

基于 PIC 单片机的无功补偿器设计

王顺平, 张振国, 辛利斌, 封继军, 刘 冬

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘 要 无功功率是保证电网安全可靠运行的重要指标, 根据无功补偿器控制策略的不同。文中以 PIC32MX764F128H 单片机为核心, 将无功功率作为主投切判据, 设计了一种可根据负荷变化, 通过控制晶闸管投切电容器组, 实现对电网无功功率动态调节的补偿器。通过 Simulink 搭建仿真模型, 试验结果表明, 该补偿器的软、硬件设计合理, 运行安全、可靠, 能达到无功补偿设计的要求。

关键词 单片机; 无功补偿; 晶闸管投切电容器组

中图分类号 TM714.3 **文献标识码** A **文章编号** 1007-7820(2016)05-071-04

Design of Reactive Power Compensator Based on PIC

WANG Shunping, ZHANG Zhenguo, XIN Libin, FENG Jijun, LIU Dong

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract Reactive power is an important indicator to ensure the safe and reliable operations of the power network. According to the different control strategies of the reactive power compensator, a power control system is designed with the PIC32MX764F128H single-chip microcomputer as the core and reactive power as the main criterion for switching to realize the dynamic adjustment of reactive power by controlling the thyristor switched capacitor. Simulink is used to build simulation model. Test results show that the compensator hardware and software design is reasonable and the system runs safely and reliably and meets the requirements of reactive power compensation design.

Keywords single chip microcomputer; reactive power compensation; thyristor switched capacitor

无功功率对供电系统的运行十分重要, 电网的无功状况是衡量电网运行水平的重要指标之一^[1]。随着电网中低压用电设备数量越来越多, 同时人们对供电的可靠性和供电质量提出了更高的要求^[2]。提高电力系统的供电质量的方法主要有两个: 一是对电气设备的设计水平不断改进和提高, 使电气设备在使用过程中对电网的运行造成的污染尽可能的小或为零; 二是在向用户进行供电的同时, 对电能直接进行治理, 例如对运行中的电力系统进行补偿无功功率、治理谐波等^[3]。

本文介绍了以美国 Microchip 公司的 PIC32MX764F128H 单片机为控制核心, 设计了一种动态无功补偿器。通过检测系统的有功、无功功率、有功能量和无功能量等电网参数, 为无功补偿提供准确的电网数据, 控制电容器组的合理投切, 实现无功功率的

动态补偿。

1 无功补偿器硬件结构

无功补偿器的总体结构包括电网参数检测模块、控制模块、电源模块和外围辅助模块等组成, 如图 1 所示。

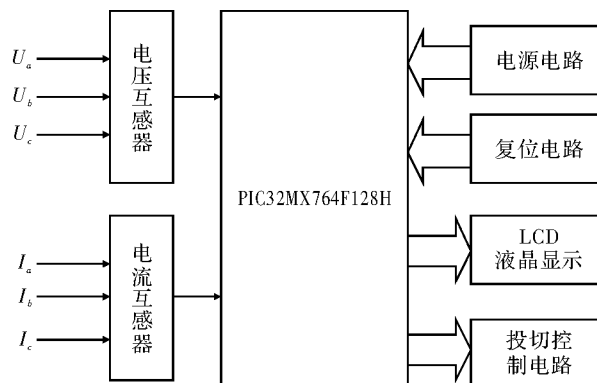


图 1 无功补偿器硬件结构图

1.1 PIC32MX764F128H 及其最小系统

PIC32MX764F128H 是 Microchip 公司的一款 Flash 单片机^[4]。PIC32MX764F128H 的基本功能特性

收稿日期: 2015-09-14

基金项目: 沪江基金资助项目(B1402/D1402)

作者简介: 王顺平(1991—), 男, 硕士研究生。研究方向: 电力电子与电力传动。

有:额定工作温度可以达到 105 ℃;工作电压范围为 2.3 ~ 3.6 V;具有最大 512 kB 的闪存和 128 kB 的 SRAM;工作频率最高可达 80 MHz,多种时钟模式供用户选择;丰富的中断源,协调外围设备模块与 CPU 之间的交互工作;6 个输入/输出端口,分别为 RB(16 位)、RC(4 位)、RD(12 位)、RE(8 位)、RF(6 位)、RG(6 位),共有 51 位;单周期(MAC)32 × 16 和双周期 32 × 32 乘法;3 个多功能定时器,既可作为定时器和计数器,还可与 CCP 功能模块配合使用;以及 USB 2.0 和串行通信外设;集成多种串行数据传送方式,包括通用同步/异步收发器(USART)模块和主同步串口(MSSP)模块;提供各种通用和专用的外设,包括以太网、CAN、USB 主设备;具有多种复位模式,包括上电复位、上电延时定时器、WDT 复位、欠压复位和起振延时定时器;提供一种在线串行编程功能,通过简单的 6 线接口即可实现对芯片的编程与调试。外加时钟电路、电源电路、复位电路,构成 PIC 单片机的最小系统。

1.2 电网参数检测模块

电网参数检测模块采用了一款多功能高精度三相电能专用计量芯片 ATT7022E,该芯片具有信号采样和参数计算的功能,测得的结果将以 24 位数据、补码形式存放在内部寄存器中。集成了 7 路二阶 Sigma - delta ADC,其中 3 路用于三相电压采样,3 路用于三相电流采样,还有 1 路可用于零线电流采样,适用于三相三线和三相四线应用^[5]。还集成了参考电压电路以及所有功率、能量、有效值、功率因数及频率测量的数字信号处理电路,能够测量各相以及合相的有功功率、无功功率、视在功率,同时还能测量各相电流、电压有效值、功率因数、相角、频率等参数。

1.2.1 电压检测

电压互感器 SPT204A,其实际上是一款毫安级精密电流互感器,输入额定电流为 2 mA,额定输出电流为 2 mA。最大电流通常为 10 mA,可耐冲击电流为 100 mA × 1 s,精度 < 1%。采用差分输入方式,如图 2 所示。

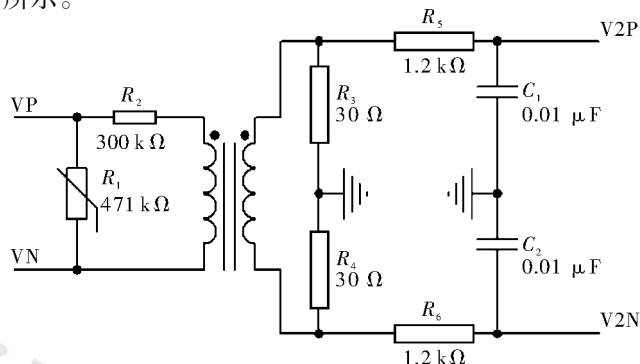


图2 电压采样采用差分方式输入

在电压采样电路中,首先并联了一个压敏电阻,防止电压发生急剧变化,经过 300 kΩ 的电阻将电网中的电压信号转换为 2 mA 范围内的电流信号,经过 2 mA/2 mA 变比的互感器,转换成弱电的电流信号,再经过阻值合适的电阻将电流信号转换成 ATT7022E 测量范围内的电压信号,电路中 1.2 kΩ 的电阻和 0.01 μF 的电容组成了抗混叠滤波器,降低混叠频率分量,之后信号就进入到 ATT7022E 的电压输入通道 V2P 和 V2N,这样一相电压信号就完成了采集。

1.2.2 电流检测

电流互感器 SCT245AK,这是一款精密电流互感器,匝数比为 1:2 000,输入额定电流 5 A,输出额定电流 2.5 mA。采用差分输入方式,如图 3 所示。

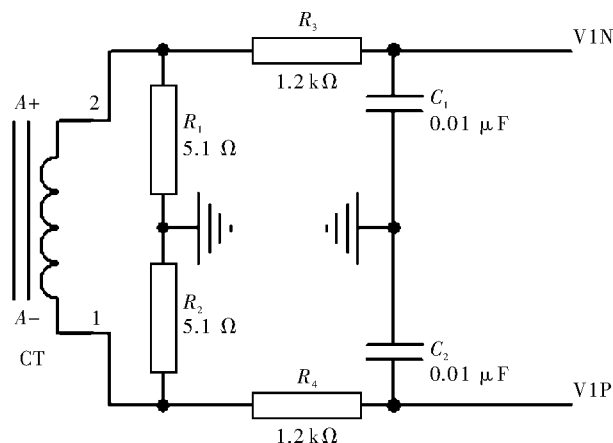


图3 电流采样采用差分方式输入

电流信号经过 5 A/2.5 mA 的互感器转换成小电流信号,由合适阻值的电阻转换成 ATT7022E 测量范围内的电压信号,再经过抗混叠滤波器进入到 V1P 和 V1N 电流通道引脚端,完成一相电流信号的采集。

1.3 补偿控制模块

系统由控制模块完成对电压、电流信号的采样、处理、计算后,根据控制方式和控制算法向执行单元发出投切信号并进行投切动作。PIC32MX764F128H 单片机作为控制模块的核心电路。信号处理利用 Hilbert 变换测量法对各次谐波均能准确进行 90° 移相,连续周期信号 $x(t)$ 的 Hilbert 变换定义为

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{x - \tau} d\tau = x(t) \otimes \frac{1}{\pi t} \quad (1)$$

由式(1)可以得到单位冲击响应 $h(t) = 1/x(t)$, Hilbert 变换频率特性为

$$H(e^{j\omega}) = -j \operatorname{sgn}(\omega) = \begin{cases} -j, & \omega > 0 \\ j, & \omega < 0 \end{cases} \quad (2)$$

记 $H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)}$, 当 $|H(j\omega)| = 1$ 时

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} -\pi/2, & \omega > 0 \\ \pi/2, & \omega < 0 \end{cases} \quad (3)$$

即 Hilbert 变换器是幅频特性为 1 的全通滤波器,当信号经过希尔伯特变换后,正频率部分作 -90° 相移,而负频率部分作 $+90^\circ$ 相移。

1.4 电源模块

在补偿器的设计中,电源模块是重要的组成部分,能够为系统中所有芯片和器件提供工作电压。电线性电源在体积、重量、功耗等方面都比较大,不适合系统在体积和功率方面的要求。所以,本控制系统在电源方面采用开关稳压电源。

1.5 补偿控制策略

根据选择的控制物理量的不同,补偿控制方法可有多多种样。在电力行业标准中,根据控制物理量将低压无功补偿控制器分为四类:无功功率、无功电流、功率因数、复合型(按两个及以上物理量组合)^[6]。这些控制方法中,较为合理的补偿均应做到:充分利用补偿设备尽量提高功率因数;不发生过头补偿;无振荡投切;无冲击投切;反应灵敏、迅速。设计中以无功功率作为主判据^[7]。

无功功率控制方式是一种最直接的控制方法,把无功功率作为控制变量控制电容器组的投切,利用检测装置检测出的公用电网的电压、电流和功率因数等参数,计算出无功功率的值,并推算出应该投入或者切除的电容器的容量,选择一种最接近但又不会出现过头补偿的电容器组合方式,进行充分补偿。若应投切的电容器的容量小于最小一组电容器容量,电容器的补偿状态保持不变。当所需的电容容量大于或等于最小一组电容器容量时,进行电容器的投切^[8-9]。

ΔQ 的计算公式如下:假设补偿器检测到阻感性负荷当前的功率因数为 PF_1 ,有功功率为 P ,无功功率为 Q_1 ,则

$$PF_1 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad (4)$$

$$Q_1 = \left(P \times \sqrt{\frac{1}{PF_1^2} - 1} \right) \quad (5)$$

式中, $X_L = \omega L$ 。

假设设定目标功率因数为 PF_2 ,无功功率为 Q_2 此时系统有功功率仍为 P ,则

$$Q_2 = \left(P \times \sqrt{\frac{1}{PF_2^2} - 1} \right) \quad (6)$$

由此可计算出所需补偿的无功大小 ΔQ 为

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 \quad (7)$$

补偿器根据 ΔQ 值的大小来发出投切指令。为避免发生“投切振荡”现象,在设置补偿目标的范围时,值要大于基本电容器的容量。在投切过程中,电网实际需要无功的容量从投入区或切除区投入或切除一组

电容器后,落在稳定区内,这就保持了补偿的稳定性。无功功率控制方式如图 4 所示。

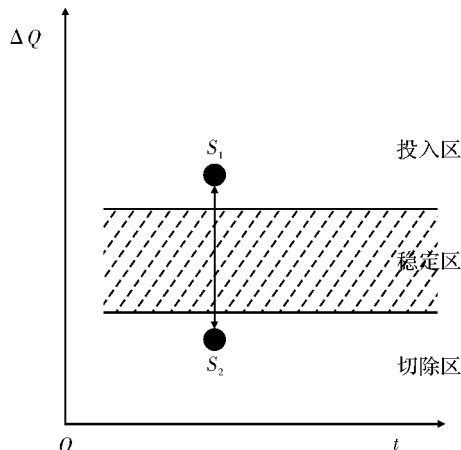


图 4 无功功率控制方式

2 软件流程

PIC 系列单片机有很多种开发环境,本设计选择 Microchip 公司的 Mplab IDE 软件,该开发环境能够对用户编写的高级语言和汇编语言程序进行编译,生成可执行代码。对生成的代码通过使用烧写器和调试器 Mplab ICD3 进行代码的烧写和调试。能够观察到芯片的运行状态和每个寄存器的当前数值,还可控制代码运行,测试代码的性能。

本设计运用 C 语言编程,提高程序的可读性,便于代码的修改和优化。系统软件设计主要包括主程序模块、数据采集模块、控制模块、显示模块 4 个部分。

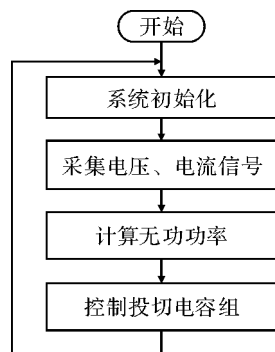
(1) 主程序模块主要完成上电后系统各模块的初始化就是对相关寄存器进行配置,及主循环的等待中断响应;

(2) 数据采集模块用于将经电压和电流互感器及 A/D 转换电路处理后的电压、电流的模拟信号通过 PIC 单片机转换为数字信号,为后续投切控制做准备;

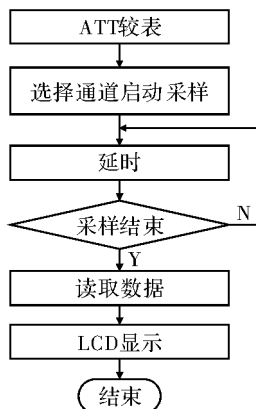
(3) 控制模块用于处理数据,计算系统所需补偿的无功容量,优化投切电容组动作的选择;

(4) 显示模块用于实现无功补偿器相关参数的动态显示。在软件编程时,主要包括初始化屏幕、校对坐标以及确定触摸坐标。

PIC32MX 单片机产生中断请求以响应来自外设模块的中断事件。中断模块处于 CPU 逻辑之外,并且在将中断事件预发送到 CPU 之前为其设置优先级顺序。在程序设计中,根据事件的优先等级,综合考虑中断的分配,提高 CPU 的工作效率。程序设计主要流程如图 5 所示。



(a) 主程序流程图



(b) 参数读取程序流程图

图 5 程序设计主要流程图

3 试验结果

按上述设计思路,以 Simulink 为仿真环境,搭建仿真模型。选用阻、感性负载来模拟电网中感性无功功率的情况。试验的波形如图 6~图 7 所示。

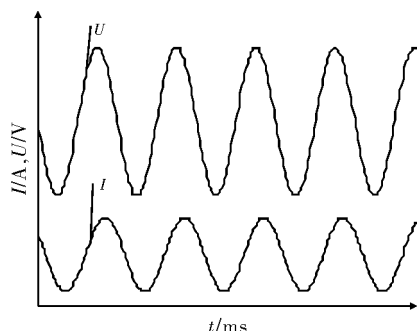


图 6 投入无功补偿器前电压电流波形

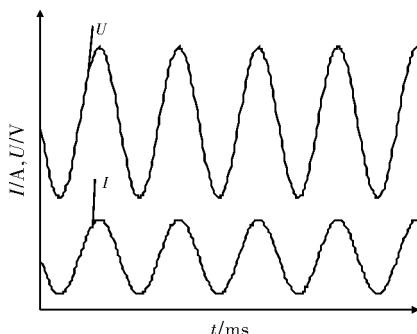


图 7 投入无功补偿器后电压电流波形

通过比较两组波形图可知,电网系统在投入无功补偿器之前,感性负载使得电流相位滞后于电压相位;投入无功补偿器之后,系统电流与电压相位基本一致,接近阻性负载状态,说明系统的感性无功得到了补偿。

4 结束语

针对无功补偿器采用功率因数控制方式,由于功率因数是有功功率与视在功率的一个比值,并不能反映电网真正所需的无功功率大小的问题。设计了采用无功功率控制策略的控制系统。采用 Microchip 公司的 PIC32MX764F128H 作为控制核心,充分发挥 PIC 单片机运算速度快、接口资源丰富、性价比高和在线调试的优点,同时提供良好的人机交互,同时采用 C 语言模块化的编程,将更加有利于系统移植以及产品的升级与推广。

参考文献

- [1] 王兆安,杨君,刘进军,等. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] Guo Weifeng, Xu Dianguo, Wu Jian, et al. United system of TSC and SVG for reactive power compensation [C]. Tokyo: 2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2010.
- [3] 袁光明,张波,王丹,等. 晶闸管投切电容的最佳编码方式与最优投切阈值的数学分析和应用[J]. 电网技术,2004, 28(23):43-46.
- [4] 王大志,王克难,刘震. 电力系统无功补偿原理与应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2013.
- [5] 黄鹤松,刘奎,齐俊清,等. 基于 ATT7022B 的多功能电能表系统的设计[J]. 电测与仪表,2011,48(6):63-67.
- [6] 肖立军,贺炳庆,伍世民,等,译. 静止无功补偿装置 [M]. 长沙:湖南大学出版社,1989.
- [7] 谷永刚,肖国春,裴云庆,等. 晶闸管投切电容器 (TSC) 技术的研究现状与发展[J]. 电力电子技术,2003,37(2): 85-88.
- [8] Yop Chung, Dong Junwon, Joong Moon Kim. Development of a network-based power quality diagnosis system [M]. Electric Power Systems Research, 2007, 22(77):1086-1094.
- [9] 陆阳,刘晨芳,兰才进. 低压配电网并联电容器的无功补偿优化算法[J]. 电子科技,2013,26(5):115-116,121.