

以太网在变电站自动化系统通信中的应用前景

冯邦成,康积涛

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 从变电站自动化系统的分层分布式结构及其通信任务和要求出发,分析了目前现场总线技术标准过多,信息交互困难及通信控制器不易扩展,开放性、灵活性不强的缺陷。提出基于以太网的变电站自动化系统,重点论述了基于网络控制的分布式变电站自动化系统网络结构简单、设备通用、通信速率快、全双工通信等优点;特别给出了嵌入式以太网的应用模式(每个间隔层设备配置一个以太网接口、多个智能电子设备通过 RS-232/485 或现场总线与以太网连接、以上 2 种的混合模式);最后,指出采用交换式高速以太网,并使节点工作在全双工方式,能满足变电站数据传输的实时性和可靠性要求。

关键词: 变电站自动化系统; 以太网; 实时性; 可靠性

中图分类号: TM 734; TP 393.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)07-0062-04

0 引言

变电站自动化系统在通信技术的推动下发展成为典型的分层分布式结构。该结构一般分为 3 层:变电站层、间隔层和过程层。其中,过程层包含变电站内的生产过程设施,如变压器、断路器及其辅助接点、电流和电压互感器等,主要负责现场数据采集、提供 I/O 接口等;间隔层包含测量和控制单元,负责该单元线路或变压器的参数测量和监控,断路器的控制和连锁等。变电站层包含全站性的监控主机,通信及控制主机,实现管理等功能的工程师站^[1]。

变电站自动化系统的通信任务一方面是实现站内通信功能,完成对全站一、二次设备和装置运行情况的数据信息采集和控制命令的传输;另一方面完成与上级调度或集控中心的通信,向上传送变电站运行的实时信息,接收和执行上级下达的控制命令。由于数据通信的重要性,可靠的通信成为系统的技术核心,加上变电站的特殊环境和系统要求,对变电站自动化系统的通信提出了以下要求:快速的实时响应,即变电站自动化系统要求及时地传输现场的实时运行信息和操作控制信息,在电力工业标准中对系统都有严格的实时性指标,网络必须很好地保证数据通信的实时性;高可靠性和抗干扰性,即变电站内通信环境恶劣,干扰严重,网络的故障和非正常工作会影响整个系统的运行,因此,变电站自动化系统的通信系统必须保证很高的可靠性。

1 现场总线网的缺陷^[2]

现场总线技术是 20 世纪 80 年代末 90 年代初应用于过程自动化和制造自动化最底层的现场仪表

或现场设备互联的网络通信技术,主要解决现场被控装置或设备之间、现场设备与上级监控系统之间的通信问题。目前,现场总线技术比较成熟,在变电站自动化系统中得到了广泛应用;但是,现场总线技术还存在许多不足之处。一方面,现有的现场总线标准过多,在今后一段时间内将会形成多种总线并存、相互竞争共同发展的格局。不同类型的现场总线设备均配有专用的通信协议,无法实现信息的无缝集成。目前,在一些工程中利用基于对象连接和嵌入技术的过程控制(OPC)等标准技术可以实现不同现场总线的间接信息交互,但各现场总线标准没有完全统一,需要开发大量的接口才能满足不同控制对象的需要。另一方面,采集、处理、控制、转发等任务都由通信控制器完成。虽然通信控制器的档次不断提高,但仍不可避免地具有功能不易扩展,开放性、灵活性不强等缺点,在速度、容量、成本等方面日益成为变电站自动化系统发展的瓶颈。

2 基于以太网的变电站自动化系统

2.1 以太网技术^[3]

以太网(Ethernet)是目前应用最为广泛的基带总线局域网。以太网的核心技术是它的随机争用型介质访问控制方法,即带有冲突检测的载波侦听多路访问(CSMA/CD)的介质访问控制技术。在以太网中,任何连网节点的发送都是随机的,网中不存在集中控制的节点,网中的结点平等的争用发送时间,这种介质访问控制属于随机争用型方式。每个节点利用总线发送数据时,首先要侦听总线的忙、闲状态,如果发送数据的过程中检测出冲突,为了解决信道争用冲突,结点停止发送数据,随机延迟后重发。

2.2 以太网变电站自动化系统

随着计算机技术和通信技术的发展,尤其是网络技术的应用,以太网技术正被引入变电站自动化系统过程层的采集、测量单元和间隔层保护、控制单元中。在基于 IEC 61850 体系的变电自动化系统设计中,过程层与间隔层、间隔层与变电站层之间的通信方式全部采用标准以太网方式(TCP/IP),取代了当前自动化系统中的各种现场总线(如 Lonworks、CAN、Profibus、SMI 及 RS-485 总线等),构成基于网络控制的分布式变电站自动化系统。

基于以太网技术的变电站自动化系统相对于传统的自动化系统有诸多优点^[4]。

a. 通信速率快。以太网的数据传输速度很快,一般采用 100 Mbit/s 的网速,而 RS-485/RS-232 的通信速率只有几十千比特每秒,即便在现场网络系统中,最高速率也只有几兆比特每秒。

b. 全双工通信。对于各个结点之间的连接相当于点对点方式,通信管理机可同时接收所有节点的信息,也可同时向所有的间隔设备发送信息,所有信息的采集和装置的控制可在很短的时间内完成。采用合适的通信规约,如采用主动上送与查询相结合的方式,就可减少网络的数据流量,减轻网络负担。

c. 网络结构简单。所有的设备连接在同一条数据线上,拓扑结构简单。

d. 网络设备通用。标准统一,价格便宜,备品备件少,软、硬件维护工作量少。

e. 基于以太网的变电站自动化技术,使得基于 Web 技术的远程维护成为可能。这包括 2 种情况,即可通过网络远方访问 Web 服务器,了解本站的实时运行情况;通过网络访问每台间隔层设备,利用通用浏览器实时监视数据、观察保护动作记录及录波信息。这种情况不通过通信管理机,减少了中间环节、缩短了时间、也减轻了通信机的负担。

f. 使网络上的节点之间的实时访问成为现实,为其他功能的实现打下了基础。

总之,在变电站自动化系统中采用以太网通信是大势所趋,是通信技术在电力系统领域应用和发展的必然趋势。

2.3 嵌入式以太网应用模式^[5-6]

嵌入式技术是随着计算机软、硬件的飞速发展于近几年出现在工业控制领域的一种新技术,利用嵌入式的硬、软件在单片机系统上实现以太网技术,即为嵌入式以太网。嵌入式以太网基于微处理器的软、硬件环境,与传统的基于 PC 机或工作站软、硬件环境的以太网都遵循 IEEE 802.3 标准,它使用的网络协议族(如 TCP/IP)是内嵌在高效实时多任务调度和中断管理的实时操作系统 RTOS 之中的,因此,其打破了在工业控制领域应用的很多限制。在变电站自动化系统中的智能电子设备(IED)能形成与以太网直接连接的关键是将嵌入式以太网芯片集成在

变电站间隔层 IED 的 CPU 处理模板或通信处理模板上^[7]。

嵌入式以太网用于变电站自动化系统内部的通信网络一般有 3 种典型应用模式,见图 1。

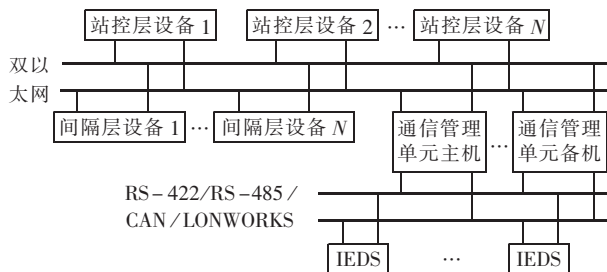


图 1 嵌入式以太网应用模式

Fig.1 Application mode of embedded Ethernet

a. 每个间隔层设备都配置一嵌入式以太网接口,将该设备作为以太网节点直接连到以太网上。

b. 几个不具备以太网接口的智能电子设备(IED)通过 RS-232/485 或现场总线等方式连接,然后通过具有嵌入式以太网接口的通信管理单元,将其作为以太网节点连到以太网上。

c. 应用模式 a 和应用模式 b 的混合。

对比 3 种应用模式,从技术实现而言,三者都必须设计嵌入式以太网接口,本质上没有太大差别。但从变电站自动化系统的电压等级、具体配置及成本考虑,它们的适用范围有所不同。

从保证数据传输的高可靠性考虑,作为站内数据流的枢纽,变电站内通信系统最好是双以太网冗余配置。这样,即使一个网出现故障也不会影响整个变电站自动化系统的稳定运行。然而,基于成本考虑,对中、低压变电站自动化系统,若采用应用模式 a,则设计成冗余的双以太网结构就不太适合;若采用应用模式 b,则可方便地设计成冗余的双以太网结构。在现阶段,变电站中其他 IED(如智能电表和直流屏)可能由其他厂商提供,这些 IED 的对外通信接口可能只有 RS-485 或现场总线接口,没有嵌入式以太网接口,因此,就无法直接连到作为变电站自动化系统内部通信网络的以太网上。

在这种情况下,必须设计一些既有多种通信接口又有嵌入式以太网接口的通信管理单元,将站内无法直接连到以太网上的 IED 通过这种通信管理单元连到以太网上。该通信管理单元的应用模式实际上与应用模式 b 相同。通信管理单元也要考虑单机和双机冗余 2 种配置方式。因此,可在变电站自动化系统中,要把站内所有 IED 都集成到以太网上,使用应用模式 c 则成为必然选择。但随着国际标准 IEC 61850 的颁布,所有厂家的 IED 都具有标准的以太网通信接口,并遵循统一的协议,选择模式 a 也可以实现系统的完全集成,这也是今后的发展趋势。

另外,3 种应用模式的网络节点数是不同的,因而会对网络流量等网络特性产生不同的影响。对于

同一规模的变电站,应用模式 **a** 的网络节点数最多,应用模式 **c** 其次,应用模式 **b** 最少。但是,研究表明,10 Mbit/s 或 100 Mbit/s 的带宽相对于变电站自动化系统的信息已经足够了,所以 3 种应用模式对于网络特性的影响不会有明显的区别。

因此,实际应用中采用何种应用模式,应从变电站的具体情况、成本和电压等级等方面综合考虑。

3 数据传输的实时性与可靠性^[8]

变电站的保护、测控装置对通信实时性要求很高,传统以太网采用的 CSMA/CD 协议是一种非确定性(non-determinism)网络通信方式,且不支持优先级传输,即如果大家同时竞争总线发送信息时,就会发生冲突,尤其当网络负载过大时,通信性能会大大降低,导致无法保证将其中重要的信息及时送达指定设备。但是,随着计算机网络技术的突飞猛进,这个问题基本上已经得到解决。

a. 以太网的传输速度已经从 10 Mbit/s 提高到 100 Mbit/s,以至目前的 1 Gbit/s、10 Gbit/s,对于同样的通信量,通信速度的提高意味着网络负荷的减轻,而减轻网络负荷则意味着提高确定性,这使以太网有能力满足实时性的要求。研究表明,当网络负荷不超过带宽的 37% 时,网络上的冲突率很低,实际上变电站自动化系统内部若使用合理的通信规约和传输模式,其网络负荷与带宽 10 Mbit/s 的 37% 相比是很低的,网络冲突率极低^[9]。

b. 交换式以太网技术的发展,则为彻底解决以太网通信的非确定性问题带来了希望。交换式以太网把网络用交换机分割成互不相连的几个网段,为每个节点提供了独占的点到点链路,在体系结构上和简单的点到点的连接完全一致,每个设备都有一个专用的单独信道连接到另一个设备,因此不需要竞争底层传输信道,使不同设备之间产生冲突的可能性大大降低,网络传输的确定性问题得到了妥善解决。

c. 在点对点连接中,以太网还提供了标准的全双工配线,它采用全双工协议,可避免数据传输冲突。

总之,采用交换式高速以太网,并使节点工作在全双工方式,是能够满足变电站实时性要求的。美国电力研究院(EPR1)在制定 UCA 通信协议体系时,对以太网用于变电站自动化系统中的网络传输实时性作了研究分析,结果表明当使用交换式集线器时,10 Mbit/s 以太网是完全可以满足实时性要求的。

4 前景展望

由于以太网具有应用广泛、价格低廉、通信速率高、软件和硬件产品丰富、应用支持技术成熟等优点,目前它已经在变电站自动化系统中的站控层、间隔层得到了一定规模的应用,并呈现向下延伸直接应

用于过程层的趋势。未来以太网将在变电站自动化系统中的现场设备之间的互连和信息集成中发挥越来越重要的作用。总之,以太网技术在变电站自动化系统中的发展前景体现在几个方面。

4.1 以太网直接应用于现场设备

以太网直接应用于现场设备间的通信已成大势所趋。随着以太网通信速率的提高、全双工通信、交换技术的发展,为以太网的通信确定性的解决提供了技术基础,从而消除了以太网直接应用于工业现场设备间通信的主要障碍,为以太网直接应用于工业现场设备间通信提供了技术可能。目前,以太网应用于现场设备间通信的关键技术获得重大突破。

a. 实时通信技术。其中采用以太网交换技术、全双工通信、流量控制等技术,以及确定性数据通信调度控制策略、简化通信栈软件层次、现场设备层网络微网段化等针对过程控制的通信实时性措施,解决了以太网通信的实时性。

b. 总线供电技术。采用直流电源耦合、电源冗余管理等技术,设计了能实现网络供电或总线供电的以太网集线器,解决了以太网总线的供电问题。

c. 远距离传输技术。采用网络分层、控制区域微网段化、网络超小时滞中继以及光纤等技术解决以太网的远距离传输问题。

d. 网络安全技术。采用控制区域微网段化,各控制区域通过具有网络隔离和安全过滤的现场控制器与系统主干相连,实现各控制区域与其他区域之间的逻辑上的网络隔离。

e. 可靠性技术。采用分散结构化设计、电磁兼容(EMC)设计、冗余、自诊断等可靠性设计技术等,提高基于以太网技术的现场设备可靠性,经实验室 EMC 测试,设备可靠性符合现场控制要求^[10]。

4.2 TCP/IP 应用于设备层通信

TCP/IP 是定义各计算机如何通过网络通信的协议。TCP 传输控制协议对应于国际标准化组织/开发性互连(ISO/OSI)模型中的传输层,负责将数据消息分组成将被 IP 层传输的数据包,以及将从 IP 层接收的数据包重新组合为完整的消息并进行校验的协议。TCP 可提供在连至网络上不同计算机运行的进程间的可靠、面向连接的通信。IP 网际协议对应于 ISO/OSI 模型中的网络层,负责将数据消息拆分为包,并将这些包从发送者按一定路径传输到目的网络或站点,然后在目的地将包重新组合成原始的数据消息。TCP/IP 是目前所实现的最成功的网络协议,是 Internet 互联网的基础。对该通信协议的支持内置于所有操作系统中。在数据链路中所用硬件对 TCP/IP 应用均是透明的。TCP/IP 已成为网络(包括 Internet)上数据传输的事实标准。具有 TCP/IP 接口的现场设备可无须透过现场的计算机,直接连接到 Internet 上,实现远程监控或远程诊断功能。

基于以太网的变电站自动化系统中,以太网深入到设备层,可连接到每个独立的控制模块。整个过程或系统被看作为一个逻辑单元,甚至是一个独立的控制器。不需考虑网络的各层概念,而只形成一个层,去除了CUP的瓶颈效应。所有数据在网络中仅需表达一次,网络扮演真正的服务器,从传感器到Internet的通信开放,从传感器到管理层的直接通信,与IT和Office办公软件兼容,真正实现开放性。以前,总是用一些专用的控制设备完成对变电站现场设备的控制,然后再用一上位机和人机界面接口(HMI)软件做监控;若需要将现场的设备状态反映在管理级网络中,则将上位机连入管理网内,异地查看设备运行状态也必须通过Internet到企业网,再到与现场控制器紧密相连的控制系统I/O服务器取数据。而基于以太网的系统,这一状况得到了革命性的改变。利用Ethernet智能板,配以各种各样的I/O模块,组成一个前端智能I/O系统,对外提供以太网通信接口,可直接挂在Internet或Intranet网上,直接将现场数据提交到本地或异地管理网上^[3]。

4.3 重视局域网与广域网的无缝接口

伴随着变电站自动化功能的开发,如巡视警戒功能、开关实时状态监测、火灾报警及消防联动等功能,需要传送视频信号,运行更加复杂的数据库,站内局域网必将向宽带化的方向发展,多媒体通信技术也将进入到变电站自动化系统中。快速以太网在带宽、可扩性、可靠性、经济性、通用性等方面具有明显优势,其应用会更加广泛。异步传输模式(ATM)是基于信元的传输技术,可以提供高达1.2 Gbit/s的传输速率,能提供局域网与广域网之间的无缝接口,这种技术会受到重视。

4.4 以太网接口用于保护

目前,微机保护装置有逐步取代传统的继电保护装置的趋势,微机保护装置可完成测量、控制和保护功能,所实现的功能已超出传统的继电保护功能。微机保护装置如果提供以太网接口,站级主机或管理部门的主机可通过以太网,访问装置的运行状态,实现保护定值的管理及提取故障录波数据。这对构建分布式变电站自动化系统非常理想。

4.5 组网技术

组网技术将逐步改进,以太网介质从同轴电缆,至双绞线,直到光纤,尤其是光纤网络已逐渐从电信的主干网络,延伸到终端设备。光纤不受噪声干扰,适合使用在实时监控的高噪声现场环境。另一方面,利用标准简单网络管理协议(SNMP)的网络管理工具,可有效地管理网络。以太网用于变电站自动化一个很大的困难便是布线,现正在发展无线、红外线、电力载波及蓝牙等组网技术,这些技术由于广大市场的推动,技术快速提升,成本则相对下降,会很快应用于生产实际,反过来又会推动自动化的发展。

可以预见,不久的将来,除了传输介质为光纤的以太网外,还有许多设备皆采用无线方式。

4.6 以太网与现场总线

现场总线经过十几年的发展,在技术上已经成熟,在市场上也得到了全面推广。就目前而言,以太网全面代替现场总线应用于变电站自动化系统还存在一些问题,因此,近一段时间内,工业以太网技术的发展将与现场总线相结合,物理介质采用标准以太网连线,如双绞线、光纤等;使用标准以太网连接设备(如交换机等),在现场使用工业以太网交换机;采用IEEE 802.3物理层和数据链路层标准、TCP/IP协议组;应用层(甚至是用户层)采用现场总线的应用层、用户层协议;兼容现有成熟的传统控制系统,如分布式控制系统(DCS)、可编程逻辑控制(PLC)等。

参考文献:

- [1] 王晨皓. 现场总线技术及其在变电站自动化中的应用[J]. 河南科学, 2004, 22(6): 859-862.
WANG Chen-hao. Field-bus technology and its application in the substation automation systems[J]. Henan Science, 2004, 22(6): 859-862.
- [2] 徐茹枝, 单波. 影响现场总线在电力系统应用的关键因素分析[J]. 自动化博览, 2005, 22(2): 69-70, 72.
XU Ru-zhi, SHAN Bo. Key factors analysis of affecting the applications for fieldbus technology to electric power system[J]. Automation Panorama, 2005, 22(2): 69-70, 72.
- [3] 宋子强. 以太网在变电站自动化中的应用[J]. 供用电, 2004, 21(2): 38-40.
SONG Zi-qiang. The application of Ethernet in the substation automation[J]. Distribution & Utilization, 2004, 21(2): 38-40.
- [4] 谢玉亮. 以太网技术在变电站自动化系统中的应用[J]. 电工技术杂志, 2004(11): 10-12.
XIE Yu-liang. The application of Ethernet technology in substation automation system[J]. Electrotechnical Journal, 2004(11): 10-12.
- [5] 任雁铭. 基于嵌入式以太网的变电站自动化系统通信网络[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(17): 36-38.
REN Yan-ming. Computer communication network based on embedded Ethernet technique for substation automation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(17): 36-38.
- [6] 丁杰, 赵金荣, 周邓飞, 等. 基于组件模型技术的变电站监控软件[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(18): 51-54, 59.
DING Jie, ZHAO Jin-rong, ZHOU Ye-fei, et al. Substation SCADA system based on component technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(18): 51-54, 59.
- [7] 杨刚, 杨仁刚, 郭喜庆. 嵌入式以太网在变电站自动化系统智能化电气设备上的实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 74-76, 85.
YANG Gang, YANG Ren-gang, GUO Xi-qing. Implementation of embedded Ethernet in Intelligent Electric Device(IED) in the substation automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 74-76, 85.
- [8] 林健. 以太网在变电站自动化通信中的应用[J]. 机电信息, 2004(8): 32-34.
LIN Jian. The application of Ethernet in the substation automation system communication[J]. Electromechanical Information, 2004(8): 32-34.

[9] 任雁铭,秦立军,杨奇逊,等. 变电站自动化系统中内部通信网的研究[J]. 电网技术,2000,24(5):42-44.
REN Yan-ming,QIN Li-jun,YANG Qi-xun,et al. Research on internet communication network of substation automation system [J]. Power System Technology,2000 , 24 (5):42-44.

[10] 王荣莉,雷斌. 工业以太网技术的现状和发展[J]. 自动化博览, 2004,21(4):63-65.
WANG Rong-li,LEI Bin. The status quo and development of industrial Ethernet technology[J]. Automation Panorama,2004, 21(4):63-65.

(责任编辑: 汪仪珍)

作者简介:
冯邦成(1982-),男,山东济宁人,硕士,主要从事电力调度自动化系统和工业监控组态软件的研究工作(E-mail: fchcheng@tom.com);
康积涛(1962-),男,江西遂州人,教授,博士,主要从事电力调度自动化系统、电力系统无功优化计算和工业监控组态软件的研究工作。

Application and prospect of Ethernet in substation automation system communication

FENG Bang-cheng, KANG Ji-tao

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on the layered and distributed structure of the substation automation system and its communication tasks and requirements, defects of the field bus technology are analyzed, such as too many standards, difficult information interactions, inconvenient communication controller expansions, insufficient openness and flexibilities and so on. A substation automation system based on Ethernet is put forward, which has simple network structure, universal devices, fast communication speed and full-duplex transmission. Three application modes of the embedded Ethernet are presented: one Ethernet interface for each device in cell; communication manager with Ethernet interface for IEDs (Intelligent Electronic Devices) connected via RS-232/485 or field bus; hybrid mode of both. The solution for real-time and reliable data communication of substation is the application of exchange high-speed Ethernet and the full-duplex mode of nodes.

Key words: substation automation system; Ethernet; real-time performance; reliability