

# 箱式变电站的智能数据采集系统

孙 强<sup>1</sup>, 张建忠<sup>2</sup>

(1. 合肥学院 电子电气系, 安徽 合肥 230022;

2. 东南大学 电气系, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 依据数据采集系统用于配电网中 35/0.4 kV、10/0.4 kV 箱式变电站中, 可实现远方集中控制和监测的特点, 设计了以 80C196 KC 单片机为核心的智能数据采集系统(简称数采系统)。数采系统由电压形成、前置模拟低通滤波器、多路开关、模/数(AD)转换及过零检测等模块组成。采用比较式数采系统, 选用顺序采样、依次转换的采样方式, 芯片为逐次逼近型 AD MAX197; 数采系统用交流采样, 选用软件同步采样方式。为减小误差, 系统设计了频率测量子程序, 利用 80C196 KC 产生的高速中断测量电网周期, 从而计算出采样间隔时间, 保证精确采样。根据电网频率的变化修正定时器的中断常数实现电网周期的跟踪。试验结果表明, 所设计的数据采集系统符合要求。

**关键词:** 数据采集系统; 模/数变换器; 软件同步采样

中图分类号: TM 764

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)08-0063-04

## 0 引言

随着电网电压等级和复杂程度的提高, 对电力供应的安全性、可靠性和连续性要求越来越高, 由此, 变电站自动化系统得到了很大发展<sup>[1-2]</sup>。同时, 随着我国各城市市政建设现代化进程的加快, 大量的 10 kV 架空线转入地下, 淘汰了过去常用的柱上变压器, 作为电力系统输配电的末端环节, 箱式变电站获得了应用<sup>[3]</sup>。据统计, 美国的箱变产量占到配电变压器产量的 80% 以上, 而我国至 2000 年只占不到 2%, 箱式变电站在我国配电网中还需大力发展<sup>[4]</sup>。

作为箱式变电站重要组成部分的数据采集系统将保护装置所输入的电压、电流等模拟量准确实时地转换为所需的数字量, 为监控主机实时判断系统的运行状态提供依据, 因此, 数据采集系统的设计在箱式变电站的自动保护中具有重要的作用。本文研究的数据采集系统用于配电网中 35/0.4 kV、10/0.4 kV 箱式变电站, 可以实现箱式变电站的远方集中控制和监测, 它是对配电网自动化的完善和补充。

## 1 数据采集系统

数据采集系统可以有不同形式, 本系统采用比较式数据采集系统, 采用逐次逼近式模/数(AD)转换器实现数据转换, 采集系统组成框图如图 1 所示<sup>[5]</sup>。

数据采集系统包括电压形成回路、前置模拟低通滤波器、采样保持器、多路转换开关和 AD 转换器、过零检测等功能模块。采用软件同步方法的交流采样方案, 通过过零检测电路实时监测及跟踪电网频率变化, 调整采样定时器的中断定时值, 以达到系统所需的检测精度。

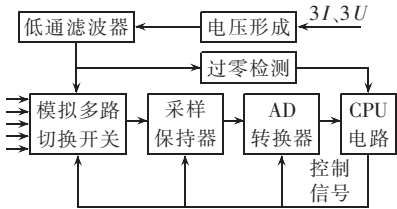


图 1 数据采集系统组成框图

Fig.1 Configuration of data acquisition system

### 1.1 电压形成环节

由于 AD 转换器只能对一定范围内的输入电压转换, 因此需要对输入的电流、电压信号进行处理, 将它们转换为 AD 转换器可以接收的电压, 这就是数据采集系统的电压形成环节。

电压形成环节除要求线性度好、波形不失真外, 还要求起屏蔽和隔离作用, 以免系统受二次回路暂态过电压及浪涌过电压的危害, 系统采用高精密的电压变换器  $U_V$  和电流变换器  $U_A$  实现, 它们分别接收来自现场 TV、TA 的三相交流信号, 然后输出模/数转换器可接收的电压, 其工作原理如图 2 所示。

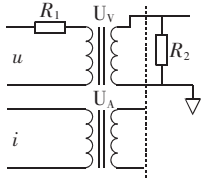


图 2 变换器原理

Fig.2 Principle of converter

变换器  $U_V$  和  $U_A$  的体积小、重量轻、失真度小, 如果设计得当, 在最大短路电流时保证电流变换器铁芯不饱和, 则其二次电流及并联电阻上的二次电压可基本保持和一次电流波形相同且同相。

### 1.2 低通滤波器

由电压形成环节传送来的电压信号含有一定的高频分量。由奈奎斯特采样定律知道, 若被采样信号为有限带宽的连续信号, 采样频率  $f_s$  应不小于 2 倍

其所含的最高频率成分,否则将产生频率混叠。因此,在电压形成环节设置了低通滤波器,让超过一定频率的分量滤除,以降低采样频率 $f_s$ 值,从而降低对微机系统硬件过高的要求。

RC 低通滤波器结构简单、可靠性高、能耐受较大过载和浪涌冲击,但其传递函数呈单调衰减性,无法做到通带平坦和过渡带,由于电压和电流互感器对高频分量已有相当大的抑制作用,不要求模拟低通滤波器具有理想的衰减特性,否则高阶的模拟低通滤波器将带来长的过渡过程,影响系统的快速性。综合以上因素,系统采用了如图 3 所示的二阶 RC 无源低通滤波器。

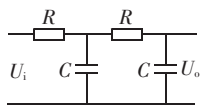


图 3 二阶 RC 无源低通滤波器

Fig.3 Dual RC passive low-pass reactive power filter

滤波器传递函数为  $H(s) = \frac{1}{1+3RCs+(RCs)^2}$ , 其中取  $R=3\text{ k}\Omega$ ,  $C=0.47\text{ }\mu\text{F}$ 。

### 1.3 AD 转换器

选择 AD 转换芯片的原则应从转换精度、转换速度、模拟信号输入通道数及成本、供货来源全面考虑。选择不同的 AD 转换芯片,与单片机的接口要求不同,必须依芯片对控制电路的要求设置,接口电路必须满足这些要求。还要考虑到变换器  $U_V$  和  $U_A$  输出信号与之匹配。

对于多通道输入信号采样而言,根据相互时间关系,可以将采样方式分为以下 3 种:

- 同时采样,同时或依次 AD 转换;
- 顺序采样,依次 AD 转换;
- 分组同步采样,同时 AD 转换。

与 a、c 方式相比,方式 b 的实现方法更简单,成本更低。经过综合比较和分析,最终选用了顺序采样、依次转换的采样方式,芯片为逐次逼近型 AD MAX197。

MAX197<sup>[6]</sup>内部同时集成采样保持器和多路选择开关,在获得优异数据采集性能的同时,合理地输入极性、量程范围、电源及参考电压和简化的接口标准简化了电路设计,易于获得优异的性价比。MAX197 的特点是多量程、8 通道、12 位 AD 转换器。通过编程可以实现不同的量程范围,当量程取  $-5\sim+5\text{ V}$ ,转换后的输出值以补码表示,这样除去符号位外,数值表示为 11 位。现场电流互感器二次侧电流取  $5\text{ A}$ ,电流测量按 1.2 倍额定电流考虑,则 AD 转换本身的电流分辨率为

$$I = \frac{1.2 \times I_n}{2^{11}} = \frac{1.2 \times 5}{2048} = 0.0029(\text{A}) \quad (1)$$

满足:  $I < I_n \times 0.1\% = 5 \times 0.1\% = 0.005(\text{A})$ 。

同理可分析得到,当电压互感器二次侧额定值取  $100\text{ V}$ ,按 1.2 倍额定电压考虑时,AD 转换本身的电压分辨率满足  $U < U_n \times 0.1\%$ 。

AD 转换器具有较高的转换速度,每次采样时,

可以采用查询方式控制 AD 转换是否结束,这种方式既可以保证 AD 控制简单,又可不过多地占用 CPU 时间,大大减少程序等待时间。

采用顺序采样必然会给通道采样带来时间差,在功率计算中将带来误差。下面分析电压、电流不同时采样对结果造成的影响。当电压、电流都为周期分量,则三相功率和是个常量,即

$$P = P_a + P_b + P_c = 3UI\cos\varphi \quad (2)$$

式中  $\varphi$  为  $I$  滞后于  $U$  的角度。

设  $i$  比  $u$  滞后  $t_0$  采样,则测得功率为

$$P^* = 3UI\cos(\varphi + \omega t_0) \quad (3)$$

MAX197 一次转换时间为  $6\text{ }\mu\text{s}$ ,若程序读取和执行时间为  $5\text{ }\mu\text{s}$ (16 MHz 晶振),则  $t_0 = 11\text{ }\mu\text{s}$ ,设  $\varphi = 30^\circ$ , $\omega = 314$ ,则

$$\frac{P - P^*}{P} \times 100\% = \frac{\cos\varphi - \cos(\varphi + \omega t_0)}{\cos\varphi} \times 100\% = 0.2\% \quad (4)$$

当电网功率因数较低时,测得的精度将有所降低,考虑电网的功率因数正常情况下接近 0.9,则认为采用顺序采样已能符合监控系统要求。

### 1.4 采样保持

由于模拟量转换为数字量有一过程,对于一个动态模拟信号,在模/数转换器接通的孔径时间里,输入的模拟信号值是不确定的,从而引起输出的不确定性误差。设输入信号是频率为  $f$  的正弦信号  $u = U_m \times \sin 2\pi ft$ ,如图 4 所示,那么可以推得最大孔径误差为  $\Delta U_m = U_m \times 2\pi ft_A$ ,最大相对孔径误差  $\zeta_r = 2\pi ft_A \times 100\%$ 。可看出:对于动态信号的测量,孔径误差  $\zeta_r$  与信号的最高频率  $f$  和系统的孔径时间  $t_A$  有关。当 50 Hz 频率数据被采样时,若要使 12 位分辨率 AD 转换的

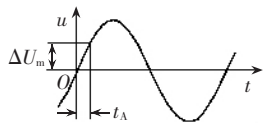


图 4 孔径误差

Fig.4 Error of aperture

孔径误差小于  $1/2\text{ LSB}$ (LSB 为最低有效位),其转换速率必须为  $0.4\text{ }\mu\text{s}$  或更快。因此,为了减少动态数据测量的孔径误差,应设置采样/保持电路以保证采样精度<sup>[5]</sup>。

MAX197 内部集成了采样跟踪/保持电路<sup>①</sup>,因此简化了数据采集系统的设计。

MAX197 具有优异的线性特性,微分非线性 DNL(Differential Nonlinearity)最大值为  $\pm 1\text{ LSB}$ ;积分非线性 IDL(Integral Nonlinearity)最大值为  $\pm 1/2\text{ LSB}$ 。这样可以保证模拟量数据采集系统较好的线性度。

### 1.5 AD 转换与 CPU 接口

MAX197 和 80C196KC 的接口电路如图 5 所示。

图中  $\text{CH}_0 \sim \text{CH}_5$  为 6 路模拟量输入端, $\text{D}_0 \sim \text{D}_7$  为分时复用的数字信号输出端,WR 和 RD 分别与微处理器的读/写信号线相连,用于向芯片写入控制字和读取转换结果。HBEN 用于分别读取转换结果的低 8 位和高 4 位数据,当 HBEN 为低电平时,输出低 8 位数据,为高电平时,输出高 4 位数据。在本系统中,该引脚与地址锁存器 74LS373 的地址线  $A_0$  相连,输

① Max197 Manual. Maxim Integrated Products,1996.

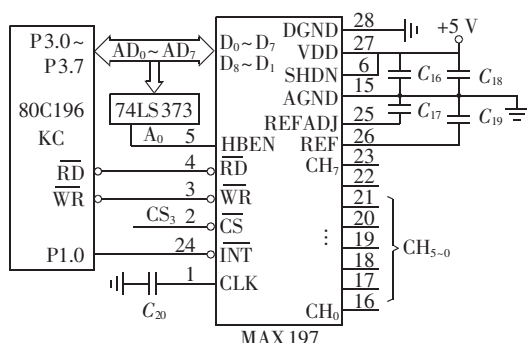


图 5 MAX197 与 80C196KC 接口电路

Fig.5 Interface circuit between MAX197 and 80C196KC

出数据的低 8 位和高 4 位数据的地址分别为 7F00 和 7F01。INT 用于指示转换状态,当转换结束时,INT 输出低电平,可向 CPU 发中断信号,本系统中,将该引脚接至 80C196 的 P1.0,通过查询方式进行 AD 转换。

向 MAX197 芯片写入控制字,即可控制 AD 转换的输入通道、电压输入范围及芯片工作方式等的选择,在写入控制字的同时,启动 1 次 AD 转换,转换结束后,芯片的 INT 引脚就会输出低电平,因此,可采取中断或查询方式等待转换结束,读取转换结果,然后再启动下一路转换。控制字各位的意义分别如表 1 所示。

表 1 MAX197 控制位意义

Tab.1 Definitions of MAX197 control bits

| 控制位                                            | 意 义          |
|------------------------------------------------|--------------|
| D <sub>7</sub> 、D <sub>6</sub>                 | 时钟和掉电模式选择位   |
| D <sub>5</sub>                                 | 内部和外部采集控制选择位 |
| D <sub>4</sub>                                 | 电压输入范围选择位    |
| D <sub>3</sub>                                 | 输入极性选择位      |
| D <sub>2</sub> 、D <sub>1</sub> 、D <sub>0</sub> | 模拟输入通道选择位    |

### 1.6 过零检测电路

过零检测电路如图 6 所示。电压信号经放大整形后送至过零比较器 LM311, 在它的输出端可以得到稳定良好的方波信号, 将该信号送至 80C196 KC 的 HSI.0 口, 用于信号的周期测量。

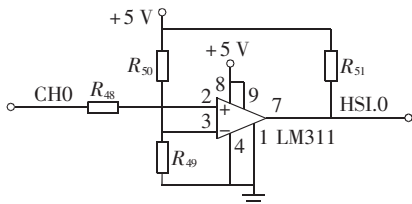


图 6 过零检测电路

Fig.6 Zero-cross detection circuit

## 2 数据采集系统软件设计

箱式变电站采集系统除设计硬件电路外,还应当有与之配套的采样算法,这样才能充分保证系统实现监控所需的检测精度。

目前,对交流信号的采样方法可分为直流采样和交流采样2类,由于交流采样较之直流采样有诸

多优势<sup>[7]</sup>,因此,系统采用交流采样,而交流采样也有3种<sup>[7-13]</sup>,为充分发挥80C196KC的功能,同时降低系统成本,经过比较,本文选用了软件同步采样方式,但软件同步很难满足完全同步的要求,原因是<sup>[8]</sup>:

**a.** 采样周期  $T_s$  是测量上一周期的电网周期确定的, 当电网频率波动时, 采样时的信号周期实际值与测量值之间存在非同步误差:

**b.** 中断响应时间及分散性在每次中断时均引起同步误差,重置定时值时要考虑消除这一累积误差;

**c.** 定时器计数周期的分辨率不可能无限小,当采样周期  $T_s$  量化时( $T_s = T/N$ )将产生量化误差。

软件同步不满足完全同步条件时产生的周期误差  $\Delta T$  不为零, 当存在周期误差时, 因采样  $N$  点所需时间已不等于信号周期, 理论上不能用同步采样公式计算电流、电压有效值和平均功率。一般  $\Delta T \ll 2\pi$ , 微机测量系统仍将 1 周内上述  $N$  个采样值用离散积分的方法计算。显然计算结果有误差<sup>[10]</sup>。

为减小误差,系统软件分别设计了频率测量程序和采样子程序。

在频率测量量子程序中,充分利用了 80C196 单片机的高速输入(HSI)接口特性,HSI 接口检测经硬件电路整形后的方波上升沿,产生高速输入中断进行电网周期的测量。在中断程序中首先读出当前的高速输入计数值  $T_{\text{new}}$ ,计算与上次计数值  $T_{\text{old}}$  之差,获得适时工频周期  $T$ ,对  $T$  的数值范围进行判断,以确定该值的有效性,并根据采样子程序所需要的采样频率计算出适时采样间隔时间  $T_{\text{sj}}$ 。其程序流程图如图 7 所示。

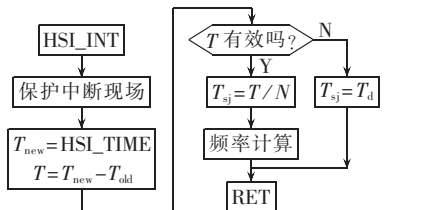


图 7 频率测量子程序

Fig.7 Subprogram of frequency measuring

在如图 8 所示的采样中断子程序中,其主要实现的功能是响应 AD 芯片数据转换后的中断信号,存取采样数据,对采样进行计数,确定是否 1 个周期

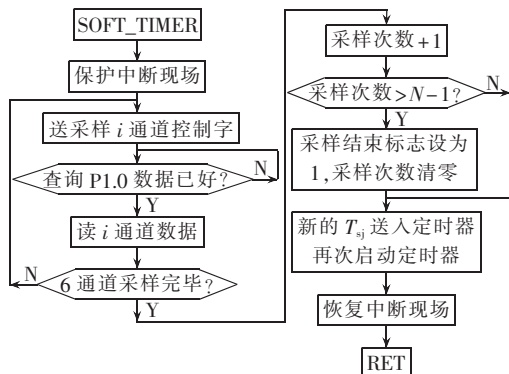


图 8 采样中断子程序

Fig.8 Subprogram of sampling interruption



的数据采样完毕,设置采样 1 周完成标志位,以确定能否进行后续的计算工作,根据电网频率的变化,修正定时器定时中断常数<sup>[11-12]</sup>。80C196 单片机的软件定时器用于产生适时采样间隔  $T_{sj}$  为周期的软件定时器中断,以进行 AD 采集控制。

### 3 实验结果

图 9~12 是数据系统硬件的实验结果,由图可见测量精度满足设计要求。

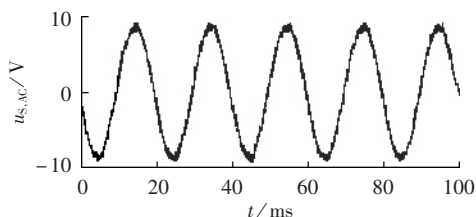


图 9 交流电源输入波形

Fig.9 Waveform of AC input

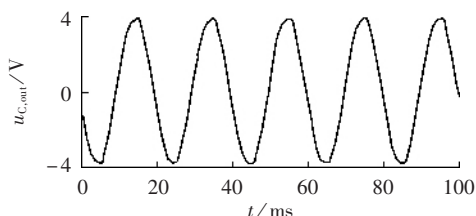


图 10 电压变换器输出波形

Fig.10 Waveform of voltage converter output

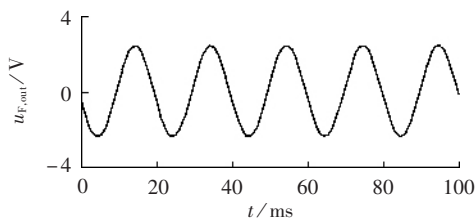


图 11 低通滤波器输出波形

Fig.11 Waveform of low-pass filter output

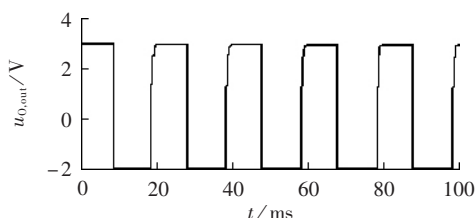


图 12 过零检测电路输出波形

Fig.12 Waveform of zero-cross detection circuit output

### 4 结语

本文介绍了箱式变电站数据采集系统的研制,包括数据采集系统的结构及其硬件和软件的设计。数据采集系统的交流采样采用软件同步采样方式,通过硬件测频电路提供信号实现电网周期的跟踪。系统多通道输入信号采用顺序采样、依次 AD 转换

的采样方式,并从分辨率、转换速度、转换精度等证明系统方案的可行性。实验结果表明数据采集系统能可靠稳定工作,采样精度满足设计要求。

### 参考文献:

- [1] 梁宇宏,杨炼条. 基于现场总线技术的变电站综合自动化系统[J]. 广东电力,2000,13(2):28-32.  
LIANG Yu-hong,YANG Lian-tiao. Fieldbus-technology-based integrated automation system of substations[J]. Guangdong Electric Power,2000,13(2):28-32.
- [2] 党存禄,靳路宁,马安仁,等. 基于现场总线的变电站综合自动化系统[J]. 甘肃科学学报,2006,18(1):95-99.  
DANG Cun-lu,JIN Lu-ning,MA An-ren,et al. Integrated automatic system of substations based on field bus [J]. Journal of Gansu Sciences,2006,18(1):95-99.
- [3] 陈堂,赵祖康,陈星莺,等. 配电系统及其自动化技术[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [4] 孙涵芳. Intel 16 位单片机[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1995.
- [5] 张明君,弭洪涛. 电力系统微机保护[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
- [6] 赵修民,赵屹涛. 测量用互感器及其测试仪器的发展和创造[J]. 中国工程科学,2000,2(3):73-77.  
ZHAO Xiu-min,ZHAO Yi-tao. Development and creations of measuring instrument transformers and their testing equipments [J]. Engineering Science,2000,2(3):73-77.
- [7] 王士政. 电网调度自动化与配网自动化技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [8] 张红,王诚梅. 电力系统常用交流采样方法比较[J]. 华北电力技术,1999(4):25-27.  
ZHANG Hong,WANG Cheng-mei. Comparison of normal alternating sampling methods in electric power system[J]. North China Electric Power,1999(4):25-27.
- [9] 胡虔生,马宏忠. 非正弦周期信号测量同步误差研究[J]. 中国电机工程学报,2000,20(9):35-40.  
HU Qian-sheng,MA Hong-zhong. Research on the synchronous error in the measurement of non-sinusoidal periodic signals[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(9):35-40.
- [10] 马宏忠,胡虔生. 软件实现同步采样的误差分析[J]. 电工技术学报,1996,11(1):44-48.  
MA Hong-zhong,HU Qian-sheng. Analysis on error synchronous sampling by software[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,1996,11(1):44-48.
- [11] 黄纯,何怡刚,江亚群,等. 交流采样同步方法的分析与改进[J]. 中国电机工程学报,2002,22(9):38-42.  
HUANG Chun,HE Yi-gang,JIANG Ya-qun,et al. Analysis and improvement of synchronization technique for AC sampling [J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(9):38-42.
- [12] 黄纯,彭建春. 周期电气信号测量中软件同步采样方法的研究[J]. 电工技术学报,2004,19(1):35-40.  
HUANG Chun,PENG Jian-chun. Research on software synchronous sampling in measurement of period electric signals[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(1):35-40.
- [13] 刘凤新,徐晓明. 电力参数非同步采样误差分析[J]. 电测与仪表,2003,40(10):9-11.  
LIU Feng-xin,XU Xiao-ming. Error analysis of electrical power parameters in non-synchronous digital sampling measurement [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2003,40(10):9-11.

(责任编辑:汪仪珍)

### 作者简介:

孙强(1968-),男,安徽合肥人,讲师,博士,研究方向为微特电机、测控系统、电力电子与电机集成系统等(E-mail:Sun 211@hfu.edu.cn);

张建忠(1970-),男,江苏张家港人,博士研究生,研究方向为现场总线及智能电器。

# Intelligent data acquisition system for prefabricated substation

SUN Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Jian-zhong<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical & Electronic Engineering, Hefei University,  
Hefei 230022, China; 2. Department of Electrical Engineering,  
Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** With 80C196 KC microprocessor as the core, an intelligent data acquisition system is designed for 35/0.4kV and 10/0.4kV prefabricated substations to realize remote centralized control and monitoring. The system consists of modules of voltage generation, front analog low-pass filter, multiplexer, analog-to-digital converter, zero-crossing detector. It is of comparative system, which adopts MAX197 working in sequent sampling and ordinal converting mode and AC sampling synchronized by software. To reduce the error, a subprogram for frequency measuring is developed. The high-speed interruption generated by 80C196 KC is used to measure the power frequency and the sampling interval is then calculated. The interruption constant of the timer is corrected according to the power frequency. Experiment results show that the designed system meets requirements.

**Key words:** data acquisition system; AD converter; software synchronous sampling