

基于 DSP 的智能配电网环网柜 FTU 的设计

周 洪, 罗 星, 邓其军

(武汉大学 自动化系, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对环网柜不易测量多路模拟量的特点, 提出了一种基于数字信号处理器(DSP)的智能配电网环网柜馈线终端 FTU(Feeder Terminal Unit)的设计方案。系统采用插槽式结构进行模块化设计, 利用复杂可编程逻辑器(CPLD)进行信号调度, 能够最多测量 120 路模拟信号, 也可搭配开关信号共同使用, 并且集成有供现场调试用的液晶显示屏。系统还研制了基于 PC 机的上位机调试软件, 通过串口或网络进行通信, 在 PC 机上可以方便地了解到线路的运行状态及历史数据等。

关键词: 配电自动化; 环网柜; 馈线终端; DSP2812

中图分类号: TM 642

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2011)02-0124-05

近年来环网柜在智能配电网和配电自动化领域得到了广泛的使用^[1-2]。

文中介绍了一种基于数字信号处理器(DSP)的智能配电网环网柜馈线终端 FTU(Feeder Terminal Unit), 一台设备最多能够采集 120 路模拟信号。

1 环网柜 FTU 硬件设计

FTU 以 TMS320F2812(简称 DSP2812)作为主控制器, 采用插槽式结构, 采用复杂可编程逻辑器(CPLD)实现 CPU 对各种不同插件的选通及控制。硬件部分主要由主体机箱、CPU 插件、模拟量测量插件、开关量输入/输出插件、电源插件、底板以及 LCD 液晶显示器等部分组成。系统总体框架和硬件原理结构分别如图 1 和图 2 所示。

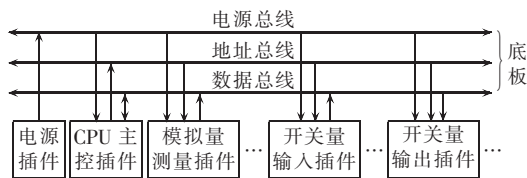


图 1 环网柜 FTU 的总体框架

Fig.1 Overall framework of FTU for RMU

1.1 CPU 插件及信号调度

CPU 插件是整个系统的核心部分, 它采用 DSP 2812 作为主处理芯片, 在系统中负责实现获取模拟量和开关量的数据并进行相应计算和处理、谐波分析、故障判断及处理、与上位机调试软件进行串口和网络通信、支持显示器就地显示等功能^[3-5]。

另外, 系统插件较多, 故采用 CPLD 芯片 XC9536 处理 CPU 插件与模拟量插件、开关量插件之间的数据传递关系。其具体过程如下: 当 CPU 需要得到某个模拟量(开关量输入)插件上的数据或者要控制某

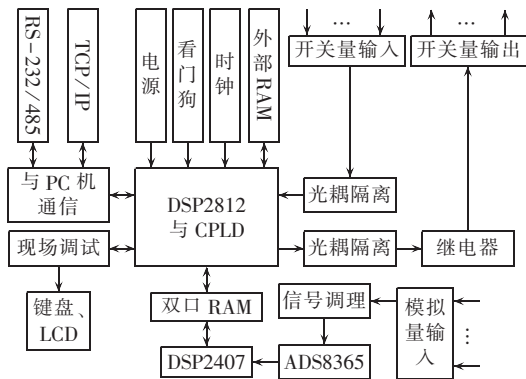


图 2 环网柜 FTU 的硬件结构

Fig.2 Hardware architecture of FTU for RMU

个开关量输出插件时, 先通知 CPLD 选中此插件的锁存器, 此时该插件的数据总线才能连接到 CPU 的数据总线上, 而其他插件的数据总线则不能得到 CPU 发出的数据; 操作完毕后, 再用 CPLD 控制锁存器将此插件的数据总线与 CPU 的数据总线相隔离。这样就使得 CPU 在控制某个插件工作时不会影响到其他插件, 从而很好地完成整个系统的信号调度工作。图 3 为系统信号调度的连接示意图。

1.2 模拟量测量插件

系统插件较多, 采样得到的数据较多, 算法较为

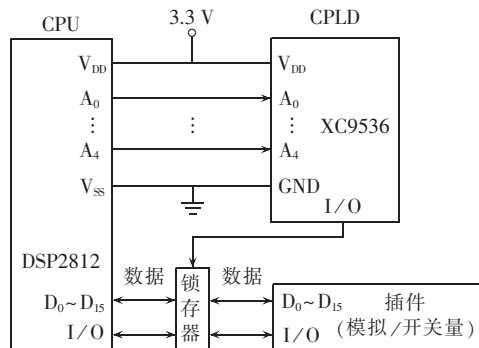


图 3 系统信号调度连接图

Fig.3 Wiring diagram of system signal dispatch

复杂。为了及时处理采样数据,完成谐波分析,并且能够迅速响应主站发出的命令,系统采用双 CPU 结构,把数据采集、计算和数据通信分开处理,以满足系统对实时性的要求^[6-8]。在模拟量测量插件中,采用的是 TMS320LF2407(简称 DSP2407)芯片和 ADS8365 芯片。系统每个模拟量测量插件采集 8 路交流电压或电流信号,采样频率为 3 200 Hz(即每个周期采集 64 点)。ADS8365 是一种 16 位高速并行接口的 A/D 转换芯片,待测模拟信号经过电压或电流互感器(TV、TA)后,再进行信号调理以满足 A/D 采样的要求,然后进入 ADS8365 进行 A/D 转换。ADS8365 将得到的采样数据送入芯片 SN74 LVC16245 进行电平转换,再传给 DSP2407,DSP 及时地进行计算,得到电压/电流的有效值、频率、有功功率、无功功率、功率因数等参数,并且对数据进行 FFT 变换,得到谐波参数。

双 CPU 间的数据共享采用 16 位的高速双口 RAM 芯片 IDT7133 实现。双口 RAM 中主要存放 2 种数据:一种为模拟量经过测量计算后得到的数据,另一种为 CPU 主控插件下传的控制参数。2 种数据被固定存放在双口 RAM 不同的区域中。其中,CPU 下传控制参数的同时会以中断方式通知模拟量测量插件,让其及时地去读取数据。而模拟量测量插件总是根据系统的设定更新测量数据,以保证系统的实时性^[9]。

1.3 开关量插件

开关量插件由开关量输入插件和开关量输出插件 2 部分组成,每块插件均有 16 路输入或输出通道。在控制系统中,FTU 通过开关量的输入、输出与外部开关进行联系。因此,开关量的输入、输出必须确保可靠。系统在开关量输入和开关量输出部分均加入了光电耦合隔离器,以提高系统的抗干扰能力。在开关量输出部分,输出信号首先被寄存在开关量输出控制缓存器中,经光电隔离后,再用达林顿管 ULN2003 对信号进行放大,最后输出到继电器中。

1.4 通信及液晶显示模块

环网柜 FTU 的一个非常重要的功能就是将采集到的各种信息传送至控制中心,并且能根据控制中心下发的命令进行相应操作,这些任务是通过通信模块完成的。为配合不同现场环境的需要,系统设计了串口和网络 2 种通信方式。

系统基于 DSP2812 的 SCI 模块实现了 CPU 与外设进行 RS-232 或 RS-485 方式的串行数字通信,并且提供有 1 个 RS-232 接口,1 个 RS-232 和 RS-485 共用接口。网络通信则采用基于以太网的标准 TCP/IP 协议,通过无线 WiMAX 技术或有线局域网、城域网构成强大的配电自动化系统^[10-11]。

同时,为方便现场调试,设计了基于 RS-232 接口的串口液晶显示屏,能够在调试现场方便地看到

环网柜线路当前的运行状态、开关合闭闸情况、模拟量测量值、计算值、谐波参数及波形图等。

1.5 插件与结构设计

本系统主机箱内底板共有 17 个插槽位,其中左起第 1 个为电源插件槽位,第 2 个为 CPU 插件槽位,其余 15 个槽位可根据需要插入模拟量测量插件、开关量输入插件或开关量输出插件。在作为环网柜 FTU 使用时,可较多地使用模拟量测量插件,也可搭配开关量插件灵活使用。

2 环网柜 FTU 软件设计

2.1 下位机软件总体设计

系统下位机软件编程主要包括 CPU 插件主程序、模拟量测量插件 A/D 数据采集程序、通信程序等设计。环网柜 FTU 的主要任务是:对电网的电压、电流、频率、功率、谐波、开关信号等进行实时采样、分析、检测、记录,隔离故障线路,上报故障数据,及时执行控制中心下发的数据召唤和开关量输出等工作命令^[12]。

CPU 插件软件总体流程:系统初始化后,先进行硬件自检,然后打开中断,进行故障检测,再根据所选择的不同插件进行相应的数据读取或开关控制的操作,并且对事件和数据记录,处理显示程序,再将数据等上传到控制中心。图 4 为 CPU 插件的总体流程图。

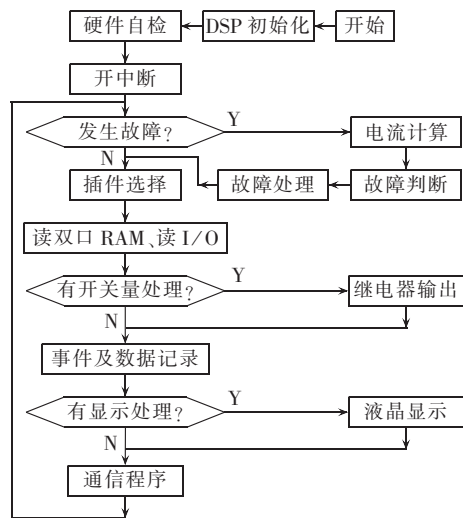


图 4 CPU 插件总体流程

Fig.4 Flowchart of CPU plug-in card

模拟量测量插件最主要的功能是对交流电压或电流信号进行采样和计算,它的主程序流程如下: DSP2407 先初始化,再通过定时器中断控制 A/D 芯片进行采样,之后进行基本参数计算和谐波分析计算,并将结果写入双口 RAM 供 CPU 插件读取使用,如 CPU 插件有控制命令以中断方式发出,DSP2407 也要做出相应处理。图 5 为模拟量测量插件的软件流程图。

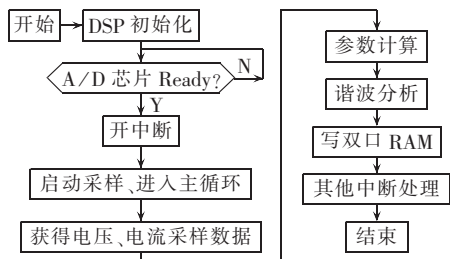


图 5 模拟量测量插件的软件流程

Fig.5 Flowchart of analog plug-in card

系统的网络通信采用 TCP/IP 协议,具体流程如下:第 1 步判断是否有新的数据包,当有新的数据包时,判断是否是 arp 数据包,若是 arp 数据包,采用 arp 应答。若不是 arp 数据包,判断是否是 ip 数据包,若是 ip 数据包,判断是 ping 请求还是 udp 请求,并做出相应的应答,其流程图如图 6 所示。

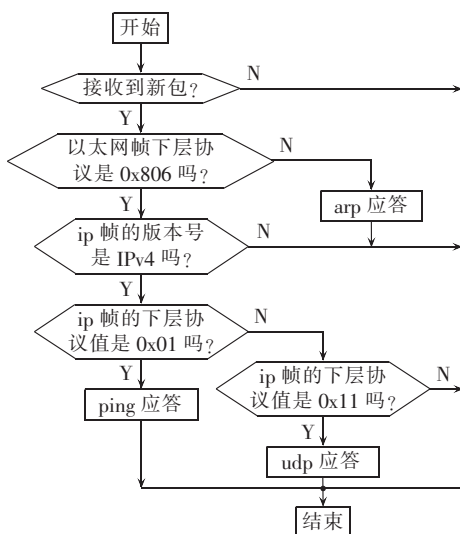


图 6 网络通信流程

Fig.6 Flowchart of network communication

2.2 模拟量插件基本参数计算

频率计算:利用 DSP2407 芯片自带的电压捕获功能对频率进行测量,将跟踪频率的方波信号作为捕获引脚的输入信号,令连续 2 次捕获信号时定时器上的读数之差为 N ,DSP 定时器的频率为 f_s ,则交流信号的频率 $f = f_s / N$ 。同时系统采用了测量多个周期取平均值的方法,以减小测量的误差。

基本参数的计算:系统采用高精度的 16 位 A/D 芯片进行交流采样,能够准确测量计算出线路电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数等参数。系统对被测信号在 1 个周期内进行 64 次采样,设还原后的离散值为 $U(n)$ 、 $I(n)$ (其中 $n = 1, 2, \dots, 64$),则计算公式如下(U 、 I 为电压、电流有效值):

$$U = \sqrt{\frac{1}{64} \sum_{n=1}^{64} U^2(n)}, I = \sqrt{\frac{1}{64} \sum_{n=1}^{64} I^2(n)}$$

$$P = \frac{1}{64} \sum_{n=1}^{64} U(n)I(n), S = UI$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \lambda = \cos \varphi = P/S$$

2.3 谐波分析

随着非线性设备的大量应用,电力系统中的谐波问题日益严重,而谐波会导致绝缘应力升高,最终可能使电缆击穿,谐波还会增加设备的损耗,可能使负载设备损坏,所以对配电网中的谐波检测分析是必要的^[13-14]。另外,谐波分析也是实现配电自动化中接地故障分析及检测功能不可缺少的手段^[15]。系统在谐波分析理论的基础上,运用 FFT 算法进行谐波分析。

在电力系统中对频率为 f_m 的非正弦波电量进行傅里叶级数分解,除了得到与电网基波频率相同的分量外,还会得到一系列高次谐波分量。下面以电压 $u(t)$ 为例,在满足狄里赫利条件下可分解为

$$u(t) = \sum_{n=0}^k A_n \sin(2\pi f_m t + \theta_0)$$

其中, $n = 0, 1, 2, \dots, k$; $n = f_n / f_1$ 为谐波频率与基波频率的比值,称为谐波次数; A_n 为 n 次谐波的幅值。

电压信号的连续时间频谱可表示为

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt$$

根据离散傅里叶变换,被测信号的第 k 次谐波分量 $Y(k)$ 可表示为

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (1)$$

其中, $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$; $y(n)$ 为零序电压或零序电流。

根据系统功能的实际需要,环网柜 FTU 可以提供第 1~11 次零序谐波分析的指标,即在式(1)中取 k 值为 1、3、5、7、9、11,用以分析接地故障及电能质量。

2.4 上位机调试软件

为增强环网柜 FTU 的功能,更好地分析电能质量,系统配有专门的上位机调试软件。该软件能够很好地通过网络或串口与环网柜 FTU 相连接,软件主要实现了用户管理、文件操作、运行监视、通信设置和辅助功能等 5 个方面的功能,图 7 为该软件的功能结构图。

3 环网柜 FTU 的主要技术指标

3.1 模拟量测量插件技术指标

容量:单板支持 8 路交流信号采样,可根据需要扩展至 15 块板。

电压输入标称值:100 V/220 V、50 Hz。

电流输入标称值:5 A、50 Hz。

电压/电流测量精度:0.5 级。

有功测量精度:1.0 级。

无功测量精度:1.0 级。

相位角精度:不大于 2°。

谐波电压/电流精度:1.0 级。

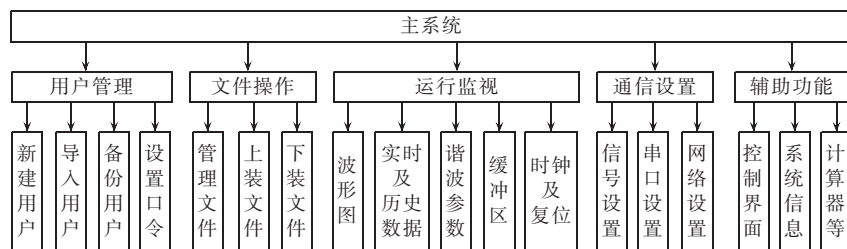


图 7 上位机调试软件功能结构

Fig.7 Functional structure of commissioning software for superordinate computer

在标称输入值时,每一回路的功率消耗小于 $0.25 \text{ V} \cdot \text{A}$ 。

短期过量交流输入电流施加标称值的 2000 % (标称值为 5 A),持续时间小于 2 s 时,系统工作正常。

3.2 开关量输入插件技术指标

容量:单板 16 路输入通道,可根据需要扩展至 15 块板;事件分辨率小于 2 ms;软件防抖动时间为 1~60000 ms 可设。

3.3 开关量输出插件技术指标

容量:单板 16 路输出通道,可根据需要扩展至 15 块板;输出方式为继电器常开接点;接点容量为交流 220 V,10 A;直流 24 V,10 A。

3.4 通信技术指标

串行接口:1 个 RS-232 接口,1 个 RS-232 和 RS-485 共用接口(可自行选择),采用 IEC60870-5-101:2002 协议。

以太网接口:10BASE-T RJ45 接口 1 个,采用 IEC60870-5-104 协议。

通信速率:串行接口,传输速率不大于 19.2 Kbit/s,最大传输距离为 1.2 km、比特差错率不大于 10^{-5} ;以太网接口,传输速率为 10 Mbit/s、比特差错率不大于 10^{-10} 。

4 结语

文章主要从开发设计的角度,结合环网柜的特点以及 DSP 技术在配电自动化当中的应用,介绍了智能配电网环网柜 FTU 的软硬件实现。该系统发挥了 DSP2812 处理器灵活高速,外设集成度高,控制能力强的优点,计算快速准确,测量精度高,运行稳定可靠。系统采用模块化设计,层次清楚,利用 CPLD 完成 CPU 与其他插件之间的信号调度,提高了设备的集成度和灵活性;双 CPU 设计提高了系统的运行速度,16 位的 A/D 转换芯片保证了模拟量采集的准确性和高精度,对被测量的模拟量进行 FFT 运算,得到谐波参数,分析电能质量;开关量部分的光电隔离设计提高了系统的稳定性;配有液晶显示屏及键盘能够方便地进行现场调试;配有上位机调试软件,能够在 PC 机上实时地了解环网柜中线路的运行状态,并且进行远程控制。

参考文献:

[1] LEEUWERKE R P, BRAYFORD A L, ROBINSON A, et al.

Developments in ring main unit design for improved MV network performance[J]. Power Engineering Journal, 2000, 14(6): 270-277.

[2] 蔡树立. 新型智能化环网柜测控保护终端的研究开发[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 24-25.

CAI Shuli. Research and development of intelligent ring main unit of control, measuring and protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 24-25.

[3] 苏书坚, 郑强. 基于 ARM9 的 FTU 控制器设计[J]. 科学技术与工程, 2009, 12(9): 3531-3534.

SU Shujian, ZHENG Qiang. Design of FTU controller based on ARM9[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 12(9): 3531-3534.

[4] 刘仕兵. 基于 DSP 的馈线终端装置 FTU 的设计与实现[J]. 华东交通大学学报, 2009, 26(3): 58-63.

LIU Shibing. Design and realization of feeder terminal unit based on DSP[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2009, 26(3): 58-63.

[5] 宗剑, 张鑫, 牟龙华. 智能配电网馈线终端单元 FTU 设计方案[J]. 电工技术, 2004(1): 11-12.

ZONG Jian, ZHANG Xin, MU Longhua. Research on intelligent distribution network feeder terminal unit[J]. Electric Engineering, 2004(1): 11-12.

[6] 毛艳, 王章启, 沈祥裕. 适用于铁路贯通(自闭)线的高性能 FTU 的研制[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 111-113.

MAO Yan, WANG Zhangqi, SHEN Xiangyu. Research on FTU of the railway power supply line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(8): 111-113.

[7] MENG Yongpeng, JIA Shenli, SHI Zongqian. Application of the DSP technology in Feeder Terminal Unit(FTU)[C]//Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Yokohama, Japan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2002: 2100-2105.

[8] BERTOCCHI A, BRACCO G, BUCETI G, et al. Distributed computing for FTU data handling[J]. Fusion Engineering and Design, 2002, 60(3): 325-331.

[9] 隋国正. FTU 中电流采样值准确性问题研究[J]. 低压电器, 2008(17): 45-48.

SUI Guozheng. Research on precision of current sampling value in FTU[J]. Low Voltage Apparatus, 2008(17): 45-48.

[10] LIANG Ying, XIN Yong. Discussion on practical functions of feeder automation based on SCADA and FTU[C]//2006 China International Conference on Electricity Distribution. Beijing, China: Institution of Engineering and Technology, 2006: 84-89.

[11] CENTIOLI C, BRACCO G, ECCHER S, et al. Commodity hardware and open source solutions in FTU data management[J]. Fusion Engineering and Design, 2004, 71(1): 195-200.

[12] 周念成, 贾延海, 赵渊. 基于配电网系统保护的馈线终端[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 94-97.

ZHOU Niancheng, JIA Yanhai, ZHAO Yuan. Feeder terminal unit based on system protection to distribution network[J].

Automation of Electric Power Systems,2006,30(8):94-97.

(编辑:汪仪珍)

- [13] CHULHWAN K. Educational use of emtp models for the study of a distance relaying algorithm for protecting transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2000,15(1):9-15.
- [14] REINPRECHT N B,DAVID B. Data management for the electricity market[J]. IEEE Computer Applications in Power,2001,14(1):35-38.
- [15] ZHOU Dan,QI Hongwei,YANG Xudong. Study of fault location isolator and restoration method in the distribution network[C]//2009 Chinese Control and Decision Conference. Guilin,China:IEEE Computer Society,2009:5284-5288.

作者简介:

周 洪(1962-),男,湖南茶陵人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为多变量过程控制系统、发电厂电网控制系统等(E-mail:hzhouwuhee@263.net);

罗 星(1989-),男,江西丰城人,硕士研究生,研究方向为电力系统计算机控制技术(E-mail:luoxing89@163.com);

邓其军(1975-),男,湖北新洲人,讲师,博士,研究方向为电力系统计算机控制技术。

Design of DSP-based FTU for RMU of intelligent distribution grid

ZHOU Hong,LUO Xing,DENG Qijun

(Department of Automation,Wuhan University,Wuhan 430072,China)

Abstract: As the RMU(Ring Main Unit) of intelligent distribution grid is difficult to measure multiple analog signals,a DSP-based FTU(Feeder Terminal Unit) is designed for it,which adopts the slot-type structure in modularized design,applies CPLD to dispatch signals,measures up to 120 analog signals or digital signals,and integrates LCD for site commissioning. The commissioning software is developed for PC-based superordinate computer,communicating via serial port or network. The line operating condition and the historical data can be displayed on the PC.

Key words: distribution automation; RMU; FTU; DSP2812