

# 一种高性能三相四桥臂逆变器控制器的设计

林金燕, 王正仕, 陈辉明, 李超

(浙江大学电气学院, 浙江省 杭州市 310027)

## High Performance Controller Design for Three-phase Four-leg Inverters

LIN Jin-yan, WANG Zheng-shi, CHEN Hui-ming, LI Chao

(Electric Engineering College, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** Three-phase four-leg inverter has powerful ability to effectively treat unbalanced and nonlinear loads, however the controller design is quite complicated. This paper proposes a novel method based on pole arrangement of PID controller for the four-leg inverter. In order to model this type of inverter, different operation modes is analyzed, the switch cycle average method and the rotary coordinate transformation are used to establish continuous invariable system model, then the simple bright PID control can be designed based on this foundational model. In practical application, according to transfer function of the inverter, the distribution of expected poles and demand performance, optimal parameters of the controller can be calculated. Analyzing the unbalance degree of the output voltage with unbalanced loads and contrasting the harmonic contained in the output voltage with the nonlinear loads, final achievement can be got: the four legs inverter system combined with the optimal PID controller can achieve the excellent stabilization and dynamic performances. Moreover, this method is simple to implement and the design is convenient. Detailed simulation and experimental results verify the validity of the proposed method.

**KEY WORDS:** three-phase four-leg Inverter; modeling; PID controller; unbalanced and nonlinear load

**摘要:** 三相四桥臂逆变器能有效地处理不平衡和非线性负载, 然而其控制方法通常非常复杂。该文提出了一种性能优异、设计简单的控制器及其设计方法, 该方法基于极点配置的PID电压单环控制。为了得到三相四桥臂逆变器的数学模型, 采用开关周期平均法和旋转坐标变换建立连续定常系统模型, 在此模型的基础上设计简单明了的PID控制器。根据

三相四桥臂逆变系统的控制传递函数、期望的极点分布和性能指标, 计算出最佳的PID控制参数。对该系统工作于不平衡负载时输出电压的不平衡程度分析, 和非线性负载时输出电压的谐波含量对比分析, 结果证明该文提出的方法具有很好的动静特性, 该方法与诸多其他控制方法相比具有原理简洁、应用方便、参数整定灵活等杰出优点。详细的仿真结果和实验结果验证了该方法的正确性。

**关键词:** 三相四桥臂逆变器; 建模; PID控制; 不平衡和非线性负载

## 0 引言

三相逆变器带不平衡负载时各相输出电压幅度的大小会有很大差异、带非线性负载时输出电压的波形严重畸变, 造成电源的输出电压质量明显下降。常用的处理方法有: 分裂电容式电路和附加 $\Delta/Y$ 变压器<sup>[1]</sup>。经过实验证明都存在比较严重的缺点: 分裂电容式逆变器滤波电容较大、直流电压利用率低、电容电压不易平衡; 附加 $\Delta/Y$ 变压器体积、重量较大, 成本较高。三相四桥臂逆变器能够很好的解决不平衡与非线性负载问题, 但效果很大程度上还依赖于控制器的设计。常用的控制方法有: 内环空间矢量电流调节器和外环同步坐标比例积分控制的双环控制<sup>[1-2]</sup>, 正序负序零序分量分解形成多环控制<sup>[3-4]</sup>; 最大误差电流调节和电压PI调节的双环控制<sup>[5]</sup>; 大多控制方法<sup>[1-14]</sup>虽然能在不平衡负载下改善输出电压的对称性, 但其控制设计过于复杂。实际上, 经过特殊设计的PID控制器, 仍然能够取得优异的控制性能。

本文提出一种采用极点配置的方法实现三相四桥臂逆变器的单环电压PID控制<sup>[15-16]</sup>。三相四桥

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50437010)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China(50437010).

臂逆变器增加的第四桥臂可直接控制中性点电压,从而得到三个独立电压,使其在不平衡负载和非线性负载维持三相电压的高质量输出。PID算法包含了动态过程中即时、滞后与超前信息。基于极点配置选择PID参数的方法快捷准确,适合各种负载情况,有效地避免了凭经验整定或基于频率特性试凑所带来的不方便。本文结合三相四桥臂逆变器同步坐标系统模型<sup>[17]</sup>、控制传递函数和期望的极点分布、性能指标,设计出合理的PID控制参数。仿真和实验验证了四桥臂逆变器和基于极点配置设计的PID控制器相结合的系统具有很好的动态特性,该方法与其它多种控制方法相比具有简单明了、快捷准确、直接与性能指标相联系的优点。

## 1 三相四桥臂建模

### 1.1 静止坐标系下的模型

如图1,其第4桥臂中点通过电感 $L_n$ 与负载中性点相连。把负载电流作为系统外部扰动,同时认为输入电源理想。假设开关管是理想的,开通时开关函数值为1,反之为0;忽略死区影响, $S_i$  ( $i=a, b, c, f$ )均用上桥臂的开通情表示。

$$\begin{cases} S_{af} = S_a - S_f \\ S_{bf} = S_b - S_f \\ S_{cf} = S_c - S_f \end{cases} \quad (1)$$

为滤除开关频率分量和谐波分量,进行开关周期平均运算,分别得到占空比 $d_{if}$ 、相电压 $U_{af}$ 、 $U_{bf}$ 、 $U_{cf}$ 和直流侧输入电流 $I_p$ :

$$\begin{bmatrix} U_{af} \\ U_{bf} \\ U_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{af} \\ d_{bf} \\ d_{cf} \end{bmatrix} U_{dc} \quad (2)$$

$$I_p = \begin{bmatrix} d_{af} & d_{bf} & d_{cf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

以电感电流 $I_a, I_b, I_c, I_n$ 和电容电压 $U_{AG}, U_{BG}, U_{CG}$ 为状态变量对回路分析:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{L_n}{L} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_n \\ I_n \\ I_n \end{bmatrix} + \frac{U_{dc}}{L} \begin{bmatrix} d_{af} \\ d_{bf} \\ d_{cf} \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} U_{AG} \\ U_{BG} \\ U_{CG} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$I_a + I_b + I_c + I_n = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} U_{AG} \\ U_{BG} \\ U_{CG} \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

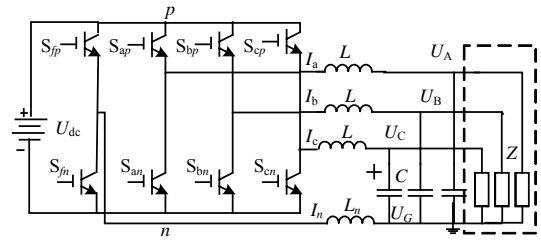


图1 三相四桥臂逆变器主回路结构图

Fig. 1 Configuration of three-phase four-leg converter

### 1.2 旋转坐标模型

由于静止坐标系下逆变器的平均模型是时变、非线性系统。要得到连续定常系统和小信号模型,必须进行旋转坐标变换,建立其平均模型。静止/旋转坐标变换式为

$$X_{dq0} = T_{abc/dq0} \times X_{abc} \quad (7)$$

$$T_{abc/dq0} =$$

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $\omega=2\pi f$ ;  $f$ 为电网或基波频率。

对各个状态变量、输入输出量及其相应的关系式坐标变换。三相四桥臂逆变器转换为三通道信号模型: $d$ 通道、 $q$ 通道和 $0$ 通道。式(9): $0$ 通道完全独立于其他两个通道,为二阶模型;而 $d$ 、 $q$ 通道之间存在着耦合项: $\omega C U_q$ 、 $-\omega C U_d$ 、 $-\omega L I_q$ 、 $\omega L I_d$ 可认为是四阶模型。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} U_d \\ I_d \\ U_q \\ I_q \\ U_0 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/C & \omega & 0 & 0 & 0 \\ -1/L & 0 & 0 & \omega & 0 & 0 \\ -\omega & 0 & 0 & 1/C & 0 & 0 \\ 0 & -\omega & 1/L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/C \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/(L+3L_n) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ I_d \\ U_q \\ I_q \\ U_0 \\ I_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{dc}/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & U_{dc}/L & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & U_{dc}/(L+3L_n) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \\ d_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 $U_d, U_q, U_0, I_d, I_q, I_0, d_d, d_q, d_0$ 分别表示旋转坐标各对应通道的电容电压、电感电流和占空比的开关周期平均值。对占空比作微小扰动将引起电路中各状态变量和输入电流量的微小扰动,结合静态工作点各稳态值之间的关系,整理得到系统的

小信号模型，如图 2。

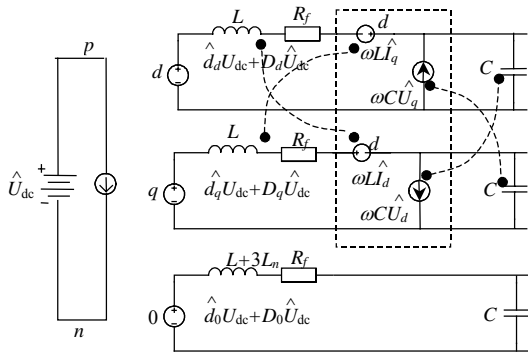


图 2 四桥臂逆变器旋转坐标小信号模型  
Fig. 2 Synchronous frame small signal model of three-phase four-leg converter

### 1.3 三相四桥臂 PID 控制系统等效控制模型

本文中采用PID电压环控制，需要对d、q 通道耦合项进行解耦。实际应用中考虑到滤波电感L的等效串联电阻、开关管导通压降等因素加入电感串联等效电阻，如图 2 中的R<sub>f</sub>。

在给定输入信号U<sub>r</sub>、负载电流扰动信号i<sub>o</sub>同时作用下闭环输出电压U<sub>o</sub>的传递函数为

$$U_{dq0}(s) = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{LCs^3 + (rC + k_d)s^2 + (1 + k_p)s + k_i} U_r(s) - \frac{s(Ls + r)}{LCs^3 + (rC + k_d)s^2 + (1 + k_p)s + k_i} I_o(s) \quad (10)$$

逆变器闭环系统特征方程为

$$D(s) = LCs^3 + (rC + k_d)s^2 + (1 + k_p)s + k_i \quad (11)$$

由于三通道在等效电感及电感等效串联电阻差值比较小，认为传递函数相同。

## 2 系统极点配置

从控制角度而言，如果高阶系统中距离虚轴的距离最近的一对极点，其实部比其它极点的实部的1/5 还要小，可认为系统的响应主要由该极点决定(主导极点)。若四桥臂逆变器系统可以找到一对共轭复数主导极点，则此系统就可近似地当作二阶系统来分析，其暂态响应性能指标都可按二阶系统近似估计。

系统主导极点期望值为

$$\begin{cases} s_{r1,2} = -\zeta_r \omega_r \pm j \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2} \\ s_{r3} = -n \zeta_r \omega_r \end{cases} \quad (12)$$

式中：ζ<sub>r</sub>为阻尼比；ω<sub>r</sub>为无阻尼自然振荡角频率；因此满足动态性能要求的参数应为

$$\begin{cases} k_d = (2 + n) \zeta_r \omega_r LC - rC \\ k_p = (2n \zeta_r^2 + 1) \omega_r^2 LC - 1 \\ k_i = n \zeta_r \omega_r^3 LC \end{cases} \quad (13)$$

根据实际系统设计各参数：二阶系统的最佳阻尼比为ζ<sub>r</sub>=0.707，这时调整时间最小，最大超调量也不大；n取 10。系统未校正时自然振荡角频率为4.4krad/s，选取期望自然振荡角频率为3krad/s，对应的调节时间约为1.4ms，在可以接受的范围内。计算得到：k<sub>d</sub>=0.0013；k<sub>p</sub>=4.2258；k<sub>i</sub>=1.0079×10<sup>4</sup>。

## 3 仿真结果及其分析

### 3.1 不平衡负载运行情况分析

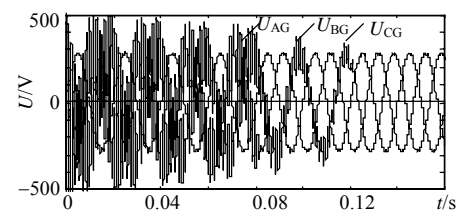
三相系统不平衡程度定义为：负序分量或零序分量有效值与正序分量有效值的比较：

用谐波含量和总畸变量表征波形非线性程度。

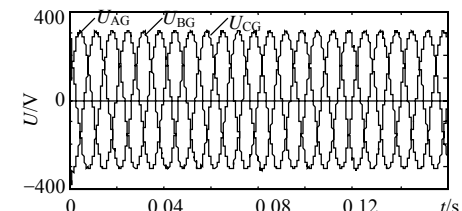
采用 matlab 软件仿真验证系统的特性。仿真参数为：额定功率 2.4 kW；额定输出电压有效值：220V；滤波部分 L=1.6mH，C=33μF；电感等效串联电阻 R=0.1Ω。

四桥臂逆变器不平衡负载测试两种情况：①不平衡负载：R<sub>a</sub>=2Ω，R<sub>b</sub>=60Ω，R<sub>c</sub>=5000Ω，模拟短路和开路情况；②突变负载：A、B、C相分别在0.04s、0.08s、0.12s从模拟开路5000Ω突变为20Ω。

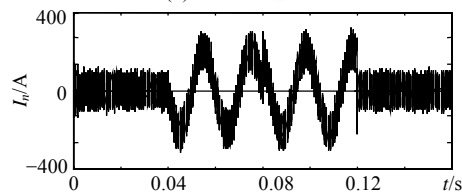
主要分析突变负载情况下的工作情况。如图3(a)



(a) 开环输出电压



(b) PID 系统输出电压



(c) PID 系统第四桥臂电感电压

图 3 不平衡负载开环、闭环输出波形

Fig. 3 voltage、current of open loop and PID system

开环时第四桥臂的中性点电流在负载突变时虽然具有一定的调节作用,但动态响应不快,无法控制三相电压平衡输出。然而PID控制器在系统出现大扰动时能够跟踪突变并立即调节,反应快速,稳定性好,如图3(b)。

分解后正序分量的幅值接近311V;负序分量、零序分量都在-1~1V之间。负序不平衡程度、零序不平衡程度都在0.002~0.003之间。

表1可以看出:不平衡负载下,开环的三相四桥臂逆变器其电压输出不平衡系数约为2%。采用闭环PID控制则可以把电压不平衡系数控制在0.005%以下,且反应时间更快,具有更好的稳态特性,动态特性。

表1 三种负载输出电压不平衡程度分析  
Tab. 1 Output voltage unbalance degree analyse for three kinds of load

负载	A相		B相		C相		
	负序	零序	负序	零序	负序	零序	
开环不 平衡负载	最大值/V	40	38	40	38	40	38
	不平衡系数/%	0.1	0.09	0.1	0.09	0.1	0.09
闭环不 平衡负载	最大值/V	2.3	2.1	2.3	2.1	2.3	2.1
	不平衡系数%	0.004	0.0035	0.004	0.0035	0.004	0.0035
开环突 变负载	最大值/V	100	100	100	100	100	100
	不平衡系数/%	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
闭环突 变负载	最大值/V	1	1	1	1	1	1
	不平衡系数/%	0.0023	0.0025	0.0023	0.0025	0.0023	0.0025

注:上表中的“闭环”均指本文中所采用的闭环PID控制。

### 3.2 非线性负载运行情况分析

非线性负载测试如下3种情况,其中整流负载输出带滤波电容 $C_f$ 和电阻负载 $R_r$ : ① C相接不控整流负载,  $C_f=1\mu\text{F}$ ,  $R_r=20\Omega$ ; A相负载为40Ω电阻; B相接电阻60Ω; ② A、B、C相滤波电容均为 $C_f=1\mu\text{F}$ ,  $R_r=40\Omega$ ; ③ A、B、C相滤波电容均为 $C_f=1\mu\text{F}$ ,  $R_r$ 分别为A相60Ω、B相40Ω、C相20Ω。

其中负载3的C相输出电压畸变较严重,如图4(a),对其进行谐波分析如图4(b)。

表2看出:三相四桥臂逆变器开环系统接非线性

表2 非线性负载C相输出电压谐波分析  
Tab. 2 Output voltage hamonic analyse of C phase for nonlinear load

负载	$\eta_{\text{THD}}$	基波电压/V(f/Hz)	主要谐波含量/(f/Hz)
1	开环	278(50)	17(650) 13(750)
	闭环	311(50)	0.6(250) 0.71(350)
2	开环	280(50)	13(650) 8(750)
	闭环	311(50)	0.7(250) 0.71(350)
3	开环	278(50)	16(650) 13(750)
	闭环	311(50)	0.75(250) 0.79(350)

性负载时,输出电压畸变严重,谐波含量高, $\eta_{\text{THD}}$ 在20%左右。而闭环PID控制可以控制电压正弦输出, $\eta_{\text{THD}}$ 为2%,可见此闭环PID控制对非线性负载控制和调节能力强。

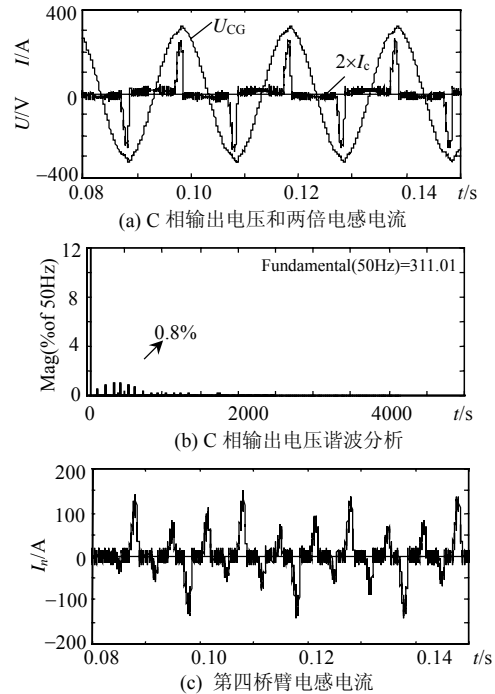
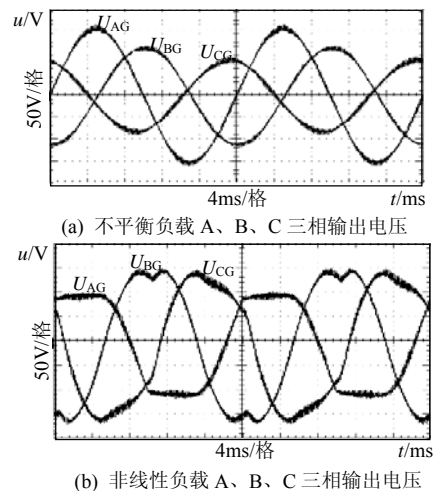


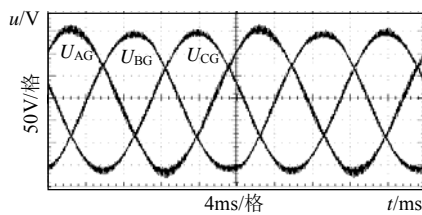
图4 PID系统电压电流波形  
Fig. 4 Voltage, currents for PID system

## 4 实验结果

实验滤波部分:  $L=1.6\text{mH}$ ;  $C=33\mu\text{F}$ 。不平衡负载为A相输出接100k电阻,B相输出两个并联的灯,C相接一个灯。非线性负载实验为A相输出接单相整流、滤波电容470μF,B、C相输出接一个灯。分别测试三相三桥臂开环系统和三相四桥臂PID闭环系统两种情况,电压输出波形分别为,如图5(a)~(c)。



(b) 非线性负载 A、B、C 三相输出电压



(c) PID 系统非线性负载时 A、B、C 三相输出电压

图 5 不平衡、非线性负载时开环和闭环输出波形

Fig. 5 output voltage of unbalanced load and nonlinear load for open loop and PID control system

实验结果证明四桥臂的 PID 系统在不平衡和非线性负载时均具有很好的稳定性和调整能力。

## 5 结论

本文提出了采用三相四桥臂结合极点配置 PID 控制的方法。在导出逆变器数学模型的基础上，针对线性定常模型，按照实际要求的性能指标，从控制极点的分布出发设计 PID 控制器参数。通过详细的仿真研究和实验结果，证明了该系统在不平衡负载时输出三相电压平衡性好，非线性负载时输出电压畸变小，负载适应性强，能保证输出高质量高可靠性的电能，而且控制方案简单，思路清晰，系统简明。

## 参考文献

- [1] 孙驰, 毕增军, 魏光辉. 基于空间矢量电流调节器的三相四桥臂逆变器的解耦控制研究[J]. 电工电能新技术, 2003, 22(3): 37-40. Sun Chi, Bi Zengjun, Wei Guanghui. Study on decoupled control of three-phase four-leg inverter with space vector based current regulator[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(3): 37-40(in Chinese).
- [2] 孙驰, 毕增军, 魏光辉. 一种新颖的三相四桥臂逆变器解耦控制的建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 1-7. Sun Chi, Bi zengjun, Wei Guanghui. Modeling and simulation of a three-phase four-leg inverter based on a novel decoupled control technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 1-7(in Chinese).
- [3] 孙进, 侯振义, 苏彦民. 三相四臂对逆变电源控制方法的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 61-65. Sun Jin, Hou Zhenyi, Su Yanmin. Study of control method of three-phase four-wire inverter power supply[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2004, 19(4): 61-65(in Chinese).
- [4] 孙进, 卢家林, 苏彦民. 三相四线逆变电源解耦控制方法的研究[J]. 电气传动, 2002, 32(4): 3-5, 12. Sun jin, Lu jialin, Su yanmin. Study on decoupling control methods of three-phase four-wire inverter power supply[J]. Electric drive, 2002, 32(4): 3-5, 12(in Chinese).
- [5] 阮新波, 严仰光. 四桥臂三相逆变桥的控制策略[J]. 电工技术学报, 2000, 15(1): 61-64. Ruan Xinbo, Yan Yangguang. The control strategy for three-phase inverter with four bridge legs[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2000, 15(1): 61-64.
- [6] 邹祖冰, 蔡丽娟, 甘辉霞. 基于非线性解耦控制的三相电压型 SPWM 逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 57-60. Zou zubing, Cai lijuan, Gan huixia. Nonlinear decoupling control of Three-phase voltage source SPWM inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 57-60(in Chinese).
- [7] 高军, 黎辉, 杨旭, 等. 基于 PID 控制和重复控制的正弦波逆变电源研究[J]. 电工电能新技术, 2002, 21(1): 1-4. Gao Jun, Li Hui, Yang Xu, et al. Study on sine wave inverters with PID control and repetitive control[J]. Advanced technology of electrical engineering and energy, 2002, 21(1): 1-4(in Chinese).
- [8] Hsu P, Behnke M. A three-phase synchronous frame controller for unbalanced load[C]. Power Electronics Specialists Conference, Fukuoka, 1998, 2.
- [9] Robert A Gannett. Control strategies for high power four-leg voltage source inverters[D]. Dissertation, Virginia Tech, 2001.
- [10] 王归新, 康勇, 陈坚. 基于状态空间平均法的单相逆变器控制建模[J]. 电力电子技术, 2004, 38(5): 9-12. Wang Guixin, Kang Yong, Chen Jian. Control modeling of a single-phase inverter based on state-space average method[J]. Power Electronics, 2004, 38(5): 9-12(in Chinese).
- [11] Gannett R A, Sozio J C, Boroyevich D. Application of synchronous and stationary frame controllers for unbalanced and non-linear load compensation in 4-leg inverters[C]. APEC, State of Texas, 2002.
- [12] Mattavelli P, Fasolo S. Implementation of synchronous frame harmonic control for high-performance AC power supplies [C]. Industry Applications Conference, Rome, 2000.
- [13] 张宇, 段善旭, 康勇, 等. 基于瞬时对称分量的三相逆变器特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 15-20. Zhang Yu, Duan Shanxu, Kang Yong, et al. The analysis of Three-phase inverter based on instantaneous symmetrical components[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 15-20(in Chinese).
- [14] Michael J Ryan, Rik W De Doncker, Robert D Lorenz. Decoupled control of a four-leg inverter via a new 4x4 transformation matrix [J]. IEEE transactions on power Electronics, 2001, 16(5): 694-701.
- [15] 陈青昌, 彭力, 康勇. 基于极点配置的 DC/DC 变换器 PID 参数优化设计[J]. 通信电源技术, 2005, 22(2): 6-9. Chen Qingchang, Peng Li, Kang Yong. PID controller parameters' optimization for DC/DC converters based on pole deploying [J]. Telecom Power Technologies, 2005, 22(2): 6-9(in Chinese).
- [16] 彭力, 张宇, 康勇, 等. 高性能逆变器模拟控制器设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 89-94. Peng Li, Zhang Yu, Kang Yong, et al. Design method of analog controller for high-performance inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 89-94(in Chinese).
- [17] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

收稿日期: 2007-02-28.

作者简介:

林金燕(1984—), 女, 硕士, 从事电力电子技术及其应用的研究, linjinyan1984@yahoo.com.cn;

王正仕(1965—), 男, 博士, 从事电力电子变换与电机控制方面的研究, wsz@zju.edu.cn(本文通信作者);

陈辉明(1964—), 男, 教授, 从事电力电子技术及其应用方面的研究;

李超(1983—), 男, 硕士, 从事电力电子技术及其应用方面的研究。

(编辑 王彦骏)