

# 基于 DSP 控制的逆变电源装置的研究

陈天锦, 姚为正

(许继电源有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 介绍了基于高性能 DSP 的逆变电源全数字化控制方案, 该方案结合了重复控制、预测 PID 控制和前馈控制的优点, 能减小逆变电源在非线性周期负载下的输出电压谐波畸变率和阶跃负载时的超调量。通过对 1.6 kVA 单相 SPWM 逆变电源实验装置的实验, 实验结果显示所采用的全数字化控制方案能达到逆变电源在各种负载条件下的动态和稳态指标要求。

**关键词:** 数字信号处理器; 预测 PID; 重复控制; 前馈控制

**中图分类号:** TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)07-0039-06

## 0 引言

在早期的电力电子设备中, 控制系统都是由模拟器件构成, 系统直接对模拟量进行检测、处理和控制在。传统的模拟控制的局限性表现为: 由于模拟量易受噪声、温度、器件老化等因素影响, 系统的可靠性很难保证; 控制电路复杂, 使用元件多, 因器件特性差异造成产品的一致性不好; 设计工作量大, 周期长, 且调试不方便; 因硬件实现的局限性, 控制上仅能采用 PID 等简单的调节方式。

随后出现的数字控制通过 A/D 转换, 将检测到的信号由模拟量转换为数字量, 再进行传输和处理, 可获得较高的稳定性。和传统的模拟量控制相比, 数字控制更为可靠、高速, 同时可实现各种复杂算法, 能方便地进行智能控制。数字化控制从发展阶段可分为部分数字化和全数字化控制。由于逆变电源组成的 UPS 是一个综合性的电力电子系统, 对动、静态特性有较高要求, 因此需要控制部分有良好的实时性和控制精度。直到现在, 电力电子产品中仍大多采用部分数字化, 即模-数混合控制, 这主要是由于以往的微处理器处理速度和片内资源的限制。

高性能数字信号处理器(DSP)的面世, 为全数字控制提供了可能。全数字控制可实现的功能已经包括脉冲序列控制、自动相移修正、多机并联、谐波控制、功率因数调节、监测显示等, 利用 DSP 强大的编程能力, 可不断根据市场要求进行功能扩展, 提升智能化程度。总的来说, UPS 逆变器实现数字化可带来以下好处:

1) 可以采用更先进、更复杂的控制方法, 从而

得到更好的性能。

2) 简化电路, 提高可靠性和系统抗干扰能力, 设计和制造更灵活, 大大缩短开发周期和产品调试时间。

3) 便于实现智能控制和多台逆变器并联运行控制。

从市场发展来看, 全数字化将成为衡量产品的重要指标之一, 今后会有持续的发展。因此, 对原有的模拟控制的逆变电源进行全数字化改造及产品化适应了当前技术发展的方向, 具有许多现实的意义。

## 1 硬件平台技术方案

本方案中采用的全数字化控制系统由德州仪器(TI)公司最新开发的数字信号处理器 TMS320F2812 作为其核心控制器, 这种型号的数字信号处理器芯片具有如下优点:

1) 强大的数据处理能力。32 位 DSP 可提供每秒 1.5 亿次指令、单周期 32 × 32 位 MAC 功能、支持并行指令、中断现场的保护和恢复由硬件自动完成、丰富的片内高速 RAM 等极大地提高了其数据处理速度;

2) 丰富的片内资源。128 k × 16 bit 的片上 FLASH、18 k × 16 bit 片内 RAM; 优化过的 2 个独立的事件管理器; 16 路 12 位模数转换器(ADC), 转换速度达到 80 ns/ 12.5 MSPS; 5 种不同的片上标准通信端口可为主机、测试设备、显示器及其它组件等提供简便的通信端口。丰富的片上资源极大地降低了板级空间及系统成本, 可实现更简单、更高效和更经济的设计;

3) 强大的开发软件支持。基于 C/ C++ 高效 32 位 TMS320C28X DSP 内核, 结合了 32 位数学处理

基金项目: 河南省杰出人才创新基金资助项目(0321000200)

能力,由独特的 IQ 数学函数库支持。通过采用 Code Composer Studio 工具及 DSP/BIOS 实时内核,进一步加快了开发进程。

为减小控制系统硬件规模,本方案采用 DSP + CPLD 模式,控制板硬件资源配置如下:

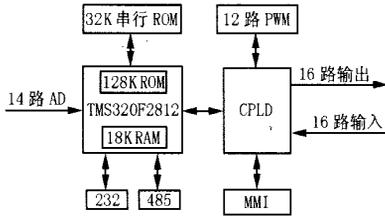


图 1 控制板硬件资源配置图

Fig. 1 Hardware configuration of the control board

## 2 控制系统设计

单相 SPWM 逆变器简化电路如图 2 所示,包括单相全桥逆变电路和 LC 滤波器。图中  $L_f$  为滤波电感,  $C_f$  为滤波电容,  $R_z$  为等效电阻(包含滤波电感等效内阻和变压器等效内阻等)。全桥逆变电路等效为延时很小的功率放大环节,逆变器的等效传递函数可由 LC 滤波参数来确定。

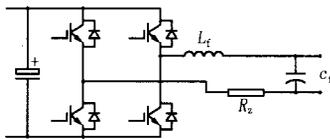


图 2 单相 SPWM 逆变器简化电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the single-phase SPWM inverter

图 2 所示的逆变系统传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{1}{L_f C_f s^2 + r_z C_f s + 1} \quad (1)$$

式中:  $n = 1 / \sqrt{L_f C_f}$ ,  $\zeta = \frac{R_z}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}}$

采用零阶保持器和选取合适的采样周期  $T$ , 式(1)离散化传递函数如下:

$$G(z) = \frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2} \quad (2)$$

本文中实验主电路参数为  $L_f = 1 \text{ mH}$ ,  $C_f = 25 \mu\text{F}$ ,  $R_z = 1 \Omega$ , 则  $n = 6324 \text{ rad/s}$ ,  $\zeta = 0.08$ 。

利用 MATLAB 可求出系统传递函数的离散形式如式 3 所示,并绘制 Bode 图如图 3 所示。

$$G(z) = \frac{0.048762z + 0.047954}{z^2 - 1.8546z + 0.95127} \quad (3)$$

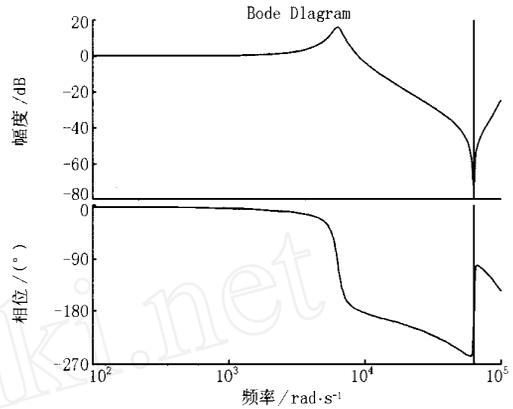


图 3 单相逆变器系统开环频率特性

Fig. 3 Open-loop frequency characteristic of the single-phase inverter system

由图 3 可知,逆变器空载时阻尼很小,在自然频率处有较大的谐振峰值。因为 PWM 逆变器的输出电压误差主要是由负载扰动(线性或非线性的)、直流侧电压波动、死区效应等因素引起的。误差频率分量大多位于中低频段,系统只要对这些中低频误差分量有较强的抑制能力,就已经可以大幅度地改善诸如谐波失真度(THD %)、电压稳态误差等稳态指标。因此,为保证系统即使在空载时依然有较高的稳定性,对其幅值和相位补偿应主要集中在中低频段,即将自然频率处的幅值衰减到 -3dB 以下。

在数字控制技术中,数字 PID 以其简单、灵活的特点,在许多工业控制系统中被采用。由于积分项(I)无法对交流信号实现无静差跟踪,且加入积分项后还会使输出电压与给定信号间产生相移,考虑到 UPS 输出电压一般都有和系统电压锁相同步的要求,因此无须加入积分项。比例项(P)代表了当前信息,起校正动态偏差的作用,使控制过程反应迅速。比例常数越大,调节越迅速,输出电压跟踪误差越小。微分项(D)对信号变化有超前控制作用,代表了将来的预测信息,可缩短调节时间,减小超调,克服系统震荡。由于 A/D 转换和处理器计算引入了延时和误差,且控制信号要延迟一个控制周期输出,这等同于在系统中串入了一个纯延迟环节,为了使系统稳定,控制系统增益不能过大,以保证系统有足够的稳定裕度和相位裕度。这也就限制了比例和微分常数的取值,结果势必造成稳态误差增大,输出电压波形畸变升高。为克服控制系统中的延时,本方案中采用预测 PID 控制,但对相控负载和整流器等非线性负载,输

出电压仍然呈现比较高的 THD。为全面满足逆变电源的动/静态指标要求,本方案中采用“重复控制”<sup>[12]</sup>+“预测 PID”<sup>[11]</sup>+“前馈控制”+“状态反馈控制”的控制方案。

传统 PID 控制器如图 4 所示:

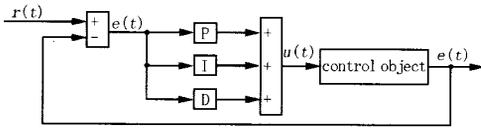


图 4 传统 PID 控制器框图

Fig. 4 Block diagram of the conventional PID controller

图 4 所示 PID 控制器的等效表达式如下:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

式(4)的离散化表达式为:

$$u_{PID}(k) = K_p e(k) + K_I T \sum_{n=1}^k e(n) + \frac{K_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (5)$$

为克服控制系统中的一拍延时,可用下面简单的线性预测算法:

$$e(k) = e(k-1) + [e(k-1) - e(k-2)] \quad (6)$$

当前控制周期的误差信号预测值由它前两次的误差值确定,将式(6)带入式(5)有:

$$u_{PID}(k) = [2K_p + 2K_I T + K_D/T]e(k-1) - [K_p + K_I T + K_D/T]e(k-2) + K_I T \sum_{n=1}^{k-1} e(n) \quad (7)$$

由于重复控制环节相当于积分环节,因此在设计预测 PID 环节时取消式(7)中的积分环节,则表达式变为:

$$u_{PID}(k) = K_1 e(k-1) + K_2 e(k-2) \quad (8)$$

本方案中  $K_1 = 1.033$ ,  $K_2 = -2.523$ ,预测 PID 控制器闭环系统控制框图如图 5 所示:

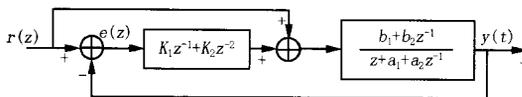


图 5 预测 PID 闭环系统控制框图

Fig. 5 Block diagram of the closed-loop system using the predictive PID controller

图 5 所示系统的闭环传递函数为:

$$G_{PID}(z) = \frac{b_1 z^3 + (b_1 K_1 + b_2) z^2 + (b_1 K_2 + b_2 K_1) z + b_2 K_2}{z^4 + a_1 z^3 + (a_2 + b_1 K_1) z^2 + (b_1 K_2 + b_2 K_1) z + b_2 K_2} \quad (9)$$

利用 MATLAB 绘制其波特图如图 6 所示,原

系统在自然特征频率处的谐振峰值降到 -3 dB 以下,并在高频段呈现较大的衰减特性。由于控制系统采用了多种控制方法,在单独设计预测 PID 控制部分的参数时,  $K_1$  和  $K_2$  先设置得小些,保证系统稳定即可,等加入重复控制后再适当增加  $K_1$ 、 $K_2$ ,以提高动态性能,但必须以系统在任何负载条件下都能稳定为前提。

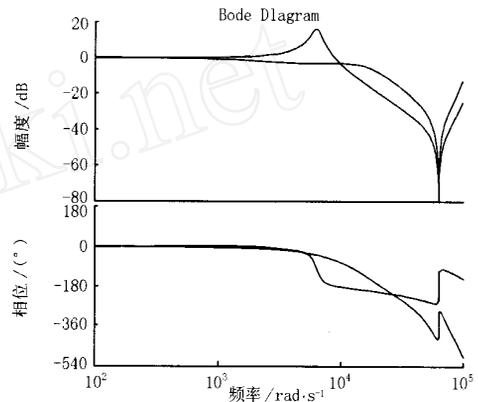


图 6 预测 PID 闭环控制系统 Bode 图

Fig. 6 Bode plot of the closed-loop system using the predictive PID controller

重复控制是目前用于逆变电源输出电压波形校正的一种成熟的控制技术,可有效地降低电压波形畸变率和稳态误差,但该控制方法很难兼顾动态指标。由于重复控制中存在周期延迟因子  $z^{-N}$ ,控制指令并不是立即输出给系统,而是要滞后 1 个基波参考周期后才输出。这样,如果系统内部出现扰动,消除扰动对输出的影响也至少需要 1 个参考周期。扰动出现后的 1 个参考周期内,控制系统对扰动不产生任何调节作用,这 1 个周期系统近乎处于开环控制状态。因此,重复控制系统的动态响应速度是非常慢的。

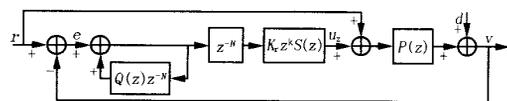


图 7 重复控制 SPWM 逆变器系统框图

Fig. 7 Block diagram of the repetitive controlled SPWM inverter system

图 7 中  $r$  为电压指令;  $v$  为输出电压;  $u_r$  是重复控制器叠加于指令  $r$  之上的校正量,重复控制器除内模外的各环节简介如下:

- 1)  $z^{-N}$ ,周期延迟环节。使本周期的误差信息从下一周期才开始影响校正量  $u_r$ ,它使得超前环节的设置成为可能。

2)  $S(z)$ , 补偿器。作用是改造对象特性, 以适应重复控制的要求。主要有以下 3 方面的作用: 将对象中低频段增益校正为 1, 使  $K_r$  的调整范围归一化; 抵消对象较高的谐振峰值, 使之不破坏稳定性; 增强前向通道的高频衰减特性, 提高稳定性和抗高频干扰能力。

3)  $z^k$ , 超前环节 (其中  $k$  可称为超前步长)。作用是抵消补偿器和对象的相位滞后。

4)  $Kr$ , 比例系数。确定矫正量  $u_r$  的幅值。

内模中的  $Q(z)$  是为克服对象模型不精确的影响, 即增强系统鲁棒性而设置的滤波器或 1 个小于 1 的常数。它使该内模成为 1 个准 (周期) 积分环节。本方案中  $Q(z) = 0.95$ ,  $Kr = 0.9$ ,  $k = 13$ ,

$$S(z) = S_1(z) \cdot S_2(z) = \frac{0.1219z + 0.0817}{z^2 - 1.0976z + 0.3012} \cdot \frac{z^8 + 2 + z^{-8}}{4} \quad (10)$$

逐周期积分环节的离散化表达式为:

$$x(z) = e(z) + Q(z) x(z) z^{-N} \quad (11)$$

则  $x(k) = e(k) + Q(z) \cdot x(k - N)$ , 取  $Q(z) = 0.95$ , 则  $x(k) = e(k) + 0.95 \cdot x(k - N)$ 。

由于本方案中采样频率为 20 kHz, 则  $N = 400$ , 程序中设置大小为 400 的数组用于存放重复控制的逐周期积分值。改变超前步长  $k$  值, 将影响该数组值的变化, 满负载时调整  $k$  值使输出电压过零点的误差积分值接近零即可。

补偿器  $S(z)$  分 2 部分, 低通滤波器  $S_1(z)$  和陷波器  $S_2(z)$ , 由波特图 8、9 可知,  $S(z)$  对原系统自然特征频率处有很明显的衰减 (-20 - 30 dB), 增大了系统空载阻尼, 增强了系统稳定性。

$S_1(z)$ 、 $S_2(z)$  幅频和相频曲线如图 8、9 所示。

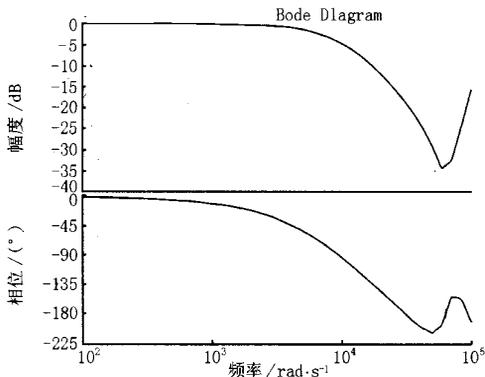


图 8  $S_1(z)$  Bode 图

Fig. 8 Bode plot of  $S_1(z)$

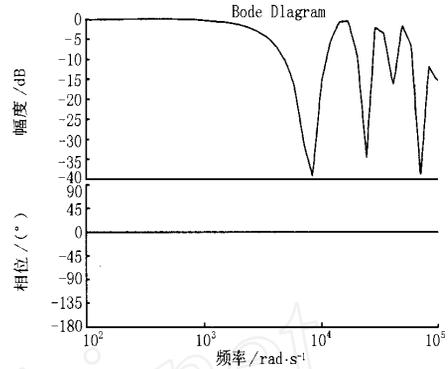


图 9  $S_2(z)$  Bode 图

Fig. 9 Bode plot of  $S_2(z)$

$S_1(z)$  和  $S_2(z)$  串联后的幅频和相频曲线以及  $S_1(z) S_2(z) P(z)$  串联后的幅频和相频曲线如图 10、11 所示:

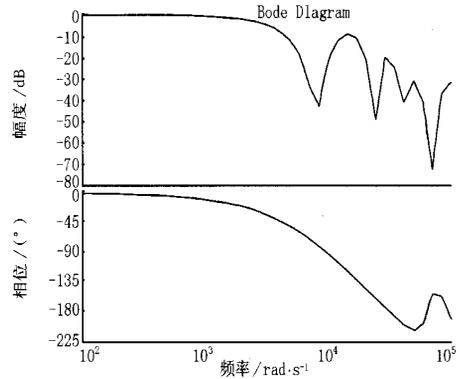


图 10  $S_1(z)$ 、 $S_2(z)$  Bode 图

Fig. 10 Bode plot of  $S_1(z)$  and  $S_2(z)$

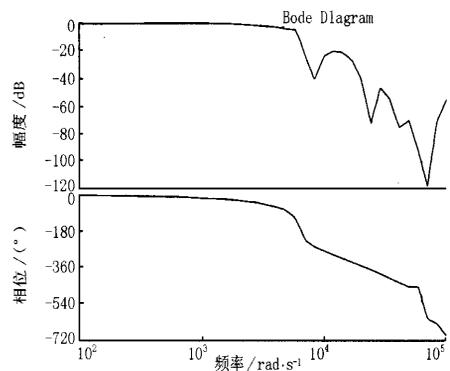


图 11  $S_1(z)$ 、 $S_2(z)$ 、 $P(z)$  Bode 图

Fig. 11 Bode plot of  $S_1(z)$ ,  $S_2(z)$  and  $p(z)$

算法如下:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = z^{k-N} S_1(z) S_2(z) = \frac{c_1 z + c_2}{z^2 - d_1 z - d_2} \cdot \frac{z^{(8+k-N)} + 2z^{(k-N)} + z^{(k-8-N)}}{4} \quad (12)$$

则:

$$y(k+1) = d_1 \cdot y(k) + d_2 \cdot y(k-1) + [c_1 \cdot x(k+21-N) + c_2 \cdot x(k+20-N) + 2 \cdot c_1 \cdot x(k+13-N) + 2 \cdot c_2 \cdot x(k+12-N) + c_1 \cdot x(k+5-N) + c_2 \cdot x(k+4-N)] / 4$$

重复控制立足于提高逆变器系统的稳态指标,尤其是减小周期性负载扰动导致的输出电压的谐波畸变率。预测 PID 控制和状态反馈控制用于提高逆变系统的动态指标,缩短调节时间,减小系统超调,抑制系统震荡。为进一步减小控制误差和提高系统的稳定性,控制环节中引入了前馈控制,通过将直流电压和负载电流的变化在前馈量中进行补偿,取得了很好的控制效果。系统框图如图 12 所示:

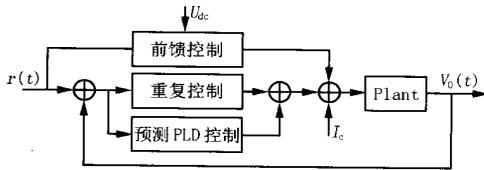


图 12 控制系统框图

Fig. 12 Block diagram of control system

### 3 实验结果

实验主电路参数:

直流电压,400 V;输出电压,220 V/50 Hz;额定功率,1.6 kW;输出滤波器参数, $L_f = 1 \text{ mH}$ ,  $C_f = 25 \mu\text{F}$ ;输出隔离变压器, $N = 1:1$ ;开关频率,10 kHz;采样频率,20 kHz。

主要技术指标要求:

稳态误差,220 Vac  $\pm 2\%$ ;动态超调,220 Vac  $\pm 5\%$ ;电压谐波畸变率, $< 1\%$ 。

1) 电压谐波畸变率  $< 1\%$  (如图 13、14 所示)

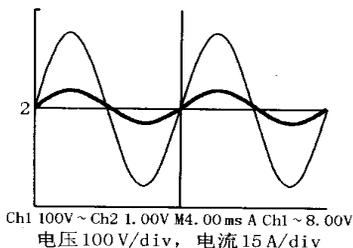


图 13 阻性负载电压电流波形

Fig. 13 Output voltage and load current waveforms under resistive load

2) 负载切换时电压超调  $< 5\%$  (如图 15、16 所示)

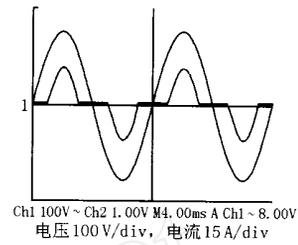


图 14 整流性负载电压电流波形

Fig. 14 Output voltage and load current waveforms under rectifier load

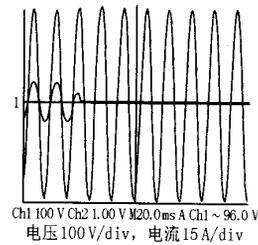


图 15 满载到空载切换

Fig. 15 Output waveforms operating from no load to rated resistive load

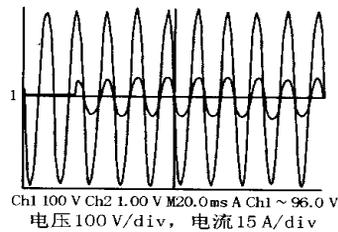


图 16 空载到满载切换

Fig. 16 Output waveforms operating from rated resistive load to no load

3) 软启动无超调(如图 17、18 所示)

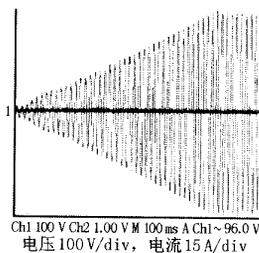


图 17 空载软启动

Fig. 17 Output waveforms of soft-start under no load

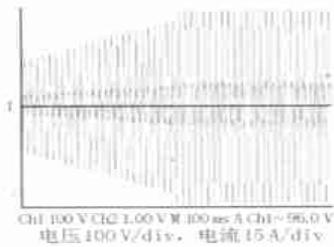


图 18 满载软启动

Fig. 18 Output waveforms of soft-start under rated resistive

#### 4) 稳态误差 < 2 % (如图 19 所示)

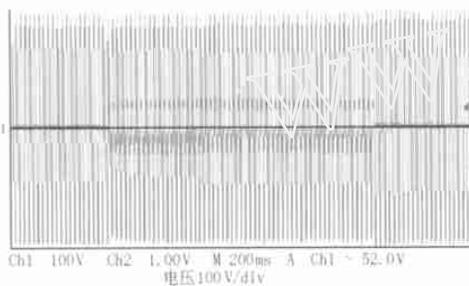


图 19 满载/空载切换电压波形

Fig. 19 Output waveforms operating between rated resistive load and no load

## 4 结论

本文介绍了基于高性能数字信号处理器 (DSP)

### Study of inverter supply device with DSP-based control

CHEN TianJin, YAO Wei-zheng

(XI Power Company Limited, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** This paper presents a full digital control scheme for inverter power supply based on high-performance DSP. The controller inherits the merits of repetitive controller, predictive PID controller and feedforward control and can minimize the harmonic distortions of output voltage resulted from nonlinear cyclic loads and overshooting under step loads. Experimental results for a single-phase SPWM inverter demonstrate the good performance of the adopted control scheme under all types of loads.

**Key words:** DSP; predictive PID; repetitive control; feedforward control

(上接第 38 页 continued from page 38)

盛四清 (1965-), 男, 副教授, 主要研究方向为智能技术

### Study of intelligent system for the setting calculation of relay protection on local power network

WU Chen-xi<sup>1</sup>, SHENG Si-qing<sup>1</sup>, DU Zhen-kui<sup>2</sup>, XONG Zhong-xing<sup>1</sup>

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Wuji Electric Power Bureau, Wuji 052460, China)

**Abstract:** An intelligent system of relay protection setting calculation combined with database is introduced in this paper. It is composed of four modules in the following: topology analysis, short circuit calculation, break point search, and setting calculation. It predigests the workload of the relay protection engineers, settles the matters of the coordination among the protective relays. Based on the Visual Basic 6.0 and Ms-access, the software for setting calculation of relay protection is developed, and the parameters of network and relay protection, and the setting value management system are established. The proposed system is strong as a whole, and is easy to be operated.

**Key words:** topology analysis; graphic algorithm; setting calculation of relay protection; intelligent system

的逆变电源全数字化控制方案,该方案结合了重复控制、预测 PID 控制和前馈控制的优点,能减小逆变电源在非线性周期负载下的输出电压谐波畸变率和阶跃负载时的超调量,并能减小输出电压的稳态误差。通过对 1.6 kVA 逆变电源实验装置的实验,实验结果显示所采用的全数字化控制方案能同时保证逆变电源在各种负载条件下的各项动态和稳态指标满足要求。本方案为基于高性能 DSP 的全数字化设计,能实现 UPS 的智能化控制和逆变器并联控制等复杂控制。

#### 参考文献:

- [1] Rech C, Pinheiro H. Analysis and Design of a Repetitive Predictive — PID Controller for PWM Inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2001, 3: 986-991.
- [2] ZHANG Kai, KANG Yong. Repetitive Waveform Correction Technique for CVCF-SPWM Inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2000, 1: 153-158.

收稿日期: 2003-07-29; 修回日期: 2003-09-08

#### 作者简介:

陈天锦 (1973 -), 男, 工学硕士, 现从事电力电子产品的设计开发工作;

姚为正 (1967 -), 男, 工学博士, 现从事大功率电力电子技术的研究工作。

在电力系统中的应用、电力系统故障诊断与事故处理等。