维普资讯 http://www.cqvip.com

数字化变电站通信网络的传输时延不确定性分析

辛建波[1]， 蔡子亮[2]

（1.江西省电力科学研究院，江西 南昌 330006； 2.许昌学院电气信息工程学院， 河南 许昌 461000）

摘要：针对数字化变电站通信网络传输时延不确定性问题尚存在争议，采用网络仿真方法，定量分析了数字化变电站通信网络的传输时延不确定性问题。探讨了引起网络传输时延不确定性的诸多因素；分析了测量、数学分析和仿真三种网络传输时延分析方法的技术特点；采用OPNET网络仿真软件，仿真分析了网络端节点的处理能力、网络流量和端节点处的流量等达到某一数值时，网络传输时延展现出的不确定性行为，并提出了基于IEEE 802.1p/Q的优先级标签、虚拟局域网，组播过滤和自适应数字滤波技术提高数字化变电站通信网络传输时延确定性的四种方案。

关键词：数字化变电站； 通信网络； 时延不确定性； 网络仿真； 分析； 处理

Study on the delay-non-determinism of communication network of digital substation

XIN Jian-bo[1], CAI Zi-liang[2]

（1.Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China; 2.Xuchang College,Xuchang 461000,China）

Abstract: Considering that it is argued that communication network of digital substation exists delay-non-deterministic problem, this paper makes study quantitatively on the delay-non-deterministic problem based on network simulator software. Firstly, in the aspect of delay-non-determinism analysis, several factors that bring about the problem of delay-non-determinism are discussed in this paper, the technical features of the methods for network transmission delay analysis in common use are analyzed, including testing, simulating and queuing theory(analytically). Secondly, the delay-non-determinism dynamic behavior is focused on applying OPNET network simulator software when different factors are out of the certain value, such as the processing capability of the end-node, the traffic of network and end-node location. Finally, in the aspect of delay-non-determinism process, several schemes of the packet prioritization based on IEEE 802.1p, the virtual LAN based on IEEE 802.1Q, dynamic multicast filtering technique and the adapting digital filter algorithm for improving the precision of the sample measure value inside end-nodes are proposed.

Key words: digital substation; communication network; delay-non-determinism; network simulation; analysis; process

中图分类号： TM73 文献标识码： A 文章编号： 1003-4897(2007)05-0045-05

0 引言

随着以太网技术的发展、电子式互感器、智能一次设备以及IEC 61850标准的制定，为数字化变电站的实现提供了可能。由于数字化变电站具有数据共享、信息全面、安装、运行、维护、升级方便、底层数据格式相同，设备成本低，便于提供先进的应用功能等优点，国家电网公司制定了未来5年内研究和推广数字化变电站技术的实施方案，先后有20多个网、省电力公司申报了数字化变电站示范工程项目，江西省电力公司也计划将董家窑220 kV变电站建设成智能数字化变电站。这表明数字化变电站的实施已推进到一个新的实用的层面。

但是，数字化变电站技术还不成熟，需要不断在实践中完善。为此，有必要在项目实施前，对数字化变电站建设中的相关问题进行认真研究，如：建设定位、其它设备的接入方式、通信网络的拓扑结构、通信网络的时延不确定性、装置参数化文件的统一配置等。其中，时延不确定性对数字化变电站通信的影响最为严重，2003年的美加大停电便是例证。2003年美加8·14大停电的重要原因之一[1]就是：电网故障情况下，大量信息的涌入使第一能源公司（FE）变电站端RTU出现排队和缓冲区溢出，导致大量报文丢失，使中西部调度中心（MISO）EMS的状态估计功能故障，最后导致AGC等控制系统无法正常工作。这还只是由于突发的EMS数据对控制系统造成的影响，当通过以太网接入更多故障录波、动态监测、在线监测等信息时，

维普资讯 http://www.cqvip.com

如果控制方法不当，将更容易危害控制系统的运行。

为此，本文主要对数字化变电站通信网络的传输时延不确定性展开研究。由于时延不确定性问题涉及诸多因素，目前研究正在进行，还没有一致性的结论。不少学者认为只要选择交换式以太网作为数字化变电站的内部通信网络，其网络传输时延是有保证的[2~4]，其理由是：网络各节点之间通过交换机可实现逻辑上的点对点通信，信道冲突可以避免。另一种观点则认为虽然采用交换式以太网可以避免信道冲突，提高了通信时延的确定性，但是，交换式以太网中仍存在端口竞争，并没有彻底消除碰撞和排队等现象[5~7]。

引发以上争论的最根本原因是：人们对数字化变电站通信网络传输的时延不确定性的机理还不够了解。现有研究大多只是定性分析了时延不确定性问题，没有对该问题进行定量分析。因此，有必要在实际应用前对时延不确定性进行定量研究。

1 时延不确定性的定义及其产生原因

1.1 时延不确定性的定义

时延不确定性是指不能保证报文在可预测的时间内可靠传输。本文中的时延是指端到端时延，即发送节点的应用程序发送报文的时刻起至该报文被接收节点的应用程序接收到的这段时间。由于报文丢失相当于时延为无穷大，本文将报文丢失也称为时延不确定性。

1.2 影响网络传输时延不确定的因素

通信网络报文传输过程的实质是由发送节点的某功能产生发送报文，经过各层协议的封装解析并通过网络到达接收节点的某功能，网络时延就是在这个过程中产生的。在普通办公自动化领域，一般只保证传输可靠性即可，通常不要求严格控制时延。而在变电站自动化领域则不然，报文的成功发送不仅取决于收到报文的完整性，更取决于收到报文的时间。变电站内的以太网必须满足数字化变电站中最苛刻应用（例如 GOOSE、采样值等报文传输）提出的时延确定性要求，即报文在以太网上传输时应有可预测的、确定的时延，在系统运行的任何期间都必须满足此要求。但是，传统以太网技术一直被视为不确定性的网络，难以满足数字化变电站中最苛刻应用的时延确定性的要求。

WEB 技术的应用推动了交换式以太网技术的发展，使得采用交换技术构建可预测的实时以太网成为可能。需要指出的是，尽管采用交换技术在一定程度上提高了以太网通信的时延确定性，但是并不能满足数字化变电站中最苛刻应用的要求[8]，特别是在电网故障或系统规模扩大时，若对网络中某一资源（如缓冲区、带宽、处理能力）的需求超过了该资源所能提供的可用部分，将出现报文超时到达，甚至报文丢失，不能保证时延的确定性。具体表现在以下几个方面：

（1） 由于数字化变电站通信网络中存在多种类型信息源，不可避免地存在信息的碰撞、重发等现象，这就导致信息传输时延不确定。

（2） 网络中每个交换机或路由器都有输入和输出缓冲区，若报文到达的速率接近或超过报文处理和转发的速率，报文就会在缓冲区堆积，出现排队现象，这时报文会经历很大的时延，特别是当缓冲区溢出时，会导致报文丢失。

（3） 时延不确定性问题不仅与网络的链路容量（带宽）、交换机的缓冲区有关，而且与接入网络的 IED 的处理能力密切相关。

（4） 当前网络正朝着高速化的方向发展，更容易出现 IED 的处理能力不够高、缓冲区不够大而造成报文的丢失。

根据以上分析可知，引起传输时延不确定的因素主要为：端节点CPU的利用率（与端节点CPU的处理能力和端节点操作系统性能有关）；端节点处的通信流量（到达率、报文大小）；网络负载。

2 基于 OPNET 的通信网络仿真研究

2.1 概述

网络传输时延分析方法主要有测量、数学分析和仿真三种[8]。由于数字化变电站中的网络需要承载多种综合信息，具有高度复杂性和不确定性，采用网络仿真方法定量分析数字化变电站通信网络的传输时延不确定性问题是一种比较可行的方法。

目前商用网络仿真软件主要有 MIL3 公司的 OPNET、CACI 公司的 COMNET III；科研用软件主要有 UC Berkeley NS-2[9]。COMNET 采用数学分析的建模方法，仿真效率很高，但是无法得到有关网络和协议的详细结果，因此 COMNET 适用于网络高层性能的仿真。OPNET 综合采用基于包和数学分析的建模方法，既可得到非常详细的模拟结果，也可获得较快的仿真计算速度。而 UC Berkeley NS-2 适用于 TCP 层次上的网络模型。经过比较分析，本文采用 OPNET 网络仿真软件[10]进行研究。

维普资讯 http://www.cqvip.com

2.2　基于 OPNET 仿真软件进行建模和仿真

采用OPNET进行网络仿真主要分为需求分析、定义输入/输出、系统建模、设置运行参数/仿真和分析五步。

（1）需求分析

对仿真对象进行全面的认识和了解，有选择地确定仿真内容，例如，通信系统要实现的通信服务功能、采用的传输模式、系统规模以及可能出现的瓶颈等方面进行需求调研和分析。

（2）定义输入/输出

数据定义有两种：输入（模型运行参数）定义和输出（测试参数）定义。其中模型运行参数包括交换机背板速率、交换机端口速率、IP 地址信息、IP 转发速率等。测试参数是指与仿真结果相关的数据，包括在模型中设置的采集点，取样变量（例如端到端时延、链路利用率、服务器利用率等），仿真输出格式等。

（3）系统建模

系统建模采用建模工具和程序语言描述系统中各种仿真对象的模型。在 OPNET 中，系统建模主要由网络建模编辑器、节点建模编辑器和进程建模编辑器完成。其中，网络建模编辑器用于建立网络节点和功能服务的拓扑连接关系；节点建模编辑器用于建立进程、队列、传输/接收等功能模型间的逻辑连接；进程建模编辑器用于建立节点内的进程和队列模型。

（4）设置运行参数/仿真

在仿真模型建立好之后，通过仿真程序外部接口设置运行参数，运行仿真程序。

（5）分析

对仿真结果进行系统的分析、比较，得出与预期的偏差，重新对仿真对象进行描述，再进行仿真分析，直至得到真实、可信的结果。

3　数字化变电站通信网络仿真研究

3.1 仿真案例

变电站的种类很多，即使是同种类型的变电站，保护和控制设备的配置也不尽相同，因此需要针对具体的变电站工程进行独立的仿真分析。本文以由八个馈线间隔和两个变压器间隔组成的一个全数字化变电站为例，八个馈线间隔、两个变压器间隔和变电站层设备（母线保护、工程管理和站控单元）采用 100 Mbit/s 以太网交换机实现信息共享，网络拓扑结构如图 1 所示。

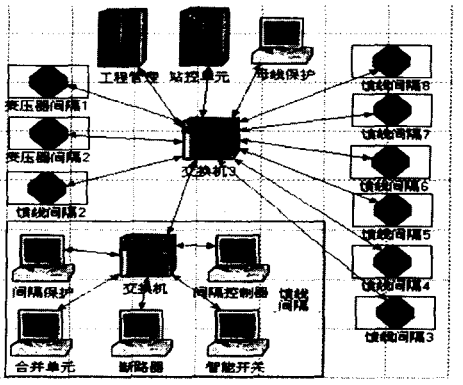


图 1　网络拓扑结构图

Fig.1 Network topology structure

每个间隔由以下IED构成：1个合并单元，2个控制器（如间隔控制器和间隔保护），2个执行器（如断路器和智能开关）。合并单元按照预设采样率，将一个间隔内的12路模拟电流和电压量，经采样、A/D转换为数字量，然后周期性地将数字采样测量值按IEC 61850-9-2的帧格式打包传送给控制器，由控制器内的控制策略判断后决定是否保护动作，若需动作则发送跳闸命令给执行器。

假定合并单元采样率为1400 Hz，报文长度为123字节；控制器向执行器发送命令的频率为250 Hz，报文长度为16字节；控制器之间的数据交换频率为10 Hz，报文大小为32字节；工程管理工作站与每个IED之间的突发数据文件传输（如维护、配置文件上/下载），文件传输的次数各不相同，文件的大小为1M字节。

为了避免“空采样”（即合并单元产生的旧数据在发送出去之前被新数据覆盖）的发生，端到端时延 T_{ETE}（从合并单元发送数据开始，到执行器收到跳闸命令，总共经历的时延）应小于合并单元数据的采样周期，仿真案例中 $T_{ETE} < 714\ \mu s$。

由于变电站层的母线保护与多个间隔的合并单元和断路器之间都有信息交换，信息流分布呈现集聚的特点，大量信息汇集到变电站层的母线保护，使合并单元与母线保护、母线保护与断路器之间的链路成为网络的重负载链路。因此，将着重研究报文从合并单元至母线保护再到断路器总共经历的时延。假设仿真时间为150 s，在90 s时开始传输突发流量，持续时间为5 s。

3.2 仿真结果

根据上节的通信流量模型进行仿真，可以得到不同因素（端节点 CPU 的利用率、端节点处流量、

维普资讯 http://www.cqvip.com

网络负载）下报文传输时延曲线对比，如图 2 所示。

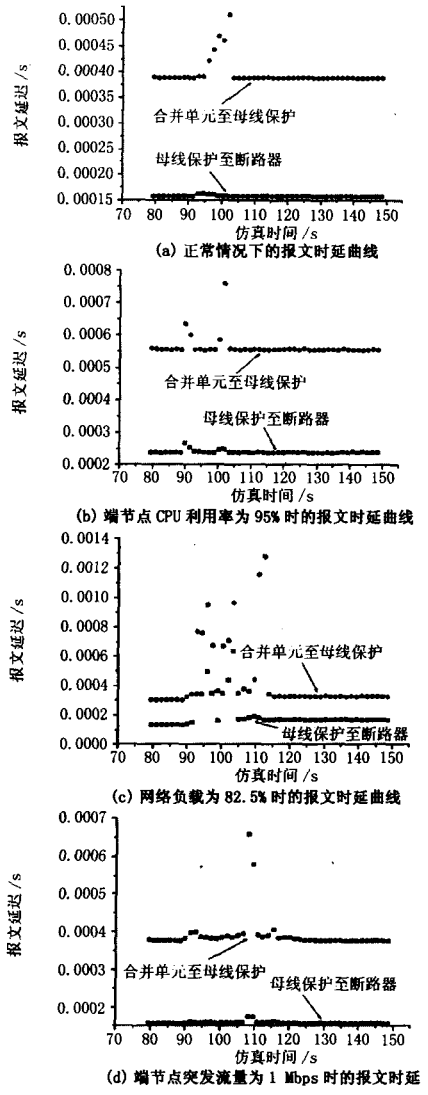


图 2 不同因素下的报文传输时延比较

Fig.2 Comparison of communication delay on different status

图 2(a)为网络轻载(6.5%)、端节点 CPU 利用率较低(26%)、端节点处突发通信流量较小(350 kbit/s)的情况下的时延曲线。由图可见，正常的报文传输时延为 492 μs，492 μs =合并单元至母线保护的时延(341 μs)+母线保护至断路器的时延(151 μs)，在出现突发通信流量的情况下报文时延增加到 672 μs，672 μs =合并单元至母线保护的时延(509 μs)+母线保护至断路器的时延(163 μs)，仍不超过时延上界 714 μs，可满足报文传输时延确定性要求。

图 2(b)为端节点 CPU 利用率较高(96%)、网络轻载(6.5%)、端节点处突发通信流量较小(350 kbit/s)的情况下的时延曲线。由图可见，在端节点 CPU 利用率较高时，正常的报文传输时延增加(794 μs)，并且在出现突发通信流量的情况下时延大幅度增加(102 6 μs)，已经超过时延上界 714 μs，不能满足时延确定性的要求。这主要是由于 CPU 繁忙时（例如，频繁的磁盘读写操作耗费 CPU 大量时间），操作系统的中断处理能力下降，接收端接收报文的中断请求无法获得高优先级，使操作系统的中断响应时间增加；另一方面，通信处理任务被就绪任务队列中的高优先级任务延迟，通信处理任务的排队时延增加，导致时延出现较大幅度增加。以上表明，端节点 CPU 利用率大小对时延不确定性有显著影响。

图 2 (c)为网络重载(82.5%)、CPU 利用率较低(26%)、端节点处突发通信流量较轻(350 kbit/s)的情况下的时延曲线。由图可见，在网络重载情况下，正常的报文时延增加(545 μs)，并且在出现突发通信流量的情况下时延大幅度增加(1903 μs)，已经超过时延上界 714 μs，不能满足时延确定性的要求。这主要是由于网络负载过大时，报文在交换机队列中积压，使报文在队列中等待服务的时间增大，导致时延剧增，成为影响报文传输时延不确定性的重要因素。

图2(d)为端节点处突发通信流量较大(1 Mbit/s)、网络轻载(6.5%)、CPU 利用率较低(26%)的情况下的时延曲线。由图可见，在端节点处的突发流量较大情况下时延剧增（832 μs），已经超过时延上界 714 μs，不能满足时延要求。这是由于端节点处突发流量过大时，报文在端节点的队列中排队等待服务的时间增大，导致时延剧增，对通信时延不确定性的影响较大。

3.3 仿真结果分析

由以上仿真结果可见，端节点的 CPU 处理能力、端节点处的通信流量以及网络负载是引起数字化变电站通信网络传输时延不确定性的四个关键因素，当以上参数达到某个特定值时，网络传输时延有一个突变过程，明显呈现不确定性行为。这种不确定性对数字化变电站中的采样值和保护跳闸报文的传输将产生很大影响。例如，由于采样值传输时延的不确定，使端节点无法正确记录采样数据到达的准确时间，导致影响测量精度。而保护跳闸报文的传输时延剧增，意味着电网故障切除时间延长，可能降低电网暂态稳定和动态稳定水平降低，降低输电断面的输电能力，甚至导致电网失去稳定，发生大面积停电事故。

3.4 时延不确定性的处理方案

如前所述，数字化变电站通信网络的时延不确

维普资讯 http://www.cqvip.com

定性问题比较复杂，一个问题往往涉及到相互联系的多个方面。因此，要提高数字化变电站通信网络的时延确定性，可以考虑从以下几个方面采取合理措施：

（1）当端节点的CPU利用率较高时，中断响应时间和通信处理任务执行出现较大时延，不能满足数字化变电站关键应用的报文传输时限要求。为此，端节点的硬件和软件运行环境必须仔细选取，正确配置。例如，缓冲区大小、CPU处理能力、实时操作系统的中断处理能力以及任务调度算法等。

（2）当网络轻载时，数字化变电站通信网络采用传统的交换机能够满足时延确定性要求，但是在电网故障或系统规模扩大，导致网络重载时，交换机内可能出现较大的排队时延，甚至报文丢失，不能保证时延的确定性。因此，在交换机内有必要引入基于IEEE 802.1Q的虚拟局域网（VLAN）和组播过滤等机制来处理来自不同源节点、有不同时延确定性要求的报文。

（3）当端节点处的突发通信流量较大时，节点内可能出现较大的排队时延。因此，有必要在端节点的MAC层引入基于IEEE 802.1p的优先级标签机制，提高端节点内报文传输时延的确定性。

（4）针对采样值传输时延不确定，可以考虑在采样数据报文中增加时标，并而在端节点内采用自适应数字滤波算法进行数据处理，提高采样测量值的精度。

4　结束语

数字化变电站受到普遍喜爱，一些建设中的问题需要大家献计献策。本文主要对数字化变电站通信网络的传输时延不确定性问题进行了初步研究，可能有些不切实际，甚至是错误的观点,作为抛砖引玉提出这些问题与同仁共探讨。

参考文献

[1] Hauser C.Comments to U.S.-Canada Power System Outage Task Force Regarding the Interim Report[R]. Technical Report EECS-GS-004, 2003.

[2] Falk H.Test Methodologies, Setup and Result Documentation for EPRI Sponsored Benchmark of Ethernet for Protection Control[EB/OL]. ftp://ftp.sisconet.com/epri/benchmrk/ethernet.zip.

[3] 窦晓波，吴在军，胡敏强. 借鉴IEC 61850功能分布的保护装置的设计[J]. 电力系统自动化,2004, 28(23): 65-70.
DOU Xiao-bo,WU Zai-jun,HU Min-qiang.Design of Protection by Referring to Function Leveling in IEC 61850[J].Automation of Electric Power Systems, 2004,28(23):65-70.

[4] 吴在军，胡敏强. 基于IEC 61850标准的变电站自动化系统研究[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 61-65.
WU Zai-jun, HU Min-qiang. Research on a Substation Automation System Based on IEC 61850[J]. Power System Technology, 2003,27(10):61-65.

[5] 殷志良，刘万顺，杨奇逊，等. 基于IEC 61850标准的过程总线通信研究与实现[J].中国电机工程学报, 2005, 25(8): 84-89.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun,et al. Research and Implementation of the Communication of Process Bus Based on IEC 61850[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8):84-89.

[6] Sidhu T S, Demeter E, Faried S O. Power System Protection and Control Integration over Ethernet-based Communication Channels[A]. In: Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering.2004.225-228.

[7] IEEE Std PC37.115, Draft Standard Test Method for Use in the Evaluation of Message Communications Between Intelligent Electronic Devices in an Integrated Substation Protection, Control and Data Acquisition System[S].

[8] Pozzuoli M P. Ethernet in Substataion Automation Applications-issues and Requirements[A]. In:Distribu Tech Conference and Exhibition[C]. Orlando: 2004.

[9] 王文博，张金文. OPNET Modeler与网络仿真[M]. 北京：人民邮电出版社, 2003.
WANG Wen-bo, ZHANG Jin-wen. OPNET Modeler and network Simulation[M]. Beijing: People's Posts& Telecom Press, 2003.

[10] OPNET.Introduction to OPNET Modeler: Accelerating Network R&D, 2003[EB/OL]. http://www.opnet.com/

收稿日期：2006-09-12；　修回日期：2006-12-14

作者简介：

辛建波(1970-)，男，博士，研究方向为数字化变电站、电能质量和电网动态稳定性等方面的科研工作。E-mail: Mandyzhuhai@163.com

蔡子亮(1965-),男,副教授,从事电路与系统研究工作。