

数字化变电站通信网络 规划与实时特性改进

李 强, 窦晓波, 吴在军, 胡敏强

(东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 数字化变电站通信网络 CNDS (Communication Network of Digital Substation) 与传统变电站自动化系统中的通信网络在结构、功能、性能和重要性等方面存在较大差异。在 IEC 61850 标准对变电站自动化系统功能分层的要求和明确数字化变电站通信网络效能目标的基础上, 提出了过程层点对点/多点、过程层总线和站内统一网络 3 种数字化变电站通信网络组网方式; 指出前 2 种组网方式目前较易实现, 而站内统一网络将凭借信息高度共享等优势成为数字化变电站通信网络的最终形态。在分析以太网介质访问控制方法的基础上, 针对标准以太网存在延时不确定的问题, 提出了改进以太网实时性能的若干措施, 并从中选择出适用于数字化变电站通信网络的方法。研究了数字化变电站通信网络广播域的划分方法。

关键词: 数字化变电站; 通信网络; 组网方式; 实时性能; 数字式电流互感器 (ECT); 数字式电压互感器 (EVT)

中图分类号: TM 769; TP 393

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)05-0073-04

0 引言

随着现代信息技术的发展, 数字式电流、电压互感器 (ECT、EVT)、光纤智能断路器的成熟, 建设数字化变电站的实践成为可能。

数字化变电站强调变电站自动化系统整体数字化、信息化的程度, 站内自动化设备之间及与电力系统的集成应用和整体协调操作的能力, 是变电站自动化系统未来的发展方向。

从运行形态上看, 数字化变电站具有自动化系统层次化、过程设备智能化、间隔设备网络化和运行管理信息化等特征; 从技术层面上看, 过程数据数字化、共享化, 支持互操作, 高速、可靠、开放的通信网络, 全站信息化、模型化是它主要的技术特征。

数字化变电站中自动化设备之间信息的交互均采用数字通信方式, 大部分自动化功能的实现依赖于通信网络。高速、可靠、开放的通信网络是建设数字化变电站必不可少的先决条件和关键技术, 因此, 对其进行深入的研究具有现实意义。

数字化变电站的建设依据变电站通信网络与系统标准——IEC 61850 标准来规范信息组织和交互的方式。因此, 这里在研究数字化变电站通信网络 CNDS (Communication Network of Digital Substation) 相关内容时, 都以 IEC 61850 标准为依据。

1 数字化变电站通信网络基本分析

1.1 网络的层次结构

根据 IEC 61850 标准对变电站自动化系统功能

分层的要求, 数字化变电站被划分为 3 个功能层次, 即变电站层、间隔层和过程层^[1], 如图 1 所示。

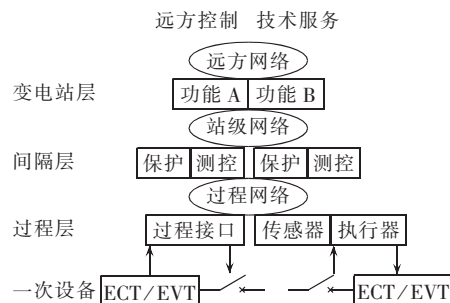


图 1 数字化变电站功能层的划分

Fig.1 Functional levels of digital substation

其中, 过程层主要完成开关量 I/O、模拟量采集和控制命令发送等与一次设备相关的功能; 间隔层的功能是利用本间隔的数据对本间隔的一次设备产生作用; 变电站层完成对站内间隔层设备、一次设备的控制及与远方控制中心、工程师站及人机界面通信的功能; 各层之间通过通信网络连接。

以上 3 个功能层的划分既是逻辑上的, 又是物理上的, 逻辑上表示变电站自动化功能的分类, 物理上反映站内不同类型自动化设备的实际分布。而各层之间通信网络的划分仅仅是在逻辑上用来表示网络承载的不同功能, 实际构建中可不拘泥于这样的划分形式, 在满足 IEC 61850 标准对变电站内部信息传输要求的前提下, 根据变电站的规模、设备状况、运行要求以及网络技术条件可采取不同的组网与应用方式。

1.2 网络的效能目标

与一般通信网络不同, 数字化变电站通信网络的效能目标不是高的带宽利用率, 而是更高的实时

性和生存性(生存性包括可用性、可靠性、易维护性、鲁棒性、安全性、抗干扰性、自恢复性等)。

首先,为保证各类自动化功能正常工作,数字化变电站通信网络实时性能必须达到 IEC 61850 标准对报文传输性能的要求,以输电间隔为例:极快速报文不超过 3 ms、快速报文不超过 20 ms、中速报文不超过 100 ms、低速报文不超过 500 ms^[1]。

其次,为了保证数字化变电站的可靠运行,站内通信网络的生存性能要远高于一般通信网络:

a. 站内通信网络必须具备最长的运行时间、最少的故障时间;

b. 站内通信网络必须具备“故障弱化(graceful degradation)”的特性,单点故障不会影响整个网络的正常工作,且网络要具有一定的容错能力;

c. 站内通信网络必须能够通过软硬件进行维护,维护便捷,且对系统的正常工作影响最小;

d. 在不影响网络正常工作的条件下,可最大程度地动态改变网络结构;

e. 站内通信网络必须具备抵御服务拒绝(试图故意阻止合法的访问)和非法入侵的能力;

f. 在变电站这个强电磁干扰环境中,网络必须具备较强的抗电磁干扰能力;

g. 站内通信网络必须具备故障监测、故障自恢复和数据校验等功能。

2 组网方式

依据目前通信网络技术的发展状况,并且参照 IEC 61850 标准、IEC 60044-7/8 标准(数字式电流、电压互感器规范),数字化变电站通信网络应采用以太网,其中过程网络必须采用抗电磁干扰强的光纤介质,站级及对外网络采用光纤或双绞线介质。

合理的组网方式是保证以太网高效可靠运行的重要条件。在数字化变电站中,合理的组网方式可以简单概括为:组建的网络在实现承载功能、并满足性能要求的基础上,在不改变网络本体参数的条件下,通过对网络结构和节点分布的优化,提高网络的效能和变电站信息化应用的水平,并达到效能与投入的平衡。

以太网具有 3 类拓扑结构:总线、星型和环型,其中,双网冗余下的星型结构可以兼顾网络的安全稳定性和扩展性,适宜作为数字化变电站通信网络总体拓扑结构(部分网络可能采用的是点对点通信的方式)。针对数字化变电站的功能分层结构,可采取图 2~4 所示 3 种双星型的组网方式。

图 2、3 所示的组网方式是将站内通信网络划分为 2 个相互隔离的物理子网,即站级网络和过程网络,站级网络用于互连所有的变电站层设备和间隔设备,过程网络用于连接间隔设备和过程设备。图 2 中,过程网络是点对点/多点的方式,过程数据只能被本间隔某个设备独享或几个设备有限共享;图 3 中,过程网络拓扑为星型结构,过程数据可以被所有

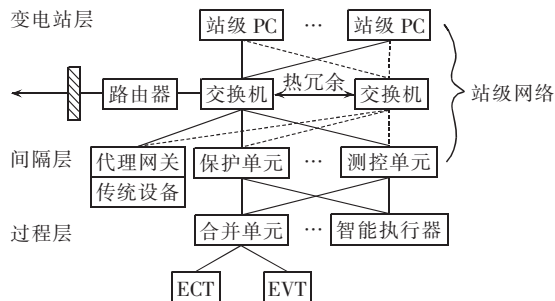


图 2 2 层网络(过程层点对点/多点)

Fig.2 Two level network(point-to-point/multi points at process level)

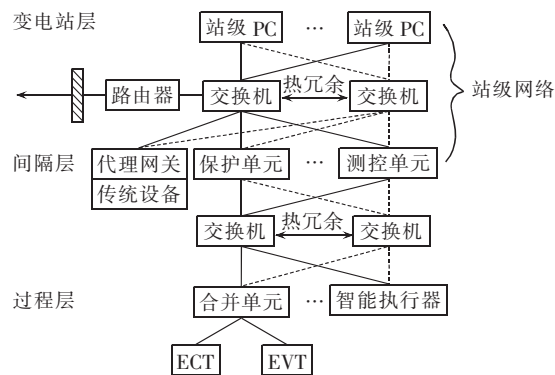


图 3 2 层网络(过程层总线)

Fig.3 Two level network(bus at process level)

间隔设备共享。由于站级网络和过程网络是 2 个独立的物理网络,变电站层设备不能直接访问过程设备。

图 4 所示的组网方式是将站内通信网络组建成一个统一的物理网络,除了 ECT/EVT 通过合并单元接入外,站内所有的自动化设备都挂接在同一个网络上。

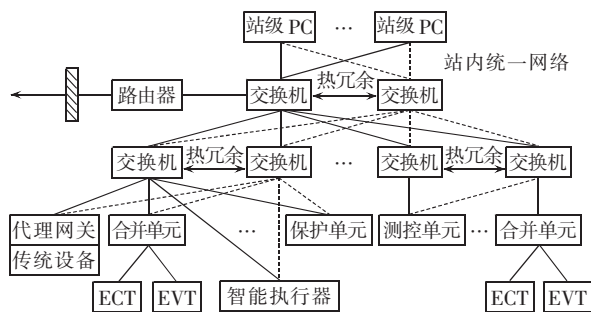


图 4 站内统一网络

Fig.4 Internal unique communication network

从过程层点对点/多点,到过程层总线,再到站内统一网络,随着信息共享程度的不断提高,数字化变电站信息化应用水平不断提高,同时对网络性能、组网技术,以及自动化设备的要求也越来越高。以站内统一网络为例进行说明。一方面,所有自动化设备都可以通过同一个网络无障碍地进行信息交互,信息得到最大程度上的共享。因此,在能够精简自动化设备的同时,可以便捷实现全局保护、防误闭锁等复杂的全站集成应用和协调功能。另一方面,由于所有的设备都挂接在同一个网络上,在加大了

网络负荷的同时,各类不同到达的数据流使网络运行状况变得复杂且难以评估,网络的实时性、生存性面临较大的考验。另外,由于网络节点数目众多,而网络交换设备的端口数目有一定的限制,需要采取多级交换的组网方式,因此网络结构较为复杂。

可见,数字化变电站信息化应用水平的提高有赖于以网络技术为主的各项技术水平的提高。根据目前的技术条件,2层物理网络结构的站内通信网络更易实现,而站内统一网络可先在规模不大、节点数较少的低压变电站中进行试验,当各项技术水平达到一定高度并积累了一定的组网和运行经验后,站内统一网络将凭借其信息高度共享的优势,成为数字化变电站通信网络的最终形式,届时,甚至ECT/EVT也可以不通过合并单元,直接挂接到统一网络上。

以上3种组网方式都将逻辑上的对外网络归并到站级网络中,因此,站外网络能够直接访问站间隔设备。借助间隔设备的广域信息交互,可以实现输配电系统的广域控制,这是建设数字化变电站的一个重要目标。当然,这也带来了间隔层设备信息安全等问题,这些问题可以通过防火墙等技术和管理措施加以解决,不再赘述。

3 数字化变电站通信网络实时性能研究

以往,变电站通信网络只是用于站内监控系统,而在数字化变电站中,保护功能(包括采样值传输、跳闸动作等有严格时限要求的环节)的实现也借助于站内通信网络。因此,数字化变电站通信网络必须具备较高的实时性能。

3.1 以太网实时性能分析

通信网络的实时性能是由网络的带宽、访问仲裁/传输控制方法、优先级、组网方式等诸多因素共同决定的。以太网技术在带宽上具有突出的优势,但由于以太网技术最初针对的是商业应用领域而非工业过程控制领域,强调的是网络节点之间的平等和带宽的共享,所以在访问仲裁/传输控制方法和优先级上的实时性特征并不突出。

以太网采用的是载波侦听多路访问/冲突检测CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)的介质控制方法:节点在访问网络之前,首先侦听网络是否空闲,如繁忙则等待;节点发送完一帧报文之后等待一个帧间隔时间,以留给其他节点访问网络的机会;当2个或多个节点同时访问网络时,就会产生数据冲突,所有冲突的节点会按照一定的退避算法随机延迟一定时间,然后重新侦听网络,试图获得网络的访问权^[2]。

以太网并不限定节点访问网络的时刻,即节点访问网络是事件驱动的,而非时间驱动的,所以在多节点复杂网络中,数据冲突不可避免;而普通共享式以太网不支持对报文或节点优先级的设定,发生冲突后所有节点都采取相同的退避机制,且退避时间

是随机的。因此,预测或者计算某个特定信息的最长响应时间比较困难,即无法确定信息的最坏端到端时延。但有必要说明的是,数据冲突并不是以太网技术的缺陷,而是以太网实现节点之间平等和带宽共享的手段。

因此,以太网凭借其突出的带宽优势,具备了良好的实时性能;但由于缺乏实时的访问仲裁/传输控制方法和优先级的设定,在多节点复杂网络中不能达到硬实时系统的要求。针对这一问题,一方面,可以采取一些改进以太网实时性能的措施,使其能够更适合工业过程控制的应用;另一方面,在一些实时性要求特别高的环节中,可以采取点对点的通信方式,以避免产生数据冲突。

3.2 以太网实时性能改进措施

变电站自动化应用中不会有持续很长时间的大流量的数据传输,以太网的带宽是足够的。信息的端到端时延不只消耗在传输时延上,而更多的消耗在排队时延上(包括节点侦听网络、冲突退避后等待再侦听等过程中消耗的时间)。因此,提高以太网的实时性能,应首先从避免数据冲突或保证实时数据的优先权入手,目前主要有下面所述的几种措施^[3-10]。

a. 修改以太网介质访问控制MAC(Media Access Control)层协议,改进以太网介质控制方法。当检测到冲突时,实时信息不退避、或者采用与非实时信息不同的退避算法、或者等待较小的帧间隔时间,从而保证实时信息的优先传送。这种方法不能避免冲突,但可以确定实时信息的最坏端到端时延,即达到硬实时系统的要求。理论上是一种理想的方法,但需要修改硬件芯片。因此,在形成标准并得到芯片制造商广泛支持之前,这种方法的可用度不高。

b. 带优先级的交换式以太网。通过交换机将网络划分为多个网段,减少了冲突域,从而降低了数据冲突的概率;提高了网络带宽;通过优先级的标识或仲裁,保证优先级高的数据通过交换机时可以优先传送;能够单独隔离最重要的节点,以确保其实时性。相对于普通共享式以太网,带优先级的交换式以太网的实时性能显著提高,且实现方法简单、灵活,是提高以太网实时性能的主要方法。

c. 实时调度协议。将网络中的某个节点设定为主节点,由主节点发出命令,调度其他节点有序地访问网络。通过控制节点访问网络的过程,预留了带宽、避免了数据冲突,可以达到硬实时系统的要求。但目前各种实时调度协议都还处于研究试验阶段,没有形成标准,设备厂商之间难以统一,在有多个厂商设备的系统中可用度不高。

d. 传输整形、通信平滑、实时控制层等传输控制措施。在以太网的传输层与MAC层之间增加流量整形器、通信过滤器或实时控制层来控制非实时信息的传输,以减少对实时信息传输的影响,保证实时信息的优先处理,可以作为提高以太网实时性能的辅助方法。

考虑到网络的兼容性、技术的成熟程度和实现难度,在数字化变电站中可采用带优先级的交换式以太网和实时传输控制(如用来防止故障录波数据传输对实时数据传输造成的影响)2种方法作为提高网络实时性的措施,其他方法可以酌情采用。

3.3 数字化变电站通信网络广播域划分方法

在交换式以太网中,广播域的划分是一项关键的应用技术。广播域划分的基本原则是依据实际应用将不同的节点划分到不同的网段中,以便使网络上的数据冲突降至最低,网络的实时性达到最高。

理论上,数字化变电站通信网络应采用面向功能的广播域划分方法。因为,变电站自动化系统其实就是驻留或分散在各个装置中的功能单元相互提供和享用自动化功能的实现;所以,如果能将某个功能所涉及到的所有网络节点划分到同一个网段中,则网络上的数据冲突必然降至最低。

实际中,采用面向功能的广播域划分方法会遇到一些困难。首先,变电站内的网络节点通常不从属于唯一的自动化功能,很可能多个自动化功能都要和这个节点进行信息交互;其次,如果不采用虚拟局域网 VLAN(Virtual Local Area Network)技术,广播域的划分在组网阶段就必须完成,往往此时对各个自动化功能的认识还不够明确和全面。

考虑到现在的大多数自动化设备的功能还是面向间隔层的,实际中不妨将同一个间隔层内的网络节点划分到同一个网段中,即采用面向间隔层的广播域划分方法。这种划分方法简单、可操作性强,可能将信息交互最为频繁的节点划分到同一个网段中。但这种划分方法会导致间隔层之间信息交互的不便,不利于全站集成应用功能和整体协调操作的实现。

因此,数字化变电站通信网络采取怎样的广播域划分方法最为合理,还需要在实践中进行更深入的研究。

4 结语

就数字化变电站通信网络的组网方式、网络的实时性能等问题进行了深入研究,并提出了相应的解决方案。但数字化变电站通信网络的建设还属于一个崭新的尝试,无论是在技术上,还是在管理上都还有一些问题需要进一步的研究并加以解决,例如站内统一网络的实现、广播域划分的策略、信息安全的保障措施等,这些都是后续研究的目标。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会. IEC/TC57 IEC 61850 变电站通信网络和系统标准[S]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 吴在军,胡敏强,杜炎森. 嵌入式以太网在变电站通信系统中的应用[J]. 电网技术,2003,27(1):71-75.

Ethernet to communication networks in substations[J]. Power System Technology,2003,27(1):71-75.

- [3] 彭瑜. 工业以太网及以太网向现场层延伸的若干问题的思考[J]. 自动化博览,2003,20(6):10-16.
- PENG Yu. Industrial Ethernet and some pondering when Ethernet to extend to field layer[J]. Automation Panorama,2003,20(6):10-16.
- [4] 沈宏涛,姜奇鹤,王初,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] 辛建波,段献忠. 基于优先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 Jian-bo, DUAN Xian-zhong. A transfer scheme based on priority-tag in switched Ethernet for substation process-level[J]. Power System Technology,2004,28(22):26-30.
- [6] 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,2002,36(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,2002,36(12):1299-1302.
- [7] 窦晓波,吴在军,胡敏强,等. UDP 协议在变电站自动化通信系统中的实现[J]. 电力自动化设备,2003,23(12):39-43.
- DOU Xiao-bo, WU Zai-jun, HU Min-qiang, et al. Implementation of UDP in communication system of substation automation[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(12):39-43.
- [8] 沈钢,魏震,蔡云泽,等. 一种实时以太网介质访问控制协议的时延性能分析[J]. 电子学报,2003,31(2):175-178.
- SHEN Gang, WEI Zhen, CAI Yun-ze, et al. Delivery delay analysis of a real-time Ethernet MAC protocol[J]. Acta Electronica Sinica,2003,31(2):175-178.
- [9] 陈磊,冯冬芹,金建祥,等. 以太网在工业应用中的实时特性研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2004,38(6):670-675.
- CHEN Lei, FENG Dong-qin, JIN Jian-xiang, et al. Study on real-time characteristics of Ethernet in industrial application[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science,2004,38(6):670-675.
- [10] 王志平,熊光泽. 一种基于 Ethernet 的硬实时通信协议[J]. 计算机研究与发展,2000,37(10):1252-1258.
- WANG Zhi-ping, XIONG Guang-ze. An Ethernet-based hard real-time communication protocol[J]. Journal of Computer Research and Development,2000,37(10):1252-1258.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

李强(1965-),男,江苏南京人,博士研究生,主要从事配网自动化、电力需求侧管理、变电站自动化等方面的研究;
 窦晓波(1979-),男,江苏南京人,讲师,博士,主要从事变电站自动化研究(E-mail: dxb_2001@sina.com);
 吴在军(1975-),男,江苏南京人,副教授,博士,主要从事变电站自动化、实时系统等方面研究工作;
 胡敏强(1961-),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,主要从事工程电磁场计算、电机及其控制技术、电气主设备状态监测与故障诊断等方面的工作。

Communication network of digital substation and improvement of real-time performance

LI Qiang, DOU Xiao-bo, WU Zai-jun, HU Min-qiang

(Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The CNDS (Communication Networks of Digital Substation) is quite different from that of conventional substation in structure, functions, performance, essentiality and so on. To meet the requirements of IEC 61850 for functional hierarchy, three types of CNDS network structures are proposed based on its clarified functional targets: point-to-point multipoints at process level, bus at process level and internal unique network. The first two types are easier to be realized, while the unique network in whole substation, with highly shared information, will be the final structure of CNDS. Based on the analysis of ethernet media access control, measures to improve its real-time performance are suggested, some of which are applicable for CNDS. The partition method for the broadcasting domain of CNDS is discussed.

Key words: digital substation; communication network; network structure; real-time performance; electronic current transducer; electronic voltage transducer