

DOI: 10.7500/AEPS20130920001

基于背板总线的站域保护控制装置设计

丁毅, 陈福锋, 张云, 余华武, 兰金波

(国电南京自动化股份有限公司, 江苏省南京市 211100)

摘要: 提出一种基于背板总线的智能变电站站域保护控制装置设计方案。设计出一种基于多点低电压差分信号的多主通信背板总线结构;基于资源配置和逻辑图分割描述装置功能协作模型,以背板总线为核心,建立模件内虚拟逻辑总线、背板总线、过程总线以及广域通信网等多层次数据交互及其控制模型。重点分析了背板总线原理、逻辑图实现及功能分割、多层次数据交互实现等问题。该方案在 110 kV 智能变电站站域保护控制装置设计中得到应用,可集成实现功能迁移、冗余保护、集中后备保护、安全自动控制类功能等。现场运行结果表明该设计方案的有效性和实用性。

关键词: 背板总线;站域保护控制;层次化保护控制;智能变电站;集中式保护;IEC 61850;通信

0 引言

IEC 61850 信息模型的应用以及基于以太网的过程总线技术的成熟^[1-4],为多间隔信息共享以及保护、监视、控制等功能融合提供了条件,为层次化保护控制系统的提出创造了契机^[5-6]。层次化保护控制系统以就地间隔保护为主,站域和广域保护控制为补充^[5-6]。其中站域保护控制系统在实现集中配置的后备保护时可利用全站信息共享优势改进现有继电保护算法^[7];同时融合功能迁移、冗余保护、安全自动控制等功能^[8-9]。

站域保护控制系统对装置通信及计算能力提出新的要求^[10]。该装置需接入全站所有间隔过程层智能电子设备(IED)以及其他相关间隔层 IED,提供广域通信网接口,集成多种保护逻辑功能并完成跳闸决策处理^[8];同时为达到优化保护逻辑功能、增加装置内功能单元间协作内容目的,需灵活建立多层次数据通信关系。

基于数字化采样的集中式保护装置已具备站域保护控制装置基本功能雏形^[11],基于多点低电压差分信号(M-LVDS)的背板总线已在继电保护装置过程总线接入功能上得到应用^[10-12]。集中式保护缺乏功能单元间交互与协作。文献^[13]实现了一种基于 M-LVDS 的背板总线且可进行平台化应用开发,但其单套总线非多主模式,扩展能力有限;且缺乏基于背板总线的装置应用功能建模描述及功能单元间协作机制。

本文提出一种基于背板总线的站域保护控制装

置设计方案。设计出一种基于 M-LVDS 的多主通信背板总线结构,引入多模件提升装置通信接入和数据/逻辑处理能力;多层次分析站域保护控制装置功能协作关系,提出基于资源配置和逻辑图分割的功能协作描述模型。该方案应用于 110 kV 智能变电站站域保护控制装置开发,满足装置对通信及计算能力的要求,同时为功能融合和优化提供支撑。

1 站域保护控制装置功能设计

1.1 典型功能配置^[8-9]

层次化保护控制系统把继电保护系统分为 3 个层次:就地间隔保护、站域保护和广域保护^[5-6]。结合智能变电站应用,层次化保护控制系统见图 1。

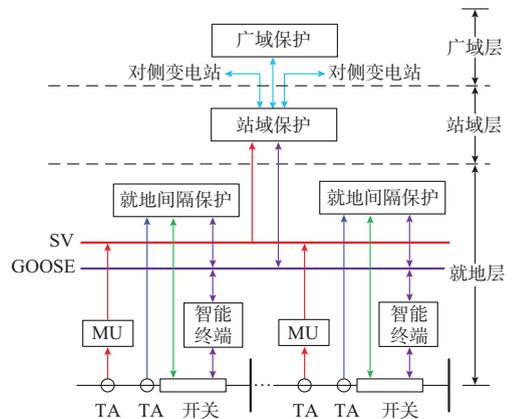


图 1 智能变电站层次化保护控制系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of hierarchical protection and control system of smart substation

图 1 中站域保护控制装置属于站域层设备^[2]。层次化保护控制系统中属于一次设备的电流互感器

(TA)和开关等通过电气信号直接连接至就地间隔保护装置,同时经由作为过程层设备的合并单元(MU)和智能终端分别接入采样值(SV)网和通用面向对象变电站事件(GOOSE)网^[14-15]。站域保护控制装置接入过程总线与过程层设备交互,同时通过广域通信网与广域保护系统及其他变电站通信,因此该装置对外存在多层次通信连接与数据交互。以 110 kV 智能变电站站域保护控制装置为例,其典型功能配置如下。

- 1)就地级间隔保护功能迁移,在就地级间隔保护异常退出或检修时,替代其承担的主保护功能。
- 2)单套配置保护的冗余保护和集中后备保护功能。
- 3)安全自动控制类功能,如低频低压减载、站域备自投、主变过载联切等。
- 4)广域保护类,包括站域信息采集、处理和发送,区域电网保护控制子站功能等。
- 5)通信接入,包括过程总线以及广域通信网接入,与本站其他 IED、远端其他变电站以及广域保护系统通信,实现 SV 接收、GOOSE 收发以及其他功能数据集交互等。

1.2 装置总体设计^[12]

以 110 kV 智能变电站为例,站域保护控制装置由若干保护模块、监控模块以及通信模块等类型组成,均定义为功能模块。其总体设计如图 2 所示,绿色虚线表示模块背板总线地址线。

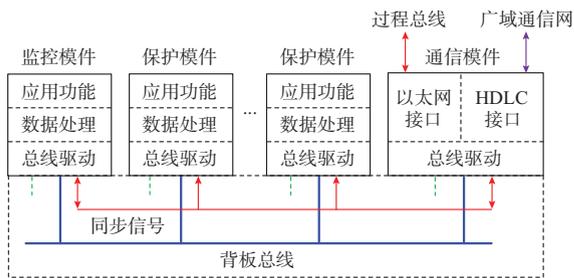


图 2 站域保护控制装置总体设计
Fig.2 Overall design of substation-area protection and control equipment

图 2 中通信模块通过以太网接口接入过程总线,通过高级数据链路控制(HDLC)接口接入广域通信网。背板总线连接各模块,总线地址唯一标识模块。保护模块、监控模块以及通信模块均通过现场可编程门阵列(FPGA)芯片实现背板总线驱动以及数据处理;保护模块和监控模块实现特定应用功能,如保护模块实现具体保护控制算法,监控模块实现监视与操作等。背板上另设同步线,监控模块/通信模块发送同步信号至其他功能模块,以 SV 节拍

为基准实现整装置数据同步处理。

1.3 功能协作架构

背板总线在各分立模块间建立物理通信连接,以此为基础建立模块间灵活的逻辑关系,以多层次数据交互为核心建立功能协作关系,实现特定应用功能。站域保护控制装置功能协作层次架构如图 3 所示。

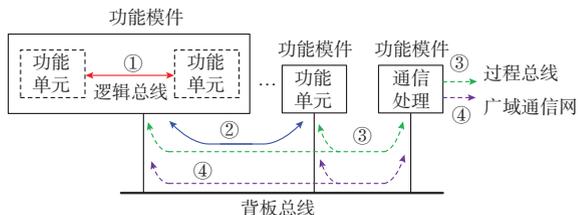


图 3 站域保护控制装置功能协作层次架构
Fig.3 Hierarchical cooperation architecture of substation-area protection and control equipment

图 3 中功能单元指具备独立性的具体应用功能,如保护模块中保护控制功能,通信模块中通信处理功能等;多个功能单元聚合成功能模块,功能模块之间通过背板总线互联;多个功能模块组成整装置。

从图 3 可知,站域保护控制装置数据交互区分为 4 个层次:①单功能模块内逻辑总线;②功能模块间背板总线;③经由背板总线作为整装置接入过程总线;④经由背板总线作为整装置接入广域通信网。层次①为功能单元间提供功能协作机制,数据集输入/输出虚拟为内部逻辑总线;层次②为功能模块间提供交互机制;层次③提供装置与本站其他 IED 交互机制,由 IEC 61850 模型描述^[12],在装置内部转换为背板总线报文;层次④提供变电站到变电站交互机制,因其数据量小,可采用定制数据集方式实现。

层次②为本文论述重点,在分割的功能模块间建立交互机制,实现面向整装置的资源配置、逻辑功能配置、IEC 61850 模型配置一体化。

2 背板总线功能实现

2.1 物理链路设计^[16]

基于 M-LVDS 技术构建背板总线,实现功能模块间高速可靠通信。以 FPGA 为基础构建物理链路;总线包括 1 对时钟总线、1 对控制总线和 4 对数据总线(可扩展),采用无损冲突检测方法实现各模块对总线资源共享。基于 M-LVDS 芯片的背板总线物理链路示意如图 4 所示。图 4 中 M-LVDS 收发器完成单端信号与低电压差分信号之间的转换,单端信号接入模块中的 FPGA 芯片;通信模式为半双工,背板总线时序如图 5 所示,其中 CLK 表示时

钟信号, CTL 表示控制信号, $D[0]$, $D[1]$, $D[2]$, $D[3]$ 分别表示第 0, 1, 2, 3 对数据信号。

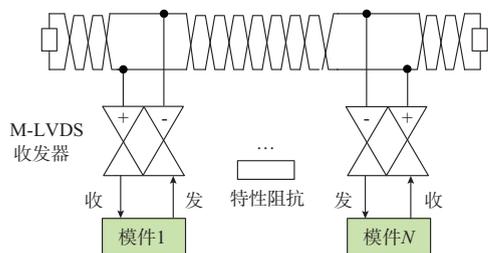


图4 基于 M-LVDS 的背板总线通信链路示意图
Fig.4 Schematic diagram of communication link of backboard bus based on M-LVDS

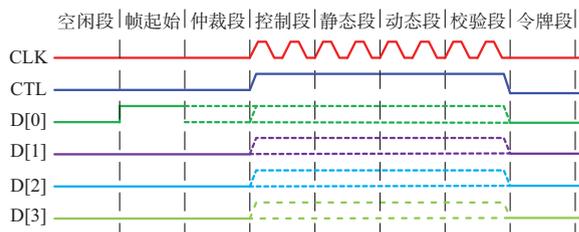


图5 背板总线时序
Fig.5 Timing sequence of backboard bus

图5显示总线链路报文由8段组成。仲裁段标注报文优先级和源地址,令牌段保证总线控制正确轮转,两者结合保证总线上各节点分时使用总线资源,以上两段与空闲段、帧起始段采用异步传输方式。控制段标注目的地址;数据段分静态段和动态段两部分,其中静态段占用固定时隙,动态段按需分配时隙,以能转发最大以太网报文为目标,设置数据段最大占用时隙为 $81 \mu\text{s}$,保证总线节点轮询周期在固定范围之内;校验段校验数据传输正确性。以上4段采用同步方式传输。

2.2 应用报文设计

基于总线链路报文,面向多层次数据集交互,共设计4类应用报文。

1)配置报文。用于监控模块根据配置信息初始化各功能模块,建立模块间数据集交互关系。

2)SV报文。封装来自过程总线SV报文并转发至其他功能模块,包括SV和数据品质。

3)通信端口转发报文。用于将通信模块端口(以太网接口、HDLC接口)接收报文(GOOSE报文、广域通信网报文等)转发至其他功能模块。

4)功能模块输出报文。用于输出功能模块间交互信息、GOOSE报文以及广域通信网报文等。

其中第2,3,4类报文均通过数据集方式交互,第2类报文用于层次③交互;第3类报文用于层次③,④交互;第4类报文用于层次②,③和④交互。

报文携带源地址和目的地址,同时可设置4类报文总线传输优先级,一般取第2类报文优先级最高,第3和第4类报文次之,第1类报文优先级最低。总线节点多个报文可按优先级顺序拼接直至最大总线报文长度,多余报文等待下一轮询周期发送。

3 基于逻辑图的数据交互建模与实现

3.1 建模流程简介^[17]

基于逻辑图建立站域保护控制装置多层次数据交互模型,其流程如图6所示。

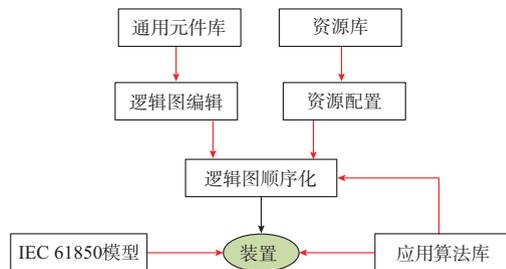


图6 基于逻辑图的装置建模流程图
Fig.6 Flow chart of equipment modeling based on logic diagram

图6中下载至装置信息包括逻辑图顺序化结果、应用算法库以及IEC 61850模型,其中逻辑图顺序化结果是核心,其来源包括通用元件库、资源库和应用算法库。通用元件库包括基本逻辑元件和输入/输出通道元件,通道元件用于关联具体资源;资源库表征装置可用输入/输出资源,配置为层次③和层次④交互数据集,其中层次④数据集为定制;应用算法库包含特定保护控制算法元件。三者组织成逻辑关系后下载至装置;同时下载算法库和IEC 61850模型,后者描述装置过程总线收发数据集和控制模型,建立装置与过程总线关联关系,详细描述层次③数据交互。

3.2 逻辑图分割建立数据交互模型

以主逻辑图为单位分割整装置逻辑,建立数据集交互与功能协作关系,如图7所示。图中以分图为单位建立多层次逻辑包含关系,多个子分图在父分图中引用,多个父分图组合最终形成面向整装置的逻辑配置;属于同一父分图的子分图之间数据交互虚拟为逻辑总线,建立层次①上多值同步传递关系。多个子分图组合成主逻辑图,其输入/输出包含层次③和层次④所配置数据集。

图7通过逻辑图分割建立层次②数据交互,指定主逻辑图运行功能模块地址,确立功能模块间交互数据集数据数量、类型以及方向;同时基于主逻辑图分割资源配置和IEC 61850模型,建立层次③和

层次④数据集交互模型。

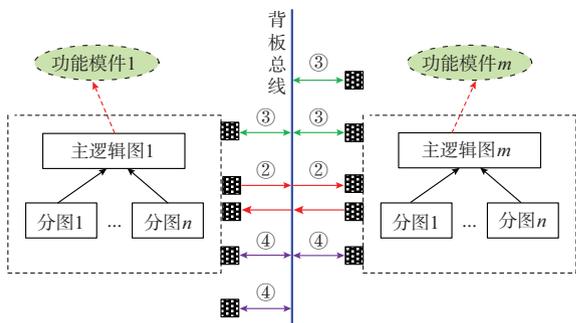


图7 基于逻辑图分割建立数据集交互示意图
Fig.7 Schematic diagram of exchange dataset construction based on logic diagram division

3.3 数据集交互模型在背板总线上的实现

层次①数据交互在功能模块内部完成;层次②、③和④数据交互均需通过背板总线传递,其实现方法如下。

1)功能模块在初始化阶段解析数据集交互模型,层次②输入数据集映射到主逻辑图输入端,输出数据集与逻辑图中间变量建立关联关系;层次③和层次④分割后交互关系通过配置报文发送至通信模块。

2)通信模块根据数据集控制信息对层次③和层次④数据进行转发处理,在背板总线报文和外部报文之间进行转换;接收报文转发至指定总线地址功能模块;发送报文根据携带的输出端口信息进行转发。

3)层次②输出数据报文中包含发送目的功能模块总线地址、数据以及数据节拍,其中数据包括逻辑量和数值型数据等;功能模块根据本地保护控制逻辑处理节拍周期发送,形成稳定总线数据流。

4)层次②接收端定时接收总线报文,解包后把相应数据项填充至逻辑执行输入端,按照数据节拍形成对齐关系并处理,最终完成功能模块间逻辑交互。

4 试验验证

4.1 验证环境与配置

以典型的110 kV智能变电站为例,包含2台主变,110 kV/35 kV两个电压等级。其中110 kV为双母接线,考虑12条出线;35 kV为单母四分段接线,有32条出线。站域保护控制装置功能配置见图8。

图8所示装置共配置8块功能模块,其中包含5块保护模块、2块通信模块和1块监控模块,共建

立8个总线节点。其中功能迁移模块针对12条110 kV线路主保护;3块线路保护模块实现110 kV线路后备保护;集中保护控制模块实现功能包括:简易母差保护、母联保护、主变加速保护、低频低压减载、备自投、失灵保护等。根据图8所示装置逻辑功能分割,装置背板总线报文类型和数量如表1所示。

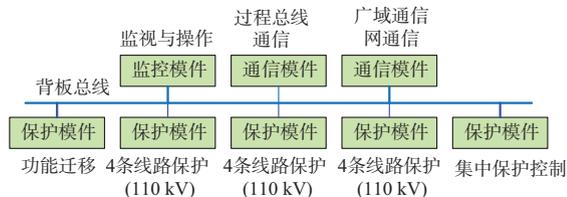


图8 110 kV智能变电站站域保护控制装置功能配置
Fig.8 Function configuration of substation-area protection and control equipment oriented to 110 kV smart substation

表1 背板总线报文类型和数量
Table 1 Type and amount of messages on backboard bus

序号	类型	长度/B	传输时间/ μs	数量	层次
1	初始配置报文	50	2.5	30	②
2	SV报文	904	52.0	1	③
3	GOOSE报文	200	10.0	85	③
4	广域通信网报文	50	6.5	8	④
5	模块交互报文	60	7.0	8	②

表1所示层次③数据交互接入25台合并单元数据,接收69路GOOSE报文,发送16路GOOSE报文;与对侧4座变电站建立8条收发通信通道,实现层次④数据交互;功能模块间建立8条层次②数据交互。其中从25台合并单元SV报文中抽取162路采样通道组成1路总线SV报文,发往各功能模块进行按需抽取。SV采样率可配,如采样周期点数为24时,收发周期为833 μs ,此即最大允许轮询周期。

通过同步数字体系(SDH)广域通信网与其他4座变电站建立通信通道,在站与站之间交互SV及其他控制信息,实现差动保护等主保护功能迁移以及安全稳定控制类功能。

功能模块间数据交互以启失灵和闭锁重合闸逻辑交互为例。功能迁移模块、3块线路保护模块均需向集中保护控制模块发送启失灵信号,同时在相反方向传递闭锁重合闸信号。

根据配置及逻辑图分割确定总线节点运行期发送信息。保护模块均需发送1路功能模块间交互数据;另外功能迁移模块需发送12路GOOSE报文;3块线路保护模块和集中保护控制模块需分别发送1路GOOSE报文;过程总线通信模块发送1帧总

线 SV 报文,实现 69 路 GOOSE 报文转发;广域通信网通信模块接入并转发对侧 4 路数据集。

4.2 结果与分析

单节点单次最大占用时隙为 $81 \mu\text{s}$,8 个总线节点最大轮询周期为 $648 \mu\text{s}$,小于 SV 报文收发周期,装置能正常运行。经测试,不考虑突发性 GOOSE 报文,实际轮询周期为 $130 \mu\text{s}$ 。当某节点出现突发性 GOOSE 报文时,根据节点报文拼接功能,该节点发送报文增长,对总线流量造成冲击,导致轮询周期增长,但不超过最大轮询周期,且不影响 SV 报文接收。

分析两座变电站 M 与 N 之间线路纵联差动保护广域延时。数据传递途经过程总线、背板总线以及广域通信网,延时(T_d)示意如图 9 所示。

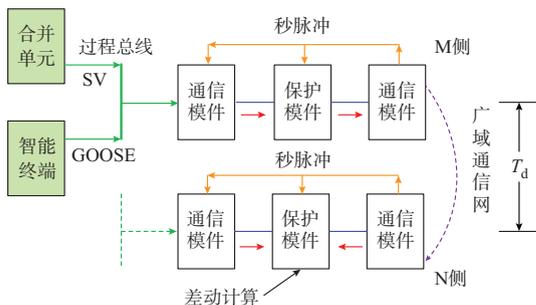


图 9 线路纵联差动保护数据流及其延时环节示意图
Fig.9 Schematic diagram of data flow and time-delay of line pilot differential protection

两侧均由通信模块实现基于时刻调整法的采样数据同步与对齐,并触发秒脉冲信号调整本装置其他模块数据插值时刻^[18]。以数据汇集至 N 侧保护模块实现差动计算为例,M/N 侧 SV 首先接入合并单元,经由过程总线和通信模块传入装置,再通过背板总线转发至保护模块;GOOSE 报文也经由相同路径。

M 侧保护模块汇集 SV 和 GOOSE 报文开入状态以及计算向量值组成定制数据集,周期发送至背板总线,通过通信模块经由广域通信网发送至 N 侧。N 侧由通信模块接入,通过背板总线转发至保护模块,实现 SV 差动和向量差动。

根据试验及现场运行结果,N 侧 SV 延时在 $2.1 \sim 3.2 \text{ ms}$ 之间,M 侧 SV 传递至 N 侧延时在 $3.8 \sim 5.5 \text{ ms}$ 之间,在两倍差动整定值情况下,差动动作时间均小于 30 ms ,满足线路纵联差动保护动作时限要求^[1],表明站域保护控制装置能承担差动保护等主保护功能,同时也能满足其他后备保护功能要求。

5 结语

本文提出一种基于背板总线的站域保护控制装置设计方案,实现通信接入及模块间功能协作机制。基于 M-LVDS 技术构建的背板总线在提升整装置计算和通信能力基础上,具有高带宽、使用简单、扩展方便等优点;基于逻辑图分割建立模块内虚拟逻辑总线、背板总线、过程总线以及广域通信网多层次数据交互,实现功能单元、功能模块、IED 以及站域等多层次功能协作;统一整装置逻辑功能配置、资源配置以及 IEC 61850 模型配置,为整装置功能协作和扩展提供了便捷手段,满足装置开发灵活性要求。该方案可推广至智能变电站其他 IED 开发过程。

参考文献

- [1] Q/GDW 441—2010 智能变电站继电保护技术规范[S].北京:国家电网公司,2010.
- [2] 任雁铭,秦立军,杨奇逊. IEC 61850 通信协议体系介绍和分析[J].电力系统自动化,2000,24(8):62-64.
REN Yanming, QIN Lijun, YANG Qixun. Study on IEC 61850 communication protocol architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(8): 62-64.
- [3] 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 Xiaobo, WU Zaijun, HU Minqiang. Design of protection by referring to function leveling in IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 65-70.
- [4] 李九虎,郑玉平,古世东,等.电子式互感器在数字化变电站的应用[J].电力系统自动化,2007,31(7):94-98.
LI Jiuhu, ZHENG Yuping, GU Shidong, et al. Application of electronic instrument transformer in digital substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 94-98.
- [5] 邓烽,王海燕,周邵亮,等.层次化保护系统:中国,201210289444.2[P].2012-08-14.
- [6] 宋璇坤,李敬如,肖智宏,等.一种面向区域电网的层次化保护控制系统:中国,201310085093[P].2013-03-18.
- [7] 高厚磊,刘益青,苏建军,等.智能变电站新型站域后备保护研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(2):32-38.
GAO Houlei, LIU Yiqing, SU Jianjun, et al. New type of substation-area backup protection for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 32-38.
- [8] 蔡小玲,王礼伟,林传伟,等.基于智能变电站的站域保护原理和实现[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(6):128-133.
CAI Xiaoling, WANG Liwei, LIN Chuanwei, et al. Principle and realization of substation-area protection based on smart substation[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2012, 24(6): 128-133.
- [9] 张春合,陆征军,李九虎,等.数字化变电站的保护配置方案和应用[J].电力自动化设备,2011,31(6):122-125.
ZHANG Chunhe, LU Zhengjun, LI Jiuhu, et al. Protection configuration scheme and application in digital substation[J].

- Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 122-125.
- [10] 李响,刘国伟,冯亚东,等.新一代控制保护系统通用硬件平台设计与应用[J].电力系统自动化,2012,36(14):52-55.
LI Xiang, LIU Guowei, FENG Yadong, et al. Design and application of general hardware platform for new generation control and protection system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 52-55.
- [11] 韩伟,杨小铭,仇新宏,等.基于数字化采样的集中式保护装置[J].电力系统自动化,2010,34(11):101-104.
HAN Wei, YANG Xiaoming, QIU Xinhong, et al. Integrated protection device based on digital sampling technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 101-104.
- [12] 丁毅,叶品勇,郭晓,等.基于背板总线的继电保护装置过程总线功能设计[J].电力自动化设备,2013,33(8):162-166.
DING Yi, YE Pinyong, GUO Xiao, et al. Process bus function design based on backboard bus for relay protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 162-166.
- [13] 蔡月明,仇新宏,李惠宇,等.基于低压差分信号高速串行总线的智能变电站硬件平台设计[J].电力系统自动化,2012,36(21):73-76.
CAI Yueming, QIU Xinhong, LI Huiyu, et al. Smart substation hardware platform design based on low voltage differential signal high-speed serial bus [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 73-76.
- [14] 刘琨,周有庆,彭红梅,等.电子式互感器合并单元(MU)的研究与设计[J].电力自动化设备,2006,26(4):67-71.
LIU Kun, ZHOU Youqing, PENG Hongmei, et al. Research and design electronic transducer merging unit [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 67-71.
- [15] 宋丽君,王若醒,狄军锋,等.GOOSE 机制分析、实现及其在数字化变电站中的应用[J].电力系统保护与控制,2009,37(14): 31-35.
SONG Lijun, WANG Ruoxing, DI Junfeng, et al. Analysis and implementation of GOOSE mechanism and its application in digital substation [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 31-35.
- [16] 李云志,李立萍,杨恒.基于 FPGA 的 LVDS 高速差分板间接口应用[J].半导体技术,2008,33(12):1138-1142.
LI Yunzhi, LI Liping, YANG Heng. Application of LVDS difference interface based on FPGA [J]. Semiconductor Technology, 2008, 33(12): 1138-1142.
- [17] 张云,尹秋帆,胡道徐.继电保护装置开发平台软件系统架构与设计[J].电力系统及其自动化学报,2005,17(4):20-23.
ZHANG Yun, YIN Qiufan, HU Daoxu. Software architecture and design of the development platform for protective relay [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(4): 20-23.
- [18] 丁毅,张云,叶品勇,等.智能变电站光纤纵差保护采样通道延时自适应设计[J].华北电力技术,2012(6):1-4.
DING Yi, ZHANG Yun, YE Pinyong, et al. Adaptive scheme of fiber current differential protection sampling channel delay for smart substation [J]. North China Electric Power, 2012(6): 1-4.

丁毅(1979—),男,通信作者,硕士,工程师,系统架构设计师,主要研究方向:智能变电站、嵌入式系统平台。E-mail: yi-ding@sac-china.com

陈福锋(1979—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:继电保护。

张云(1974—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:继电保护装置平台。

(编辑 蔡静雯)

Design of Substation-area Protection and Control Equipment Based on Backboard Bus

DING Yi, CHEN Fufeng, ZHANG Yun, YU Huarwu, LAN Jinbo

(Guodian Nanjing Automation Co. Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: A backboard bus based design scheme for substation-area protection and control equipment used in smart substations is proposed. A multiple master communication backboard bus is designed based on multi-point low voltage differential signaling (M-LVDS). The cooperation model is described according to resource configuration and logic diagram division. With backboard bus as the core, a multi-level dataset interaction and control model is developed between the virtual logic bus, backboard bus, process bus and wide area communication network. Several topics are discussed, such as the principle of backboard, realization and function division of logic diagram, realization of multi-level data exchange. The design scheme proposed is applied in substation-area protection and control equipment for a 110 kV smart substation for function transfer, redundancy protection, concentrated backup protection, safety automatic control, etc. Site operation has proved its effectiveness and practicality.

Key words: backboard bus; substation-area protection and control; hierarchical protection and control; smart substation; integrated protection; IEC 61850; communication