

# 光伏并网发电与电能质量调节统一控制系统

杨秋霞, 刘大鹏, 王海臣, 陈学琴

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 结合光伏并网系统与有源电力滤波器在控制结构和控制策略上的相似性, 研究了一种既能实现光伏并网发电又能实现电能质量调节的统一控制系统。对传统的光伏电池最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)方法进行了改进, 给出了流程图。针对统一控制系统特点, 在PI控制基础上, 提出了准PIR控制策略, 从理论上分析了其优势, 并给出了各参数的计算方法。在Matlab环境下, 搭建了系统的仿真模型, 仿真结果证明了该系统结构和控制策略的有效性。

**关键词:** 光伏并网; 电能质量; 最大功率跟踪; 准PIR控制

## A combined control approach for grid-connected photovoltaic and power quality regulatory systems

YANG Qiuxia, LIU Dapeng, WANG Haichen, CHEN Xueqin

(School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Considering the consistency in structures and control strategies of the grid-connected photovoltaic inverter and active power filter, a combined control system is proposed. This system can realize both grid-connected power generation and power quality regulation. One new method is proposed based on the traditional maximum power point tracking method, and the flow diagram is given. Based on the proportional-integral control strategy, a modified proportional-integral-resonant control strategy is applied to the combined control system, the advantage of strategy and the calculation method of parameters are given as well. At last, simulation models are built through Matlab, and results show that the structure and control strategy of the system are valid.

**Key words:** grid-connected photovoltaic; power quality; MPPT; modified PIR control

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)05-0069-06

## 0 引言

随着能源短缺与环境问题的日益严峻, 绿色可再生能源的研究与开发得到了国内外的广泛关注。太阳能因其取之不尽、用之不竭的特点而备受青睐<sup>[1-2]</sup>。然而, 光伏发电受天气变化影响, 具有间歇性和不确定性, 使得光伏并网系统对传统电网会产生一些不良影响, 给配电网带来各种扰动, 影响电能质量。另外, 随着越来越多的电力电子器件的使用以及大量非线性负载的存在, 使得电网中存在大量的谐波和无功成分, 影响了供电质量<sup>[3]</sup>。

传统的光伏并网发电系统的主要功能是完成光伏阵列的并网发电控制, 向电网注入有功。在谐波

抑制和无功补偿方面, 有源电力滤波器因其优秀的动态补偿效果备受关注<sup>[4-5]</sup>。分析比较光伏并网系统和有源电力滤波器可知, 两者在结构以及控制策略上有许多相似之处, 仅仅只是向电网提供的电能不同, 所以在理论上可以对两者进行统一控制。目前, 国内外已有相关研究<sup>[6-9]</sup>, 针对系统特点, 研究者给出了多种不同的控制策略, 但是, 在光伏电池MPPT<sup>[10]</sup>、逆变器并网控制<sup>[11]</sup>等方面仍然有很大的研究价值和发展空间。文献[8]中, 作者采用定时控制以克服滞环比较控制开关频率不固定的缺点, 但并网电流在过零点附近时仍会具有较大的滞环宽度, 增大了并网电流的谐波; 文献[9]提出的无差拍控制策略, 虽具有较高的跟踪精度, 但需要不断求取状态方程, 增加了系统的复杂度, 且不利于硬件实现。针对上述问题, 本文从系统控制策略入手, 结合工业中应用广泛的PI控制器, 提出了一种简单

基金项目: 秦皇岛市科学技术研究与发展计划项目(201001A086)

有效且易于实现的准 PIR 控制方式，同时提出了一种新的光伏电池 MPPT 方法，优化了跟踪过程。该统一控制系统通过实时监测光伏电池的输出电压和电流、电网电流以及负载电流，在实现光伏电池 MPPT 的同时，向电网注入有功功率，并实时补偿电网的谐波和无功电流，改善电网电流的波形。在 Matlab 环境下搭建系统模型，仿真结果证明了所研究的统一控制系统的正确性和有效性。

### 1 统一控制系统的建立

为了实现光伏并网发电与电能质量调节的双重目标，设计的统一控制系统应当能够实现：光伏阵列 MPPT，提高光伏电池输出效率，向电网注入有功；提升并稳定直流侧电压，使其符合并网要求；实时检测并补偿电网谐波和无功电流，改善电网电能质量。光伏并网发电与电能质量调节统一控制系统的结构如图 1 所示。

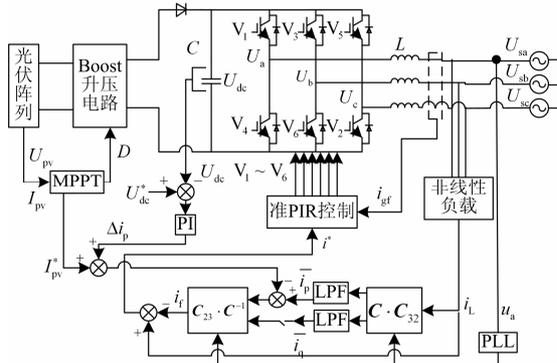


图 1 统一控制系统结构图

Fig. 1 Structure of the combined control system

其基本工作原理是：最大功率跟踪控制单元完成对光伏电池最大功率点工作电压  $U_{pv}$  和电流  $I_{pv}$  的计算，使光伏阵列工作在最大功率点，同时得到并网有功电流指令  $I_{pv}^*$ 。Boost 升压电路实现对光伏阵列输出电压的提升，提升后的电压为  $U_{dc}$ 。直流侧稳定控制则是通过采样直流侧电压的实际值  $U_{dc}$  与给定值  $U_{dc}^*$  相比较，经 PI 调节器得到调节信号  $\Delta i_p$ ，与光伏阵列有功电流指令  $I_{pv}^*$  一起叠加到检测出的负载有功电流的直流分量  $\bar{i}_p$  上。PLL 锁相环，实时跟踪电网电压相位。基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测单元，完成负载无功和谐波电流的检测以及复合指令信号的计算。指令信号的合成可用式(1)表达。

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} - C_{23} \cdot C^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{i}_p - I_{pv}^* - \Delta i_p \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$ 、 $i_{Lc}$  为负载电流； $C_{23}$ 、 $C^{-1}$  为坐标变换矩阵。

经过指令信号合成运算后，指令信号  $i^*$  中就包含了光伏阵列并网有功电流、直流侧电压稳定所需的调节信号以及负载侧电流中的谐波和无功电流分量。准 PIR 控制器按照指令信号，控制光伏并网逆变器产生无差电流  $i_{gf}$  注入电网，最终实现光伏并网与电能质量调节的双重目标。

### 2 光伏电池 MPPT

对于两级式光伏并网系统<sup>[12]</sup>，光伏电池 MPPT 一般通过前级 Boost 电路实现<sup>[13-14]</sup>，其基本控制原理为

$$R' = (1 - D)^2 R_L \quad (2)$$

即在 Boost 电路负载阻抗一定的前提下，通过扰动高频开关的占空比，调整光伏电池的等效负载阻抗，使光伏电池的工作点逐渐接近最大功率点，并最终完成 MPPT 控制，如图 2 所示。

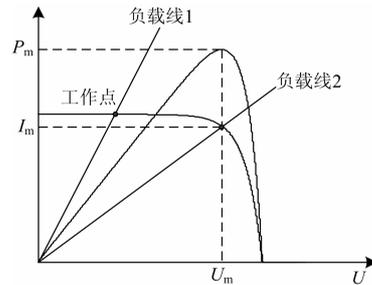


图 2 MPPT 原理

Fig. 2 Principle of the MPPT

本文在传统电导增量法<sup>[15]</sup>的基础上，获得一种占空比扰动式变步长 MPPT 控制方法，通过算法求取扰动量  $\alpha$ ，再与三角波比较产生占空比  $D$ ，如图 3 所示。

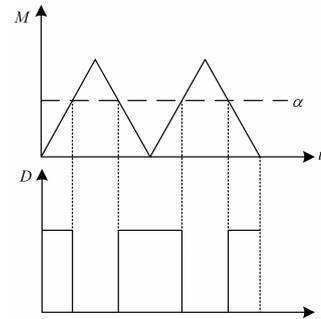


图 3 占空比产生原理

Fig. 3 Principle of the duty cycle

该方法将传统电导增量法中判断光伏电池工作区间的判据

$$I/U + dI/dU$$

改为

$$\Delta U(U \cdot \Delta I + I \cdot \Delta U)$$

即在新的算法中, 将原来较为复杂的除法及微分运算过程, 简化为相对简单的乘法运算, 更有利于硬件实现。新方法简化了运算过程, 从而加快了 MPPT 的跟踪速度。该方法通过判断括号内外两部分的正负关系, 即可求取光伏电池的工作区间, 进而确定扰动方向, 且在不同的区间内采用不同的扰动步长, 以提高 MPPT 跟踪精度。算法流程如图 4 所示。

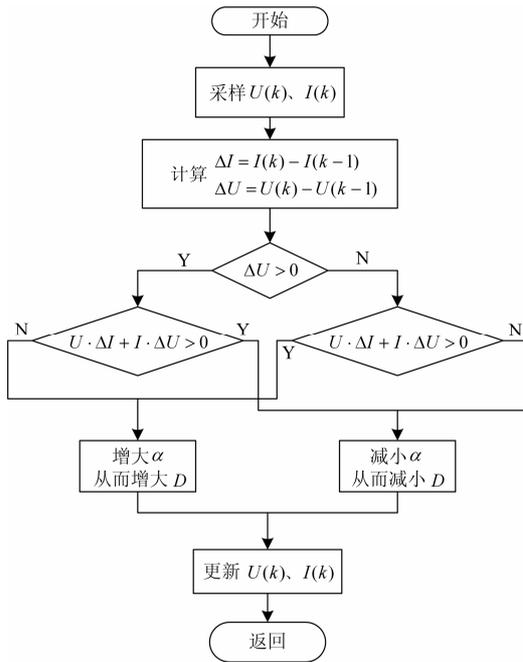


图 4 MPPT 流程图

Fig. 4 Flow diagram of the MPPT

设置光伏电池参数为: 短路电流  $I_{sc} = 5 \text{ A}$ , 开路电压  $U_{oc} = 53 \text{ V}$ , 最大功率点电流  $I_m = 4.5 \text{ A}$ , 最大功率点电压  $U_m = 44.4 \text{ V}$ , 参考光照强度  $S_r = 1000 \text{ W/m}^2$ , 参考环境温度  $T_r = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在 Matlab 环境下对提出的 MPPT 算法进行仿真, 0.1 s 时将光照强度由  $1000 \text{ W/m}^2$  降为  $600 \text{ W/m}^2$ , 得到光伏电池输出电流和输出电压波形图如图 5 所示。仿真结果证明了所提算法的可行性和有效性。

### 3 准 PIR 控制

传统的 PI 控制器对直流量具有无穷大增益,

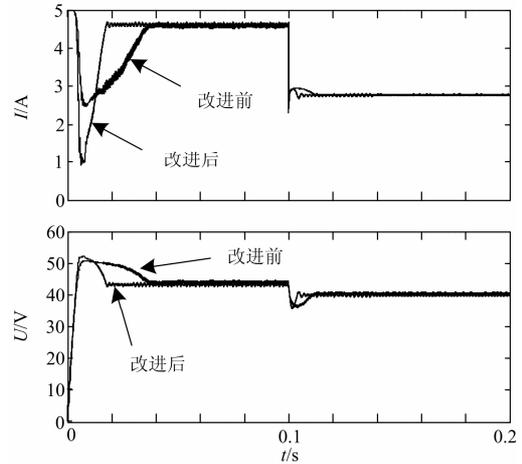


图 5 MPPT 仿真波形图

Fig. 5 Simulation results of the MPPT

因而能够实现对直流量的无静差控制。对于交流量, PI 控制器在频率  $\omega$  处的增益为

$$\sqrt{K_p^2 + \left(\frac{K_I}{\omega}\right)^2}$$

增益值有限, 不能实现无静差控制。

本文在 PI 控制器基础上, 引入准谐振控制器<sup>[16]</sup>, 构成准 PIR 控制, 表达式为

$$G_{PIR}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + \sum_{n \in 6k \pm 1} \frac{K_R \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (n\omega)^2} \quad (3)$$

式中:  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_R$  分别为比例、积分、谐振系数;  $\omega_c$  为剪切频率, 一般取值为 5~15;  $n$  为谐波次数。

该控制器不但具有 PI 控制器良好的稳定性, 还兼有谐振控制器良好的动静态特性。且不需要经过复杂的坐标变换将交流量变换为直流量, 在两相垂直静止坐标系下即可实现对交流量的无静差控制。经电网电压前馈补偿<sup>[17]</sup>后, 电流环的控制结构图如图 6。

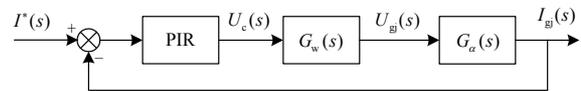


图 6 电流环控制结构图

Fig. 6 Structure of the current loop control

图中,  $G_w(s)$  为逆变器等效传递函数;  $G_\alpha(s)$  为滤波器传递函数。表达式分别为

$$G_w(s) = \frac{k_w}{\tau_w s + 1}, \quad G_\alpha(s) = \frac{1}{Ls + R} \quad (4)$$

式中:  $k_w$ 、 $\tau_w$  分别为逆变器的增益及时间常数;  $L$  为滤波器电感;  $R$  为主回路等效电阻。

本文求取电流环中各控制参数时，首先采用 PI 控制器将电流闭环校正成典型二阶系统，加快电流的跟随速度。二阶系统闭环传递函数的一般形式为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

式中： $\zeta$  为系统阻尼比； $\omega_n$  为系统无阻尼自然振荡角频率。

为消除滤波器时间常数对逆变主回路的影响，令  $K_p/K_i = L/R$ ，经 PI 校正后系统的闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_1 k_w}{R\tau_w} \frac{1}{s^2 + \frac{1}{\tau_w}s + \frac{K_1 k_w}{R\tau_w}} \quad (6)$$

式(5)、式(6)两式对应项相等，按照二阶系统最优控制的整定原则，代入系统各参数后，求得  $K_p = 0.114$ 、 $K_i = 2.27$ 。随后，通过仿真获取与 PI 控制器参数相匹配的  $K_R$  值，本文取  $K_R = 2$ 。

本文设计的统一控制系统只补偿系统中含量较大的 5、7 次谐波。从系统开环 Bode 图(图 7(a))

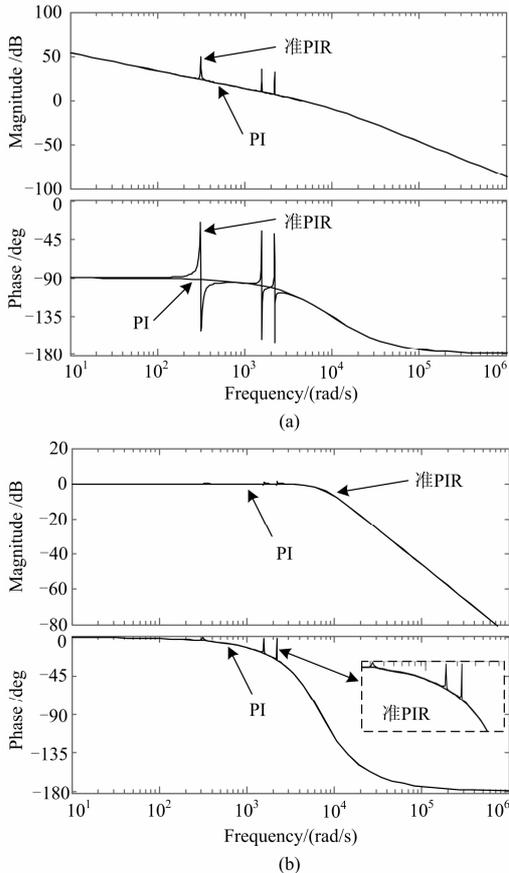


图 7 Bode 图

Fig. 7 Bode diagram

中可以看出，加入准谐振控制后系统在基波、5 次及 7 次谐波处，幅频特性明显增大，在一定条件下，可视为无穷大；相频特性发生跳变，从系统闭环 Bode 图(图 7(b))中可以更加清楚地看到，准 PIR 控制使输出信号的相位滞后值明显减小，原则上可以实现零相位差。

#### 4 统一控制系统仿真分析

在 Matlab 环境下，对本文设计的统一控制系统进行仿真。仿真模型中，光伏电池采用上文所述电池的 10 串 10 并模型，最大输出功率约为 20 kW；电网电压为 380 V、50 Hz；采用带电阻负载的不可控整流电路模拟电网中谐波的产生， $R=5\Omega$ ；采用阻感负载模拟电网中有功和无功的产生， $P=50\text{ kW}$ 、 $Q=51\text{ kvar}$ 。

(1) 系统并网发电的同时，进行电能质量调节。仿真中同时包含上述两种负载，0.08 s 时投入统一控制系统，仿真波形如图 8(a)所示。

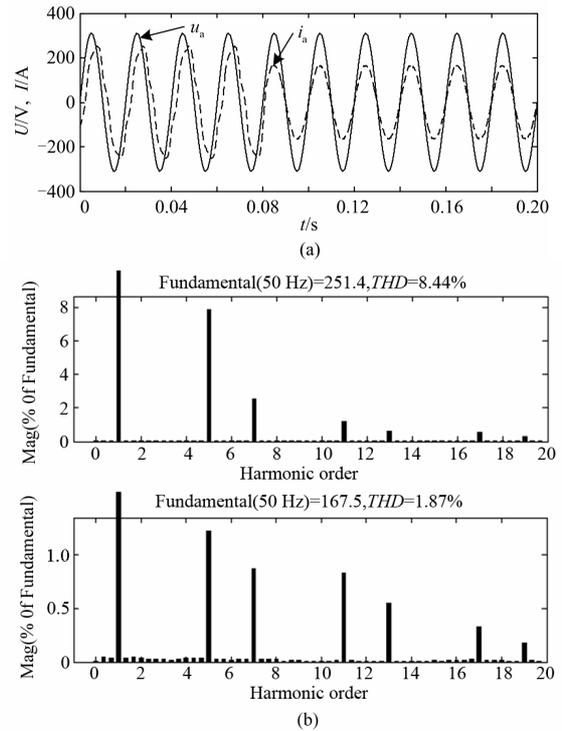


图 8 统一控制系统仿真波形图

Fig. 8 Simulation results of the combined control system

由仿真结果可知，0.08 s 之前，因谐波及无功的存在，电网中的电流发生了一定的畸变，并且滞后于电网电压；0.08 s 之后，统一控制系统发挥电能质量调节作用，电流波形明显改善，且电流与电压同相运行。对 A 相电流进行 FFT 分析，如图 8(b)所示。从分析结果可以看出，由于光伏阵列的存在，电网向负载注入的有功电流的幅值，由 251.4 A 减

小为 167.5 A, 系统中 5 次及 7 次谐波的含量也明显降低。仿真证明本文设计的系统达到了预期的效果。

(2) 系统作有源电力滤波器运行。考虑到光伏电池对太阳光的依赖性, 夜间运行时, 将系统中的光伏阵列切除, 系统此时作有源电力滤波器使用, 仿真结果如图 9 所示, 可以看出, 系统进行谐波抑制和无功补偿的效果非常明显。

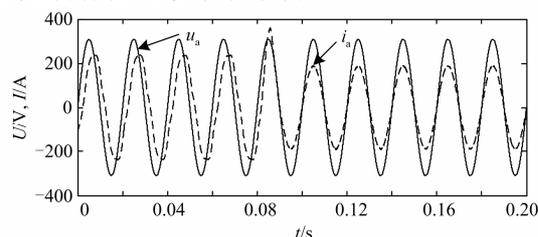


图 9 有源电力滤波器仿真波形图

Fig. 9 Simulation results of the active power filter

## 5 结论

本文研究了一种既能实现并网发电又能进行电能质量调节的统一控制系统。针对系统中各模块的特点, 从控制策略入手, 对传统电导增量法的判据进行了优化, 使运算更加简单、高效; 在 PI 控制基础上, 引入准谐振控制方式, 新控制器兼有二者的优势。通过 Matlab 仿真软件对系统进行仿真分析, 给出了仿真波形, 仿真结果实现了光伏并网发电与电能质量调节的双重目标。

## 参考文献

- [1] 许洪华. 中国光伏发电技术发展研究[J]. 电网技术, 2007, 31(20): 77-81.  
XU Honghua. The study on development of PV technology in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(20): 77-81.
- [2] 周林, 曾意, 郭珂, 等. 具有电能质量调节功能的光伏并网系统研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 137-145.  
ZHOU Lin, ZENG Yi, GUO Ke, et al. Development of photovoltaic grid-connected system with power quality regulatory function[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 137-145.
- [3] 宁志毫, 罗隆福, 李勇, 等. 大功率整流系统谐波功率特性及其对电能计量的影响和节能分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 248-255.  
NING Zhihao, LUO Longfu, LI Yong, et al. Analysis of energy saving and harmonic power characteristics and its effects on electric energy measurement in high power rectifier system[J]. Transactions of China

- Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 248-255.
- [4] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] 于晶荣, 栗梅, 孙尧. 有源电力滤波器的改进重复控制及其优化设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 235-242.  
YU Jingrong, SU Mei, SUN Yao. Improved repetitive control and its optimization for active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 253-242.
- [6] WU T F, NIEN H S, SHEN C L, et al. A single-phase inverter system for PV power injection and active power filtering with nonlinear inductor consideration[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2005, 41(4): 1075-1083.
- [7] HAN B, BAE B, KIM H, et al. Combined operation of unified power quality conditioner with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 330-338.
- [8] 张国荣, 张铁良, 丁明, 等. 光伏并网发电与有源电力滤波器的统一控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 61-66.  
ZHANG Guorong, ZHANG Tieliang, DING Ming, et al. Combined control of active power filter and PV grid-connected generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 61-66.
- [9] 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 Tianfu, SHI Xinchun, WEI Debing, 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.
- [10] 高志强, 王建曠, 纪延超, 等. 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, WANG Jianze, JI Yanchao, et al. A fast method of maximum power point tracking for PV[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 105-109.
- [11] 刘波, 杨旭, 孔繁麟, 等. 三相光伏并网逆变器控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 64-70.  
LIU Bo, YANG Xu, KONG Fanlin, et al. Control strategy study for three phase photovoltaic grid-connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 64-70.

- [12] 曾斌, 徐红兵, 陈凯, 等. 两级式光伏并网逆变器母线电压稳定算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 30-35.  
ZENG Bin, XU Hongbing, CHEN Kai, et al. Algorithm research on the stability control of bus voltage in two-stage photovoltaic inverter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 30-35.
- [13] 赵宏, 潘俊民. 基于 Boost 电路的光伏电池最大功率点跟踪系统[J]. 电力电子技术, 2004, 38(3): 55-57.  
ZHAO Hong, PAN Junmin. Photovoltaic maximum power point tracking system using Boost converter[J]. Power Electronics, 2004, 38(3): 55-57.
- [14] 李京, 胡仁杰. 光伏电池在 Boost 电路中的最大功率跟踪[J]. 电气技术, 2013(4): 21-24.  
LI Jing, HU Renjie. Maximum power point tracking of photovoltaic cell in boost circuit[J]. Electrical Technology, 2013(4): 21-24.
- [15] 郭勇, 孙超, 陈新. 光伏系统中最大功率点跟踪方法的研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(11): 21-23.  
GUO Yong, SUN Chao, CHEN Xin. Research on maximum power point tracking method for photovoltaic system[J]. Power Electronics, 2009, 43(11): 21-23.
- [16] 胡巨, 赵兵, 王俊, 等. 三相光伏并网逆变器准比例谐振控制器设计[J]. 可再生能源, 2014, 32(2): 152-157.  
HU Ju, ZHAO Bing, WANG Jun, et al. Design for quasi proportional resonant controller of three-phase photovoltaic grid connected inverter[J]. Renewable Energy Resource, 2014, 32(2): 152-157.
- [17] 马琳, 金新民, 唐芬, 等. 三相并网逆变器比例谐振控制及其网压前馈问题分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 56-63.  
MA Lin, JIN Xinmin, TANG Fen, et al. Analysis of three-phase grid-connected inverter proportional resonant control and grid voltage feed-forward[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 56-63.

收稿日期: 2014-05-25

作者简介:

杨秋霞(1972-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为逆变器并网控制、电力系统控制; E-mail: yangqx\_fly@163.com

刘大鹏(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏并网发电与电能质量改善; E-mail: ldpeng0424@163.com

王海臣(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏发电最大功率跟踪控制。

(编辑 周金梅)