

基于 RTPS 的变电站自动化 网络通信系统研究

沈宏涛, 姜奇鹤, 王 勃, 李瑞芳
(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 介绍了基于 IEC 61850 的变电站自动化系统的结构, 结合 IEC 61850 标准, 分析了分布式变电站自动化网络通信系统数据流的特点以及以太网在工业控制领域的实时性和可靠性要求, 提出应用实时发布/订购 RTPS(Real Time Publish/Subscribe)模型的通信解决方案, 并在此基础上研究了变电站自动化系统报文传输确定性和优先级实现的关键技术问题, 最后提出了一些值得进一步深入研究的问题。

关键词: 变电站自动化; 以太网; 网络通信; 数据流; 实时发布/订购

中图分类号: TM 769; TP 393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)02-0025-05

0 引言

长期以来, 变电站自动化通信采用现场总线方式, 尽管现场总线的应用获得了巨大的成功, 但这类专用实时通信网络在成本、速度、兼容性以及互操作性等方面的缺陷始终制约着它的发展。随着计算机技术和通信技术的发展, 系统网络化和体系开放性成为工控技术发展的趋势, 以太网技术顺应这种趋势, 正被引入变电站自动化系统过程层的采集、测量单元和间隔层的保护、控制单元中, 构成基于网络控制的分布式变电站自动化系统^[1]。即将正式出版的变电站通信网络和系统标准 IEC 61850 中淘汰了不透明、不开放的各种现场总线式通信协议, 同时提出了新的指导意见, 即采用开放的高速实时的工业以太网通信方式。

传统的以太网采用的 CSMA/CD(带冲突检测的

载波侦听多路访问)协议是一种非确定性网络通信方式, 不仅不支持优先级传输还有可能发生数据流冲突。因此, 若网络负荷过大时, 通信性能会大大降低, 从而无法保证将重要的信息及时送给指定设备。而且, 以太网不具备优良的故障安全特性, 无法动态配置系统通信单元, 屏蔽故障信息点。

国内外学者对以太网的实时性也进行了不少研究, 主要从通信技术的角度对以太网进行了改进, 包括使用交换式以太网、使用全双工通信模式、采用虚拟局域网技术等, 这些新技术的采用, 一定程度上解决了以太网实时性问题, 但是底层网络的实时性传输只是为控制系统的实时性奠定了基础^[2], 而通信协议的执行策略及报文优先级处理仍然影响着系统的实时性和协调性, 因此通信协议的性能及报文的优先级处理都是至关重要的。

1 基于 IEC 61850 的变电站自动化系统结构

变电站通信网络和系统协议 IEC 61850 标准草

案提出了变电站内信息分层的概念,按照变电站自动化系统所要完成的测量、保护、控制三大功能,从逻辑上将系统分为 3 层,即变电站层、间隔层和过程层^[3],系统结构如图 1 所示。

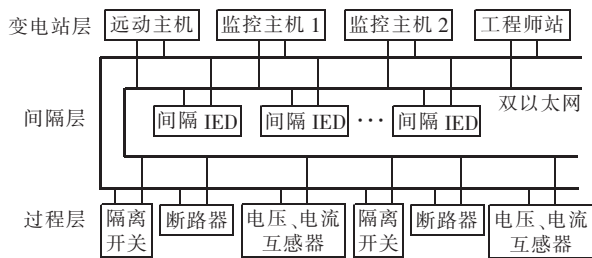


图 1 基于 IEC 61850 的变电站自动化系统结构

Fig.1 Configuration of substation automation system based on IEC 61850

基于 IEC 61850 体系的变电站自动化系统中,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以太网方式,取代了当前自动化系统中各种现场总线,实现了变电站内通信“一网到底”。为了保证数据传输高可靠性,采用双以太网冗余配置。从系统结构可以看出,变电站自动化系统中重要的自动化设备都直接上以太网,避免经过变电站层的数据处理和智能 I/O 单元上以太网,从而减少了通信处理及转换的中间环节,增加了系统的可靠性。

2 变电站自动化系统网络通信数据流分析

数据流是指在一个给定的时间间隔内的数据交换,这种数据交换可能是连续的或由事件驱动的^[4]。实时应用程序必须处理不同种类的数据流,要分析这些不同的复杂数据,必须理解这些数据的类型和属性。在基于 IEC 61850 的变电站自动化系统结构中,过程层和间隔层、间隔层和变电站层、间隔层内部及变电站层内部都有数据交换,可以将这些信息归纳为信号量、命令量、状态量、事件量、查询量 5 种类型。

2.1 信号量

为保证供电系统的可靠运行,变电站二次设备要求对一次物理量进行不间断测量,如母线电压、馈线电流、变压器油温、谐波分量等。由于这些信号量总是在持续不断地变化,因而对信号量的处理一般采取的策略是总传最新的数据,对传输中丢包现象可以忽略,只要满足传输实时性、快速性即可。

2.2 命令量

变电站当地监控单元和调度中心要实现电力设备的运行控制就必须能够可靠地传送命令量,如当地监控单元或调度中心发给执行终端的断路器和隔离开关的分合闸指令,这种命令量必须按顺序传送并执行,而且不能在传输过程中丢失也不能将同一条命令连续执行两次,即必须要求很高的可靠性。

2.3 状态量

状态量表示当前对象的状态或目标状态,如高压断路器和隔离开关的分合闸状态等,也可以称其

为开关量,对状态量的传输同样要求准确无误,并保证一定的实时性。

2.4 事件量

事件量是用异步操作以串行化任务执行的物理量,例如:当故障发生时,馈线断路器会因为保护的启动而动作将故障线路切除,要求严格的数据传输实时性和可靠性。

2.5 查询量

实时系统经常需要发布一些对所需要数据的查询,如调度中心对远端变电站功率因数和用电量的查询等。

从以上对数据流的分析可以看出,变电站自动化系统是一个典型的实时系统,其不同部分、不同时期及不同运行方式下的数据流都具有不同的传输响应速度和优先级的要求。为了适应不同的实时性和可靠性的要求,系统必须支持所有的数据流类型,而这是由通信协议性能和协议实现机制所决定的。

3 以太网通信协议讨论

3.1 TCP 和 UDP 协议

以太网本质上是物理层和数据链路层符合 IEEE 802.3 标准的一种总线型网络(指的是逻辑拓扑结构),在以太网上可以实现多种高层协议^[5],目前用于以太网的通信协议有 TCP/IP、SNA、XNS 等,其中 TCP/IP 参考模型已经成为事实上的业界标准。位于 TCP/IP 模型传输层上的协议有传输控制协议(TCP)和用户数据报协议(UDP)。TCP 协议必须首先验证目标是否可达,再建立通信(即建立“握手”信息),是一种面向连接的服务,因而可靠性较高。但由于需要建立“握手”信息,仅支持点对点的通信,而设备间状态信息和互锁信息的交换,则属于异步对等以及点对多点通信模式,采用 TCP/IP 是无法有效实现的,而且 TCP/IP 不能保证数据在有限的、确定的时间期限内到达接收方,如果接收方没有收到数据,TCP/IP 协议就会控制重发,同时阻塞应用程序进程直到收到数据或发生系统超时。因此,在那些数据的接收方必须在某一个确定的时间范围内收到数据的情况下,就不能使用 TCP/IP 协议了。而 UDP 是一种无连接的服务,不需要建立“握手”信息,速度快,实时性好,系统开销小且具有多播组播的能力,采用 UDP 协议的数据报结构简单,便于组织,但数据容量较大时可靠性不能得到保证。

可见,基于无连接的传输服务,数据报文传输的可靠性与时间确定性是一对矛盾的因素,但是在分布式变电站自动化系统中,要满足系统的要求,又必须在传输可靠性和时间确定性之间找到一个最佳的平衡点来控制报文可靠、实时的传输,即传输具有确定性。

2001 年 11 月,IDA(Interface for Distributed Au-

tomation)组织公布了它的第一份技术规范,IDA 为以太网建立了一个新的实时通信用户层,采用一种新的通信协议——实时发布/订购 RTPS(Real Time Publish/Subscribe)实现实时通信。RTPS 协议本身构建在 UDP 协议之上,RTPS 协议的实现则由一个 RTPS 中间件完成^[6],其结构如图 2 所示。

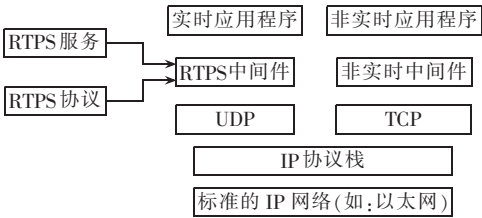


图 2 协议栈中的 RTPS
Fig.2 RTPS in protocol stack

3.2 RTPS 通信模型

Publish/Subscribe 结构模型是专为简化一对多的数据传输要求而设计的,可以处理十分复杂的数据流模式。在这种结构模型中,节点通过“Publish”发送数据,通过“Subscribe”接收所需要的数据,信息直接在多个节点之间传送。RTPS 通信模型是为了适应实时环境下应用,而在继承 Publish/Subscribe 模型优点的基础上进行了必要的扩展而来的^[7]。相对传统的发布订购模式,RTPS 提供了实时通信服务,如传送时间控制、可靠性控制、可变带宽控制、容错能力和效率控制等,可以在实时性和可靠性之间权衡。它定义了实时发布和实时订购的参数和特性,通过设置这些参数,RTPS 模型可以支持所有的数据流类型,开发者可以根据不同的数据流类型选择不同的属性参数以达到最好的性能要求。RTPS 现在已经在分布式系统中得到了广泛应用,具有 4 个鲜明的特点。

- a. 独特的声明和传输,发布方发表声明来发布一个 Publication,订购方声明对特定的 Publication 有无兴趣。因此,该模式支持多种数据流类型,数据流的控制管理较为容易。
- b. 命名发布,信息与设备地址无关。Publish/Subscribe 应用程序用命名的 Publication 传送数据。每个 Publication 由 Topic 和 Type 作唯一标志,Publication 无源地址位与目标地址位。要接收数据,Subscriber 仅需要识别 Topic 和 Type。任何设备的热插拔并不影响系统运行,配置改变时也不会导致数据流的中断。
- c. 支持多对多通信。Publish/Subscribe 模型用一对多的方式发送数据,但是,其本身的灵活性使得开发者能够轻而易举地用它实现复杂的多对多、多对一的应用。
- d. 事件驱动。Publish/Subscribe 模型本质上是事件驱动的,对发送者,当其准备好后就可以发送数据;对订购方来说,它将阻塞进程直到接收到数据。

4 变电站自动化系统采用 RTPS 模型通信

通过对变电站内通信网络中数据流的分析可知,变电站自动化系统具有多种复杂的数据流,各种数据流具有不同的属性,对实时性和可靠性的要求也不相同。利用 RTPS 通信模型不仅可以处理多种复杂的数据流,实现设备间直接通信,而且其连接简单、通信速度快、优先级控制以及可靠性保障等特性完全可以满足变电站自动化网络通信的需要。

4.1 报文传输确定性的实现

在变电站自动化系统中,存在多种类型报文,正确理解这些报文数据的属性十分关键,这些属性包括:数据多快能达到目的地,即实时性;数据能否到达,即可靠性。报文传输确定性即是要实现实时性和可靠性的最佳折衷。RTPS 为应用程序提供了一种机制,由应用程序自己在可靠性和实时性之间作出折衷的选择^[8]。Publish 输出端引入{TOPIC,TYPE,SEQ,V_SEQ,DUR} 5 个参数,即在输出数据流中插入数据流标示 TOPIC,标志数据类型 TYPE,数据序列号 SEQ,数据版本号 V_SEQ 及数据存活时间 DUR。Subscribe 输入端引入{TIMEOUT,MINISEPRATION,DEADLINE} 3 个参数和数据序列号校验功能,即在输入数据流中插入超时时间 TIMEOUT,不接收新数据的时间段 MINISEPARATION 及等待时间 DEADLINE。

通过设定 TOPIC 和 TYPE 参数,使 RTPS 结构具备支持多种数据流类型的特性,可以方便地将站内通信系统中的命令量、信息量、状态量、事件量等加以区分。每一个序列号 SEQ 赋予一个版本号 V_SEQ。SEQ 用于将发送的数据按序编号以检测其是否丢失或重复。V_SEQ 使用 SEQ 初始化时的系统时标定义,用于重新设定发送数据的 SEQ,例如当发送数据 SEQ 初始化时产生 V_SEQ,如果发布节点关闭后又重新启动时,SEQ 会重新设定,这时接收节点可能会误认为 SEQ 丢失,为了防止这种情况发生,为发送数据的 SEQ 加上 V_SEQ,用来表示开始了新一轮数据发送,SEQ 重新开始计数。

因为不同的数据流有不同的可靠性要求,所以发布节点可以通过 TYPE 参数设置所发布的数据是否需要可靠性检查,以保证数据的可靠性。TYPE 参数范围可分为两个部分,分别表示需要可靠性检查和不需要可靠性检查的数据,不同的数据选用不同 TYPE 来标识自己。接收节点通过 TYPE 参数判断所接收到的数据是否需要可靠性检查。如果需要,则检查数据的传输序号和序列版本号;否则,直接接收数据并进行处理。

MINISEPARATION 参数定义了一段时间,在这段时间内,不接收新的数据,这就防止了发送方发送

过快而导致的接收方缓冲区溢出的情况,当发送方和接收方的硬件配置有较大差别时就会出现这种现象,防止这种现象对系统的危害也就保证了既有的设备稳定性。

如果需要数据在某个确定的时间内到达,则可以用 DEADLINE 参数来处理,超过 DEADLINE 的数据将被丢弃或重传。这样就保证了保护和监控系统收到的采样数据的实时性,对于不断变化的电力系统状态信息(如瞬时电压、电流量等),过期的数据是无效的。

通过设置以上发布订购参数,允许系统根据不同的数据流类型选择不同的属性参数以达到最好的性能要求。当数据是要求更新频率很快的数据时,侧重于实时性要求;当数据是类似于遥控量这种可靠性要求很高的数据时,则要严格保证数据可靠性。

传输数据时,发送节点由事件触发后从数据集中收集所需要数据送往缓冲区,在数据流出口,为每个发布的数据添加序列号、版本号及存活时间等参数,然后通过缓冲区发布数据。当系统关闭后重新启动或者重新启动发送任务时,SEQ 应该设为 1, V_SEQ 应该用当前时标设定。每次传输,SEQ 自动加 1。计数器计满后,SEQ 重新置 1。

接收节点接收缓冲区的数据,如果发现所接收的数据存活期 DUR 已过,则丢弃该数据;如果发现数据的序列号错位,则认为网络传输中发生了数据包丢失,应立即根据丢失数据包的序列号通过服务向发送节点查询。发送节点收到接收节点的查询后,则知道网络传输中丢失了数据,于是发送节点查询发布缓冲区中所发数据包,如果查询数据包存在于发布缓冲区,则发送节点立刻重发该数据包,该过程如图 3 所示。

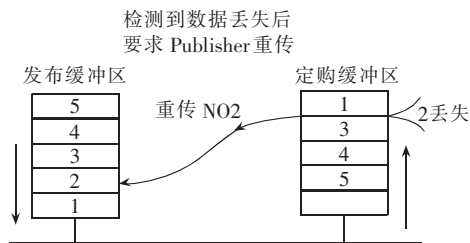


图 3 数据缓冲区工作原理

Fig.3 Working principle of data buffer

由于每个节点既作发布节点,又可作订购节点,所以每个节点都必须设置两个数据缓冲区,分别用作发送和接收。发送缓冲区用于存储发送的数据,对于没有可靠性要求的数据,发送后可以直接清除;对于有可靠性要求的数据,发送后需要在缓冲区内保留。因此,发送缓冲区可以设置大一点。接收缓冲区用于存储接收后准备处理的数据,由于每次接收的时候都需要根据优先级遍历查询,以确定数据处理

的先后顺序,因此可以设置得小一些以提高实时性。

此外,Publisher 在启动发布信息时应考虑以下 4 种情况:

- 当设备加电后进入操作运行状态,应向其他 Subscriber 通知其当前自身状态参数;
- 当某个状态发生改变,应启动发布通知相关设备;
- 当用户设置为周期性发布时,应按设定的周期间隔定期发布;
- 即使状态数据没有改变,也应定期发布信息,以确保最近激活的设备了解当前相关设备的状态值。

4.2 报文传输优先级实现

在变电站自动化系统中,对于不同的报文,根据其重要性,它们的优先级应该是不同的。Publish 输出端除了引入 TOPIC,TYPE 参数外,还引入参数 PRI,表示优先级,所有需要传送的数据可以由低到高分 1~7 个不同的优先级别,用来控制数据发送和接收的时间。缺省的情况下,数据优先级为 0,是最低的,在发送和接收时最后处理。对于发送方,在发送数据前需完成下面的任务。

- 发布节点根据要发送数据的实时性要求分配一个 1~7 范围内的优先级,然后将该数据传到输出缓冲区中,再发送数据。
- 如果发布节点没有对数据安排优先级控制,则将数据优先级 PRI 设为 0,然后发送数据。对于接收方,在接收到数据之后完成以下任务。
- 接收节点检查接收数据的优先级控制 PRI,如果优先级在 1~7 的范围内,则节点根据指定的优先级接收数据并传送给应用程序。
- 如果节点接收到优先级为 0 的数据,则使用最低的优先级处理。

图 4 表示了对于优先级别的处理方法,第 3 个到达发送缓冲区的数据的优先级别为 3,则其绕过排在前面的级别为“1”的 2 两组数据先行发送,优先处理。在接收缓冲区中情况类似,若在缓冲区内如果还有待处理的数据,则按优先级顺序排列,再进行处理。

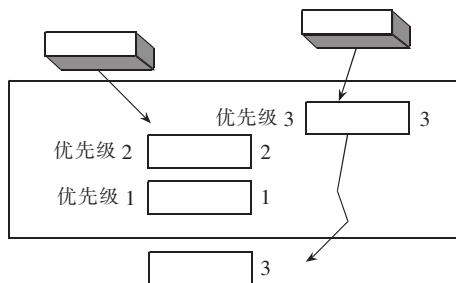


图 4 报文优先级处理办法

Fig.4 Solution to message priority

PRI 参数提供的机制在变电站自动化系统中非常有用。比如快速报文如保护命令触发,是变电站

自动化系统要求实时性能最高的报文。一旦该命令发出,其他所有数据自动被屏蔽,等候处理完该命令后,可以继续处理其他数据。在变电站中,对于某些可靠性要求比较高的节点,可以采用另外一个节点作为其备用节点的方式提高系统的可靠性。这两个节点可以发布相同类型的数据(TYPE 相同),但是备用节点的优先级比主节点的优先级低,并且每个节点采用 DUR 参数指定数据的有效时间。当节点接收到 TYPE 相同的数据时,如果已经存在一个高优先级的数据,并且处于 DUR 指定的有效时间内,则只处理优先级高的数据,丢弃优先级低的数据。如果主节点停止发送数据,则备用节点可以被正常接收,实现无缝转换,不中断系统运行。

5 结论

文章阐述了在分布式变电站自动化网络通信系统中,应用 RTPS 模型实现智能电子设备之间实时可靠及保证优先级的相互通信机制,克服了以太网应用在工业控制领域中的诸多弊病,为以太网应用在变电站自动化控制领域提供了一个解决方案,研究结果对于变电站自动化网络通信系统的设计具有参考价值,也为在工业自动化领域解决类似问题提供了有用的信息。文章所作的基于 RTPS 的以太网通信系统研究只是为实现新一代变电站自动化网络通信系统奠定基础,更重要的是要实现变电站自动化通信系统的开放性、互操作性和鲁棒性,这些都是变电站自动化网络通信系统发展的目标。

参考文献:

- [1] 孙军平,盛万兴,王孙安. 新一代变电站自动化网络通信系统研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3):16-19.
- SUN Jun-ping,SHENG Wan-xing,WANG Sun-an. Study on the new substation automation network communication system[J]. *Proceedings of the CSEE*,2003,23(3):16-19.
- [2] 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.
 - [3] IEC 61850,Communication networks and systems in substation:Part1~10[S].
 - [4] 谭文恕. 对变电站自动化系统通信网络的要求及通信网络标准化的动态[J]. 电网技术,1999,23(12):1-5.
 - TAN Wen-shu. Requirements of communication networks and trend of standardization for communication networks in substation automation system[J]. *Power System Technology*,1999,23(12):1-5.
 - [5] 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.
 - WU Zai-jun,HU Min-qiang,DU Yan-sen. Application of embedded ethernet to communication networks in substations[J]. *Power System Technology*,2003,27(1):71-75.
 - [6] 王威,缪学勤. 试论工业以太网实时通信技术[J]. 自动化仪表,2003,24(2):1-4.
 - WANG Wei,MIAO Xue-qin. Discussion on real time communication technology of industrial Ethernet[J]. *Process Automation Instrumentation*,2003,24(2):1-4.
 - [7] 唐惠玲. 基于以太网开放式监控系统的分析设计与实现[D]. 成都:西南交通大学,2003.
 - TANG Hui-ling. Analysis design and realization of Ethernet-based open supervisory control and data acquisition system[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2003.
 - [8] 王进. 高速铁路牵引供电调度仿真系统的牵引变电所仿真与实现[D]. 成都:西南交通大学,2004.
 - WANG Jin. The simulation and implementation in traction substation for high speed railway power supply dispatch system[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2004.
- (责任编辑:戴绪云)

作者简介:

沈宏涛(1979-),男,河北静海人,硕士研究生,研究方向为微机保护与变电站自动化(E-mail:hongtaosh@163.com);
 姜奇鹤(1977-),男,河北承德人,硕士研究生,研究方向为微机保护与变电站自动化;
 王初(1967-),男,四川成都人,副教授,研究方向为微机保护及自动化。

Research on substation automation network communication system based on RTPS

SHEN Hong-tao, LOU Qi-he, WANG Ren, LI Rui-fang
 (Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The configuration of substation automation system based on IEC61850 is introduced. The characteristics of data flow in communication system of distributed substation automation network and the requirements of industrial control for real-time performance and reliability of Ethernet are analyzed based on IEC61850. A scheme with RTPS (Real Time Publish/Subscribe) model is presented, based on which the key technologies for the realization of message transmission reliability and priority are researched. Some problems are put forward for further study.

Key words: substation automation; Ethernet; network communication; data flow; RTPS