

基于 DSP 的有源电力滤波器的实现

钟庆¹, 吴捷¹, Eric K. W. Cheng², 杨金明¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 香港理工大学电机工程学系, 中国 香港)

摘要: 为了将自抗扰控制算法应用于有源电力滤波器, 研究了基于 DS1104 控制板的并联型有源电力滤波器的硬件设计和控制算法实现问题。选定智能功率模块 (IPM) 为有源电力滤波器的主电路之后, 给出了系统硬件的总体结构和布局。采用 DS1104 控制板, 可以直接利用 MATLAB/ Simulink 软件, 设计系统的自抗扰控制框图, 并能将控制框图自动转换成源代码, 下载到 DSP 中运行, 实现系统的自抗扰控制。实验结果验证了硬件实现方式的正确性, 并且由于 DS1104 的卓越性能和友好的工作界面, 可以简化系统的实现、降低设计成本。

关键词: 数字信号处理器; 有源电力滤波器; MATLAB/ Simulink

中图分类号: TM502 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)11-0037-04

0 引言

有源电力滤波器的检测控制系统有如下两个特点: 一是检测处理的变量多, 需要检测系统三相电压、系统电流或者负载电流, 在电压检测方法中还需要检测负载的电压。为了实现良好的控制效果, 有时还需要检测逆变器的输出电流。此外, 为了控制直流侧电压, 还需要检测直流电容的电压, 以实现闭环控制; 二是计算工作量大, 在检测控制过程中要进行大量的乘法和除法运算, 尤其是对于复杂的控制算法, 还需要有微分或积分运算, 需要对各项采样数据进行递推存储。这都需要处理器能有很快的计算速度, 尽量减少计算时延, 实现实时补偿^[1]。

数据信号处理器 (DSP) 从 80 年代初发展到现在, 已经经历了 4 代, 发展速度极快。DSP 是一种特别适合数字信号处理的微处理器, 它的最大特点是速度快、精度高、稳定性好, 是为实时实现各种数字信号处理和其它精密计算的应用而设计的, 并为这些应用提供了如快速傅里叶变换、数字滤波、频率合成及卷积等信号处理算法及其它良好的软、硬件工具。以上这些优点可以满足实时、快速地完成有源电力滤波器的控制和采样计算的要求。

本文基于 dSPACE 公司的 DS1104 R&D Control Board 设计了一套简单实用的有源电力滤波器实验装置, 并在这套实验装置的基础上验证了自抗扰控制器算法在 APF 中的应用^[2]。

基金项目: 广东省“十五”科技重大专项资助项目 (A1050202); 国家重点基础研究专项经费 (1998020308) 资助项目

1 系统的总体构成

系统是一个三相三线系统, 采用三相整流桥作为非线性负载, 产生谐波。有源电力滤波器采用智能功率模块 (IPM) 作为主电路。控制器采用 dSPACE 公司的 DS1104 R&D Control Board 的 32 位 DSP 进行控制, 通过 DSP 的 PWM 脉冲输出信号驱动主电路的开关动作。在主电路与控制回路之间由光耦电气隔离。系统利用 HALL 元件测量电源电流、负载电流、补偿电流、电源电压和直流侧电压的瞬时值, 并输入 DSP 的数模转换器 (ADC)。系统的总体结构框图如图 1 所示。

系统主要由三相交流电源、电力电路、负载和控制器 4 个部分构成。三相交流电源采用的是工频 50 Hz 电源, 经过三相交流调压器给系统供电。负载由自制电感以及电阻负载构成。控制器由 PC 和插在 PCI 槽的 DSP 构成, 通过 A/D, I/O 和 PWM 输出与系统相联。下面将会对电力电路板——这一实验装置的主要部分进行详细的说明, 电力电路由三块电路板和—一个供电用的直流电源组成。负载电路板包括一个三相空气开关, 用来开断系统与电源之间的联接; 6 个二极管组成的三相整流桥, 联接到所带的负载; 另外还包括 6 个电流传感器和 2 个电压传感器, 分别用来测量电源电流、负载电流、补偿电流、系统电压和直流侧电容电压。供电用的直流电源有 +5 V、+15 V 和 -15 V 输出, 其中 ±15 V 输出为电流传感器和电压传感器供电, +5 V 输出通过 4 个 DC-DC 变换器变为 4 个独立的 +15 V 直流电源, 为 PWM 驱动电路供电和光电耦合器供电 (上 3 个桥

臂必须使用 3 个独立直流电源供电,下 3 个桥臂由 1 个直流电源供电)。APF 电路板回路中包括有 1 个 IPM 模块(上面安装有散热片),其直流侧连接有 2 个串联的电解电容,交流侧并联在系统的母线上,作为谐波的通路;另有 6 个光电耦合器,起一次侧和二

次侧的电气隔离作用,将控制回路和主回路分开。DSP I/O 电路板与 PC 机内部的 DSP 端口相联接,将采样的电流和电压数值输入到 DSP,并将 PWM 信号输出到 IPM 的驱动端口中。

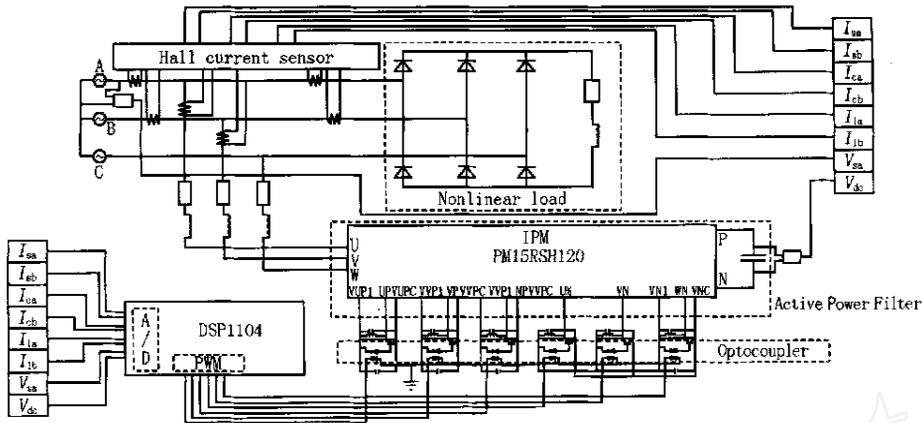


图 1 试验装置总体结构图
Fig. 1 Overall structure of testing device

2 DS1104 简介

本系统的设计采用的是由 dSPACE 公司提供的专门进行研发工作、能处理快速控制问题的新型 DSP——DS1104 R&D Control Board。它有基于 PowerPC 技术的主处理器和一整套的 I/O 口,能够应用于各种工业控制领域。对于工业控制和高校试验来说,DS1104 R&D Control Board 是一个性价比十分理想的装置。另外它还提供全图形化的界面和基于 Simulink/ Stateflow 的编程,能够轻松实现复杂的控制算法。它能够安装在任何一台 PC 机的 PCI 槽中,具有很好的兼容性。它的技术参数主要有:

- 1) 需要 5 V, 2.5 A / - 12 V, 0.2 A / 12 V, 0.3 A 电源和 1 个 32 位 5 V 的 PCI 插槽,功耗为 18.5 W。
- 2) 主处理器采用 MPC8240, PowerPC 630e 芯片,计算主频高达 250 MHz, 64 位浮点运算,具有 32 k 的高速缓存。
- 3) 1 个 32 位递减计数的高速采样时钟, 4 个 32 位的通用时钟, 64 位的计时器。
- 4) 32 M SDRAM, 8 M 闪存。
- 5) 有多种中断方式,如计数器中断、串口中断、从 DSP 中断、ADC 中断和 4 个外部输入中断等。
- 6) 多路复用的 4 个 16 位的 ADC,输入电压范围为 ± 10 V,采样时间可达 2 μ s, > 80 dB 的信噪比; 4 个 12 位的 ADC 通道,输入电压范围为 ± 10 V,采

样时间可达 2 ns, > 65 dB 的信噪比。

- 7) 8 通道 16 位模拟输出,输出电压范围 ± 10 V。
- 8) 20 位的数字 I/O 口,输出电流 ± 5 mA,一个串口输出。
- 9) 从处理器 (Slave DSP)。采用德州仪器公司的 TMS320F240 芯片 (16 位浮点运算, 20 MHz 计算主频) 具有三相 PWM 输出和 4 个单相 PWM 输出,具有频率测量 (F/D) 和发生 (D/F) 功能, 14 个数字 I/O 口 (TIL), 输出电流可为 13 mA。

DS1104 的具体结构如图 2 所示^[3]。

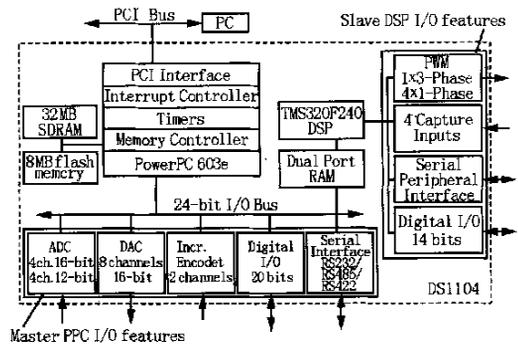


图 2 DS1104 的结构图

Fig. 2 Architecture of the functional units of the DS1104

3 基于 MATLAB 的控制算法实现与结果

dSPACE 公司提供的 DS 系列 DSP 的最大优点

在于它能与 MATLAB 中的 Simulink 有很好的接口。利用 dSPACE 的开发程序 ControlDesk, 可以将 Simulink 框图直接译成 DSP 执行的目标码, 是一个集

成科学计算、数学计算、图象处理和友好的可视化界面的高级编程语言, 对于算法需要做频繁修改的试验提供了极大的方便^[4]。

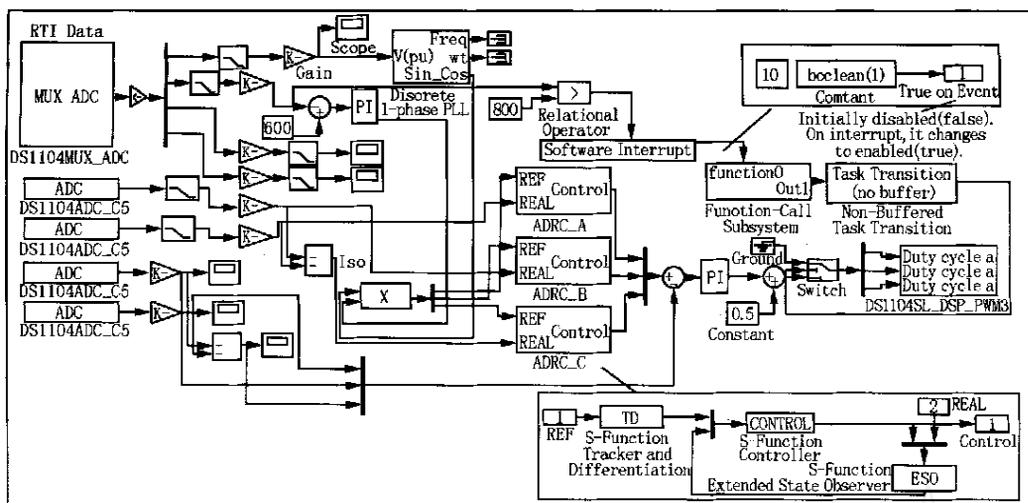


图3 ADRC 实验系统的 Simulink 框图

Fig. 3 Simulink block diagram of ADRC experimental system

根据文献[2]给出的算法, 用 MATLAB 中的 S-Function 编写 ADRC 中的 TD、ESO 和 NSLEF3 个组成部分, 并通过实验对该算法进行验证。APF 的 ADRC 控制系统的 Simulink 框图如图 3 所示, 利用 MATLAB 中的 RTW 将该控制框图转为代码, 下载到 DS1104 中运行, 则可实现系统控制策略。

为了保护系统安全运行, 在软件设计过程中应用软件中断对系统进行保护, 当直流侧电压过高, 超过上限(此处上限为 800 V)时, 软件保护动作, 将自动切除系统的 PWM 输出, 达到保护实验系统的作用。

实验结果由图 4 给出。其中(a)为负载电流, 是由装置中的非线性负载部分——三相整流桥产生的, 其中含有大量的谐波成分; (b)是经过 APF 补偿之后的系统电源电流; (c)为 APF 的补偿电流。实验结果表明, 实验装置对非线性负载产生的谐波有很好的抑制作用, 系统的电源电流基本是一个和电压同相位的正弦波形, 能够同时达到谐波抑制和无功补偿的功能, 与文献[2]中的理论分析和仿真结果相符合。

ADRC 算法可以解决一类不确定性对象的控制问题, 具有很强的鲁棒性和适应性, 但其内部包含有复杂的非线性函数, 其中的计算复杂。采用基于 DS1104 设计的控制器, 能够将算法集成在 MATLAB 的 Simulink 中, 应用 S-Function 对其中的主要构成

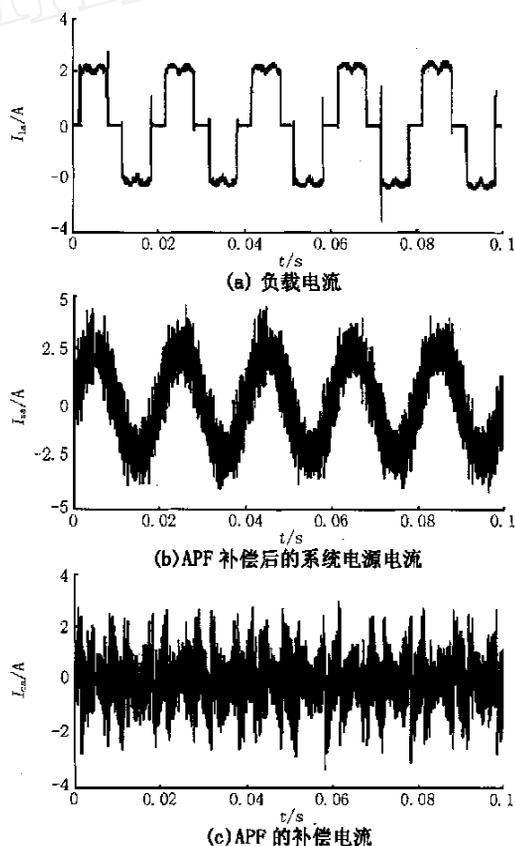


图4 ADRC 实验结果

Fig. 4 Experimental results of ADRC

部分进行编程处理, 能够实现控制算法的可视化, 不

需要对源代码进行修改,可以大大缩减装置的开发周期和难度。

4 结论

本文介绍了基于 DSP 的有源电力滤波器实验系统的设计过程,详细对系统的 3 个主要组成部分进行了说明,由于 DSP 给出的控制信号是数字式的,没有模拟信号,故该系统是一个全数字控制系统。与普通的 DSP 相比,DS1104 R&D Control Board 具有更高的运算速度和更好的性能,能够实现现象 ADRC 之类的复杂算法。同时,在软件实现上,DS1104 具有与 MATLAB/ Simulink 的接口,能够自动将 Simulink 的控制框图生成 DSP 使用的代码,还具有对系统各种状态的实时检测功能和友好的图形化界面,能够只通过软件的修改实现不同的控制策略。DS1104 本身具有良好的性能价格比,无论在实际应用和研究开发中,都将会拥有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 孙建军,王晓峰,杨洪海,等(SUN Jian-jun, WANG Xiaofeng, YANG Hong-hai, et al). 基于双 DSP 结构的有源电力滤波检测及控制系统 (Detecting and Control System of

Active Power Filter Based on Double Digital Signal Processors) [J]. 武汉大学学报 (Engineering Journal of Wuhan University), 2001, 34(3): 55-59.

- [2] 钟庆,吴捷,徐政 (ZHONG Qing, WU Jie, XU Zheng). 自抗扰控制器在并联型有源滤波器中的应用 (Application of the Automatic Disturbance Controller in the Shunt Active Power Filter) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(16): 22-25, 44.
- [3] dSPACE. DS1104 R&D Control Board Feature Reference, Release 4.3[M]. dSPACE Co., Ltd, 2002.
- [4] Brag R A M, Lemos F A B, Libano F B. Development Environment for Control Strategies of Hybrid Active Power Filters Using Matlab and dSpace DSP [J]. Power Technology Proceedings, IEEE Porto, 2001, 2: 6-11.

收稿日期: 2003-09-15; 修回日期: 2003-11-17

作者简介:

钟庆(1978-), 博士, 主要研究方向为控制理论与应用、电力电子中的控制问题;

吴捷(1936-), 教授, 博导, 主要研究领域为控制理论与应用、电力电子中的控制问题、新能源的应用等;

Eric K. W. Cheng(1962-), 教授, 主要从事电力电子技术及其控制问题研究。

The application of active power filter based on DSP

ZHONG Qing¹, WU Jie¹, Eric K. W. Cheng², YANG Jir-ming¹

(1. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: In order to realize the auto-disturbance rejection control (ADRC) strategy in active power filters (APF), this paper expounds the implementation of the hardware design and control strategy of shunt APF based on DS1104 R&D control board. The intelligent power module (IPM) is taken as the solid-state component of the APF. Then, the overall structure and layout are illustrated in the paper. After that, the technical details of DS1104 are given. The ADRC strategy of the experimental system is realized by MALAB/ Simulink. The software of DS1104 can generate the code from the block diagram model automatically and download the code to target hardware directly to implement hardware-in-the-loop (HIL). Experimental results show the feasibility of the hardware. DS1104 provides an easy use, integrated environment to design quickly without lengthy hand coding and debugging.

This project is supported by Guangdong Key Scientific Fund (No. A1050202) and National Key Research Fund (No. 138020308).

Key words: DSP; APF; MATLAB/ Simulink

(上接第 32 页 continued from page 32)

(1. Sifang Institute of North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The distributed capacitance to earth is high in large-scale generator, so it calls for the alarming sensitivity on the stator single phase-to-ground fault protection. In this paper, fuzzy pattern-recognition-based stator ground fault protection scheme is put forward. Employing fuzzy integrated discrimination theory and genetic algorithm, the scheme judges more than one parameter integrally on stator ground fault and optimizes subjection coefficients respectively. Simulations on stator winding ground fault of a hydro generator and a steam generator demonstrate that the proposed scheme is superior to the conventional ones in reliability and sensitivity.

Key words: ground fault protection; fuzzy logic; pattern recognition; genetic algorithm