

智能变电站网络压力对IEEE 1588时钟同步的影响

IEEE 1588时钟同步方式可以满足智能化变电站同步对时的要求。本文分析了IEEE 1588同步对时系统的原理和优越性,对比两种设备(具有抗网络压力的设备和不具备抗网络压力的设备)点对点模式和经IEEE 1588交换机模式下在不同流量的网络压力冲击下的表现和IEEE 1588对时性能。试验表明,虽然网络压力对设备的IEEE 1588对时精度没有直接影响,但是如果设备不具备抗网络压力的能力,随着流量的增加,设备的测试结果会受到影响,甚至出现不能正常工作的现象。因此,在智能变电站的同步对时系统中,特别是IEEE 1588对时网络中,加强对时设备的抗网络压力能力非常重要。

于同伟¹ 吉明岐¹ 王罡² 邓星星³ 牛俊涛^{3/1} 1.国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院 2.国网天津市电力公司经济技术研究院 3.武汉凯默电气有限公司



于同伟/高级工程师

0 引言

采用以太网作为对时路径进行时钟同步,是智能变电站时钟同步技术发展的趋势。因此,通信网络在变电站中发挥着重要的作用,如何避免网络风暴、网络阻塞以及某个IED设备损坏导致网络流量突变等对设备本身和整个时钟同步网络的影响是值得关注的的一个重要问题。本文主要分析了IEEE 1588对时精度的优越性,并且对比了不同设备在不同流量下的对时精度,分析网络流量对不同设备IEEE 1588同步对时精度及同步性能的影响。

1 IEEE 1588协议的优越性

在整个电网系统中,统一的时间基

准是继电保护及其他安全自动装置可靠工作的基础,也是正确分析电网故障和事故原因的依据。可以说,统一的时间基准是保证电力系统正常运行和分析事件原因的前提。

IEC 61850标准是基于网络通信平台的变电站网络通信标准,是我国智能电网相关标准规范的基础。基于IEC 61850标准研究智能变电站自动化系统中的时钟同步问题,具有很好的通用性和前瞻性。目前,变电站的对时手段主要包括GPS秒脉冲同步、串口报文同步、IRIG-B编码同步和网络同步。在前期的智能变电站试点中,大量使用光IRIG-B/PPS对时,时间同步系统采用光纤点对点连接授时设备,随着智能变电站及二次设备网络化的发展需求,基于网络的时间同步技术具有更广泛的需求。SNTP (Simple Network Time Protocol) 是网络时间协议NTP (Network Time Protocol) 的简化版,对时精度只能达到1 ms,无法满足智能变电站的同步时钟精度要求。IEEE 1588协议是针对分布式网络测控系统提出的精确时钟同步协议,如果有硬件辅助,对时精度就能够达到亚微秒级别。又因为是在网络中对时,在分配控制工作时无需单独进行同步通信,并且在局域网中支持组播报文发送的网络通信技术,使用范围也十分广泛,占用的网络资源和计算资源也较少,满足了成本较低的要求。对比这两种时钟同步方式,IEEE 1588有很大的优势,是目前最具有发展前景的时钟同步方式之一。表1给出了NTP/SNTP和IEEE 1588两种网络协议的对比。

关键词/Keywords

IEEE 1588 ·
对时精度 ·
网络压力 ·
智能变电站 ·

表1 NTP/SNTP和IEEE1588网络协议对比

类别	NTP/SNTP	IEEE1588
最大误差	1~100 ms	100~100 μ s
网络类型	以太网	以太网
延迟矫正	有	有
客户端硬件支持	无	支持
同步周期	不等,通常为分钟级别	2 s(可设置)
时间戳获取支持	软件(应用层)	硬件(MIN层)
同步结构类型	全体同等/客户-服务器	主、从模式
协议支持	UDP/IP单播(主要)	UDP/IP多播/单播

2 IEEE 1588协议同步原理

IEEE1588时钟协议采用的是主(Master-Slave)模式^[3],通过发送和接受同步报文进行时钟同步。主要分为四种时钟报文类型。

- (1) 同步报文,即Sync报文。
- (2) 跟随报文,即Follow_Up报文。
- (3) 延时测量报文,即Delay_Req报文。
- (4) 延时回应报文,即Delay_Resp报文。

IEEE 1588协议主要同步过程如图1所示,包含时钟偏移测量过程和传输延时测量过程。偏移测量是指测量主时钟和从时钟之间的时间偏移,从而在从时钟上消除这些偏移;传输延时测量是指确定主、从时钟间帧传输过程的网络延时。

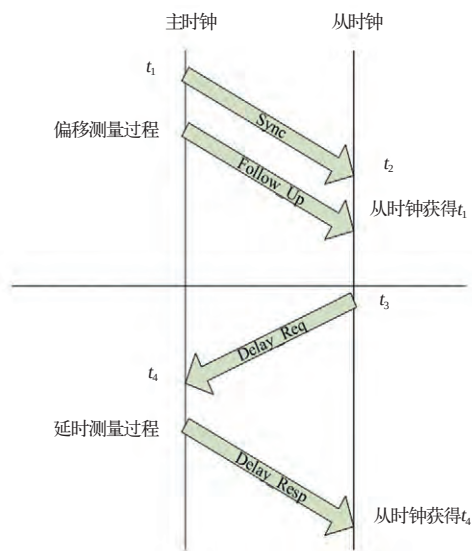


图1 IEEE 1588时钟同步原理

主时钟采用多播方式周期性地向网络发布Sync报文,默认周期为2 s。Sync报文离开主时钟端口时,记录下报文的发送时间 t_1 ,Sync报文进入从时钟端口时,记录下报文的接收时间 t_2 。主时钟还会在网络上以广播的形式发送Follow_Up报文,记录下发布Sync报文的时间戳 t_1 的值,从时钟就会在接收到的Follow_Up报文中读取这个 t_1 值。另外,从时钟还会向主时钟发送Delay_Req报文,记录下此时的发送时间 t_3 ;主时钟接收到Delay_Req报文后记录下收到报文的时间 t_4 ,再次向从时钟回复一个Delay_Resp报文,并且在Delay_Resp报文中包含有收到Delay_Req报文的时间 t_4 ^[3]。

假设主、从时钟之间的偏差恒定,传输路径对称,应有如下关系:

$$t_1 = t_2 + \text{Offset} - \text{Delay} \quad (1)$$

$$t_4 = t_3 + \text{Offset} + \text{Delay} \quad (2)$$

式中,Offset是主从时钟之间的偏差;Delay是报文传输的网络延时。

因此可以得出

$$\text{Delay} = [(t_4 - t_3) + (t_2 - t_1)]/2 \quad (3)$$

$$\text{Offset} = [(t_4 - t_3) - (t_2 - t_1)]/2 \quad (4)$$

得到主从时钟之间的偏差,就可以通过调节从时钟的算法来调节从时钟。另外,为了避免主从时钟内部网络协议栈处理延迟不确定性的影响,IEEE 1588采用硬件获取时标的方法,在接近物理层的位置获取时间标签,这种方法也是IEEE 1588具有很高对时精度的原因之一。这种方法具有两种模式:点对点模式和经交换机的网络模式。

点对点模式就是用光纤对主从时钟进行连接,由于在光纤上报文的传播时间 T_1 是相等的,这种模式具有很高的时钟同步精度,同步原理如图2所示。

经交换机的模式是用交换机串在主从时钟之间。由于交换机流量和内部排队机制的影响,网络传输延迟的不确定程度增大了,因此为了弥补这种不确定性,就要对传输路径进行分段测量和修正。同时,为了获得高精度的时钟同步,对于接入主从时钟之间的交换机也提出了更高的要求。不仅要在每个端口设置独立的硬件来获取同步报文进入和离开交换机的时标,还要具备高精

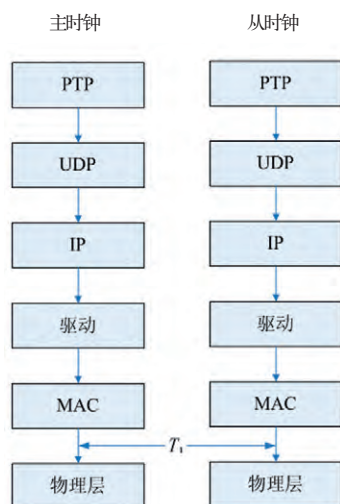


图2 点对点时钟同步原理

度的内部时钟来测量同步报文在交换机内的驻留时间，这在一般普通的交换机上是无法实现的，因此，为了达到高精度的时钟同步目的，就要采用符合IEEE 1588的新型交换机。这样就可以将整个传输路径分为三段，即主时钟到交换机的时间 T_1 、交换机内部的时间 T_2 和交换机到从时钟的时间 T_3 。其中， T_1 和 T_3 可以由主、从时钟和交换机之间的报文得到； T_2 是指同步报文在交换机内部的驻留时间，这个时间也可以通过IEEE 1588交换机内部的时钟精确得到。这样，从时钟就可以从交换机计算出的 T_1 、 T_2 和交换机自身的驻留时间得到整个主从时钟之间的传输延迟，并且对得到的时钟延迟进行补偿和修正。同步原理如图3所示。

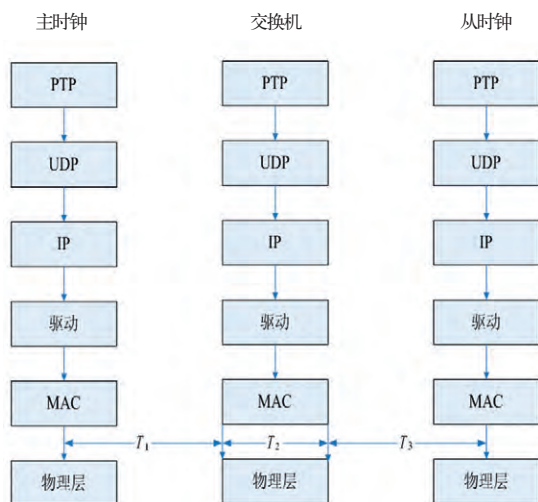


图3 接IEEE1588交换机时钟同步原理

3 网络流量的影响

智能变电站采用三层两网的架构，包含站控层、间隔层和过程层。站控层设备和间隔层设备采用站控层网络连接，也称MMS网；间隔层设备和过程层设备采用SV、GOOSE网络连接，存在SV、GOOSE单独组网的情况，也存在SV、GOOSE共网的情形，统称为过程层网络。如果站内使用IEEE 1588时钟同步对时，那么过程层网络中既包含有SV采样值报文、GOOSE报文，还包含有IEEE 1588报文。过程层网络的正常通信及安全非常重要，当采用点对点通信时，由于不经过交换机，一般不需要考虑流量问题；如果采用组网通信，那么过程层网络SV、GOOSE和IEEE1588报文都要经过二层交换机传输，需要考虑网络流量对过程层网络及设备的影响，组网模式的智能变电站网络架构示意图如图4所示。

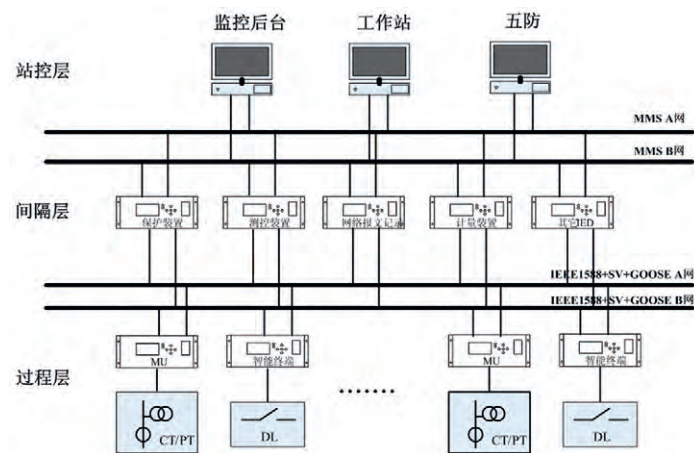


图4 组网模式智能变电站网络架构示意图

组网模式下，GOOSE、SV和IEEE 1588报文同时存在于过程层网络，以组播方式传播，以便更好地控制报文的转发范围。在智能变电站中，GOOSE报文本身流量不大，但是如果遇到开关抖动、台风或地震等大面积故障，导致GOOSE风暴，会有很大的突发流量；SV报文采用IEC 61850-9-2协议传输，报文流量大但相对稳定，合并单元端口流量因为通道数目不同约为6~8 Mit/s；IEEE 1588对时报文的流量总体较小且相对平稳。

虽然过程层网络报文总体保持平稳，但是时间同步系统以及整个网络系统仍存在一定的风险，比如由于SV采样值报文的引入使得过程层

网络流量比站控层网络更大，一般都是数倍的关系；网络上设备故障或者交换机配置错误以及遇到变电站事件集中发生等异常时，过程层网络会产生大量的扰动报文或者外来源头加入大量的扰动报文，这些瞬时的突变流量使得过程层网络中的设备受到冲击，严重时造成设备对时工作异常、死机，甚至造成过程层网络瘫痪。

因此，时间同步网络上设备是否具备抗网络压力的能力和不同网络流量对IEEE1588时间同步性能的影响是值得关注的问题。

4 对比实验

4.1 实验方案

鉴于突变增大的网络流量会对过程层中连接的设备造成冲击，本文选择采用IEEE 1588对时的两台设备A和设备B作为从时钟，设备A具备抗网络压力的性能，设备B不具备抗网络压力的性能。将这两台设备分别和主时钟做点对点测试和经IEEE 1588交换机测试，并且在测试中给这两台设备加不同的干扰网络流量，干扰报文包括SV、GOOSE和IP等类型，分别给设备A加0%、10%、20%、50%、80%和99%干扰背景流量，设备B施加0%、5%、8%、10%、20%、50%、80%和99%的干扰背景流量，记录下10 min之内设备A和设备B的测试结果，检查：①设备A、设备B是否能够正常工作；②在不同的流量下对时精度是是否能够保证在误差范围内。

测试方案如图5和图6所示。

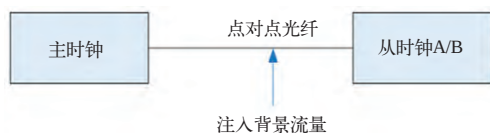


图5 实验方案1：点对点光纤连接

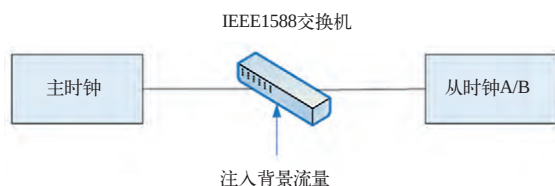


图6 实验方案2：经IEEE1588交换机连接

4.2 实验结果分析

1. 点对点模式

当设备A和设备B采用点对点的模式进行测试，分别接收到不同流量下主时钟发送的IEEE 1588对时信号，由于A具备抗网络压力的性能，加0%、10%、20%、50%、80%和99%的背景流量，设备A依然可以正常工作没有出现设备异常现象，并且延时偏差在 $-20\sim 20$ ns范围内，如图7~图12所示。

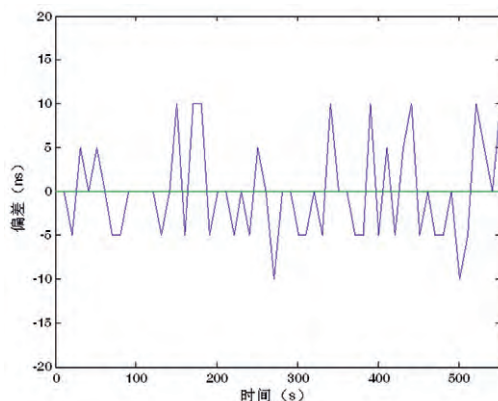


图7 设备A无干扰背景流量

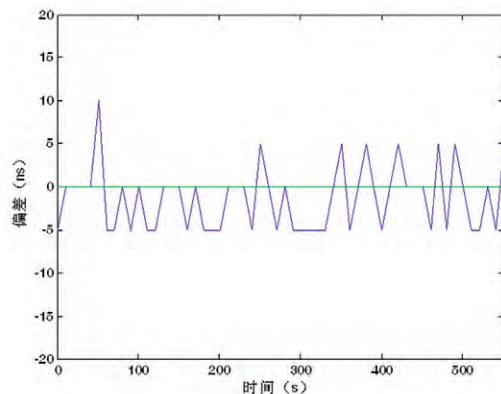


图8 设备A施加10%的干扰背景流量

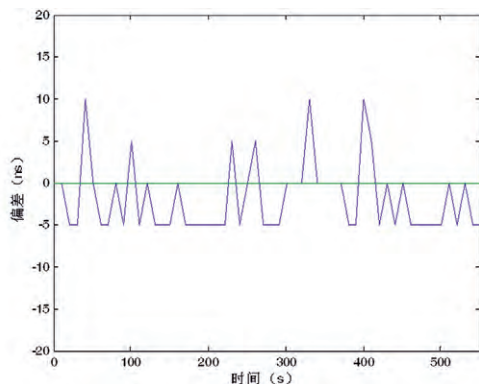


图9 设备A施加20%的干扰背景流量

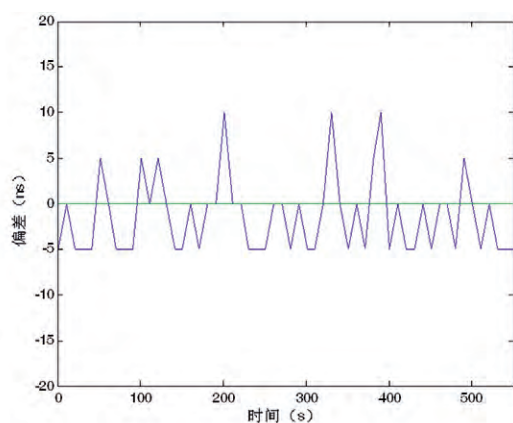


图10 设备A施加50%的干扰背景流量

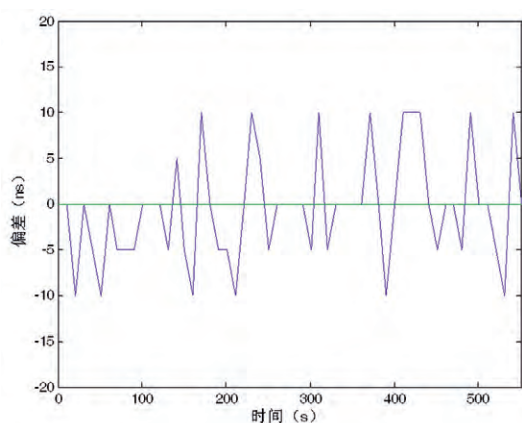


图11 设备A施加80%的干扰背景流量

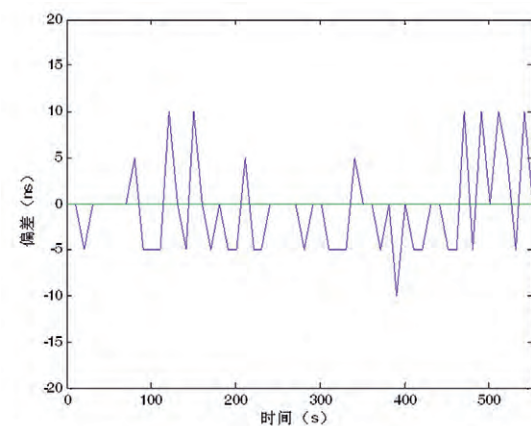


图12 设备A施加99%的干扰背景流量

而B设备由于没有抗网络压力的能力,设备采用中断处理模式,当流量从0%增加到10%,CPU的计算量会增大,延迟偏差会不断跳变;当流量大于10%时,设备B无法解析报文,不能测出延时偏差,无法正常工作,测试结果如图13~图16所示。

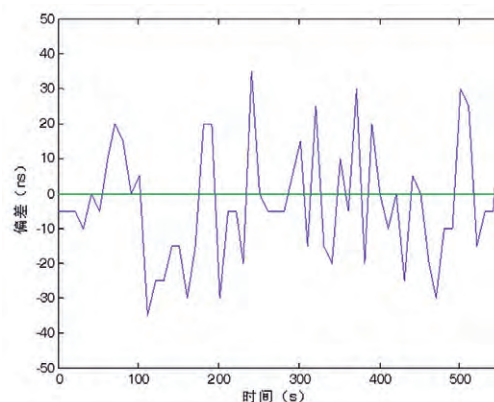


图13 设备B无干扰背景流量

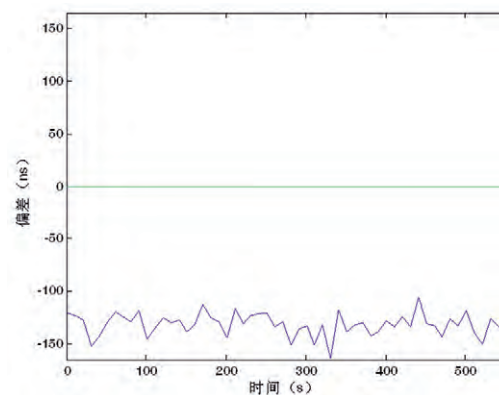


图14 设备B施加5%的干扰背景流量

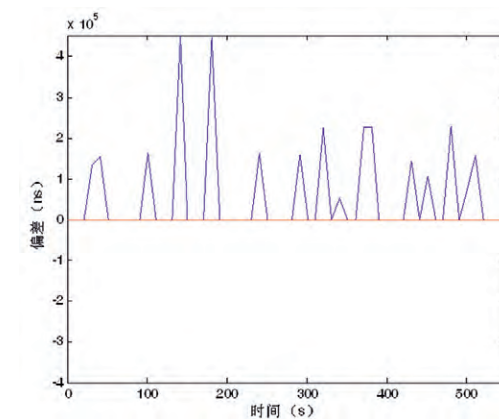


图15 设备B施加8%的干扰背景流量

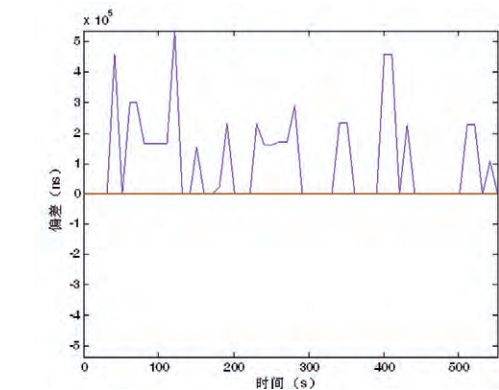


图16 设备B施加10%的干扰背景流量

2.经IEEE 1588交换机模式

当设备A和设备B采用接IEEE1588交换机的模式进行测试，分别接收到不同流量下主时钟发送的IEEE 1588对时信号，由于设备A具备抗网络压力的性能，加0%、10%、20%、50%、80%和99%的干扰背景流量，可以正常工作没有出现设备异常现象，误差在-100~100 ns范围内，如图17~图22所示；设备B由于没有抗网络压力的能力，采用中断处理模式，当流量从0%增加到10%，CPU的计算量会增大，测试出来的延迟偏差会不断跳变；当流量大于10%时，CPU无法解析报文，设备B无法测出延时偏差，不能正常工作，测试结果如图23~图26所示。

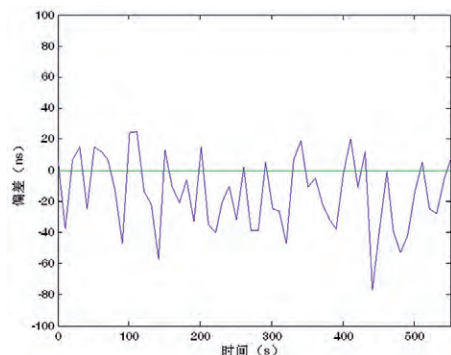


图17 设备A无干扰的背景流量

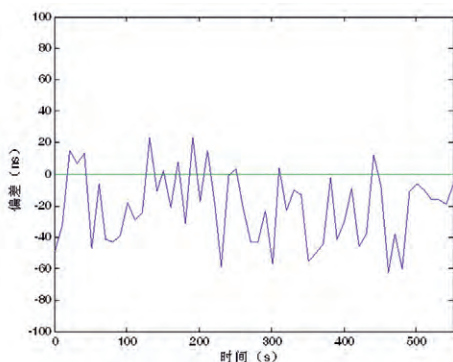


图18 设备A施加10%的干扰背景流量

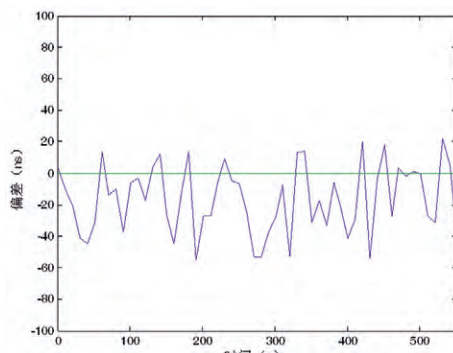


图19 设备A施加20%的干扰背景流量

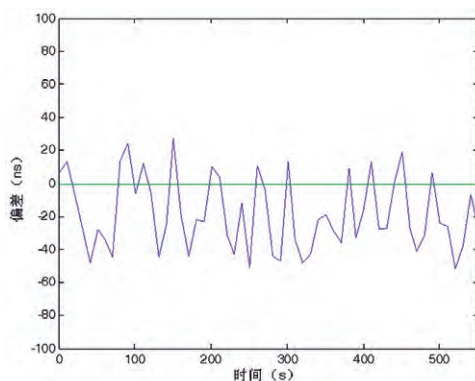


图20 设备A施加50%的干扰背景流量

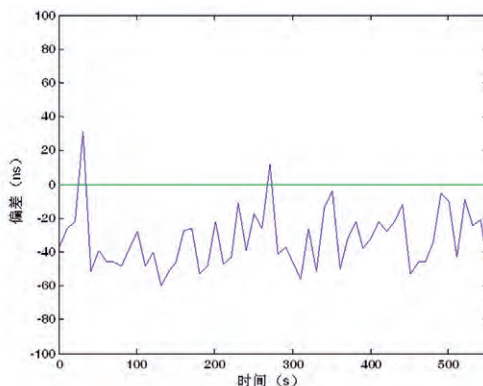


图21 设备A施加80%的干扰背景流量

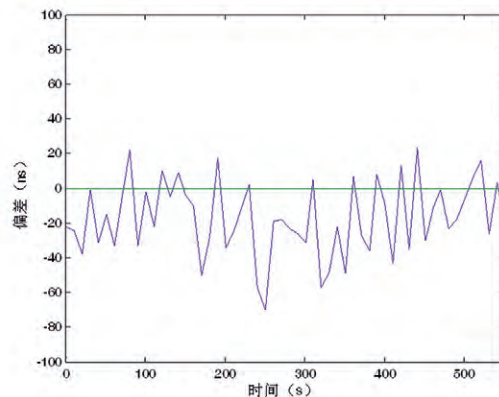


图22 设备A施加99%的干扰背景流量

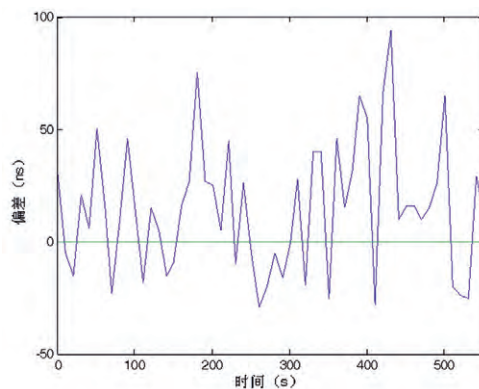


图23 设备B无干扰背景流量

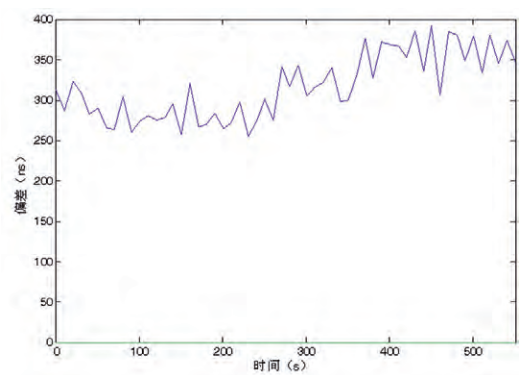


图24 设备B施加5%的干扰背景流量

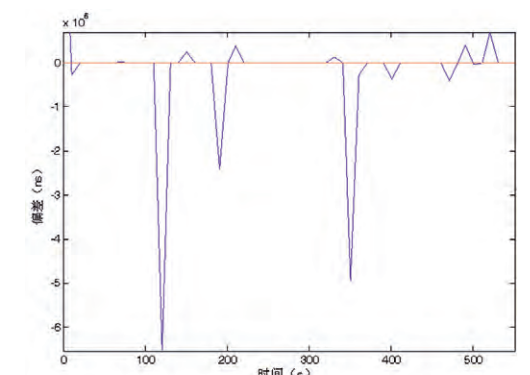


图25 设备B施加8%的干扰背景流量

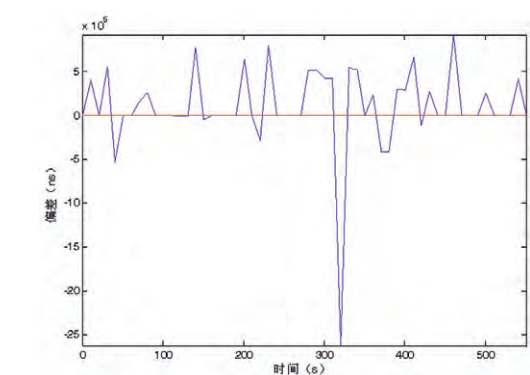


图26 设备B施加10%的干扰背景流量

从图7~图26可以看出，不论是点对点模式还是经IEEE 1588交换机的模式，当网络背景流量从0%增加到99%，由于设备A采用了针对网络流量的优化设计，具备抗网络压力的能力，对时精度一直保持在-100~100 ns之间，并且设备无任何异常现象。设备B在网络流量小于10%时，能够工作，但是延时误差已经出现跳变，当流量不小于10%时，设备B出现异常，无法计算出从主时钟到从时钟的延迟偏差，进而不能完成正常的时间同步过程。两种设备平均对时误差测试结果如表2和表3所示。

表2 设备A测试结果 (单位:ns)

背景流量 (%)	0	10	20	50	80	99
点对点	-0.5	-0.7	-1.0	-0.5	-0.4	-0.6
经1588交换机	-17.2	-18.6	-20.3	-21.2	-32.2	-16.5

表3 设备B测试结果 (单位:ns)

背景流量 (%)	0	5	8	10	20、50、80、99
点对点	-2.8	-131.4	556 88.6	107 418.9	异常
经1588交换机	14.8	316	-157 003.5	98 428.2	异常

从表3可以看出，由于设备B不具备抗网络压力的能力，当网络中背景流量不断增大时，超出设备的计算解析能力，导致IEEE 1588报文丢失，测出的延时误差跳变很大，根据设备性能的不同，可能会出现设备死机的现象。如果电网中使用这种不具备抗网络压力的设备，整个时钟同步系统就会出现故障，出现不可预知的后果。所以加强设备的抗网络压力能力是一个不容忽视的问题。

5 结束语

随着智能变电站的不断发展，时钟同步技术在电力系统中发挥越来越重要的作用，基于网络传输的IEEE 1588对时是未来智能变电站时钟同步技术的发展趋势。针对大量数据传输的网络中，每个网络节点以及交换设备的IEEE1588功能、对时性能是否会受到影响的问题，本文搭建了模拟大数据量的网络环境进行了试验，结果表明，当网络设备没有针对大流量进行优化设计时，会出现IEEE1588报文丢失，报文序号不连续等问题，引起同步丢失、同步异常和时间抖动，严重时可能

能会带来保护误动、SOE事件顺序紊乱等影响电网安全的后果。因此，基于IEEE1588时间同步的智能变电站网络系统及设备均需要在设计时就要考虑抗网络压力的能力，并进行系统的抗网络压力测试。

参考文献

- [1] 张洪源, 王倩. 基于IEEE1588的数字化变电站时钟同步技术的应用研究[C]. 西南交通大学, 2010.
- [2] 周旭峰, 杨贵, 袁志彬, 等. 刘文慧. 交换机流量限制技术及其在智能变电站的应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (18) : 114-118.
- [3] 谢俊, 李峰, 冯维纲, 等. 智能变电站IEEE1588时钟同步方案对比研究[J]. 华中电力, 2011, 24 (6) : 49-53.

- [4] 刘明惠, 赵晓东, 司梦, 等. 智能变电站过程层网络流量管理方式研究与应用[J]. 电力系统保护与控制[J], 2012, 40(23): 87-92.
- [5] 崔全胜, 魏勇, 何永吉, 等. PTP1588协议的分析, 电力系统保护与控制[J]. 2011, 39(10): 148-154.
- [6] 于鹏飞, 喻强, 邓辉, 等. 电力系统自动化[J]. 2009, 33 (13) : 99-103.

(收稿日期: 2015-03-30) EA

作者简介

于同伟 (1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能变电站相关技术研究。

吉明岐 (1962-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为智能变电站相关技术研究。

(上接第393页)

验证正向操作, 也要验证反向操作, 即错误的步骤不能执行。每个间隔均需进行验证。

(2) 编制顺序控制典型操作票。顺序控制操作票与正常的典型操作票有区别, 需要编制单独的顺序控制典型操作票, 并认真进行审核。在顺序控制操作票中, 也应将软压板纳入, 并在验证时注意软压板动作是否正确。

(3) 掌握顺序控制操作的操作方法。顺序控制操作与常规的倒闸操作不同, 在顺序控制操作时, 一人在后台机调用顺序控制操作票, 一人在现场在现场核查设备实际位置。运维人员要掌握在后台机中止顺序控制操作票的方法, 并明确后台机操作人员应听从现场人员指令。在操作时, 两人都应携带对讲机和顺序控制操作票, 在操作开始时后台机操作人员大声唱票, 在得到现场人员许可后, 方可进行。现场人员要认真检查设备动作情况, 遇设备异常时, 后台机操作人员应听从现场人员指令, 果断中止, 再进行处理。

2.5 熟悉辅助控制系统

智能变电站辅助系统将传动综自变电站的视频监控系统、安全防范系统、环境监控系统、智能门禁系统、火灾自动报警系统和设备温度监测系统辅助生产系统集成, 统一接入一个综合监

控平台。

运维人员要掌握各子系统的使用方法, 如室内照明、风机和空调的关闭和开启方法, 如门禁系统的密码设置, 如视频监控的查看和调用等。

3 结束语

智能化变电站生产准备工作相对来说更加繁重, 需要很大的耐心和责任心去完成, 运维人员要把握好关键环节和关键点, 做好此项工作, 为变电站安全运行打下坚实的基础。

(收稿日期: 2015-03-30) EA

作者简介

李东 (1981-), 男, 工程师, 主要从事高压变电管理与运行工作。

尚光伟 (1979-), 男, 高级工程师, 主要从事电网规划。