

基于 DSP 的新型静止无功发生器控制器的研制

李海鹏, 牛培峰

(中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 电力系统无功动态准确补偿是在对系统参数准确测量的基础之上建立的, 而传统单片机由于受运算速度和精度的限制, 难以完成电力系统对精确性和实时性的要求。该文详细介绍了一种基于定点数字信号处理器 (DSP) TMS320LF2407A 的新型静止无功发生器控制器, 克服了传统单片机计算速度慢、精度低的缺陷。同时, 为实现装置应有的功能, 设计并制作了较为完整的控制电路及其外围设备的硬件电路包括采样电路、保护电路及通讯电路。此外, 详细介绍了控制器软件设计方案。

关键词: 无功补偿; 静止无功发生器 (SVG); 数字信号处理器; 微控制器

中图分类号: TM714.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)10-0057-05

0 引言

供电系统常由于感性负载过重, 造成感性无功过大, 电能质量下降, 功率因数过低。为提高电能质量和功率因数, 维护电力系统安全、稳定地运行, 常需在低压侧装设无功补偿装置。常规低压无功补偿装置的主控制器多采用 8 位或 16 位单片机作为主控制器, 通过采集低压电网的电压、电流参数, 实时计算电网的无功功率、无功电流或功率因数, 然后根据相应的控制策略实现对电网的无功补偿。这些以传统的单片机作为控制器的系统由于受硬件资源与速度的限制, 采样精度不高, 每周波的采样点少, 只能选择计算量小的算法, 结果限制了测量的精度, 无法实现对电网的实时动态无功补偿。而在新型静止无功发生器 (SVG) 中, 控制器是其核心部件之一, 它通过产生并控制驱动开关器件的脉冲来控制 SVG 的各种行为, 完成 SVG 的控制任务。SVG 控制器必须有控制速度快、控制精度高、快速保护等特点。因此, SVG 控制器必须功能强大、结构完善、能够适用于各种复杂算法并且运算速度快、计算精度高。本文设计的基于 TI 公司 DSP 芯片 TMS320LF2407A 的新型静止无功发生器控制器弥补了以往控制器的不足, 并且硬件电路简单、实时性好、功能完善、有较高的可靠性和抗干扰能力。

1 主控制器的设计与实现

SVG 主控制器的作用是利用所收集的电力系统状态信息, 根据一定的控制规律确定 SVG 逆变器

输出电压与系统电压间的相位差, 从而控制 SVG 向系统发出 (或吸收) 的无功功率, 以达到预定的控制目标。针对输电系统的控制目标是维持系统节点电压、提高系统暂态稳定性能、增强系统阻尼; 对于配电系统, 控制目标主要是抑制用户端电压闪变、提高系统功率因数、改善系统电压质量等。具体的控制过程如下: A/D 转换器将 SVG 出口处的三相电压和三相电流转换成数字量, 主处理器利用瞬时值算法对上述电流电压信号加以处理, 计算出瞬时无功和瞬时电压有效值的大小, 然后根据控制目标控制 SVG 输出电压相对于系统电压的相角差, 使 SVG 达到上述目标。

在本文设计的新型静止无功发生器控制器中, 采用 TI 公司的 TMS320LF2407A DSP 作为主处理器, 该系列 DSP 的体系结构专为实时信号处理而设计, 将实时处理能力和控制器外设功能集于一身, 为控制系统应用提供了一个理想的解决方案。

1.1 硬件实现电路

控制器硬件原理如图 1 所示, 控制器采用单 CPU 结构。控制系统由信号调理板和控制主板两部分构成。信号调理板将电压和电流及相位信号处理后传给控制主板; 在控制主板上, 由 TMS320LF2407A 负责进行数据采集、数据实时处理、数据显示、与上位机通讯及对 IGBT 进行控制。TMS320LF2407A 将 A/D 采集的数据进行实时处理, 送入 LCD 显示各种电量参数, 同时根据采样回来的数据判断是否发送控制命令。通过按键, 操作者可以设置无功门限延迟、过压门限、欠流门限等。LCD 可显示功率因数、电压、电流、谐波电压、谐波电流、有功功率和无功功率等。该控制器主要有以

基金项目: 青岛市“十五”重点攻关项目 (02-1-kj-gg-14)

下功能:

1) 脉冲同步。根据从电网取回的同步脉冲,产生出与电网电压同步的脉冲信号,使 ASVG 产生的阶梯波电压与电网电压保持同步,从而使 ASVG 正确并网运行。

2) 控制 ASVG 行为。这包括电流跟踪、提供规定的超前或滞后无功电流、控制直流侧电容电压保持基本稳定、保证该电压在 IGBT 的安全工作范围之内。

3) 产生触发脉冲。产生一定规律的触发脉冲,经门极驱动电路放大后控制 IGBT 的导通与关断,使 ASVG 产生正确的阶梯波电压。

4) 保护功能。当 ASVG 运行在过压、过流或其它一些不正常的情况下,控制器发出封锁脉冲封锁 IGBT,使 ASVG 停止工作,防止发生危险。

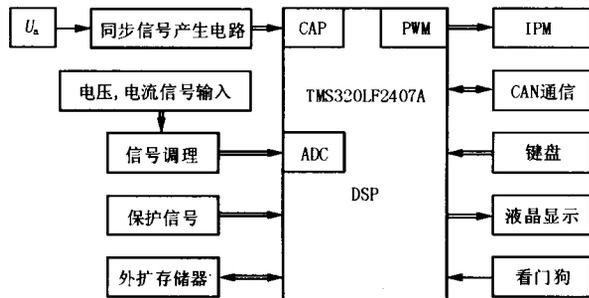


图 1 控制器硬件原理图

Fig 1 Block diagram of hardware circuit of controller

1.1.1 信号调理电路的设计

信号调理电路主要完成强电信号与弱电信号之间的隔离和变换,该电路包括互感器信号转换电路、电平提升电路和同步信号产生电路。

1) 互感器信号转换电路

TMS320LF2407A 内部设有单极性 10 位的 A/D 模块,其 A/D 转换的域值电压为 3.3 V,其最大转换时间为 $6.6 \mu s$ ^[1]。因此对于选择的交流传感器,其采样精度应与 TMS320LF2407A 的 A/D 采样精度相匹配。另外,电压、电流传感器的功用主要在于从主电路上适当的支路或节点处对其电压或电流值进行采样,并将控制电路与主电路进行隔离。因此,传感器的选取就要考虑到主电路及控制电路的电压(或电流)等级。对于容量为 100 kvar,电压等级为 380 V/220 V 的三相静止无功发生器(ASVG),所需的电流参数为系统对电网的输出无功电流参数,其电流等级可以按 100 kvar/380 V 的 2 倍来计算,约为 526 A。因此,选用北京星格公司研制的精密电压传感器 SPT304 和精密电流传感器 SCT2601。

SPT304 是一款电压输出型精密电压传感器,其额定输入为 380 V,额定输出为 1.25 V,线性范围为 0 ~ 450 V,最大输入电压为 570 V,精度为 0.2% (-40° ~ +75°),相移 5°。

SCT2601 是一款电流输出型精密电流互感器,其额定输入为 600 A,额定输出为 100 mA,线性范围为 0 ~ 720 A,非线性度 0.1%,相移 0.5°(补偿前)。推荐使用电路如图 2 所示,互感器副边电路为电流/电压变换电路,调节图中反馈电阻 R 和 r 的值可得到所需的电压输出 (-1.25 V ~ +1.25 V)。电容 C2 是 400 至 1 000 pF 的小电容,用来去耦、滤波和相位调节。

对于直流侧电压传感器的选取,考虑到系统交流侧最高电压等级为 380 V,因此,直流侧最高电压等级为:

$$U = 380 \times 1.414 = 537.3 \text{ V}$$

其电压等级为 500 V 以上,因此,选择 0.2 级直流电压传感器 HV201E1,其一次侧电压等级为 800 V,输出标称值为 3.3 V,采样精度为 0.2% (-10° ~ +50°)。

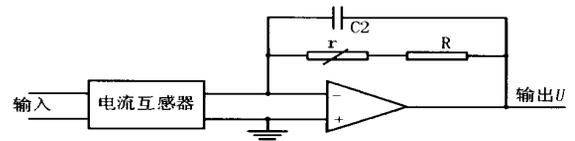


图 2 传感器信号调理电路

Fig 2 Sensor signal processing circuit

2) 电平提升电路

因目标信号为交流信号,而经过交流变送器采样得出的信号也为交流信号(0 ~ 1.25 V),而系统 CPU 的 A/D 输入电平要求为 0 ~ 3.3 V,为满足单极性 A/D 采样的要求,需要对互感器的输出信号进行电平转换,使其波形处于 0 ~ +3.3 V 之间。互感器输出交流信号的电平提升电路如图 3 所示。其为同相求和电路, $U_{out} = U_{in} + 1.25$,则输出电压在 0 ~ 2.5 V 之间变化。

因电平提升电路的输出信号直接作为系统参数传入 DSP,因此,对电压的精确性提出了很高的要求,因此,电平提升电路的参考电压 1.25 V 由 12 位 D/A 芯片 MAX5121 提供。

3) 同步信号产生电路

从 SVG 的工作原理可知,当逆变器的输出电压矢量与电网电压矢量幅值大小相等、方向相同时,连接电抗器内没有电流流动,而 SVG 工作在感性或容性状态都可通过调节以上两个矢量的夹角来进行控

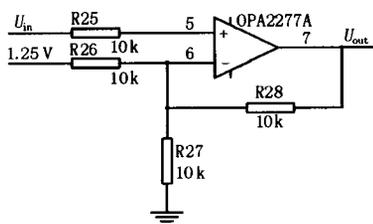


图 3 电平提升电路

Fig 3 Level lifting circuit

制^[2],因此,逆变器输出的电压矢量的幅值和方向的调节都是以电网电压的幅值和方向作为参考的,所以,系统电压与电网电压的同步问题就尤为重要了。

同步信号的产生采用最为简单的过零同步,即对系统三相电压信号进行处理后取一相基波正序电压作为同步信号,当该同步信号过零时作为脉冲发生器的同步点,同时通过测量连续两个正向或负向过零点之间的时间作为周期计算出同步信号的频率。

同步信号产生电路如图 4 所示,由 3 部分组成,第一部分是由电阻、电容组成的 RC 滤波环节,为减少系统与电网的相位误差,该滤波环节的时间常数应远小于系统的输出频率;第二部分由运算放大器 MCP604 构成,实现过零比较;第三部分为上拉拉位电路,满足 TMS320LF2407A 的输入信号要求。

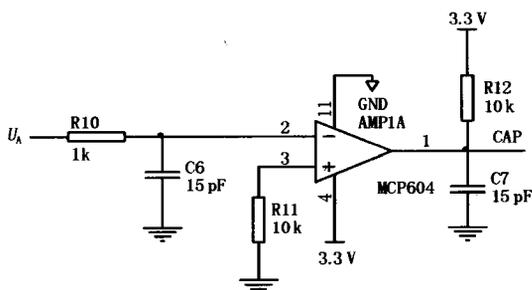


图 4 同步信号产生电路

Fig 4 Synchronizing signal circuit

1. 1. 2 控制主板电路设计

控制主板采用 TMS320LF2407A DSP 作为主控芯片。TMS320LF2407A 模块扩展了两片 64 k × 16 位高速 SRAM (CY7C1021V) 分别作为程序存储器 and 数据存储器,它们分别通过 TMS320LF2407A 的 PS 和 DS 引脚选通。扩展一片 264 k 字节的串行 FLASH 芯片 (AT45DB021B), 一片串行时钟芯片 PCF8583, 一片 12 位 D/A 芯片 MAX5121 和看门狗芯片 MAX823。控制主板主要包括数据采集、重要数据存储、控制脉冲形成、键盘显示和与上位机的串

行通信等功能模块。

1) 采样电路设计

TMS320LF2407A 通过自带的带内置采样保持的 10 位精度的模数转换模块 ADC 将模拟信号转化为数字信号。TMS320LF2407A 模数转换模块 ADC 有 16 个模拟输入通道,一次可执行最多 16 个通道的“自动转换”。最小转换时间 500 ns,可实现对电网的三相电压采样,无需进行相位补偿^[3]。

由于系统对采样电压电流信号有较高的精度要求,所以外扩了一片 12 位精度、具有 SPI 接口并且内含 +1.25 V 基准电压输出的 D/A 芯片 MAX5121。MAX5121 输出的基准电压作为信号调理板电平提升电路的参考电压,满足采样精度的要求。MAX5121 与 TMS320LF2407A 的接口电路如图 5 所示。

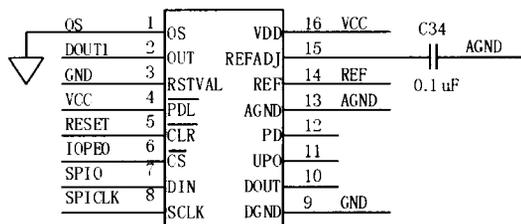


图 5 MAX5121 与 TMS320LF2407A 的接口电路

Fig 5 Interface of MAX5121 and TMS320LF2407A

2) 存储电路设计

由于系统需要存储较大数量的历史数据,其中仅整点数据就有 90 k 字节的容量,故需要大容量的数据存储器,所以选用了 ATMEL 公司研制的串行 FLASH 芯片 AT45DB021B^[4]。

AT45DB021B 是一种串行 FLASH 芯片,它具有 264 k 字节的存储容量。该芯片的控制线比较简单,共 4 根,分别是:芯片选通信号 (CS)、串行输入信号 (SI)、串行输出信号 (SO) 以及串行时钟信号 (SCK)。另外,该芯片的操作由一定的时序保证,抗干扰程度较强,并且有硬件 WP 保护,能可靠地保护数据。

3) 串行时钟芯片 PCF8583

由于无功补偿控制器需要历史记录,所以在系统中必须有时钟基准,即时钟芯片。本系统选用带 I²C 总线接口的日历时钟芯片 PCF8583^[5]。

由于 TMS320LF2407A 芯片没有专用的 I²C 时序引脚,所以用软件来模拟 I²C 总线时序,实现 I²C 总线接口的日历时钟芯片 PCF8583 与 DSP 芯片 TMS320LF2407A 的接口电路及其应用。设计的另一个要点是电池充放电问题,由于 DSP 用 3.3 V 供

电,电池为 3.6 V,所以需要解决在掉电情况下电池只对 PCF8583 供电;而在不掉电情况下 PCF8583 由 3.3V 供电,且电池处于浮充状态的问题。其引脚和 DSP 的连线如图 6 所示,图 6 中的 3 个二极管较好地解决了以上问题。

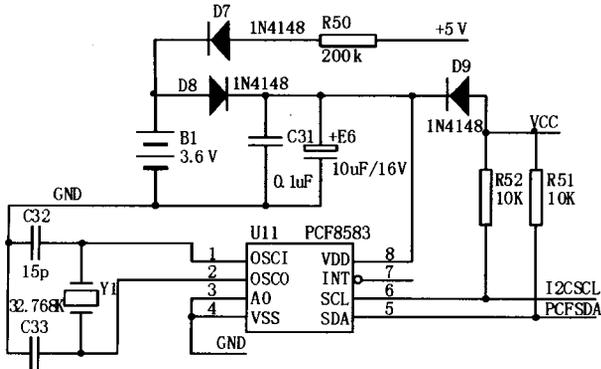


图 6 PCF8583与 TMS320LF2407A 的接口电路
Fig 6 Interface of PCF8583 and TMS320LF2407A

4) 外部看门狗电路

在单片机中,由于外部干扰或硬件设备故障,常常出现程序跑飞问题。为解决这个问题,单片机中常采用看门狗 (WATCH DOG)。TMS320LF2407A 具有看门狗定时器 (WDT) 功能,为保证系统在强干扰下更加可靠地运行,系统设计了一个外部看门狗电路。系统工作时,内外部看门狗电路若能同时启动工作,将使系统对于突发干扰造成的死机问题更容易解决,并可避免 CPU 死机后导致内部看门狗电路不能正常工作的情况。本控制器中选用 MAX823 作为外部看门狗电路。

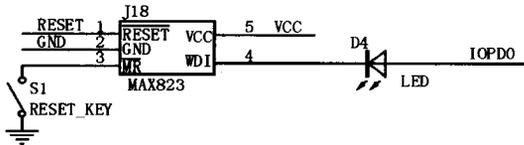


图 7 看门狗电路
Fig 7 Watchdog circuit

5) 通信接口电路

控制器局域网属于现场总线的范畴,它是有效支持分布式控制或实时控制的串行通信网络。在 DSP 芯片 TMS320LF2407A 内部集成符合 CAN2.0B 协议要求的 CAN 总线控制器,其内部集成的 CAN 控制器与其它 CAN 控制器一样,完全支持 CAN2.0B 协议。

对于 TMS320LF2407A 的 CAN 控制器而言,如需实现多个 CAN 节点之间的多点通讯,必须增加 CAN 控制器的驱动能力。本设计中是通过外加 CAN 控制器驱动芯片 PCA82C250T 来实现的。它

能提供总线的差动发送能力和总线对 CAN 控制器的差动接收能力。而对于同一网络内的其它节点也必须添加 PCA82C250T 接口芯片,才能使整个网络的发送和接收功能正常运行。TMS320LF2407A 与 PCA82C250T 接口电路如图 8 所示,电阻 R25, R26, R27 及二极管 D3 组成的电路为电平转换电路,因为 TMS320LF2407A 用 3.3 V 供电,而 PCA82C250T 用 5 V 供电。

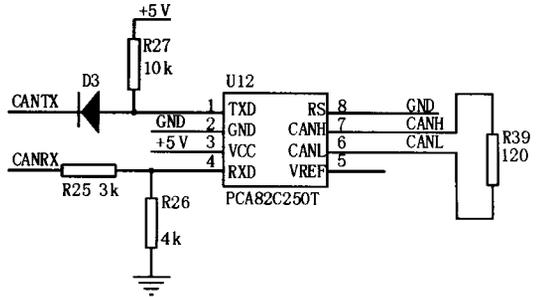


图 8 通信接口电路
Fig 8 Communicating interface circuit

2 控制系统软件设计

系统软件采用 C 语言和汇编语言混合编程,主程序采用 C 语言以增加可读性,子程序采用汇编语言以提高运算效率。控制系统总体流程如图 9 所示。

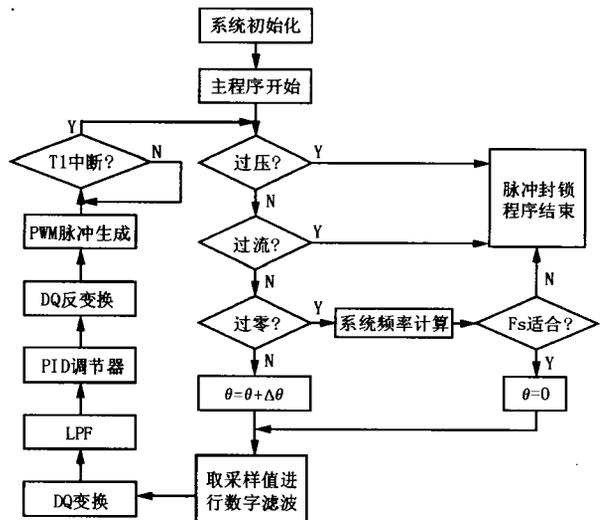


图 9 软件流程图
Fig 9 Flow chart of controlling software structure

软件大体包括以下几个子程序模块:系统保护模块、过零检测模块、数字滤波模块、DQ 变换模块、低通滤波模块、DQ 反变换模块及脉冲生成模块。另外,系统包括以下几个中断子程序:CAP 过零中

断、定时器 T1 下溢中断、CAN 通讯中断和定时器 T2 周期中断、分别完成过零标志置位、周期控制、与上位机通信和 A/D 启动。

3 结论

数字信号处理器芯片 TMS320LF2407A 有很强的数字处理、分析和计算能力。本文设计的新型低压静止无功发生器控制器充分利用了 TMS320LF2407A 的特点,加快了处理速度和精度,能实现各种复杂的算法,并且结合自身高精度的 ADC 模块,使采集回来的数据精度高,实时性好。因此,用 DSP 芯片 TMS320LF2407A 作为主处理器的控制器能更好地满足实时性和精确性的要求。同时,采用 TMS320LF2407A 作为控制芯片,可以减少电路的复杂程度、提高功率密度、降低成本,并且减少因元器件的离散性给调试和批量生产所带来的困难。

参考文献:

[1] TMS320LF/LC240Xa DSP Controllers System and Peripherals[Z]. Texas Instruments, 2001.

- [2] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun Harmonics Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [3] 刘和平,王维俊,江渝. TMS320LF240x DSP C语言开发应用[M]. 北京:航空航天大学出版社,2003.
LIU He-ping, WANG Wei-jun, JIANG Yu C Language Application Based on Digital Signal Processing TMS320LF240x[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003.
- [4] AT45DB021B-2 7 Volt Only DataFlash[Z]. Amel Corporation, 1997.
- [5] PCF8583-Clock/Calendar with 240 ×8-bit RAM [Z]. Philips Semiconductors Corporation, 1997.

收稿日期: 2004-08-27; 修回日期: 2004-11-08

作者简介:

李海鹏(1981-),男,硕士研究生,从事电力电子技术和智能控制的研究;E-mail: lhp32@sohu.com

牛培峰(1958-),男,博士,教授,从事电力电子技术、电力系统自动化和智能控制的研究。

Design of a static VAR generator controller based on digital signal processor

LI Hai-peng, NIU Pei-feng

(Ocean University of China, Qingdao 266071, China)

Abstract: The accurate measurement of power system factors is the basis of accurate power factor compensation. However, traditional microcontroller Unit(MCU) can not complete the requirements of accuracy and real-time in power system. Therefore, the paper introduces a new static VAR generator(SVG) controller, which adopts TMS320LF2407A as main processor. It can compute and measure more quickly and accurately than traditional MCU. Meanwhile, the paper designs and realizes comparatively integrated microcomputer controlled circuit with its peripherals circuit, including sampling circuit, protecting circuit and communicating circuit. In addition, the paper gives the scheme of controlling software structure flow chart.

This project is supported by National Tenth-five Year Technologies R&D Programme of Qingdao (No. 02-1-kj-gg-14).

Key words: reactive power compensation; SVG; DSP; MCU

(上接第 48 页 continued from page 48)

(1 Dept of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2 Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule Aachen, RWTH-Aachen 52064, Germany)

Abstract: A fault diagnosis method based on extended backward Petri nets is presented, which is mainly to deal with some faults comprising integrated protection information in power system. It has been proved to be true in fault diagnosis of Huangdun substation of Suyu county, and the results are in accordance with the ones deduced by forward Petri model. Some uncertain or incorrect information can be testified by comparison with corresponding diagnosis template. All diagnosis course can be completed with correct Petri model and some simple matrix numeration. This method saves time for diagnosis greatly and enhances efficiency, so it is very applicable for real-time fault diagnosis.

Key words: power system; Petri nets; fault diagnosis; relay protection