

# 工业以太网技术在变电站自动化系统中的应用

刘频, 陈立

(成都电业局, 四川 成都 610031)

**摘要:** 针对当前变电站自动化系统中通信网络的特点, 依托于实际的大型变电站自动化系统开发项目, 着眼于以太网上不同协议和传输机制对数据传输的实时性、可靠性会产生不同的效果。首先分析了工业以太网在当前新兴的两层式变电站体统应用的缺陷, 提出了组播技术、UDP扩展协议在工业以太网中的应用策略, 以及实现中的关键技术。

**关键词:** 工业以太网; 组播技术; UDP扩展协议; 变电站综合自动化

## Application of industrial Ethernet in substation automation system

LIU Pin, CHEN Li

(Chengdu Electric Power Bureau, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Applying Ethernet technology in substation communication system is a trend. According to the features of communication network for Substation Automation System(SAS) as well as the experience of large transformer station automation systems in real development projects, this paper analyzes the disadvantages of industrial Ethernet used in 2-layers SAS, proposes a new solution of the 2-layers SAS based on multicast technology and UDP extended protocol.

**Key words:** industrial ethernet; multicast; UDP extended protocol; substation automation system

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)23-0065-04

## 0 引言

变电站自动化以计算机技术为基础, 实现了电网变电站现代化管理, 改变了传统变电站控制室、保护室的主体结构 and 值班维护方式, 充分体现了现代生产的特点, 是当代电网发展的必然趋势<sup>[1]</sup>。经过十多年的发展, 国内变电站自动化系统已经达到一定的水平, 正向分布化、智能化的实时控制方面发展。

通信网络是变电站自动化系统的命脉, 其可靠性与信息传输的快速性决定了系统的可用性<sup>[2]</sup>。一方面, 用户对统一的网络和通信协议的要求日益迫切; 另一方面, Intranet/Internet 等信息技术的飞速发展, 要求电力系统从现场控制层到管理层能实现全面的无缝信息集成, 并提供一个开放的基础构架。因此, 以太网(Ethernet)作为应用最广泛的局域网技术异军突起, 已经迅速走向工业自动化控制领域的前台<sup>[3,4]</sup>。

所谓的工业以太网, 与以太网相似, 是基于IEEE 802.3 的强大的区域和单元网络。不同的是, 工业以太网还需要从网络通讯协议、通信速率、工

业环境、安装方式、散热、通信管理、主干(TrunkingTM)冗余、环网冗余、服务质量(QoS)等方面考虑, 以适应工业现场的需求。由于网络通信具备兼容性、可扩展性以及适合处理突发事件的异步工作方式, 工业以太网将在变电站自动化系统的发展中扮演重要角色。

## 1 变电站自动化通信系统的发展

### 1.1 传统现场总线通讯模式

根据 IEC 关于厂站自动化的分层观点考虑, 变电站自动化系统逻辑上可以分为三层结构(站控层, 间隔层, 过程层)。本文仅讨论站控层与间隔层之间的通讯。

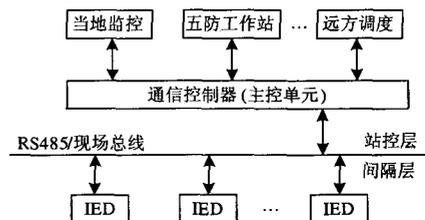


图1 基于现场总线的变电站系统结构  
Fig.1 Structure of SAS based on fieldbus

由图 1 可以看出, 这种结构下, 间隔层的智能装置 (IED) 负责采集变电站内的实时数据。通信控制器实现汇总 IED 数据、规约转换、信息传递、系统对时等功能。站控层与间隔层之间由各种类型物理通信网络连接, 如 RS485 网、CAN 网、LONWORKS 网等。需要注意的是, 通信控制器管理着整个系统的实时数据。一旦通信控制器发生故障, 整个变电站自动化系统即将瘫痪。

### 1.2 新兴网络分布式通信模式

随着计算机技术、网络及通信技术的飞速发展, 形成了真正意义上的分层分布式自动化系统。分布式有利于任务在整个计算机系统上进行分配与优化, 克服了传统集中式系统会导致中心主机资源紧张与响应瓶颈的缺陷, 是计算机系统技术的一大进步。目前国内外主流厂家均采用了此类结构模式<sup>[5]</sup>。

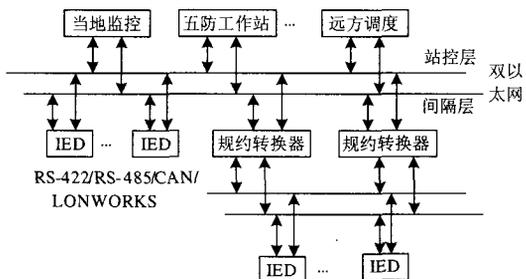


图 2 基于分布式网络的变电站系统结构

Fig.2 Structure of SAS based on distributed network

从图 1 和图 2 的比较可以看出, 图 1 中站控层与间隔层之间复杂的通信网络被统一的工业以太网所取代。所有设备均通过标准通信协议及统一的 RJ45 口接入到高速工业以太网中。同时, 为兼容部分的老设备, 利用规约转化器来完成设备非以太网接口到以太网接口的转化。这样, 以前通信控制器的任务分散到多个子设备完成, 某一个子设备出现问题均不会影响到系统其他部分的正常运转, 大大降低了系统故障导致瘫痪的可能性。

## 2 工业以太网通信协议的应用

工业以太网通信协议的应用, 实质上是根据系统中信息类别决定的。本文将变电站自动化通信系统中的信息大致分为三类: 第一类为周期性发送的数据, 如遥信、遥测、脉冲量等; 第二类为扰动时产生的变位信号、SoE (Sequence of Events) 及扰动记录等, 此类信息突发性强, 需要快速可靠的传输。这两类数据一般由间隔层的保护测控装置产生, 需要变电站层的设备同时接收。第三类数据为

变电站层设备与装置之间的调节控制等命令。

在以太网 OSI 结构的传输层中, 定义了 TCP 及 UDP 两种协议。TCP 具有可靠性高但速度慢的特点, 在一对多的通信模式下需要维持多个连接, 并不适合变电站内的大量实时数据传输。因此在变电站自动化系统中多采用效率更高 UDP 协议。而在基于 UDP 的变电站通信系统中, 有单播、组播、广播三种通信方式可供选择。下面就这些方式在变电站通信网络中的影响详细阐述:

单播是单一点对点的数据包传递, 在每个发送者和接收者之间需要独立的数据通道。对于第一、第二类数据, 采用单播发送多个副本给各个变电站层设备将给装置 CPU 带来较大的处理负担, 同时网络上出现同一报文的多个副本, 无谓消耗了网络带宽。单播只适合于第三类数据的通信。

广播能将数据包发送到同一子网中所有主机上, 是一种易于实现且比较高效的一对多通信手段。在高压变电站一般采用高端 CPU 或独立的通信处理芯片, 应用层对无用的广播报文可以迅速解码并丢弃而不影响保护功能。而低压变电站由于保护测控装置的硬件平台配置较低, 很多保护测控装置还采用 16 位单片机 (如 intel 公司的 80296SA) 作为主处理器, 通信、人机界面、保护逻辑都由同一个 CPU 负责。如果采用广播通信方式, 网络上大量频繁出现的第一、第二类数据会让 CPU 不堪重负, 甚至影响到保护功能。而对于校时命令等少量需要全站设备接收的信息, 广播是很好的选择。

组播是同时给同一子网中所有组播成员发送数据包是一种传输方式<sup>[6]</sup>。当有多台主机 (即一个组播组) 同时成为一个数据包的接收者时, 出于对带宽和 CPU 负担的考虑, 组播会是低压变电站自动化系统中传输第一、第二类数据的最佳选择。

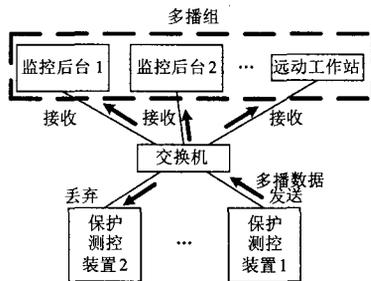


图 3 多播数据流

Fig.3 Multicast Data Flow

本系统中, 间隔层的保护测控装置以组播方式发送第一、第二类数据, 需要接收这些数据帧的变电站层设备通过配置划分为同一组播组。而

其它不需要接收这些数据的装置由于没有加入这一组播组,数据帧将根据 IGMP 协议被交换机丢弃<sup>[7]</sup>。数据流如图 3 所示。

### 3 UDP 协议在工业以太网通信中的问题

由于 UDP 协议高效性和支持组播的特点,在大部分的变电站自动化通信系统,特别是低压变电站中,都采用基于组播的 UDP 协议是一种高效的选择。美国电力科学研究院定义的 UCA 通信协议体系也推荐使用 UDP 的分组广播方式<sup>[8]</sup>。但同时由于 UDP 协议固有的通信特点,运用在工业以太网通信也存在着诸多不足,需要加以弥补。

UDP 协议本身是一个无连接,不可靠,仅仅“尽力传递”的协议,它没有使用确认来确保报文到达,没有对收到的报文排序,也不提供反馈信息来控制机器间信息流动的速度<sup>[9]</sup>。因此,UDP 协议的传输将会导致以下三个严重问题:

1) 报文可能出现丢失、重复或无序到达的现象。

2) 报文发送端和接收端无法根据网络吞吐量进行流量控制和拥塞避免。

3) 变电站内实时数据的传输,只靠“尽力传递”是不够的,它必须有时延、时延抖动等业务质量(QoS)保证的要求。

从上面分析可以看出,标准的 UDP 协议显然不能满足工业以太网上应用的需求。下面笔者将依托实际的大型变电站工程,针对这些问题提出基于工业以太网的 UDP 扩展协议。

### 4 UDP 协议在工业以太网的扩展

为了解决标准 UDP 协议在工业以太网中使用的缺陷,需要在应用层对其进行了扩展,以保证数据传输的稳定性和可靠性。第一,增加报文编号机制来解决 UDP 报文的丢失、重复与无序的缺点。第二,增加滑动窗口机制来控制报文发送速度,避免网络拥塞。第三,增加多级别的优先级控制,保证 QoS 的需求。下面,结合工业以太网在变电站自动化通讯系统中的应用详细阐述。

在变电站自动化通讯系统中,以太网上的报文可以分为两类:不需要申请重发的报文(DNRR)和需要申请重发的报文(NRR),这两类数据需要由系统分别编号。DNRR 用于普通信息或周期性发送的信息,如全遥测、全遥信等,当这类数据丢失后,因为它们在下一个周期仍将继续发送,以前丢失的数据能得到及时更新,故系统不需要申请重发。NRR 编号用于重要信息或主动上送信息,如 SoE 等,这类报文只会发送一次,如果接收到的编号不

连续,则应对比已正确接收到的报文编号和当前接收的报文编号,对丢失或重复接收的报文进行处理。

当变电站产生突发事件或智能装置发生故障时,往往会产生海量的数据报文。这时为了避免由于网络拥塞出现数据收发停滞,甚至引起网络瘫痪的情况。需要使用滑动窗口机制来控制网络流量。如图 4 所示:假定发送序号用 3 个比特来编码,同时假定发送窗口为 1。也就是说帧编号可以从 0-7 共 8 个,而允许发送的未被确认的最大帧数目是 1。当发送端发完 0 号帧后,如果没有收到确认帧,就必须等待,如果收到一个确认帧,发送窗口就沿顺时针方向旋转一个号(前面设定发送窗口为 1),使窗口后沿与一个未被确认的帧号相邻。这时,5 号帧落入了发送窗口内,就可以发送了,如果超时没有收到任何确认帧,就将发送窗口里的帧全部重发。当然,发送窗口假定为 1 是一个特例,此时所有的数据报文都需要确认。在实际工程应用中,可以根据现场网络的吞吐量和网络状况,设置发送序号的编码位以及发送窗口的大小,以提高协议运行的效率。

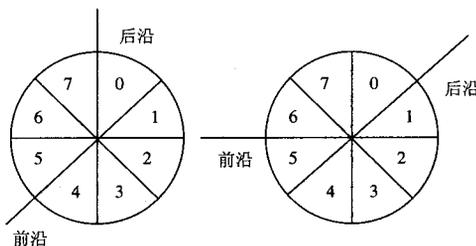


图 4 滑动窗口示意图

Fig.4 Sketch map of slip window

由于变电站自动化通讯系统中报文类别多种多样,在网络带宽足够时,正常发送全部信息可能没有问题。但一旦网络出现拥塞,就应该利用有限的网络资源首先传输重要的、实时的数据。为此,引入 QoS 是必要的。通信系统可以参考国际通用规约 IEC-60870-103 以及 IEC-60870-104<sup>[10]</sup>,对各类的数据报文设定优先级。假定设置三个优先级,第一级传输重要的主动上送信息及控制信息,第二级传输周期性上送的实时信息,第三级上送校时信息或网络管理信息。当网络资源不足时,可以考虑丢弃优先级三的数据,当网络资源严重不足时,可以考虑丢弃优先级二、三的数据。优先级个数设定以及舍弃的问题需要根据工程网络情况决定。

在现场工程中,除了要在协议上保证数据的可靠传输,还需要从网络拓扑、网络冗余、现场运行环境等多方面加以考虑。这样,工业以太网才能在变电站自动化通信系统中发挥出它强大的能力。

### 5 结语

本论文在分析了变电站自动化系统的发展过程、现状和发展方向的基础上,对变电站自动化系统通信网络的结构和关键技术进行了研究,针对当前存在的问题,提出了一种基于工业以太网组播技术的变电站自动化系统通信网络解决方案,并详细阐述了方案的优势和其中的技术难点。经过实际应用证明,这种方案完全可行,具有广泛的应用前景。

### 参考文献

[1] 黄益庄. 变电站综合自动化技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.  
HUANG Yi-zhuang, Technology of Substation Automation System[J]. Beijing China Electric Power Press, 2000.

[2] 赵金荣, 王海峰. 基于嵌入式以太网的变电站自动化系统的实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (11): 79-82.  
ZhAO Jin-rong, WANG Hai-feng. Implementation of Substation Automation System based on the embedded Ethernet technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (11): 79-82.

[3] Skeiet T, Johannesse N, Brunner C. Ethernet in Substation Automation[J]. IEEE Control System Magazine, 2002, 22.

[4] 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.  
WU Zai-jun, HU Min-qiang, DU Yan-sen. Application of the Embedded Ethernet in Substation Automation System[J]. Power System technology, 2003, 27.

[5] 孔庆月, 翟少华, 徐明贤. 对传统式分布式系统的改进研究[J]. 黑龙江科技信息, 2007, (6).  
KONG Qing-yue, ZHAI Shao-hua, XU Ming-xian. Improvement Research of Traditional Distributed

System[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2007, (6).

[6] 叶保留, 顾铁成, 陆桑璐, 等. 组播技术综述[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25.  
YE Bao-liu, GU Tie-cheng, LU Sang-lu, et al. Multicast Technology Summary[J]. Small Microcomputer System, 2004, 25.

[7] 刘波. IP 组播通信机制及其实现[J]. 计算机工程, 2001, 27.  
LIU Bo. The Mechanism and Realizes of IP Multicast Communication[J]. Computer Project. 2001, 27.

[8] 任雁铭, 操丰梅, 等. 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).  
REN Yan-ming, CAO Feng-mei, et al. Computer Communication Network Based on the Embedded Ethernet Technique for Substation Automation System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (17): 79-82.

[9] 汪晓平, 钟军, 等. 网络通信协议分析与应用实现[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.  
WANG Xiao-ping, ZHONG Jun, et al. The Analysis and Application of Network Protocol[M]. Beijing: Post and Telecom Press, 2003.

[10] 徐力子. 变电站自动化系统 IEC60870-5-103 和 IEC60870-5-104 协议的分析和实施[J]. 电网技术, 2002, 26.  
XU Li-zi. The Analysis and Application of IEC60870-5-103 and IEC60870-5-104 in Substation Automation System[J]. Power System Technology, 2002, 26.

收稿日期: 2008-02-25; 修回日期: 2008-05-21

### 作者简介:

刘 频 (1981-), 男, 硕士, 从事变电站自动化系统领域的研究与开发; E-mail: liupinvip@163.com

陈 立 (1967-), 男, 博士, 从事电力自动化系统领域的研究。

(上接第 55 页 continued from page 55)

当电源电压低于 4.5 V 时, 在 INT1 中断服务程序内使电压低指示灯亮, 并关闭所有中断源及定时器, 使单片机进入休眠状态。

从棒程序与主棒类似 (略)。

### 4 结束语

无线芯片实现核相仪结构简单, 安全可靠, 价格低, 具有很大的实用推广价值。该新型高压核相仪使用方便, 安全可靠, 具有发光二极管显示及声音提示功能, 符合电力企业标准化要求。通过选取不同的耐压元件及调节相应的参数, 可以对 6 kV、35 kV 等高压系统核相。

### 参考文献

[1] 杨学昭, 任跃华, 郑河清. 10 kV 高压相位检测仪[J]. 电测量技术, 2003, (4): 17-19.

YANG Xue-zhao, Ren Yue-hua, Zheng He-qing. The Research of New Type 10kv High-voltage Phase Comparator[J]. Electronic Measurement Technology, 2003, (3): 17-19.

[2] 黄永康, 曾宪喜. 10kV 定相器的原理及应用[J]. 福建电力与电工, 1997, 17(2): 39-41.

HUANG Yong-kang ZENG Xian-xi. The Thero and Application of 10Kv comparator[J]. Fujian Power and Electrical Engineering, 1997, 17(2): 39-41.

[3] GB13398-92, 带电作业用绝缘杆 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1992.

GB13398-92, Insulating Rod for Live Working [M]. Beijing: China Metrology Press, 1992.

收稿日期: 2008-02-12; 修回日期: 2008-03-02

### 作者简介:

杨学昭 (1966-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事电气控制、测量与控制自动化的教学与研究。E-mail: Yangxz@zzti.edu.cn