

DOI: 10.7667/PSPC152228

智能变电站无线站域测试系统的同步策略研究

林国新¹, 唐志军², 翟博龙², 尹元¹, 林国栋², 汤汉松³, 张炜³

(1. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350000; 2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007; 3. 江苏凌创电气自动化股份有限公司, 江苏 镇江 212009)

摘要: 为解决智能变电站现场站域测试时无线分布式数据的时间同步问题, 提出了一种适用于无线数据通信的多终端同步控制策略。介绍了智能变电站的站域测试系统及其实现的关键性问题, 说明了网络传输延时不确定对IEEE 1588 网络时钟同步协议的影响, 研究了基于单点对多点无线通信系统同步的样本滤波、同步校正、时域跟随等问题, 并给出了实施方案。实验结果表明, 无线通信下经同步控制后时间精度可达微秒级, 能够满足智能变电站系统级测试对时间同步的需求。

关键词: 智能变电站; 站域; 测试; 无线通信; IEEE 1588; 同步

Research on synchronization strategy of wireless substation area test system for intelligent substation

LIN Guoxin¹, TANG Zhijun², ZHAI Bolong², YIN Yuan¹, LIN Guodong², TANG Hansong³, ZHANG Wei³

(1. State Grid Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350000, China; 2. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China; 3. Jiangsu Lingchuang Electric Automation Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China)

Abstract: In order to solve the time synchronization problem of wireless distributed data in the field test of intelligent substation, this paper proposes a multi terminal synchronization control strategy for wireless data communication. It introduces the substation area test for the intelligent substation and its key problems, describes the influence of the uncertain network transmission delay time on the IEEE 1588 network clock synchronization protocol, researches the sample filtering, synchronous correction, time domain following and other issues that based on the single point to multipoint wireless communication system synchronization, and gives the implementation scheme. Experiments show that the synchronization precision with this synchronous control in the wireless communication can reach microsecond, which can meet the synchronization demand of the intelligent substation system-level test.

Key words: intelligent substation; substation area; test; wireless communication; IEEE 1588; synchronization

0 引言

二次系统测试是变电站可靠稳定运行的重要保障, 智能变电站目前常用的二次系统检验方法分为实验室系统测试及现场单体测试两类^[1-2]。智能电网系统实施复杂, 在智能变电站现场验证设备间逻辑配合关系非常困难, 可预先在实验室搭建仿真平台进行系统模拟试验, 验证智能变电站的系统架构及整体功能。智能变电站工程实施过程中存在系统拆解、设备运输、系统重组等多个不确定环节, 二次设备在变电站现场组建后的运行情况往往与前期的实验室测试结果存在出入, 因此, 变电站投运前需要在现场对相关设备重新测试。智能变电站内的重

要二次设备(如高、中压侧保护装置)多采用直采直跳模式, 且预先铺设的同步信号专用光纤不宜改动, 为保证现场工程回路的完整性及测试结果地真实性, 现场测试一般只能通过测试仪点对点地逐个对单间隔或少量间隔设备进行简易测试, 测试方式繁琐且无法对设备的系统级功能或实际运行工况进行验证, 在检验方法上存在缺陷。

随着智能变电站系统范围的扩大和分散控制理论的发展, 如何融合实验室测试的全面性与现场测试的易操作性, 在变电站进行系统级的多间隔整体测试成为了智能变电站调试技术的发展趋势。研究适用于智能变电站二次系统的试验方法对智能电网的安全运行具有重要意义。

1 无线站域测试系统

1.1 分层分布式的系统架构

智能变电站站域测试是指在变电站现场搭建分布式测试平台, 采用数字建模方式对变电站运行状态及节点电气信息进行总体仿真, 通过对分散测试节点的时间同步性及数据传输控制, 实现对变电站现场多个间隔或整系统的完备运行仿真测试^[3-4]。

如图1所示, 测试系统由控制层及模拟层两部分组成。控制层包括仿真测试平台与控制主机, 主要完成测试数据仿真、全站测试信息汇总、测试命令控制、试验结果分析等工作, 是整个测试系统的核心部分; 模拟层包括多个测试终端, 用于模拟变电站智能设备的信息交互过程, 实现对待测设备的采样输入控制及动作行为监测。

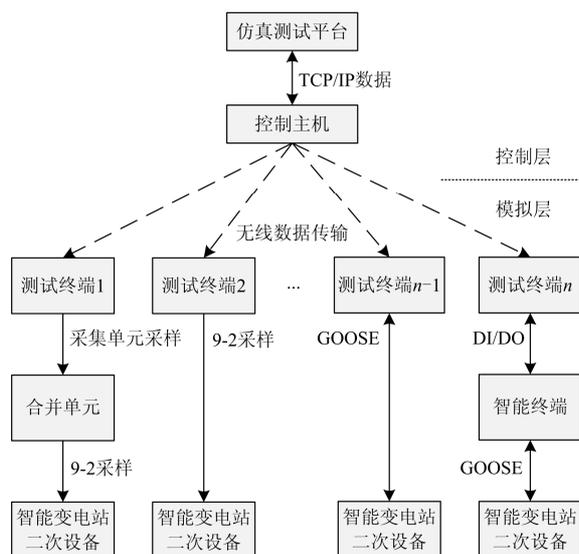


图1 系统架构图

Fig. 1 System architecture diagram

为在智能变电站现场模拟实际运行工况, 并有效检测各智能设备间的逻辑配合关系, 站域测试系统采用了分布式测试模式。按照待测设备实际位置配置测试终端, 单个测试终端只负责与单间隔内智能设备交互测试信息(例如模拟一台电子式互感器的采样输出), 待测设备每个间隔交互的测试数据逻辑关联、通道独立, 保证了设备逻辑检测的真实性。

1.2 无线数据流通信

考虑到变电站现场设备的分布情况, 测试终端与控制主机间相距可能较远, 若两者间采用以太网有线方式通信, 不仅增加了通信线路的铺设成本, 也不利于试验内容的变化。相比而言, 无线网络通信方式不需要额外的通信线路铺设, 系统架构简洁,

测试方式灵活, 更适合智能变电站现场的系统级测试。

目前电力系统常用的无线通信技术包括 GPRS 通用分组无线服务^[5]、3G/4G 移动通信、WLAN 无线局域网接入技术等^[6]。WLAN 支持几百米范围内高速数据传输的无线通信, 传输带宽可达 300Mbps 以上, 在信号较弱或存在干扰的情况下, 带宽可自动调整, 有效保障了数据传输的稳定性和可靠性^[7]。WLAN 传输设备的发射功率较低, 对人体及变电站运行设备影响较小, 同时支持点对点、点对多点连接和中继功能, 可以满足智能变电站站域测试的组网需求。

1.3 关键性问题

电力系统变电站内的网络化同步一般采用 IEEE 1588 网络时钟同步协议, 通过测量线路的路径延时量并计算主从时钟的时间偏移量实现时间同步^[8-9]。

站域测试系统中, 各分布式测试终端间数据时间同步性是测试结果准确的基础^[10]。时钟偏差修正公式基于主从时钟间网络传输延迟对称且稳定的前提, 当传输网络的延迟不确定时, 无法正确计算对应的时钟偏差^[11]。站域测试采用无线通信技术, 现场测试时, 测试终端就地放置, 终端间相隔较远, 基于无线技术的通信干扰较大, 无法采用常规时钟同步方法, 如何解决变电站内所有无线分布式测试终端的时间同步性, 是站域测试的关键问题及技术实现难点。

2 适应于站域测试的同步控制策略

2.1 样本滤波

由于无线通信网络链路不稳定, 易受外部环境及噪声影响, 因此无线数据传输时丢包率较高, 且传输延迟容易被数据多跳传输、数据包调度、传输优先级等因素干扰, 极大影响了 IEEE 1588 同步对时系统的稳定性。

为保证同步调节精度, 需对原始获取的时间样本数据进行算法预处理, 采用数字滤波^[12]获取相对理想的时间样本参数, 主要包括以下 3 个步骤。

(1) MAC 组播地址过滤。主时钟定时在系统内发布同步报文, 从时钟启用 HASH 表算法实现 MAC 组播地址过滤, 只订阅来自主机目的 MAC 地址的报文, 降低处理芯片的资源占用率。

(2) 边界数据滤除。基于无线信号稳定时数据传输延迟突变边限定, 对相邻样本数据 T_n 和 T_{n+1} 的变化率进行判别, 若连续样本数据偏差值超出最大偏差, 则判定为干扰信息, 应剔除该样本数据并使用前次数据替代; 若小于最大偏差值, 则认为样

本数据正常。具体判据为

$$\begin{cases} T = T_{n+1} & |T_{n+1} - T_n| \leq K \\ T = T_n & |T_{n+1} - T_n| > K \end{cases} \quad (1)$$

式中： T 为本次使用的时间样本； T_n 为前次获取的时间样本； T_{n+1} 为本次获取的时间样本； K 为相邻时间样本的最大偏差值。

(3) 平均路径时间修正。通过长期跟踪最小主从系统的环回延时(即有效延时)来检测最小平均路径时间。每次维护 N 次平均路径时间信息, 对时延进行算术平均修正, 设置合适的 N , 在保证高平滑稳定度的前提下提高延迟滤波响应的灵敏度。计算公式为

$$\begin{cases} T_{vi} = \text{MIN}(T_a, T_b) \\ T_f = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N T_{vi} \end{cases} \quad (2)$$

式中： T_{vi} 为本区域的最小环回延时； T_a 为监测区域首点的时间样本； T_b 为监测区域末点的时间样本； T_f 为本次修正后的路径时间； N 为每次修正的样本点数。

对上述样本滤波算法的实际效果进行验证, 主时钟通过无线网络与从时钟进行应答式往返数据交互, 统计无线数据传输下每次环回的总延迟, 比较原始网络延迟时间(图 2)与滤波后网络延迟时间(图 3)可知: 在无线通信传输模式下, 网络数据传递延迟呈无规律性的正、负双向抖动, 恶劣情况下抖动时间可达到毫秒级别, 若不经数据处理, 直接对样本采用 IEEE 1588 对时算法, 无法实现有效的时间同步收敛。经前述滤波算法对样本数据预处理后, 网络传输延迟变化基本稳定, 抖动时间不大于 $\pm 20 \mu\text{s}$ (大部分抖动时间小于 $\pm 10 \mu\text{s}$), 相比原始样本数据有了明显改善, 可满足后续同步策略的需要, 提高无线以太网数据同步的最终对时精度。

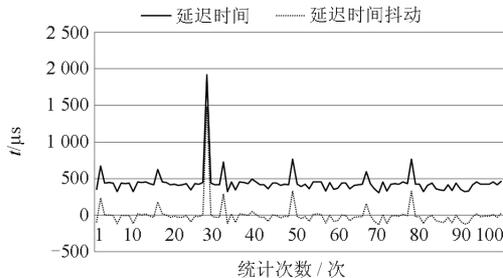


图 2 原始网络延迟时间

Fig. 2 Original network delay time

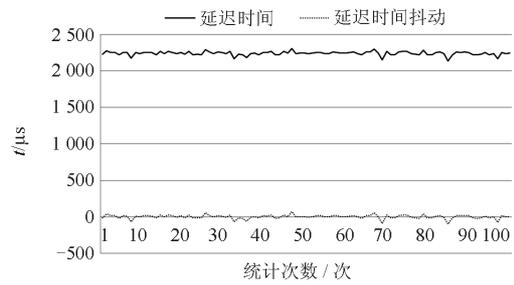


图 3 滤波后网络延迟时间

Fig. 3 Network delay time after filtering

2.2 频率及延迟校正

时钟同步包括时钟频率校正及时钟延迟校正。对于两个异步时钟, 首先需要锁定时钟频率, 保证时钟间变化节拍的一致性, 然后再在统一的时域体系下获取相对时间关系, 并通过逐次逼近的方式补偿时钟延迟差, 实现时钟同步。

(1) 频率校正。通过测量平均路径延时来调整主、从时钟的频率偏差, 如图 4 所示, 主时钟以固定频率向从时钟发送同步报文, 从时钟记录修正后的到达报文频率, 计算频率修正系数为

$$C_n = \frac{T'_n - T'_{n-1}}{T_n - T_{n-1}} \quad (3)$$

式中： C_n 为本次频率修正系数； T'_n 为从时钟本次获取的报文到达时刻； T'_{n-1} 为从时钟前次获取的报文到达时刻； T_n 为主时钟本次报文发送时刻； T_{n-1} 为主时钟前次报文发送时刻。

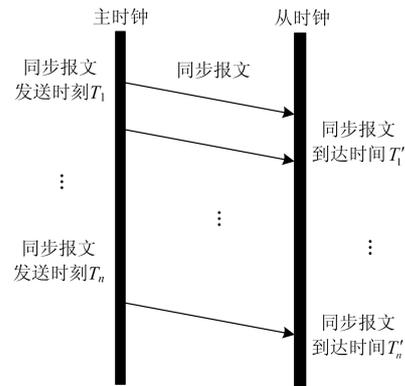


图 4 频率校正

Fig. 4 Frequency correction

从时钟通过频率修正系数对自身时钟频率进行离散点修正, 为防止过调振荡, 应采用平滑的调节方法, 如式(4)所示。

$$f_n = f_{n-1} + K \times \left(\frac{f_{n-1}}{C_n} - f_{n-1} \right) \quad (4)$$

式中: f_n 为本次校正后频率; f_{n-1} 为前次校正后频率, K 为调节系数; C_n 为本次频率修正系数。

(2) 延迟校正。使用同步报文和延时请求报文来进行时间校正, 获取主、从时钟间环回延迟。如果测量延迟大于平均路径时间, 则该次测量值可能包含报文传输延迟抖动, 不使用该值进行校正; 反之则测量延迟有效, 从时钟通过多次延迟计算消除与主时钟的延迟差, 实现延迟校正。

2.3 时域跟随

在点对多点网络拓扑下, 为保证多个从时钟与主时钟的时钟一致性, 需采用快速分时的同步应答机制。当无线通信网络不稳定或从时钟数量较多时, 单个从时钟可能会因为短时的同步链路异常导致时钟失步, 为避免这种情况, 从时钟需具备时域跟随能力。

如图 5 所示, 从时钟完成时钟同步后, 按校准后的时钟频率定频产生内部同步脉冲。内部同步脉冲周期随校准时钟频率变化而变化, 同时通过内部高精度晶振对同步脉冲计数, 观察同步脉冲的离散度。当同步脉冲离散度超过测量误差阈值时, 认为时钟同步系统异常, 从时钟进入时域跟随模式, 通过回溯同步脉冲计数模拟主时钟频率, 继续保证从时钟与主时钟的同步一致性。

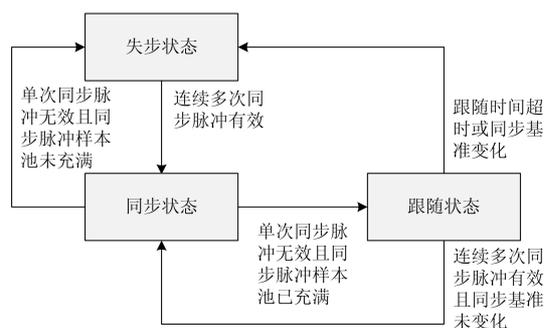


图 5 时域跟随流程图

Fig. 5 Flow chart of time domain following

时域跟随通过计数器均分实现频率锁定及内部中断间隔调节。从时钟频率由回溯的同步脉冲计数值决定, 与硬件晶振频率无关, 解决了无线通信系统链路不稳定时带来的同步精度跳变, 硬件锁频效果不佳等问题, 提高了无线环境下系统长期运行时同步的稳定性。

3 方案实现

无线站域测试系统的控制主机及测试终端均采用 PowerPC 与 FPGA 结合的双处理器嵌入式架构。PowerPC 负责同步策略控制、数据组织、无线网桥

通信、人机接口控制; FPGA 主要完成底层硬件驱动、内部时钟维护、数据编解码等功能。

控制主机上电运行后, 循环向无线网络发送同步对时报文; 测试终端自动订阅同步报文并与控制主机进行同步协议交互。具体同步控制策略如图 6 所示, 从时钟通过组播 MAC 地址过滤接收主时钟同步报文, 计算主、从时钟的环回延迟时间, 对时间样本进行数字过滤, 获取修正的平均路径延迟, 并对从时钟进行频率和延迟校正, 当从时钟与主时钟间频率一致且延迟收敛小于阈值后, 完成时钟同步, 同时持续监测同步离散度, 在同步异常时进入时域跟随状态, 保证主、从时钟同步的长期一致性。

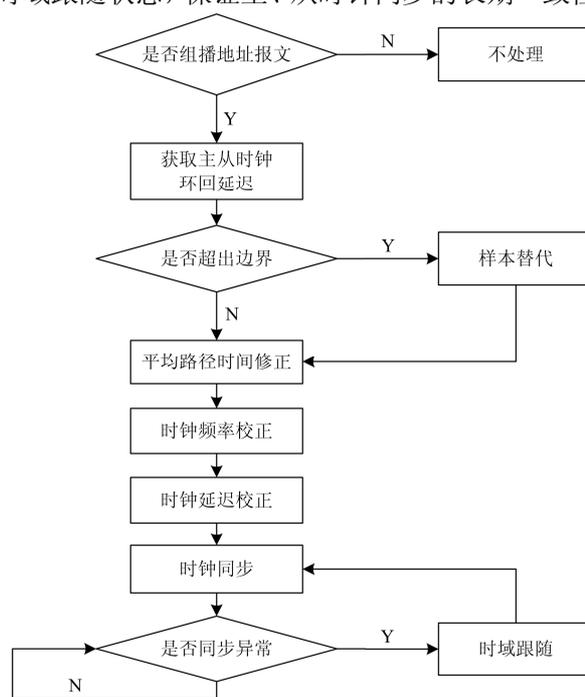


图 6 同步控制策略

Fig. 6 Synchronization control strategy

4 实验测试

采用图 7 所示接线方式对系统的同步效果进行验证, 控制主机将虚拟的电子式互感器采集单元采样值数据通过无线方式发送至三台测试终端, 测试终端再将采样值按配置的协议编码后输出至合并单元校验仪, 改变控制主机与测试终端的间隔位置, 通过合并单元校验仪记录测试终端输出结果。

在室内进行测试, 主机与各测试终端放置在同一房间内, 间距约 10 m, 无线传输路径间无阻碍。所有终端输出数据配置为“自定义”、“单相电流互感器”, “电流幅值” 1 000 A, “电流相位” 0°, “频率” 50 Hz。以测试终端 1 作为相位基准, 观测的实验记录如表 1 所示。

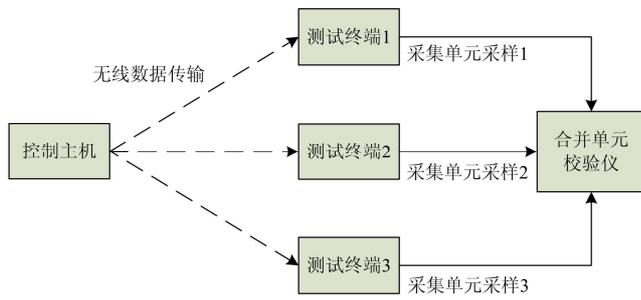


图 7 测试系统接线图

Fig. 7 Wiring diagram of test system

表 1 室内 10 m 测试数据

Table 1 Test data of indoor 10 m

序号	无线强度/ dBm	频率/ Hz	有效值/ A	相位/ (°)	延迟/ μs
终端 1	-33	50.000	707.062 5	/	/
终端 2	-21	50.000	707.062 3	0.002 3	0.128
终端 3	-26	50.000	707.062 3	-0.013 3	-0.739

在室内进行测试，主机与各测试终端放置在不同房间，间距约 50 m，无线传输路径间穿越两堵墙。以测试终端 1 作为相位基准，观测的实验记录如表 2 所示。

表 2 室内 50 m 测试数据

Table 2 Test data of indoor 50 m

序号	无线强度/ dBm	频率/ Hz	有效值/ A	相位/ (°)	延迟/ μs
终端 1	-51	50.000	707.063 6	/	/
终端 2	-59	50.000	707.065 0	-0.153 8	-8.544
终端 3	-65	50.000	707.063 7	-0.092 5	-5.139

在室外进行测试，主机与各测试终端间距约 200 m，无线传输路径间无明显阻碍。以测试终端 1 作为相位基准，观测的实验记录如表 3 所示。

表 3 室外 200 m 测试数据

Table 3 Test data of outdoor 200 m

序号	无线强度/ dBm	频率/ Hz	有效值/ A	相位/ (°)	延迟/ μs
终端 1	-67	50.000	707.064 1	/	/
终端 2	-62	50.000	707.063 3	-0.081 7	-4.539
终端 3	-73	50.000	707.069 3	-0.144 9	-8.050

由实验数据可知：在各种测试环境下，经同步控制算法处理后输出的虚拟采样值稳定，输出有效值误差不大于±0.1%，输出相位差不大于±0.2°，符合数字化继电保护试验装置技术规范要求。控制主机与测试终端在室外 200 m 范围内同步精度稳定，同步后的最大复合延迟差(包含校验仪比对误差)

不大于 10 μs，可满足智能变电站现场站域测试对同步精度的需求。

5 结论

智能变电站采用数字化采样值传输方式，传统测试手段无法检查其复杂的信息组织和分配关系，难以实现对变电站二次系统功能的准确认定，给智能变电站的调试运行工作带来了安全隐患。本文针对智能变电站的测试需求，提出了适用于点对多点无线传输系统的同步控制策略，基于该技术实现的站域测试系统同步性能良好，能满足继电保护现场测试需求，可极大提高智能变电站测试的可靠性及准确性，对智能变电站测试体系的发展具有重要意义。

参考文献

[1] 孟恒信, 梁旭, 刘愈倬, 等. 数字化变电站继电保护闭环实时仿真系统研究[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 198-203.
MENG Hengxin, LIANG Xu, LIU Yuzhuo, et al. Research on closed loop real time simulation system of relay protection for digital substation[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 198-203.

[2] 浮明军, 刘昊昱, 董磊超. 智能变电站继电保护装置自动测试系统研究和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 40-44.
FU Mingjun, LIU Haoyu, DONG Leichao. Research and application of relay protection automatic test system for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 40-44.

[3] 井实, 黄琦, 甄威, 等. 面向智能变电站全场景试验的无线时钟同步方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 103-109.
JING Shi, HUANG Qi, ZHEN We, et al. A new wireless time synchronization approach for whole-view test system in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 103-109.

[4] 纪陵, 李忠明, 蒋衍君, 等. 智能变电站二次系统仿真测试和集成调试新模式的探索和研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 119-123.
JI Ling, LI Zhongming, JIANG Yanjun, et al. Exploration and research of smart substation secondary system simulation testing and integration testing new mode[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 119-123.

[5] 谢黎, 黄国方, 沈健. 数字化变电站中高精度同步采样时钟的设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 61-65.
XIE Li, HUANG Guofang, SHEN Jian. Design of high

- accuracy synchronous sampling clock in digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 61-65.
- [6] 翟章. 无线通信技术在电力通信中的应用[J]. 电力系统通信, 2006, 27(163): 1-2.
ZHAI Zhang. Hotspots of wireless communication technique and application prospect in electric power communication network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2006, 27(163): 1-2.
- [7] 李霞. 无线局域网(WLAN)标准与实现[J]. 计算机与数字工程, 2005, 33(1): 125-128.
LI Xia. Criterion and realization of wireless LAN (WLAN)[J]. Computer & Digital Engineering, 2005, 33(1): 125-128.
- [8] 李俊刚, 刘星, 张爱民, 等. 智能变电站 IEEE1588 时钟同步冗余技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 97-101.
LI Jungang, LIU Xing, ZHANG Aimin, et al. Research on redundant technology of IEEE1588 clock synchronization system in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 97-101.
- [9] 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): 137-141.
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): 137-141.
- [10] 胡伟, 翟正军. 网络化混合测试系统中的时间同步机制研究[J]. 测控技术, 2008, 27(12): 59-61.
HU Wei, ZHAI Zhengjun. Research on time synchronization of network mixed-test system[J]. Measurement & Control Technology, 2008, 27(12): 59-61.
- [11] 胡永春, 张雪松, 许伟国, 等. IEEE 1588 时钟同步系统误差分析及其检测方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 107-111.
HU Yongchun, ZHANG Xuesong, XU Weiguo, et al. Error analysis and detection method for IEEE 1588 clock synchronization system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 107-111.
- [12] 凌忠兴. 嵌入式系统中数字滤波的算法及软件流程[J]. 电测与仪表, 2007, 44(493): 58-61.
LING Zhongxing. Digital filtering algorithm and software flow in embedded system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44(493): 58-61.

收稿日期: 2015-12-24; 修回日期: 2016-02-24

作者简介:

林国新(1971-), 男, 高级工程师, 从事电力系统及其自动化的技术研究与管理工; E-mail: lin_guoxin3181@sina.cn

唐志军(1973-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护及自动化技术方面的研究; E-mail: 13705004007@139.com

翟博龙(1986-), 男, 硕士, 工程师, 从事智能变电站技术与继电保护试验方面的研究。E-mail: zhaibolong@163.com

(编辑 葛艳娜)