

# The Research on Time Synchronization Technology for Smart Power Grid

Zanhong Wu<sup>1</sup>, Yuanfeng Huang<sup>2</sup>, Gang Xiong<sup>3</sup>, Xiaoming Tong<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Power Grid Control Center of Guangdong, Guangzhou

<sup>2</sup>Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Zhuhai

<sup>3</sup>Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Foshan

<sup>4</sup>State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing  
Email: [huangwei@bupt.edu.cn](mailto:huangwei@bupt.edu.cn)

Received: Nov. 19<sup>th</sup>, 2013; revised: Dec. 16<sup>th</sup>, 2013; accepted: Dec. 25<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2014 Zanhong Wu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Zanhong Wu et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

**Abstract:** To support precision time transmission with SDH link in ground applied in Time Synchronization System is the development direction in Smart Power Grid. First of all, the paper analyzes the current situation of network time synchronization, and proposes the requirement for electric power system time synchronization. Without changing the existing grid under the premise of time synchronization system structure and equipment, we integrate Guangdong Grid Control Center, DiDiao Center, and the substation into designing time synchronization system architecture based on satellite time reference source and ground source. It could pass the high precision time reference from each province center to the substation and power plant and also realize the power system network-wide time synchronization.

**Keywords:** Smart Power Grid; Time Synchronization; SDH

## 面向电力通信网的时间同步应用技术研究

吴赞红<sup>1</sup>, 黄远丰<sup>2</sup>, 熊刚<sup>3</sup>, 仝晓明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>广东电网电力调度控制中心, 广州

<sup>2</sup>广东电网公司珠海供电局, 珠海

<sup>3</sup>广东电网公司佛山供电局, 佛山

<sup>4</sup>北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京

Email: [huangwei@bupt.edu.cn](mailto:huangwei@bupt.edu.cn)

收稿日期: 2013年11月19日; 修回日期: 2013年12月16日; 录用日期: 2013年12月25日

**摘要:** 基于SDH地面链路传递高精度时间的电力全网时间同步系统是智能电网的发展方向。本文首先分析了电网时间同步的现状, 并提出电力系统对于时间同步的需求。兼顾广东省电网调中心、地调中心、变电站三级架构, 在不改变现有电网时间同步系统构架与设备的前提下, 提出了以卫星时间基准源为主、地面时间基准源为辅的电网全网时间同步系统设计方案, 将高精度时间基准通过地面链路从网省中心传递到各变电站、电厂, 实现电力系统的全网时间同步。

**关键词:** 电力通信网; 时钟同步; SDH

### 1. 引言

电力时间同步系统是电网安全运行的基础, 是提

高电力运行管理水平和事故分析能力的重要保障。随着智能电网的飞速发展, 电网对时间同步的要求越来越

越高,目前普遍要求时延误差小于 1 us,高精度、高可靠、可管理、统一的时间同步系统是确保电力系统安全运行、提高电力运行管理水平和事故分析能力的重要保障。目前,电力系统中的绝大多数时间同步系统还仅是各变电站内部的局部时间同步,各个变电站、厂站系统所使用的时间都是由各自系统内部时钟来提供的,由于各自内部时钟的差异与不同,将会导致运行长时间之后,系统与系统之间出现较大时间偏差,给电力系统的安全运行与生产带来巨大隐患。电力系统对于全网时间同步的需求日趋迫切,整个电力系统内部实现时间同步已然成为一种必然趋势。

电力系统全网时间同步系统是电力行业近年来重点发展和推广的关键技术,国内外正在开展基于 SDH 网络传递高精度时间基准、以及采用 PTP 实现高精度网络授时的应用研究。电力全网时间同步系统关键技术为 IEEE 1588 高精度网络授时协议、基于 SDH 网络的 E1 接入和传输时延误差修正,以满足电力全网时间同精度 1 us 的需求;建设时间同步网管系统,实现对时间同步装置的集中管理。目前电力 SDH 传输网络已覆盖省调、地调、变电站、发电厂、调度中心,可为电力全网时间同步系统的地面传输提供基础条件,通过卫星和地面时间基准的主备互用、有效融合,实现统一的电力全网时间同步,为电力系统的安全稳定运行提供可靠的时间同步保障。

## 2. 电网时间同步系统

目前电力系统中主要采取四种时间同步方式:1) 利用 GPS 卫星和北斗卫星系统实现时间同步,接收卫星时间信号对各个时钟设备进行同步;2) 编码同步,如 IRIG-B 码,DCF77 码等,通过将时钟源的时间信息编码,利用传输通道和媒体将这些时间信息码传送至各个接收端设备,实现时间同步;3) 网络时间协议(NTP)及简单网络时间协议(SNTP),将时钟源的时间信息以以太网包的形式通过网络传送至各个子系统,经过一级简单的时钟对时协议对子系统时间进行校准;4) IEEE1588 协议,即精确时钟对时协议(PTP),通过在以太网协议的物理层打时间戳,消除设备相应同步报文的不确定时延,很大程度地提高了同步精度<sup>[1]</sup>。

针对电力系统对于时间同步系统的要求,以上几

种同步方式都存在一些缺陷。电网的安全运行实现时间传递和同步的系统必须具备极高的安全性和可靠性并且能够自主控制,另外还需要具备较高的稳定度和精确度,并且能够覆盖整个电力系统的每个环节和每个角落。利用卫星系统实现时间同步,同步精度可以达到 1 us,但受环境天气影响较大,很难时刻保持较高的同步精度,在可靠性和自主控制方面都不能满足电力系统的要求;通过时间码实现同步要占用专门的传输通道,同步精度受传输距离影响,传输距离有限,则不能满足电网的精度要求并且不易实现整个电网全部覆盖;利用网络时间协议实现同步是目前时间同步系统发展的趋势,不存在前面两种同步方式的局限,但是由于网络传输中时延的不确定性(例如交换机时延,同步报文相应时延等)同步精度不能满足电力系统所有业务需求,NTP 与 SNTP 在局域网中能达到 1 ms 的同步精度,在广域网中只能达到 30 ms 精度<sup>[1,2]</sup>。PTP 协议正常工作需要系统硬件支持,对于目前已经成熟的电力系统来说,成本投入太大。目前电力系统对于可以直接使用的时间同步系统的需求非常迫切。我国电力系统已经建成一个完整的,覆盖全网的 SDH 网络,而近年来电网的运行实践证明 SDH 网络是目前电力系统最稳定,最可靠的通信网络。利用 SDH 的 E1/2M 业务通道传递时间信息,只需接入通用接口的 E1 对时设备,不对现有系统构架和设备进行改动,实现原有时间同步系统与 SDH 网络结合从而实现电力全网时间同步。并且 SDH 网络的 E1/2M 通道目前已经覆盖大部分电网的所有变电站,厂站,基于 SDH 网络实现全网时间同步完全可以满足电力系统对于同步精度,稳定度,可靠性等方面的要求。

## 3. 基于 SDH 网络时间同步技术

### 3.1. PTP 技术

IEEE 1588 PTP 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”,是通过网络传输高精度时间最可靠的一种协议,其主要原理是通过一个同步信号周期性的对网络中所有节点的时钟进行校正同步,可以使基于以太网的分布式系统达到精确同步<sup>[3]</sup>。

IEEE 1588 将整个网络内的时钟分为主时钟和从时钟,一个 PTP 通信子网内只能有一个主时钟。同步

的基本原理包括时间发出和接收时间信息的记录，并且对每一条信息增加一个“时间戳”，根据时间戳接收端就可以计算出自己在网络中的时钟误差和延时。PTP 协议定义了 4 种多点传送的报文类型和管理报文，包括同步报文(Sync)，跟随报文(Follow\_up)，延迟请求报文(Delay\_Req)，延迟应答报文(Delay\_Resp)。这些报文的交互顺序如图 1 所示。

Sync 报文的真实发出时间被测量后在随后的 Follow\_Up 报文中发出，Sync 报文的接收方记录下真实的接收时间。使用 Follow\_Up 报文中的真实发出时间和接收方的真实接收时间，可以计算出从属时钟与主时钟之间的时差，以此更正从属时钟的时间。但是此时计算出的时差包含了网络传输造成的延时，所以使用 Delay\_Req 报文来定义网络的传输延时。Delay\_Req 报文在 Sync 报文收到后由从属时钟发出。与 Sync 报文一样，发送方记录准确的发送时间，接收方记录准确的接收时间。准确的接收时间包含在 Delay\_Resp 报文中，从而计算出网络延时和时钟误差。同步的精确度与时间戳和时间信息紧密相关。纯软件的方案可以达到毫秒级精度，软硬件结合的方案可以达到微秒级精度<sup>[4]</sup>。

主时钟发出 Sync 报文与 Followup 报文，从时钟在接到之后可以通过 Sync 报文与 Followup 报文计算主时钟到从时钟之间的通道时延。如图 2 所示，主时钟发出 Sync 报文中并记录本地系统时刻 Tm1，从时钟接收 Sync 报文并记录报文到达从时钟的时刻 Ts1。如果通道时延不存在，则 Ts1 = Tm1 + Tms，Tms 为主时钟与从时钟的钟差，PTP 协议的最终目的是消除主从间的钟差。

主时钟发送 Sync 报文后将记录的时间 Tm1 封入 Followup 报文在 Tm2 时刻发出。从时钟接收到 Followup 报文并记录当前时刻 Ts2 从时钟根据 Sync 报文发送和接收的时间 Tm1 与 Ts1 可以计算出主时钟到从时钟的通道时延 Tmsd。

$$Tmsd = (Ts1 + Tms) - Tm1 \quad (1)$$

同样从时钟主时钟发出 DelayReq 报文与 DelayResp 报文，主时钟在接到之后可以通过 DelayReq 报文与 DelayResp 报文计算从时钟到主时钟之间的通道时延。如图 2 所示从时钟发出 DelayReq 报文并记录在 Delay-

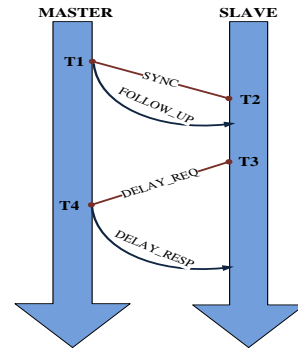


Figure 1. PTP packets and exchanging sequence  
图 1. PTP 报文与交换顺序

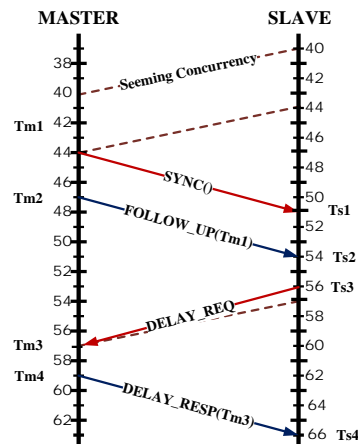


Figure 2. PTP delay and clock correction calculation  
图 2. PTP 时延与钟差计算

Req 报文发出时刻 Ts3，等待主时钟的响应。

主时钟接收 DelayReq 报文并记录报文到达时刻在 Tm3。主时钟将 Tm3 封入 DelayResp 报文中将它发送回从时钟。从时钟收到 DelayResp 报文可以计算出从时钟到主时钟的通道时延 Tmsd。

$$Tmsd = Tm3 - (Ts3 + Tms) \quad (2)$$

(1)式与(2)式中存在共同的变量主时钟与从时钟的时间差 Tms，如果通道时延相等，即

$$Tmsd = Tmsd = Td \quad (3)$$

(1)式与(2)式相加则可以得到

$$Td = 1/2[(Ts1 - Tm1) + (Tm3 - Ts3)] \quad (4)$$

得到后通道时延，主时钟与从时钟的钟差可以通过(1)式或者(2)式计算。

$$Tms = Td - (Ts1 - Tm1) \quad (5)$$

$$Tms = (Tm3 - Ts3) - Td \quad (6)$$

从时钟可以根据钟差修正本地系统时间与主时钟同步。频率调整,在实际系统中每个同步设备的本地的时钟源,由于晶振和时钟定时器分频偏差等原因导致每个设备的时钟运行速度都不一样。假设主时钟本地时钟速度为  $R_m$ ,从时钟本地时钟速度为  $R_s$ ,同步间隔为  $\Delta T$ ,则每次同步间隔中引起的最大偏差计算方式如式(7)所示:

$$\Delta = \Delta T \cdot \frac{|R_m - R_s|}{R_m} \quad (7)$$

补偿的目的是使  $R_m = R_s$ 。

具体补偿算法:在运行过程中,每台设备都记录本地时钟的一段运行时间,与主时钟的运行时间进行比较,来调整时钟的计数值,使设备时钟和主时钟的运行速度相同。调整方式如式(8)所示:

$$R_s = R_{s1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \Delta T_{mi}}{\sum_{i=1}^n \Delta T_{si}} \quad (8)$$

(8)式中  $R_s$  为调整后的从时钟速率,  $R_{s1}$  为调整前的从时钟速率,分子和分母分别表示了主时钟和从时钟在  $n$  个调整周期内的运行时间。

### 3.2. 基于 SDH 网络时间同步的实现

SDH 网络作为电路域的基本物理结构,其具有全网同步,组网灵活,兼容性强,网络智能化管理等优点,在电力系统中已得到广泛应用,大部分电网公司的 SDH 网络已经覆盖所有地调, E1 链路也基本覆盖全部变电站。基于 PTP 协议的前提是时间收、发两条传输链路要求绝对对称,即时延相同。由于 SDH 网络不能完全满足收发对称的要求,传输时延会因为链路倒换、指针调整等而发生变化<sup>[5]</sup>,因此在 SDH 网络上应用 PTP 协议时需要加以修正。

#### 3.2.1. 传输通道

全网时间同步系统所占用的 E1 资源很少,可以通过一条 E1 链路业务通道传输时间。对于 SDH 网络系统中的开销通道,由于各传输设备厂商的传输设备不同,其通道开销的保留位定义也不一样,只有同一厂商的传输设备才可以考虑基于开销通道传输。因此对电力全网同步来说,只有采用业务通道来传递时间信息才是全网时间同步的发展方向。

#### 3.2.2. SDH 网络对时间同步的影响及解决方法

当利用 SDH 网络传输时间基准信号时,SDH 网络的通道特性将直接影响时间的传递质量,包括授时精度、时间可用率等指标。因此,在实施地面时间传递时,需要对传输通道进行专门研究,通过分析通道的时延特性,提出时间传递技术的自适应补偿方法,以满足高精度时间传递的需求。

##### 1) 线缆传输的时延修正

在全网时间同步系统中,SDH 传输网络的光缆、电缆的长度、温差等变化对时间的传输时延影响较大,线路固定的传输时延基本上是固定值<sup>[6]</sup>。因此,在时间传递过程中必须要对传输线缆产生的时延进行误差修正。目前普遍采用的是双向时间比对法,通过收发端的高精度时间戳比对、自适应滤波等手段,基于 PTP 时间处理技术,可有效的自适应消除线路传输时延,传输时延修正误差达百纳秒量级。

##### 2) SDH 网元的时延抖动误差修正

在 SDH 网络中,传输网络和网元引起的时延误差主要包括因指针调整、映射处理等产生的时延变化。目前,电力 SDH 网络主要采用 STM-1 (155 M)、STM-4 (622 M)、STM-16 (2.5 G) 等传送网,其中,业务信号的中继处理基本上是在 SDH 的高阶部分,高阶部分采用了指针调整机制(AU4),以适应线路部分和高阶业务部分的适度隔离,提高 SDH 通信体制的适应能力,但是会造成通道时延的波动。由于 SDH 高阶部分信号速率高,高阶比低阶的时延波动要小得多,因此,SDH 网络即使在高阶中发生多级中继的累计时延效应,也可通过双向传输时间比对、自适应时延滤波等手段来消除其影响<sup>[6]</sup>。而 2M 低阶指针调整是造成时延抖动的主要原因,需要通过钟控滤波算法、自动平滑处理、提高守时精度的方法来克服。

##### 3) SDH 传输链路倒换误差修正

在基于 E1 传递时间信息的过程中,需要特别注意通道倒换、环路自愈问题对时间传递精度的影响。当工作通道传输中断或性能劣化到一定程度后,线路保护倒换功能将由主用传输通道自动转到备用传输通道,环形网保护就是当前传输链路中断或性能劣化到一定程度后所引起的一种通道倒换。在 SDH 传输中,通道倒换和环路自愈时将重新选择一条传送通路,从而产生较大的抖动时延;通过采用双向法在 SDH 网络中传递时间信号时,难以保证收发路径上数据传



输时延完全相同,无法通过采用 PTP 精确时间传输协议来解决 SDH 网络传输路径不对称引起的传输时延问题。因此,采用可事先比较、记忆当前传输链路和基准源之间的时延,在链路倒换引起时延变化时记录变化的差值,在原来的时延上增加这个差值,对最终时间进行修正。

综上所述,通过传输时延抖动探测、时延抖动建模、自适应滤波、时延误差抖动修正处理算法、时钟控制、PTP 精确对时等关键技术,可以实现电力 SDH 传输时延抖动误差修正,有效减少时延抖动误差,确保 1 us 的时间同步精度。

### 3.3. 时间同步系统(装置)的集中管理

通过网络接口实现对时间同步系统(装置)的配置、参数设置和运行状态监测、告警管理和统计分析等。通过配置时间同步监测装置,实现对时间同步系统的脉冲、B 码、串行报文和 NTP/SNTP/PTP 网络授时的工作状态及授时性能监测。当时钟装置异常、授时性能超过设定门限时,自动告警,由监控中心进行统计分析和告警处理。

## 4. 广东省电网全网时间同步系统

以广东省电网全网时间同步系统采用逐级汇接的三级网络拓扑结构,由一级时间同步系统(设在中调)、二级时间同步系统(设在佛山地调)和变电站时间同步系统组成,在原有电网时间同步系统和设备基础上,不改变原有系统构架配置,接入 E1 接入时钟装置,将标准 IRIG-B 信号中的时间信息承载于电力 SDH 网络的 E1/2M 业务通道,实现时间信息传递,从而将原有时间同步装置经地面链路组网,实现全网的时间同步。电力全网时间同步系统架构图如图 3 所示。

中调一级时间同步系统主时钟接收北斗、GPS 卫星系统的时间基准,获取高精度 UTC 时间信息,接收来自上级的时间基准信号,卫星时间基准和来自上级的地面时间基准有效融合,以地面为主卫星为辅、互为备用,驯服高稳原子钟,提供电力时间同步所需的各类授时信号。

地调二级时间同步系统主时钟接收北斗 GPS 卫星系统的时间基准,获取高精度 UTC 时间信息,接收来自中调一级时间同步系统通过 SDH 网络 E1/2M

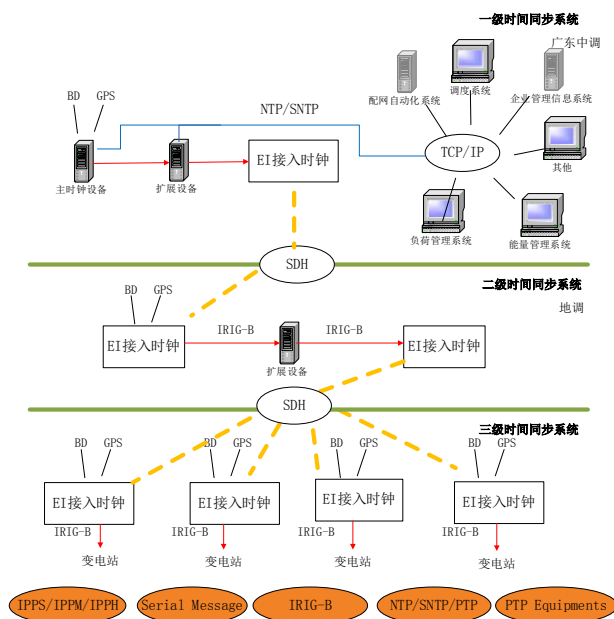


Figure 3. The Power Grid network-wide time synchronization system architecture of Guangdong Province  
图 3. 广东省电网全网时间同步系统结构

传输的高精度时间基准信号,卫星时间基准和来自上游的地面时间基准有效融合,以地面为主卫星为辅、互为备用,驯服高稳时钟,提供所需的各类授时信号。

变电站三级时间同步系统时钟接收北斗、GPS 卫星系统的时间基准,获取 UTC 时间信息;接收地调二级时间同步系统通过 SDH 网络 E1/2M 传输的高精度时间基准信号,卫星时间基准和来自上游的地面时间基准有效融合,以地面为主卫星为辅、互为备用,驯服高稳时钟,提供所需的各类授时信号。

针对原有时间同步装置不支持远程管理的时间同步系统,通过外置时间同步监测装置,实现对时间同步系统的脉冲、B 码、串行报文和 NTP/SNTP/PTP 网络授时的工作状态及授时性能监测,实现对时间同步系统的集中网络管理。

## 5. 系统性能

系统中所使用的 E1 接入时钟设备,采用 E1 接入和 IEEE 1588 v2 协议,提供基于标准 IRIG-B (DC)码接口的输入输出时间基准。装置采用 E1 链路 1 + 1 保护方式,具有标准的通用接口,内置高稳晶体钟,实时检测 E1 传输时因指针调整、映射等引起的时延抖动误差,采用自适应滤波处理算法和时钟控制等专利技术,有效地消除了 E1 链路的传输时延误差,满足

电网公司全网时钟同步 1 us 的需求。

研究具有较好的参考和实用价值。

## 6. 结语

电力 SDH 网络复杂,传输设备种类众多,在 SDH 网络的 E1 业务通道传递高精度时间,满足全网时间同步 1 us 同步精度的要求是一个需要长期研究、实践的课题。如何适应各种复杂网络环境,达到大范围推广、实用,还需要在提高时间精度、增强稳定性方面进行深入研究。本文中所给出的全网时间同步方案,基于现有电力系统实现简单,投入成本低,组网灵活,具有很强兼容性。并且经过在电力系统现网运行中得到应用验证,对进一步开展电力全网时间同步的应用

## 参考文献 (References)

- [1] 陈宁,李洪涛,俞刚 (2011) 电力系统中基于 SDH 的时间同步系统研究. *科学技术与工程*, **11**, 3574-3678.
- [2] 焦群,马涛,何迎利,丁鼎 (2011) 基于光通信系统建立时间传递网络技术的研究. *电力系统通信*, **32**, 21-27.
- [3] IEEE Std 1588-2008 (2008) IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems.
- [4] IEC 61588 (2004) Precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems.
- [5] 詹颖 (2009) 电网时间统一系统中 SDH 业务通道传递时间技术的研究. *华东电力*, **37**, 83-88.
- [6] 张继荣 (2008) 基于 SDH 的时间传递方法研究. 中国科学院国家授时中心, 西安.