

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.05.025

# 光伏发电系统并网逆变器控制策略研究\*

陈瑞睿, 陈辉明\*, 王正仕

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 针对传统比例积分(PI)控制器难以准确跟踪正弦指令信号和抑制电网基频干扰,而单纯比例谐振(PR)控制器对电网非基频处干扰信号抑制能力较弱的问题,对两级式光伏并网发电系统建立了逆变部分控制模型,采用频率响应的分析方法给出了后级逆变器双闭环系统的设计准则与详细设计过程;为了获得更好的系统稳定性和并网电流波形,结合系统输出功率随光伏阵列输出能力随时变化的特点,提出了电流内环一种基于DSP数字控制的分段PI+准谐振控制器的改进算法;设计了一台2 kW 两级式光伏并网逆变器实验样机,验证了该方案的有效性。研究表明,该方案实现简单,控制稳定,系统具有良好的动静态特性,输出并网电流的总谐波畸变度(THD)明显减小,且有较强的抗电网干扰能力。

**关键词:** 光伏发电系统; 并网; 逆变器; 谐振控制; 数字控制

中图分类号: TM615; TM464

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)05-0619-04

## Control strategy for grid-connected inverter in photovoltaic power generation system

CHEN Rui-rui, CHEN Hui-ming, WANG Zheng-shi

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that traditional PI controller is difficult to track the sinusoidal instruction accurately and to inhibit the grid interference effectively, also, PR controller has weak anti-interference capability in non-resonant frequency area, the control model of inverter in the two-stage photovoltaic power generation system was built. The design principles and detail process of the dual-loop system was given using the frequency-response analysis method. Considering that the system output power changes with the output capacity of PV array, an improved piecewise PI + quasi resonant control algorithm was proposed based on DSP digital control to obtain better system stability and current waveform. A 2 kW experimental prototype was designed to test validity of proposed strategy. The experimental results show that the scheme is simple and stable. The system has good dynamic and static performance. The total harmonic distortion (THD) of the output grid current decrease significantly and the system has strong anti-interference ability.

**Key words:** photovoltaic power generation system; grid-connected; inverter; resonance control; digital control

## 0 引 言

当今社会由于正面临着非可再生资源的不断消耗所带来的能源危机,使得新能源并网发电技术的研究越来越受到重视<sup>[1-3]</sup>。在两级式光伏并网发电系统中,一般前级DC/DC完成升压及对光伏阵列的最大功率跟踪功能,后级逆变器采用功率和电流双闭环控制

策略实现功率平衡和对并网电流的有效控制。本研究对后级逆变器控制系统进行了详细的分析和设计。由于PI控制器在电网基波频率处幅值有限,存在稳态误差<sup>[4]</sup>,而PR控制器在电网低次谐波处环路增益小,抗干扰能力差<sup>[5]</sup>,电网电压前馈控制方案依赖于传感器精度,可能无法抵消电网谐波,甚至出现将电网中谐波引入逆变器使并网电流恶化的情况。

收稿日期: 2012-12-03

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y1110233)

作者简介: 陈瑞睿(1989-),男,湖北随州人,主要从事光伏并网逆变器方面的研究. E-mail: rr\_chen@126.com

通信联系人: 陈辉明,男,教授,硕士生导师. E-mail: huiming@zju.edu.cn

针对上述情况,同时结合“该系统采用最大功率点跟踪(MPPT)算法来跟踪光伏阵列输出,是变功率系统”的特点,本研究提出电流内环的分段PI+谐振控制的控制策略。

## 1 系统结构与模型建立

2 kW 两级式光伏并网发电系统结构如图 1 所示。

主电路结构前级为双 BOOST 电路交错并联,后级为单相 H 桥逆变。前级 BOOST 电路实现升压功能并通过改变开关管的占空比,实现对光伏阵列的最大功率点跟踪(MPPT);后级逆变器采用电压外环和电流内环的双闭环控制方法,电压外环通过控制直流母线电容  $C_2$  上电压的稳定来实现光伏阵列输出功率与逆变器输出功率的平衡,电流内环通过控制滤波电感  $L_3$  的电流实现并网。

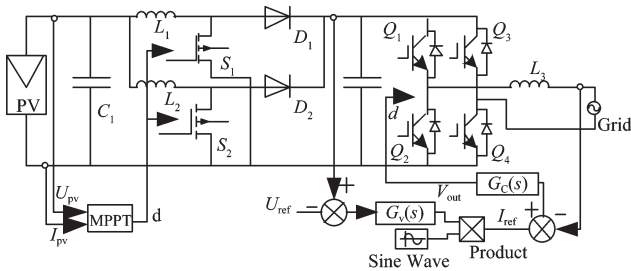


图 1 两级式光伏并网发电系统结构图

该系统最大功率点跟踪和并网是解耦的,相互独立,互不干扰,使系统控制更加灵活可靠。

## 2 控制系统分析与设计

### 2.1 电流内环模型

笔者根据图 1 结构建立的电流内环控制框图如图 2 所示。

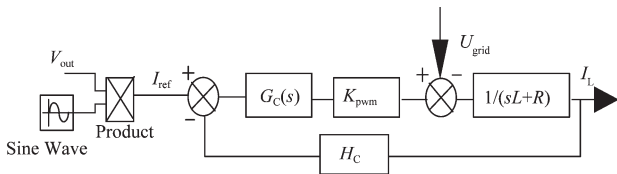


图 2 电流内环控制框图

电流环传递函数:

$$I_L = \frac{G_c(s)K_{pwm} \frac{1}{sL+R}}{1 + G_c(s)K_{pwm} \frac{1}{sL+R} H_c} I_{ref} - \frac{\frac{1}{sL+R}}{1 + G_c(s)K_{pwm} \frac{1}{sL+R} H_c} U_{grid} \quad (1)$$

内环补偿环节  $G_c(s)$  采用 PI+准谐振控制方式,传递函数如下<sup>[6]</sup>:

$$G_c(s) = G_{c1}(s) + G_{c2}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_{pr} + \frac{2K_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (2)$$

其中,  $K_{pr}$  固定为 1,以保证谐振控制器在谐振频率以外的频率段增益为 1。

给出 PI 控制器与谐振控制器 Bode 图如图 3 所示。由图 3 知,谐振控制器主要用来在基波及其附近频率处提供一个较大的幅值增益,减小稳态误差及电网带来的干扰。

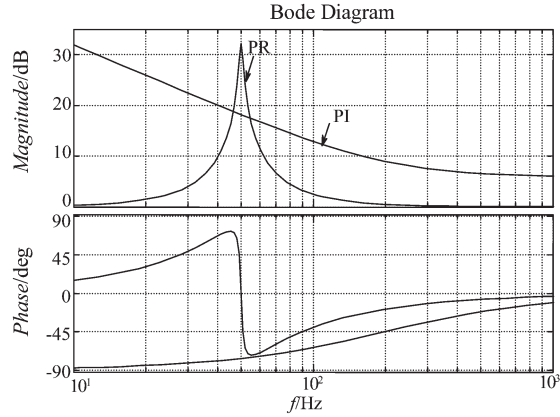


图 3 PI 控制器与谐振控制器 Bode 图

而在加入谐振控制器后,本研究仍然保留积分控制器,一方面是因为 PI 控制器在较宽的频率范围内有较大的幅值增益,可抑制非基波频率处的谐波干扰<sup>[7]</sup>;另一方面 PI 控制器数字化后形式简单,且积分部分可分离,笔者可根据误差大小及时调整积分的强弱,减小稳态误差的同时避免超调量过大引起系统振荡,有利于保证系统稳定性及获得较好的并网电流波形。

### 2.2 PI 控制器设计

本研究先考虑单独采用 PI 控制,若补偿后截止频率较低,可提高系统的稳定性,但会使快速跟随性能变差,若截止频率较高,可改善系统快速跟随性能但会使系统稳定裕量下降。同时,需要考虑数字控制器的一拍滞后引起的相位滞后对系统的影响<sup>[8]</sup>。取加入 PI 控制器补偿后的开环截止频率为 2 kHz,PI 控制器零点频率为 200 Hz,得到 PI 参数(本例中电流反馈系数  $H_c=0.833, K_p=1.98, K_i=2480$ )。

### 2.3 准谐振控制器设计

在准谐振控制器的参数里,由上文知  $K_{pr}=1, \omega_0$  是谐振基波角频率,  $K_r$  与控制器峰值增益成正比,  $\omega_c$  决定控制器的带宽,  $\omega_c$  越小,谐振峰值的宽度越窄,选择性越好,但是  $\omega_c$  太小使滤波器对频率变化非常敏感,一般  $\omega_c$  在 5 rad/s~15 rad/s 范围内取值<sup>[9]</sup>(该例中选取参数如下  $\omega_0=100\pi, K_r=40, \omega_c=5$ )。

PI+谐振控制补偿后,系统开环传递函数 Bode 图如图 4 所示。

由图 4 知,系统截止频率约 2.8 kHz,既能有效滤除开关频率(20 kHz)及其谐波,又能保证较好的系统

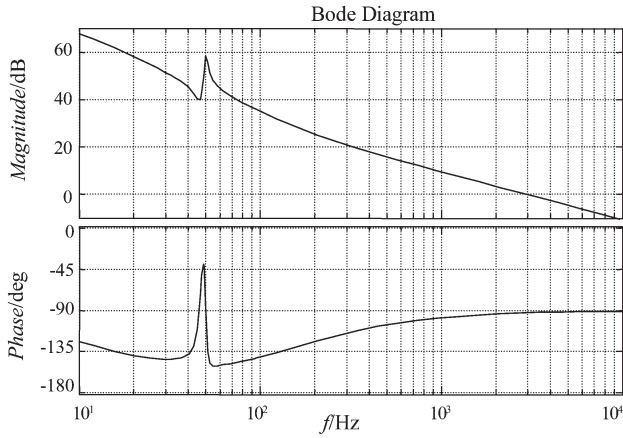


图4 补偿后系统开环Bode图

快速跟随性能。截止频率处相位裕量约90°,系统稳定可靠,在较宽的频率范围内有较大的开环增益使系统有较强的抗干扰能力。在50 Hz处有近60 dB增益,可基本实现对指令的无误差跟踪及抗电网基波干扰。

### 2.4 数字化与PI分段

确定参数后,为了在DSP中实现对控制器进行双线性变换<sup>[10]</sup>,笔者对补偿器进行离散化,得到离散化方程:

$$s = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (3)$$

对PI控制器,有:

$$G_{c1}(z) = \frac{2K_p + K_i T + (K_i T - 2K_p)z^{-1}}{2 - 2z^{-1}} \quad (4)$$

转化成差分形式:

$$u(k) = u(k-1) + K_p(e(k) - e(k-1)) + \frac{K_i T}{2}(e(k) + e(k-1)) \quad (5)$$

对PR控制器,有:

$$G_{c2}(z) = K_{PR} + \frac{a_0 z^{-1} - a_1 z^{-2}}{b_0 - b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}} \quad (6)$$

转化成差分形式为:

$$u(k) = K_{PR} e(k) + \frac{1}{b_0}(a_0(e(k-1) - e(k-2)) + b_1 u(k-1) - b_2 u(k-2)) \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} a_0 &= a_1 = 2K_r K_r \omega_c; \\ b_0 &= b_2 = K_r^2 + 2K_r^2 \omega_c + \omega_0^2; \\ b_1 &= 2K_r^2 - 2\omega_0^2; \\ K_r &= \frac{2}{T} \end{aligned}$$

式中: $T$ —采样周期。

在光伏并网逆变器中,电流内环指令值 $I_{ref}$ 是随最大功率点变化而变化的,系统并不是工作在额定功率点,而是随日照和温度等因素变化的变功率系统。传统PI调节器中,比例部分能快速响应控制作用,积分

部分是偏差的积累并最终减小或消除稳态误差。当偏差变化较大时时,P和I同时起作用,在满足快速调节功能同时容易带来过大的退饱和和超调,严重时导致系统振荡失稳。

针对系统特点,而且由于数字控制容易把P和I分开,本研究采用一种分段PI的改进算法:当误差 $e(k)$ 较大时,为使系统能快速跟踪,快速减小偏差,取较大 $K_p$ ,同时为避免出现大的超调,取较小 $K_i$ 值;当 $e(k)$ 中等时,为使系统有较小的超调量,选择较小 $K_p$ ,而 $K_i$ 取值适中;当 $e(k)$ 较小时,为使系统有较好稳态性能, $K_p$ 再增大, $K_i$ 取较大值。

### 2.5 电压外环设计

电压外环结构如图1所示,本研究将直流母线电压与电压参考信号相减后与标准正弦信号相乘,作为电流内环指令值。补偿环节器 $G_v(s)$ 采用PI控制器,由于直流母线上存在100 Hz的低频纹波,为了抑制其影响电流内环,取补偿后开环截止频率为10 Hz,PI控制器零点频率为100 Hz,得到外环PI参数(本例中取 $K_{pv}=0.11, K_{iv}=69.1$ )。

## 3 实验分析

本研究按照如图1所示的结构建立了两级式光伏并网发电系统样机。逆变器部分参数如下:额定输出功率 $P_0=2$  kW,开关频率 $f_s=20$  kHz,并网滤波电感 $L_3=5.1$  mH。电压外环和电流内环补偿器参数如上文所述。控制电路采用数字信号处理芯片TMS320F2808,笔者对文中控制策略进行了实验研究。

系统在并网电压220 V、并网电流8 A时获得的电压电流波形如图5所示。

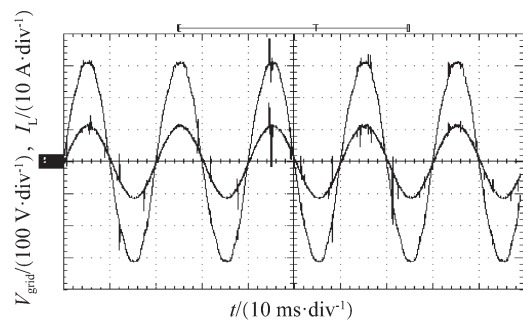


图5 并网电压电流波形

本研究通过对图5中的电压电流进行谐波分析可知,在电网电压 $THD=3.63\%$ 情况下,并网电流 $THD=1.82\%$ 。该系统可以很好地跟踪指令电流,并抑制电网及其谐波干扰。

跳负载实验的电压电流波形如图6、图7所示。

可见在系统负载跳变时,通过采用本研究提出的控制策略能使系统很快进入稳态,电流基本无畸变,有良好的动态性能。

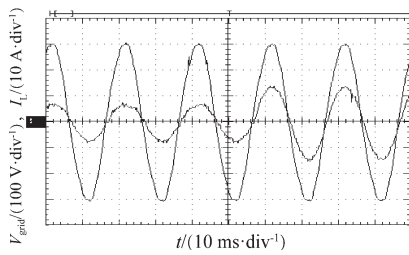


图6 1 kW跳到2 kW时波形图

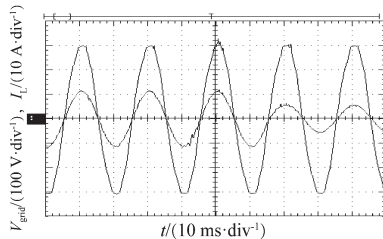


图7 2 kW跳到1 kW时波形图

## 4 结束语

本研究给出了光伏发电系统用并网逆变器后级逆变部分的双闭环控制系统设计方法与详细设计过程,提出了基于数字控制的并网电流内环的分段PI+准谐振控制策略。

理论研究与实验结果表明,该控制策略实现简单,利于系统稳定,有良好的动、静态性能,能准确跟踪指令信号、减小并网电流THD、有效抑制电网干扰,是一种非常实用的解决方案。

(上接第602页)

应加热响应时间,模具温度基本不变,而后模具温度迅速线性上升,即食品罐体模具高度随温度发生了线性变化,故通过自动控制食品罐体模具温度来实现食品罐体刻痕深度的实时控制是可行的。

## 3 结束语

本研究得到的仿真和实验结果表明,采用感应加热技术加热模具,模具受热快,径向温差小,同一圆周方向的轴向温度基本一致,最重要的是,模具在受热过程中,温度可视为线性变化,这些特点利于自动控制温度,能使控温达到较高的精确性,即对提高食品罐体产品的质量具有重大的意义。

### 参考文献(References):

- [1] SCOTT S L L, D G. Race of induction heating in lean manufacturing[J]. *Heating Treating progress*, 2006(6):31-36.
- [2] Fish M. Simulation of induction heating in manufacturing[J]. *Licentitate Thesis*, 2008(42): 271-335.
- [3] 王永国,尹永国. 感应加热温压系统的研究[D]. 合肥:合肥工业大学机械电子工程系,2008.
- [4] WU N X, ZHU J G. The research and analysis about extrusion production of the deairing pug mill variable tempere-

### 参考文献(References):

- [1] JUNG S M, BAE Y S, CHOI S, et al. A low cost utility interactive converter for residential fuel cell generation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(6):2293-2298.
- [2] 王赞,肖岚,姚志全,等. 并网独立双模式控制高性能逆变器设计与实现[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(1):54-59.
- [3] 吴浩伟,段善旭,徐正喜. 一种新颖的电压控制型逆变器并网控制方案[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(33):19-24.
- [4] 金圆圆. 基于准PR控制的并网逆变器的研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2008.
- [5] 孟元东. 太阳能用单相正弦波逆变器的研究[D]. 天津:天津大学环境学院,2007.
- [6] SHEN Ke, WANG Jian-ze, GAO Zhi-qiang, et al. Dynamic voltage restore based on proportional-resonant control[C]// *Asia Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE Power & Energy Society*, 2010. Chengdu:[s.n.], 2010:1-4.
- [7] 杭丽君,李宾,黄龙,等. 一种可再生能源并网逆变器的多谐振PR电流控制技术[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(12):51-58.
- [8] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [9] 张海钰,王正仕,陈辉明. PR控制在抑制逆变器输出变压器直流偏磁中的作用[J]. *机电工程*, 2011, 28(8):986-990.
- [10] 席爱民. 计算机控制系统[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

[编辑:李辉]

ture field based on ANSYS[J]. *Information Engineering*, 2010(3):57-61.

- [5] CHEN D X. *Machinery's Handbook* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [6] ZHANG G X, TAO Y, WANG Y K. Reearch of dynamic forecasting model and ANSYS analysis of temperature field in slab[J]. *Hot Working Technology*, 2009, 38(15):141-143.
- [7] ACERO J, NAVARRO D, BARRAGA L A. FPGA-based power mesuring for induction heating appliance using sigma-delta A/D conversion [J]. *Industrial Electronics*, 2007, 38(4):1843-1852.
- [8] STAUFFER P R, CETAS T C, JONES R C. Magnetic induction heating of ferromagnetic implants for induction localized hyperthermia in deepseated tumors[J]. *Biomedical Engineering*, 1984, 53(1):235-251.
- [9] HANSSON S, FISK M. Simulation and measurements of combined induction heating and extrusion processes[J]. *Finite Elements in Anlysis and Design*, 2010, 46(10):906-915.
- [10] SHI J C, WEI M Y. Numerical simulation of temperature field in barrel of injection molding machine during induction heating process based on ANSYS software [J]. *Advance Materials Research*, 2009, 87(16):16-21.

[编辑:李辉]