

# 井下采区无人值守变电所综合自动化系统设计

吴 娜, 郭银景

(山东科技大学 信息与电气工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘 要:**开发了一种基于数字信号处理器与控制器局域网总线的井下采区变电所无人值守综合自动化系统, 实现了采区变电站的无人值守。系统由监控中心、通信接口和智能测控保护单元组成。重点研究了智能测控保护单元部分软硬件设计和测控保护算法; 针对井下采区变电站的实际应用环境, 设计了适合井下供电系统的测控部分模拟量交流采样算法和微机保护算法, 以提高测量精度, 实现及时有效的保护。

**关键词:**采区变电站; 无人值守; 测控保护单元; 数字信号处理器; 控制器局域网总线

中图分类号: TP277

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2011)05-0090-06

## Design of Integrated Automation System in Unattended Mining Area Substation

WU Na, GUO Yinjing

(College of Information & Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology,  
Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** A new kind of integrated automation system was designed based on digital signal processor and CAN bus, the unattended in mining area was realized in the paper. The system was composed of the monitoring center, the communication interface and, the intelligent supervision and protection units. The authors focused attention on the design of hardware and software of intelligent supervision and protection units, and the algorithm of supervision and protection. According to the actual environment in mining area, the authors developed a supervision and protection algorithm suitable to the exchange and sampling of analog quantity of supervision and protection units in power supply system underground and the algorithm of microcomputer protection, improving the measuring precision and real-time effective protection in time.

**Key words:** substation in mining area; unattended; supervision and protection unit; digital signal processor; CAN bus

煤矿井下采区变电所是煤矿供电系统的一个重要组成部分, 井下无人值守变电站监测技术是煤矿减员增效的有效手段, 也是煤矿安全生产的技术保障之一<sup>[1]</sup>。为了应对我国日益严峻的煤矿开采安全形势, 2010年8月24日, 国家安监总局和国家煤矿安监局联合下发关于建设完善煤矿井下安全避险“六大系统”的通知(安监总煤装[2010]146号), 明确要求各大煤矿建设完善矿井监测监控系统, 煤矿井下采区变电所的监测监控是其中的重要组成部分。

近年来, 无人值守变电站监测技术得到较快发展<sup>[2]</sup>, 在变压器监控<sup>[3]</sup>、监控平台建设<sup>[4]</sup>和故障诊断技术<sup>[5]</sup>等领域都有了可喜进步, 为面向现场的采区变电站智能测控系统的设计奠定了技术基础。2003年, 郭银景等<sup>[6]</sup>将 VoIP (voice over internet protocol) 技术应用到无人值守变电站监测系统中, 实现了各开关设备的遥测、遥信、遥控、遥调“四遥”功能; 2008年, 陈尔奎等<sup>[7]</sup>基于 CAN (controller area network, 控制器局域网) 总线技术开发设计了变电站终端的预警功能。在井下采区无人值守变电所综合自动化系统中, 测控保

收稿日期: 2011-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(61071087); 山东科技大学科学研究“春蕾计划”项目(2008BWZ050)。

作者简介: 吴 娜(1977—), 女, 山东梁山人, 讲师, 博士研究生, 主要从事电气工程及其自动化方面的教学及科研工作。

E-mail: wuna\_sd@163.com.

护单元的设计是最关键的。本研究开发了一种基于数字信号处理器的智能测控保护单元,并搭建了实用的井下采区无人值守变电所智能测控保护系统。

## 1 无人值守变电所智能测控系统结构设计

无人值守变电所智能测控系统的设计采用分层分布式结构。该系统主要由 3 部分构成:①地面监控中心,②井下采区变电站的智能通信接口及信息传输通道,③面向现场的智能测控保护单元。系统整体结构如图 1 所示。

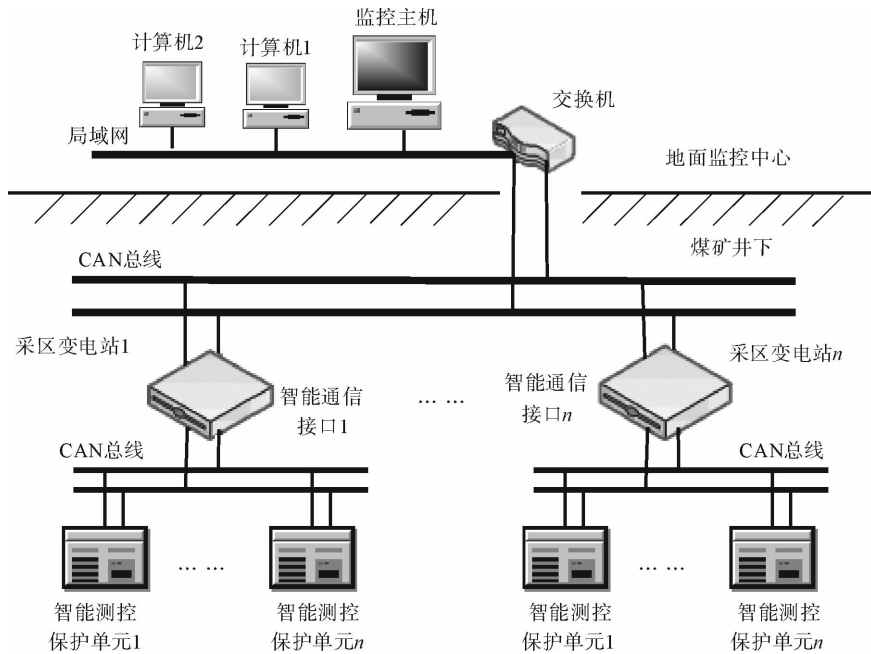


图 1 系统整体结构图

Fig. 1 The diagram of overall structure of the system

### 1.1 地面监控中心

地面监控中心沿用过去变电所综合自动化系统的相关技术<sup>[6]</sup>,由局域网交换机、系统主控计算机、其它网络计算机等组成。其任务是对整个井下采区变电站的信息进行收集和处理,并通过先进友好的人机界面实现井下采区变电站的监控及管理。值班人员在核对口令后,通过监控主机对井下采区变电所内的配电设备进行操作控制,其他计算机可以通过局域网显示部分或全部监控画面和数据,但不能进行操作控制。

### 1.2 井下采区变电站的智能通信接口

井下监控智能通信接口(工控机)放置于采区变电所内,负责连接地面监控中心和现场所有的智能测控保护单元,起着上传下达的作用。

井下采区变电站的智能通信接口与地面监控主机之间采用高可靠性的现场 CAN 总线控制技术<sup>[2]</sup>。井下智能通信接口装置与测控保护单元之间也采用高可靠性的 CAN 总线的通信方式。

### 1.3 井下智能测控保护单元

智能测控保护单元的主要监控对象为井下采区变电所内的高低电压防爆馈电开关,是系统的核心单元,它既要实现微机监控又要实现微机保护功能。微机监控功能是采集井下采区变电站各线路的电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数、电网频率、有功电度、无功电度等模拟量参数,采集现场各开关设备的状态,并送至地面监控中心;同时,接收地面监控中心下发的控制指令并执行,即实现“四遥”的功能。微机保护部分负责采集线路的电压和电流,根据复序分量法故障判据判断线路是否发生了短路、过载、断相、欠压、漏电等故

障,根据故障的类型发出语音报警信号或者控制断路器跳闸。

## 2 井下智能测控保护单元的硬件设计

### 2.1 硬件总体设计

目前运行的智能测控保护单元大都是采用单片机做处理器,采用汇编语言编程,功能比较单一,不能满足井下电力监控的需求。本系统选用美国德州仪器公司的 32 位定点、150 MHz 主频的 TMS320F2812 芯片做数字信号处理器(digital signal processor,DSP)。

井下智能测控保护单元采用的是模块化设计,除了 MCU 模块外,还包括电源模块、模拟量采集模块、光电隔离开关量输入模块、光电隔离开关量输出模块、时钟模块、显示模块、两路 CAN 总线通信模块等。智能测控保护单元的总体结构如图 2 所示。

### 2.2 模拟量交流采集电路的设计

#### 2.2.1 互感器的选择

为了保证测量的精度和保护及时性,测量部分和微机保护部分的模拟量输入通道采用分开设计的形式。测量部分采用精度高的电压电流互感器,测量精度可达 0.1 级;微机保护部分则采用专用的保护用 P 级电压电流互感器,以满足微机保护的快速性。

而漏电保护所需的三相线路的零序电压和零序电流取自专用的零序电压互感器与零序电流互感器。

#### 2.2.2 A/D 转换器的选取

本系统采用 DSP 内嵌 A/D 转换器,具有 12.5 MS/s 的转换速率,精度为 12 位,可接入 16 通道模拟量。模拟量交流采集电路如图 3 所示。

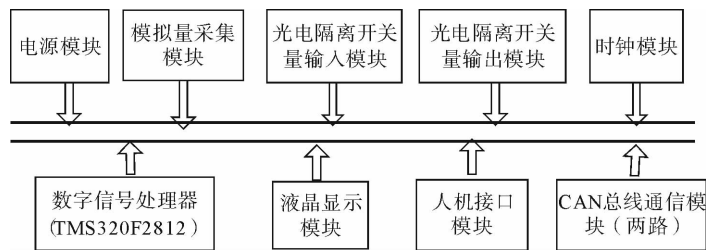


图 2 测控保护单元硬件结构图

Fig. 2 The diagram of hardware structure of the supervision and protection units

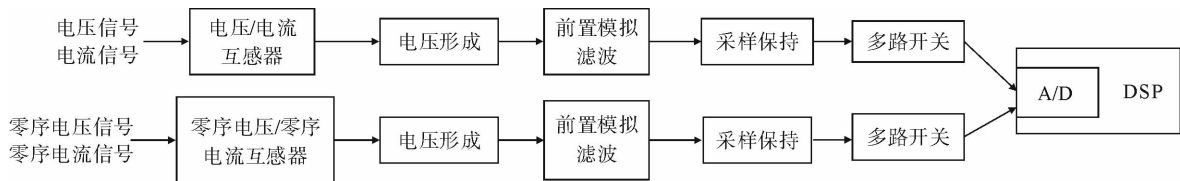


图 3 模拟量输入通道结构图

Fig. 3 The structure of input channel of the analog quantity

### 2.3 开关量输入输出回路设计

开关量输入模块的任务是采集现场线路断路器和隔离开关的状态,然后传送至监控中心。开关量输出模块的任务是接收地面监控中心的遥控指令并驱动继电器控制相应的回路实现跳闸或合闸。

开关量输入输出模块设计采用光电耦合器以有效地隔离现场高电压、大电流对微机系统的电磁干扰。

### 2.4 其它模块

#### 2.4.1 电源模块

电源模块采用带失压延时功能的高可靠性开关电源、宽电压输入的供电方式,正常工作电源由控制变压器引入。

## 2.4.2 显示模块

显示模块用于与保护装置的人机交互、键盘处理、红外遥控接收和信息显示等功能。显示窗口采用 4.3 英寸的汉字液晶显示器,使人机界面清晰易懂;同时配置了丰富的灯光指示信息,使保护装置的运行信息更为直观。显示模块可采用本安键盘、按钮和红外遥控器进行操作,操作安全、方便、可靠。显示模块采用高速串行总线接口与主板连接。

## 3 测控保护单元采用的算法设计

### 3.1 模拟量交流采集算法

本系统采用交流采样的方式测量井下供电系统三相线路的电压、电流,为了保证测量的精度,采用均方根算法。

对于周期为  $T(T=20\text{ ms})$  的交流电压电流信号,设采样从  $t=0$  开始,采样点数为  $N$ ,第  $j$  个采样点的电压值为  $u_j$ ,电流为  $i_j$ ,利用如下均方根的公式(离散化后)即可求出电压电流的有效值:

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j^2}, I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N i_j^2}。$$

其中, $U$  和  $I$  需经过系数变换才能得到交流采样器一次侧的电压和电流。设电压互感器和电流互感器的变比分别为  $k_{TV}$  和  $k_{TA}$ ,A/D 转换系数为  $k_{AD}$ ,电压互感器与 A/D 之间电压形成回路的转换系数为  $k_{U1}$ ,电流互感器与 A/D 之间电压形成回路的转换系数为  $k_{I1}$ ,则实际的电压和电流的有效值为:

$$U = \frac{k_{TV}}{k_{U1}k_{AD}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j^2}, I = \frac{k_{TA}}{k_{I1}k_{AD}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N i_j^2}。$$

对于三相电路来说,如果完全对称,可测得单相有功功率,然后乘以 3 就得到三相有功功率。如果三相不对称,分别求得各相的有功功率,然后求和,也可以得出三相有功功率,这就是常说的“三表法”,但这样就必须对 3 个电压瞬时值和 3 个电流瞬时值进行采样,分别计算各项功率,因而软硬件的开销都比较大<sup>[8]</sup>。由于煤矿井下供电系统采用的是中性点不接地系统,根据三相三线制的特点,本系统采用“两表法”来测量三相有功功率。有功功率的计算公式为  $P = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (u_{ABj} \cdot i_{Aj} + u_{BCj} \cdot i_{Cj})$ 。其中, $u_{AB}, u_{BC}$  为线电压, $i_A, i_C$  为相电流。

因无功功率  $Q$  与有功功率  $P$  仅在电压、电流的相位差上相差  $\frac{\pi}{2}$ ,故  $Q$  的计算公式为

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [u_{ABj} \cdot i_{A(G+\frac{N}{4})} + u_{BCj} \cdot i_{C(G+\frac{N}{4})}],$$

其中: $N$  为一个周期等间隔采样次数; $u_j, i_j$  为一个周期内电压、电流的第  $j$  次同时刻采样值。

可以看出,均方根算法的数据窗为整个周期,所以该算法具有精度高的优点。由于该算法的结果是均方值,它不仅对交流正弦波形有效,而且当采样点数较多时,对畸变的波形也是非常有效的,因而适用于井下采区变电所交流电量的采集。

### 3.2 微机保护算法

煤矿井下供电系统由地面变电所通过 6 kV 电缆提供,其接线方式采用中性点不接地方式。而煤矿井下供电系统常见的故障主要是单相或两相接地、断相、短路,不正常运行方式主要有过载、欠压、过压等。

供电系统在正常运行状态下基本上为正序分量的电压、电流,只有在出现不对称故障时才会出现负序或零序分量的电压、电流。因此,负序和零序分量包含有故障信息,它们都可用于检出故障,因而将此方法应用于本系统的微机保护中。

#### 3.2.1 故障判据

煤矿井下供电系统最常见的就是单相接地故障,其最大的特点就是产生了零序电流和零序电压。故障线路的零序电流为全系统非故障元件对地电容电流之和,功率方向为由线路流向母线;非故障线路的零序电流大小等于本身的对地电容电流,功率方向为由母线流向线路。系统中专设零序电流互感器,用来采集线路

的零序电流。

当井下供电系统发生两相短路时,电网中产生负序电流而无零序分量,并且两故障相电流大小相等,方向相反。

当井下电网发生断相故障时,线路中也会出现负序电流,但负序电流的大小与发生两相短路时不同。因此,可通过判断负序电流的大小来区分两相短路故障和单相断线故障。

采用负序保护原理对井下不对称故障进行分析,可大大提高两相短路保护和断相保护的灵敏度和保护范围。

### 3.2.2 负序分量法

A相的负序电流分量可表示为  $\dot{I}_{A_2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C)$ , 其中: 运算子  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ,  $a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ;  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  分别为 A, B, C 三相电流。

对于负序分量, 总有:  $\dot{I}_{A_2} + \dot{I}_{B_2} + \dot{I}_{C_2} = 0$ , 其中  $\dot{I}_{A_2}, \dot{I}_{B_2}, \dot{I}_{C_2}$  分别为 A, B, C 三相负序电流。所以,

$$\dot{I}_{A_2} = \frac{1}{3}[(1 - a^2)\dot{I}_A + (a - a^2)\dot{I}_C] = \frac{1}{3}\left[\sqrt{3}\left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}\right)\dot{I}_A + j\sqrt{3}\dot{I}_C\right] = \frac{\sqrt{3}}{3}[\dot{I}_A e^{j\frac{\pi}{6}}],$$

离散化后得

$$i_{A_2}(k) = \frac{\sqrt{3}}{3}\left[i_A\left(k + \frac{N}{12}\right) + i_C\left(k + \frac{N}{4}\right)\right].$$

这种算法要求数据窗的宽度为 1/3 个工频周期, 当  $N = 12$  时, 负序电流瞬时值为

$$i_{A_2}(k) = \frac{\sqrt{3}}{3}[i_A(k+1) + i_C(k+3)].$$

通过上述算法求出负序电流瞬时值后, 可采用全波傅里叶算法或其它方法计算负序电流。本系统采用

全波傅里叶算法:  $a_1 = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} i(t) \cos(\omega_1 t) dt$ ,  $b_1 = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} i(t) \sin(\omega_1 t) dt$ ; 离散化后  $a_1 = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i(k) \cos(k \frac{2\pi}{N})$ ,

$b_1 = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i(k) \sin(k \frac{2\pi}{N})$ ; 基波分量的有效值为:  $I = \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{2}}$ 。

全波傅里叶算法应用于井下供电网络有如下优点: 将周期函数分解为正弦和余弦分量, 适合于微机保护中计算基波分量和倍频分量; 全波傅里叶算法精度高、滤波效果好、稳定性强, 和其他算法相比, 更适合井下采区变电站的微机保护。

### 3.2.3 过载保护算法

过载保护使用反时限保护元件。反时限保护元件是动作时限与被保护对象中电流大小自然配合的保护元件, 可以非常方便地实现全线路的配合。本系统提供一般、特殊、极端三种反时限曲线, 可以通过整定控制字选择其中一种, 构成反时限过流保护。

反时限保护元件动作曲线方程如下:

$$\text{一般反时限曲线 } t = \frac{0.14t_p}{(I/I_p)^{0.02} - 1}; \text{特殊反时限曲线 } t = \frac{13.5t_p}{(I/I_p) - 1}; \text{极端反时限曲线 } t = \frac{80t_p}{(I/I_p)^2 - 1}。$$

其中:  $I_p$  为启动电流,  $I$  为最大相电流,  $t_p$  为时间常数,  $t$  为理论动作时间。

反时限过流保护采用能量积累及释放方式, 不受电流波动影响, 当电流大于启动电流, 并且当能量积累时间大于理论动作时间时, 保护开始动作。

## 4 测控保护单元的软件设计

系统软件采用 C 语言编程, 模块化结构设计, 由主程序和一些功能模块子程序组成。功能模块子程序主要包括系统初始化模块、测控部分计算模块、中断服务模块、故障处理模块、显示模块、串行通信中断模块、人

机接口模块等。

主程序除完成系统初始化和装置自检等任务外,还包括电压、电流、功率因数的计算,温度的测量,液晶显示以及键盘扫描等功能模块。此外,由于过压和欠压保护对时间要求不是很严格,因而也在主程序中实现。

采样中断模块中首先进行模拟量的采集,每采集一个通道,都要分别保存原始数据和差分数据,当所有通道采集完后,计算保存负序电流瞬时值并读取开关量的状态。采样中断程序每个采样周期调用一次故障检测模块,在该检测模块中,利用双半周比较法作为保护的启动元件,若任一相电流突变量连续3次超过门槛值,则进入微机保护故障处理模块;当采集完三相零序电压和零序电流时,计算 $3\dot{U}_0, 3\dot{I}_0$ ,若满足 $3U_0$ 大于零序电压整定值则进入漏电保护故障处理模块。

## 5 井下采区无人值守变电所综合自动化系统的现场应用

经过两年多的研制和多次现场调试,井下采区变电所无人值守综合自动化系统已在现场投入使用。与原有的井下采区变电所运行模式对比,以山西灵石某煤业公司为例,系统的优越性是非常显著的,主要体现在以下方面:

1)该系统投入运行后,采区变电所可实现无人值班,只需安排一名巡视人员,提高了劳动生产率。一个采区变电所一年大约节省人工运行费10万元。

2)井下采区变电所实现了无人值守后,大大提高了井下供电系统的可靠性。据统计,安装此系统后井下每年误操作事故率平均降低了约70%,停电事故率平均减少了约80%。

## 6 结论

井下采区变电站无人值守综合自动化系统结合计算机、通信、自动化领域的先进技术,采用先进的DSP作为微处理器,将高可靠性的CAN总线应用于采区变电站与地面监控中心的通信。井下现场发生故障时,一方面可通过清晰实时的语音报警通知现场巡视人员,另一方面通过数字CAN总线通信方式将故障信息及时可靠地送到地面监控中心。实现了地面监控中心对井下现场的实时监控,真正实现了无人值守。应用情况证明,系统具有可靠性高,稳定性强,软硬件扩展方便,安装、调试、维护简单等优点。

### 参考文献:

- [1]YANG Z, TANG W H, SHINTEMIROV A, et al. Association rule mining-based dissolved gas analysis for fault diagnosis of power transformers[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2009, 39(6):597-610.
- [2]RIM S J, ZENG S W, LEE S J. Development of an intelligent station HMI in IEC 61850 based substation[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2009, 4(1):13-18.
- [3]CATTERSON V M, MCARTHUR S D J, Moss G. Online conditional anomaly detection in multivariate data for transformer monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4):2556-2564.
- [4]WESTERMANN D, KRATZ M. A real-time development platform for the next generation of power system control functions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(4):1159-1166.
- [5]TRIPATHY M. Power transformer differential protection using neural network principal component analysis and radial basis function neural network[J]. Simulation Practice and Theory, 2010, 18(5):600-611.
- [6]郭银景, 康景利, 唐富华, 等. VoIP技术在无人值班变电所远动通信中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 26(1):82-84.  
GUO Yinjing, KANG Jingli, TANG Fuhua, et al. Application of VoIP technology in unmanned substation communication system[J]. Automation of Electric Power System, 2004, 26(1):82-84.
- [7]陈尔奎, 牛慧晖, 苏明. 基于CAN总线的变电站预警终端的研究与开发[J]. 山东科技大学学报:自然科学版, 2008, 27(3):58-62.  
CHEN Erkui, NIU Huihui, SU Ming. Research and development of forewarning terminal in substations based on the CAN bus[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 27(3):58-62.
- [8]李勇. 低压配电开关柜智能监控单元设计[D]. 成都:成都理工大学, 2010.