失; 但是, 简单拟合的二次曲线跟实际的 P-V 曲线很难吻合, 而且当温度变化时, 最大功率点电压将会发生变化, 也会造成一部分的功率损失。电导增量法, 可以比较精确地实现最大功率跟踪控制, 但是这种方法复杂, 对硬件要求也比较高。间歇扫描法, 这种方法稳定可靠, 算法也比较简单; 但是这种方法控制的光伏发电系统无法实现连续的功率输出, 同时要求控制器要有较大的存储空间。模糊控制法, 是一种先进的控制方法, 精度好, 速度快, 但是这种控制方法的设计要求设计人员更多的直觉和经验^[9]。

针对当前各种控制方法的优缺点, 本文提出一

基金项目: 台达电力电子科教发展计划基金资助项目 (DREG2009006)

种改进的最大功率跟踪方法, 该方法由扰动观察法、二次插值法和恒电压法相结合而成, 扬长避短, 可以快速精确地找到最大功率点, 并使光伏阵列稳定输出, 提高发电效率。

1 光伏电池的特性

太阳光照射到半导体 PN 结上, PN 结两端会产生一个光生电压, 当接上负载时, 就会产生一个电流。单个太阳能电池的等效电路模型如图 1 所示, 电气特性如式 (1) 所示^[10]。

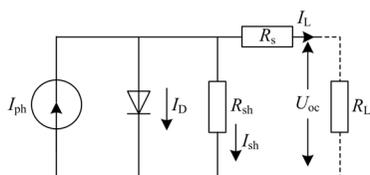


图 1 太阳能电池的等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit of solar cells

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q}{AkT}(U_{oc} + I_L R_s) - 1\right] \right\} - \frac{U_D}{R_{sh}} \quad (1)$$

其中: I_{ph} 为光生电流; I_0 为 PN 结反向饱和电流; I_L 为负载电流; U_{oc} 为开路电压; q 为电子电荷; A 为 PN 结的曲线常数; U_D 为等效二极管端电压; R_s 为串联电阻; R_{sh} 为旁路电阻; k 为 Boltzmann 常数; T 为电池表面温度。

光伏电池具有很强的非线性特征, 图 2 是光伏电池在标准光照和标准温度条件下的 P-V 特性和 I-V 特性。在一定的温度和光照条件下有唯一的最大功率点, 而且最大功率点电压随光照特别是温度的变化而变化。因此, 常在负载和光伏阵列之间加入最大功率跟踪控制器, 使光伏阵列工作在最大功率点上。

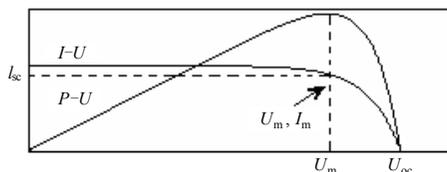


图 2 P-V 特性和 I-V 特性 (标么值)

Fig.2 P-V and I-V characteristics (pu)

2 最大功率跟踪方法设计

2.1 二次曲线拟合

光伏阵列在任意温度和光照条件下的功率如式 (2)^[11]:

$$P = U(I_{LG} - I_{OS} \left\{ \exp\left[\frac{q}{\alpha KT}(U + IR_s)\right] - 1 \right\} - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}) \quad (2)$$

式 (2) 是一个相当复杂的表达式, 在实际中很难应用。但是, 如果能够找到 P-V 特性曲线最大功率点附近近似的初等函数表达式, 就可以用比较简单的数据处理方法, 求出最大功率点电压。在最大功率点附近, P-V 特性曲线近似为开口向下的抛物线, 所以可以通过选取三个合适的样本点, 用二次插值法求出函数表达式, 再求出最大功率点。

假设已知三个插值节点 (y_{k-1}, x_{k-1}) 、 (y_k, x_k) 、 (y_{k+1}, x_{k+1}) , 则插值多项式如式 (3)^[12]:

$$L_2(x) = y_{k-1}l_{k-1}(x) + y_k l_k(x) + y_{k+1}l_{k+1}(x) \quad (3)$$

其中:

$$l_{k-1}(x) = \frac{(x - x_k)(x - x_{k+1})}{(x_{k-1} - x_k)(x_{k-1} - x_{k+1})} \quad (4)$$

$$l_k(x) = \frac{(x - x_{k-1})(x - x_{k+1})}{(x_k - x_{k-1})(x_k - x_{k+1})} \quad (5)$$

$$l_{k+1}(x) = \frac{(x - x_{k-1})(x - x_k)}{(x_{k+1} - x_k)(x_{k+1} - x_{k-1})} \quad (6)$$

可以得到二次函数的一般式如式 (7):

$$L_2(x) = ax^2 + bx + c \quad (7)$$

其中:

$$a = \frac{y_{k-1}}{(x_{k-1} - x_k)(x_{k-1} - x_{k+1})} + \frac{y_k}{(x_k - x_{k-1})(x_k - x_{k+1})} + \frac{y_{k+1}}{(x_{k+1} - x_{k-1})(x_{k+1} - x_k)} \quad (8)$$

$$b = \frac{y_{k-1}(x_k + x_{k+1})}{(x_{k-1} - x_k)(x_{k-1} - x_{k+1})} + \frac{y_k(x_{k-1} + x_{k+1})}{(x_k - x_{k-1})(x_k - x_{k+1})} + \frac{y_{k+1}(x_{k-1} + x_k)}{(x_{k+1} - x_{k-1})(x_{k+1} - x_k)} \quad (9)$$

$$c = \frac{y_{k-1}x_k x_{k+1}}{(x_{k-1} - x_k)(x_{k-1} - x_{k+1})} + \frac{y_k x_{k-1} x_{k+1}}{(x_k - x_{k-1})(x_k - x_{k+1})} + \frac{y_{k+1} x_{k-1} x_k}{(x_{k+1} - x_{k-1})(x_{k+1} - x_k)} \quad (10)$$

那么, 拟合曲线的最大值点为 $(-\frac{b}{2a}, \frac{4ac - b^2}{4a})$ 。

在拟合光伏电池 P-V 曲线时, 只需要将所选取的三个点 (U_1, P_1) 、 (U_2, P_2) 和 (U_3, P_3) 代入式 (8) 和式 (9), 求出二次曲线系数 a 和 b , 再求出 $-b/2a$, 则最大功率点电压 $U_m = -b/2a$ 。所以, 采用二次插值法, 只需要很少的运算就可以求出最大功率点。但是, 如果选取的三个点不合适, 例如, 选取的三个点都在最大功率点的左边或者右边, 或

者三个点离最大功率点较远，拟合出来的曲线将与实际的 P-V 曲线相差较远，计算出来的最大功率点电压 U 将偏离实际，导致一部分功率损失。如果所选取的三个点分布在最大功率点附近左右两侧，则拟合出来的曲线将能较好地 and 实际的最大功率点附近的 P-V 曲线吻合，这样计算出来的最大功率点电压将很接近实际的最大功率点电压。如果最大功率点附近的三个点满足条件 1:

$$(U_1 > U_2 > U_3) \ \&\& \ (P_2 > P_1, P_2 > P_3) \quad (11)$$

或者满足条件 2:

$$(U_1 < U_2 < U_3) \ \&\& \ (P_2 > P_1, P_2 > P_3) \quad (12)$$

则三个点就分布在最大功率点两侧，可作为插值点用来拟合曲线。

2.2 改进的最大功率跟踪方法

基于单独使用某一种控制方法的缺点和 2.1 节所述的二次插值法在计算最大功率点电压时的简单可行性，本文提出一种改进的方法，控制流程图如图 3 所示。该方法由扰动观察法、二次插值法和恒电压法三种方法相结合，首先采用传统的扰动观察法搜索最大功率点，当搜索一段时间后，光伏阵列将会运行在最大功率点附近；然后选取满足式 (11) 或者式 (12) 的三个点 (U_1, P_1) 、 (U_2, P_2) 和 (U_3, P_3) ，按式 (8) 和式 (9) 求出二次曲线的系数 a 和 b ，再求出最大功率点电压 U_m ；最后采用恒电压法使光伏阵列工作在 U_m 。为了在光照和温度变化后，光伏阵列仍然能工作在最大功率点，可按一定的周期 T 重复上述步骤搜索最大功率点。输出电压的调节通过电压闭环实现，即光伏阵列的工作电压 U 作为反馈量，和前级给定的参考电压 U_{ref} 相比较，误差经 PI 调节器调节，使光伏阵列工作在给定的参考电压上。

光伏阵列的最大功率点电压受光照强度的影响小，受温度影响较大。实际中，光伏阵列的工作温度变化缓慢，光伏阵列的最大功率点电压不会剧烈变化，所以在实际应用中重复搜索最大功率点的周期 T 可以选一个比较大的值，如 15 min。

3 仿真分析

3.1 P-V 特性曲线拟合

按照 2.1 节所述的方法，通过选取三个合适的样本点拟合最大功率点附近的 P-V 特性曲线。仿真结果如图 4 所示。图中，功率 P 和电压 U 均用标么值表示，分别以最大功率 P_m 和最大功率点电压 U_m 为基准值，曲线 1 是光伏阵列实际的 P-V 特性曲线，

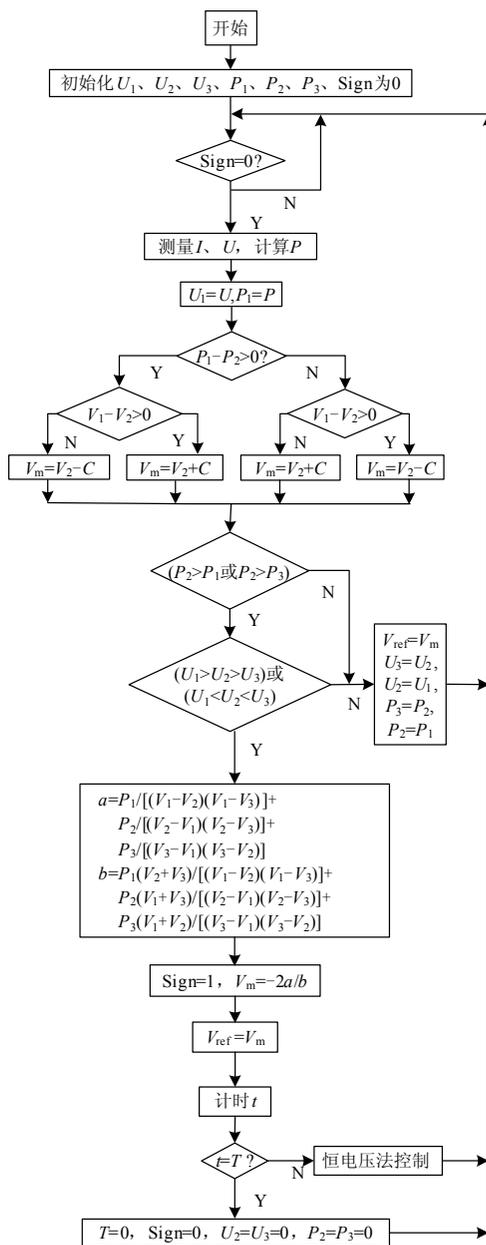


图 3 控制流程图

Fig.3 Control flow chart

曲线 2 和 3 是拟合出来的曲线。曲线 2 采用的插值点是电压 $U=0.8U_m$ 、 U_m 和 $1.2U_m$ 对应的三个点，曲线 3 采用的插值点是电压 $U=0.92U_m$ 、 U_m 和 $1.08U_m$ 对应的三个点。可以看出，当选取的插值点分布在离最大功率点较远的区域时，拟合出来的曲线 2 误差较大；当选取的插值点分布在离最大功率点较近的区域时，拟合出来的曲线 3 误差很小。通过反复比较研究，当插值点分布在 $(0.92U_m, 1.08U_m)$ 区域内时（如图灰色区），拟合出来的曲线误差很小，可以据此来确定选点的步长。

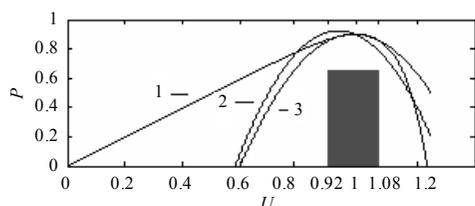


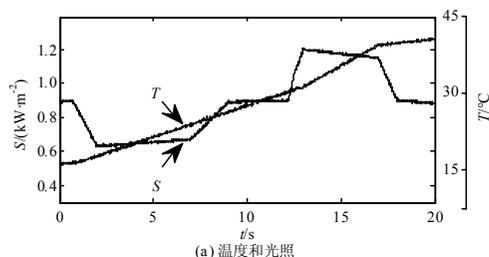
图4 曲线拟合 (标么值)

Fig.4 Curve fitting (pu)

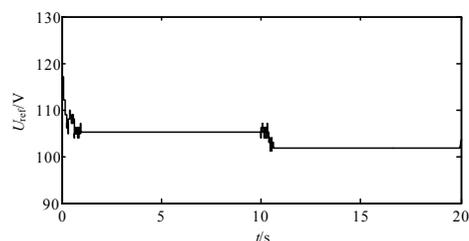
3.2 最大功率跟踪

光伏阵列通过 BOOST 电路和负载连接, 通过控制 BOOST 电路使光伏阵列工作在最大功率点。在标准光照 $S=1000 \text{ W/m}^2$ 和标准温度 $T=28^\circ\text{C}$ 条件下, 光伏阵列开路电压 $U_{oc}=123.5 \text{ V}$, 短路电流 $I_{sc}=10.68 \text{ A}$, 最大功率点电压 103.0 V , 最大输出功率 $P_m=1070.0 \text{ W}$ 。

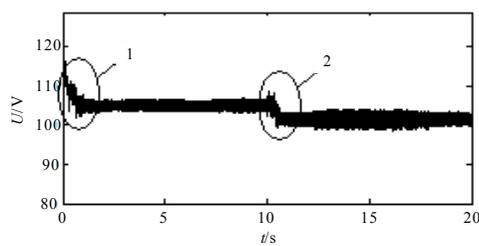
仿真时, 扰动步长 $\Delta U=1 \text{ V}$, 搜索最大功率点周期 $T=10 \text{ s}$ 。温度和光照条件如图 5 (a) 所示。图 5 (b) 是光伏阵列的参考工作电压, 起始工作电压是 120 V 。首先通过扰动观察法使光伏阵列工作在最大功率点附近, 一旦找到三个合适的样本点, 则进行二次曲线拟合并算出最大功率点电压 $U_{ref1}=105.1 \text{ V}$ 。起始时的光照和温度分别约为 890 W/m^2 和 15°C , 经测量, 光伏阵列在该环境条件下实的最大功率点电压为 105.8 V , 说明 $U_{ref1}=105.1 \text{ V}$ 比较接近实际的最大功率点电压。10 s 后, 光照和温度分别约为 900 W/m^2 和 25°C , 重新搜索最大功率点, 通过二次插值求得的参考电压 $U_{ref2}=103.5 \text{ V}$ 。图 5 (c) 和 5 (d) 分别是光伏阵列的实际工作电压和输出功率, 除了在搜索最大功率点时会有短暂的电压震荡 (如图 5 (c) 状态 1 和 2), 其他时候工作电压稳定, 并且始终保持最大功率输出。



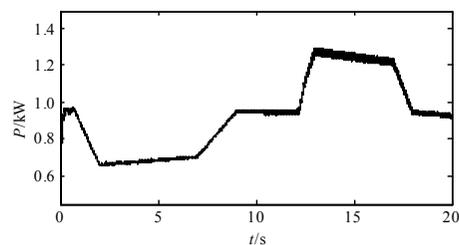
(a) 温度和光照



(b) 参考工作电压



(c) 实际工作电压



(d) 输出功率

图5 仿真结果

Fig.5 Simulation results

4 实验分析

为了验证本文提出的控制方法, 研制了一台控制器, 其拓扑结构是一个 BOOST 电路, 采用 TI 的定点 DSP TMS320F2812 控制^[13]; 电池板型号为 KD135GH-2P, 该电池板在标准光照和标准温度下, 短路电流 $I_{sc}=8.37 \text{ A}$, 开路电压 $U_{oc}=22.1 \text{ V}$, 最大功率点电流 $I_m=7.63 \text{ A}$, 最大功率点电压 $U_m=17.7 \text{ V}$, 最大输出功率 $P_m=135\text{W} \times (95\% \sim 105\%)$ 。实验平台如图 6 所示。

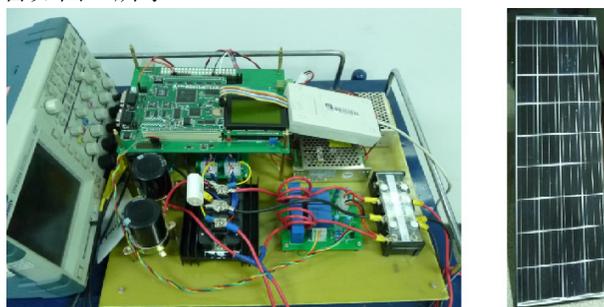


图6 实验平台

Fig.6 Experimental platform

为了滤除干扰, 测量光伏电池工作电压 U 和电流 I 时, 采用平均滤波的方法, 再两者相乘求出电池板输出的功率 P 。实验时, 扰动步长 $\Delta U=0.3 \text{ V}$ 。图 7 是实验结果, P 、 I 和 U 分别是电池板的输出功率、输出电流和端电压。起始时, 电池板端电压是 20 V (状态 0); 然后在扰动观察法的控制下, 电池板端电压开始减小, 往最大功率点靠近; 接下来, 电池板依次运行在状态 1、状态 2 和状态 3, 并且这三个状态对应的三个点 (17.0 V , 117.1 W)、(16.7 V ,

119.2 W) 和 (16.5 V, 118.2 W) 满足曲线拟合的第一个条件 (式 (11)), 于是进行曲线拟合, 并计算出最大功率点电压 $U_m=16.67$ V; 最后采用恒电压法, 使光伏电池恒定工作在 16.67 V (状态 4)。其中状态 2 是采用扰动观察法搜索到的最大功率点, 比较状态 2 和状态 4 可以看出, 通过二次插值法计算出来的最大功率点电压相当接近实际的最大功率点电压。实际应用中, 可以按一定的周期 T 重复上述步骤, 实时调整工作点, 这样, 光伏阵列只在最大功率点跟踪的时候会有短暂的电压震荡, 而且当环境条件改变时仍能工作在相应的最大功率点。

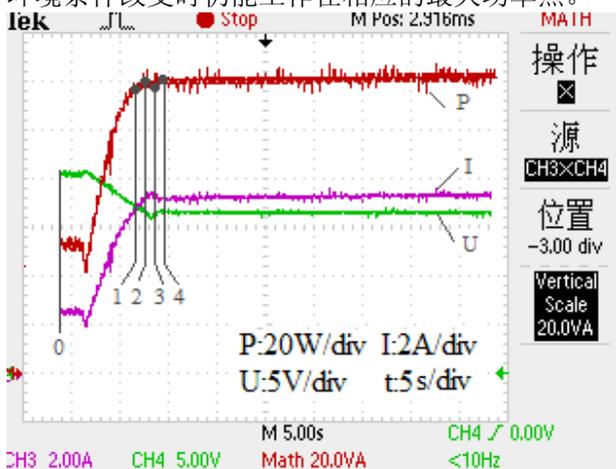


图 7 实验结果

Fig.7 Experimental results

图 8 为系统长时间运行的测量结果, 期间本文提出的方法一直运行, 每隔 110 s 进行一次最大功率点跟踪。由于光照和温度基本保持不变, 尽管系统经过若干次刷新跟踪, 但最终仍运行于原最大功率点。图 8 中, 点 1、2、3 为三次刷新点。

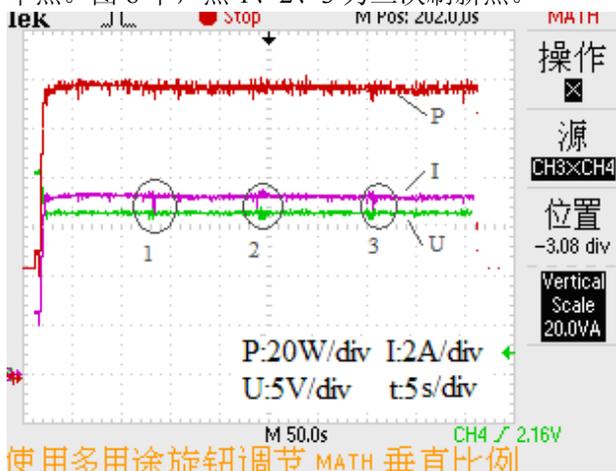


图 8 实验结果

Fig.8 Experimental results

5 结论

本文在分析光伏电池特性和比较当前各种光伏发电最大功率跟踪方法优缺点的基础上, 提出了一种由扰动观察法、二次插值法和恒电压法相结合的控制方法, 该方法可以精确地找到光伏阵列在不同环境条件下的最大功率点, 解决了扰动观察法电压震荡和恒电压法不能在环境条件改变时调整工作点的问题, 提高了发电效率。在 Matlab/Simulink 平台上对整个系统进行了建模仿真, 研制了基于 BOOST 电路的最大功率跟踪控制器, 仿真和实验结果都验证了这种综合的控制方法是稳定可行、有效的。

参考文献

- [1] 李晶, 窦伟, 徐正国, 等. 光伏发电系统中最大功率点跟踪算法的研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28 (3) : 268-273.
LI Jing, DOU Wei, XU Zheng-guo, et al. Research on MPPT methods of photovoltaic power generation system[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2007, 28 (3) : 268-273.
- [2] Jung Youngseok, So Junghun, Yu Gwonjong, et al. Improved perturbation and observation method (IP&O) of MPPT control for photovoltaic power systems. IEEE Electron Device Society[C]. //Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005, Lake Buena Vista, FL, United states. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc: 2005: 1788-1791.
- [3] Jing Hu, Jiancheng Zhang, Hongbo Wu. A novel MPPT control algorithm based on numerical calculation for PV generation systems[C]. //IEEE Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPMC'09. IEEE 6th International. Wuhan: 2009: 2103-2107.
- [4] Koutroulis E, Kalaitzakis K, Voulgaris N C. Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16 (1) : 46-54.
- [5] 孙自勇, 宇航, 严干贵, 等. 基于PSCAD的光伏阵列和MPPT控制器的仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 61-64.
SUN Zi-yong, YU Hang, YAN Gan-gui, et al. PSCAD simulation models for photovoltaic array and MPPT controller[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 61-64.
- [6] 戴训江, 晁勤. 单相光伏并网逆变器固定滞环的电流控制[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 12-17.
DAI Xun-jiang, CHAO Qin. Current control of constant hysteresis band for single phase photovoltaic

- grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 12-17.
- [7] 刘永军, 万频, 王东海, 等. 自适应模糊算法在光伏系统MPPT中的应用[J]. 太阳能学报, 2008, 29(6): 167-171.
LIU Yong-jun, WAN Pin, WANG Dong-hai, et al. Maximum power point tracking in photovoltaic system by using adaptive fuzzy arithmetic[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2008, 29(6): 167-171.
- [8] Syafaruddin, Karatepe Engin, Hiyama Takashi. Polar coordinated fuzzy controller based real-time maximum-power point control of photovoltaic system[J]. Renewable Energy, 2009, 34(12): 2597-2606.
- [9] 周林, 武剑, 栗秋华, 等. 光伏阵列最大功率点控制方法综述[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1145-1154.
ZHOU Lin, WU Jian, LI Qiu-hua, et al. Survey of maximum power point tracking techniques for photovoltaic array[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1145-1154.
- [10] 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.
ZHAO Zheng-ming, LIU Jian-zheng, SUN Xiao-ying, et al. The photovoltaic generation and application of the solar energy[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [11] 茆美琴, 余世杰, 苏建晖. 带有MPPT功能的光伏阵列MATLAB通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
MAO Mei-qin, YU Shi-jie, SU Jian-hui. Versatile matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [12] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 斯普林格出版社, 2001.
LI Qing-yang, WANG Neng-chao, YI Da-yi. Numerical analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, Springer Press, 2001.
- [13] 吴玉蓉, 张国琴. 基于DSP控制的单相光伏并网逆变器系统的设计[J]. 继电器, 2008, 36(4): 51-56.
WU Yu-rong, ZHANG Guo-qin. Design of single phase photovoltaic grid-connected inverse system based on DSP[J]. Relay, 2008, 36(4): 51-56.

收稿日期: 2010-02-05; 修回日期: 2010-05-15

作者简介:

邱培春(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: qiupc22@126.com

葛宝明(1971-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制;

毕大强(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统主设备继电保护、电力电子技术在电力系统中的应用。

(上接第 61 页 continued from page 61)

- [3] 吴文传, 张伯明. 电容器实时优化投切的最优匹配注入流法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 35-39.
WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. Optimal matching injected flow for optimal sizing of capacitor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 35-39.
- [4] 王星华, 余欣梅. 电容器组串联电抗率优化选择模型和算法研究[J]. 电力系统控制与保护, 2008, 36(16): 43-47.
WANG Xing-hua, YU Xin-mei. Optimal configuration of series reactors in capacitor banks[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(16): 43-47.
- [5] 赵登福, 刘昱, 夏道止. 考虑开关动作次数约束的配电网无功电压控制方法的研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(8): 783-786.
ZHAO Deng-fu, LIU Yu, XIA Dao-zhi. Reactive power/voltage control of distribution system considering the constraint of the maximum allowable number of switching operations[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(8): 783-786.
- [6] 胡泽春, 王锡凡. 配电网无功优化的分时段控制策略[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 45-49.
HU Ze-chun, WANG Xi-fan. Time-interval based control strategy of reactive power optimization in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 45-49.
- [7] 唐群纲, 林景栋. 基于启发式搜索降低配电网网损的配网重构算法[J]. 电力系统控制与保护, 2007, 35(14): 10-12.
TANG Qun-gang, LIN Jing-dong. Reconfiguration of distribution network algorithm of power loss reduction based on heuristic search[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(14): 10-12.
- [8] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40
CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Study on Power flow calculation of distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 35-40.

收稿日期: 2009-02-10; 修回日期: 2009-04-16

作者简介:

彭显刚(1964-), 男, 副教授, 从事电力系统分析、电网优化与控制研究;

张聪慧(1984-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统运行与控制研究; E-mail: zchsunny99@163.com

王星华(1972-)男, 副教授, 从事电力系统分析、电网优化与控制研究。