

并行控制结构的静止无功 补偿器设计与实现

张延迟¹,解 大²,任 涛²,戴 维³,舒观澜³,何 伟³,庄俊鹏³

(1.上海电机学院 电气工程系,上海 200240; 2.上海交通大学 电气工程系,
上海 200030;3.上海利思电气有限公司,上海 200032)

摘要: 介绍了静止无功补偿器的基本原理和结构,采用并行控制结构设计并实现了静止无功补偿器的控制系统、保护系统及人机接口系统。软件采用面向对象的线程设计方法,分别设计了控制 CPU 的主控制、定时器、SPI 等线程;保护 CPU 的保护、I/O 及 SPI、串行通信等线程;人机接口 CPU 的 SPI、键盘输入、液晶显示等线程。对实现的静止无功补偿器样机进行了动态模拟实验,结果表明,该静止无功补偿器的控制系统、保护电路及人机接口电路等达到设计要求,整机运行稳定可靠。

关键词: 静止无功补偿器; 灵活交流输电技术; 并行控制结构; 线程

中图分类号: TM 714.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)02-0053-04

0 引言

随着现代工业技术的发展,工业现场出现了大量的冲击性负荷,这些负荷的存在可能会引起电网电压闪变、网损增加、功率因数降低等问题,如果不采取有效措施,不仅不能保证电力系统安全、经济地运行,而且会影响电气设备的正常工作,严重时会造成电气设备损坏。静止无功补偿器 SVC (Static Var Compensation) 是国外在 20 世纪 70 年代研制出的一种动态无功补偿装置,在国内外的输配电系统中应用已十分广泛^[1]。它采用不同的静止开关投切电容器或电抗器,使其具有吸收和发出无功电流的能力,用于提高电力系统的功率因数,稳定系统电压,抑制系统振荡^[2-5]。与传统的无功补偿设备相比,SVC 具有响应速度快、调节性能好、运行损耗和维护费用低,并且可作为多方面应用等优点。

SVC 装置设计中,抑制快速冲击性负荷造成的电压波动和闪变,是一个较难解决的问题。当前 SVC 装置的控制器一般采用数字信号处理器(DSP)^[6-7],它具有运算速度快、容易实现复杂的控制算法等优点,但是对于应用于负荷侧、以补偿无功功率为控制目的的 SVC 而言,采用 DSP 作为控制器的主芯片价格较高,而且 DSP 功能繁多,容易造成 CPU 资源浪费。因此,研制一种高性价比的 SVC 控制器具有实际的工程应用意义。

CPU 并行控制结构,或称 CPU 多任务机制,是一种以同时实现数据采样、存储、计算、控制输出、通信等多项控制任务为目的机制,它的最小执行单位是面向对象的线程,各线程按照一定的方法组成控制流程,共同完成一个复杂系统的控制任务^[8-9]。并

行控制结构可以只由 1 片 CPU 组成,此时并行机制的主要工作在软件的并行控制上实现;并行控制结构也可以由多片 CPU 组成,这时的并行机制还要考虑各个 CPU 之间的协调和线程的优化分配。

1 SVC 的基本原理和结构

SVC 的补偿原理是通过控制晶闸管触发角,改变接入系统中的 SVC 等效电纳的大小,从而使 SVC 达到调节补偿无功功率的目的。采用晶闸管控制的 SVC 装置根据晶闸管控制对象主要可以分为晶闸管投切电容器(TSC)和晶闸管控制电抗器(TCR),以及两者混合式(TCR+TSC)等类型。

1.1 TSC

TSC 单相原理图如图 1 所示。2 个反并联晶闸管串联电容器并联接入电网系统中。分析和实验研究表明,TSC 最佳投切时间是晶闸管两端电

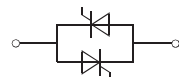


图 1 TSC 原理图
Fig.1 TSC diagram

压为零的时刻,即电容器两端电压等于电源电压的时刻,此时投切电容器,电路冲击电流为零。为保证更好的投切效果,应对电容器预先充电,充电结束后再投入电容器。在工程实际中一般将电容器分组,每组都可由晶闸管投切,这样可根据电网的无功需求投切电容器,运行时不会产生谐波,且损耗较小。

运行实践证明此装置具有较快的反映速度、体积小、重量轻,对三相不平衡负荷可以分相补偿,操作过程不产生有害的过电压、过电流。但是,对于抑制冲击负荷引起的电压闪变,单靠 TSC 投入电网的电容量变化进行调节是不够的,所以 TSC 装置一般与电感相并联,其典型设备是 TSC+TCR 补偿器。这种补偿器以电容器作分级粗调,以电感作相控细调,又设有 3 次和 5 次谐波滤波器,大大减小了谐波。

1.2 TCR

图 2 所示为 TCR 单相原理图,将 2 个反并联晶闸管与 1 个电抗器相串联再接入电网中。这种电路结构并联到电网中相当于交流调压器接感性负载,这种结构的无功补偿装置具有反应时间快、无级补偿、运行可靠、能分相调节、适用范围广及价格较便宜等优点,因此实际应用最广。

单独的 TCR 只能吸收感性无功功率,因此往往与电容器并联使用。根据投切电容器的元件不同,又可分为 TCR 与固定电容器并联使用的 SVC(TCR+FC)和 TCR 与断路器投切电容器并联使用的 SVC(TCR+MSC)。

1.3 混合型 SVC

如图 3 所示为混合型 SVC(TCR + TSC)单相原理图。显然,这种结构的无功补偿装置综合了 TCR 和 TSC 的优点,图中电感与电容的 2 个并联支路分别表示 3 次和 5 次谐波滤波器。

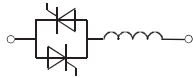


图 2 TCR 原理图
Fig.2 TCR diagram

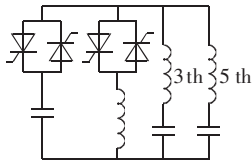


图 3 SVC 原理图
Fig.3 SVC diagram

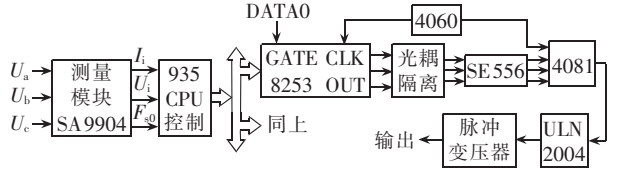
2 SVC 控制系统和保护系统设计

下面以图 3 的混合型 SVC 为目标,研究并行控制结构的 SVC 控制系统和保护系统的设计。

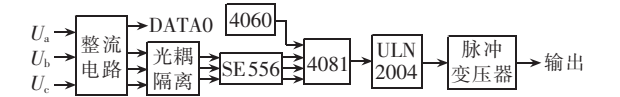
2.1 控制系统

控制模块是 SVC 的主要组成部分,同时也是核心部分,它主要完成 TSC 和 TCR 中晶闸管触发脉冲的输出控制。其输出一是控制 TCR 支路中的晶闸管,由主控制 CPU 提供;另一个是控制 TSC 支路中的晶闸管,由电压感应输入 U_a, U_b, U_c 的值直接控制。

TCR 支路中晶闸管的控制主要是由控制 CPU 完成的,它包括主控制、触发脉冲形成、光电隔离、触发脉冲调制及触发脉冲输出等电路。TSC 支路中的晶闸管控制主要是通过直接确定电压过零点完成,它包括整流、光电隔离、触发脉冲调制及触发脉冲输出等电路。图 4 为 TCR 和 TSC 的控制电路原理图。



(a) TCR 控制电路原理图



(b) TSC 控制电路原理图

图 4 控制系统原理图

Fig.4 Principle diagram of control system

2.2 保护系统

SVC 的保护系统由保护 CPU 主控。该 CPU 的输入值为测量采样的交流电压值经过整流电路后得到直流电压 $U_{AA1}, U_{BB1}, U_{CC1}$,采用直流电压的主要目的是为了使保护的整个反应更为迅速敏捷,因为判断交流电压是否为正常电压所用的是交流电压平均值,所以当电压有突变时,交流信号必须至少经过 1 个周期才会有反映,甚至可能因为正负半波发生了绝对值相同的突变,取平均值使得保护忽略了突变,无法输出保护控制信号,发生保护该动而未动的情况。反之,当输入电压为直流电压时,CPU 判断电压是否为正常电压,所用的是直流电压瞬时值,所以可以保证突变一发生,CPU 马上可以作出反应,直流电压可以保证 CPU 在 10 ms 内动作。

保护系统的原理图如图 5 所示。

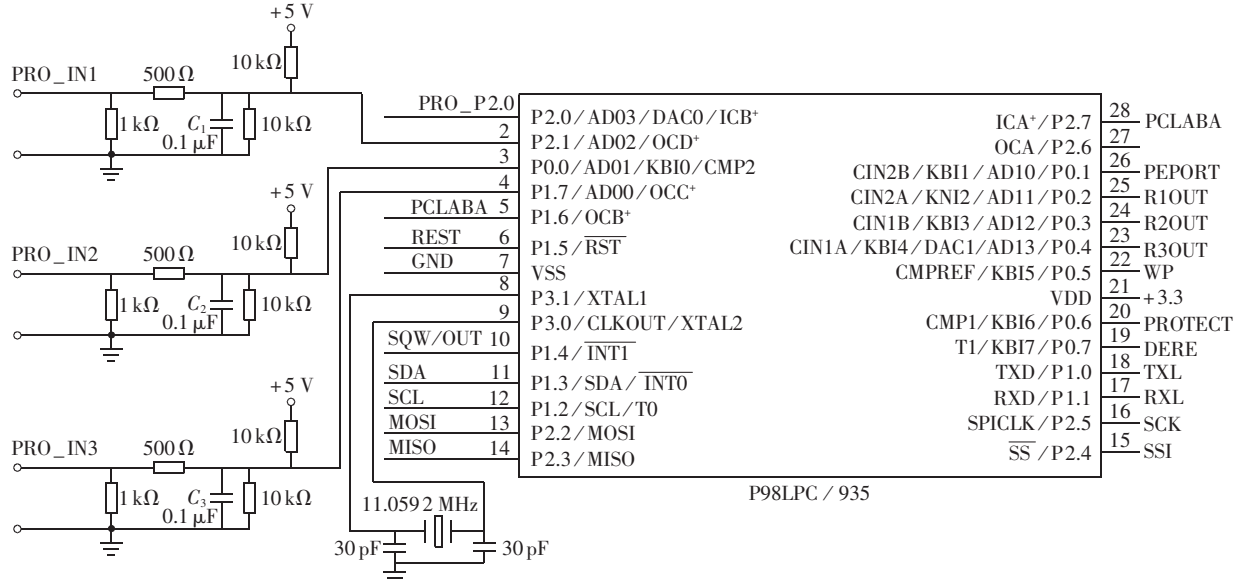


图 5 保护系统原理图

Fig.5 Principle diagram of protection system

2.3 人机接口系统

人机接口由键盘和液晶显示屏实现。键盘输入可以在人机接口 CPU 内部产生中断,将控制输入到该 CPU 中,其中采用 74LS166 完成数据的并行输入转成串行输入。键盘输入在经过处理后由 LCD 显示,各个 CPU 的工作状态也可通过 LCD 显示。

2.4 软件线程

如上所述,控制过程中总共用到了 3 片 CPU,它们之间是通过串行通信接口——SPI 接口通信,SPI 是一种全双工、高速、同步的通信总线,共有 2 种操作模式:主模式和从模式。在主模式或从模式中均支持高达 3 Mbit/s 的速率,同时还具有传输完成标志和写冲突标志保护。

多 CPU 并行控制须有主机与从机之分,本系统 3 片 CPU 之间的关系为:控制模块中的控制 CPU 为主机,另 2 片 CPU 为从机。连接方式如图 6 所示。

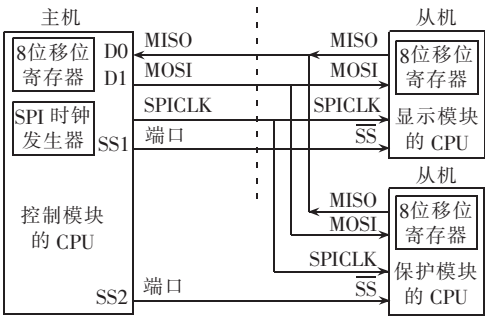


图 6 SPI 单主多从机配置

Fig.6 Single-master and multi-slave configuration of SPI

SPI 接口有 4 个管脚:SPICLK,MOSI,MISO,SS。SPICLK,MOSI,MISO 通常和多个 SPI 器件连接在一起,数据通过 MOSI 从主机传送到从机(主机输出,从机输入),通过 MISO 由从机传送到主机(主机输入,从机输出)。SPICLK 信号在处于主机模式时为输出,在处于从机模式时为输入。SS 为从机选择管脚,在典型的配置中,SPI 主机使用 I/O 口选择 1 个 SS 作为当前的从机。

在图 6 中,从机通过对应的 SS 信号被选中,SPI 主机可使用任何端口驱动从机的 SS 脚,这样数据就可以通过 3 片 CPU 之间的 SPI 接口互相进行传输。

本设计软件采用面向对象的线程设计方法,以实现 SVC 系统的并行控制。面向对象的线程设计具有与结构化软件完全不同的特点,首先不同 CPU 内的线程可以各自独立,同一 CPU 内线程也可以相互独立,它们可以并行运行,大大提高 CPU 的计算和逻辑能力;其次,线程可以面对对象进行设计,具有类的封装、继承、抽象和多态等特点。根据以上的硬件结构和控制对象,本系统 3 片 CPU 分别包含以下 10 个基本线程。

2.4.1 控制 CPU(主 CPU)

a. 主控制线程:由控制 CPU 累加器控制,是控

制 CPU 中最高级别的进程,完成数据采样、数据存储、计算触发角和发出触发指令等工作,并根据控制 CPU 的 SPI 进程统一协调整个 SVC 系统的总体控制。

b. 定时器线程:由控制 CPU 定时器控制,是独立进程,完成控制系统的定时、中断、看门狗和设置独占标识等工作。

c. SPI 线程:由控制 CPU 累加器控制,是控制 CPU 中第 2 级别的进程,完成控制 CPU 与其他 CPU 的数据交换、控制协调等工作。

2.4.2 保护 CPU(从 CPU)

a. 保护线程:由保护 CPU 累加器控制,是保护 CPU 中最高级别的进程,完成数据采样、数据存储、计算、发出保护指令等工作,并根据保护 CPU 的 SPI 进程处理和其他 CPU 的协调。

b. I/O 线程:由保护 CPU 累加器控制,是保护 CPU 中第 2 级别的进程,完成 I/O 工作。

c. SPI 线程:由保护 CPU 累加器控制,是保护 CPU 中第 3 级别的进程,完成保护 CPU 与其他 CPU 的数据交换、控制协调等工作。

d. 串行通信线程:由保护 CPU 累加器控制,是保护 CPU 中第 4 级别的进程,其中保护 CPU 的定时器进程为独立中断进程,完成保护 CPU 与上位机的串行通信。

2.4.3 人机接口 CPU(从 CPU)

a. SPI 线程:由人机接口 CPU 累加器控制,是人机接口 CPU 中最高级别的进程,完成人机接口 CPU 与其他 CPU 的数据交换、控制协调等工作。

b. 键盘输入线程:由人机接口 CPU 累加器控制,是人机接口 CPU 中第 2 级别的进程,完成键盘输入工作。

c. 液晶显示线程:由人机接口 CPU 累加器控制,是人机接口 CPU 中第 3 级别的进程,完成液晶显示工作。

由于上述的 10 个线程中 9 个进程在各自的 CPU 系统中由累加器控制,它们不是独立的线程,因此就具有如上所述的优先级别。又为了防止并行控制中多线程的并发冲突,必须首先合理分配内存和变量,其次要为占据控制的线程加锁,保证该线程的系统独占。图 7 为上述多线程的控制结构图。

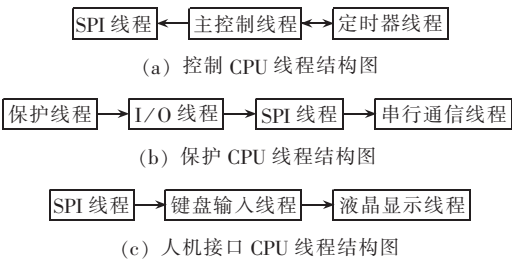


图 7 3 CPU 多线程控制结构图

Fig.7 Multi-thread control with three CPUs

3 动态模拟实验及结果

为确定以上原理设计的 SVC 的工作性能,对样机进行了动态模拟物理实验。投切前的电流与电压波形如图 8 所示,从图中可看出:由于负载上的无功损耗,使得 SVC 所在系统节点的电流相位比电压相位滞后大约 $1/8$ 周期。

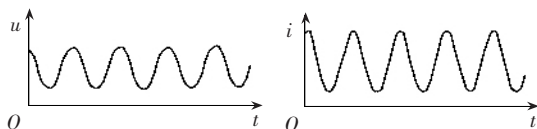


图 8 SVC 所在系统节点投切前的波形图
Fig.8 Waveforms of the bus without SVC operation

SVC 投切后电流、电压波形如图 9 所示。

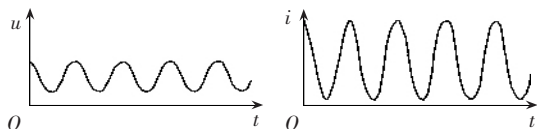


图 9 SVC 所在系统节点投切后的波形图
Fig.9 Waveforms of the bus with SVC operation

从图中可见,与 SVC 投切前相比主要有 2 个区别。

a. 电压相位与电流相位相同。系统中的用电装置以及输配电设备都不可能是纯阻性负载,因此它们会产生一定的无功损耗,造成系统的无功缺损。无功缺损又恰恰是电流相位滞后的主要原因。在 SVC 投入后,它补偿了系统的无功损耗,所以就减缓了电流相位的滞后情况。

b. 电流增大。SVC 在补偿了系统无功损耗的同时,补偿了一定的电流,使得补偿后的电流增大。

由上面的分析可见,本文设计的 SVC 有着良好的补偿性能,完全可以满足系统无功补偿的要求。

4 结语

本文应用并行控制结构原理设计并实现了 1 台 TCR+TSC 结构的 SVC,该 SVC 控制系统含有 3 片独立的 CPU。为 SVC 控制系统设计了 10 个线程,并通过合理分配 CPU 内存和并发锁实现了多线程控制。为校验 SVC 样机的功能进行的动态模拟实验表明,该 SVC 性能稳定,达到预期的设计目标。

参考文献:

- [1] JIN H, GOOS G, LOPES L. An efficient switched-reactor-based static var compensator[J]. **IEEE Trans. on Industry Application**, 1994, 30(4): 998-1004.
- [2] 孙元章,曹明. FACTS 对多机系统静态电压稳定性的影响[J]. **电力自动化设备**, 2001, 21(1): 6-10.

SUN Yuan-zhang, CAO Ming. Effect of FACTS on static voltage stability of multi-machine power systems [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2001, 21(1): 6-10.

- [3] 马幼捷,周雪松. 静止无功补偿器非线性控制对系统功角稳定的影响[J]. **中国电机工程学报**, 2003, 23(12): 84-88.
- MA You-jie, ZHOU Xue-song. Study on nonlinear SVC control for improving power system stability [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2003, 23(12): 84-88.
- [4] 王琦,吴启涛,纪延超. 基于脉宽调制静止无功补偿器的模糊变结构控制方式研究[J]. **电网技术**, 2004, 28(4): 46-50.
- WANG Qi, WU Qi-tao, JI Yan-chao. Study on fuzzy sliding mode controller for PWM based static var compensators [J]. **Power System Technology**, 2004, 28(4): 46-50.
- [5] 葛友,李春文. 基于非仿射非线性模型的静止无功补偿控制器设计[J]. **电力系统自动化**, 2001, 25(6): 4-6.
- GE You, LI Chun-wen. SVC controller design based on non-affine nonlinear model [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2001, 25(6): 4-6.
- [6] 韩业辉,陈建业,关胜利. 基于 DSP、工控机和网络的 SVC 分布式控制系统[J]. **清华大学学报:自然科学版**, 2003, 43(9): 1206-1209.
- HAN Ye-hui, CHEN Jian-ye, GUAN Sheng-li. SVC distributed control system using digital signal processing, industrial computer and network [J]. **Journal of Tsinghua University: Sci. & Tech.**, 2003, 43(9): 1206-1209.
- [7] 逯帅,陈建业,刘秀成,等. SVC 控制所需信号的快速检测方法[J]. **华北电力大学学报**, 2002, 29(增刊): 112-117.
- LU Shuai, CHEN Jian-ye, LIU Xiu-cheng, et al. A fast detection method of signal required by SVC controller [J]. **Journal of North China Electric Power University**, 2002, 29(Supplement): 112-117.
- [8] PETZOLD C. Programming windows[M]. 5th ed. New York, USA: Microsoft Press, 2003.
- [9] RICHTER J. Programming applications for Microsoft Windows[M]. 4th ed. New York, USA: Microsoft Press, 2005.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

张延迟(1967-),男,北京人,副教授,主要从事灵活交流输电技术的应用研究(E-mail:zy_chi@163.com);

解大(1969-),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,主要从事电力系统分析和灵活交流输电技术的应用研究(E-mail: xieda@sju.edu.cn);

任涛(1983-),女,河南开封人,从事灵活交流输电技术的应用研究;

戴维(1980-),男,上海人,工程师,主要从事灵活交流输电技术应用工作;

舒观澜(1980-),男,上海人,工程师,主要从事灵活交流输电技术应用工作;

何伟(1980-),男,上海人,工程师,主要从事灵活交流输电技术应用工作;

庄俊鹏(1980-),男,上海人,工程师,主要从事灵活交流输电技术应用工作。

Design and implementation of parallel controlled SVC

ZHANG Yan-chi¹, XIE Da², REN Tao², DAI Wei³,

SHU Guan-lan³, HE Wei³, ZHUANG Jun-peng³

(1. Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 3. Shanghai DoubleX Tech. Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The principle and configuration of SVC (Static Var Compensator) are introduced, and its control system, protection system and man-machine interface system are designed and implemented by using parallel control. Ten threads are designed using object-oriented method, including the main control, timer and SPI for control CPU, the protection, I/O, SPI and serial communication for protection CPU, and the SPI, keyboard input, liquid crystal display for man-machine interface CPU. The prototype is tested by dynamic simulation, and the results prove that the control system, protection circuit and man-machine circuit of SVC meet design targets with stable and reliable operation of whole equipment.

Key words: static var compensator; FACTS; parallel control; thread