

IEEE1588v2 时间同步技术在新一代电力骨干网中应用研究

吴维农, 唐 奔, 卓 灵

(国网重庆市电力公司信息通信分公司 技术发展部, 重庆 400014)

摘要: 针对传统的时钟同步方法已经无法适应新一代电力系统对时钟同步提出的更高要求, 引入了一种能达到亚微秒级同步精度的 1588v2 时间同步技术, 可以完全满足新一代电力系统中数字化变电站等电力二次终端设备高精度时间同步的要求; 在对 OTN 和 PTN 进行同步技术分析的基础上, 提出了基于 OTN+PTN 统一同步网络组网模型的应用场景, 探讨了 1588v2 时钟信号在混合网络中的传递方式, 并在现网中进行了时间同步性能测试验证, 时间精度优于 ± 100 ns; 研究表明, 基于 1588v2 时间同步技术的 OTN+PTN 组网模型能够满足电力系统业务的同步需求。

关键词: 1588v2; OTN; PTN; 时间同步

Application and Research of IEEE1588v2 Time Synchronization Technology in New Generation of Power Backbone Network

Wu Weinong, Tang Tao, Zhuo Ling

(Technology Development Department, State Grid Chongqing Power Information & Communication Branch Company, Chongqing 400014, China)

Abstract: As the traditional clock synchronization technique has been unable to meet higher requirements of clock synchronization in new generation of power system, this paper introduces a method of 1588v2 time synchronization technology, which could reach sub-microsecond level of synchronization accuracy and completely meet the requirements of higher time synchronization precision proposed by power two terminal equipments such as digital substation in new generation of power system. Based on Synchronization Technology Analysis of OTN and PTN, it puts forward the application of the unified synchronous network model based on OTN and PTN, discusses the transmission mode of 1588v2 clock signal in the hybrid network, tests and verifies the synchronization performance of the existing network, time accuracy is better than ± 100 ns. The research results show that OTN and PTN network model based on 1588v2 time synchronization technology can satisfy the synchronization requirements of power system operation.

Keywords: 1588v2; OTN; PTN; time synchronization

0 引言

近年来, 面对经济社会的迅速发展, 科学技术的全面进步以及全球资源和环境问题的日益突出, 积极开展智能电网技术的研究, 加快推进特高压电网的建设, 是电网发展的必然趋势。随着智能电网综合建设工程的研究和实践中, 在数字化变电站、配电网自动化、大区域电网安全稳定控制、超临界机组并网互联、广域向量测量、灵活交流输电及智能电表应用等领域方面得到了广泛的应用, 而这些自动化领域的配合工作需要有一个精确统一的时钟基准^[1]。因此, 提供一个标准的时钟基准成为整个电力系统的迫切需要, 时间统一性是保证电力系统安全运行的重要措施, 对未来新一代智能电网的建设越来越重要。

目前, 在传统电力系统时间不能够达到完全统一, 各系统在时间描述方面存在较大差异, 时间精度差异大, 难以准确描述时间顺序, 给电网故障的分析带来了一定困难。没有有效的技术手段对众多对时装置的时间准确度、控制和校准工作态

度、保证自动化装置接收时间同步信号等进行全网统一监管, 更难满足未来电力自动化、智能化及电网安全、可靠和高质量运行对时间精度的要求^[2]。

2004 年, 国际电工委员会 (international electro technical commission, IEC) 颁布了基于以太网的变电站通信网络和系统的国际标准 IEC61850, 其第二版已经应用到变电站之外的其他领域, 涵盖了电力公用事业自动化的各个方面^[3]。该标准针对智能电子设备时钟精度的要求, 把时钟功能划分为 5 个等级 (T1~T5), 其中最高等级 T5 的精度要求达到 $\pm 1 \mu\text{s}$ ^[4]。如果将达到微秒级精度的 IEEE1588 协议引入变电站系统, 就能很好地满足 T5 级的精度要求。2004 年 5 月, IEC 将 2002 年 11 月颁布的 IEEE 1588v1 采用为 IEC 61588^[5]。因此, IEC61588 标准成为了智能变电站内新的网络时间同步协议标准, IEEE1588 时间同步技术将广泛应用于基于以太网通信架构的保护、控制、自动化和数据通信应用的电力通信系统中^[6]。

1 新一代电力系统对时间统一性要求

在智能电网建设的推动下, 电网配电自动化、集抄业务及办公自动化进一步发展, 该类业务主要为大颗粒 IP 业务, 突发性强, 需要传送带宽具有良好的共享能力, 而传统的传送技

收稿日期: 2013-12-16; 修回日期: 2014-03-09。

作者简介: 吴维农 (1965-), 男, 四川成都人, 高级工程师, 主要从事电力系统通信方面的工作。

术,业务带宽固定分配,业务突发时带宽无法共享,面对传统传送网络建设成本高、传送效率低下、带宽不足等问题,国家迫切需要建设未来新一代电力通信网络。伴随着全 IP 传送网络进程的加快,出现了以 PTN (分组传送网, Packet Transport Network)、OTN (光传送网, Optical Transmission Network) 为代表的新一代光网络传送技术,逐渐成为光传送的主流产品。PTN 技术完美地结合了大容量分组交换/标签交换技术、QoS 机制的数据技术与 OAM 管理传输技术,具有小颗粒 IP 业务的灵活接入、业务的汇聚收敛优势,而不擅长传送大颗粒业务。OTN 技术解决了 IP 业务的超长距离、超大带宽传输的问题,可以为 10 Gbit/s、40 Gbit/s,甚至 100 Gbit/s 等大颗粒业务提供传输通道^[7],但其带宽利用率不高,难以对小颗粒业务进行处理。因此,无论从未来网络业务 IP 化,还是从电力远距离、大规模输送,这两种传送体制的结合,将最大限度满足经济快速发展对电力通信的需求。

在未来新一代电力通信系统中,PTN 设备定位在汇聚层和接入层,而 OTN 设备定位于骨干/核心层。目前,大多数 PTN、OTN 设备厂家均支持 1588v2 时间同步功能,因此,在大容量光网络设备组网的承载网中,应用 1588v2 时间报文传递时间同步信息具有如下优势:

- 1) 高精度时钟同步 (<1 μs);
- 2) 复用以太网络,无需要单独铺设电缆 (相对于 GPS、IRIG_B);
- 3) 使用 BMC 算法获得很好的容错能力;
- 4) 设备侧实现相对容易;
- 5) 减少对 GPS 的依赖。

2 1588v2 时间同步技术

2.1 1588v2 系统结构

IEEE1588 标准的全称是“网络测量和控制系统的精密时钟同步协议标准 (IEEE 1588 Precision Clock Synchronization Protocol)” 简称为 PTP (precision time protocol)。目前已经发展到 v2 版本,同步精度可以达到次微秒级。是通用的提升网络系统定时同步能力的规范,使分布式通信网络能够具有严格的定时同步。PTP 作为一种主从同步系统,将整个网络内的时钟分为三种,即普通时钟 (ordinary clock, OC),边界时钟 (boundary clock, BC),透明时钟 (transparent clock, TC)。OC 设备只有一个 PTP 通信端口,只能作为 Slave (从端口) 或 Master (主端口),通常是网络始端或终端设备。BC 设备有多个 PTP 通信端口,其中一个端口作为 Slave,其它端口作为 Master,每个端口提供独立的 PTP 通信,该设备系统频率和时间同步于上一级设备,可以实现逐级的时间传递,通常用在网络中间节点时钟设备 (如交换机和路由器) 上。TC 设备可分为 E2E TC (End to End TC) 和 P2P TC (Peer to Peer TC) 两种,通过计算报文在中间网络设备内驻留时间,修正时间戳信息,测量端口链路延时,从而实现主从间精确时间同步,通常作为网络中间透传时钟设备^[8]。

2.2 1588v2 同步过程

在 PTP 系统的同步过程中,首先,根据最优时钟 BMC (best master clock) 算法选取最优时钟,协商 PTP 通信端口的主从状态,建立主从关系。在主从关系建立之后,就可以进行频率同步和时间同步,主时钟设备周期性发布携带 1588v2

时间同步协议及时间信息的报文,从时钟设备接收主时钟设备发来的时间戳信息,通过记录主从时钟设备之间事件报文交换时产生的时间戳,计算出主从时钟设备之间的路径延迟和时间偏移,调整本地时间,实现主从时钟设备的频率与相位同步^[9-10]。这里应考虑计数器的频率准确性和时钟链路的对称性对 1588v2 时间同步传递精度的影响。

2.3 1588v2 传输模式

在 OTN 和 PTN 传送网络中,1588v2 实现时间同步传送主要有 BC 和 TC 两种模式。从理论上讲,在 BC 模式下,多级 BC 串联会导致每级主时钟和从时钟端口之间误差的累加,到末端的时间偏差可能会比较大,在时钟恢复过程中会引入漂移。在 TC 模式下,对节点级数并不敏感,因为从时钟是直接和主时钟进行协商,累计补偿了路径延时和节点驻留,导致从时钟的时间偏差比较小,故其端到端的传递精度优于 BC 模式。然而,通过大量的现网试验,测试结果表明,由于 BC 模式下各级节点时钟恢复过程中所引入的偏移存在一定的正负偏差相互抵消的效应,其端到端的时间传送精度并不比 TC 模式差,甚至还优于 TC 模式。此外,还考虑到 TC 模式会造成主时钟的 CPU 负荷增加。所以,在目前实际现网中部署应用 1588v2 技术时,建议 OTN 和 PTN 设备均采用 BC 传输模式。

3 网络中传递 1588v2 时间同步的实现

3.1 OTN 网络中传递的实现

在通过地面传输方式进行时间信号传送时,时间源设备设置的位置可能上移至核心层网络,需要利用 OTN 网络进行核心层面的 1588v2 报文传送。由于 OTN 是异步复用的网络,OTN 设备要支持时间同步,必须具备时钟处理、频率同步、支持识别和处理 1588v2 协议和提供时延补偿的功能。具备这些功能后,OTN 设备即可实现 1588v2 传递和频率同步。根据 OTN 承载方式的不同,1588v2 报文传送分为 3 种方式^[4]: 1) 透传方式,即采用客户信号通道来传送 1588v2 报文; 2) 带内方式,即采用 OTN 开销传送 1588v2 报文; 3) 带外方式,即采用 OSC 通道来传送 1588v2 报文。基于 OTN 的 1588v2 报文传送方式如图 1 所示。

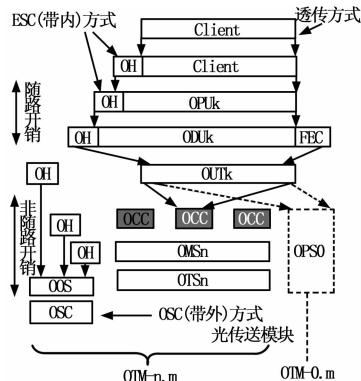


图 1 基于 OTN 的 1588v2 报文传送方式示意图

1) 透传方式。1588v2 报文作为客户信号进行承载,OTN 不对 1588v2 报文进行处理。在 OTN 采用客户信号承载 1588v2 报文中,存在两种具体的实现方式:一种是全透传方式,比如 GE 信号透明封装到 ODU0 中,然后再复用到 ODU2 中上线路传输;另一种是半透明方式,即以太网信号采用

GFP-F 封装, 然后映射到 ODUk 中进行传输。

2) 带内方式。1588v2 报文通过 OTN 设备的预留开销进行承载, 每个 OTN 设备节点均需对 1588v2 报文进行处理, 其中预留开销可以是 ODU 开销, 也可以是 OTU 开销, 通常称为 ESC (电监控通路) 方式。

3) 带外方式。1588v2 报文通过 OTN 系统专门的光监控通道 OSC 进行承载, OTN 设备一般需逐点对 1588v2 报文进行处理, 通常称为 OSC 方式。

根据上面对 3 种基于 OTN 传送 1588v2 报文方式描述, 表 1 给出了基于 OTN 传送 1588v2 报文的 3 种不同实现方式比较, 总体来说, 从长远发展来看, 推荐使用 OSC 方式来实现 1588v2 报文在 OTN 网络中的传递, 完成时间同步。

表 1 基于 OTN 传送 1588v2 报文的三种实现方式比较

1588v2 传递方式	经济成本	标准支持	时间精度	应用环境建议
纯透传	低	好	低	简单的网络环境, 时间精度要求的应用 (如 10 μs 级以上)
ESC	高	一般	较高	可应用于距离较短的城域网, 主要适用于新建网络
OSC	较高	一般	高	可应用于城域网和长途骨干网, 并适用于现网升级和新建网络

3.2 PTN 网络中传递的实现

采用 PTN 网络承载电力业务时, 将 1588v2 技术移植到 PTN 网络中, 则可以充分发挥 1588v2 次微秒级传递精度的优势, 在传输层面进行时间同步信息的传递, 实现同步时间源到各电力二次终端设备的同步时间传递, 将 GPS/北斗接收机集中上移至核心层, 不仅减少了系统组网成本, 而且也降低了安装维护困难。

PTN 设备支持 1588v2 协议主要有两种实现方式, 即 PTP 节点模式和非 PTP 节点模式。

1) PTP 节点模式。PTP 节点具有识别和处理 1588v2 协议的能力, PTN 接收来自上级设备的 1588v2 报文, 解析报文并得到上级的时间信息, 同时, PTN 设备生成自己的 1588v2 报文, 并通过 PTP 协议将此报文送往下级设备。

2) 非 PTP 节点模式。非 PTP 节点为普通交换设备, PTN 设备接收上级设备的 1588v2 协议报文, 与其它协议包等同对待, 按照正常协议报文转发给下级设备。

对于支持 1588v2 时间同步的 PTN 网络, 可以完全有 PTP 节点组成, 也可以有 PTP 节点和非 PTP 节点混合组成。在 PTP 节点模式下, 相对于上级设备, PTN 设备工作在 OC Slave, 相对于下级设备, PTN 设备工作在 OC Slave, 这种时钟模式就是 PTP 协议内的 BC 模式。而在非 PTP 节点模式下, 实现方式简单, 不承担复杂工作, 一旦网络负载加重, 时间质量将受到严重影响, 需要考虑 PTN 设备 1588v2 报文的延时补偿功能, 这种时钟模式成为 TC 模式。相对于普通的 PTN 设备, PTP 节点增加了时间戳模块、PTP 协议处理模块和时钟处理模块 3 部分, 如图 2 所示。

4 应用场景及性能验证

未来电力通信网业务传输的特点主要是汇聚, 各地市电网汇聚大量 IP 业务至省电网, 以分层的原则建设省级 OTN 传输网, 网络分为骨干层、汇聚层和接入层, 依托各 500 kV 变电

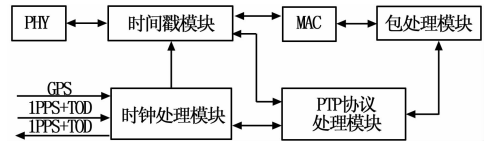


图 2 PTN 网络中 PTP 节点结构示意图

站建立骨干层各地市电网、220 kV 变电站、发电厂则通过 500 kV 站接入骨干传输网。因此, 在 OTN+PTN 的混合网络中, 采用 1588v2 时间同步传递方法可设置 OC-BC 模式进行频率和时间同步, OTN 网络设备相当于时钟中继器, 既可以恢复时钟信号, 也可以作为基准时钟源向下游节点传递时钟信号。基于 OTN+PTN 组网的 1588v2 时间同步传送方案如图 3 所示, OC 节点用于首末端设备, 大多处于主备时钟源和 PTN 的接入层; BC 节点具有逐级跟踪传递的特点, 位于核心层、汇聚层和接入层, 外部设备与同步网的边缘节点通过带内方式进行同步。

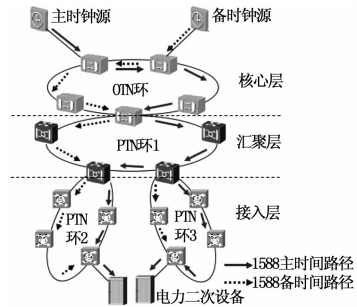


图 3 基于 OTN+PTN 组网的 1588v2 时间同步传送方案

在核心层和汇聚层的交汇点, 由于 OTN 采用带外方式, 1588v2 时钟信号单独占用一个波长, 可以看做 OTN 的一种业务从核心层下沉至汇聚层, 完成 OTN 业务侧与 PTN 客户侧的时钟信号对接, 从而实现 1588v2 时钟信号从核心层向汇聚层的传递。当 1588v2 时钟信号进入汇聚层网络时, PTN 网元工作在 BC 方式, 通过带内方式在业务通道中传递, 既可以恢复时钟, 又可以作为时钟源向下层传递时钟信号, 同时对时钟报文做出延时修正, 消除网络波动的影响。当 1588v2 信号进入接入层网络时, 与汇聚层类似, 通过带内方式在业务通道中传递。最后, 进入了客户侧的电力二次终端设备时, 依然利用带内方式, 在 FE、GE 以太网接口完成业务和时钟信号传递, 从而实现了 1588v2 时钟同步信号从核心层到接入层之间的传递部署。

2011 年 11 月, 广东移动与华为、中兴、烽火 3 个网络设备厂家在深圳 TD-LTE 现网上部署了 OTN+PTN 的全业务地面时间同步传送网络, 通过工信部电信研究院测试, 验证了在现网环境下, OTN+PTN 混合组网的 1588v2 时间同步性能优于 ±100 ns, 完全满足电力系统同步要求。OTN+PTN 组网环境下的 24 小时 1588v2 同步性能测试如图 4 所示。

5 结论

综上所述, 1588v2 具有亚微秒级的时间同步精度、卓越的跨领域移植功能及在不同网络间的穿透能力等诸多优点。凭借 PTN 网络自有的开放性、OTN 带外传输方式的可行性以及

口; 2) /WRST 端口。这两个端口可以对单片机进行读写控制。在 AL422B 芯片的读写操作中, 写时钟和 TLC5510 一起, 共同控制数据的采集和输入。通过硬件的配置, 可以使单片机适应低速的环境, 更加高效地控制单片机的读写操作。

在 AL422B 的芯片中, 没有全满信号指示, 只能通过时间进行判断, 判断芯片容量的大小以及写满的时间。根据计算可以知道, 写满 FIFO 需要的时间为 25 ms。因此, 需要在开始采集信号后 25 ms 才能停止对信号的采集操作。AL422B 芯片采集信号的流程如图 7 所示。

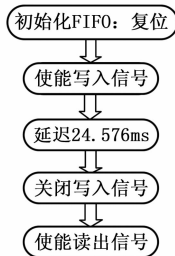


图 6 AL422B 程序设计流程图

5.3 串口程序设计

在串口程序设计中, 使用的串口方式是工作方式 (1), 这种工作方式可以使单片机和 PC 之间进行数据的传输。其中定时器 T1 的工作方式是方式 (2)。在进行串口编程时, 要注意以下几点: 1) 串行口接收数据; 2) T1 和 R1 串行标志需要清 0 处理。

6 实验及其结果

根据整个系统电路图连接好的硬件系统, 本文研究的硬件系统主要包括以下 4 个部分: 1) 单片机开发板, 该部分用到的芯片型号为 STC89C52; 2) 两个电路板, 其中一个电路板的芯片型号包括两个型号: (a) AL422B, (b) TLC5510; 另外一个电路板用于外围电路元器件的接线; 3) 有源晶振; 4) 稳压源。

(上接第 2535 页)

PTN 与 OTN 组网的强大的 IP 业务接入、汇聚及灵活调度能力, 1588v2 时间同步网络大规模部署应用于新一代电力光传送网络中成为可能。OTN+PTN 混合组网方案不仅实现了电力系统中 IP 化分组业务端到端的传送, 还通过地面时间传送方式解决了不同网络层次的全网时钟同步问题。因此, 1588v2 时间同步技术在电力系统中的应用, 为数字化变电站的时钟同步建设提供了可靠的保障, 也是下一代智能电网电力通信业务 IP 化的强有力支撑。

参考文献:

- [1] 李 炜, 王妙心, 滕 玲. 基于 OTN+PTN 的光传输网络同步系统研究 [J]. 光通信研究, 2013, 178 (5): 18-56.
- [2] 于晓东, 于 昉. OTN+PTN 技术在电力通信网中的应用 [J]. 电力系统通信, 2010, 31 (217): 31-34.
- [3] 贾小铁, 雷学义, 吴云峰, 等. PTN 为智能电网提供理想的信息通信平台 [J]. 电力系统通信, 2010, 7 (58): 10-15.

系统采用的源晶振, 其中标准晶振的频率为 16 MHz。为了使实验更加方便, 使用的 SOP 是一个 DIP 插座, 可以更准确地进行测试。

系统可以通过串口 P0 进行数据的读取操作, 通过读取的数据可以判断 PC 串口的数据输入是否正常。为了使读取的数据正确, 可以通过输入模拟信号进行测定, 将 AL422B 中的端口 DI0~DI7 的数据导出, 和串口读取的数据 P0 进行比较, 可以验证输入的数据是否正确。

7 结论

随着科学技术的进一步提升, 社会对高速度传输的数据采集有更高的要求, 需要采集的数据更加准确。在本文中, 主要研究的内容是设计一个完整的数据采集系统, 该数据采集系统的组成包括单片机、FIFO 以及 UART 串口的设计, 这种设计具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 黄武煌, 王厚军, 曾 浩. 一种超高速并行采样技术的研究与实现 [J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23 (8): 67-71.
- [2] 孙元敏, 尹立新, 杨书涛. 基于 TMS320F2812 的高速数据采集处理系统 [J]. 计算机工程, 2009, 35 (2): 242-244.
- [3] 刘泽西, 程晶晶, 孔 力. 基于 USB2.0 接口的高速实时数据采集系统 [J]. 测控技术, 2007, 26 (2): 34-37.
- [4] 杨永东, 曾庆立. 基于 FPGA+DSP 的高速数据采集系统设计 [J]. 吉首大学学报 (自然科学版), 2009, 30 (4).
- [5] 刘 静, 耿国华. 基于 USB2.0 的高速大容量数据采集存储系统 [J]. 计算机技术与发展, 2011, 21 (2): 143-146.
- [6] 李红刚, 杨林楠, 张丽莲, 等. 基于 FPGA 的高速多通道数据采集系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (10): 1407-1409.
- [7] 樊 军. 航空机载机电设备测试系统研究与设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 11 (2): 1789-1791

- [4] IEC. IEC 61850: Communication networks and systems in substations [S]. 2004.
- [5] 王晓义. 基于 OTN 的 1588v2 时间同步传送技术及其应用 [J]. 电信技术, 2010, (1): 80-82.
- [6] Andersson L, Brand K P, Fuechsle D. Optimized architectures for process bus with IEC 61850-9-2 [A]. CIGRE 2008 [C]. Pads, France, 2008, B5-101.
- [7] 魏 伟, 李 扬, 陈 芳. 电力骨干通信网时间同步系统 [J]. 电力系统通信, 2011, 32 (219): 10-15.
- [8] IEEE Std 1588-2008. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems [S]. 2008.
- [9] 沈瑞武, 刘兴铨. 基于 PTN 网的 1588 时间同步技术及应用研究 [J]. 移动通信, 2009, (1): 57-62.
- [10] Moore R. IEEE 1588 time synchronization [J]. PAC World magazine, 2009, 1 (3): 44-49.