

智能变电站网络对时测试研究

张清枝¹, 左群业², 何刚², 张保善²

(1. 新乡学院机电工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 智能变电站使用网络对时方式。对时精度测试是肯定测试的重点, 对时可靠性测试则是容易忽略的问题, 在否定测试时应重点考虑, 因此, 为了测试网络对时软件的可靠性, 针对目前广泛应用的 SNTP 网络对时, 设计了否定测试用例, 并结合用例开发了网络对时模拟服务器和模拟客户端这两个测试工具, 应用工具发现了相关的软件缺陷, 并加以分析解决。提出的网络对时测试技术及相关问题分析对智能变电站中其他网络对时方式的测试也有借鉴意义。

关键词: 智能变电站; 网络对时; 否定测试; 测试工具; 测试环境

Research of networked correction time test on smart substation

ZHANG Qing-zhi¹, ZUO Qun-ye², HE Gang², ZHANG Bao-shan²

(1. Mechanical and Electrical Engineering Institute, Xinxiang University, Xinxiang 453003, China;
2. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: Smart substation uses the networked correction time. The precision of correction time is the emphasis of positive test, but the reliability test on correction time is ignored easily, which should be the emphasis of negative test. In order to test the reliability of the software on networked correction time, and in view of currently widely used SNTP network correction time, negative test cases are designed, and combining which the stimulant SNTP server and the stimulant SNTP client are developed, and applying these testing tools, some bugs are discovered and amended. The testing technology on networked correction time and the analysis of the correlative problem are significant for testing the other modes of networked correction time in smart substation.

Key words: smart substation; networked correction time; negative test; test tool; test environment

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0237-04

0 引言

IEC 61850 标准要求智能变电站采用网络协议对时方式, 时间同步协议依赖于所选择的 SCSSM, 网络对时协议有 SNTP、IEEE 1588 PTP 等, 目前主要采用 SNTP 网络对时协议^[1]。智能变电站由于要求更高的实时性, 以及与站外有协同互动功能, 必须要有精确的绝对时标^[2], 对时功能的重要性提高了。在对 SNTP 对时功能进行测试过程中, 对时精度测试等肯定测试的方法成熟, 测试充分, 而对时可靠性测试也应得到重视, 对时可靠性测试主要包括对时报文丢帧、报文延时时间较长等否定测试, 测试中遇到了现有测试工具无法模拟对时报文延时响应、丢帧等异常情况的问题, 由此也无法测试数字化保护装置处理 SNTP 对时报文的可靠性, 影响了测试的全面性, 因此设计开发了 SNTP 对时模拟服务器/客户端, 解决了智能变电站装置在网络对时

测试中, 对时报文延时响应、丢帧等异常情况的仿真测试问题。通过本工具的应用, 发现并解决了某保护装置时钟走时不准确的问题, 保证了智能变电站间隔层设备对时软件、SNTP 时间服务器主时钟软件的可靠性。

1 网络时间协议分析及其测试简介

本节以常用的 SNTP 为例, 介绍其工作过程。

1.1 SNTP 协议工作模式

可以使用单播、广播或多播模式进行工作。其中最常用的是单播工作模式。智能变电站采用本地局域网内部部署 SNTP 服务器, 一般采用带有 SNTP 功能的 GPS 卫星时钟作为外部高精度时间源。下面以最常用的 SNTP 单播工作模式, 来说明 SNTP 的工作过程。

SNTP 协议单播工作模式采用客户端/服务器 (Client/Server) 工作方式。服务器通过接收 GPS

信号作为系统的时间基准，客户端通过定期访问服务器提供的时间服务获得准确的时间信息，并调整自己的系统时钟，达到网络时间同步的目的。

1.2 单播模式工作原理简介

SNTP 网络对时最典型的授时方式是客户端/服务器方式。如图 1 所示， T_1 为客户发送 SNTP 请求时间戳(以客户时间为参照)； T_2 为服务器收到 SNTP 请求时间戳(以服务器时间为参照)； T_3 为服务器回复 SNTP 请求时间戳(以服务器时间为参照)； T_4 为客户收到 SNTP 回复包时间戳(以客户时间为参照)； d_1 为 SNTP 请求包传送延时； d_2 为 SNTP 回复包传送延时； t 为服务器和客户端之间的时间偏差， d 为 SNTP 包的往返时间。

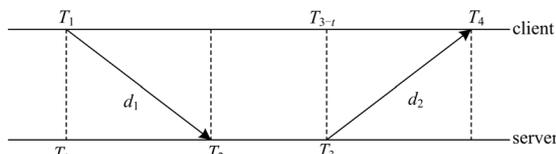


图 1 Client/Server 方式下 SNTP 授时原理

Fig.1 Principle on client/server of SNTP

现已知 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 ，希望求得 t 以调整客户端时钟，即理论上可得出最终的结果 t 、 d 与服务器处理请求所需的时间无关^[3]。

1.3 误差分析

IEC 61850 标准对保护装置的时钟精度要求为：事件时标要求精度 $\pm 1.0\text{ ms}$ ^[4]。网络对时过程中，误差原因主要有三种：1) 晶振偏移；2) 网络抖动；3) 软件编制不当导致误差，即网络对时软件编制缺陷 (bug) 引起的有关误差。由于软件缺陷导致对时误差的地方还是很多，有些甚至会引起较大的误差。例如，某工程在更新装置时钟的时间值时，发现并没有立即更新，而是延迟了一段时间之后才更新，这种延迟在程序中引起误差达到 1 s。本文主要对第三种原因进行测试技术研究。

2 对网络对时客户端的测试研究

对网络对时客户端对时功能和性能的测试可分为肯定测试和否定测试，肯定测试侧重于精度测试，在一般测试工作中能注意到，而否定测试容易被忽略，保护装置(对时客户端)也容易因此存在质量隐患，因此首先简要介绍肯定测试，再重点论述否定测试。

2.1 对 SNTP 单播模式客户端的肯定测试

测试对象是智能变电站间隔层继电保护装置，其作为 SNTP 客户端，标准时钟源如 GPS 作为 SNTP 服务器，客户端从服务器取标准时间。对客户端的

肯定测试的内容主要包括^[5]：1) 保护装置接收网络对时的功能及其对时精度；2) 网络负荷对单播对时的影响。测试方法是通过测试 SOE 分辨率的方法间接验证 SNTP 对时精度，或采用 GPS 装置的以太网口与智能装置的以太网口连通，同时将 GPS 的秒脉冲接入智能装置的开入，智能装置的开入变位信息应在整秒发出，误差不大于 1 ms 为合格(如图 2)。

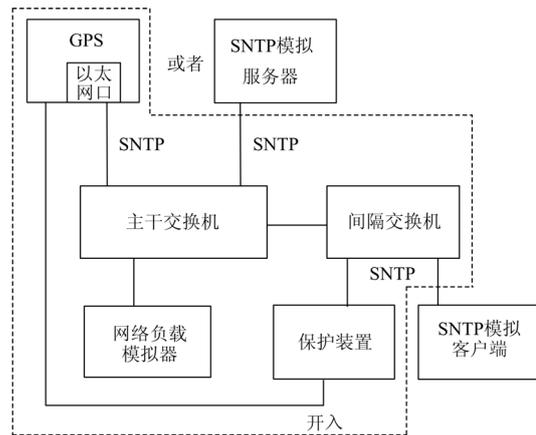


图 2 网络对时协议 SNTP 测试环境

Fig.2 Test environment on SNTP

测试环境说明：图 2 中虚线框为肯定测试所用环境，主要进行 SNTP 对时功能及对时精度的验证。对时系统的网络采用 100 M 以太网结构，可同时测试 SNTP 服务器和客户端的软件功能及性能，其中数字化保护装置作为 SNTP 客户端，GPS 作为 SNTP 服务器。验证 SNTP 服务器(如 GPS 装置)与多台保护装置进行 SNTP 对时的稳定性，是典型的 SNTP 肯定测试环境。其中仅用 SNTP 模拟服务器代替实际服务器，即可对客户产品进行否定测试；仅增加 SNTP 模拟客户端，即可对服务器产品进行压力测试。

2.2 对客户端的否定测试及其测试用例设计

智能变电站保护装置目前在实际工程应用中，主要采用 SNTP 网络单播对时方式，测试保护装置(SNTP 客户端)的对时功能时，采用支持 SNTP 的 GPS 作为 SNTP 服务器端，能测试装置发出 SNTP 对时请求报文，以及 GPS 发回 SNTP 响应报文的正确性。目前应用的 GPS 作为成熟的产品，只要装置发出的 SNTP 请求报文正常，GPS 一般情况下都会正确地立即发回响应报文，因此，对装置测试而言，用现成的 GPS 无法模拟 SNTP 响应报文异常情况下，装置能否正确反应，除非 GPS 或对时网络受到强干扰等情形，而且所产生的效果不可预知，即采用 GPS 装置来测试装置仅可覆盖 SNTP 对时功能和

性能的正常的肯定测试用例, 不能模拟异常的否定测试用例。

虽然理论上最终的对时结果与服务器处理请求所需的时间无关, 但客户端发出请求对时报文后, 无法明确较长时间收不到响应报文是由于服务器还未收到请求报文, 还是服务器处理请求报文较慢, 还是请求报文已在网络传输过程中丢失, 客户端软件如果对这些请求超时情况处理不当, 就可能产生对时问题, 因此有必要设计异常测试用例来验证客户端的对时功能。

异常测试用例设计包括: 1) SNTP 响应报文不是在收到请求报文后, 就立即发出, 而是延时 (如 1 s) 发出; 2) 服务器不响应 SNTP 请求报文等。例如针对第一种异常测试用例, 可设计为: 服务器接收到客户端发送的请求报文后, 不是实时响应, 而是延时 1 s 发送响应报文。用来验证客户端对响应报文的接收、处理等功能。预期结果为, 客户端发送完成请求报文后, 直到接收到来自服务器的响应报文, 然后计算出时钟偏差校正自己的时钟。

2.3 SNTP 模拟服务器在对时可靠性测试中的应用

为了模拟现场由于 GPS 受到干扰或网络延时等原因出现的 SNTP 响应报文延时发出或丢帧等情况, 专门设计开发了 SNTP 模拟服务器工具。

该模拟服务器按照单播模式进入侦听响应状态, 实时响应来自 SNTP 客户端的请求报文。在响应处理中可根据通过人机界面设定的延时参数, 延时发送响应报文。该模拟服务器的主要功能有: 1) 该工具开始运行即进入 SNTP 正常响应处理过程中, 除非通过按钮启动延时响应或者不响应等逻辑。2) 能按照所设置的 SNTP 报文延时响应时间及次数, 根据测试需求, 随时手动启动模拟延时响应 SNTP 报文。3) 模拟不响应报文, 并可根据测试需要随时恢复响应报文; 4) 可根据事先设置好的延时时间和频度, 自动运行 SNTP 服务端。例如每 3 min 就产生一次延时 1 s 响应。该功能可用于正常测试和拷机测试中。5) SNTP 模拟服务器可模拟与外部时钟源失去同步, 而把报文中 Stratum 字段置为 0。客户端应能识别服务器端的故障, 一旦发现收到 Stratum 字段为 0, 应立刻丢弃服务器发来的时间戳信息, 转向其他备用服务器取时间, 以避免授时错误。

利用该网络对时模拟服务器进行否定测试, 测试被测客户端装置对延迟收到来自服务器的响应报文、丢帧等否定测试用例的处理机制, 即模拟服务器端延时 1 s 响应客户端请求报文, 结果发现了某数字化保护装置 (单播请求周期 10 s) 在收到一帧

已经延时 1 s 的 SNTP 响应报文后, 装置 (SNTP 客户端) 走时比 SNTP 服务器慢 10 s 的问题。测试结果与预期结果不一致。

2.4 保护装置对时问题分析及解决

通过分析保护装置与服务器网络对时配合情况, 得出了引起上述问题的原因并及时解决。具体问题分析如图 3 所示。

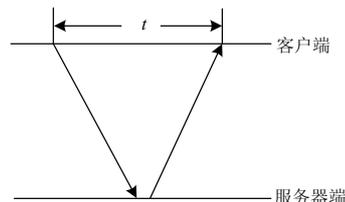


图 3 客户端 (保护装置) 对时算法问题分析

Fig.3 Analysis on relay device correction time arithmetic

如果客户端发出 1 次请求对时报文后延时 t 大于 1 s 才收到来自服务器的响应报文, 客户端则认为请求超时, 不对客户端本地时钟进行校时, 但本次服务器响应命令还留在客户端, 未释放, 当客户端下一次请求时, 就用上一次的响应命令来对本身时钟校时, 则导致时间晚一个响应周期 10 s。解决方法: 1) 每次发请求之前, 清空接收命令缓存, 直到收到新响应报文; 2) 客户端若判断出接收到响应报文的时刻与最近一次发出请求报文的时刻差值大于一个请求对时周期, 则舍弃该响应报文不采用, 而采用下一次收到的响应报文。

3 对网络对时服务器的测试研究

测试对象为网络对时服务器时, 需要设计异常测试用例以及相应的模拟客户端。其异常用例主要用于压力测试, 异常用例为: 多个客户端同时请求 SNTP 服务器 (如带 SNTP 服务器的 GPS) 时, 测试服务器的处理能力即稳定性。即多个客户端同时请求 SNTP 服务器 (如带 SNTP 服务器的 GPS) 时, 服务器不应死机或者不响应。

根据设计的异常测试用例, 设计开发了 SNTP 模拟客户端。在单播模式下根据设置的单播请求周期, 向 SNTP 服务器发送请求命令, 单播周期的设置范围为从 10 ms 到几十秒。SNTP 模拟客户端还可以同时产生 SNTP 流量和非 SNTP 流量; 可显示客户端对应于 SNTP 服务器的时钟偏移量。SNTP 模拟客户端内置的实时协议分析解码软件可以对 SNTP 报文直接进行编辑或者解码, 在测试过程中可以实时显示各种详细的网络对时报文统计信息, 测试统计信息内容有: 时间戳统计并保存; 发送的单播请求报文数量、接收的单播请求报文数量;

发送的单播响应报文数量、接收的单播响应报文数量。该网络对时模拟客户端，可在线设置对时周期（例如从 10 ms 到 50 s 等）。

应用该模拟客户端，发现了某 GPS（带 SNTP 服务器）在多客户端短小时内大量请求的情况下，不再响应 SNTP 请求报文的问题。在图 2 所示环境中为了增大对被测 SNTP 服务器的压力，增加计算机为 SNTP 模拟客户端，该对时模拟客户端的单播请求周期设置为 10 ms，此时被测服务器（GPS）的 SNTP 流量为 130 次/s 左右（ARP 和 UDP 报文数量为 200 帧/s 左右），运行 15 min 左右会出现被测服务器不再响应 SNTP 请求的现象。不满足“SNTP 请求量：500 次/s”的要求。

经分析发现是由于该对时服务器（GPS）程序中资源消耗迅速，响应栈未响应，原因是上次还未处理完，故以后的请求命令都未处理。解决方法是：若本次处理未结束，则下一次来的请求命令就被缓存，等待被处理。

4 结论

通过进行智能变电站网络对时客户端/服务器的测试研究，设计开发了 SNTP 模拟客户端/服务器应用于否定测试，可根据需要模拟响应报文延时或丢弃，测试 SNTP 请求/响应报文丢帧对被测设备（服务器/客户端）的影响；在请求或响应报文中增加错误数据包，验证被测设备的检测与处理能力。这些对智能变电站网络化对时（如 SNTP、IEEE 1588 等对时方案）的可靠性和冗余性设计及其测试都有借鉴意义，提高了测试效率和测试全面性。

参考文献

[1] DL/T 860.72-2004 (IEC 61850-7-2) 变电站通信网络和系统第 7-2 部分：变电站和线路（馈线）设备的基本通信结构 抽象通信服务接口（ACSI）[M]. 北京：中国电力出版社，2002.

（上接第 236 页 continued from page 236）

[11] 周念成, 谭桂华, 何建森, 等. 基于统计方法的电网谐波状态估计误差分析[J]. 电工技术学报, 2009 (6): 109-114.
ZHOU Nian-cheng, TAN Gui-hua, HE Jian-sen, et al. Error analysis in harmonic state estimation of power system based on the statistical approach[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009 (6) : 109-114.
[12] 周念成, 谭桂华, 赵渊, 等. 一种计及参数误差的电网谐波状态估计方法[J]. 重庆大学学报, 2009 (2) :30-34.
ZHOU Nian-cheng, TAN Gui-hua, ZHAO Yuan, et al. A

DL/T 860.72-2004 (IEC 61850-7-2) basic information and communication structure-abstract communication service interface (ACSI) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
[2] DL/T 860.81 (IEC 61850-8-1) 变电站通信网络和系统第 8-1 部分：特定通信服务映射（SCSM）映射到制造报文规范MMS[M]. 北京：中国电力出版社，2002.
DL/T 860.81 (IEC 61850-8-1) communication networks and systems for power utility automation-part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM) - mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
[3] 黄沛芳. 基于 NTP 的高精度时钟同步系统实现[J]. 电子技术应用, 2009, 35 (7): 55-57.
HUANG Pei-fang. Implementation of high-precision clock synchronous system based on NTP[J]. Application of Electronic Technique, 2009, 35 (7): 55-57.
[4] DL/T 860.10 (IEC 61850-5) 变电站通信网络和系统第 5 部分：功能通信要求和装置模型[M]. 北京：中国电力出版社，2002.
DL/T 860.10 communication networks and systems for power utility automation-part 5 : Communication requirements for functions and device models[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
[5] DL/T 860.10 (IEC 61850-10) 变电站通信网络和系统第 10 部分：一致性测试[M]. 北京：中国电力出版社，2002.
DL/T 860.10 communication networks and systems for power utility automation-part 10: conformance test[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

收稿日期：2009-12-05； 修回日期：2010-03-30

作者简介：

张清枝（1970-），女，副教授，硕士，研究方向为电力系统控制、网络等；

左群业（1975-），男，工程师，硕士研究生，主要从事电力系统通信及变电站自动化产品开发与测试；E-mail: qunyez@xjgc.com

何刚（1980-），男，工程师，本科，主要从事电力系统通信及变电站自动化产品开发与测试。

method for considering parameter errors in power system harmonic state estimation[J]. Journal of Chongqing University, 2009 (2) : 30-34.

[13] Chakphed Madtharad, Suttichai. An optimal measurement placement method for power system harmonic state estimation[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2005, 20 (2): 1514-1521.

收稿日期：2010-04-10

作者简介：

王艳松（1965-），女，博士，教授，研究方向为电能质量分析、配电网优化规划和配电网故障诊断。E-mail: hdjd@upc.edu.cn