

数字化变电站系统结构

张沛超¹, 高翔²

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海市 徐汇区 200030; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

System Architecture of Digitized Substation

ZHANG Pei-chao¹, GAO Xiang²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Xuhui District, Shanghai 200030, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: The system architecture and design principles of digitized substation are expounded and the technical fundamentals for the proposed system architectures are analyzed. The basic scheme of network composition for process bus and station bus are presented. Digitized substation architectures with high reliability are proposed in the matter of functional redundancy and network fault tolerance, and the solutions for the connecting of conventional devices are put forward in the process level and bay level.

KEY WORDS: power system; digitized substation; system architecture; communication; IEC 61850

摘要: 阐述了数字化变电站的系统结构和设计原则, 讨论了过程总线和变电站总线的基本组网方案, 分别从功能冗余及网络容错等方面提出了多种具有高可靠性的数字化变电站系统结构, 并从过程层和间隔层方面提出了常规设备的接入方案。

关键词: 电力系统; 数字化变电站; 系统结构; 通信; IEC 61850

0 引言

变电站自动化技术的发展直接表现为变电站自动化系统结构的变迁, 即经历了集中式和分布式 2 个阶段。新一代变电站的结构在增强了变电站自动化系统功能的同时, 提高了系统的实时性、可靠性、可扩展性和灵活性, 达到了节省系统投资以及简化维护等目的^[1-4]。数字化变电站的系统结构继承了分层分布式变电站结构的优点, 同时, 由于高速以太网^[5-7]、非常规传感器^[8-9]和智能开关技术的应用以及 IEC 61850 标准^[10-11]的实施, 使得数字化变电站的系统结构又有了不同于常规变电站的革新性变化。文献[4]讨论了数字化变电站自动化系

统的网络选型问题, 提出了基于嵌入式以太网的方案。文献[12]讨论了基于 IEC 61850 标准的变电站自动化系统, 研究了智能电子装置(intelligent electronic device, IED)硬件系统和软件系统的实现方法。文献[13-15]详细探讨了常规变电站内的通信网络结构与协议等问题。上述文献都没有对数字化变电站的具体架构方案、过程层结构以及结构可靠性等问题进行讨论。本文在介绍数字化变电站系统的基本结构和组网方案的基础上, 提出具有高可靠性的数字化变电站系统结构, 并探讨在数字化变电站中接入常规系统的技术方案, 可为相关部门逐步实现数字化变电站提供参考。

1 数字化变电站的技术基础

1.1 网络技术

通信环节是变电站自动化系统的关键^[16], 对数字化变电站具有重要影响的网络技术包括:

(1) 交换式以太网技术^[5-7]。传统以太网采用随机的网络仲裁机制(carrier sense multiple access/collision detection, CSMA/CD), 其传输的不确定性是以太网进入实时控制领域的主要障碍。而交换式以太网具有微网段和全双工传输的特性, 从本质上保证了通信的确定性, 为数字化变电站采用过程总线提供了技术基础。

(2) IEEE 802.1p 排队特性^[17]。实时数据和非实时数据在同一个网络中传输时, 容易发生竞争服务资源的情况。IEEE 802.1p 排队特性采用带 IEEE 802.1Q 优先级标签的以太网数据帧, 使得具有高优先级的数据帧获得更快的响应速度。另外, 采用该技术还可将数字化变电站中的过程总线和

变电站总线合并为 1 个物理网络。

(3) 虚拟局域网(VLAN, virtual local area network)技术^[5-6]。VLAN 利用现代交换技术, 将局域网内的设备按照逻辑关系(而不是物理关系)划分成多个网段, 这样就可以从逻辑上划分变电站中的控制网段和非控制网段, 而不需依赖物理的组网方式以及设备的安装位置, 从而有效地保证了控制网段的实时性和安全性。

(4) 快速生成树协议(IEEE 802.1w rapid spanning tree protocol)^[5-6]。传统的以太网拓扑结构中不能出现环路, 因为由广播产生的数据包会引起无限循环而导致阻塞, 该问题可依靠生成树算法解决。快速生成树协议使算法的收敛过程从 1min 降低到 1~10s, 这样, 在变电站网络中就可以采用多种冗余链路设计来保证网络的可靠性。

1.2 IEC 61850 标准

IEC 61850 标准中引入了抽象通信服务接口(abstract communication service interface, ACSI)。ACSI 使变电站自动化功能完全独立于具体的网络协议, 因此最新网络技术可以很快被应用于变电站中。另一方面, ACSI 使物理的 IED 隐藏起来, 变电站功能可以被灵活地分配到多个 IED 中, 还可以开发 ACSI 网关装置以接入不支持 IEC 61850 的 IED^[10-11]。

1.3 非常规互感器与智能开关技术

采用低功率、数字化的新型互感器代替常规的 PT 和 CT, 将高电压、大电流直接变换为数字信号, 利用高速以太网构成数据采集及传输系统。基于微机、电力电子技术和新型传感器建立新的断路器二次系统, 保护和控制命令可以通过光纤网络传输到断路器操作机构的数字化接口。这些技术使变电站的过程层得以数字化, 以太网也成为了全变电站的神经中枢^[8-9,18]。

2 数字化变电站的基本结构

2.1 功能层、逻辑接口与网络总线

数字化变电站的基本结构继承了分层分布式的特点, 如图 1 所示。其功能在逻辑上被分配到 3 个不同的层(即过程层、间隔层和变电站层)中。在这 3 层中有 10 类逻辑接口, 分别接入 2 类总线: 过程总线(process bus)以及变电站总线(station bus)^[10]。表 1 概括了它们之间的关系。

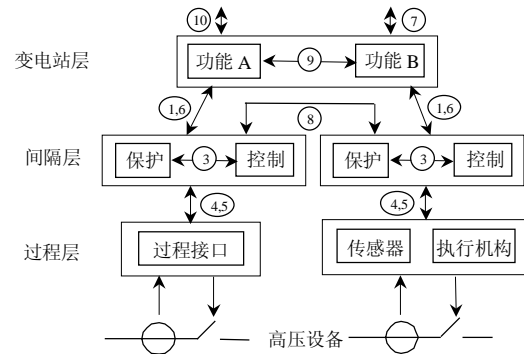


图 1 数字化变电站功能层与逻辑接口
Fig. 1 Function levels and logical interfaces in digital substation

表 1 功能层、逻辑接口与网络总线

Tab. 1 Function levels, logical interfaces and buses					
逻辑接口	说明	过程层	间隔层	变电站层	总线
IF4	过程层和间隔层之间 PT 和 CT 暂态数据交换	•	•		过程总线
IF5	过程层和间隔层之间 控制数据交换	•	•		过程总线
IF3	间隔层内数据交换		•		
IF8	间隔层之间直接数据交换			•	
IF1	间隔层和变电站层之间 保护数据交换			•	变电站总线
IF6	间隔层和变电站层之间 控制数据交换			•	变电站总线
IF9	变电站层内数据交换			•	
IF7	变电站层与远方工程师 办公室数据交换			•	

2.2 过程总线的基本组网方案

过程总线可以采用不同的组网方式, IEC 61850 标准中列举了 4 种基本方案^[10], 如图 2 所示, 它们体现了不同的组网原则, 可以满足不同的数据流要求及可靠性要求, 并可应用于不同场合。

(1) 面向间隔原则。在方案 1 中, 每个间隔有其自身的总线段, 同时还装设 1 个独立的全站范围的总线以连接各间隔的总线段。面向间隔的组网方案的优点是结构清晰、易于维护, 缺点是需要安装较多的交换机和路由设备, 成本较高。该方案适用于 220kV 及以上系统以及重要间隔。

另外, 设备的互操作性乃至互换性既可在 IED 层面获得, 也可在间隔层面获得。在 IEC 61850 实施初期, 由于缺乏足够的互操作性实践, 间隔层面的互操作性更容易得到保证, 这也就自然导致了面向间隔的组网方案。

(2) 面向位置原则。方案 2 中每个间隔总线段覆盖了多个间隔。当 IED 的安装位置处于多个传

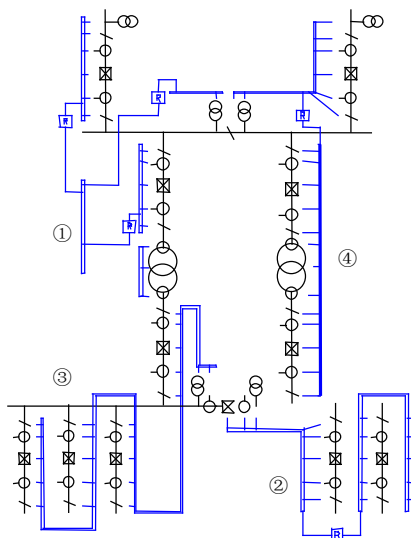


图2 可选的过程总线结构

Fig. 2 Alternative process bus architectures

传感器的安装位置的中心时,从高压端到IED的光纤传输距离最短。另外,220kV双母线接线多采用母线PT,该PT可以为多个间隔所共用,从而节省了PT的安装数量。

(3)单一总线原则。方案3是一种全站单一总线方案,所有设备都与该总线连接。该方案的优点是节省了交换机,成本较低;缺点是系统可靠性差,需要较高的总线速率。该方案适用于网络负载较轻、实时性要求不高的中、低压系统。

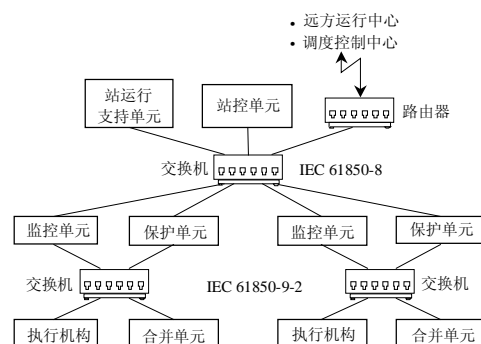
(4)面向功能原则。方案4中的总线段是按照保护区域来设置的,其突出优点是总线段之间的数据交换量最小。

2.3 变电站总线的基本组网方案

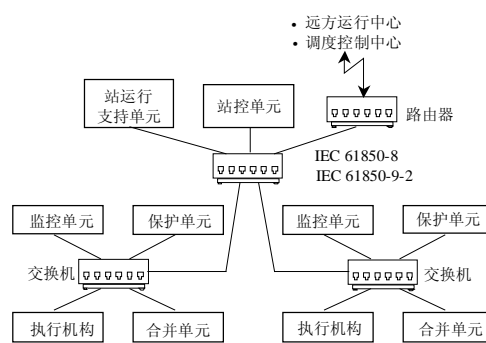
变电站总线的基本组网方案包括:

(1)独立的变电站总线。采用该方案时,位于间隔层的IED需要2套以太网接口,分别接入过程总线和变电站总线,如图3(a)所示。

(2)合并的变电站总线和过程总线。由于在数字化变电站中采用公共的以太网技术,变电站总线和过程总线完全可以合并^[19-20],如图3(b)所示。这样,IED只需1套以太网接口,既简化了结构又降低了设备和维护费用。该方案的缺点是实时数据和非实时数据、控制性数据和非控制性数据共享同一网络,易导致争夺网络资源以及安全性问题,应利用交换式以太网的优先级排队特性以及虚拟局域网技术解决上述问题。



(a) 独立变电站总线



(b) 合并总线

图3 可选的变电站总线结构
Fig. 3 Alternative station bus architectures

3 高可靠性的系统结构

3.1 功能冗余结构

数字化变电站系统需要利用功能冗余结构来提高其可靠性,这一点与常规变电站自动化系统相同。图4以保护系统为例,在图2中的方案2的基础上增加了冗余功能。其中2套保护系统具有独立的传感器、合并单元、交换机以及保护装置,母线PT可被多个间隔共享(图中只画了一个间隔)。当保

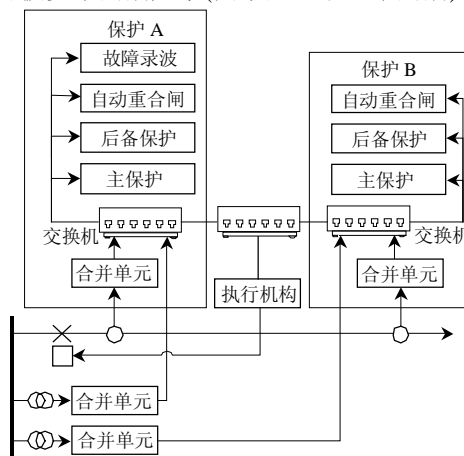


图4 功能冗余示例

Fig. 4 An example of function redundancy

护系统 A 的互感器因故退出时, 2 套保护系统可共用保护系统 B 的互感器, 这样就在数字化变电站系统中实现了真正的冗余。

3.2 容错网络结构

以上讨论的过程总线和变电站总线都是逻辑概念。在物理上, 变电站网络拓扑不仅可以选总线型, 还可以选择星型和环型^[5], 这也是数字化变电站的主要优点。上述 3 种基本网络的结构如图 5 所示, 它们之间的比较结果见表 2。

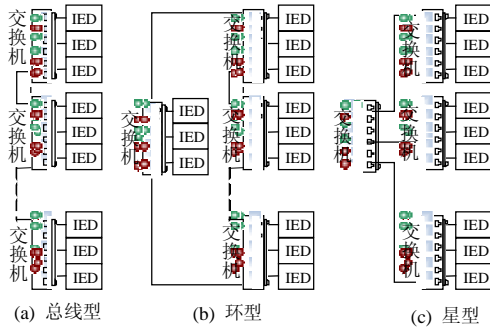


图 5 基本网络结构

Fig. 5 Basic network architectures

表 2 3 种基本网络结构比较

Tab. 2 Comparison of the three basic network architectures

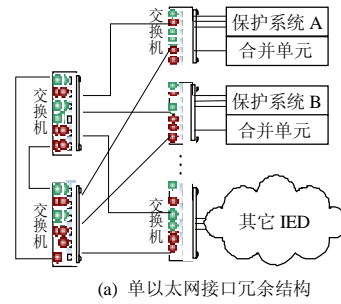
网络结构	可靠性	网络延迟	造价
总线型	最低	较大	最低
星型	较低	最小	中
环型	较高	较大	最高

在这些基本网络结构的基础上可以派生出大量具有高可靠性的网络结构。以保护系统为例, 在图 4 所示的功能冗余的基础上再增加网络冗余, 可以构成如图 6(a)所示的结构, 该结构采用了多星型加环型的冗余设计。在一些对可靠性要求特别高的系统中, 合并单元和 IED 的网络接口以及交换机可能成为系统可靠性的瓶颈, 此时可采用如图 6(b)所示的网络结构。其中的每个装置都带有双网卡(各网卡具有独立物理地址, 即 MAC 地址)或提供双网络端口(MAC 地址相同)的单网卡, 它们分别接入 2 台交换机, 网络总线采用多环形拓扑。这种方案极大地提高了系统的可靠性。

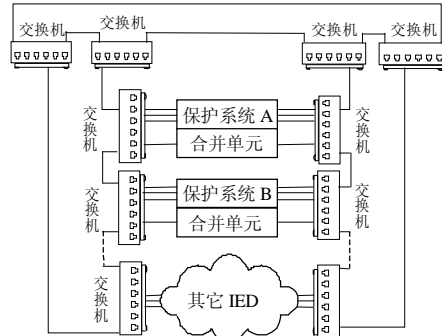
4 常规系统接入方案

4.1 常规系统的兼容性

在相当长的一段时间内, 不支持 IEC 61850 的 IED 以及常规的传感器、开关设备还将在系统中继续运行。在设计数字化变电站的结构时, 必须考虑如何接入常规设备或系统, 在 IEC 61850 标准的制定过程中就已对上述问题进行了充分考虑。



(a) 单以太网接口冗余结构



(b) 双以太网接口冗余结构

图 6 高可靠性网络结构

Fig. 6 Examples of high reliable network architectures

4.2 过程层中接入常规设备的方案

图 7 说明了在过程层中接入常规设备的各种方案, 其中: 间隔 A 只使用了变电站总线, 过程层仍采用连接导线接入常规互感器和开关; 间隔 B 也没有过程总线, 但使用了合并单元, 采样值传输基于 IEC 61850-9-1 的单向多路点对点串行通信连接方式; 间隔 C 中使用了过程总线, 但仍使用常规互感器, 可通过合并单元将采样值以多播方式发布到过程总线, 即利用基于 IEC 61850 标准的开关控制器将常规开关设备接入过程总线。

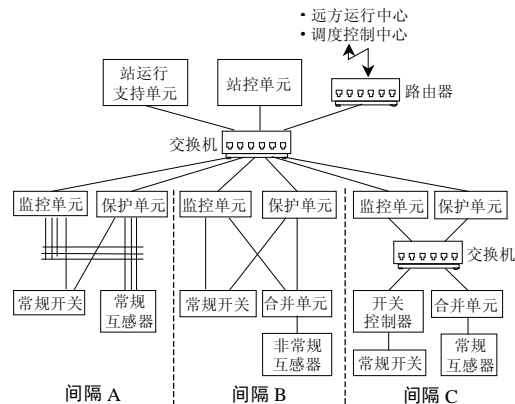


图 7 过程层中常规设备的接入方案

Fig. 7 Connection schemes for conventional devices in process level

4.3 间隔层中接入常规 IED 的方案

图 8 说明了间隔层接入常规 IED(或系统)的方案,其中 Server IED 起到了 IEC 61850 网关的作用,这样,不支持 IEC 61850 的 IED 也可被接入数字化变电站系统中。

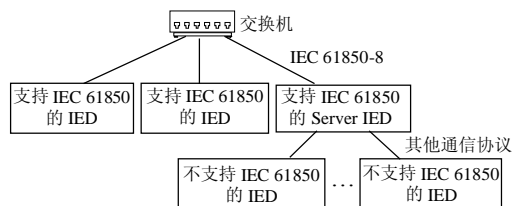


图 8 间隔层中常规 IED 的接入方案
Fig. 8 Connection scheme for conventional IEDs in bay level

5 结语

本文从过程总线和变电站总线两方面讨论了数字化变电站的结构,分析了各种组网方式的特点及应用场合,提出了基于功能冗余和网络冗余的多种可靠性设计方案。另外,本文还分别提出了在过程层和间隔层接入常规设备或系统的方案。

数字化变电站系统中引入了大量网络设备及新型电子装置,变电站的系统可靠性已引起相关部门的高度重视。因此,为定量分析各种结构的数字化变电站的可靠性,下一步将着重研究数字化变电站系统的可靠性模型。

参考文献

- [1] 曾庆禹,李国龙. 变电站集成技术的发展——现代紧凑型变电站[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 60-67.
Zeng Qingyu, Li Guolong. Evolution of integrated technique of substation-modern compact substation[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 60-67(in Chinese).
- [2] 曾庆禹. 变电站自动化技术的未来发展二——集成自动化、寿命周期成本[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(20): 1-5.
Zeng Qingyu. The development of substation automation in the near future part two—Integrated automation, life cycle costs [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(20): 1-5(in Chinese).
- [3] 朱大新. 数字式变电站综合自动化系统的发展[J]. 电工技术杂志, 2001, 4: 20-22.
Zhu Daxin. The development of integrated automation system of digital transformer station[J]. Electrotechnical Journal, 2001, 4: 20-22(in Chinese).
- [4] 丁书文. 数字式变电站自动化系统的网络选型[J]. 继电器, 2003, 31(7): 37-40.
Ding Shuwen. Choosing internal communication network of digital substation integrated automation system[J]. Relay, 2003, 31(7): 37-40(in Chinese).
- [5] 谢希仁. 计算机网络(第四版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [6] 张奇智,尹汝波. 交换式工业以太网的现状和研究[J]. 传感器世界, 2005, 2: 34-39.
Zhang Qizhi, Yin Rubo. The state of art switched industrial Ethernet [J]. Sensor World, 2005, 2: 34-39(in Chinese).
- [7] Skeie T, Johannessen S, Brunner C. Ethernet in substation

- automation[J]. Control Systems Magazine, IEEE, 2002, 22(3): 43-51.
- [8] 曾庆禹. 电力系统数字光电量测系统的原理及技术[J]. 电网技术, 2001, 25(4): 1-5.
Zeng Qingyu. Principle and technology of digital electro-optical measurement for power system[J]. Power System Technology, 2001, 25(4): 1-5(in Chinese).
- [9] 曾庆禹. 电力系统数字光电量测系统的应用及效益分析[J]. 电网技术, 2001, 25(5): 6-9.
Zeng Qingyu. Application of digital electro-optical measurement technology in power system and analysis of its benefit[J]. Power System Technology, 2001, 25(5): 6-9(in Chinese).
- [10] IEC. IEC 61850: Communication networks and systems in substations[S]. 2004.
- [11] 谭文恕. 运动的无缝通信系统体系结构[J]. 电网技术, 2001, 25(8): 7-10.
Tan Wenshu. Seamless telecontrol communication architecture [J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 61-65(in Chinese).
- [12] 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 Zaijun, Hu Minqiang. Research on a substation automation system based on IEC 61850[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 61-65(in Chinese).
- [13] 王海峰, 丁杰. 对变电站内若干网络通信问题的探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 65-68.
Wang Haifeng, Ding Jie. Research on several issues of substation network communications[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 65-6(in Chinese).
- [14] 田国政. 变电站自动化系统的通信网络及传输规约选择[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 66-68.
Tian Guozheng. Selection of communication network and protocol for substation automation system[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 66-68(in Chinese).
- [15] 王峰, 吴在军, 胡敏强, 等. 配电变电站内部通信网络研究与实践[J]. 电网技术, 2000, 26(2): 59-62.
Wang Zheng, Wu Zaijun, Hu Minqiang, et al. Research and practice of internal communication networks for distribution substation [J]. Power System Technology, 2000, 26(2): 59-62(in Chinese).
- [16] 沈国荣, 黄健. 2000 年国际大电网会议系列报道——通信技术是变电站自动化的关键[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 1-5.
Shen Guorong, Huang Jian. A review of CIGRE'2000 on substation automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 1-5(in Chinese).
- [17] 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(22): 26-30.
Xin Jianbo, Duan Xianzhong. A transfer scheme based on priority-tag in switched Ethernet for substation process-level[J]. Power System Technology, 28(22): 26-30(in Chinese).
- [18] IEC. IEC 60044-8 仪用互感器[S]. 2002.
- [19] Gross R, Herrmann H J, Katschinski U. Substation control and protection systems for novel sensors[C]. CIGRE Session, Paris, 2000.
- [20] Anderson L, Brunner C. Substation automation based on IEC 61850 with new process-close technology[C]. IEEE PowerTech Conference, Bologna, Italy, 2003.

收稿日期: 2006-04-23.

作者简介:

张沛超(1970—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为专家系统在电力系统中的应用及电网调度自动化技术;

高翔(1962—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电网继电保护与自动化运行与管理, Email: gao_x@ec.sp.com.cn.

(编辑 王金芝)