

无差拍控制的非隔离型并网逆变器漏电流分析

高金辉, 邢倩

(河南师范大学物理与电子工程学院, 河南省光伏材料重点实验室, 河南 新乡 453007)

摘要: 为实现逆变系统高质量并网电流的输出, 漏电流的消除对非隔离型光伏并网逆变器至关重要。分析了非隔离型单相并网逆变器漏电流的产生机理和流通回路, 并基于无差拍电流控制原理, 说明漏电流对逆变电流以及 MPPT 的影响。提出了一种基于无差拍电流控制的单相光伏并网逆变器漏电流补偿方法, 并在 Matlab/Simulink 环境下进行仿真。通过仿真结果和实验测得值相比较表明, 通过对逆变器占空比的补偿, 可以有效地消除漏电流对逆变电流的影响, 从而避免功率跟踪中出现误判或者找不到最大功率点的情况, 实现逆变电流高质量输出和最大功率的正确跟踪。

关键词: 非隔离型; 逆变器; 漏电流; 无差拍电流控制; MPPT

Deadbeat control for transformerless PV grid inverter leakage current analysis

GAO Jin-hui, XING Qian

(Henan Key Laboratory of Photovoltaic Material, College of Physical and Electronic Engineering,
Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: In order to achieve high quality grid current output of inverter system, it is very important to eliminate the leakage current of the transformerless PV grid inverter. This paper analyzes the mechanism and current loop of leakage current, and based on dead-beat current control principle, illustrates the influence of leakage current on the inverter current and MPPT. It puts forward a kind of single-phase PV grid inverter leakage current compensation methods based on dead-beat current control. Simulation is carried out in Matlab/Simulink environment. The comparison between the model output and experimental measurement shows that using the compensation of the inverter duty ratio can efficiently eliminate the impact of leakage current on the inverter current, so as to avoid the misjudgment in power tracking or the condition that it can't find the maximum power point, in addition, achieve high-quality inverter current output and correct maximum power point tracking.

Key words: transformerless; inverter; leakage current; dead-beat current control; MPPT

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)09-0120-06

0 引言

随着光伏并网发电技术在世界各地的研究和推广, 非隔离型并网逆变器凭借效率高、体积小、重量轻和成本低等优势, 迅速地成为各国科研人员和工业界的研究热点^[1], 但由于光伏阵列和电网无直接的电气隔离, 形成较大漏电流^[2], 带来传导和辐射的干扰, 增加进网电流谐波和安全隐患。为实现逆变系统高质量并网电流的输出, 漏电流的消除对非隔离型光伏并网逆变器至关重要。并网逆变器作为发电系统与电网的接口设备之一, 其控制技术一直是研究的热点^[3-5], 且无差拍控制 PWM 算法具有

良好的动态响应, 并且可以使输出电流快速、准确地跟踪参考电流等特点, 常用于并网逆变系统中^[6]。因此由无差拍电流控制的非隔离型光伏并网逆变器漏电流的研究具有重大意义。

本文通过无差拍电流控制的单相光伏并网逆变电路, 分析漏电流产生机理和流通回路, 说明了漏电流对逆变电流以及 MPPT(Maximum Power Point Tracking)的影响。并基于无差拍电流控制原理提出了对占空比进行补偿的补偿方法。并通过 Matlab/Simulink 系统仿真和实验数据验证本文提出的方法可以有效地消除漏电流对逆变电流以及 MPPT 稳定的影响, 实现系统的高质量并网电流的输出和最大功率的准确跟踪。

基金项目: 河南省重点科技攻关项目 (102102310041)

1 单相非隔离型并网逆变器漏电流分析

以单相全桥并网逆变电路为研究对象, 如图 1, 分析其漏电流的产生机理和流通回路。其中 U_{PV} 为光伏阵列的等效直流电压; C_{PV} 为光伏阵列与大地的寄生电容; C_{AG} 、 C_{BG} 分别为交流输出点 A、B 对大地的分布电容; L_A 、 L_B 为并网滤波电感; Z_A 、 Z_B 为滤波电感所在线路的传输线阻抗; Z_G 为地阻抗。

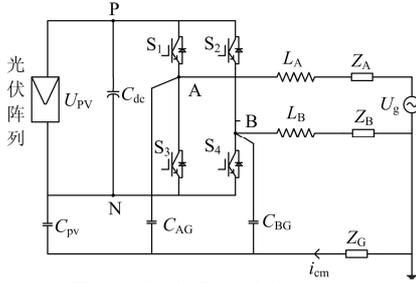


图 1 单相全桥并网逆变电路

Fig. 1 Single-phase full-bridge grid-connected inverter

由于寄生电容 C_{PV} 的存在, 形成了由寄生电容、滤波电感、线路阻抗及电网组成的谐振回路。当回路中各节点电位波动产生的位移电流之和不为 0 时, 就有漏电流 i_{cm} 产生。定义并网逆变器输出共模电压 U_{cm} 和差模电压 U_{dm} 如式(1), 其中, U_{AN} 和 U_{BN} 分别表示逆变器输出侧中点 A、B 对直流输入源负极 N 的电压差。

$$\begin{cases} U_{cm} = \frac{U_{AN} + U_{BN}}{2} \\ U_{dm} = U_{AN} - U_{BN} \end{cases} \quad (1)$$

用共模电压 U_{cm} 和差模电压 U_{dm} 表示 U_{AN} 和 U_{BN} 为

$$\begin{cases} U_{AN} = U_{cm} + \frac{U_{dm}}{2} \\ U_{BN} = U_{cm} - \frac{U_{dm}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

图 2(a)为图 1 变换得到的漏电流谐振回路模型 I。按照不同的激励源对漏电流的“贡献”, 经电路等效变换后得到其谐振电路的等效模型 II 如图 2(b), 其中

$$\begin{cases} U_{s1} = \frac{U_{dm}}{2} \cdot \frac{L_B + Z_B - L_A - Z_A}{L_B + Z_B + L_A + Z_A} \\ U_{s2} = U_g \cdot \frac{L_B + Z_B}{L_B + Z_B + L_A + Z_A} \\ U_{s3} = \frac{U_{dm}}{2} \cdot \frac{C_{BG} - C_{AG}}{C_{BG} + C_{AG}} \end{cases} \quad (3)$$

由图 2 和式(3)可知, 从漏电流产生谐振回路来

看, 当激励源 $U_{cm} + U_{s1} + U_{s2} + U_{s3} \neq C$ (常数) 时, 漏电流就存在。

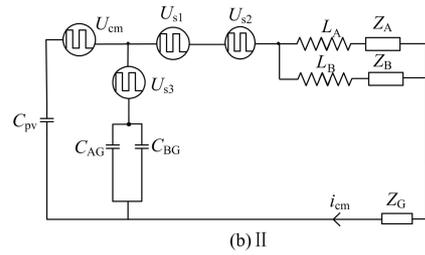
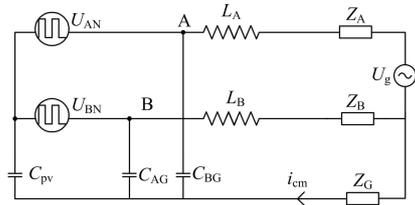


图 2 单相并网逆变器谐振电路的等效模型

Fig. 2 Single-phase grid inverter common-mode simplified model of the resonant circuit

2 并网逆变器无差拍电流控制

无差拍控制器属于一种预测控制器。其原理为: 预测控制量 (电流) 的变化, 并在这个基础上选取逆变器的开关状态或者变化状态^[7]。并网逆变器无差拍电流控制的原理是在每一个开关周期的开始时刻, 对并网逆变器的输出电流进行采样, 其采样电流为 i , 并且预测出下一周期开始时刻逆变器并网侧电流的参考值 i^* , 由差值 $i - i^*$ 计算出开关器件的开关时间, 且使 i 在下一周期开始时刻等 i^* 。这种方法虽计算量较大, 但其开关频率固定、动态响应快, 十分适宜于光伏并网系统的数字控制^[8]。

如图 1 所示, 根据单相全桥并网逆变系统基尔霍夫电压定律, 回路电压时域方程为

$$L \frac{di(t)}{dt} = -Ri(t) + U(t) - U_g(t) \quad (4)$$

其中: $i(t)$ 是逆变输出电流 (逆变电流); $u(t)$ 是逆变器输出电压; $U_g(t)$ 是电网电压; R 为逆变器交流侧的总电阻; L 为总电感。

在一个采样周期内, 将式(4)转换成差分方程为

$$L \frac{I(n+1) - I(n)}{T} = -RI(n) + \overline{U(n)} - \overline{U_g(n)} \quad (5)$$

式(5)中: T 为逆变器的采样周期; $I(n)$ 、 $I(n+1)$ 分别为第 n 、 $n+1$ 个采样周期的采样电流; $\overline{U(n)}$ 和 $\overline{U_g(n)}$ 分别为第 n 个采样周期逆变器输出电压、电网电压的平均值。同时设电流参考值为 $I^*(n+1)$, 逆变器开关器件每个采样周期内的占空比为 $D(n)$ 。

用逆变器参考电流信号 $I^*(n+1)$ 代替 $I(n+1)$, 则

$$\overline{U(n)} = L \frac{I^*(n+1) - I(n)}{T} + RI(n) + \overline{U_g(n)} \quad (6)$$

由于控制周期 T 远小于电网基波周期, 在一个控制周期内, 可忽略电网电压的变化, 即

$$\begin{cases} \overline{U_g(n)} = \frac{3}{2}U_g(n) - U_g(n-1) \\ \overline{U(n)} = \frac{L}{T}I^*(n+1) + (R - \frac{L}{T})I(n) + \frac{3}{2}U_g(n) - U_g(n-1) \\ D(N) = \frac{\overline{U(n)}}{U_{pv}} \end{cases} \quad (7)$$

因此, 逆变器开关器件每个采样周期内的占空比 $D(n)$ 为

$$D(N) = \frac{\frac{L}{T}I^*(n+1) + (R - \frac{L}{T})I(n) + \frac{3}{2}U_g(n) - U_g(n-1)}{U_{pv}} \quad (8)$$

由此可知, 在第 n 个采样时刻, 开关管的占空比 $D(n)$ 与该时刻的采样电流 $I(n)$ 有关。

3 漏电流对逆变系统的影响及补偿方法

3.1 漏电流对逆变电流及 MPPT 的影响

由式(8)可知, 占空比 $D(n)$ 受采样电流 $I(n)$ 的影响, 且由于电流的采样位置会受到电磁干扰, 漏电流影响采样电流 $I(n)$ 的采样值, 进一步影响占空比 $D(n)$ 的大小。

假设在第 n 个采样点, 引入电流干扰量 $\Delta I(n)$, 使实际电流采样值为 $I(n) + \Delta I(n)$ 。则由式(8)可知, 逆变开关管占空比相对偏大。由无差拍电流控制原理可知, 逆变器开关管占空比决定开关管的导通时间, 影响逆变器输出电流和电压的波形。占空比相对偏大, 会造成逆变电流瞬间过大, 系统运行不稳定, 严重会造成并网失败。

由于光伏电池的输出功率是受日照强度和环境温度影响的非线性函数^[9]。因此, 为了最大限度地利用光伏电池产生的能量, 需要在光伏电池和负载之间串联 MPPT 电路^[10]。最常用的最大功率点跟踪方法有扰动观察法^[11]和电导增量法^[12]。基本原理是通过不停观察光伏阵列输出功率的大小以决定增大还是减小光伏阵列的输出电压达到最大功率跟踪。其输出功率可表示为 $P(n) = U(n) \cdot I(n)$ 。

设第 n 个采样点的采样电压、电流分别为 $U(n)$ 和 $I(n)$ 。受漏电流干扰, 引入的干扰电流为 $\Delta I(n)$, 实际采样电流为 $I'(n)$, 实际输入功率为 $P'(n)$ 。即

$$I'(n) = I(n) + \Delta I(n)$$

$$P'(n) = P(n) + \Delta I(n)U(n)$$

则有干扰电流对 MPPT 造成的影响可分为以下三种情况。

(1) $\Delta I(n)$ 非常小, $\Delta I(n)U(n) < P(n+1) - P'(n)$ 时, 对跟踪过程无影响。

(2) $\Delta I(n)$ 增加, 但 $\Delta I(n)U(n) > P(n+1) - P'(n)$ 时, 造成最大功率可能会误判。

(3) $\Delta I(n)$ 很大, 且 $\Delta I(n)U(n) > P(n+1) - P'(n)$ 时, 降低跟踪速率甚至找不到最大功率点。

3.2 基于无差拍控制的漏电流补偿方法

由式(8)可知, 逆变开关器件开断的占空比 $D(n)$ 由输出电流采样值 $I(n)$ 和参考电流 I^* 决定。漏电流干扰造成采样不准确, 用不准确的采样值作为反馈控制量进行计算得到控制量, 会使系统出现振荡, 逆变输出电流的谐波和直流分量变大, 则由漏电流带来的干扰更大, 对 MPPT 跟踪造成更大的影响。

为了消除漏电流对无差拍电流控制方法带来干扰电流的影响, 本文提出对占空比进行反馈电流补偿。原理图如图 4 所示, 其中 $\Delta D(n)$ 模块如图 3。

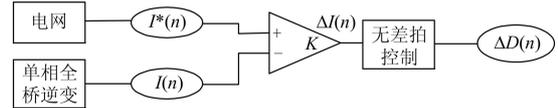


图 3 $\Delta D(n)$ 模块

Fig. 3 $\Delta D(n)$ modules

设某时刻采样电流 $I(n)$, 引入的干扰电流为 $\Delta I(n)$, 则经过无差拍并网控制器计算的占空比误差为 $\Delta D(n)$ 。由式(8)可得

$$\Delta D(n) = \frac{L \cdot \Delta I(n)}{T \cdot U_{pv}} \quad (9)$$

其中, $\Delta I(n) = k(I^*(n) - I(n))$, 且 k 是在实际调试过程中得到的补偿系数。

则补偿后的占空比为

$$D'(N) = \frac{\frac{L}{T}I^*(n+1) + (R - \frac{L}{T})I(n) + \frac{3}{2}U_g(n) - U_g(n-1)}{U_{pv}} + \frac{L \cdot [K(I^*(n) - I(n))]}{T \cdot U_{pv}}$$

对于三相光伏并网逆变电路而言, 由基尔霍夫定律得到三相系统逆变器的三个电压环路, 彼此并不独立, 相当于只有两个独立方程。由于逆变器开关上下桥臂的导通在一个控制周期内是对等的, 即可得到逆变器开关器件每个采样周期内的占空比

$D(n)$ ^[8]。并采用上述补偿方法进行各个补偿, 可得到补偿后的占空比。所以该补偿方法同样适用于三相逆变电路。

4 实验验证与分析

为了验证无差拍电流控制补偿方法的正确性, 本文在 Matlab/Simulink 仿真平台中搭建了基于无差拍控制的单相并网系统仿真模型, 其中包括光伏电池模块, MPPT 模块, PWM 模块, DC-DC 升压模块, 无差拍控制模块, 以及后端的逆变模块和滤波模块。电路原理图如图 4。

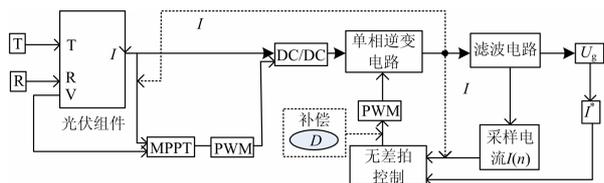


图 4 无差拍控制的单相并网系统仿真模型

Fig. 4 Dead-beat current control single-phase grid system simulation model

光伏电池经 DC/DC 升压模块, 使光伏阵列等效直流输出电压为 400 V。逆变模块中开关频率为 6 kHz, R 为 20 Ω , 滤波电感 5e-2 H。共模电容 C_{pv} 为 20 μF 。逆变电流仿真如图 5。

由图 5(a)所示, 当漏电流为 0 时, 逆变电流波

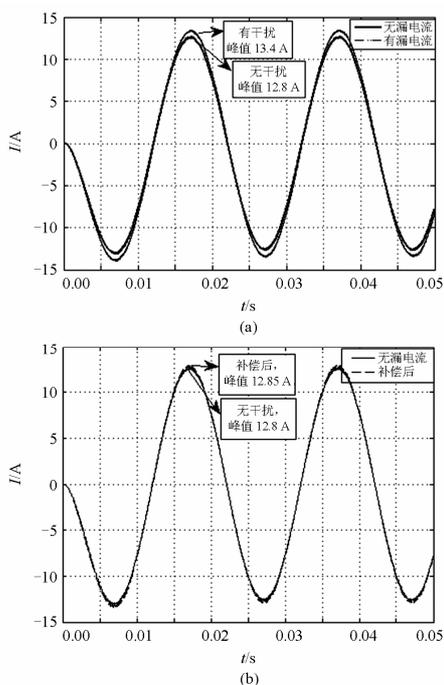


图 5 逆变电流波形

Fig. 5 Inverter current waveform

峰为 12.8 A。添加共模电容 C_{pv} 产生漏电流, 有干扰电流后, 逆变电流增加, 波峰增大为 13.4 A。且在实际电路中, 由于漏电流的大小不确定, 会使逆变电流瞬间不同程度的增大, 造成系统不稳定。

图 5(b)为补偿后的波形仿真图, 补偿后逆变电流波峰为 12.85 A, 漏电流对逆变电流的影响减小, 波形与无漏电流时几乎重合, 验证本文提出补偿占空比可以消除漏电流对逆变电流影响的正确性。

为了说明漏电流对 MPPT 的影响, 本文采用 QSM125-170X 电池板^[13], 在 Matlab/Simulink 仿真环境中设置 t 为 0.1 s 时, 温度不变(25 $^{\circ}\text{C}$), 光伏组件日照强度由 300 W/m^2 变为 1 000 W/m^2 。在同样的条件下, 无漏电流和不同大小的干扰电流时, 输出功率如图 6(a)。由图 6(a)知: 1)当寄生电容 C_{pv} (取 10 μF) 较小, 漏电流对采样电流的干扰 ΔI 小, 但满足第二种情况时, 造成最大功率的误判。若干扰电流比较恒定, 则实际的最大功率点小于光伏组件真实的最大功率点。2)当寄生电容 C_{pv} (取 10 μF) 较大, 漏电流对采样电流的干扰 ΔI 较大, 处于第三种情况下, 功率一直处于振荡状态, 找不到最大功率点。

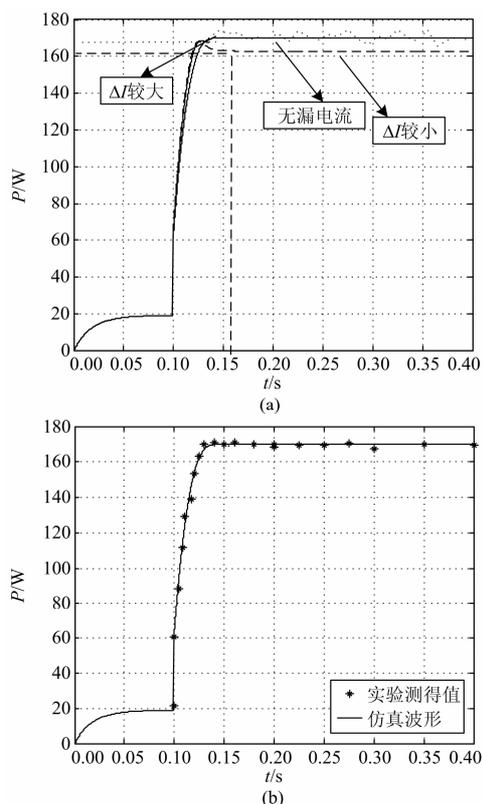


图 6 输出功率波形

Fig. 6 Output power waveform

表 1 实验测得功率数据

Table 1 Measured power data by experiment

$\begin{matrix} P \\ t \\ I_{cm} \end{matrix}$	0.10	0.105	0.11	0.115	0.12	0.125	0.13	0.135	0.14
1.75 mA	20.3	170	170	169.4	153.4	169.7	169.5	168.3	170
8.69 mA	152.8	169.9	170.1	170.1	152.8	169.5	169.7	169.5	169.9
0.15	0.16	0.18	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.35	0.4
169.4	170.1	170.1	169.7	169.5	169.5	170.1	167.3	170	169.5
170.1	169.8	169.5	169.5	169.8	169.7	170	169.5	169.3	170.1

为验证对占空比的补偿可以消除漏电流对 MPPT 影响的正确性, 本文以型号为 SM125-170X 的电池板搭建小功率实验平台, 并通过实验测得补偿占空比后电池板在跟踪过程的实验数据如表 1。分别令共模电容 C_{pv} 取 10 μ F, 10 nF。用灵敏电流表测得漏电流值分别为 1.75 mA 和 8.69 mA 时, 在跟踪过程的不同时刻的功率值。并取其多次测量的平均值与仿真实验对比如图 6(b)所示。由图 6(b)可知, 仿真结果和实验数据基本保持一致, 验证本文提出的通过补偿占空比, 可消除漏电流对逆变电流及 MPPT 的影响。

5 结论

本文通过对无差拍电流控制的单相光伏并网逆变电路漏电流的产生原因以及流通回路进行分析, 说明了漏电流的存在对逆变电流以及 MPPT 的影响, 且当漏电流产生的大小不同时, 对逆变电流和 MPPT 的影响也不同, 说明消除漏电流的重要性。并提出了一种通过补偿占空比, 消除漏电流影响的方法。最后通过 Matlab/Simulink 系统仿真和实验数据比较, 验证该方法可以有效地消除漏电流对逆变电流的影响, 且可以实现最大功率的准确跟踪。

参考文献

[1] 张耀明. 中国太阳能光伏发电产业的现状与前景[J]. 新能源与新材料, 2007(1): 1-6.
ZHANG Yao-ming. China's photovoltaic industry present situation and prospect[J]. New Energy and New Materials, 2007(1): 1-6.

[2] 张犁, 孙凯, 冯兰兰, 等. 非隔离全桥并网逆变器并联运行系统[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 21-27.
ZHANG Li, SUN Kai, FENG Lan-lan, et al. Parallel

operation of non-isolated full bridge inverters in grid-connected system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 21-27.

[3] 李练兵, 赵治国, 赵昭, 等. 基于复合控制算法的三相光伏并网逆变系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 44-47.
LI Lian-bing, ZHAO Zhi-guo, ZHAO Zhao, et al. Study on three-phase photovoltaic grid-connected inverter system based on compositive control[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 44-47.

[4] 戴训江, 晁勤. 光伏并网逆变器自适应电流滞环跟踪控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 25-30.
DAI Xun-jiang, CHAO Qin. Research of adaptive current hysteresis band track control for photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 25-30.

[5] 杨勇, 阮毅, 叶斌英, 等. 三相并网逆变器无差拍电流预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 40-46.
YANG Yong, RUAN Yi, YE Bin-ying, et al. Deadbeat predictive current control method for three-phase grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 40-46.

[6] 高吉磊, 黄先进, 林飞, 等. 基于重复观测器的 PWM 整流器无差拍控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 47-54.
GAO Ji-lei, HUANG Xian-jin, LIN Fei, et al. Deadbeat control strategy for PWM rectifiers based on repetitive observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 47-54.

- [7] TEODORESCU R, LISERRE M, RODRIGUEZ P. Grid converters for photovoltaic and wind power systems[M]. USA: John Wiley & Sons Inc. Ltd, 2011: 285-287.
- [8] 黄天富, 石新春, 魏德冰, 等. 基于电流无差拍控制的三相光伏并网逆变器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 36-41.
HUANG Tian-fu, SHI Xin-chun, WEI De-bing, et al. Study on three-phase photovoltaic grid-connected inverter based on current deadbeat control[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 36-41.
- [9] 郑必伟, 蔡逢煌, 王武. 一种单级光伏并网系统 MPPT 算法的分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 90-96.
ZHENG Bi-wei, CAI Feng-hua, WANG Wu. Analysis and research of MPPT algorithm for a single-stage PV grid-connected power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 90-96.
- [10] 杨水涛, 张帆, 丁新平, 等. 基于输入-输出参数的光伏电池[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 95-102.
YANG Shui-tao, ZHANG Fan, DING Xin-ping, et al. Comprehensive research on the photovoltaic maximum power point tracking based on input parameters or output parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 95-102.
- [11] FEMIA N, PETRONE G, SPAGNUOLO G, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2005, 20(4): 963-973.
- [12] LEE J H, BAE HS, CHO B H. Advanced incremental conductance MPPT algorithm with a variable step size[C] // Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International, Aug 30-Sept 1, 2006: 603-607.
- [13] 高金辉, 唐静. 一种新型光伏系统最大功率跟踪算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 21-29.
GAO Jin-hui, TANG Jing. A novel MPPT method for PV systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 21-29.

收稿日期: 2013-07-29; 修回日期: 2013-09-22

作者简介:

高金辉(1962-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事光伏发电系统相关技术的研究;

邢倩(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事光伏相关技术的研究。E-mail: xingqian8911@163.com