148

面向交换式电力监测网的 NTP 同步精度提高方法

侯重远,江汉红,芮万智,刘 亮

(海军工程大学 电气与信息工程学院,湖北 武汉 430033)

摘要:针对交换式电力监测网中 NTP 同步精度较低的问题,提出一种理论上可使同步精度提高到原来的 17 倍且不增加硬件的改进协议。SN-NTP 利用了交换机的 IEEE802.1p 优先级调度功能,首先由 NTP 客户端向 NTP 服务器不间断地发送具有高优先级的短包,使所经路径被短包抢占,交换机中其他数据包处于等待状态; 然后发送优先级高于短包的 NTP 请求包,使 NTP 请求包在传输路径上抢占短包优先权,从而使请求包在交 换机中的最大等待时间变为原来的 1/17,以此提高同步精度。基于船电监测网的 SN-NTP 协议性能试验显示, 该方法可使同步精度提高到原来的 15~24 倍,与理论值基本吻合。

关键词: 电力监测网络; 网络时间同步; 同步精度; 精确时间同步; IEEE1588; 监测; 同步 中图分类号: TM 727 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.028

0 引言

基于网络的时间同步技术是电力监测网的支撑 技术之一,广泛应用于同步测量、同步保护、同步控 制、合并单元等场合^[1-4],IEC61850标准也将该技术 作为变电站监测网中传统同步手段的换代技术^[5-6]。

网络时间同步主要通过 NTP(Network Time Protocol)和 PTP(Precision Time Protocol,即 IEEE1588 标准)2种技术途径实现[7]。目前,电力监测网一般 使用交换式以太网消除碰撞,提高实时性。NTP 技 术的优点是不需要交换机中有特殊硬件支持,成本 低:但 NTP 受交换机网络延迟不对称性的影响,同 步精度一般只能保证 ms 级^[8-9]。PTP 则通过在全网 所有交换机中植入高精度自守时时钟,以及在网卡物 理(PHY)层植入支持 PTP 的专用集成电路(ASIC)或 现场可编程门阵列(FPGA),使同步精度能够达到 1 µs 以内^[10],适用于相量测量等高精度同步场合。 但 PTP 也存在以下缺点: PTP 建立在对以太网 ASIC 硬件改造的基础上,因此成本长期居高不下,限制了 其广泛应用:必须全网交换机都支持 PTP 才能保证同 步精度,因此可靠性不及 NTP.且时钟温度条件苛刻: 由于全网交换机必须都支持 PTP,因此在高精度测 量需求不多的场合,其成本优势不及传统的串口通信 校时、脉冲中断校时和综合校时等点对点同步方式[7]。

本文提出了一种可将 NTP 同步精度提高到 17 倍的改进协议 SN-NTP(Switch Networks-NTP),使得 同步精度根据网络拓扑的不同可达 10~100 μs 量级。 该协议不需要增加硬件,只利用大部分工业网络交换

收稿日期:2011-08-18;修回日期:2012-10-27

机都已支持的 IEEE802.1p 优先级排队功能,因此,与 IEEE1588 相比具有很大成本优势,在电力监测网中 可以部分替代 IEEE1588。未来随着 1 Gbit/s 以及更 高速以太网技术在电力监测领域的应用,SN-NTP 同 步精度将进一步提高到 μs 级,完全满足 IEC61850 所 规定的 5 种级别^[7,11]的电气信号同步需求,具有在电 力监测领域替代 IEEE1588 的技术潜力。

1 NTP 时间同步协议原理

NTP 一般采用"客户端-服务器"方式。如图 1 所示,先由客户端向服务器发送时间同步请求包,包 内包含发送时的本地时间 *T*₁;请求包经各级交换机 传输,到达服务器后,服务器立即记录到达时的本地 时间 *T*₂;接着服务器再向客户端发送回复包,包内包 含 *T*₂以及发送回复包时的本地时间 *T*₃;回复包到达 客户端后,客户端记录到达时的本地时间 *T*₄,至此完 成一次网络同步通信。



图 1 NTP 网络同步机制

Fig.1 NTP synchronization mechanism

设请求包的网络传输延迟为 t_{req,d},回复包的网络 传输延迟为 t_{cnf,d},客户端与服务器的时钟偏差为 t_{affset}, 则客户端计算自身的时间偏差并以此调整自身时钟。

$$t_{\text{offset}} = \frac{(T_2 - T_1) + (T_3 - T_4)}{2} \tag{1}$$

显然,式(1)成立的前提是传输延迟的对称性, 即 t_{req.d} 与 t_{caf.d} 相等,但交换式以太网无法保证这一

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50421703)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50421703)

点,因此式(1)会引入同步误差 terror:

$$t_{\rm error} = \frac{t_{\rm req,d} - t_{\rm cnf,d}}{2}$$
(2)

即实际的时间同步关系为:

$$t_{\text{offset}} + t_{\text{error}} = \frac{(T_2 - T_1) + (T_3 - T_4)}{2}$$
(3)

在交换式以太网中, | t_{error} | 的上确界通常为 ms 以 上量级, 这也是 NTP 同步精度较差的根源, 本文提 出的 SN-NTP 改进协议通过减小 | t_{error} | 的上界值来 提高同步精度。

2 SN-NTP 协议

2.1 NTP 同步精度及其改善方法

2.1.1 NTP 同步误差的成因分析

NTP 数据包在交换机中转发时,必须等到发送队 列中正在发送的数据帧完全传输完才能发出,该等待 时间的不确定性造成了同步误差。具体如图 2 所 示,当某时刻 NTP 数据包进入发送队列时,尽管 NTP 数据包使用了优先级机制(IEEE802.1p),但必须等 待优先级较低的帧"Frame 0"发送完。



图 2 NTP 同步误差成因

Fig.2 Causes of NTP synchronization error

2.1.2 NTP 同步精度计算

NTP 同步精度可以表示为式(4)。

$$T_{\text{accuracy}} = \max\{ \mid t_{\text{error}} \mid \} = \frac{n \cdot \max\{t_{\text{wait}}\}}{2}$$
(4)

其中,n为转发路径上所经过的交换机个数。

因以太网最长数据包可达 1 538 Byte(含帧间间 隔 12 Byte),故 max{ t_{wait} }等于发送 1 538 Byte 的时间 (百兆以太网可达 123 μ s,千兆以太网可达 12.3 μ s), 显然必须减小 max{ t_{wait} }才能改善同步精度。

2.1.3 同步精度改善方法

本文通过先发送转发端口抢占包,再发送 NTP 数据包的方式来减小 max {t_{wait}},从而提高同步精度。 具体分以下 2 步。

a. 在 NTP 数据包发送之前,先连续发送 18n 个 长度为 88 Byte 的转发端口抢占包。所谓转发端口 抢占包是优先级低于 NTP 数据包但高于其他数据 包的以太网最短包,共 88 Byte(包含帧间间隔 12 Byte 和优先级标记 4 Byte)。显然,转发端口抢占包在交换机中会阻塞除 NTP 数据包之外的其他数据包在交换机中的转发,从而使得 NTP 数据包即将通过的转发路径完全被转发端口抢占包所占据。

当转发端口抢占包的发送数量为 18n(其中,18= [1538/88],n 为转发路径上的交换机数量)时,可以 在最坏的情况下(即转发端口抢占包在每台交换机 中总是需要等待 1538 Byte 传输完),确保 NTP 请求 包在传输过程中前方总有转发端口抢占包正在阻塞 其他数据的传输。

b. 以最高优先级发送 NTP 数据包,并使其接在 所有转发端口抢占包之后。

由于其他长数据包都已被之前发出的转发端口 抢占包所阻塞,因此 NTP 数据包只需等待正在占据 端口的转发端口抢占包(最长 88 Byte)被发送完即 可获得端口,如图 3 所示。此时,max{ t_{wait} }仅为发送 88 Byte 数据包的时间(百兆以太网仅需 7.04 μ s,千兆 以太网仅需 0.704 μ s),由式(4)可知,同步精度约提 高到原来的 17 倍(1538/88≈17)。







2.2 SN-NTP 协议机制

根据 2.1 节原理设计 SN-NTP 协议。SN-NTP 协议的时序如图 4 所示,其中,为确保服务器每次只 为一个客户端授时,采用了"SN-NTP 请求"、"SN-NTP 允许"和"SN-NTP 完成"的握手机制,以避免多个客 户端的并发。



Fig.4 Timing sequence of SN-NTP

SN-NTP 客户端和 SN-NTP 服务器的流程图分 别如图 5、6 所示。



图 5 SN-NTP 客户端流程图 Fig.5 Flowchart of SN-NTP client code



图 6 SN-NTP 服务器流程图 Fig.6 Flowchart of SN-NTP server code

2.3 SN-NTP 同步精度的计算

根据网络拓扑和转发路径的不同,不同客户端与服务器之间的同步精度不尽相同,可由式(5)计算:

$$T'_{\text{accuracy}} = \max\{ \mid t_{\text{error}} \mid \} = \frac{7n_1 + 0.7n_2}{2}$$
 (5)

其中, n_1 为转发路径上 100 Mbit/s 交换机的个数, n_2 为 1 Gbit/s 交换机的个数。

2.4 SN-NTP 对网络实时性的影响

转发端口抢占包会对所占端口的其他数据包产 生阻塞,最大阻塞时间可由式(6)计算:

$$t_{\text{block,d}} = \begin{cases} 123n & \text{\pounds 100 Mbit/s } \\ 12.3n & \text{\pounds 1 Gbit/s } \\ \\ \end{cases} \tag{6}$$

IEC61850标准根据采集、控制、保护等应用场合的不同要求,定义了 2~100 ms 的网络延迟要求^[7],这些延迟要求对电力监测网具有参考意义,必须根据实际情况部署 SN-NTP,以防止影响电力监测网的实时性。

3 SN-NTP 同步性能试验

3.1 试验环境

试验平台为某船舶电站交流侧综合监测系统测 试床,其网络拓扑结构如图7所示。



Fig.7 Test environment

交流侧 A、B、C 三相的监测设备分别接入对应的 3 台交换机,网络速率为 100 Mbit/s,均支持 IEEE 802.1p 协议;3 台交换机之间以弹性分组环网模式 连接,网络速率为 1 Gbit/s,B 相交换机与 C 相交换 机之间为环网的冗备链路。

SN-NTP 客户端和 SN-NTP 服务器分别运行于 工控机 A 和工控机 B 上,2 台工控机分别连接到 B 相交换机和 C 相交换机的百兆端口上。由于冗备链 路的存在,NTP 请求包的转发路径为"工控机 A→B 相交换机→A 相交换机→C 相交换机→工控机 B", NTP 回复包则反之。

为测量 SN-NTP 协议的同步误差,本文使用独 立的串口时钟源通过 RS-232 串口分别为 2 台工控 机提供标准时间信号。由于客户端和服务器的本地 时间都已与标准时间同步,故此时两本地时钟偏差 为 0, 即 t_{offset} 为 0, 根据式(2)和式(3)得到同步误差 计算公式:

$$t_{\rm emor} = \frac{t_{\rm req,d} - t_{\rm enf,d}}{2} = \frac{(T_2 - T_1) + (T_3 - T_4)}{2}$$
(7)

3.2 软硬件配置

运行 SN-NTP 客户端和 SN-NTP 服务器的工控 机均采用 x86 架构, Intel Pentium M 1.6 GHz 处理 器;网卡芯片为支持 IEEE802.1p 优先级功能的 Intel 82575 网络控制器,在试验中工作于 100 Mbit/s 全 双工模式;采用 Intel 82C54 计时器作为同步性能试 验用的本地时钟。

采用 VxWorks 6.6 操作系统(评估版)作为客户 端和服务器的软件平台;TCP / IP 协议栈采用 VxWorks 自带的 WRNS(Wind River Network Stack)。 使用 WRNS socket 中的 setsockopt()函数设置数据 包的 IEEE802.1p 优先级标签,其中,转发端口抢占 包设定优先级"6",NTP 数据包设定优先级"7",其他 数据包均不含优先级标签(即最低优先级)。

3.3 试验步骤、数据处理与结果分析

NTP 与 SN-NTP 采用相同的试验步骤和数据处理方法:

a. 由客户端发起一次网络同步,并根据式(7)计 算同步误差,同时记录本地端口负荷;

b. 重复测试 10 000 次, 频率为 1 Hz;

c. 将端口负荷率分为 0~0.1%、0.1%~0.5%、 0.5%~1.0%、1.0%~5.0%、5.0%~10.0% 共 5 个区 间,分别以 0、1、2、3、4 表示,把 10 000 组同步误差 数据按照此区间分为 5 组,并分别找出各组中同步 误差的最大值作为该组的同步精度。

NTP 协议的同步精度如图 8 所示, SN-NTP 协议的同步精度如图 9 所示。



Fig.9 Synchronization accuracy of SN-NTP

分析如下:

a. 由图 8 可见, NTP 同步精度随网络繁忙程度 的增大而呈现恶化趋势,但其精度仍在 200 μs 以内, 主要原因是由于使用了 IEEE802.1p 机制;

b. 由图 9 可见, SN-NTP 同步精度为 8 μs 左右, 随网络繁忙程度变化仅在 5% 以内浮动,离散性较好;

c. SN-NTP 协议同步精度约为 NTP 协议的 15~24 倍,与理论值(17 倍)基本吻合,实测值与理论值的 差异主要来自测量误差、测试时间的充分性、测试代 码执行开销以及模型误差等因素。

4 结语

信息网络技术的快速发展与硬件成本大幅降低,是工业网络技术发展的原动力。在工业以太网领域,1Gbit/s甚至10Gbit/s以太网正在逐步取代目前100Mbit/s以太网的主流地位。因此,利用成熟通用的网络硬件,通过软件算法改进,为工业网络需求服务,是本文SN-NTP协议的出发点。该方法目前可以达到10~100 µs同步精度,能够在部分场合替代IEEE1588,在电力监测网的设计中综合运用这2种技术将有效降低成本。

参考文献:

- [1] 于跃海,张道农,胡永辉,等. 电力系统时间同步方案[J]. 电力系统自动化,2008,32(7):82-86.
 YU Yuehai,ZHANG Daonong,HU Yonghui,et al. Time synchronizing system for power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(7):82-86.
 [2] 高翔,张沛超.数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技
 - 术,2006,30(23):67-72. GAO Xiang,ZHANG Peichao. Main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology,2006,30(23): 67-72.
- [3] 胡巨,高新华. SNTP 对时方式在数字化变电站中应用[J]. 电力 自动化设备,2009,29(3):143-147.
 HU Ju,GAO Xinhua. Application of SNTP-based time synchroni-

zation in digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(3):143-147.

- [4] 庄玉飞,黄琦,井实. 基于 GPS 和 IEEE1588 协议的时钟同步装置的研制[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(13):111-116.
 ZHUANG Yufei,HUANG Qi,JING Shi. Development of a clock synchronization device based on GPS and IEEE1588 protocol[J].
 Power System Protection and Control,2011,39(13):111-116.
- [5] IEC. IEC61850-8-1 Communication networks and systems in substations [S]. Washington D C, USA: International Electrotechnical Commission, 2004.
- [6] 谭恕强,任雁铭,黄健,等. DL/Z86022004 变电站通信网络和系 统[S]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [7] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2008: 86-119.
- [8] 雷霆,黄太贵,李斌,等. 时间同步监测分析系统的开发与应用

[J]. 电力系统自动化,2010,34(24):66-69.

LEI Ting, HUANG Taigui, LI Bin, et al. Crucial techniques of fault isolation and restoration for distribution systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24):66-69.

- [9] 易娜,贺鹏,易亚文,等. 遵循 IEC61850 实现变电站自动化系统 时间同步的频率调节算法设计[J]. 电网技术,2007,31(16):46-49.
 YI Na,HE Peng,YI Yawen,et al. Design of frequency adjustment algorithm for time synchronization of substation automation system according to IEC61850 standard[J]. Power System Technology,2007,31(16):46-49.
- [10] 汪祺航,吴在军,赵上林,等. IEEE1588 时钟同步技术在数字 化变电站中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19): 137-142.

WANG Qihang, WU Zaijun, ZHAO Shanglin, et al. Application of IEEE1588 time synchronization in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19):137-142.

[11] 钱美,韩江桂,尹为民. 船舶综合电力系统同步测量的实现[J].
 电力自动化设备,2010,30(11):101-104.
 QIAN Mei,HAN Jianggui,YIN Weimin. Implementation of

synchronous measurement in ship integrated power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(11):101-104.

 $\left[12\right]$ WILSON R. Uses of precise time and frequency in power

systems[J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(7): 1009-1018.

- [13] SERIZAWA Y,KITAMURA K,MYOUJIN M,et al. SDH-based time synchronous system for power system communications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1):59-65.
- [14] KOOK K,LIU Y,BANG M. Global behavior of power system frequency in Korean power system for the application of frequency monitoring network[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2008,2(5):764-774.
- [15] RASMUSSEN J, JORGENSEN P. Synchronized phasor measurements of a power system event in eastern Denmark[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1):278-284.
- [16] ZHONG Z,XU C,BILLIAN B,et al. Power system frequency monitoring network (FNET) implementation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4):1914-1921.

作者简介:

侯重远(1982-), 男, 陕西礼泉人, 博士研究生, 研究方向 为电力系统网络化测控(E-mail: houzenan@163.com);

江汉红(1960-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师, 博士,研究方向为电力系统网络化测控(**E-mail**:jianghanhong@ gmail.com)。

Improvement of NTP synchronization accuracy for switch-oriented power monitoring networks

HOU Chongyuan, JIANG Hanhong, RUI Wanzhi, LIU Liang

(College of Electric and Information Engineering, Naval University of Engineering,

Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to improve the synchronization accuracy of NTP(Network Time Protocol) for switchoriented power monitoring networks, an improved protocol, SN-NTP(Switch Networks-NTP), is proposed, which enhances the synchronization accuracy to 17 times the original theoretically. SN-NTP is based on the priority scheduling foundation of switch protocol IEEE802.1p. First, NTP client continuously sends the short packets with higher priority to NTP server to block the switch path and make other data packets in waiting state. Then, NTP client sends NTP request packet with highest priority to NTP server to seize the switch path of short packets. By the above two steps, the maximum waiting time of request packet under SN-NTP becomes one seventeenth of that under NTP and the synchronization accuracy is improved. SN-NTP performance test of ship power monitoring network shows that the synchronization accuracy is improved to 15 to 24 times the original, coinciding with theoretical analysis.

Key words: power monitoring network; network time protocol; synchronization accuracy; precision time protocol; IEEE1588; monitoring; synchronization

152