

基于 OPNET的变电站端对端通信实时性仿真研究

高会生,靳玮玮

(华北电力大学电子与通信工程系,河北 保定 071003)

摘要: 首先介绍了 OPNET网络仿真软件,在深入研究了变电站通信网络层次结构和通信数据流特点的基础上,利用 OPNET建立了间隔层保护测控单元与变电站层监控设备及工程师站之间的数据通信仿真模型,具体研究了变电站保护测控信号端对端传输时延。通过分析得出了影响端对端通信实时性的主要因素;验证了高层协议对通信实时性具有重大影响;得出了考虑高层协议影响的变电站端对端通信实时性仍能够满足小于4ms要求的结论。

关键词: 变电站自动化; 网络通信; OPNET; 网络仿真; 端对端时延

中图分类号: TP302; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)19-0033-05

0 引言

变电站通信网络是变电站自动化的重要组成部分,变电站通信网络的实时性是影响变电站自动化功能的重要因素。变电站通信网络对传输的各种报文有严格的时延要求。一般认为,在基于以太网的系统中,底层通信网络的实时性,特别是 MAC层协议的实时性,对通信网络的实时性能起关键作用,却往往忽略上层协议开销的影响。然而,底层网络的数据的实时传输只是为变电站通信网络的实时性奠定了基础,报文端对端的实时性才真正体现变电站通信的实时性能。以太网之上可以实现多种高层通信协议,为了保证系统的开放性和互操作性,变电站通信网络通常采用 TCP/IP协议栈作为网络层和传输层的协议。

国内外很多学者对变电站中以太网实时性进行了研究,文献[1~4]中对变电站底层通信网络以太网的报文传输实时性进行了不同程度的研究,但对高层协议影响下的报文端对端的实时性的研究都不够深入详细。

本文利用 OPNET对基于 TCP/IP协议栈和 Ethernet技术的变电站通信进行了动态的建模和仿真,研究了全面反映变电站通信实时性的报文端对端时延,通过分析仿真结果得出了重要结论,该研究对于变电站通信网络实时性的研究具有参考意义。

1 OPNET网络仿真软件介绍

变电站通信网络中存在许多高低压设备,在这些实际设备组成的网络环境中进行网络设计和性能

研究不仅危险而且耗资大,收集分析统计数据也存在一定困难。因此专用的网络仿真软件应运而生。OPNET网络仿真软件是目前业界公认的最优秀的通信网络、设施、协议的仿真及建模工具,提供灵活方便的建模环境,采用多种技术。

(1)采用基于离散事件驱动的仿真机制。事件是网络模型状态的变化或者某种决策。只有模型状态变化,模拟机才进行仿真,状态不发生变化的时间段,不进行仿真。仿真的时间是离散的,每当有一个事件出现后时间往前推进,也就是时间是跳跃前进的。通过离散事件驱动的仿真机制实现了在进程级描述通信的并发性和顺序性,再加上事件发生时刻的任意性,决定了可以仿真计算机和通信网络中的任何情况下的网络状态和行为。

(2)采用基于事件列表的调度机制。合理安排 OPNET调度事件,以便执行合理的进程来仿真网络系统的行为。调度的完成通过仿真软件的仿真核和仿真工具模块以及模型模块来实现。

(3)采用基于包的通信机制。通过仿真包在仿真模型中的传递来模拟实际物理网络中数据包的流动和节点设备内部的处理过程。在建模中,可以根据需要生成、编辑各种格式的数据包。

(4)采用层次化建模技术。计算机和通信网络一般包括3个方面的模型:网络拓扑,节点内部结构和通信行为。OPNET提供了多种编辑器,如网络编辑器、节点编辑器、进程编辑器等帮助用户分别完成上述3个方面模型,分别实现为网络模型、节点模型和进程模型。

2 变电站通信网络层次结构和通信数据流分析

变电站通信网络和系统国际标准 IEC61850 中明确规定:按照变电站自动化系统所要完成的功能将变电站系统划分为三层,变电站层,间隔层和过程层;将变电站通信网络划分为站级总线和过程总线两个层次。目前,现有的变电站自动化系统还没有真正实现过程层的自动化,间隔层与过程层设备之间的通信仍然使用传统的二次电缆连接,影响变电站通信网络实时性能的数据流主要是变电站间隔层设备与变电站层设备之间的数据传输^[1]。标准中规定的变电站通信网络层次结构如图 1 所示。

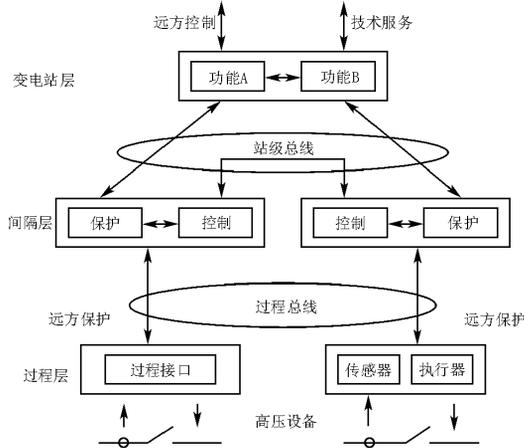


图 1 变电站通信网络层次结构

Fig 1 Hierarchical structure of communication network in substation

变电站内的数据流有多种,IEC61850根据报文特性将其分成 7 类: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。从时域的角度可将这 7 种类型的报文分成 3 种通信数据^[2]:周期性数据、随机性数据和突发性数据。

(1)周期性数据主要包括正常运行时,间隔层智能电子设备按一定周期定时向变电站层设备发送的开关状态信息和模拟量数据,这类数据数据量大,变化量小,相对稳定,时间要求严格。

(2)随机性数据主要包括开关操作命令、时间同步等数据长度较短,实时性要求较高的报文和保护定值修改、录波数据传输等数据长度较长,但传输实时性要求较低的报文。

(3)突发性数据包括故障情况下间隔层设备上转的保护动作、开关变位等信息,报文数量大,实时

性要求高。

3 端对端报文时延分析

变电站通信网络中一个报文的完整传输除了包括链路传输时间还包括源节点和目的节点必要的处理。时间计时从源节点的应用程序把数据内容置于其传输栈顶时刻开始,直到目的节点应用程序从其传输栈中取走数据时结束,报文端对端传递时延 T 主要包括源节点通信处理时延 t_a 、链路传输时延 t_r 和目的节点通信处理时延 t_b ,即:

$T = t_a + t_r + t_b$,如图 2 所示:

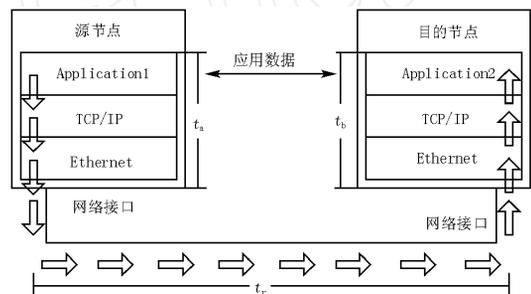


图 2 端对端报文传递时延

Fig 2 ETE delay of message

本文主要研究的是在以太网之上采用 TCP/IP 协议栈作为网络层和传输层协议的变电站自动化系统的通信网络,在此主要针对该网络系统分析报文的端对端时延。

(1)源节点通信处理时延 t_a :定义为从源节点应用程序送出应用数据到报文到达源节点网络接口开始排队等待传输所经历的时间,主要包括 TCP/IP 协议栈添加协议首部进行协议封装所消耗的时间。

(2)目的节点通信处理时延 t_b :定义为从目的结点的网络接口开始接收报文到应用数据到达应用程序进行处理所经历的时间,主要包括 TCP/IP 协议栈对接收的报文去除首部进行协议拆封所消耗的时间。

(3)链路传输时延 t_r :定义为从报文到达源节点的网络接口到最终到达目的结点的网络接口所经历的全部时间,即与底层网络 Ethernet 通信实时性相关的时延。主要包括排队时延 t_q 、传输时延 t_t 和传播时延 t_p 。排队时延是指从排队开始到获得传输所经历的时间;传输时延是指源节点在 Ethernet 链路上开始发送报文的第一个比特到发送完报文的最后一个比特所经历的时间,大小取决于报文的长度 L (byte)和数据传输速率 V (bit/s),则传输时延值为 $8L/V$;传播时延是指源节点在 Ethernet 链路上

发送第一个比特到目的结点接收到该比特所经历的时间,大小取决于传输距离 d (m)和传播速度 v (m/s),则传播时延值为 d/v 。

4 基于 OPNET的变电站报文端对端实时性建模仿真

4.1 仿真内容和仿真目标的确立

为了得出可靠的有实际意义的仿真结果,本文以中等规模的变电站为模型,对变电站层监控设备,工程师站和间隔层保护测控单元之间的通信情况进行建模仿真,具体对过程总线保护测控数据的端对端传输实时性进行研究。

建模仿真的目的在于通过分析对比不同配置下的仿真结果,得出影响网络时延的多种主要因素,证明高层协议对通信时延具有重大影响,验证在考虑高层协议影响的情况下,变电站端对端传输时延仍能够满足小于 4 ms 的实时性要求。

4.2 系统模型建立和仿真条件设定

基于上述仿真目的,这里只建模变电站内部的通信网络,而不考虑站级设备与远动主站之间的通信。建模涉及到的主要设备有变电站层的本地监控和工程师站,间隔层的保护测控单元,交换机和传输设备。节点模型实现数据包的发送和接收,本文直接应用 OPNET 中的 ethemet_wkstn 模型来模拟间隔层保护测控单元和变电站层的监控设备,它支持各种数据包的发送和接收,并可支持 Video Conferencing 服务来仿真间隔层和变电站层的周期性和随机性数据流;应用 ethemet_server 模型来仿真变电站层的工程师站,可支持 File Transfer 服务来接收间隔层设备上传的突发性数据流。这两个模型都能够很好地模拟 ethemet 之上的 TCP/IP 协议栈,符合本文建模仿真的要求。

设定要建模的变电站包含 4 个间隔,每个间隔包含 2~3 个保护测控单元,各个间隔中的设备周期性地向变电站层本地监控设备及工程师站传送开关状态信息和模拟量数据;考虑最坏情况下的通信,有间隔层保护测控单元发送故障情况下的突发性数据到工程师站;变电站层监控设备发送开关操作命令、保护定值修改等随机性数据到间隔层的保护测控单元;不考虑各个间隔之间存在数据交换和通信。

设定最坏情况下的总线负载为仿真条件;进行应用及网络参数配置;考虑实际情况,设定 3 种类型的通信数据流的参数如下:

(1) 周期性数据流

Incoming Stream Interarrival Time (seconds): constant (0.025)

Outgoing Stream Interarrival Time (seconds): constant (0.025)

Incoming Stream Frame Size (bytes): constant(800)

Outgoing Stream Frame Size (bytes): constant(800)

(2) 随机性数据流

Incoming Stream Interarrival Time (seconds): poisson (0.1) / poisson (0.2)

Outgoing Stream Interarrival Time (seconds): poisson (0.1) / poisson (0.2)

Incoming Stream Frame Size (bytes): constant (64) / constant(256)

Outgoing Stream Frame Size (bytes): constant (64) / constant(256)

(3) 突发性数据流

Command Mix (Get/Total): 50%

Inter-request Time (seconds): constant(100)

File Size (bytes): constant(1024)

4.3 仿真结果及分析

上述仿真条件和参数配置下,最坏情况下的总线负载为 2.22 Mbit/s,略大于 IEC61850 标准中规定的 2.07 Mbit/s^[5] 的中等规模的变电站总线负载要求,可认为仿真条件和参数配置与实际情况基本相符,仿真结果具有实际意义。

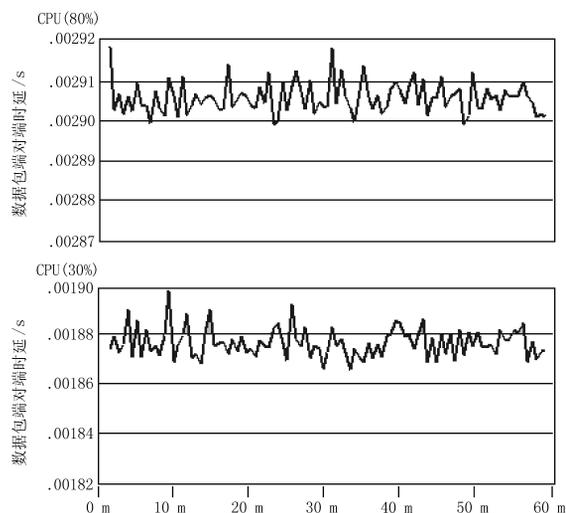


图 3 不同 CPU 背景利用率下的报文端对端时延

Fig 3 ETE delay of message in different CPU background utilization

通过观察分析仿真结果,得出影响报文端对端时延的因素有很多,产生比较大影响的主要包括:设备传送报文的频率和大小,CPU 背景利用率,高层通信协议,网络带宽和每个设备的处理能力,其中前

两项易于理解,后两项文献[6]中已有说明,本文只针对剩余两项进行定量分析。

图3为其他影响因素固定,站级设备CPU背景利用率不同的情况下的报文端对端时延比较图。图中上方的曲线是站级设备CPU背景利用率为80%时的仿真结果,下方曲线是背景利用率为30%的仿真结果,两个曲线进行比较可知,随着CPU背景利用率的增大,报文端对端时延有明显增大的趋势。由此可得出,时延随CPU背景利用率的升高而降低,且影响幅度大,是影响网络实时性的关键因素,实际设置中应合理配置。

图4为以太网链路时延和报文端对端时延的比较图,由图可见,报文端对端时延比以太网链路本身的时延高0.2ms,这一数值与协议栈的高层协议TCP/IP的封装和拆封的开销有很大关系,同时也受上述各种因素的影响,差值是非零不定值,验证了高层通信协议的性能也是影响报文端对端实时性至关重要的因素。为了满足变电站通信网络的时间限制要求和保证系统的开放性,在进行实际配置时应选择适合仿真系统的高层网络协议,同时还要综合考虑其他各种影响因素。

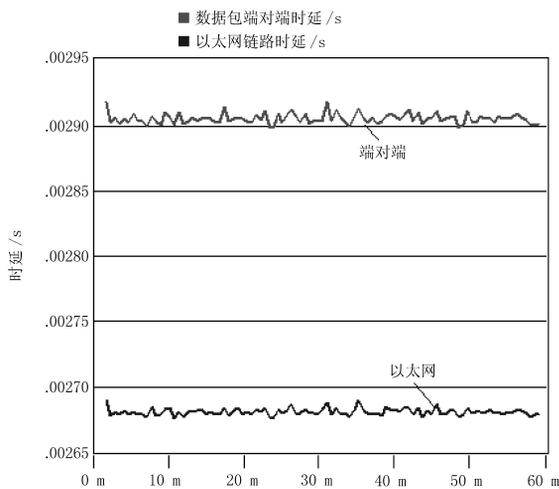


图4 以太网时延与报文端对端时延比较

Fig 4 Comparison of ethernet delay and ETE delay of message

图5为上述网络仿真参数和仿真条件下变电站报文端对端通信时延的仿真结果图,图中带尖峰的实际端对端时延,较平滑的虚线为平均端对端时延。由图可见,仿真时延在3.05ms上下波动,其中有一些离散的最大值,代表出现大量突发数据(FTP服务)的情况下报文端对端的时延,最大值远小于3.08ms。由此得出,合理配置各项参数,得出

了考虑高层协议影响的变电站端对端通信实时性仍能够满足小于4ms的要求。

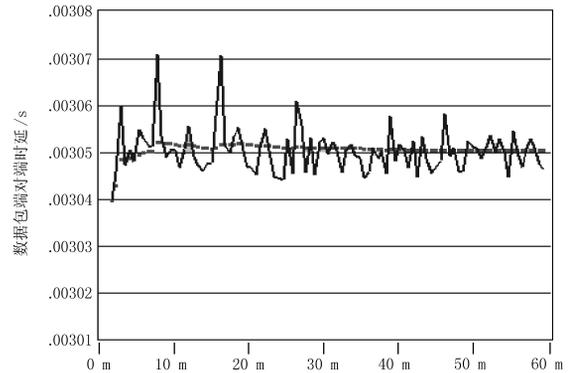


图5 报文端对端时延

Fig 5 ETE delay of message

5 结论

本文介绍了OPNET网络仿真软件,在深入研究了变电站通信网络层次结构和通信数据流特点的基础上,利用OPNET建模仿真了变电站间隔层保护测控单元与变电站层监控设备和工程师站之间的通信,具体研究了变电站保护测控信号端对端传输时延,通过分析得出了影响端对端时延的主要因素,验证了高层协议对通信实时性具有重大影响,得出了在考虑高层协议影响的情况下,合理配置各项参数,变电站端对端通信时延完全能够满足4ms的实时性要求。

参考文献:

- [1] 吴在军,胡敏强,杜炎森. 变电站通信网络实时性能仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 45-49.
WUN Zai-jun, HU Min-qiang, DU Yan-sen Analysis of Realtime Performance of Communication Network in Substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 45-49.
- [2] 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 Substation Automation Network Communication System[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 16-19.
- [3] Tengdin J T, Simon M S, Sufana C R. LAN Congestion Scenario and Performance Evaluation[A]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting New York: 1999. 919-924.

- [4] Skeie T, Johannessen S, Brunner C. Ethernet in Substation Automation [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2002, 22(3): 43-51.
- [5] IEC 61850 Communication Networks and System in Substations[Z]. 2002
- [6] 韩小涛, 聂一雄, 尹项根. 基于 OPNET的变电站二次回路通信系统仿真研究 [J]. 电网技术, 2005, 29(6): 67-77.
HAN Xiao-tao, NIE Yi-xiong, YIN Xiang-gen Research on Substation Secondary Circuit Communication System Using OPNET Simulator [J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 67-77.
- [7] Electrical Power Research Institute (EPRI). UCA2.0 Standard Document, Part II[Z].
- [8] Haude J A. Pilot Project for Testing the Standard Drafts for Open Communication in Substations - first Experiences With the Future Standard IEC61850 [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 5(2): 79-90

收稿日期: 2006-03-09; 修回日期: 2006-04-04

作者简介:

高会生 (1963 -), 男, 教授, 硕士生导师, 华北电力大学, 电子与通信工程系, 研究方向为电力系统通信及网络管理系统;

靳玮玮 (1981 -), 女, 在读硕士研究生, 研究方向为通信与信息系统; E-mail: ncepu_jww@yahoo.com.

Research on end-to-end delay for substation communication based on OPNET simulator

GAO Hui-sheng, JIN Wei-wei

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Firstly, the simulation software OPNET is introduced. On the basis of deeply studying the structure of the communication network and characteristics of data flow in the substation, the data communication simulation model between protection and supervision units in interval layer and supervision equipments along with engineer stations in station level is built up by using OPNET, then the end-to-end delay of protection and supervision signal in the substation is studied particularly. The main factors that influence the end-to-end delay is deduced, and it is proved that protocols of higher layer have important influence on the real-time communication, then it presents that considering the influence of protocols of higher layer the communication end-to-end delay is still less than 4ms.

Key words: substation automation; network communication; OPNET; network simulation; end-to-end delay

(上接第 25 页 continued from page 25)

收稿日期: 2005-10-10; 修回日期: 2006-01-16

作者简介:

廖青华 (1978 -), 女, 硕士, 研究方向为电力系统分析

与计算; E-mail: lqh2004nn@163.com

杨捷 (1976 -), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为电力系统规划与保护;

徐涛 (1968 -), 男, 硕士, 研究方向为电力系统分析与计算。

Characteristic analysis for critical voltage collapse based on alternating current circuit

LIAO Qing-hua¹, YANG Jie¹, XU Tao²

(1. Henan Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang 453002, China;

2. School of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: To solve the problem of voltage collapse in power system, this paper analyzes voltage stability problem by more visualized method based on a single circuit model and the critical voltage collapse running point of alternating current circuit. The geometric analysis method is employed to solve equations set of alternating current circuit. The current-voltage characteristic of the critical voltage collapse power flow of different running point is obtained. By analyzing the load characteristic and voltage characteristic of the alternating current circuit with zero resistance, it divides the running zone and the collapse zone of alternating current circuit. Research shows that within the running zone of power system, the power transmitting characteristic of alternating current circuit must be consistent with the load power characteristic.

Key words: power system; critical point of voltage collapse; running zone; collapse zone