

数字化变电站过程层的通信技术研究

曹津平¹, 李伟², 秦应力¹, 黄昕¹

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 2. 北京送变电公司, 北京 102401)

摘要: 分析了数字化变电站过程层通信对象(采样值信号和开入开出信号)的特点及传输方式。根据过程层总线上通信对象实时性和可靠性的要求, 提出在实现过程中, 除了选择适合的总线结构, 还需合理划分 VLAN 网段和优先级, 考虑网络流量负荷、传输时延和二次装置的接收和处理能力等因素, 使得在保证装置可靠性的基础上, 提高系统的灵活性和互操作能力。

关键词: 数字式变电站; 过程层; 电子式互感器; 智能开关; IEC61850; 网络通信

Research on digital substation process level communication technology

CAO Jin-ping¹, LI Wei², QIN Ying-li¹, HUANG Xin¹

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd, Beijing 100085, China;

2. Beijing Electric Power Transmission and Transformation Company, Beijing 102401, China)

Abstract: This paper analyses the characters and transmission modes of the digital substation process level objects (sample values, input and output signals). To the requirement of timing and reliability, it is necessary to choose the appropriate bus architecture, and other elements such as VLAN priority, network load, transmission delay and secondary device ability to ensure the reliability and improve system flexibility and interoperability.

Key words: digital substation; process level; electronic transformers; intelligent switch; IEC61850; network communication

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)12-0060-04

0 引言

IEC61850 是变电站自动化协议, 主要作用是规范需求, 为不同厂家之间装置的互操作提供一种框架^[1]。在 IEC61850 中将变电站分为三层: 变电站层、间隔层和过程层, 其中过程层为直接与一次装置连接的最底层。

过程层信息的传输要求是: 准确、可靠、快速。传输的信息主要分为两种: 1) 周期性的采样值信号, 对丢包现象可以容忍, 但需要保证传输的实时、快速。2) 由事件驱动的开入开出信号, 如分布式系统下各设备间状态信息、互锁信息的相互交换和智能设备状态信息的发布等, 该信息不仅对数据传输实时性要求高, 同时可靠性也要求高。

一次设备智能化是过程层自动化的基础。一次设备智能化的表现有: 电子式 CT、PT, 实现采样值的数字化; 智能控制装置, 实现开入开出命令的数字化和开关刀闸的故障诊断功能。过程层总线主

要传输智能化的一次设备的数字信号, 与模拟信号相比, 其抗干扰能力增强, 信息共享方便, 在工程上仅需几根光缆就可实现和主控室连接, 大大简化了传统的几十根电缆的连接方式。常见的过程层总线如图 1。

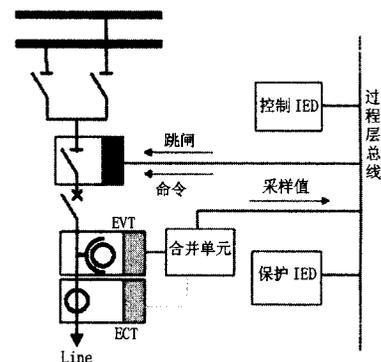


图 1 过程层总线

Fig.1 Process bus

1 采样值信号

电流、电压互感器是继电保护、自动装置和测量仪表获取电气一次回路信息的传感器。其精确度和可靠性对电力系统的安全、稳定和经济运行有着重要影响。

随着电力系统的发展,发电和输变电容量不断增加,电网电压不断提高,电子式互感器的研究和推广也越来越受大家关注。电子式互感器的特点是体积小、重量轻、暂态性能和运行性能良好,可靠性高,简化互感器的绝缘结构^[2]。

电子式互感器的采集和传输较常规的互感器有很大的不同。按照 IEC60044-8 标准,通常数字传输是采用一台合并单元(MU)汇集多达 12 路的二次转换器数据通道的采样值并由以太网输出,一个数据通道传送一台电子式电流互感器或一台电子式电压互感器采样测量值的数据流。在多相或组合式互感器时,多个数据通道可以通过一个物理接口从二次转换器传输到合并单元。合并单元对二次设备提供一组同步的电流、电压采样值。二次转换器也可以从常规电流、电压互感器获取信号,并汇集到合并单元。

2 开入开出信号

智能操作箱是相对传统操作箱而言的,利用以太网发送跳闸、合闸、闭锁命令(执行器),将其安装在开关附近,可实现用过程总线对开关进行控制。扩展故障检测功能,即状态监测、分析诊断和故障预测^[3],通过增加相应的温度、压力等传感器,将装置的当前状态传到控制器,就可以根据设定的数据进行故障诊断和处理。

设备间状态信息和互锁信息的交换,属于异步对等以及点对多点通信模式,采用 TCP/IP 协议是无法有效实现的,必须采用网络组播的方式发送报文。为了提高报文传输的速度和性能,采用发布者/订阅者(Publisher/Subscriber)模型,逻辑链路控制(LLC)协议的单向无确认机制。

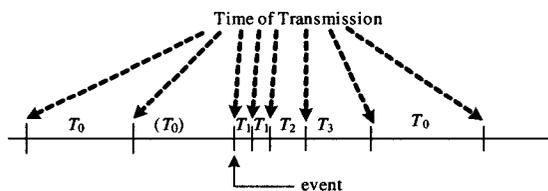
实时 Publisher/Subscriber 模型具有以下特点:

1) 信息按内容标识; 2) 点对多点传输; 3) 事件驱动^[4]。

IEC61850-7-2 提供的 GOOSE 服务就满足 Publisher/Subscriber 模型,可用来实现站内快速、可靠地发送输入和输出信号量,这种通信服务利用重传机制保证通信的可靠性。

当 IEC61850-7-2 中有定义过的事件发生后,GOOSE 服务器生成一个发送 GOOSE 命令的请求,

该数据包将按照 GOOSE 的信息格式组成并用组播包方式发送。为保证可靠性一般重传相同的数据包若干次,在顺序传送的每帧信息中包含一个“允许存活时间”的参数,它提示接收端接收下一帧重传数据的最大等待时间。如果在约定时间内没有收到相应的包,接收端可认为连接丢失^[5]。



T_0 : retransmission in stable conditions(no event for a long time)
 (T_0) : retransmission in stable conditions may be shortened by an event
 T_1 : shortest retransmission time after the event
 T_2, T_3 : retransmission times until achieving the stable conditions time

图 2 事件传输

Fig.2 Transmission time for events

3 通信技术

过程层自动化的优势不言而喻,但是推广起来还有一些困难,除了需要一次设备厂家的设备的不断更新外, 还需要注意以下几个方面的技术:

1) 网络负荷量:

以每周波 96 点采样为例,如果按照 IEC61850-9-1 的传输方式,将采样值信号和开入开出信号并为一帧发送,其信息量为: $S_R \times T_L \times n_{MU} \leq D_R$ ^[7]

$$S_R \times T_L \times n_{MU} = (96 \times 50 \text{ Hz}) \times 984 \text{ Bit} \times n_{MU} = 4.7232 n_{MU} \text{ Mbps} \leq 100 \text{ Mbps}$$

其中: D_R 为数据速率(10 Mbps 或 100 Mbps); S_R 为采样速率(Hz); T_L 为最大报文长度;(26 字节以太网报头 + 4 字节优先级标记 + 8 字节以太网型 PDU + 2 字节 ASN.1 标记/长度 + 2 字节块的数目 + 46 字节通用数据集 + 23 字节状态量 = 111 字节 \times 8 位 = 888 位 + 96 位帧间隔 = 984 位); n_{MU} 为所连接的合并单元(MU)的数目。

由以上可知,一台合并单元占用的以太网带宽约为 5%。通常变压器和母差等保护装置都需要多个合并单元,这样占用的带宽根据实际需要会成倍增加。

以太网的网络冲突概率随数据通信的增加而呈指数级增长。当网络中没有太多数据,冲突概率会降低,当以太网负荷增加时,会使冲突加剧,降低以太网的传输性能。将以上信息量集中放在过程层总线上,从某些厂家的试验数据来看百兆网都不太理想。

最简单的处理方法是网络升级,即升为 1000 M

以太网,但目前电力设备上百兆网的产品较多,使用千兆网兼容性较差。较妥善的方法是设计合理的网络布局,灵活使用带有优先级的 VLAN,降低区域内的以太网的负荷。通常按间隔分配 VLAN 结构比较清晰,网络负荷不是很大。

2) 二次装置处理

目前过程层总线上的通信瓶颈主要是信号接收端,尤其是对数据量要求较多的二次装置,如变压器保护和母差保护等。

以一般比较关注的母差保护为例,因为涉及到的模拟量非常多,如 48 路量,对 9-1 的合并单元而言至少需要 4 个及以上的 MU。对于目前通用的 100 M 以太网,网络负荷量为: $S_R \times T_L \times n_{MU} = 4.7232 \times 4 \text{ Mbps} = 18.89 \text{ Mbps}$,当信号集中传输到母线保护装置时,母线保护装置要在每个采样间隔 (20 ms/96=208 μs) 内实现对 4 个以太网帧的数据采样及处理,对现有的母线保护的硬件处理能力将是一个很大的考验。

除此以外,还需要保证二次装置收到多路信号量是同时采样的。如果对失去同步的数据不进行处理而直接使用,可能会造成保护装置的误动或拒动。IEC61850-9-1 推荐使用插值法和外接同步发生装置的方法,从理论上解决了同步问题。在实际工程中,必须考虑到丢失同步情况下装置和系统的运行情况。

3) 传输时延

根据变电站通信接口传输性能要求: CT、PT 模拟量和保护跳闸要求很高,传输时间通常小于 2 ms; 保护事件传输时间一般为 2~10 ms 之间; 信息控制和保护交换信息,保护单元间传输无严格要求的数据,同相测量,时间范围一般为 10~100 ms,外部节点到变电站(控制中心)的时间可以大于 100 ms^[8]。

以太网采用带冲突检测的载波侦听多路访问协议(CSMA/CD)以及二进制指数退避算法(BEB),因此必然导致信息传送的滞后,因其时间滞后是随机的,这说明实质上以太网是一种非确定性的网络系统。因此,对于响应时间要求严格的控制过程会存在产生碰撞的可能性,造成响应时间的不确定性,使信息不能按要求正常传递。

由上可知,过程层总线实时性要求很高,而以太网的碰撞、避让的传输机制,使得以太网传输延时存在一定的不确定。

采用支持存储-转发机制的交换机能有效解决该问题。交换机在同一时刻可进行多个端口对之间的数据传输。每一端口都可视为独立的网段,连接在其上的网络设备独自享有全部的带宽,无须同其

它设备竞争使用,消除了传输过程中的冲突。

存储转发(Store and Forward)以太网交换机的控制器先将输入端口到来的数据包缓存起来,先检查数据包是否正确,并过滤掉冲突包错误。确定包正确后,取出目的地址,通过查找表找到想要发送的输出端口地址,然后将该包发送出去。交换机在数据处理中的时延为接收数据包的时间,由于网络上传输的数据包都是固定长度,能保证传输延时的确定性。另外它可以对进入交换机的数据包进行错误检测,并且能支持不同速度的输入/输出端口间的交换,可有效地改善网络性能。

4) VLAN 的合理设定

VLAN,是英文 Virtual Local Area Network 的缩写,中文名为“虚拟局域网”,VLAN 是一种将局域网(LAN)设备从逻辑上划分成一个个网段,从而实现虚拟工作组(单元)的数据交换技术。

VLAN 的好处主要有三个:

(1) 端口的分隔。即便在同一个交换机上,处于不同 VLAN 的端口也是不能通信的。这样一个物理的交换机可以当作多个逻辑的交换机使用。

(2) 网络的安全。不同 VLAN 不能直接通信,杜绝了广播信息的不安全性。

(3) 灵活的管理。更改用户所属的网络不必换端口和连线,只更改软件配置就可实现。

由 VLAN 的特点可知,一个 VLAN 内部的广播和单播流量都不会转发到其它 VLAN 中,从而有助于控制流量、减少设备投资、简化网络管理、提高网络的安全性。VLAN 除了能将网络划分为多个广播域,从而有效地控制广播风暴的发生,以及使网络的拓扑结构变得非常灵活的优点外,还可以用于控制网络中不同节点之间的互相访问。

为了保证重要信号的快速、可靠传输,在过程层的信息传送中使用了优先级标记/虚拟局域网。按照 IEEE 802.1Q,优先级标记用于把和保护相关的时间紧迫、高优先级的总线传输与量大而优先级又低的总线负载分离开来^[9]。

标记头的结构^[6]:

8 位		8	7	6	5	4	3	2	1
1	TPID	0x8100							
2									
3	TCI	User priority			CFI		VID		
4		VID							

注: TPID 值: 0x8100

User Priority: 三位, User priority 的值应在配置时进行设置,以便将模拟量采样值和时间紧迫的、保护相关的 GOOSE 信息与低优先级的总线负载相区别。

CFI: BS1[0], 在以太网标记帧中长度/类型域后没有嵌入 RIF 域。

VID: 支持虚拟局域网是一种可选的机制, 如果采用了这种机制, 那么配置时应设置虚拟局域网标识(VID)。另外, 虚拟局域网标识 VID 缺省值为 0。

以太网只有当网络负荷量有足够裕度时才能保证信号的快速可靠; 因此必须在保证资源共享的前提下, 合理分配虚拟网段, 并根据信息的重要性设定不同的优先级, 才能有效控制信息风暴, 保证传输的可靠性。信号优先等级的划分(如: (1)GOOSE 信息; (2)SV 信息; (3)IO 信息)能有效地降低信号间的互相碰撞。

5) 互操作性

电子式互感器与 MU 之间的通信格式并无标准, 由于很多互感器厂家并不生产 MU, 很多 MU 是由二次保护厂家开发, 各个厂家有自己的标准, 造成互感器厂家与二次保护厂家出现捆绑销售的情况, 在一定程度上影响互操作。

9-1 是点对点传输方式, 沿袭了 60044-8 对采样方式的定义, 格式和传输方式比较固定, 较易实现互操作。但实际操作中依然存在: (1) 采样率各厂家的选择不一样; (2) APDU 定义格式不一, 一个 APDU 包含几个 ASDU; (3) 自定义格式下的通道定义等。

9-2 是在 9-1 的基础上, 更加灵活, 通过交换 xml 文件来实现面向对象建模, 但实际开发中, 实现很困难, 因为工程的情况很复杂, 如果实现足够灵活的可配置, 对各层装置的软硬件都是考验。

6) 组网方式

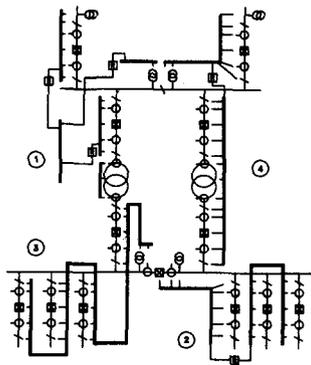


图 3 过程层总线结构

Fig.3 Process bus architectures

图 3 给出了过程总线结构的 4 种可选的解决方案^[6]。

方案 1: 每个间隔有其自身的总线段, 为了允许保护和控制设备获得来自其它总线段的数据, 装设一个独立的全站范围的总线, 该总线使用交换机或路由器与各个间隔的总线段连接, 以传输所要求

的数据流。

方案 2: 与方案 1 相似, 但该方案中每个间隔总线段覆盖了多个间隔, 多段总线要求的数据流通过交换机或路由器来传输。

方案 3: 一种全站范围单一的通信总线, 所有设备都与该总线连接。这种方案要求非常高的总线速率, 但省略了路由设备。

方案 4: 一种面向功能的总线结构, 在这种情况下, 总线段是按照保护区域来设置的, 虽然也需要路由设备, 但总线段的设置可以使总线段之间数据交换量最少。

在实际工程中, 总线结构的选择并无固定模式, 可以采用不同的组网方式, 还可能会存在几种方案并存的情况, 这取决于数据流、可靠性、以及安装维护的实用性等因素的要求。

总结: 过程层总线是随着智能化一次设备和通信技术的发展而发展的。在实现过程中, 除了选择适合的总线结构, 还需合理划分 VLAN 网段和优先级, 考虑双网冗余, 同步冗余, 网络流量冗余等各种因素。同时要求在保证装置可靠性的基础上, 提高系统的灵活性, 增强产品的互操作能力。只有合理搭建系统, 并根据实际情况配置变电站的过程层总线, 才能有效地提高系统可靠性, 降低建站成本和维护成本。

参考文献

- [1] C61850-1:2003, Communication Networks and Systems in Substations Part 1- Introduction and Overview[S].
- [2] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. 119-120.
YUAN Ji-xiu, SHENG He-le, WU Ju-ye. Application Guide for Protective Current Transformers[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. 119-120.
- [3] 苑舜. 高压开关设备状态监测与诊断技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001. 44-46.
YUAN Shun. Condition Monitor and Fault Diagnose for High Voltage Switch[M]. Beijing: China Machine Press, 2001. 44-46.
- [4] 孙军平, 盛万兴, 王孙安. 基于以太网的实时发布者/订阅者模型研究与实现[J]. 西安交通大学学报, 2002, (12): 1299-1302.
SUN Jun-ping, SHENG Wan-xing, WANG Sun-an. Research on the Real-Time Publisher/Subscriber Model Based on Ethernet and Its Implementation[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, (12): 1299-1302.
- [5] IEC61850-8:2003, Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO/IEC 9506 Part 1 and Part 2) and to ISO/IEC 8802-3: 68-69.

(下转第 68 页 continued on page 68)

- WANG Xue-chao. Dynamic Geographic Information System in Distribution Automation[J]. Power System Technology, 1999,23(8):58-60.
- [9] 刘博, 王倩. 基于 WebGIS 的电铁枢纽站场设备管理系统研究[J]. 电工技术杂志, 2004, (8): 36-39.
- LIU Bo, WANG Qian. The Analysis of the Management System in the Railway Automation Equipments of Railway Hinge Based on WebGIS[J]. Electro Technical Journal, 2004, (8): 36-39.
- [10] 乐秀璠, 沈琴. WebGIS 在配电网管理系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(5):47-48,51.
- LE Xiu-fan, SHEN Qin. The Application of Web GIS in Distribution Management System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(5):47-48,51.

(上接第 51 页 continued from page 51)

动, 但因时间元件不动作, 故保护出口不会跳闸。待系统振荡平息, 恢复正常运行, ZKJ 及 U_L-P 都持续性地处于返回状态, 图 6 中的各元件都复原到常态。

发电机强行减磁, U_L-P 可能动作, 但 ZKJ 不会动作, 保护出口不会误跳闸。

顺便指出, 图 6 及前述的图 3、4、5 诸保护框图都是静稳阻抗型失磁主判据 ZKJ 与转子低压型失磁主判据 U_L-P 构成“&”与门出口跳闸。这是因为一个主判据单独出口跳闸较危险, 可能发生误跳闸。为了提高保护出口的可靠性, 才采用两个失磁主判据组成“&”与门出口的电路。

4 结论

通过对几种不妥的或者错误的含有 U_L-P 继电器的失磁保护框图的实例分析, 提出了含有 U_L-P 继电器失磁保护框图的优化方案, 采用自保持方式, 避免静稳边界后发电机异步运行时由于 U_L-P 发生抖动而引起保护出口抖动, 保证失磁保护出口能持续性地动作。

(上接第 63 页 continued from page 63)

- [6] IEC61850-9-2:2003, Communication Networks and Systems in Substations Part 9-2 Specific Communication Service Mapping (SCSM) Sampled Values over ISO/IEC8802-3 Link: 14-14[S].
- [7] IEC61850-9-1:2003, Communication Networks and Systems in Substations Part 9-1 Specific Communication Service Mapping (SCSM) Sampled Values Over Serial Unidirectional Multidrop Point to Point Link: 22-23[S].
- [8] IEEE Std 1646, IEEE Standard Communication Delivery Time Performance Requirements for Electric Power Substation Automation: 8-9[S].
- [9] 辛建波, 段献忠. 基于优先级标签的变电站过程层交换式以太网的信息传输方案[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 26-30.
- XIN Jian-bo, DUAN Xian-zhong. A Transfer Scheme Based on Priority-tag in Switched Ethernet for Substation Process-evel[J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 26-30.

参考文献

- [1] 赵建国, 姚晴林. 整定值自动随有功功率变化的转子低压失磁继电器的研究 [J]. 电力系统自动化, 1984, 16(4):49-57.
- ZHAO Jian-guo, YAO Qing-lin. Under Voltage Loss-of-Excitation Relay Provided by a New Design Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 1984,16(4):49-57.
- [2] 姚晴林, 张学深, 张项安. 微机 U_L-P 型转子低压失磁继电器动作方程及整定计算的研究——与《大型发电机变压器继电器保护整定计算导则》商榷[J]. 继电器, 2000, 28(7):31-34.
- YAO Qing-lin, ZHANG Xue-shen, ZHANG Xiang-an. Study on the Setting Calculation and Operation Equation of Microprocessor Based U_L-P Totro LV Loss of Excitation Relay[J]. Relay, 2000,28(7):31-34.

收稿日期: 2007-04-17

作者简介:

田 丰 (1988-), 男, 在读本科生, 研究方向为电力系统稳定、分析与控制等; E-mail: spykerfeng@yahoo.com.cn

李碧辉 (1986-), 女, 在读本科生, 研究方向为电力系统稳定、分析与控制等;

王 伟 (1978-), 女, 助理工程师, 主要从事电力系统继电保护方面研究。

收稿日期: 2007-08-08; 修回日期: 2008-03-04

作者简介:

曹津平 (1977-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事继电保护研发工作。E-mail: caojinping@sf-auto.com