

DOI: 10.7667/PSPC160594

基于 PI 与准 PR 联合控制的光伏并网电流优化

王秀云¹, 毛瑞鹏¹, 田璧源¹, 黄靖丽²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 吉化集团信息技术有限公司, 吉林 吉林 132000)

摘要: 针对光伏并网逆变器在采用传统比例积分(PI)控制器时不能实现无静差跟踪和并网电流逆变器直流分量注入问题, 提出 PI 与准 PR 联合控制的光伏并网电流优化策略。在介绍了 PI 与准 PR 联合控制的原理的基础上, 详细分析了准 PR 控制的原理和算法实现。准 PR 控制能够实现无静差跟踪, PI 与准 PR 联合控制实现了直流的抑制。采用 Matlab/Simulink 进行仿真研究, 结果表明能够对并网电流的无静差控制, 消除了单一 PI 控制所产生的相位误差, 抑制了直流分量, 并且具有良好的并网波形质量。

关键词: 光伏并网; 逆变器; 联合控制; 电流控制; 准 PR 控制; 无静差控制

Optimal control of photovoltaic grid-connected current based on PI and quasi-PR control

WANG Xiuyun¹, MAO Ruipeng¹, TIAN Biyuan¹, HUANG Jingli²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;
2. Jihua Group Information Network Technology Co., Ltd., Jilin 132000, China)

Abstract: Photovoltaic (PV) grid inverter can't achieve static-error-free track while using conventional proportional integral (PI) and DC component of the current injection problem of grid inverter, for which, PI and quasi-proportional resonant (PR) control strategy of PV grid current optimization is proposed. The fundamentals of PI and quasi-PR controllers are introduced, and the principle and algorithm of quasi-PR are analyzed. Quasi-PR control can achieve static-error-free tracking, and PI and quasi-PR control strategy can suppress the DC component. Results of simulative study with MATLAB/Simulink show that, the static-error-free control of grid-connected current is realized, the phase error introduced by single PI controller is eliminated, the DC component is suppressed, and the excellent grid-connected waveform is achieved.

Key words: photovoltaic grid-connection; inverters; integrated control; electric current control; quasi-PR control; static-error-free control

0 引言

能源作为人类文明发展的重要推动力, 一直备受人们关注。太阳能光伏发电是太阳能利用的一种重要形式, 由于其不受能源资源原材料和应用环境的限制, 具有最广阔的发展前景。由光伏阵列、并网逆变器、交流滤波和电网组成了光伏并网系统。并网逆变器作为其核心组成部分, 其性能不仅是影响和决定整个光伏系统是否能够稳定、安全、可靠、高效的运行, 同时也是影响整个系统使用寿命的主要因素^[1-2]。早期关于光伏并网逆变器的研究主要是基于 L 滤波下的, 但是与 L 滤波相比之下, LCL 滤波作为三阶的滤波器能够在高频段使得谐波以 60 dB/s 速度衰减, 因此选取较小的电感就能达到 L

滤波器的效果, 这样减少了系统的体积与重量, 降低了系统成本, 所以在实践中被广泛采用。但由于 LCL 型滤波器是三阶系统, 该结构决定了它本身会产生谐振, 其设计方法也比较复杂, 目前还无法得到一个统一的方案。针对其入网电流控制技术是近些年的研究热点^[3-5]。

在单相光伏并网逆变系统中, 比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制器通常被应用于并网电流内环控制上。但该调节器难以实现零稳态误差。虽然采用调节比例增益和时间积分常数可以大幅提高基波增益, 来减小误差, 但是实际中上述的两个参数受系统稳定性的约束^[6-8]。为了解决这一问题, 提出了比例谐振调节 (Proportional Resonant, PR) 控制, 由于 PR 调节器其在基波频率处所呈现出高增

益的特性, 所以其在单相及三相静止坐标系下均可实现无差跟踪^[9-10]。

目前国内关于光伏并网电流控制已有初步研究。文献[11]提出了一种基于比例谐振 PR 控制的 H6 拓扑单相光伏并网逆变器的控制策略。通过利用 PR 控制器的谐振来增大对所控信号特定频率的增益, 从而达到消除 PI 控制器在跟踪正弦电流信号时所产生的稳态误差, 实现了对电流的无静差跟踪。但是不便实现有功和无功功率的独立控制。而且在实际应用中, 因为一些电力电子器件和数字控制器自身的限制, 使得 PR 控制器的实现存在一定程度的困难。文献[12]给出了一种基于 PR 与 PI 联合控制策略的直流注入抑制技术, 其能有效地抑制光伏发电系统注入电网的直流分量, 但是对其他次谐波抑制效果不明显, 而且电流总谐波畸变率较大。文献[13]提出了一种模糊准 PR 控制技术, 将模糊控制理论与准 PR 控制相结合, 理论上可实现较为理想的跟踪电网电流, 但是其跟踪效果非常依靠模糊控制经验参数和依赖设备的检测元件的精度。在实际过程中并未达成理想状态。为了解决上述问题, 本文提出了基于 PI 与准 PR 联合控制的光伏并网电流优化该方法, 提高了电流的控制能力和抗干扰性, 降低了电流总谐波畸变率, 抑制了注入直流分量。仿真结果验证了算法的有效性。

1 单相光伏并网拓扑结构

单相光伏并网拓扑结构如图 1 所示, PV 是光伏阵列, DC/DC 环节为最大功率点跟踪(MPPT)和 Boost 升压电路, $V_{T1} \sim V_{T2}$ 是逆变器的 IGBT, 电感 L_1 、 L_2 , 电容 C 构成 LCL 滤波器, 电容串联电阻 R , 直流电压通过逆变器逆变为交流电压 U_i , 通过滤波器并网, U_g 为电网电压。通过调节逆变器的输出电流使得 U_i 与 U_g 达到同频率同相位。

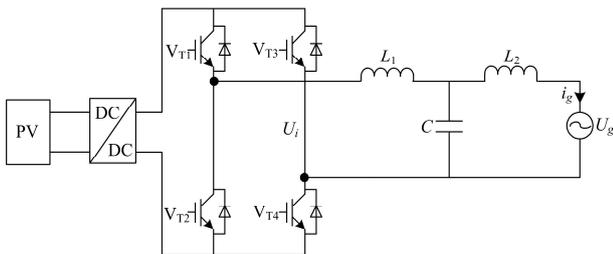


图 1 单相光伏并网拓扑结构图

Fig. 1 Single-phase photovoltaic-grid topology

根据其拓扑结构可知输入电压对输出电流的传递特性为

$$\frac{I_g(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2) s} \quad (1)$$

2 单相并网逆变系统控制策略

2.1 PI、PR 和准 PR 控制器原理

PI 控制器的传递函数为

$$G_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (2)$$

其在电网基波频率处的增益为

$$|G_{PI}(j\omega_0)| = \sqrt{k_p^2 + \left(\frac{k_i}{\omega_0}\right)^2} \quad (3)$$

由表达式(3)知 PI 作为线性控制在基波频率其为有限值, 电流 PI 调节具有改善系统的幅频特性和稳态性能的优点, 但其不足也很明显, 主要表现为电流环无法实现无静差控制, 影响网侧电流的品质, 且当输出滤波电容较大时, 系统易发生振荡, 抗干扰能力弱^[14-15]。

与 PI 控制器不同, PR 控制器的传递函数为

$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{2k_r s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (4)$$

式中, ω_0 为工频。

从数学的角度来分析, PR 控制器相比于 PI 控制器来说, 其在函数相当于在 $j\omega$ 轴上加入了两个闭环极点, 通过给定的信号的极点在谐振频率处得到较大的增益。从而使 PR 控制器可以无差跟踪 50 Hz 的正弦信号, 消除了稳态误差和电网基频对并网电流的影响。基于以上特性使 PR 控制器被广泛应用于电流控制中。

在实际应用中由于硬件与控制系统精度的有限性, 使得 PR 控制器谐振频率无法达到理想的谐振频率, 其在谐振频率处的增益也较低, 而且无法实现有功和无功功率的独立控制。目前普遍应用准 PR 控制器, 其减小了电网频率偏移对并网电流的影响, 增加了系统的带宽, 对于高次谐波的滤除也更明显。也较容易实现, 其传递函数:

$$G(s) = k_p + \frac{2k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (5)$$

PR 控制器参数: $k_p = 1$, $k_r = 100$, $\omega_0 = 2 \times 50 \times \pi$ 。对于准 PR 控制器 $\omega_c = 5$, 其余参数与 PR 控制器相同, 两种控制器伯德图如图 2 所示。

从图中可以看出准 PR 与 PR 有相似的频率特性, 两者在 50 Hz 处的相位都是 0, 因此能消除稳态误差。但准 PR 在 50 Hz 处增益小于 PR 控制器, 但在 50 Hz 附近比 PR 控制器大的多。

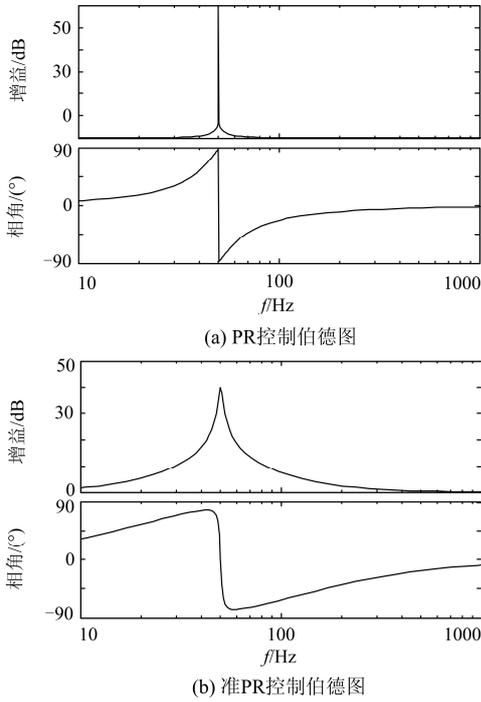


图 2 PR 与准 PR 控制器的频率特性比较
Fig. 2 Comparison of frequency response PR with quasi-PR controllers

2.2 准 PR 控制器参数的设计与算法的实现

根据文献[16]的分析, 准 PR 控制器的 3 个控制参数 k_p , k_r 和 ω_c 对系统的控制性能的影响可知: 根据系统的截止频率的带宽来确定 ω_c , 根据系统所需的峰值增益的大小来确定 k_r , 根据系统对比例增益的要求来确定最佳 k_p 。最后, 设定 $\omega_c = 10$, $k_r = 100$, $k_p = 4$, 得到准 PR 的伯德图如图 3 所示。

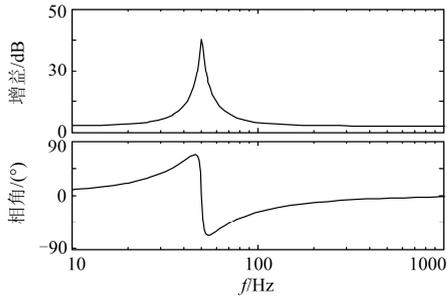


图 3 准 PR 控制器的伯德图
Fig. 3 Quasi-PR controller Bode diagram

由上文可知, 准 PR 控制器的传递函数形式为

$$G(s) = k_p + \frac{2k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (6)$$

式中, $s/s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2$ 部分可以分解为 3 个简单积

分的组合, 如式(7)所示。

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \Rightarrow \begin{cases} y(s) = \frac{1}{s}[u(s) - v(s) - w(s)] \\ v(s) = \frac{1}{s}\omega_0^2 y(s) \\ w(s) = 2\omega_c y(s) \end{cases} \quad (7)$$

利用离散信号实现上式的过程如式(8)所示, T_s 为采样周期。

$$\begin{cases} y_k = y_{k-1} + T_s[u_{k-1} - v_{k-1} - w_{k-1}] \\ v_k = v_{k-1} + T_s\omega_0^2 y_k \\ w_k = w_{k-1} + 2\omega_c y_k \end{cases} \quad (8)$$

整个准 PR 控制的算法实现结构图如图 4 所示, 其中虚线部分表示上面所分析的准 PR 控制部分。

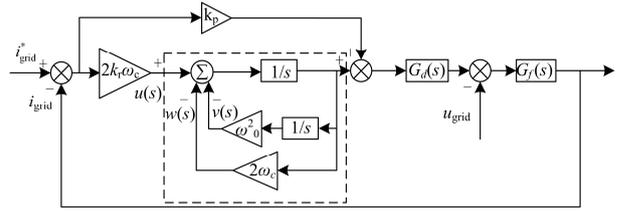


图 4 准 PR 控制算法控制框图
Fig. 4 Quasi-PR control algorithm

3 PI 与准 PR 联合控制策略的电流优化的原理分析

单环控制自身存在一些缺陷, 诸如系统响应速度慢, 容易导致系统的不稳定, 所以一般采用双环控制, 电流内环能提高系统的响应速度, 电压外环增加控制系统的稳定性。通过电流控制环节 (Automatic Current Regulator, ACR) 来实现电流的跟踪控制和电量的转换。将 ACR 采用准 PR 控制器代替, 用增益 K_{PWM} 近似代替 PWM 换流器, 得到电流内环的控制模型。

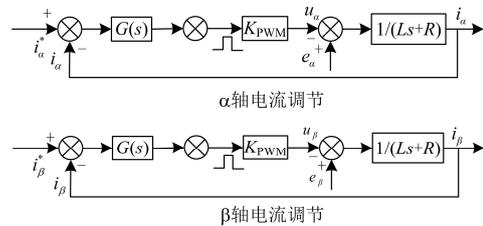


图 5 准 PR 控制的电流内环控制框图
Fig. 5 Current loop control diagram of PR control

由图 5 可以推出准 PR 控制的电流表达式为

$$\begin{cases} i_{\alpha}(s) = \frac{G(s)K_{P\text{PWM}}i_{\alpha}^*(s) - e_{\alpha}(s)}{G(s)K_{P\text{PWM}} - (Ls + R)} \\ i_{\beta}(s) = \frac{G(s)K_{P\text{PWM}}i_{\beta}^*(s) - e_{\beta}(s)}{G(s)K_{P\text{PWM}} - (Ls + R)} \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)变换成分子为“1”的表达式为

$$\begin{cases} i_{\alpha}(s) = \frac{i_{\alpha}^*(s)}{1 - \frac{Ls + R}{G(s)K_{P\text{PWM}}}} - \frac{e_{\alpha}(s)}{G(s)K_{P\text{PWM}} - (Ls + R)} \\ i_{\beta}(s) = \frac{i_{\beta}^*(s)}{1 - \frac{Ls + R}{G(s)K_{P\text{PWM}}}} - \frac{e_{\beta}(s)}{G(s)K_{P\text{PWM}} - (Ls + R)} \end{cases} \quad (10)$$

令

$$\begin{cases} \lambda_1(s) = (1 - \frac{Ls + R}{G(s)K_{P\text{PWM}}})^{-1} \\ \lambda_2(s) = (G(s)K_{P\text{PWM}} - (Ls + R))^{-1} \end{cases} \quad (11)$$

分析表达式(11)知, 当 $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0$ 时可以实现电流的无静差跟踪, 这需要在频率 ω_0 处控制器的增益无穷大。根据其在基波上的增益知, 当谐振频率等于电网频率时, 准 PR 控制器可以实现对输入电网的交流电流的无静差调节。

针对输出电流表达式的分析可知在网侧电流存在直流分量, 电力系统不允许将含有较大输出直流分量逆变器连接到电网上, 因为直流分量的存在会使变压器工作点偏移, 增加电网电缆的腐蚀, 增加谐波分量等缺点。针对 PI 控制器可实现对直流分量的无静差调节, 将其与准 PR 控制结合设计出带有抑制直流的控制器。其控制流程如图 6 所示。

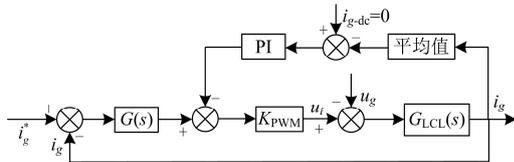


图 6 PI 与准 PR 联合控制的电流内环控制框图

Fig. 6 Block diagram of the current inner loop by quasi-PR & PI control

4 仿真实验与分析

为了验证 PI 与准 PR 联合控制算法能够实现电网的无静差控制, 本文搭建了基于准 PR 与 PI 联合控制的光伏逆变器的 Matlab/Simulink 仿真模型, 仿真参数如下: Boost 升压后的直流母线输入的电压为 600 V, 并网电压为 220 V, 电网频率为 50 Hz, 滤波电感为 2.5 mH 与 0.12 mH, 电容为 3 μ F, 倍频 SPWM 方式, 开关频率为 20 kHz; PI 控制器参数为:

$k_{p1} = 50$, $k_{i1} = 0.2$; 准 PR 控制参数为: $k_{p2} = 0.05$, $\omega_c = 10$, $k_r = 3$, 其中 k_p 与 k_r 的取值综合考虑系统所需增益及稳态性能, ω_c 则由频率波动而定。

如图 7 所示为 PI 与准 PR 联合控制下的电流波形图, 一个周期后处于稳态是可以看出电流与电压之间没有相位误差, 并网电流能够很好地跟踪电压, 逆变输出的电流非常稳定, 实现了无静差跟踪。

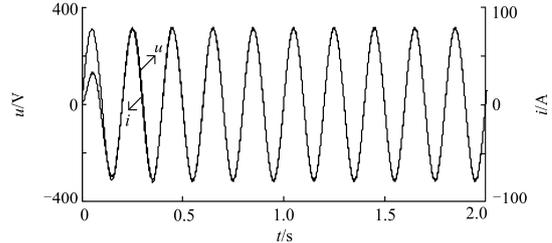


图 7 采用 PI 与准 PR 控制时并网电流图

Fig. 7 Grid-connected current with PI and quasi-PR controllers

图 8 为采用 PI 控制同 PI 与准 PR 联合控制两种算法下并网电流的谐波柱状图, 显然采用后者方法的电流总谐波畸变率比前者的减少了 0.18%, 即采用准 PR 与 PI 联合控制时, 其拥有更好的电流品质。而且从图中可以看出采用 PI 与准 PR 联合控制是并网逆变器的输出电流中不含直流分量, 拥有更好的电流质量。

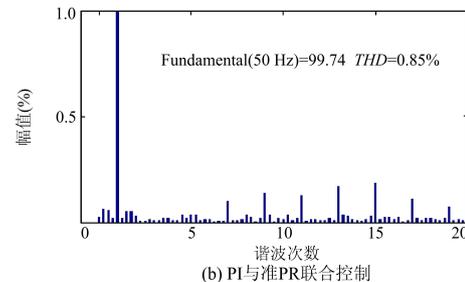
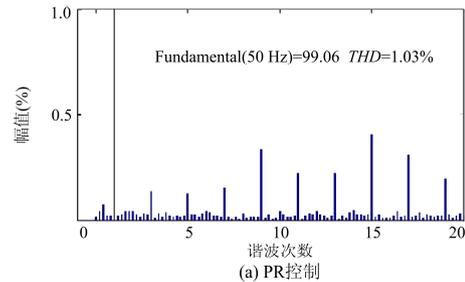


图 8 两种控制算法下的并网电流的谐波

Fig. 8 Harmonics of grid-connected current for two control strategies

5 结论

随着光伏发电不断发展, 单个光伏发电的容量与整个电网接纳光伏发电容量的不断增加, 对并网电流的要求也不断加大。本文在分析 PR 与准 PR 控

制的基础上, 提出了一种基于 PI 与准 PR 联合控制的并网电流优化算法, 通过仿真实验的结果验证了 PI 与准 PR 联合控制不仅能够实现电网电流的无静差跟踪而且可以实现并网逆变器零直流的注入, 具有很好的并网电流质量和较高的转换效率, 有一定的工程应用前景。

参考文献

- [1] 赵爽, 刘飞, 孙建军, 等. 基于改进 PR 控制器的新能源并网检测平台设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 118-125.
ZHAO Shuang, LIU Fei, SUN Jianjun, et al. Parameter design of testing platform for new energy grid connected devices based on improved PR controller[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 118-125.
- [2] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [3] 易映萍, 罗海, 胡四全. 小功率光伏并网逆变器控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 64-68.
YI Yingping, LUO Hai, HU Siqian. Study on control scheme based on low-power photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 64-68.
- [4] 黄挚雄, 徐保友, 沈玲菲. LCL 并网逆变器新型电流双闭环控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 1-5.
HUANG Zhixiong, XU Baoyou, SHEN Lingfei. New current double closed loop control strategy of LCL grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 1-5.
- [5] 许津铭, 谢少军, 张斌锋. 分布式发电系统中 LCL 滤波并网逆变器电流控制研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4153-4166.
XU Jinming, XIE Shaojun, ZHANG Binpeng. Overview of current control techniques for grid-connected inverters with LCL filters in distributed power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4153-4166.
- [6] 刘鸿鹏, 王卫, 吴辉. 光伏逆变器的调制方式分析与直流分量抑制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 27-32.
LIU Hongpeng, WANG Wei, WU Hui. Modulation mode analysis and suppressing DC current of PV inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9): 27-32.
- [7] 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.
- [8] HAO Z, YAO Z, LI S, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnicki Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.
- [9] 曾正, 杨欢, 赵荣祥, 等. 多功能并网逆变器研究综述[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 5-15.
ZENG Zheng, YANG Huan, ZHAO Rongxiang, et al. Overview of multi-functional grid-connected inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 32(8): 5-15.
- [10] 黄如海, 谢少军. 基于比例谐振调节器的逆变器双环控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 77-81.
HUANG Ruhai, XIE Shaojun. Double-loop digital control strategy based on proportional-resonant controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 77-81.
- [11] 孟建辉, 石新春, 付超, 等. 基于 PR 控制的光伏并网电流优化控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 42-47.
MENG Jianhui, SHI Xinchun, FU Chao, et al. Optimal control of photovoltaic grid-connected current based on PR control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 34(2): 42-47.
- [12] 栗晓政, 孙建平, 甄晓亚, 等. 基于 PR 与 PI 联合控制策略的光伏并网系统直流注入抑制技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 118-122.
SU Xiaozheng, SUN Jianping, ZHEN Xiaoya, et al. DC injection suppression technology based on PR & PI integrated control for grid-connected PV system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 33(3): 118-122.
- [13] 姚鑫, 罗晓曙, 廖志贤, 等. 光伏并网逆变器模糊准 PR 控制仿真研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(19): 86-91.
YAO Xin, LUO Xiaoshu, LIAO Zhixian, et al. The simulation research on fuzzy quasi PR control of PV grid connected inverter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(19): 86-91.
- [14] 赵云梦. 基于准 PR 控制的单相光伏并网逆变器的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2013.
ZHAO Yunmeng. The research of single-phase photovoltaic grid-connected inverter based on quasi-PR controller[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2013.
- [15] 鲍陈磊, 阮新波, 王学华, 等. 基于 PI 调节器和电容电流反馈有源阻尼的 LCL 型并网逆变器闭环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 133-142.
BAO Chenlei, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. Design of grid-connected inverters with LCL filter based on PI regulator and capacitor current feedback active damping[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 133-142.

收稿日期: 2016-04-26; 修回日期: 2016-07-08

作者简介:

王秀云(1979-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为分布式发电、电力系统优化运行;

毛瑞鹏(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏并网、逆变器控制; E-mail: maoruipengcm@163.com

田璧源(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式发电。

(编辑 周金梅)