

基于 IEC 61850 标准的 新型数字保护平台研究与实现

徐 科¹, 吴在军¹, 闵 涛², 杜炎森¹

(1. 东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 基于 IEC 61850 标准设计的新型数字保护平台将过程层合并单元、智能执行单元和间隔层设备映射到具体的板卡上。介绍了平台的总体硬件结构, 从实时性和可靠性角度详细分析了层间的通信方式, 提出了基于冗余 100 BASE-F 以太网和交换式网络集线器 HUB 的板间通信方式, 并给出了具体的硬件电路实现。采集板和开入/开出板 CPU 选用 5410 DSP, 分别向主控板发送采集信号和接收控制命令; 主控板 CPU 选用 AT91RM 9200 处理器, 完成保护控制和通信功能; 给出了各板的硬件逻辑图。将嵌入式操作系统 VxWorks 引入到间隔层设备中。以线路保护为例, 建立了平台的对象信息模型, 最后阐述了该平台如何实现保护功能。

关键词: IEC 61850; 数字保护平台; 100 BASE-F 以太网; 合并单元; 间隔层设备; 信息模型
中图分类号: TM 771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)02-0079-06

0 引言

IEC 61850 标准在总结多年变电站自动化技术发展经验的基础上, 对变电站自动化系统的通信问题作了深入的研究, 以解决不同产品的互操作问题为目的, 从整体上对变电站自动化系统的信息传输和处理给出了规范^[1-2]。由于目前国内一次设备的数字化尚未成熟, 要将满足此标准的变电站自动化系统在电力系统中实际运行还有很多问题需要研究和探讨。

基于 IEC 61850 标准设计了一种新型数字保护平

台, 既可以按照 IEC 61850 标准运行, 又可以在传统方式下运行, 可以在此硬件平台上深入研究探讨 IEC 61850 的具体问题, 对于 IEC 61850 的应用推广和现有变电站保护设备的改造都具有较积极的意义。

1 新型数字保护平台硬件结构

IEC 61850 规定变电站自动化系统自底向上分别划分为过程层、间隔层和变电站层, 层间采用数据通信方式, 采用面向对象的方法建立信息模型, 信息模型通过抽象通信服务接口向具体协议栈映射, 以此实现无缝的变电站通信网络, 解决不同厂商产品的互操作问题。

过程层通过合并单元将采集到的信号以通信方

收稿日期: 2006-07-12; 修回日期: 2006-10-08

式传递给间隔层设备,智能执行单元以通信方式接收命令。间隔层主要实现控制和保护功能,可以实现设备间相互对话机制。变电站层实现变电站就地操作、外部数据交互接口和通用功能服务等。

IEC 61850 标准体现在硬件上主要是采用通信

的方式。基于 IEC 61850 标准,将过程层的合并单元和智能执行单元、间隔层设备分别映射到不同的板卡上,再辅助以交换式网络集线器 HUB 板、电流互感器/电压互感器(TA/TV)板、电源板和人机界面共同构成新型数字保护平台硬件结构,如图 1 所示。

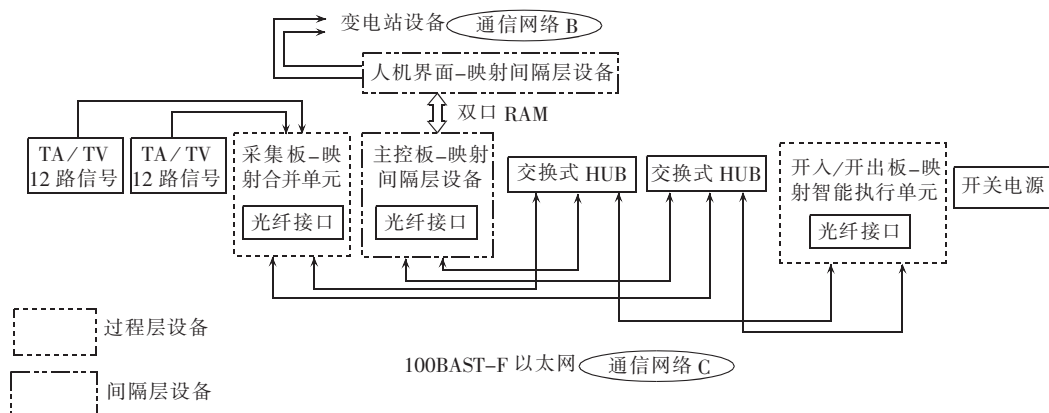


图 1 基于 IEC61850 标准的新型数字保护平台硬件结构图

Fig.1 Hardware structure of digital protection platform based on IEC 61850

该平台分别以模拟量采集板映射 IEC 61850 标准中过程层合并单元,以开入/开出板映射 IEC 61850 过程层的智能执行单元,以主控板和人机界面映射 IEC 61850 间隔层设备,板卡和板卡之间通过冗余光纤网络进行数据通信。

1.1 基于光纤的板间冗余通信网络

对于基于 IEC 61850 标准的数字保护平台设计,数据通信是非常关键的环节。如何保证数据通信的实时性和可靠性是必须解决的问题。

IEC 61850-8 和 IEC 61850-9-2 采用抽象通信服务接口将通信网络 C 和通信网络 B 分别映射到制造报文规范(MMS)和基于 IEEE 802.3 标准的过程总线。以太网采用带有冲突检测的载波侦听多路存取(CSMA/CD)机制,当通信距离较短、节点数少、特别是数据量规模不大时,网络的实时性是可以确保的^[3-4]。研究表明:以太网在网络负载低于 25% 的情况下效果良好,实时性高于令牌网。

当在 IEC 61850 标准下运行时,由于合并单元发送数据的帧格式固定(为 984 bit/s),采样速率则一般设为每周期 36 点^[5],所以过程采样的网络负载为 $36 \times 50 \times 984 = 1.771 \times 10^6 (\text{bit/s}) = 1.771 (\text{Mbit/s})$ 。当在传统方式下运行时,考虑尽可能大的网络负载,采集板采样速率定为每周期 48 点,采集板将经过快速傅氏变换(FFT)计算后的电压/电流的实部、虚部、幅值、相角都发送到主控板,每个数据用 4 Byte 表示,则过程采样的网络负载为 $48 \times 50 \times 24 \times 32 \times 4 = 7.3728 \times 10^6 (\text{bit/s}) = 7.3728 (\text{Mbit/s})$ 。10 BASE-T 的以太网曾经被用于板卡间通信^[6],并不能很好地满足层间通信的要求。对于 100 BASE 的以太网,25% 的网络负载是 25 Mbit/s,无论在何种方式下运行都可以满足变电站内数据通信的实时性要求;另外交

换式 HUB 不会损失网络带宽,将来一次设备都会采用数字化光纤接口^[7]。因此,采用 100 BASE-F 光纤以太网和 100 Mbit/s 交换式 HUB 进行组网作为层间通信的网络^[8]。

采用硬件双冗余网络技术提高装置的可靠性和抗毁性,通信网络 C 和通信网络 B 都采用双网结构,具体组网的硬件结构如图 2 所示。

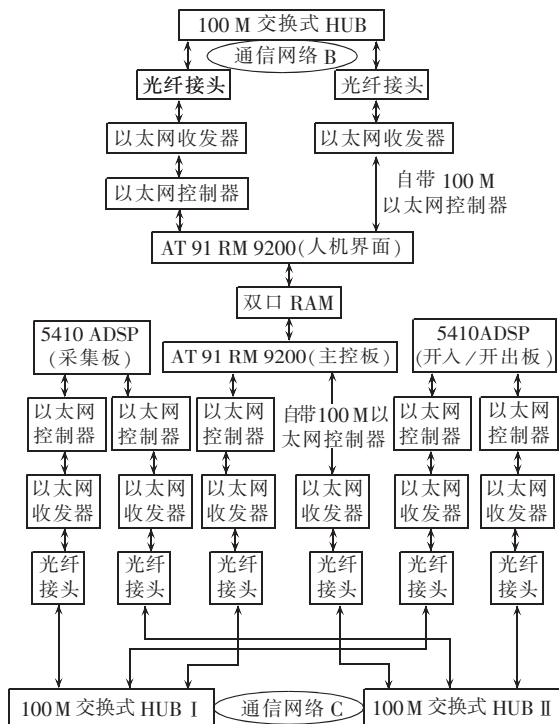


图 2 100 BASE-F 双网冗余硬件设计

Fig.2 Hardware design of redundant Ethernet

以太网控制器采用 10/100 Mbit/s 自适应工业级芯片 LAN 91C 111。LAN 91C111 虽然集成收发

器,但其集成的收发器不支持光纤接口,所以外扩 LAX 971 10/100 Mbit/s 工业级以太网收发器,光纤接头采用 HFBR 5803。交换式 HUB 专用芯片硬件复杂且不能完全满足过程采样的要求,因此采用现场可编程门阵列(FPGA)芯片实现交换式 HUB。

在双冗余网络中,每个节点的以太网控制器,收发器和光纤接头都采用独立的 2 套,交换式 HUB 也采用互不相关的 2 块。当某个节点一块网卡故障,或网线损坏,或其中一个交换式 HUB 故障时网络仍能正常运作。

每个节点的 2 个网卡只能有 1 个物理地址,1 个 IP 地址,对于高层应用程序呈现单网卡特性。网络切换时只需将协议和控制命令绑定备用的以太网控制器即可。

1.2 映射合并单元的板卡设计

IEC 61850 规定合并单元的标准输入为 12 路,考虑到装置既能满足 IEC 61850 标准又能在现有方式下运行,输入信号共为 24 路,相当于用采集板映射了 2 个合并单元,见图 3。

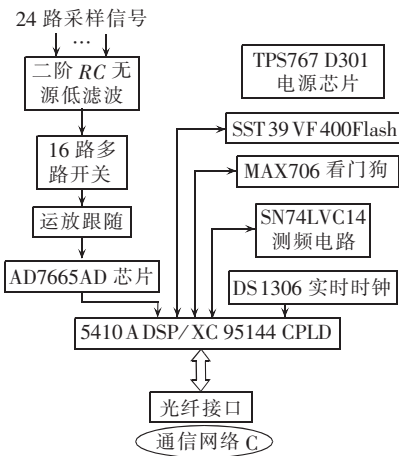


图 3 映射合并单元板卡设计
Fig.3 Board design mapping merging unit

为了实现高速精确的交流同步采样和 FFT 运算,采集板 CPU 选用 5410A DSP^[9-11],最高运算速度为 160 Mbit/s,A/D 转换选用 16 bit AD 7665 芯片,转换速度小于 2 μs。2 片 MAX 7506 多路开关实现对 24 路采样信号的通道选择。

用 XC 95144 复杂可编程逻辑器件(CPLD)扩展 CPU 的片选信号和实现同步信号处理。外扩 2 片 LAN 91C11C 10/100 M 以太网控制器和 LAX 971 10/100 M 以太网收发器实现双网冗余。

1.3 映射智能执行单元板卡设计

用开入/开出板映射智能执行单元,见图 4。

为了减小开发难度,开入/开出板选择了与采集板相同的 CPU,XC95144 CPLD 除用于扩展片选信号和同步信号处理外,还用于扩展开入/开出的接口。其结构较为简单,其余部分类似采集板。

1.4 映射间隔层设备的板卡设计

间隔层设备功能较为复杂,除完成保护/控制

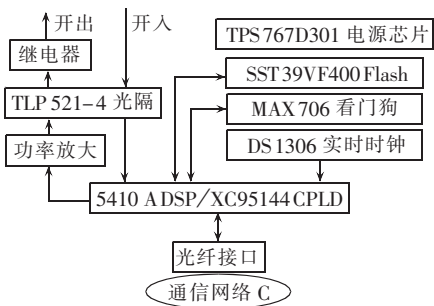


图 4 映射智能执行单元的板卡设计
Fig.4 Board design mapping smart actuator

功能外,既要与过程层通信,又要与变电站层通信,因此考虑将其功能分开,用 2 块 CPU、2 块板卡映射间隔层设备。主控板主要实现保护、控制和与过程层的通信功能,人机界面除完成液晶显示功能外还负责与变电站层的通信任务,主控板和人机界面之间采用双口 RAM 交换数据。

主控板的 CPU 要选择功能强大(尤其是通信功能)、运算速度快和存储容量大的 CPU。因此,主控板 CPU 选用基于 ARM920 T 内核的 AT 91RM9200 处理器^[12-13],主控板结构如图 5 所示。

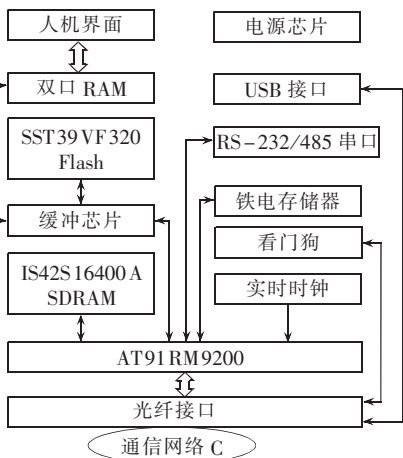


图 5 主控板的硬件设计
Fig.5 Hardware design of main-control board

主控板外扩 64 Mbit SDRAM,用于存放 CPU 运行时的程序和数据。2 片 32 Mbit Flash,1 片用于固化操作系统和装置程序,1 片用于存放事件信息和录波数据。用 1 片 64 Kbit 铁电 EEPROM 存放需经常读写的定值。AT91RM9200 自带一路 10/100 Mbit/s 的以太网控制器,还需外扩 1 片 LAN91C111 和 2 片 LAX 971 就可以实现 2 路 10/100 Mbit/s 光纤以太网接口与过程层通信。设计 1 路 RS-232 串口用于调试和现场升级,1 路 RS-485 串口和传统设备连接。

人机界面的功能主要完成液晶显示和对外通信功能,为了开发方便,采用和主控板相同的 CPU,硬件结构如图 6 所示。

人机界面的硬件结构类似于主控板,去掉了 USB,RS-232/485 串口和铁电存储器,增加 SED1335 液晶控制器和 1 片 XC 9572 CPLD,其余部分与主控板

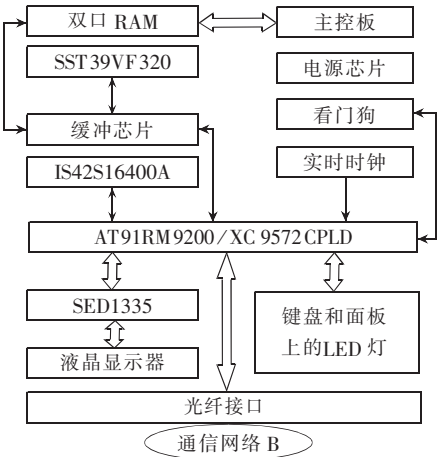


图 6 人机界面的硬件设计

Fig.6 Hardware design of human-machine interface

相同。XC9572CPLD 用于扩展键盘接口和面板上的 LED 灯。

2 实时操作系统 VxWorks 的引入

过程层和间隔层设备软件设计工作的很大部分在于通信模块的设计,尤其是间隔层设备,要同时在通信模块中实现 TCP/IP、MMS、可扩展标识语言(XML)等技术。若采用传统的前后台软件设计方法,不仅软件开发难度大、周期长,且保证不了可靠性。

嵌入式实时操作系统 VxWorks 的出现为此类任务的实现提供了便捷的方法。VxWorks 以高可靠性、强实时性和强大的功能著称。VxWorks 提供了与 BSD4.4 兼容的经过修改后实时性更高且更适合嵌入式系统的 TCP/IP 协议栈。VxWorks 提供 2 种类型的网卡驱动程序即一种是伯克利软件发布(BSD)驱动,另一种是增强的网络驱动(END)。其中,END 网络驱动通过多路(MUX)模块将网络协议和网卡驱动分开,这样就可以很方便地在驱动层实现多网卡冗余设计,也可以在高层用户程序中实现多网卡冗余设计。

因此,将 VxWorks 引入到间隔层设备中,在 Vx-Works 上进行间隔层设备的软件开发。基于 VxWorks 的软件实现示意图如图 7 所示。

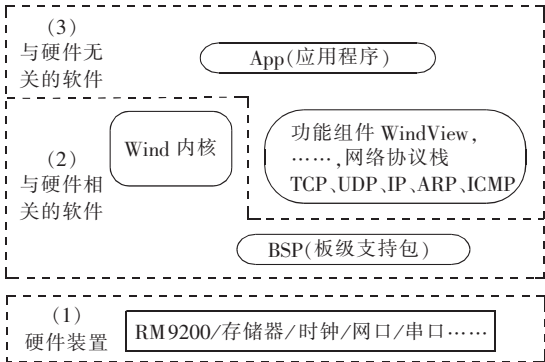


图 7 基于 VxWorks 的软件实现示意图

Fig.7 Software structure based on VxWorks

3 新型保护平台对象建模

不同于以往一般的微机保护监控装置,保护平台对象建模是实现 IEC 61850 标准软件设计的基础。

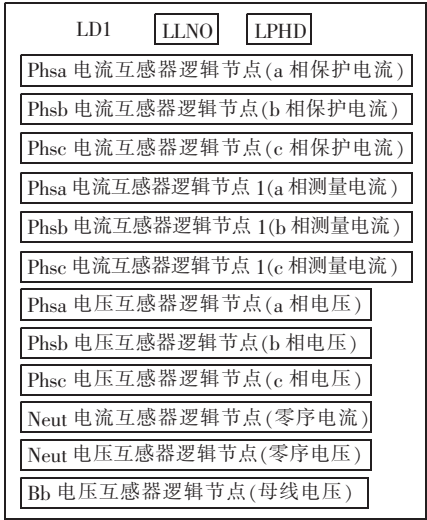
IEC 61850 规定对象的信息模型用逻辑设备(LD)、逻辑节点(LN)、数据对象(DO)和数据对象属性(attribute)构建。

逻辑节点是功能的最小组成部分,描述设备的各种功能。逻辑设备汇集有关逻辑节点和数据集,使之能够通信,一般至少包含 1 个物理设备逻辑节点(LPHD)、1 个逻辑节点(LLNO)和 1 个或多个特定应用逻辑节点。

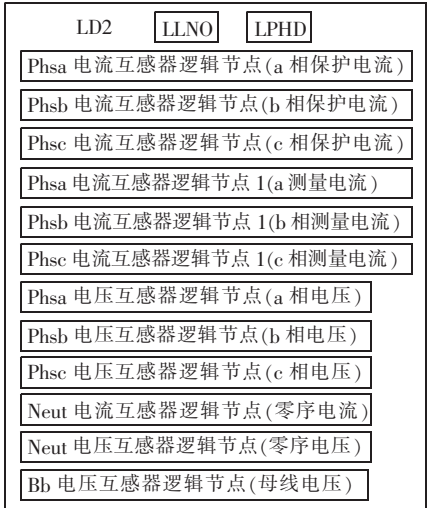
下面以线路保护为例,对保护平台进行简单建模。

3.1 合并单元信息模型

本文中的采集板对应 2 个合并单元,一个标准的 12 路输入的合并单元可以被抽象为一个逻辑设备。每个合并单元考虑采集三相电流/电压,三相测量用电流、零序电流、零序电压、母线电压共 12 路信号^[14]。采集板抽象为 2 个逻辑设备,其信息模型如图 8 所示。



(a) 合并单元 1



(b) 合并单元 2

图 8 合并单元的信息模型

Fig.8 Information model of merging unit

3.2 间隔层设备信息模型

将保护和测量功能分开,分别作为 2 个逻辑设备。保护主要考虑距离保护、过流保护、线路差动保护、振荡闭锁、自动重合闸等^[15];测量主要考虑测量电压、电流、有功、无功、功率因数、各序电压/电流等。信息模型如图 9 所示。

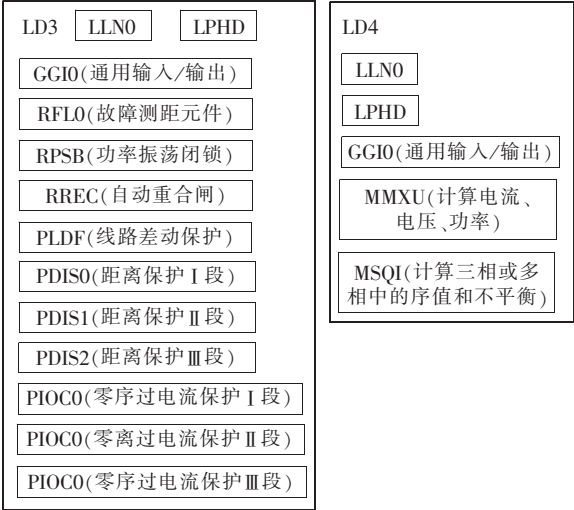


图 9 间隔层设备的信息模型
Fig.9 Information model of bay devices

3.3 智能执行单元信息模型

开入/开出板中考虑将开入和开出分别作为不同的逻辑设备,主要实现断路器、刀闸和硬节点的通、断控制和状态反映,其信息模型如图 10 所示。

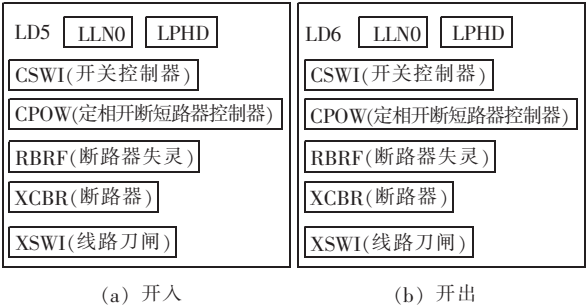


图 10 智能执行单元的信息模型
Fig.10 Information model of smart actuator

关于逻辑节点数据对象、数据对象属性和模型的映射问题在这里不详述。

4 保护功能实现

该平台基于 IEC61850 标准协议的以太网通信实现现有保护功能。采集板模拟合并单元采集 12 路或 24 路模拟信号转换为数字信号(IEC 61850 标准规定合并单元只进行模、数转换不进行计算),并通过网络将开入信号发送给主控板;开入/开出板通过网络将开入信号传送给主控板;主控板接收到采集板的数字采样信号和开入/开出板的开入信号后完成相应的 FFT 运算、保护/控制逻辑算法,然后通过网络给开入/开出板发送出口动作命令,如图 11 所示。

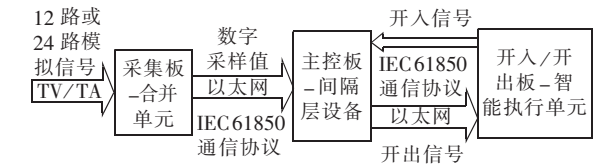


图 11 保护功能实现流程
Fig.11 Realization flow of protection function

该平台也可在现有系统中应用,相比在 IEC 61850 标准下运行,只要将通信协议和运行软件做相应改动即可,并可以进一步将 FFT 等一些保护计算放在采集板上进行。

该平台相对传统保护装置还将具有诸多优点。多 CPU 协调工作,可以实现较为强大的保护/测控功能;板卡之间通过以太网通信,具有标准接口,无相互影响,可以分别进行设计调试和改进,保护平台可以根据不同需要灵活配置(例如采集通道和开入/开出通道的调整)。

5 结论

IEC 61850 标准的实施必然需要一个较长的过程,还有很多问题需要研究和探讨,需要一个实际的硬件平台对标准的具体问题进行探讨研究。

依据 IEC 61850 标准搭建了一个既能满足 IEC 61850 标准又能在传统方式下运行的数字保护平台,并提出将嵌入式实时操作系统 VxWorks 应用到间隔层设备中。已经完成了硬件平台的设计调试工作和 VxWorks 操作系统的移植工作,并完成了硬件平台的模型建立及映射工作。从已经进行的实验可见,100BASE-F 以太网加交换式 HUB 的方式完全可以满足最大过程采样速率的要求,完成一次完整保护动作的通信延时在 10 μs 以内,可以满足保护的速断性要求。

所设计的保护平台对于 IEC 61850 的研究、应用、推广和现有变电站保护设备的改造都将具有积极的意义。

参考文献:

[1] 吴在军,胡敏强. 基于 IEC 61850 标准的变电站自动化系统研究[J]. 电网技术,2003,27(10):61-65.
WU Zai-jun,HU Min-qiang. Research on a substation automation system based on IEC 61850[J]. Power System Technology,2003,27(10):61-65.
[2] 国家发展和改革委员会. IEC / TC57 IEC 61850 变电站通信网络和系统系列标准[S]. 北京:中国电力出版社,2004.
[3] 朱中华,苗世洪,刘沛,等. 牵引变电所微机保护装置方案研究[J]. 电力自动化设备,2005,25(2):43-46.
ZHU Zhong-hua,MIAO Shi-hong,LIU Pei,et al. Scheme of microprocessor-based protection equipment for traction substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(2):43-46.
[4] 沈宏涛,姜奇鹤,王勃,等. 基于 RTPS 的变电站自动化网络通信系统研究[J]. 电力自动化设备,2005,25(2):25-29.
SHEN Hong-tao,LOU Qi-he,WANG Ren,et al. Research on

- substation automation network communication system based on RTPS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 25-29.
- [5] 国家发展和改革委员会. IEC 61850-9-1 特定通信服务映射(SCSM)单点多路点对点通信链路上的采样值[S]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [6] 窦晓波, 吴在军, 胡敏强. 借鉴 IEC 61850 功能分层的保护装置的设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 65-70.
DOU Xiao-bo, WU Zai-jun, HU Min-qiang. Design of protection by referring to function leveling in IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 65-70.
- [7] 罗苏南, 田朝勃, 赵希才. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 108-113.
LUO Su-nan, TIAN Zhao-bo, ZHAO Xi-cai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 108-113.
- [8] 孙军平, 盛万兴, 王孙安. 新一代变电站自动化网络通信系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 16-19.
SUN Jun-ping, SHENG Wan-xing, WANG Sun-an. Study of the new substation automation network communication system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 16-19.
- [9] 侯慧, 游大海, 尹根根. 基于 DSP 的微机继电保护抗干扰研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 4-7.
HOU Hui, YOU Da-hai, YIN Xiang-gen. Research on anti-interference of DSP-based relay protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 4-7.
- [10] 曾成山, 何海军, 谢培元. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 和 DSP 的微机保护核心平台[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(7): 57-60.
ZENG Cheng-shan, HE Hai-jun, XIE Pei-yuan. Product platform for microcomputer protection system based on $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ and DSP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(7): 57-60.
- [11] 张壬寅, 夏锦胜. 基于 DSP 平台的中低压微机保护装置[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 80-83.
ZHANG Ren-yin, XIA Jin-sheng. Research on DSP-based protective device for mid/low-voltage power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 80-83.
- [12] 窦晓波, 徐科, 胡敏强. 基于 ARM 处理器的低压微机保护装置[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 93-99.
DOU Xiao-bo, XU Ke, HU Min-qiang. Low-voltage Microcomputer based protection device with ARM microprocessor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 93-99.
- [13] 樊江涛, 陈剑云, 韦宝泉. ARM 处理器+DSP 构架的微机馈线保护装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 77-80.
FAN Jiang-tao, CHEN Jian-yun, WEI Bao-quan. Microcomputer-based feeder protection on ARM & DSP architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 77-80.
- [14] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于 IEC 61850 标准的采样值传输模型构建及映射实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 38-42.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. Modeling and mapping implementation of a sampled value model based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 38-42.
- [15] 高湛军, 潘贞存, 卞鹏, 等. 基于 IEC 61850 标准的微机保护数据通信模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 43-46.
GAO Zhan-jun, PAN Zhen-cun, BIAN Peng, et al. A data communication model for microprocessor protection based on IEC 61850 standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 43-46.

(责任编辑: 汪仪珍)

作者简介:

徐科(1979-), 男, 江苏兴化人, 博士研究生, 主要从事风力发电和变电站自动化系统研究(E-mail: xudenke@sina.com);

吴在军(1975-), 男, 江苏南京人, 博士, 主要从事变电站自动化系统研究;

闵涛(1963-), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 从事电力系统调度自动化研究管理工作;

杜炎森(1942-), 男, 江苏南京人, 教授, 长期从事电气主设备的微机检测、控制及故障诊断等方面的教学和研究工作。

Digital protection platform based on IEC 61850

XU Ke¹, WU Zai-jun¹, MIN Tao², DU Yan-sen¹

(1. Department of Electric Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 210003, China)

Abstract: A digital protection platform is designed according to IEC 61850, in which the merging unit, smart actuator and bay-level devices are mapped to actual circuit boards. Its hardware structure is introduced. The communication mode between levels is analyzed in terms of real-time performance and dependability. The redundant 100BASE-F Ethernet is proposed for the communication among boards. The hardware circuit is implemented. 5410DSP is used as CPU of the sampling board and the I/O board, which sends the sampling information to the main-control board and receives the control command; AT91RM9200 is used as CPU of the main-control board, which realizes protection, control and communication. Hardware logic diagrams of all boards are given. The embedded operating system VxWorks is applied to bay devices. With an example of line protection, the information model of the protection platform is established and the realization of protection functions on the platform is expounded.

Key words: IEC 61850; digital protection platform; 100BASE-F Ethernet; merging unit; bay device; information model