

# 适用于工业企业变电站的保护测控一体化装置开发

李永林<sup>1</sup>, 刘益青<sup>2</sup>, 袁文广<sup>2</sup>

(1. 山东东营供电公司, 山东 东营 257091; 2. 积成电子股份有限公司厂站部, 山东 济南 250100)

**摘要:** 大型工业企业变电站对自动化产品的需求与日俱增, 但与电力系统主电网中的变电站相比有其特殊性, 借鉴成熟的电力系统变电站综合自动化技术和以太网通信技术, 基于新型的 MCU 硬件平台和 VxWorks 嵌入式操作系统, 开发了一套系列化的保护测控一体化装置, 为实现企业变电站的自动化提供了先进的解决方案。针对目前企业变电站中应用的保护测控装置普遍存在的问题, 提出了相应的解决方法, 实践证明该装置能很好地适应工业企业变电站的特殊运行要求。

**关键词:** 测控; 微机保护; 工业变电站; 变电站自动化

## Development of integrated measurement, control and protection devices for industrial substations

LI Yong-lin<sup>1</sup>, LIU Yi-qing<sup>2</sup>, YUAN Wen-guang<sup>2</sup>

(1. Shandong Dongying Electric Power Corporation, Dongying 257091, China;

2. Integrated Electronic Systems Lab Co.,Ltd, Jinan 250100, China)

**Abstract:** The demand for automation products used in substations of large industrial enterprises is continuously increasing. Compared with conventional substations in power system, industrial substations have their own particularities. This paper introduces the development of a series of integrated measurement, control and protection devices, which provides advanced solution for industrial substation automation. Adopting matured technologies in power system substation automation and Ethernet telecommunication, the solution is based on advanced MCU hardware platform and VxWorks embedded operating system. This paper also addresses difficulties encountered in the design of devices for industrial environments and provides corresponding solutions. The field operation practice proves that the devices well satisfy the special requirements for industrial substations.

**Key words:** measurement and control; microprocessor-based protection; substation for industry; substation automation

中图分类号: TM769; TM774

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2008)21-0052-04

## 0 引言

出于生产管理及节能减排的考虑, 越来越多的冶金、石化、煤炭、钢铁等工业企业拥有了自己独立的变电站。并且随着企业规模的不断扩大, 变电站电压等级、变电容量不断提高, 这都对企业变电站的安全稳定运行水平提出了更高要求, 只有运用安全可靠、功能完备的自动化系统才能从根本上保证企业的正常生产。

虽然变电站的保护测控一体化装置已经开发出完善的产品<sup>[1]</sup>, 但是应该看到, 大型工业企业的供电网和电力系统主电网有着较大的区别, 变电站综合自动化的应用有不同的侧重点, 对工业用户而言更倾向于保证用电设备的安全和可靠的供电。简单地将应用于电力系统主网变电站的综合自动化产品用于工业企业变电站会遇到一定困难。

这些大型工业企业的负荷大部分属一类负荷,

直接与生产安全相关, 要求自动化产品具有极高的可靠性, 而且这些企业的电气系统需要与工艺系统或 DCS 系统相配合, 对装置的灵活性要求也很高。在充分考虑这些特点的基础上, 利用成熟的变电站综合自动化技术, 包括间隔层保护测控装置和网络通信技术, 成功开发出了完全适用于工业企业变电站的保护测控一体化装置, 性能优越, 并形成系列化, 可成套提供整个变电站的综合自动化解决方案。

## 1 装置整体设计

### 1.1 硬件设计

装置的硬件设计以效率为先、资源最大化兼顾成本为指导思想, 采用全模块化设计, 主要由以下几个模块组成: CPU模块、交直流模拟量输入模块、数字量输入模块、数字量输出模块、人机交互模块、电源模块等。整体硬件结构参见图1。

作为整个装置的核心模块, CPU采用Freescale

公司的 32 位 ColdFire 系列嵌入式微处理器 MCF5272<sup>[2]</sup>, 时钟频率 66 MHz, 带有适应数字信号处理的硬件乘加器 (MAC), 集成了快速以太网控制器和通用串口控制器及 SPI 总线控制器等部件, 为完成复杂的控制、计算功能和强大的通信功能提供了硬件保证。外扩了 FLASH 和 SRAM 芯片用于存放程序和掉电保持的记录。

MCF5272 自带了一路 10/100M 自适应快速以太网控制器, 另外增加了一片 AX88796 快速以太网控制器, 构成冗余双以太网结构。通过使用以太网物理层芯片 LXT971A, 实现了物理层双绞线接口和光纤接口的自适应。

作为数据采集系统的核心, A/D 芯片采用 TI 公司的 ADS8364, 该芯片是独立 6 通道同步 16 位高速模数转换器, 转换时间仅 4  $\mu$ s。模拟量采用全差分输入, 具有更高的抗共模干扰能力。考虑到工业变电站应用的特点, 模拟量输入模块除了提供通用的电压电流输入外, 还提供了 4~20mA 和 0~5V 直流采集功能, 可与 DCS 系统直接配合, 另外可支持 380 V 电压直接接入装置不需另配 PT。模拟量模块具有多种选配方式, 可灵活配置。

对于复杂的控制出口逻辑及闭锁功能利用 FPGA 实现, 同时完成地址译码、频率采集、采样定时和 GPS (IRIG-B) 解码等工作, 这样可以大大简化外围电路的设计, 提高装置的可靠性。出口控制采用编程校核模式, 并由启动继电器开放电源, 保证在干扰情况下可靠闭锁跳闸出口, 防止保护装置的误动作, 并可实现自检出错的自动闭锁。出口可灵活设置, 方便了现场的各种应用要求。

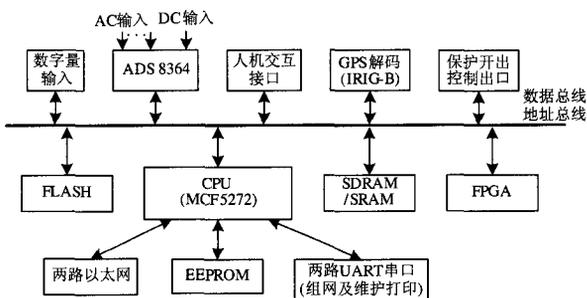


图1 装置的整体结构

Fig.1 Overall structure of equipment

## 1.2 软件设计

使用 WindRiver 公司的商用嵌入式操作系统 VxWorks 作为软件开发平台。VxWorks 采用了微内核结构, 将很多通用操作系统功能从内核中分离出来, 例如设备驱动、文件系统、网络协议栈等, 而只保留任务调度、上下文切换、任务间通讯、中断

响应等最基本的功能<sup>[3]</sup>, 这样就可以将内核体积缩小, 功能单一, 从而提高了内核的运行效率, 保证了系统软件运行的可靠性。

在应用软件设计上, 充分利用各种中断资源和多任务调度, 将实时性要求高的工作放在中断处理程序中执行, 比如采样中断, 保护逻辑处理中断, IRIG-B 解码, 数字量输入扫描, 通信数据的物理层收发等; 而将实时性要求不高或计算量大的工作全部放在任务中处理, 比如测控模拟量的计算, 通信规约的组帧、解帧, 人机交互, 硬件自检等。任务之间的调度和切换由 VxWorks 的内核以基于优先级的可抢占式策略完成, 用户只需指定每个任务的优先级即可<sup>[4]</sup>。图 2 给出了装置的软件设计框图。

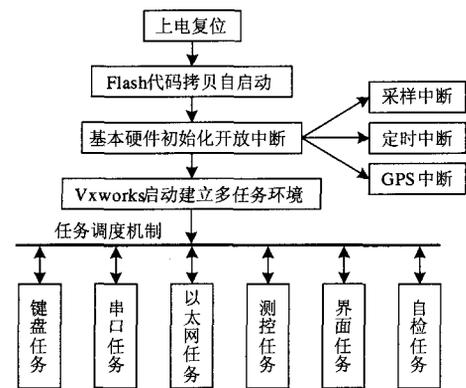


图2 软件设计框图

Fig.2 The block diagram of software

## 2 基本功能设计

### 2.1 测量及控制功能

装置可以完成对馈线、并联补偿电容器、电动机等单间隔所有电量的采集, 包括三相电压、三相电流、有功功率、无功功率、功率因数、频率等, 测量精度电压、电流可达 0.2 级, 其余量达到 0.5 级。最多可以采集 24 路数字量, 作为被控设备运行状态及开关、刀闸状态的监视。具有对功率进行积分电度的累加功能, 可以对三相电压和三相电流进行谐波幅值及含量的计算, 最高可分析到七次谐波。

装置自带操作回路, 具有防跳功能及断路器位置指示, 可以对单台断路器进行就地和远方控制, 每一次的跳合开关都有详细记录, 掉电不丢失, 可以在装置或远方查看。对每一次故障跳闸都有保护事项和录波数据, 方便了运行记录和事故分析。

对装置自身的所有硬件可以进行循环自检, 硬件故障可以定位到芯片, 包括 A/D、RAM、EEPROM、FLASH 及出口继电器等, 并作相应的掉电保持记录。

## 2.2 继电保护功能

基于上述软硬件平台,对于不同的电力设备开发了相应的保护功能:对变压器提供最多四侧差动保护和各侧复合电压闭锁的后备过流保护;对供电馈线提供电压闭锁的电流保护、三相重合闸、低周低压减载等功能;对并联补偿电容器提供放电线圈过压保护、差电压保护和不平衡保护;对电动机提供差动保护、过热保护、负序过电流保护等功能。除完善的继电保护功能外,还提供了备用电源自投等自动装置,用于提高供电可靠性。

这样开发出的系列化产品就可以提供整个变电站自动化的解决方案,还可以根据用户需求做到现场可配置。

## 2.3 通信及远动功能

装置提供了强有力的对外通信接口,足以适应变电站综合自动化的各种需求,并有一定的冗余度。传统的变电站自动化系统中的现场总线技术已经不能满足日趋增长的对分布式实时控制性能的要求,经长期实践证明,在所有的网络技术中,以太网技术是至今最理想的选择。嵌入式以太网的使用可以大大提高通信的传输效率,为与目前的系统接口还保留了两路 RS485 串口,其中一路可以设置为 RS232 模式,供维护调试用。

VxWorks 操作系统自带了 TCP/IP 的网络协议栈,并提供了增强型网络驱动接口(ENI),为使网络协议栈与具体的实现硬件无关,增加了 MUX 子层。这种扩展的体系结构使得增加一路以太网的全部驱动实现起来比较容易。VxWorks 操作系统提供了 BSD4.4 版本的 Socket 网络编程接口,应用层可以直接调用所需的 API 函数即可实现网络通信功能,不必关心具体通信过程的实现。

装置与综合自动化系统的通信规约采用 IEC60870-5-101/103 规约,装置采集到的所有模拟量和数字量等信息全部可以通过网络实现远方查看,保护的動作信息及开关变位事项(SOE)可以实现快速上传,所有的定值和参数可以实现远方查看和修改。

## 3 适用于工业企业变电站的措施

针对目前运行于大型企业变电站的自动化产品存在的种种问题,装置采取了对应的解决方法,并采取了多种提高可靠性的预防性措施。

### 3.1 微机保护频繁启动

工业企业内负荷变化大而且频繁,这样可能导致装置在正常运行时就频繁启动,不但影响了整个自动化系统的运行<sup>[5]</sup>,而且增加了保护误动的可能

性。单纯提高电流突变量启动定值,又会降低故障时保护的灵敏度,为解决这个问题对突变量启动元件增加了浮动门槛措施:

$$\left| i_{d\phi(k)} - i_{d\phi(k-N)} \right| - \left| i_{d\phi(k-N)} - i_{d\phi(k-2N)} \right| > I_{tbqd} + 1.25\Delta I_{d\phi(-3N)}$$

其中: $i_{d\phi}$ 为某相差电流(AB、BC、CA)的瞬时值; $k$ 指的是本采样间隔采样值; $(k-N)$ 表示一周波之前的对应时刻采样值; $(k-2N)$ 表示两周波之前的对应时刻采样值; $I_{tbqd}$ 为突变量起动电流固定门槛(定值可设), $\Delta I_{d\phi(-3N)}$ 为三周波前的该相差电流的有效值,为浮动门槛。

### 3.2 定时限过流保护配合

工业企业内的供电馈线普遍较短(通常只有几百至几千米),线路阻抗小,负荷电流大,波动大,并且多为单侧电源辐射性网络供电,这种电网接线本身对继电保护的配合就是个难题,更何况出于成本和可靠性的考虑一般仅配置电流电压保护,这样依靠前后级定时限电流保护定值和时限的配合可能无法实现保护动作的选择性。出现开关越级跳闸事故,导致整个变电站失电,扩大了停电范围,造成了巨大的经济损失。如果仅靠缩短保护范围解决,这使得本来短线的保护范围就小的问题雪上加霜<sup>[6]</sup>。本装置配置了三种常用的反时限特性代替定时限过流保护,在终端馈线和较小容量的电动机上,作为主保护和后备保护使用可以缩短动作时间,改善与上级保护配合时限特性。

$$\begin{aligned} \text{a) 一般反时限, } t &= \frac{0.14T_{dz}}{\left(\frac{I}{I_{dz}}\right)^{0.02} - 1}; \\ \text{b) 非常反时限, } t &= \frac{13.5T_{dz}}{\left(\frac{I}{I_{dz}}\right) - 1}; \\ \text{c) 极端反时限, } t &= \frac{80T_{dz}}{\left(\frac{I}{I_{dz}}\right)^2 - 1}; \end{aligned}$$

其中: $T_{dz}$ 为用户整定的反时限动作时间定值, $I_{dz}$ 为用户整定的反时限保护最低起动电流定值。

### 3.3 谐波影响

众所周知,工业企业用户的谐波污染严重,虽然产生的机理不同于超高压电网故障时产生的高次谐波,但是将对继电保护装置的正确动作产生影响是毋庸置疑的。借鉴超高压继电保护的处理方法,滤除谐波减轻其影响将是提高保护动作正确率的有

效方法。

为消除谐波对继电保护动作的影响,交流采样的模拟量有效值计算采取了以下措施:第一,实部虚部均经全周余弦数字滤波,改善了傅氏算法由于同时采用正弦和余弦两种幅频特性不一致的滤波器带来的谐波影响,即可以滤除所有的整次谐波,并且对低频分量也有相对较好的抑制作用;第二,采用前置差分、积分滤波,改善对非正次谐波的滤除效果和对恒定直流分量的滤除效果;第三,采用较高采样速率。

### 3.4 抗电磁干扰能力

近年来,微机保护的推广应用,突出了变电所的强电磁干扰问题<sup>[5]</sup>,造成电磁干扰的原因有很多,诸如雷击,系统故障,变电所内高压开关操作,避雷器放电高频电流干扰,以及二次回路操作和电网谐波等,特别是在冶金、钢铁等企业变电站由于电磁干扰引起的微机保护误动更是屡见不鲜。

围绕提高装置的抗干扰性能采取了大量软硬件措施,经过反复试验,达到了 IEC 标准和国家标准规定的电磁兼容(EMC)性能的全部最高标准。硬件方面除了传统措施:模拟低通滤波;数字输入与模拟输入尽量远离,二者地线相对独立;电源线及地线尽可能加粗且走向保持与数据传递方向一致,还特别注意了装置的接地环节和空间干扰的屏蔽,比如对装置内的小互感器和电源模块加装良导体的屏蔽。软件方面除了软件看门狗技术;软件陷阱;均值数字滤波外,还采用了波形拟合检测坏数据和关键代码的带校验执行两种技术,即对于关键代码必须按照预定的顺序执行,一旦出现未经过前面的必须步骤而执行到本关键代码则认为该操作无效,防止干扰造成程序流程失控而误动。

除了上述几点措施外,还具有以下特点:为事故分析提供完善的录波数据等资料,装置的动作过程做到全透明,任何一个元件何时启动何时动作于出口继电器都有详细记录,靠全站的 GPS 时钟对时,继电保护动作过程的先后顺序一目了然;应用于中性点非有效接地系统中时提供分布式的接地选线功能。

## 4 结语

利用成熟的电力系统主网变电站的实践经验,结合工业企业变电站的实际需求,开发了一套软硬件平台通用、性能优越的保护测控一体化装置。同

时采取了大量特殊措施以保证在特定环境下装置运行的可靠性、灵活性和可信赖性,可很好地解决现场存在的问题,完全可以满足工业企业变电站运行的要求。

## 参考文献

- [1] 陈玉兰,揭萍,方存洋,等.新型保护测控一体装置地研制[J].电力系统自动化,2005,29(23):83-86.  
CHEN Yu-lan, JIE Ping, FANG Cun-yang, et al. Design of New Type Integrated Device of Protection Relay and Remote Terminal Unit[J].Automation of Electric Power Systems,2005, 29(23):83-86.
- [2] Freescale. MCF5272 ColdFire Integrated Microprocessor User's Manual[Z]. 2002.
- [3] 李方敏. VxWorks 高级程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2004.  
LI Fang-min. Senior Programming for VxWorks[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [4] 邓洁清,郑建勇.嵌入式实时操作系统在中低压综合测控保护装置的应用[J].电力自动化设备,2004,24(6):85-87.  
DENG Jie-qing, ZHENG Jian-yong. Application of Embedded Real-time Operation System in Integrated Measuring and Protective Device for Mid- & Low-voltage Power System[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(6):85-87.
- [5] 袁军芳.微机保护在马钢应用若干问题的探讨[J].冶金动力,2004,11(4):19-22.  
YUAN Jun-fang. Discussion on Several Problems in Application of PC Protection in Maanshan Iron & Steel Co.,Ltd[J]. Metallurgical Power,2004,11(4):19-22.
- [6] 王大居.定时限过电流保护整定计算存在的问题及对策[J].冶金动力,2005,12(4):4-6.  
WANG Da-ju. Problems in Calculation of Setting Values of Timing Over-current Protective Device and Countermeasures[J]. Metallurgical Power,2005,12(4):4-6.

收稿日期:2008-08-05; 修回日期:2008-09-04

作者简介:

李永林(1958-),男,工程师,本科,主要从事电力生产和技术管理工作;E-mail:liyonglin\_paper@sohu.com

刘益青(1977-),男,工程师,硕士,主要从事电力系统微机保护与自动装置的研究与开发工作;

袁文广(1974-),男,高级工程师,本科,主要从事电力系统微机保护与自动装置的研究与开发工作。