

基于 PIC 单片机的高压智能同步开关控制系统

苏晓东 李树广 梁小广 杨文强 上海交通大学电子信息与电气工程学院(200030)

Abstract

This article introduces the application of PIC microcontroller in the control system of intelligent synchronous high voltage switch, it focuses mostly on the hardware. 16F87X have abundant resources, such as simplifying the peripheral devices. The skills of how to improve the precision and robustness of the system are also explained in the article.

Keywords: 16F87X, microcontroller, synchronous voltage, zero-detecting, CCP, MAX7221

摘要

本文介绍其在高压智能同步开关的控制系统中的应用,着重论述了硬件系统的设计。16F87X 软硬件资源丰富,需要的外围器件很少,本文详细说明了如何利用 16F87X 的特性来提高控制系统的精确性和可靠性。

关键词: 16F87X, 单片机, 同步开关, 过零检测, CCP, MAX7221

1 高压智能同步开关简介

传统的高压开关的动作相位是随机的,会在系统中产生很大的浪涌电流和很高的感应电压,降低了电力系统的供电质量,并可能对开关等设备造成损坏。智能同步开关的基本原理就是要控制高压开关开闸、合闸的时间,使得三相主触头分别在三相电压的过零点附近合上,在三相电流的过零点附近断开。从理论上讲,可以从根本上消除容性负载的浪涌电流和感性负载的感应电压。高压智能同步开关的关键是要实现三相触头的同步操作。其基本方法是通过硬件电路,得到准确的电压和电流的过零点,作为控制的时间基准。当操作者给出开、合闸命令后,控制系统以相应的电压电流过零时刻为基准,经设定的延时后发出控制命令,驱动操作电路对开关的触头进行操作,以使得三相触头在接下来的电压或电流过零点时刻完成操作。由于每个开关动作时间都不同,方便地对延时参数进行调节,当系统断电时,这些数据不会丢失。温度、电流大小等因素将会影响到开关的动作时间,为保证同步操作的准确性,控制系统应能利用温度、电流信号对开、合闸延时时间进行实时校正。此外,高压智能同步开关还具备电压、电流、功率因素、功率的实时监测显示功能,能显示系统的当前状态,对三相不平衡等故障进行报警,实现遥测、遥控、自动跳闸等功能。

2 PIC 16F87X 系列单片机的特点

Microchip 公司推出的 PIC 16F87X 系列 8 位单片机是采用精简指令集 (RISC) 结构和 FLASH 存储技术的高性能的嵌入式单片机,相比于其他类型的单片机,有以下特点:

1) 运行速度快。PIC 16F87X 系列单片机在架构上采用了两级流水线的哈佛总线结构,指令的读取和执行采用流水线方式,使得单条指令 (GOTO、CALL 指令除外) 的执行基本上可在一个周期内完成。另一方面,数据总线和指令总线分离,并且采用不同的宽度,便于实现全部指令的单字节化,有利于提高 CPU 的处理速度。该系列单片机是目前世界上速度最快的品种之一。

2) 扩展功能丰富,功能强大。PIC 16F87X 系列单片机不同程度地将各种外围功能模块集成于内部,如 A/D 模块、EEPROM、捕捉/比较/脉宽调制器、I²C 和 SPI 串行总线端口等,减少了外围器件的使用,简化了电路板的设计,提高了系统可靠性。

3) 逻辑结构清晰。PIC 16F87X 系列单片机采用了精简指令集 (RISC) 技术,其指令系统只有 35 条指令,其寻址方式也得

到了简化,简单易学。该系列单片机的一个很大的特色是广泛使用了可位寻址的特殊功能寄存器,只要将命令写入这些特殊功能寄存器,就可以方便灵活地控制各功能模块,易于编制程序。

另外, PIC 16F87X 系列单片机还有可在线编程,上电、掉电延时复位保护和看门狗功能, I/O 管脚驱动能力和抗干扰能力强。该系列单片机的功能基本相近,只是在存储器大小、引脚数目、A/D 转换器个数等有所区别,用户可方便地选择最适用的型号。

3 硬件设计

笔者设计的控制系统的基本原理如图 1 所示,主要包含电源模块、驱动电路模块、键盘显示模块和单片机控制模块。

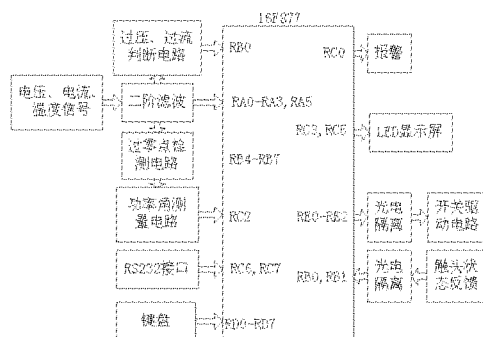


图 1 控制系统基本原理图

3.1 单片机控制模块

单片机控制模块是高压智能同步开关的核心部分,包括过零点检测、模拟信号输入处理、过压过流判断、RS232 串行接口、控制信号输出等子模块。

3.1.1 输入模拟信号处理电路

16F877 具有 8 路 A/D 输入通道,共用一个 10 位的 ADC 模块。ADC 模块完成一次 10 位数据的转换的最短时间为 19.2μs,两次转换之间至少间隔 3.2μs。16F877 提供 16 种 A/D 输入通道组合,可通过控制字 ADCON1 设置 0~8 个引脚作为模拟信号输入通道,16F877 还支持外接参考电压以提高 A/D 转换的分辨率。

笔者将输入的模拟信号先进行二阶滤波(电路如图 2 所示),以滤除高频干扰信号,然后通过交-直流变换将正弦波信号转换为与其幅值成正比的直流信号,这样就便于利用 ADC 模块进行采样,而如果是采集正弦信号的有效值则需要很复杂的运算过程。笔者每隔 1.25ms 对各输入通道进行一次采样,一个工

频周期对一个输入通道采样 16 点,然后进行数据处理。经笔者使用,证明此方法性能稳定、准确。

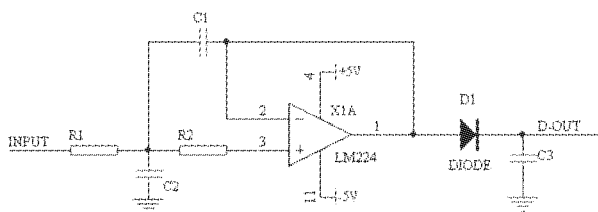


图 2 输入模拟信号处理电路

3.1.2 过零点检测电路及过压过流判断电路

输入的电压、电流信号经过滤波后,输入电压比较电路就可得到占空比为 0.5,频率 50Hz 的方波信号。笔者采用了滞回比较器以避免输出方波在输入信号过零点附近产生频繁跳变。比较器的输出方波经施密特触发器 74HC14 引入单片机,以增加系统的可靠性。电路如图 3 所示:

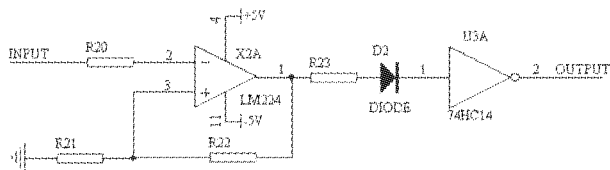


图 3 过零点检测电路

16F877 的 RB 端口的 RB_0 和 $RB_4 \sim RB_7$ 具有复合功能,可以用来检测引脚上的电平变化。如果 $RB_4 \sim RB_7$ 被设为输入引脚,当控制位 $RBIE$ 置 1 时, $RB_4 \sim RB_7$ 上的电平变化(上升沿和下降沿都有效)将触发中断,这一特性非常有利于采集过零点信号。但 $RB_4 \sim RB_7$ 共用一个中断标志位 $RBIF$,任一引脚上的电平变化都会将 $RBIF$ 置 1(此标志位必须用软件清 0),因此不能确定到底是哪个引脚上发生了电平变化。笔者根据开关操作的时序,在某一时刻只将 $RB_4 \sim RB_7$ 中的某一个管脚设为输入管脚,其余为输出管脚,这样当发生电平变化中断时,就可以确定电压、电流的过零点时刻了。

当系统中出现过压过流情况时,高压智能同步开关应能及时地断开,如果通过软件运算进行控制,响应时间会很长,不能有效保护系统的安全。如果利用 16F877 的外部中断功能,则响应时间会大大减少。16F877 的外部中断功能可通过控制位进行设置。当 $INTE$ 置 1 时,将使能外部中断功能。控制位 $INTEDG$ 用于控制是上升沿还是下降沿触发外部中断: $INTEDG=0$ 时, RB_0 下降沿有效; $INTEDG=1$ 时, RB_0 上升沿有效。为此笔者设计了如图 4 所示的过压过流判断电路。

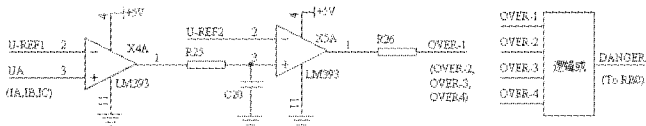


图 4 过压过流判断电路

$U-REF1$ 、 $U-REF2$ 是参考电压,可根据需要手动调整。当 U_A (或 I_A 、 I_B 、 I_C)某时刻的瞬时值大于 $U-REF1$ 时,a 点输出高电平,对 $C20$ 充电,若 $U_A > U-REF1$ 的持续时间大于一定值,使得 b 点的电平大于 $U-REF2$,则输出 $OVER-1$ (或 $OVER-2$ 、 $OVER-3$ 、 $OVER-4$)变为高电平。 $OVER-1$ 、 $OVER-2$ 、 $OVER-3$ 、 $OVER-4$ 中任意一个为高电平,都会使得输出信号 $DANGER$ (与 RB_0 引脚相连)变为高电平。使用两级比较器可以避免瞬间干扰引起判断错误。当出现过压过流情况时, $DANGER$ 由低电平变为高电平,触发 16F877 的外部中断,迅速断开开关。

3.1.3 功率因素角测量电路

电力系统可视为无穷大系统,因此可以假定其正常运行时,频率基本保持不变,因此可通过测量时间的方法来求得与角度有关的参数。下面简单介绍一下功率因素角的测量方法:

经过滞回比较器后,得到

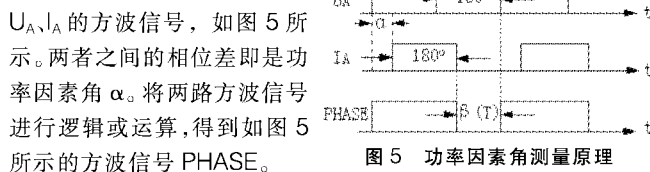


图 5 功率因素角测量原理

两路方波信号,如图 5 所示。两者之间的相位差即是功率因素角 α 。将两路方波信号进行逻辑或运算,得到如图 5 所示的方波信号 $PHASE$ 。

单片机采集到的时间信号是 $\beta(T)$,在电力系统频率保持 50Hz 不变的情况下, $\beta(T)$ 对应的角度为 β :

$$\beta = 360^\circ \times \beta(T) / 20 \quad (\beta(T) \text{ 的单位为 } ms)$$

不难算出,

$$\alpha = 180^\circ - \beta$$

16F877 具有两个输入捕捉\输出比较\脉宽调制模块 $CCP1$ 和 $CCP2$,可用来测量脉冲的宽度或产生 PWM 波, $CCP2$ 还可用来触发 A/D 转换。两者共用一个 16 位定时器 $TMR1$,其分辨率取决于 $TMR1$ 的分频比。通过设置控制寄存器 $CCPx-CON$, CCP 模块的输入捕捉功能可捕捉每一个脉冲的上升沿或下降沿,4 个或 16 个脉冲的下降沿,当 CCP 捕捉到设定的跳变沿后将进入中断处理程序。笔者利用 $CCP1$ 的输入捕捉功能来完成功率角的测量:首先设置 $CCP1$ 捕捉下降沿,当 $CCP1$ 捕捉到 t_1 时刻的下降沿后进入中断程序,将定时器 $TMR1$ 清零,并将 $CCP1$ 设为捕捉上升沿; t_2 时刻的上升沿到来时,再次进入 $CCP1$ 中断,记录下 $TMR1$ 此时的计时值(即为 T);重新设置 $CCP1$ 捕捉下降沿,等待下一次测量。

16F877 的中断响应非常快,只有 3~4 个指令周期的延时。但是 16F877 只有一个中断服务子程序入口地址,而且所有的中断源具有相同的优先等级,因此,一个特定中断的响应时间将取决于它发生的时机以及其处理程序在中断服务子程序中的位置。为了能够准确地测量出功率角,笔者采用了以下措施:

a. 把 $CCP1$ 中断处理程序放在中断服务子程序的入口处,一旦有中断发生,单片机首先判断是否是 $CCP1$ 中断,若是 $CCP1$ 捕捉到了跳变沿,就立即进入 $CCP1$ 中断处理程序,这样就保证了 16F877 能快速响应 $CCP1$ 中断,减小了响应时间的不确定性。

b. 当程序进入其他中断程序或需要禁止所有中断的子程序后立即禁止 $CCP1$ 中断,在这些程序的末尾清除 $CCP1$ 中断标志,并设置 $CCP1$ 为捕捉下降沿,避免由于不能及时响应 $CCP1$ 中断造成的计时不准。

c. 成功对时间 T 采样 16 次后进行数据处理,以进一步减小误差。

在采取这些措施后,经笔者试验,脉冲宽度测量的误差小于 $3\mu s$,完全满足高压智能同步开关的要求。

3.1.4 开关状态反馈电路

当本控制系统发出开合闸命令后,有可能由于高压开关动作失灵等原因,造成操作失败,若开关不能及时地恢复到理想状态,有可能会引起事故。因此笔者利用三相触头的常开触点作为反馈信号,经一定的逻辑电路把开关的状态反馈给单片机,从而可根据这个信号判断开关状态是否与操作目的相同,以便于及时对它进行处理。具体的方法介绍如下:当触头合上时,其常开触点输出逻辑信号 1;当触头断开时,其常开触点输出逻辑信号 0。将三相触头的常开触点输出信号分别输入如图 6 所示的逻辑

电路。当三相触头都合上时,逻辑与电路输出信号 CLOSE STATE 为高电平,其他情况下 CLOSE STATE 为低电平;当三相触头都断开时,逻辑或电路输出信号 OPEN STATE 为低电平,其他情况下 OPEN STATE 为高电平。开闸操作结束后,如果 OPEN STATE 为低电平,则说明三相触头均已成功断开,否则说明有触头未能断开,需再次进行开闸操作;合闸操作结束后,如果 CLOSE STATE 为高电平,则说明三相触头均已成功闭合,否则说明有触头未能闭合,需再次进行合闸操作。

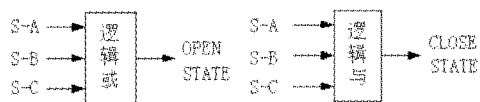


图6 开关状态反馈电路

3.2 驱动电路模块

中间继电器响应速度缓慢,而且会引入相当大的动作时间误差,导致成同步操作失败。为此,笔者采用 MOSFET 代替中间继电器对开关的开、合闸线圈进行控制,如图 7 所示:

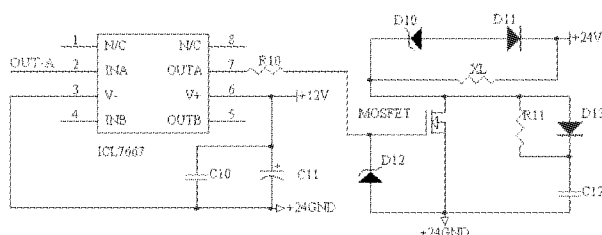


图7 开关操作线圈驱动电路

ICL7667 是 MOSFET 的驱动芯片,当 OUT-A 引脚得到合闸命令时,ICL7667 向 MOSFET 的栅极施加高电平,MOSFET 导通,开、合闸线圈通电,将开关触头合上。ICL7667 能产生 12V 的控制电平以保证 MOSFET 完全导通。ICL7667 有很强的驱动能力,可以迅速地对 MOSFET 栅极电容充放电,使其能够快速通断。ICL7667 的输入、输出信号是反相的,在设计控制逻辑时要注意。

D10、D11 构成了开关操作线圈 XL 的保护电路,防止线圈上承受过大的电压;D12 将 MOSFET 栅极和漏极间的电压限制在 12V 以内,R11、D13、C12 可以降低源漏极间电压的上升速度,以保护 MOSFET 的安全。

3.3 键盘、显示模块

图 8 中 K0~K7 是键盘按键主要用于开关操作和调整延时参数。利用 16F877 对 RD 端口进行循环扫描,判断是哪一个键按下了,并调用相应的处理程序。当有多个键同时按下时,系统认为是操作错误,将其忽略。笔者在此采用了软件抗抖动措施,当单片机扫描到 RD 端口的状态不为零时,延时 10ms,再次检测 RD 端口,如果 RD 端口的状态未改变,则认为是出现了键操作。为了避免在按钮被按下时,系统频繁地进行操作,笔者通过软件设定只有当放开按键时,系统才进行键处理。

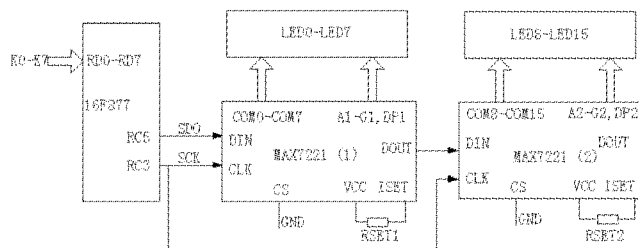


图8 键盘、显示模块原理图

为了节约单片机的管脚资源,这里采用了串行 8 位 LED 显

示控制器 MAX7221,它支持 SPI 串行总线,因此可以很方便地利用 16F877 的 SPI 串行总线将命令字写入 MAX7221 的移位寄存器。MAX7221 驱动能力很强,能动态驱动多达 8 位或 64 只单独的 LED。其通讯方式为:

在 CS 管脚为低电平时,当每个 CLK 脉冲上升沿到来时,由命令与数据组成的 16 位字串从 DIN 端进入 MAX7221 的移位寄存器。第 16 个 CLK 上升沿,CS 端变为高电平,数据即被锁存入内部寄存器中,紧接着在 CLK 下降沿数据从 DOUT 端移出,移位寄存器的最高位 D15 位最先收到数据。

如果将第一片 MAX7221 的 DOUT 端与第二片 MAX7221 的 DIN 端相连,可以方便地实现级联方式(如图 8 所示),驱动更多的 LED。高压智能同步开关需要同时显示电压、电流、功率和功率因素,需要 16 位 LED,因此利用两级 MAX7221 级联驱动方式,大大简化了系统结构。

MAX7221 的软件控制非常灵活,编程非常方便。它提供了两种段驱动方式,即段选码和 BCD 译码。通过 BCD 码译码器,可以很方便地显示十进制数字。LED 的显示亮度不仅可以通过调节限流电阻 RSET 的大小来调节,也可以通过软件进行调节。

3.4 电源模块

为避免由电源耦合的干扰危害控制系统,笔者设计了如图 9 所示的电源模块。其中 24V 电源由外部提供,经电容器稳压后直接用作开关开、合闸线圈的操作电源。经开关稳压器 LM2576-12 变换后得到 12V 的电源,为 MOSFET 驱动信号提供高电平。LM2576-5 用于产生 5V 电平。但是此电平不宜直接用作控制电路的电源,因为开关稳压器不能对地线进行隔离,有可能将强电部分的干扰通过地线耦合到控制电路,从而影响控制系统的稳定运行,甚至将其烧毁。DC-DC 变换器可以将控制部分的电源与外接电源完全隔离,消除了通过电源耦合的干扰。ICL7660 用于产生 -5V 电源,为滤波电路提供负电源。

本系统采用光耦 PC817 作为输出控制信号的隔离器件。通过 16F877 的 USART 串行总线可以很方便地利用 RS232 接口实现与上位机的通讯。

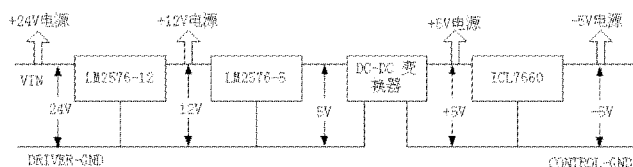


图9 电源模块

4 结束语

近年来国外开关智能化的前沿课题是实现同步操作,即开关主触头在零电压时闭合,或在零电流时断开,其关键是要达到对开关操作的精确控制,因此如何保证操作时间的精确性,是控制系统的核心任务。

PIC16F87X 单片机良好的抗干扰能力适合应用于具有很强干扰的电力环境。笔者为 10KV 电力系统设计的高压智能同步开关已经在实验室通过了多次试验,经过试验证明该单片机在多路时间点的采集等方面具有优良的性能。

参考文献

- 1 李学海.PIC 单片机实用教程.北京航空航天大学出版社
- 2 刘和平,等.PIC16F87X 单片机实用软件与接口技术-C 语言及其应用.北京航空航天大学出版社

[收稿日期:2003.8.11]