

EPON在智能化变电站中应用关键技术研究

智能化变电站遵循 IEC 61850 标准协议,采用分层架构实现变电站智能设备之间的信息共享和互操作,对通信网络实时性提出了更高的要求。EPON 结合了以太网和 PON 技术,具有低成本、高带宽、可扩展和易维护的特点,在终端通信接入网得到了广泛应用。EPON 已深入智能变电站内部,但要用于承载智能变电站业务,必须首先解决时间同步准确度和抖动等问题。而 IEEE 1588V2 时间同步准确度高达亚微秒级,可以满足智能变电站的应用场景。在深入研究 EPON 自身同步机制和 IEEE 1588V2 协议的基础上,提出一种在 EPON 系统中实现 IEEE 1588V2 的方法,用于提高 EPON 系统的时间同步准确度,减小抖动,以满足智能变电站的业务需求。通过验证测试,基于 IEEE 1588V2 的 EPON 系统能够满足智能变电站对时间同步准确度和抖动性能的需求,将为 EPON 在智能化变电站中的应用提供技术保障。

樊强 冯宝/国网电力科学研究院



樊强/高级工程师

关键词/Keywords

EPON ·
IEEE 1588V2 ·
高准确度时间同步 ·
抖动性能 ·

0 引言

随着变电站智能化发展的潮流,智能化变电站的通信网络已经成为自动化系统不可或缺的核心系统,其性能将直接决定智能变电站的各项功能和性能,IEC 61850 提出了一整套数字化变电站的通信标准,对变电站通信网络提出更高的要求^[1]。

IEC 61850 将智能变电站业务划分为 GOOSE 业务、SV 业务和 MMS 业务^[2],其中 SV 业务对智能变电站的时间同步提出了严格的要求。以每周波采集 40 次原始信息为例,每秒采集次数为 $40 \times 50 = 200$ 次,即采集间隔为 5 ms,为保证各母线采集时相位尽量相同,按照同步准确度为采集间隔的

10 倍来计算,要求的时间同步准确度至少为 0.5 ms。当前智能变电站多采用每周波采集 200 次,按照以上的计算方法,要求的时间同步准确度至少为 0.1 ms。

目前智能变电站多采用 GPS 时间同步系统^[3],该系统成本高,安全性受到制约,且建设专用的时间同步网络需要重新敷设线缆。NTP 网络和 SNTP 网络时钟同步方式只能提供毫秒的时间同步准确度^[4],无法满足智能变电站的时间同步要求。

EPON 系统具有高带宽、低成本、高可靠、抗多点失效和维护简单等特性,已广泛应用于电力系统配电网通信领域^[5-7]。另外,EPON 系统上行方向采用时分复用通信方式,方便进行合理的资源划分,研究者尝试将 EPON 技术应用于智能变电站的高可靠、高实时通信,取得了较好的效果^[8],但 EPON 本身只提供频率同步,EPON 系统要应用于智能变电站,必须解决高准确度时间同步问题。

IEEE 1588V2 网络时间同步方案采用基于 TCP/UDP 的报文传输方式,能提供亚微秒级时间同步,完全满足智能变电站的时间同步需求^[9]。因此在 EPON 系统中实现 IEEE 1588V2,是解决 EPON 系统在智能变电站中应用的关键所在。

1 EPON 同步技术介绍

1.1 传统同步方式

EPON 技术上行方向采用时分复用技术,各个 ONU 必须准确按照 OLT 指定的时间发送数据,否则不同 ONU

之间的数据将产生冲突，因此需要 OLT 和 ONU 之间准确的时间同步。另外，由于各个 ONU 到 OLT 或分光器的距离不同，EPON 在分配时隙时必须考虑光信号的传输延时，因此需要准确测量 OLT 到各个 ONU 的信号往返时间，以大幅缩小传输时隙间的保护间隔，提高效率。测量往返时间需要实现 OLT 和 ONU 之间准确的时间同步。

EPON 系统通过 MPCP 协议实现 OLT 和 ONU 的定时同步功能^[10]。OLT 和 ONU 各保存一个本地 32 bit 的计数器（MPCP Counter），该计数器每 16 ns 加 1，每 68.72 s 完成一次循环。EPON 系统以 OLT MPCP Counter 为主计数器，ONU 的 MPCP Counter 与之同步，同步过程是 OLT 发送 MPCPDU 时，利用 MPCP Counter 设

置 Timestamp 值，参考时间是发送数据帧的第一个字节的计数器值，ONU 时间等于 OLT 时间加传输延时。ONU 和 OLT 同步后，MPCP Counter 将作为测距、时隙分配等功能的时间依据。

EPON 系统的定时机制根据 EPON 系统本身的测距和时隙分配需求而设计，采用计数器方式无法提供 TOD 时间，而且没有考虑上下行信号的传输时间补偿，因此也存在一定的误差。IEEE 802.1as^[11]的发布，使 EPON 系统有了时间同步方案。

1.2 IEEE 802.1as 同步方式

利用 IEEE 802.1as 实现时间同步的方案，如图 1 所示。

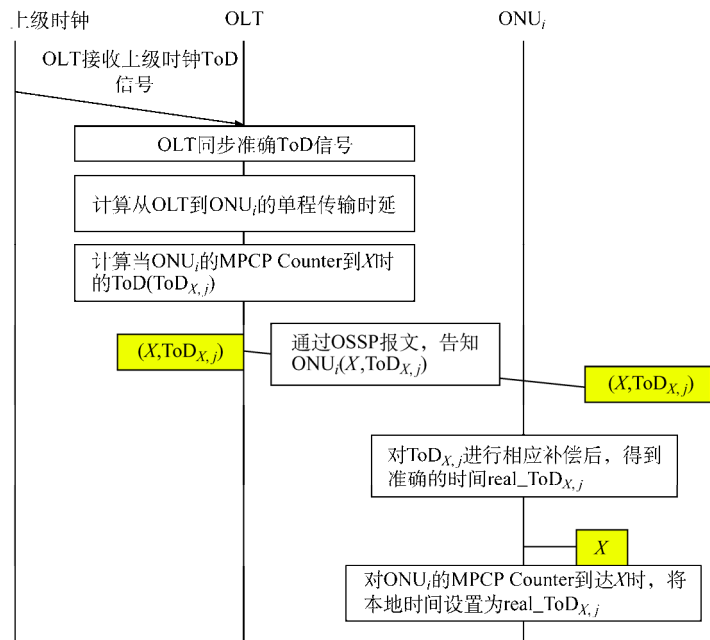


图 1 IEEE 802.1as 时间同步方案

首先 OLT 从上级时间服务器获得高准确度 ToD 并同步本地时钟，然后 OLT 计算 OLT 到 ONU 的下行时间，接着 OLT 选择一个 MPCP 时间戳 X ，计算目的 ONU MPCP Counter 增加到 X 的时间 $ToD_{X,i}$ ，发送 $ToD_{X,i}$ ，ONU 接收到 $ToD_{X,i}$ 后调整自身时间。

2 IEEE 1588V2 同步技术分析

2.1 技术简介

IEEE 1588 早期主要应用于工业控制领域，

采用网络测量和控制系统的准确时间同步协议（Precision Time Protocol，PTP），解决了网络时间协议（NTP）同步准确度不够的问题。随着公网无线通信技术的发展，3G、4G 无线网络对同步准确度要求越来越高，原有 GPS 同步方式存在选址困难、安全隐患高和成本高的缺点，IEEE 1588 开始广泛应用于公网领域，并正在完成 V2 版的修订。

IEEE 1588V2 的网络模型包括普通时钟（Ordinary Clock，OC）、边界时钟（Boundary

Clock, BC) 和透明时钟 (Transparent Clock, TC)^[12]。OC 只有一个同步端口, 且只能接收时间, 一般作为整个网络的时间源或时钟宿, 不能同时作为始端和终端; BC 相当于时间中继器, 是 OC 两种类型的混合体, 既可以恢复时钟, 又可以作为时钟源往下游传递时钟; TC 模型自身不恢复时间和频率, 只对 1588 报文作延时修正, TC 模型对应网络中仅需配合处理 1588V2 报文, 自身无须恢复时钟的设备。TC 包括端到端透明时钟 (End to End Transparent Clock, E2E TC) 和对等计算透明时钟 (Peer to Peer Transparent Clock, P2P TC) 两种^[13]。

2.2 同步过程

IEEE 1588V2 时钟同步过程如图 2 所示, 具体步骤如下:

- 1) t_1 时刻主时钟发送含报文的预计发出时刻的同步报文 Sync, 从时钟记录报文到达时刻 t_2 。
- 2) 紧接着主时钟发送含 t_1 时刻信息的跟随同步报文 Follow_Up, 从时钟记录 t_1 。
- 3) t_3 时刻从时钟发送延时请求报文 Delay_Req, 主时钟记录报文到达时刻 t_4 。
- 4) 紧接着主时钟发送含 t_4 时刻信息的延时应答报文 Delay_Resp, 从时钟记录 t_4 。

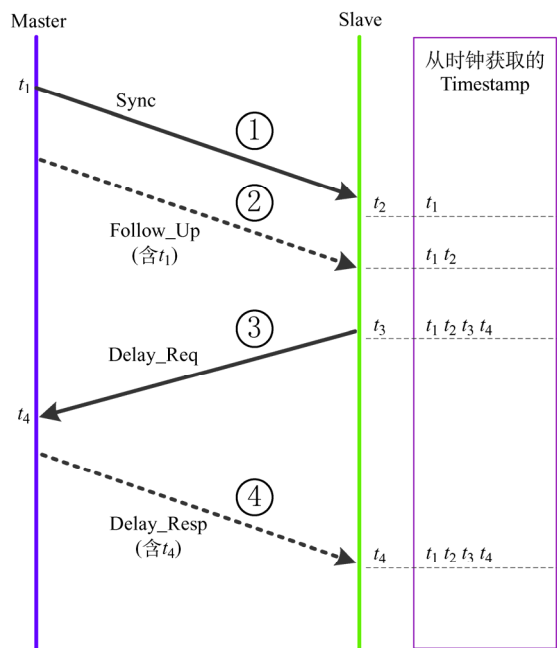


图 2 IEEE 1588V2 时钟同步过程

利用 IEEE 1588V2 实现时间同步的关键在于计算 Master 到 Slaver 的延时 Delay, Slaver 获得 Delay 就可以根据 Delay 和接收到的 Master 调整自身时间。用 Offset 表示当前 Slaver 相对于 Master 的时间漂移, Delay 计算过程如下:

$$\begin{aligned} t_2 - t_1 &= \text{Delay} - \text{Offset} \\ t_4 - t_3 &= \text{Delay} + \text{Offset} \\ \text{Offset} &= [(t_4 - t_3) - (t_2 - t_1)] / 2 \\ \text{Delay} &= [(t_4 - t_3) + (t_2 - t_1)] / 2 \end{aligned}$$

按以上分析, IEEE 1588V2 时钟同步假定上下行时间相等, 然而实际上下行时间相等的假设并不存在, 数据包传输延时受线路传输时间、数据包处理时间和排队时间等多种因素的影响, 特别是通信设备内部的数据包处理时间和排队时间受很多不确定因素影响, 很难保证时间相同。IEEE 1588V2 在 MAC 以下采用硬件为 IEEE 1588V2 的数据包打时间戳, 计算驻留时间, 降低因数据包驻留设备内部导致的上下行时间差异。

3 IEEE 1588V2 在 EPON 中的实现

根据 IEEE 1588V2 标准, 在 EPON 中实现的方式有两种: 一是时钟透传方案; 二是边界时钟方案。

3.1 时钟透传方案

该方案将整个 EPON 系统作为 IEEE 1588 透明时钟, 即将 OLT 和 ONU 在逻辑上看做一个网元, 在 EPON 系统的输入和输出点分别打上入时戳和出时戳, 计算驻留时间。但是在 EPON 网元内部, OLT 和 ONU 之间在物理上相隔一定的距离, 需要进行修正。根据校正域数据的不同, 时钟透传方案可以分为 E2E TC 和 P2P TC 两种模式。同步报文校正域 CorrectionField 中的数据在 E2E 模式下只是驻留时间的累加; 在 P2P TC 模式下, 除驻留时间的累加外, 还包括上段链路的延时累加。典型的采用时钟透传方案在 EPON 中实现 IEEE1588V2 的流程如图 3 所示, 具体步骤如下:

- 1) 1588 报文进入 EPON 时打上入时戳, 在 OLT 和 ONU 之间进行透传。
- 2) 利用 802.1as 协议实现 OLT 和 ONU 之间的时间同步, 得到时延修正值 $t_2 - t_1$ 。
- 3) 1588 报文离开 EPON 时打上出时戳, 并

将时延修正值放入 PTP 同步报文的校正域 CorrectionField，实现 1588 时钟透传。

时钟透传方案每个终端均与时间服务器之间有时间同步流量，这将大大增加时间服务器的负荷量，需要考虑其是否能够承受增大的负荷。如果时间服务器采用边界时钟模式，则不存在这种问题。

3.2 边界时钟方案

该方案将 OLT 设备作为边界时钟，即 1588 时钟同步报文在进入 OLT 之后终结，OLT 和 ONU 之间通过 802.1as 或 CTC 协议实现同步，然后将 ONU 作为 1588 时钟服务器与智能设备之间实现同步，具体如图 4 所示。

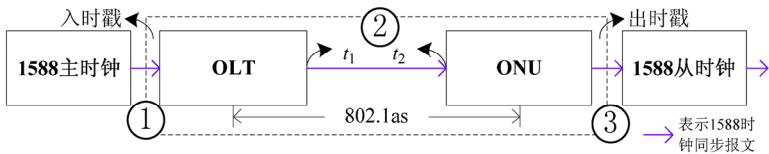


图 3 采用时钟透传在 EPON 中实现 IEEE 1588V2

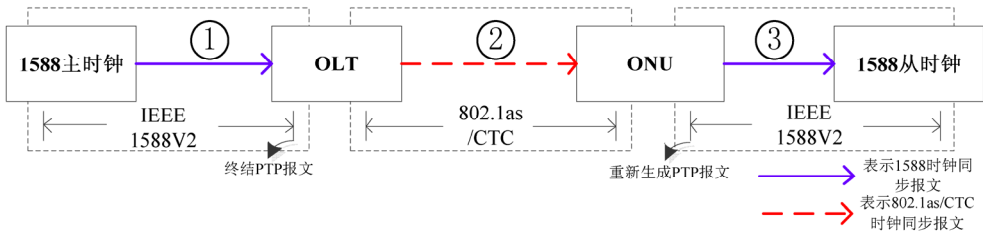


图 4 采用边界时钟在 EPON 中实现 IEEE 1588V2

边界时钟方案 OLT 主要包括三个步骤，具体如下：

1) 1588 主时钟与 OLT 之间同步，在 OLT 上终结 PTP 报文。在 OLT 上开发 1588 边界时钟功能，在 OLT MAC 层加入打时戳功能，计算线路延时补偿，对自身时钟进行更新。

2) OLT 与 ONU 之间同步，在 ONU 重新生成 PTP 报文。通过对 EPON 现有的 MPCP 协议进行改进，提出了一种在 MPCP 层完成准确时间同步的方案，具体如下：①通过 MPCP 协议测距获取往返时间 RTT，MPCP 协议中详细定义了测距的过程，OLT 和 ONU 本地都维护一个 32 位二进制计时器 Local Time，这些计时器可作为本地时戳。当 OLT 和 ONU 发送 MPCP 报文时，发送时戳由 MPCP 报文携带传送到对端设备。当 ONU 接收到 MPCP 报文时，它将计时器值置为接收报文中携带的时戳值。当 OLT 接收到 MPCP 报文时，它使用接收报文中携带的时戳值来计算往返时间。②改进 MPCP 协议承载 1588 协议。MPCP 协议中，OLT 和 ONU 的计数器都是 32 bit 二进制形式，计到 0xffff_ffff 后翻转到 0，单位为 16 ns；而 1588 协议中时戳位宽为 64 bit，低

32 bit 为纳秒部分，高 32 bit 为秒部分。低位部分单位 1 ns，计到 1 s~1 ns 后，翻转到 0。为了将 1588 时间通过 MPCP 的时戳传递给 ONU，需要将 MPCP 中的 32 bit 二进制计数器改造成 1588 时间的纳秒部分（模为 1 s），并增加 32 bit 的秒部分计数器。这样 OLT 中只要计算 1588 时戳与 MPCP 时戳之间的差值即可，并将差值封装在 MPCP 报文中，传递给 ONU。ONU 根据差值、RTT 及 ONU 本地的 64 bit 时戳计数器即可计算出 1588 时间。ONU 获得 1588 时间后，即可做 B 码口和用户口的 1588 协议，改进的 MPCP 计数器如图 5 所示。

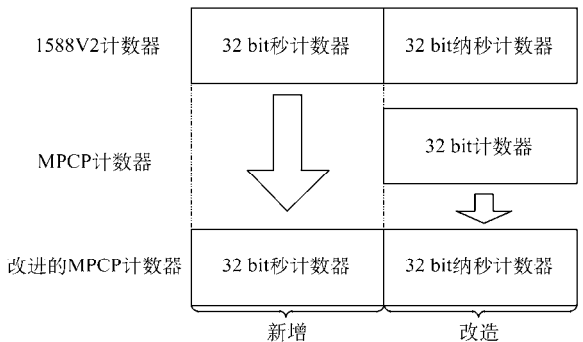


图 5 改进的 MPCP 计数器

3) ONU 与 1588 从时钟之间同步。通过对 MPCP 协议、OLT 和 ONU 的 MPCP 计数器的改进,在 ONU 上实现了 1588 功能,重新生成 PTP 报文。利用 IEEE 1588V2 协议,构建 ONU 与智能设备之间服务器客户端同步模型,计算线路延时并进行补偿,完成 1588 时钟的传输。

3.3 硬件实现

本文采用边界时钟方案实现 IEEE 1588V2 在 EPON 中的承载,硬件实现主要包括两部分,具体如下:

1) OLT 和 ONU 之间的硬件实现如图 6 中 OLT1 所示。GPS 的时钟源与 OLT 的交叉板相连,交叉板和所有的 PON 板之间通过背板总线 (COM 线) 传递 1588 时戳,实现同一个 OLT 下的多个 PON 板 1588 时戳同步。在 OLT 上维护

一个 1588 时戳计数器,并周期性地更新 COM 线送过来的 1588 时戳。OLT 内部按照 125 μs 的时间间隔重复地计算 1588 时戳与 MPCP 时戳的差值,并将该差值填充到 MPCP 报文的保留字段,随着 MPCP 报文传给 ONU。OLT 也会将 RTT 值填充到 MPCP 报文中,提供给 ONU 用于计算 1588 时戳。同时,ONU 中也维护一个 1588 时戳计数器,收到 MPCP 报文后,就会重新计算并装载一次 1588 时戳值,完成 1588 同步。当 ONU 归属到 OLT 的双 PON 口时,系统会根据注册状态自动倒换到正常运行的 PON 口上。

2) 多台 OLT 之间的硬件实现如图 6 中 OLT1 (主) 与 OLT2 (从) 所示。多台 OLT 设备之间实现 1588 同步,从设备的交叉板需要根据标准的 1588 协议与主设备的交叉板通信。

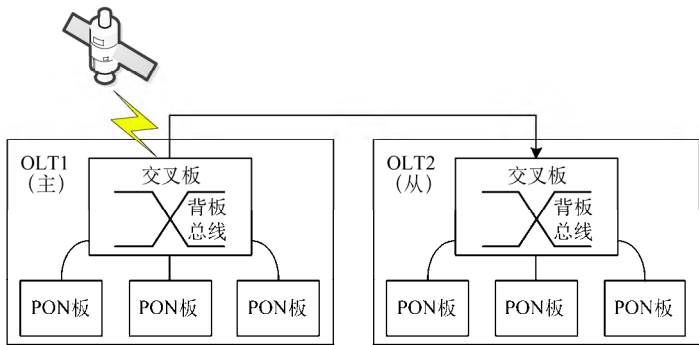


图 6 IEEE 1588V2 在 EPON 中实现的硬件方案

4 测试方案及实验结果

4.1 测试方案

1588 时钟在 EPON 中实现的测试系统构架如图 7 所示。测试中,将主时钟连接 GPS 天线,

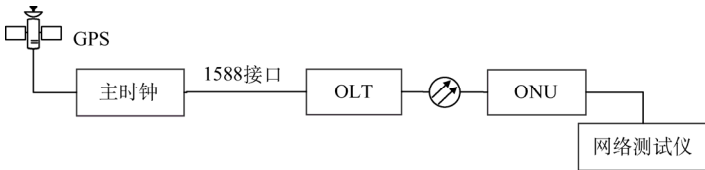


图 7 1588 时钟在 EPON 中实现的测试方案示意图

1588 接口接到 OLT,ONU 连接网络时间测试仪;网络时间测试仪从被测设备发来的 1588 报文中解析时间,与网络时间测试仪接到的 GPS 基准时间对比,测试被测设备的时间准确度。

4.2 测试结果

图 8 给出了短期 1588 准确度测试结果,从图中可以看出,平均时间同步准确度为 0.48 μs,可以很好地满足智能变电站对时间同步准确度的需求。

图 9 给出了长期 1588 准确度测试结果,从

图中可以看出,平均时间偏移值为 2.411 μs,可以很好地满足智能变电站时间同步抖动性能的需求。

5 结束语

文中提出了一种在 EPON 系统中实现 IEEE

1588V2 的方法。采用边界时钟方案，通过对 EPON 现有的 MPCP 协议进行改进，以最小代价完成准确的时间同步，而无需借助其他任何的时间同步协议，大大简化了系统的设计。通过测试验证了 EPON 实现 IEEE 1588V2 方案的可行性，为 EPON 系统在智能化变电站的应用奠定了基础。

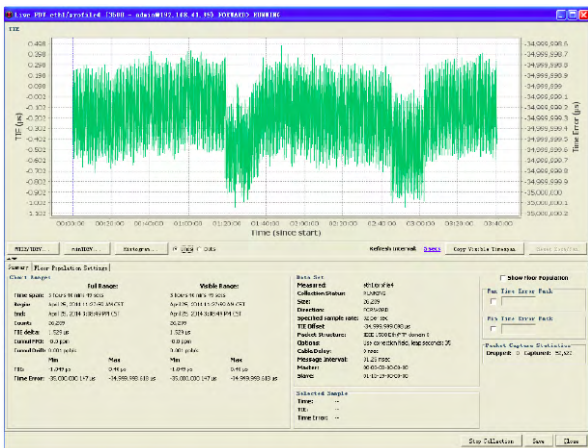


图 8 时间同步准确度

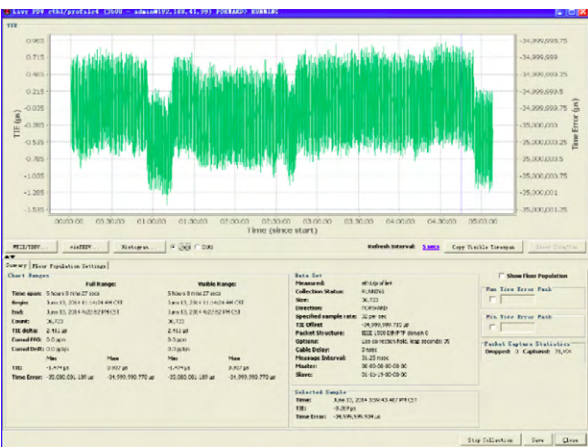


图 9 时间同步抖动值

参考文献

[1] 任雁铭, 操丰梅. IEC 61850 新动向和新应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (2): 1-6.
[2] 汪强, 徐小兰, 葛光胜, 等. 智能变电站专用通信设备的关键技术[J], 电力系统保护与控制,

2014, 42 (7): 150-153.
[3] 陈超. 基于 GPS 的智能变电站高精度时钟设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
[4] 韩本帅, 孙中尉, 崔海鹏, 等. 智能变电站过程层时间同步方式研究[J]. 中国电力, 2012, (11): 86-90.
[5] 何菲, 栗文凯. EPON 配电通信网络规划探讨[J]. 电力系统通信, 2012, 33 (240): 20-23.
[6] 杜伟, 朱尤志, 曹辉. 智能配电、用电远程通信技术分析[J]. 光通信技术, 2011 (7): 27-29.
[7] 郑毅, 甘志洲, 陈激. 配电网 EPON 通信接入与分区自治[J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (23): 114-118.
[8] 金乃正, 朱玛, 马平, 等. 基于 EPON 通信技术的智能变电站保护控制技术研究[J]. 数字技术与应用, 2013 (1): 36-38.
[9] 周末. 基于 IEEE 1588v2 电力系统时间同步的研究与设计[D]. 济南: 山东大学, 2014.
[10] 张勇. PON 无源光接入网上行链路调度算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
[11] IEEE 802.1as. Timing and Synchronization for time-sensitive applications in bridged local area networks[S]. 2010.
[12] 史先好, 高厚磊, 向珉江. IEEE 1588 时钟同步协议在数字化变电站中的应用探讨[J]. 电力自动化设备, 2011, 31 (4): 132-135.
[13] 崔全胜, 魏勇, 何永吉. PTP1588 协议的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (10): 148-154.

作者简介

樊强 (1974-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统通信技术及其应用研究工作。
冯宝 (1984-), 男, 工程师, 主要从事电力系统通信技术及其应用研究工作。

(收稿日期: 2015-12-10) EA
(编辑: 胡颖)