

# IEEE Std 1588-2008 精确时间同步协议行业规范 在电力系统的应用研究

贺春<sup>1</sup>, 陈光华<sup>1</sup>, 张道农<sup>2</sup>

(1. 许昌开普检测技术有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 华北电力设计院工程有限公司, 北京 100120)

**摘要:** 对电力行业 PTP 规范文件 IEEE C37.238-2011 标准进行总结和分析。首先介绍电力行业 PTP 规范与 IEEE1588 标准的关系, 然后介绍电力行业 PTP 规范定义的参数、机制等与 IEEE1588 标准的不同之处以及其特有的一些参数, 最后分析 PTP 精确时间同步协议在以后应用中可能面临的问题及解决办法。电力行业 PTP 规范为了给外界提供全球可用时间、设备互操作和故障管理, 在 IEEE Std 1588-2008 标准基础上规定了新的 PTP 参数子集和特权。新的 PTP 参数子集和特权使基于 IEEE1588 的时间同步机制可以通过以太网通信结构在电力系统关键领域得到有效应用, 这些领域包括保护、控制、自动化和数据通信等。

**关键词:** 电力行业; 行业规范; 时间同步; 时间分配; 精确时间同步协议

## Research on standard profile for use of IEEE Std 1588-2008 precision time protocol in power system applications

HE Chun<sup>1</sup>, CHEN Guanghua<sup>1</sup>, ZHANG Daonong<sup>2</sup>

(1. Ketop Lab, Xuchang 461000, China; 2. North China Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100120, China)

**Abstract:** This paper provides a summary of the IEEE C37.238-2011 standard. Firstly, it introduces the relationship between the IEEE C37.238 standard and the IEEE1588 standard. Then, it introduces the difference on the parameter and mechanism, which are defined by C37.238 standard and the IEEE1588 standard. And it introduces the characteristic parameters of C37.238. At last, it analyzes the problems and corresponding solutions may be faced by PTP precision time protocol in future applying. It specifies a subset of PTP parameters and options to provide global time availability, device interoperability, and failure management. This set of PTP parameters and options allows IEEE 1588-based time synchronization to be used in mission critical power system protection, control, automation, and data communication applications utilizing Ethernet communications architecture.

**Key words:** power system; industry standard; time synchronization; time distribution; PTP

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0133-06

## 0 引言

目前, 电力系统电子产品的时间同步已经实现了基于专用布线的分布式对时方式<sup>[1]</sup>, 如 IRIG-B 和 1PPS 信号。IRIG-B 拥有适合新型变电站应用技术的精确性, 采用高晶振输入源的 FPGA 可以达到较高的精度(例如: +/-15 ns), 但是, 目前使用的 IRIG-B 对时精度一般都并未达到这么高。

IRIG-B 对时还存在着另外两个弊端: 一是必须增加额外的通信线路(电缆、光纤), 而且在电缆、光纤距离不等的情况下会带来对时的差异(在纳秒级精度级别, 该误差不能轻易忽略)。二是 IRIG-B

对时为单向对时, 接收端无法对时间精度进行判断, 发送端也无法获知接收端是否接收及精度如何。

现在, 越来越多的智能设备支持以太网通信, 这为新的基于网络协议的对时方式的引进和应用提供了机会, 如 NTP 协议和 SNTP 协议。但是, 这些网络对时协议所提供的精度又不能满足各种要求。

IEEE1588 是另一种基于网络的时间同步协议(简称 PTP), 符合亚微秒精度的要求, 可以适应对时间精度要求最严酷的应用场合, 如变电站 IEC61850-9-2 过程总线或者 IEEE C37.118.1-2011 同步相<sup>[2]</sup>。但是它需要制定一个 PTP 行业应用规范以

使其在电力系统中得到广泛有效的应用, 该行业规范就是 IEEE C37.238-2011 标准。

## 1 IEEE1588 和 PTP 行业规范

网络测量和控制系统的精密时钟同步协议的 IEEE 标准最初发布于 2002 年, 并在 2008 年进行了修订, 也就是现在的 IEEE Std. 1588-2008<sup>[3]</sup>(简称 IEEE1588)。该标准定义了如何通过各种通信技术(如以太网、UDP/IP、DeviceNet 等)实现亚微秒级时间精度的传输和分配。该标准的主要优点是使时间的分配及传输可以和应用数据的传输在同一个网络上实现, 并且使其他网络协议所不能提供的高精度时间传输成为现实。

### 1.1 PTP 行业规范

IEEE1588 定义了很多精确时间同步协议的强制性及可选性的新属性, 包括新的概念性设备(透明时钟)、新的报文格式。IEEE1588 的发展带动了五个主要行业: 电信、测试与测量、工业自动化、电力和军事。其结果则是, 规定一系列互操作性强的功能以满足各行业的要求是不可能的, 因为不同行业对于标准的要求差别很大。

面对这样的挑战, PTP 行业规范应运而生, 作为对某些功能属性具有明确定义的 PTP 协议的子集, 其应用可以满足特定行业的要求。在 IEEE1588 附录 J 中有两个缺省 PTP 行规, 每个行规规定了选项和属性的一个选择, 每个选择规定了无需用户配置就可工作的系统, 鼓励各个行业定义自己的 PTP 行业规范以满足本行业应用的特殊需求。

### 1.2 PTP 电力行业规范

制定适用于电力行业的 PTP 行业规范的主要原因是电力系统应用所要求的变电站特殊的网络结构、数据交换机制以及时间分配服务性能。该协议可以使针对独立以太网的操作最优化, 而该以太网具有严格的隔离功能和少数具备主时钟能力的设备。这样的网络是电力系统变电站环境下的典型网络, 并且一般设计有静态的主/从分配机制等。需要特别注意的是这些网络需要不停的运作, 而且需要呈现出确定性的(事先计划好的)失效行为(场景包括运行孤岛的形成和主时钟的改变等)。

一个时间分配服务的性能和所需的时间精度取决于电力系统的应用需求, 一般在 100 ms(变电站监控)、1 ms(IED 事件记录)到 1  $\mu$ s(IEC 61850-9-2 标准规定的采样值<sup>[4]</sup>)之间变化。时间同步精度要求的不同等级在 IEC 61850-5 标准<sup>[5]</sup>中有明确定义。而因为该时间分配服务被要求适用于所有本地和广域的电力系统应用, 所以它必须满足最高的时间精度要求,

即 1  $\mu$ s 的时间精度。

## 2 IEEE C37.238 参数

IEEE1588 第 19 节引入了 PTP 行业规范的概念, 定义其为一个对部分协议属性具有明确定义的 PTP 协议的一个子集, 其使用可以满足特定行业的需要。

遵循这一原则, IEEE C37.238-2011 标准<sup>[6]</sup>(简称 C37.238)规定了一个由 IEEE1588 参数和一些附加的行业特定参数所组成的电力行业应用规范。

包含在 C37.238 中的 IEEE1588 参数:

- (1) PTP 消息的发送间隔为 1 s;
- (2) 组播通信方式及两层映射;
- (3) 点对点模式链路延时计算机制;
- (4) 单步时钟和双步时钟;
- (5) 默认的最佳主时钟算法;
- (6) 当地时间类型长度值(TLV)扩展。

C37.238 行业规范特定的参数:

- (1) Pdelay 对于标准从时钟为可选项;
- (2) IEEE 802.1Q 标签;
- (3) C37\_238 TLV;
- (4) C37.238 管理信息库;
- (5) 稳态特性。

### 2.1 IEEE1588 参数

C37.238 指定了 IEEE1588 中的如下参数。

#### 2.1.1 报文发送间隔

IEEE1588 定义了一个基于报文的精密时间协议, 而 PTP 报文按照功能的不同可以分为 3 种类型:

- (1) 分配时间(Sync, Follow\_Up 报文);
- (2) 选择最佳时钟(Announce 报文);
- (3) 计算链路延时(Pdelay 报文)。

为了支持大批量的应用需求, IEEE1588 对 PTP 报文发送间隔的规定比较宽泛。然而, 为了保证互操作性、简化设备配置, C37.238 规定每种报文发送的时间间隔均为 1 s, 不要求支持其他时间间隔, 如表 1 所示。

此外, C37.238 还规定: 对于优先成为主时钟的设备, Announce 报文的超时间间隔为  $2^n(n=2)$  s, 其他为  $2^n(n=3)$  s。这样时钟设备可以更快地通过最佳主时钟算法选择新的主时钟。

#### 2.1.2 通信模型和传输映射

PTP 报文支持在各种不同的底层通信协议上传输。IEEE1588 规定的传输映射包括 UDP/IP、Layer2/Ethernet 和 DeviceNet 等。一个给定的 PTP 行业规范应该规定其传输映射、寻址类型(组播或单播)和地址。

表 1 C37.238 PTP 报文发送间隔

Table 1 Interval for IEEE C37.238 message

报文类型	发送间隔	报文功能
Announce	1 s	携带主时钟的属性, 用来选择网络中的最佳主时钟。
Sync	1 s	携带主时钟的时间给从时钟。
Follow_Up	1 s	仅双步时钟模式下使用。 携带更准确的 Sync 报文离开主时钟的时标。
Pdelay_Req		计算两个 PTP 设备之间的链路延时。
Pdelay_Resp	1 s	Pdelay_Resp_Follow_Up 报文
Pdelay_Resp_Follow_Up		仅在双步时钟模式下使用。

C37.238 选择了在 IEEE1588 附录 F 中定义的组播报文传输方式以及 IEEE802.3/Ethernet<sup>[7]</sup>传输映射。另外, 它还要求使用 IEEE802.1Q<sup>[8]</sup>标签以及本文第二节中描述的行业规范的特定参数。

### 2.1.3 对等延时机制

IEEE1588 定义了两种用于计算链路延时的方法:

- (1) 延时请求-响应机制;
- (2) 对等延时机制。

延时请求-响应机制(端对端模式)下, 主、从时钟之间通过直接的报文交互计算二者间的链路延时。对等延时机制(点对点模式)则是通过链路上相邻设备间报文的交换来校准它们之间的链路延时。在对等延时机制中, 每一个网络元素使用先前计算好的链路延时调整其接收到的 Sync 报文的延时。

C37.238 仅要求时钟设备支持对等延时机制。这种机制的优势在于所有的链路延时都作为网络中各元素自身的后台任务被提前计算。因此, 就算出现因网络中某一元素的故障导致 Sync 报文突然改变路径的现象, 新路径的报文延时也会因已提前计算完毕而迅速得到纠正。此外, 主时钟的网络负载也会因为不再需要对从时钟的链路延时请求报文进行响应而降低。

对等延时机制要求同一链路两端的两个设备在两个方向上均互相交换 Pdelay\_Req 和 Pdelay\_Resp 报文, 且请求和响应报文必须是相互关联的。而为了尽可能地简化标准从时钟的协议逻辑, C37.238 规定标准从时钟(处于对时链路末端)可以不支持对等延时机制。

### 2.1.4 时钟类型

IEEE1588 定义了两种时钟类型: 单步时钟和双

步时钟。二者的区别在于单步时钟在发送 Sync 报文时, 在 Sync 报文中携带其离开主时钟的精确时间, 而双步时钟则在发送 Sync 报文后快速发送一帧附加的报文, 即 Follow\_up 报文, 用以携带 Sync 报文离开主时钟的精确时间。与双步时钟相比, 单步时钟需要特定的硬件支持以便在发送 Sync 报文时就更新其中的时标值。

C37.238 规定两种时钟类型均可用, 且推荐单步时钟, 因为它产生的网络流量更少且更易实现。

透明时钟应准确计算 Sync 报文通过其所消耗的时间(即 Sync 报文的驻留时间)以及设备间的链路延时。单步透明时钟将计算出的时间写入其发送的 Sync 报文的 correctionField 中, 而双步透明时钟则将时间写入 Follow\_up 报文的 correctionField 中。Pdelay\_Resp 和 Pdelay\_Follow\_Up 报文计算驻留时间和链路延时的方式与此类似。

IEEE1588 第 11.2 节规定: 从时钟应使用透明时钟转发的 Sync 报文和 Follow\_up 报文中 correctionField 值的和补偿通信链路和网络交换机所造成的延时, 原理如图 1 所示。

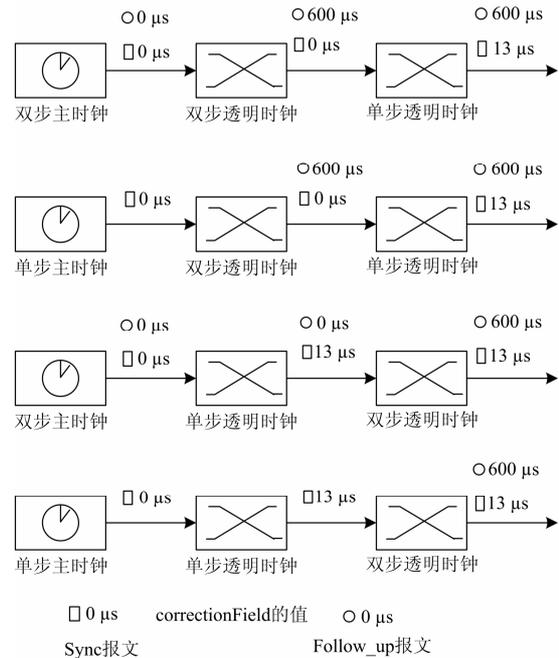


图 1 链路延时补偿原理

Fig. 1 Link delay compensation principle

### 2.1.5 最佳主时钟算法

当初始化或者任何配置重置/改变发生时, IEEE1588 支持自动选择系统中的最佳主时钟。IEEE1588 定义了缺省的最佳主时钟算法, 通过 Announce 报文实现最佳主时钟的选择。IEEE1588

还提供可配置的优先域对最佳主时钟选择过程进行控制。

C37.238 选择使用 IEEE1588 定义的最佳主时钟算法, 但有一个附加条件: 只有具备主时钟能力的设备才能发送 Announce 报文以宣布它们是潜在的主时钟。这是为了减少主时钟选择过程中的网络流量和收敛时间。变电站应该拥有 2~3 个具备主时钟能力的设备互为冗余, 而其他的设备则作为标准从时钟。

### 2.1.6 本地时间 TLV

IEEE1588 定义了自己的 Type Length Value (简称 TLV) 机制用于协议的扩展, 同时还定义了许多可用于特定行业 PTP 规范的 IEEE 1588 TLV。这些 TLV 的其中一个是在 IEEE1588 第 16.3 节所定义的 ALTERNATE\_TIME\_OFFSET\_INDICATOR TLV (简称 ATOI), 它允许主时钟将时区相关的配置发送给从时钟。

C37.238 要求主时钟在它们发送的 Announce 报文中添加一个 ATOI。一个节点(如 IED)把其本地时间与 UTC 时间相关联时需要附加的信息, ATOI 有一个实时的偏移数据区, 可以提供必要的数据将 UTC 时间转换为本地时间。所以, 单依靠添加 ATOI 就可以保证各应用实现定时方式由 IRIG-B 到 C37.238 的转换。ATOI 还支持对时间跳跃事件进行提示(例如: 夏令时更改事件)。

## 2.2 行业规范特定参数

C37.238 定义了以下特定的电力行业 IEEE1588 参数。

### 2.2.1 对等延时机制对于标准从时钟为可选项

C37.238 支持简单的标准从时钟, 如故障录波等装置。为保证标准从时钟的简单实现, 与这些设备相连的通信链路上的链路延时的测量是可选的。

这意味着, 从时钟在设定本地时间时, 不需要补偿其与主时钟之间的最后一段链路延时。考虑到最后一段链路的距离以及从时钟本身的精度要求, 该延时在整体链路延时中通常可以忽略。

### 2.2.2 IEEE 802.1Q 标签

C37.238 要求所有 PTP 报文遵守 IEEE802.1Q 协议, 在每一帧报文中插入一个标签。该标签有两个有趣的地方:

- (1) 帧的优先级(3 位);
- (2) 帧的 VLAN 成员(12 位)。

这是为了增加一个优先级域, 使关键任务(如变电站保护消息)与非关键任务(如文件传输)在交换机的同一个端口上竞争传输时, 前者能拥有更高的传输优先级。

VLAN 可以使应用程序有效分离, 这就使连接到各个应用 IED 设备的光纤只能携带这些设备所需的报文(提高报文的安全性和可靠性)。需要注意的是, 当应用程序需要时, VLAN 并不会阻止将报文分配给所有的 IED 设备。

VLAN 可以提供以下好处:

- 1) 阻止安全威胁;
- 2) 改进消息可靠性;
- 3) 消息保密;
- 4) 允许多个 IEEE1588 时间分配系统在同一网络上存在, 例如:

- (1) 同时支持音频/视频网络应用程序;
- (2) 每个 IED 接收多个数据源, 增加可靠性。

### 2.2.3 C37.238 TLV

C37.238 规定了特定配置文件的强制 IEEE C37.238 TLV, 包括:

- (1) GrandmasterID;
- (2) GrandmasterTimeInaccuracy;
- (3) NetworkTimeInaccuracy。

C37.238 从时钟可能会为别的应用提供时间, 这就需要从时钟为其时钟质量及其祖父时钟的确切身份提供精确标识。

任何给定的 C37.238 时间分配网络在固定条件下只能有一个主时钟。然而, 在暂态条件下(如意外网络故障造成的孤岛网段的分裂和重入), 不同从时钟的数据可能会在 C37.238 网络重新选择出新的主时钟之前到达它们的目的地。这就要求电力系统各应用在使用这些数据时必须确定提供这些数据的不同从时钟彼此之间不同步。

IEEE1588 和 C37.238 均有一个独特的 8 字节字段, 名为 clockIdentity。该字段足以单独识别可用的主时钟。但是, 受限于一一些电网应用报文的有效载荷(例如 IEC61850-9-2 SV 数据交换), 传输此信息有必要使用一个单字节字段。为满足这些应用, C37.238 强制 TLV 包括一个 2 字节的字段, 名为 GrandmasterID。在任何给定的网络, GrandmasterID 必须是唯一的且在配置过程中就予以分配。GrandmasterID 最显著的八位位组是保留的, 要求被设置为 0(其他都是非法值, 表示还未配置)。

### 2.2.4 C37.238 管理信息库

对于系统范围的配置和全网范围的状态监测设备, C37.238 定义了使用简单网络管理协议(SNMP)的管理信息库(简称 MIB)。该 MIB 只要求具备主时钟能力的设备支持, 包括边界/普通时钟、透明时钟等使用 IEEE1588 数据集和 C37.238 特定数据集的设备。

此外, MIB 还包括一些 SNMP 事件, 如最佳主时钟改变, 发现新的 PTP 文件, 主时钟时间偏差超过 OffsetFromMasterLimit 中配置的值等。

### 2.2.5 稳态特性

C37.238 规定了时间分配服务终端设备的稳态特性(定义环境为 80%线速下的网络负载): 当时间通过 16 级网络传输到终端设备时, 其精度必须在  $1\ \mu\text{s}$  以内。时间基准源引入的时间误差应小于  $0.2\ \mu\text{s}$ , 网络设备(透明时钟)应小于  $50\ \text{ns}$ 。C37.238 的时间分配网络如图 2 所示。

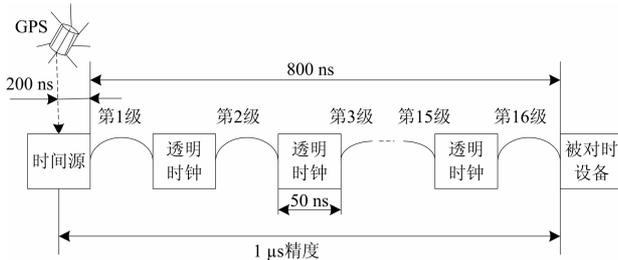


图 2 C37.238 稳态性能要求

Fig. 2 IEEE C37.238 steady-state performance requirements

此外, 为保证最佳主时钟变化过程中时间分配服务的质量, C37.238 规定: 常温下具备主时钟能力的设备在 5 s 内的守时误差应小于  $2\ \mu\text{s}$ 。

## 3 展望

### 3.1 网络安全性

网络协议的使用使 C37.238 的时间分布比传统的 IRIG-B 更容易收到干扰和破坏。C37.238 不提供加密安全算法, IEEE1588 资料性附录 K 中提供了一个“实验性”的协议, 但其被公认为无用的协议。

另一种方法是使用 IEC 安全标准 IEC62351-6<sup>[9]</sup>。其第 4.1 节规定: 对于需要 4 ms 响应时间、组播配置和低 CPU 负载的应用程序, 不推荐加密。相反, 通信路径选择过程(如 GOOSE 和 SV 应被限制在一个合乎逻辑的变电站局域网)应被用来为信息交流提供机密性保证。

符合 IEEE 802.1Q 标准要求的 C37.238 报文要求使用这种方法。当然, 网络交换机必须有自己的端口安全配置(例如使用 SNMPv3)和适用性(通过正确的 VLAN 分配实现对访问通过/不通过的控制)。

### 3.2 对无线的支持

利用无线网络实现精确时间同步不在 C37.238 定义的范围之内, 目前也只是处于研究阶段。无线网络与现在的以太网不同, 后者是全双工的, 随着时间的推移保持一致的比特率和链路延时, 而前者则无法提供这样的保证。

目前, 一个最新修订的无线标准(针对 IEEE802.11 链路<sup>[10]</sup>)正处于调查研究阶段。该标准是定义在 IEEE802.11v<sup>[11]</sup>上的原始 TIMINGMSM, 定义了独立于上述因素之外的发送/接收时间和无线链路延时测量方法。

使用该方法应该可以满足 C37.238 在无线链路上的要求, 但现在基于 IEEE802.11v TIMINGMSM 的设备的测试方法还较少发表。此外, 这种时间测量方法还必须协调以太网 PTP 测量和同步。有希望的是一个定义在 IEEE802.1AS<sup>[12]</sup>上的 IEEE 1588 音视频规范已经证明了这种协调的可行性。

## 4 结语

C37.238 定义了用于电力系统应用的 PTP 电力行业应用规范。

该行业规范是在特定变电站网络架构中使用的最优选择, 可满足电力系统最严酷的时间精度要求。

C37.238 在 IEEE1588 标准的基础上, 重新规范和定义了各 PTP 属性参数和运行机制(如最佳主时钟算法和链路延时计算机制), 增强了 IEEE1588 网络对时在电力系统应用的可行性、便利性和稳定性。此外, C37.238 还定义了一些新的 PTP 属性和机制(如行规特定 TLV 和 MIB), 进一步保证了 IEEE1588 电力应用的安全性和有效性。

### 参考文献

- [1] 庄玉飞, 黄琦, 井实. 基于 GPS 和 IEEE-1588 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): 111-115.  
ZHUANG Yufei, HUANG Qi, JING Shi. Development of a clock synchronization device based on GPS and IEEE-1588 protocol[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 111-115.
- [2] 李永乐, 江道灼, 禹化然. 一种基于多授时源多授时方式的电力系统同步授时方案[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 76-80.  
LI Yongle, JIANG Daozhuo, YU Huaran. A timing scheme for power system based on multi-timing source and multi-mode of timing[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 76-80.
- [3] IEEE Std 1588-2008 IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[S]. 2008.
- [4] IEC 61850-9-2 Ed. 2.0 communication networks and systems in substations-part 9-2: specific communication service mapping (SCSM)-sampled values over ISO/IEC

- 8802-3[S].
- [5] IEC 61850-5 Ed. 1.0 communication networks and systems in substations-part 5: communication requirements for functions and device models[S].
- [6] IEEE C37.238-2011 standard profile for use of IEEE 1588 precision time protocol in power system applications[S]. 2011.
- [7] IEEE Std 802.3™-2008 IEEE standard for lan/man-specific requirements-part 3: carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method[S].
- [8] IEEE Std 802.1Q™-2011 IEEE standard for local and metropolitan area networks-virtual bridged local area networks[S].
- [9] IEC 62351-6 power systems management and associated information exchange — data and communications security-part 6: security for IEC 61850[S].
- [10] IEEE Std. 802.11™ IEEE standard for local and metropolitan area networks-part 11: wireless lan medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S].
- [11] IEEE Std. 802.11v™-2011 amendment 8: IEEE 802.11 wireless network management[S].
- [12] IEEE Std. 802.1AS™-2011 IEEE standard for local and metropolitan area networks-timing and synchronization for time-sensitive applications in bridged local area networks[S].
- [13] IEEE C37.118.1-2011 standard for synchrophasor measurements for power systems[S]. 2011.
- [14] IEC 61850-7-2 Ed. 2.0 communication networks and systems in substations-part 7-2: basic communication structure for substation and feeder equipment-abstract communication service interface (ACSI)[S].
- [15] DL1100.2-2013 电力系统的时间同步系统(第 2 部分): 基于局域网的精确时间同步[S].  
DL1100.2-2013 time synchronism systems of power system part 2: precision time synchronization based on LAN[S].
- 
- 收稿日期: 2014-12-24; 修回日期: 2015-06-01
- 作者简介:
- 贺春(1973-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网、电力系统自动化、通信规约及规约测试; E-mail: hechun@ketop.cn
- 陈光华(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为变电站通信规约和时间同步测试; E-mail: chenguanghua@ketop.cn
- 张道农(1961-), 男, 教授级高级工程师, 设计总工程师, 主要从事继电保护及安全自动装置的设计与研究以及大型工程项目的项目管理工作。E-mail: zhangdn@ncpe.com.cn
- (编辑 周金梅)