

变电站自动化网络通信系统仿真

沈宏涛¹, 李瑞芳²

(1. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016;

2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 分析了分布式变电站自动化网络通信系统报文特点, 其报文可分为周期性、随机性和突发性 3 种类型数据, 确定实时性和可靠性是衡量报文准确传输的标准。提出将实时发布/订阅 (RTPS) 协议应用于变电站自动化网络通信系统中, 节点通过“Publish”发送数据, 通过“Subscribe”接收所需要的数据, 节点在实时传输和可靠传输间作出折衷选择。采用 OPNET Modeler 仿真软件, 创建基于 RTPS 的 16 节点的变电站自动化网络通信模型, 对周期性、随机性和突发性 3 种类型数据的仿真结果证明所提出的方案满足要求。

关键词: 变电站自动化; 报文; 网络通信; RTPS; 仿真

中图分类号: TM 73; TM 74

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)06-0114-04

通信网络的信息传输快速性、确定性和可靠性决定了变电站自动化系统的可用性^[1]。随着技术进步, 以太网应用于变电站自动化系统的过程总线和厂站总线已经成为新一代变电站自动化系统的发展趋势。但是, 以太网的介质访问控制采用带冲突检测的载波侦听多路访问 CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) 机制, 具有无法预见的延迟特性, 导致网络传输具有不确定性, 尤其当网络负荷过大时, 通信实时性能会极大降低, 直接影响以太网在现场设备中的应用^[2]。

目前, 在有关于网络通信实时可靠传输方面采用了大量新技术^[3], 这些通信新技术的采用, 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^[4], 而通信协议的执行策略及报文优先级处理仍然是影响着系统实时性和协调性的至关重要的因素。

近年来, 实时发布/订阅 RTPS (Real-Time Publish/Subscribe) 协议在分布式应用环境中的优势得到人们的关注。它的发展使之能够适应现代大规模数据量应用系统的要求^[5]。

1 变电站内报文分类

变电站自动化系统是一个典型的实时系统, 不同类型的数据, 在不同时期及不同运行方式下的数据都具有不同的传输响应速度和优先级的要求。IEC 61850 定义了 7 种类型报文, 即: 快速报文、中速报文、低速报文、原始数据报文、文件传输报文、时间同步报文和具有访问控制的命令报文^[6]。通过分析和研究, 从时域的角度, 可以把上述变电站自动化系统中 7 种类型的报文分为 3 种类型: 周期性数据、随机性数据和突发性数据^[7]。

a. 周期性数据: 周期性数据稳定、连续且变化量小, 原始数据报文属于周期性数据, 主要是过程层通过接口, 周期性地向间隔层传递过程采样数据。根据 IEC 61850 标准的规定, 对于不同性能级别, 该类数据传输一般要求在 3 ms 或 10 ms 内完成。

b. 随机性数据: 低速报文、文件传输报文、时间同步报文和具有访问控制的命令报文属于随机性数据, 这类通信一般符合泊松分布, 传送报文的数据量大, 但时间稍宽松。

c. 突发性数据: 快速报文、中速报文属于突发性数据, 报文数量少, 但时限要求高。

通过对站内数据报文的分析, 为适应不同实时性和可靠性要求, 系统要支持所有的数据报文类型, 这是由通信协议性能和协议实现机制决定的。

2 变电站自动化网络通信协议选择

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。长期以来, 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, 这就要求能够有一种新的通信协议或通信模型来解决这些问题。RTPS 通信协议的出现为解决这些问题提供了方便。在 Publish/Subscribe 结构中, 节点通过“Publish”发送数据, 通过“Subscribe”接收所需要的数据, 如图 1 所示。RTPS 具有如下特点^[8]: 独特的声明和传输、命名发布、支持多对多通信、事件驱动。

RTPS 为应用程序提供了一种机制, 由应用程序

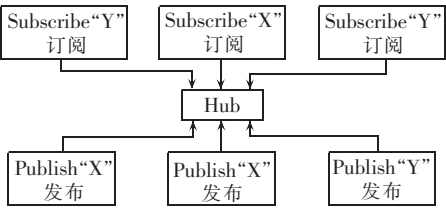


图1 实时发布/订阅结构
Fig.1 Structure of RTPS

在可靠性和实时性之间作出折衷选择^[9]。Publisher由事件(数据值改变、数据质量变化等)触发后从数据集中收集所需要的数据,然后通过输出缓冲区发布出去。在发布数据流输出端,引入{Topic, Type, Persistence, Strength}4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、数据存活时间 Persistence、数据优先权值 Strength。Subscribe输入端引入{Topic, Type, Miniseparation, Deadline}4个参数和数据序列号校验功能,即在输入数据流中插入订阅数据标识 Topic、标志数据类型 Type、不接收新数据的时间段 Miniseparation 及超时时间 Deadline。通过设置这些参数,能够很灵活地在实时性与可靠性之间作出选择。

3 仿真模型创建

基于工业以太网的变电站通信网络如从其节点数目、地理距离、传输速率等角度考察,可认为属于计算机局域网的范畴^[10],因此,只要合理地设置局域网的各种参数,对报文的到达、传输、离开等事件构成的过程仿真使之能够体现实际变电站通信网络情况,则采用计算机局域网的研究方法对变电站通信网络进行性能分析应是可行、合理的^[11]。

由前面讨论可知,变电站中所有数据流归纳为3类数据:周期性数据、随机性数据和突发性数据。对于不同类型的数据流,它们有不同的实时性和确定性方面的要求^[12]。因此,发送和接收数据时根据不同的数据类型进行不同的处理,如图2所示。

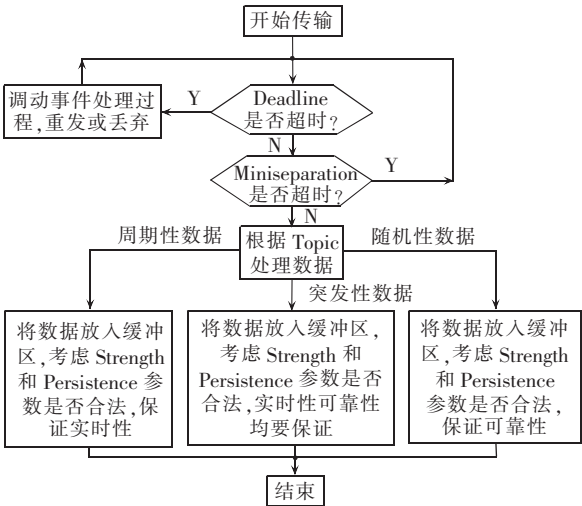


图2 网络模型处理过程
Fig.2 Data type processing of network model

使用MIL3公司的OPNET Modeler 仿真软件^[13],创建基于RTPS的变电站自动化通信模型,对16个节点设备相互通信的情况进行仿真,这16个设备节点将通过一个集线器Hub中心节点进行数据的发布和订阅。

最后创建的网络模型如图3所示。

拓扑结构包含2种类型节点模型,分别是周边设备节点和中心Hub节点。模型的目的就是仿真一个设备节点发布的包能够通过Hub节点路由至订阅该包的设备节点。

从表面上看,使用Hub的局域网在物理上是一个星形网,但由于集线器是使用电子器件模拟实际电缆线工作,因此,整个系统仍像传统的以太网运行。即该网络模型虽然使用了集线器,但是该网络在逻辑上仍是一个共享总线网,各节点仍共享逻辑上的总线,使用CSMA/CD协议。

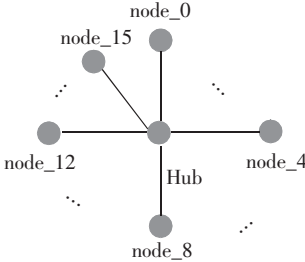


图3 网络模型
Fig.3 Network model

4 仿真结果及分析

就网络性能而言,网络通信延时直接反映了网络通信实时性能的好坏^[14],将分别模拟变电站通信网络中的周期性数据、随机性数据及突发性数据报文产生情况,对这些数据在网络传输时的通信延时进行仿真,从而对网络通信实时性能进行评估。

4.1 周期性数据传输仿真

周期性数据通常是过程层通过接口周期性向间隔层传递的过程采样电压、电流数据,实时性要求很高。该类数据的产生要保证在同一采样时刻,同时对所有模拟输入信号进行采样。只有保证对模拟输入信号采样的同时性,对微型机系统的算法才是有意义的^[15]。数据同步应该在过程层出口处完成,这样当采样数据从过程层传送到网络时,就应该是已经同步好的数据,因此,仿真只考虑网络传输性能问题,不必再考虑数据同步问题。该类数据在传输时设置网络传输速度10 Mbit/s,即采用标准以太网,包的大小为128 Byte,由于是周期性数据,故业务生成模块的包生成的时间间隔设置为服从0.02的常数分布,即业务生成模块每秒发送50个包,仿真时间200 s。数据包生成后,设置Type为8,代表该类数据为实时性要求很高的数据。发布数据时优先级都设置为同一优先级。仿真结果如图4所示(图

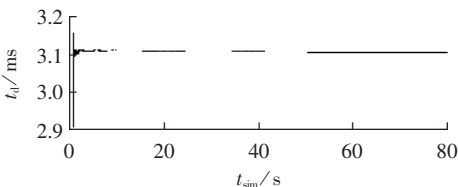


图4 周期性数据平均端到端延时
Fig.4 Average ETE delay of periodic data

中 t_d 为端对端延迟时间, t_{sim} 为仿真时间,下同)。

针对周期性电压、电流采样数据不采取可靠性检查措施,每次接收到数据后,都直接接收下一个数据,报文传输端对端延时比较小。

由图 4 可见,端对端通信延时随着仿真时间的增加先经历了一个短暂的振荡过程后逐渐收敛到一个平衡点。这说明网络是趋于稳定的。对电压、电流等实时性要求很高的数据,端对端通信延时最后稳定在大约 3.1 ms,即发布方发布数据后,订阅方可在 3.1 ms 后收到发布方发送的报文信息。按照 IEC 61850 规定的要求,对电压、电流采集数据等周期性原始数据报文延迟不能超过 4 ms,即报文端对端传输延迟的最大极限值为 4 ms。故仿真结果满足系统要求,也达到了国际标准。

4.2 随机性的数据传输仿真

在概率论中,泊松分布通常模拟随机过程发生的情况。变电站内命令下发时的数据属于随机性数据,可靠性要求很高,同时实时性要求稍宽松。故业务生成模块的包的产生设置为服从 $\lambda=0.5$ 的泊松分布,同时设置网络传输速度 10 Mbit/s,即采用标准以太网,包的大小为 128 Byte,仿真时间 1000 s。数据包生成后,设置 Topic 为 2,代表可靠性要求很高的数据。优先级都设置为同一优先级。仿真结果如图 5 所示。

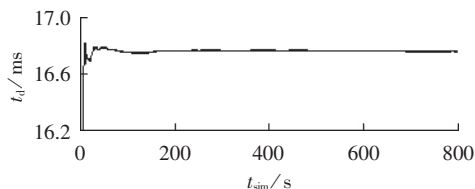


图 5 随机性数据平均端对端延迟

Fig.5 Average ETE delay of random data

针对命令报文数据传输过程中必须采取可靠性检查措施,每次接收到数据后,如果检查发现网络中发生报文丢失,则应由订购方向发布方发送重发数据请求,发布方收到请求后会重发丢失的数据,报文传输端对端延时比较大。

由图 5 可见,端对端通信延时随着仿真时间的增加先经历了一个短暂的振荡过程,然后逐渐收敛到一个平衡点。这说明网络是趋于稳定的。对命令量等可靠性要求很高的数据,端对端通信延时最后稳定在大约 16.75 ms,即发布方发布数据后,订阅方可在 16.75 ms 后收到发布方发送的报文信息。可见该类数据的传输既保证了可靠性,又保证了一定的时间性能,符合 IEC 61850 规定的要求,故仿真结果和理论分析结果相一致,满足系统要求,也达到了国际标准。

4.3 突发性的数据传输仿真

突发性数据通常指故障情况下的跳闸命令等二进制的编码数据,接收智能电子装置(IED)在正常情况下接收到该报文后,由接收该类型报文的相关

功能以某种方式立即响应。跳闸是变电站自动化系统要求实时性能最高的报文,因此,与其他快速报文相比,该报文具有较多需求,该类报文数量少,但是时限要求极高,绝对不允许报文因网络拥塞发不出去的情况发生。

设置网络传输速度 10 Mbit/s,即采用标准以太网,包的大小为 128 Byte,为了模拟故障发生时报文的产生,将在一系列正常传输的周期性采样数据包中插入一个数据包,该包的优先级设置为 7,即为最高优先级,周期性数据仍然设置成每秒发送 50 个包,仿真时间 200 s。周期性数据包生成后,设置 Type 为 8,代表该类数据为实时性要求很高的数据。插入的突发性数据包设置 Type 为 10,表示该类数据的时限要求极高。仿真结果如图 6 所示。

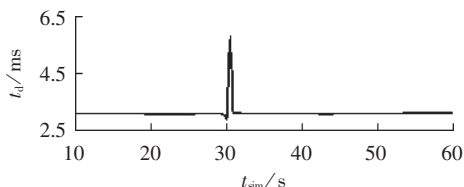


图 6 突发性数据平均端对端延迟

Fig.6 Average ETE delay of unplanned data

针对跳闸的突发性报文数据,不采取可靠性检查措施。跳闸报文在系统所有报文中是最高的,每次都优先发送,跳闸报文不会丢失。当跳闸报文发送后,原有的队列中排队数据再依次发送。当原来在网络排队队列中的数据发送完后,跳闸报文插队引入的延时影响结束。新进入排队队列的包就又按照原来的排队延时发送。故可预见,在端对端延时上必定存在一个尖峰。

由图 6 可见,端对端通信延时收敛,这说明网络是趋于稳定的。开始时延时约为 3.1 ms,这是周期性采样数据延时,此后延时出现尖峰,大约为 5.9 ms,这是由于跳闸报文插入而引起的原有网络报文排队延迟,可见跳闸报文的延时约为 2.8 ms,从图上可看出,跳闸报文引入时,延时曲线先向下有一个小的尖峰,大概到达 2.8 ms 后才又上升,正好对应跳闸报文延时情况。在经过短暂尖峰后,仿真延时重新回到 3.1 ms,表明跳闸报文过后,网络又继续传输周期性采样数据。按照 IEC 61850 规定的要求,对电压、电流采集数据等周期性原始数据报文延迟不能超过 4 ms,对跳闸报文延迟不能超过 4 ms,即报文端对端传输延迟的最大极限值为 4 ms。故仿真结果满足系统要求,也达到了国际标准。

5 结论

通过建立模型并仿真,RTPS 通信模型能够根据数据对实时性、确定性和可靠性的不同要求作出协调,能够实现实时确定传输和可靠传输的平衡,以使变电站通信网络具备最好的通信性能,同时证明 RTPS 通信模型能够很好地满足网络环境下的变电

站自动化系统的要求。可见,基于 RTPS 通信模型原理的通信网络是能够满足变电站通信对实时传输确定传输的网络要求的。

总之,针对分布式变电站自动化网络通信系统,利用网络仿真的方法,模拟了 RTPS 模型实现智能电子设备实时可靠相互通信机制,仿真结论对于验证 RTPS 的正确性及其应用于变电站通信的可能性、可行性具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 陈文升. 变电站自动化系统内部网络通信技术研究[D]. 北京:华北电力大学,2002.
CHEN Wen-sheng. Research on the technique of communication network in the substation automation system[D]. Beijing: North China Electric Power University,2002.
- [2] 傅钦翠. 变电站自动化系统的内部通信网[J]. 电气电子教学学报, 2004,26(5):63-65.
FU Qin - cui. Internal communication network in substation automation system[J]. Journal of EEE,2004,26(5):63-65.
- [3] 胡锦. 工业以太网与网络控制器[D]. 杭州:浙江大学,2004.
HU Jin. Industrial Ethernet and Ethernet controller[D]. Hang-zhou:Zhejiang University,2004.
- [4] 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.
- [5] 沈宏涛. 基于以太网的变电站自动化网络通信系统研究[D]. 成都:西南交通大学,2005.
SHEN Hong-tao. Research on the substation automation network communication system based on Ethernet[D]. Chengdu:South-west Jiaotong University,2005.
- [6] 徐立子. IEC 61850 对变电站自动化系统报文性能的要求[J]. 电网技术,2002,26(11):1-3.
XU Li - zi. Requirement of IEC 61850 to performance of messages for substation automation system[J]. Power System Technology,2002,26(11):1-3.
- [7] 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.
- [8] 刘贺锋. 基于 RTPS 的实时通讯中间件[D]. 成都:西南交通大学,2002.
LIU He - feng. Realtime communication middleware based on RTPS[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2002.
- [9] 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.
- [10] 谷米,贺仁睦. 变电站通信网络性能的仿真研究[J]. 电网技术, 2000,24(6):70-74.
GU Mi, HE Ren - mu. Simulation and research of performance of communication network in substation[J]. Power System Technology,2000,24(6):70-74.
- [11] 燕京,陈政,尹项根. 变电站信息网络传输仿真研究[J]. 电力自动化设备,2004,24(3):39-42.
YAN Jing, CHEN Zheng, YIN Xiang-gen. Research of information transmission simulation for substation network[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(3):39-42.
- [12] 冯冬芹,廖智军. 基于以太网的工业控制网络实时通信模型研究[J]. 仪器仪表学报,2003,24(4):715-718.
FENG Dong - qin, LIAO Zhi - jun. Study on real - time communication models for Ethernet - based industrial control network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2003,24 (4):715-718.
- [13] 陈敏. OPNET网络仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [14] 谢希仁. 计算机网络[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2002.
- [15] 丁文书,黄训诚,胡起雷. 变电站综合自动化原理及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2003.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

沈宏涛(1979-),男,白族,河北静海人,硕士,从事变电站自动化方面研究(E-mail:hongtaosh@163.com);

李瑞芳(1980-),女,山西原平人,讲师,博士研究生,从事变电站自动化及电气绝缘在线监测与故障诊断方面的研究。

Simulative research on substation automation network communication system

SHEN Hong-tao¹, LI Rui-fang²

(1. Sichuan Electric Power Designing and Consulting Co., Ltd., Chengdu 610016, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The characteristics of messages in distributed substation automation network communication system are analyzed, and the messages can be divided into periodic, stochastic and unplanned data. The real-time performance and reliability of message transmission are applied as the criteria of veracity evaluation and the RTPS (Real-Time Publish/Subscribe) protocol is proposed for substation automation network communication system. Nodes send data through "Publish" and receive demanded data through "Subscribe". Real-time performance and reliability are considered synthetically. A 16-node substation automation network communication model is established based on RTPS using OPNET Modeler simulation software. Simulation results for periodic, random and unplanned data communication are satisfying.

Key words: substation automation; message; network communication; RTPS; simulation