

## 基于 IEEE 1588 标准的变电站同步网络的研究

汪祺航<sup>1</sup>, 黄伟<sup>2</sup>, 吴在军<sup>1</sup>, 赵上林<sup>1</sup>

(1.东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2.江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**介绍了国内现阶段数字化变电站时钟同步技术的应用,比较了现阶段变电站时钟同步技术的技术特点。针对新型数字化变电站高精度时钟同步指标要求,引入能达到亚微秒级对时精度的 IEEE 1588 时钟同步对时技术,阐述了 IEEE 1588 时钟同步技术原理。基于 IEEE 1588 时钟同步技术,讨论了数字化变电站站内对时网络的3种配置方法。分析了 IEEE 1588 对时技术用于区域电网的局限性,综合全球定位系统(GPS)对时技术和 IEEE 1588 技术提出了一种现阶段最优化的变电站同步时钟网络配置方案。

**关键词:**时钟同步; IEEE 1588; 数字化变电站

**中图分类号:** TM63

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2010)01-0051-04

现阶段,我国的变电站正逐步向基于 IEC 61850 标准的数字化变电站方向发展。随着基于 IEC 61850 标准建设的数字化变电站的大范围陆续投运,电子式电压电流互感器和智能电子设备必将广泛应用于变电站中。作为全数字化的变电站,数字信号采集和传输必需基于统一的时序和时钟标准,才能保证数据的准确性、可靠性和有效性。

时钟同步技术在数字化变电站中发挥着重要作用。第一,建立在基于 IEC 61850 的数字化变电站

收稿日期:2009-10-10;修回日期:2009-11-12

实现了数字通信和数据共享。大多数的二次设备都需要采集多个信号量(如 IEC 61850 的 9-1 报文需要传送 12 个通道的信号量)。这就要求对应同一个合并单元的电子互感器采样同步,不同间隔之间的合并单元同步,甚至不同变电站间的采样都需要采用时钟同步技术保持同步<sup>[1]</sup>。特别是像母差保护和变压器纵差保护这类需要远端数据配合的保护设备,更需要精确的时钟同步,以防止误动作。第二,时钟同步技术为电力系统中事件顺序(SOE)记录、故障录波以及事后数据分析等方面提供精确的实时数

谐波的滤波支路。

### 4 结束语

随着我国发展方式的转变,产业升级势在必行。今后越来越多的高新技术用户将出现在公用电网中,对电能质量的要求也会越来越高。这些企业在对电能质量提出高要求的同时,一般自身也是电能污染的源头。治理电网谐波污染,不能再停留在“先污染、后治理”的层面上。预先对各类用户的负荷性质进行分析和评估,在用户接入电网时同步投入电

能质量治理装置,才是对公用电网污染的根治良方。

### 参考文献:

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [2] 许 遐. 公用电网谐波的评估与调控[M]. 北京:中国电力出版社, 2008.
- [3] GB/T 14549-93 电能质量公用电网谐波[S].

作者简介:

吴 恒(1980-),男,江苏镇江人,工程师,从事电网损耗、无功与电能质量管理工。

## Introduction of Locating and Evaluating of Harmonic Sources in Power Network

WU Heng

(Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China)

**Abstract:** The harmonic pollution is a common problem in power network. Thoughts and methods of locating harmonic sources are summarized in this paper. Then, evaluating principles and process of consumer connecting to public grid, as well as project cases are presented.

**Key words:** public electric network; harmonic; evaluation

据,不仅能够实现相量测量、快速确定故障地点,更能给变电站控制中心提供准确的操作判据,为电力系统安全、稳定、经济的运行提供坚实的保障<sup>[2]</sup>。

目前在我国电力系统中广泛应用的同步时钟技术是采用全球定位系统(GPS)作为同步时钟源。在目前可利用的时钟基准源中,GPS有其独具的优越性,是最佳的候选同步时钟源。其输出的秒脉冲统计误差为  $1 \mu\text{s}$ ,且没有累积误差,能够满足许多应用领域对同步时钟的要求<sup>[3]</sup>。但是,GPS信号是通过无线电波传播的,一定会受到不同程度的干扰,特别是特殊情况下,如战争,则可能导致对时系统完全崩溃。而且变电站数字化的发展趋势使得站内二次硬接线被串行通信线所取代。针对变电站一体化的通信网络和更高的同步精度要求,IEC 61850 引入了简单网络时间协议(SNTP)。SNTP 是网络时间协议(NTP)的简化,应用于简单网络中。作为使用最为普遍的国际互联网时间传输协议,SNTP 的应用已较为成熟,在一定的网络结构下,SNTP 的对时精度可在大多数情况下保持在  $1 \text{ ms}$  以内<sup>[4]</sup>。

IEC 61850 标准对智能电子设备的时钟精度功能要求划分为 5 个等级(T1—T5),其中用于计量的 T5 等级精度达到  $\pm 1 \mu\text{s}$ 。对变电站时钟同步技术提出了更高的要求<sup>[1,4,5]</sup>。

## 1 IEEE 1588 时钟同步机理

IEEE 1588 是应用于工业控制和测量领域的具有亚微秒级同步功能的精确时钟同步协议(Precise Time Protocol)。一个 IEEE 1588 精确时钟系统包括普通时钟(仅有一个 PTP 端口)、透明时钟和边界时钟(具有多个 PTP 端口),系统的每个节点均被认为是一个时钟,通过以太网将整个系统的时钟相连。系统中的时钟工作在主时钟、从时钟和无源时钟 3 种状态。具体的时钟状态则是由最优化的时钟算法所确定<sup>[5-8]</sup>。

IEEE 1588 的时钟同步过程通过 2 个步骤实现:偏移测量和延迟测量。

首先进行偏移测量:主时钟优先发送 Sync 报文,它是周期性的发出(一般每 2 s 发送一次)。这时主时钟记录下 Sync 报文的发出时标  $T_1$ ,如图 1 所示。从时钟接收到 Sync 报文时,记录下收到报文时标  $T_2$ 。然后主时钟发出 Follow\_up 报文,该报文包含了 Sync 报文发送的精确时标  $T_1$ 。假定网络延时为  $T_{\text{Delay}}$ 。则可计算出偏移时差  $T_{\text{offset}}$ 。

$$T_{\text{offset}} = T_2 - T_1 - T_{\text{Delay}} \quad (1)$$

延迟测量:在组网结构固定,网络负载变化不大的系统中,网络延迟  $T_{\text{Delay}}$  基本上变化不大,延迟测

量不需频繁的进行,一般为随机发送。如图 1 所示,从时钟向主时钟发出 Delay\_Req 报文,从时钟记录下报文的发送时标  $T_3$ 。主时钟在收到 Delay\_Req 报文后,记录下接收时刻的时标  $T_4$ 。然后,主时钟向从时钟发送 Delay\_Resp 报文。Delay\_Resp 报文包含了时标  $T_4$ ,则可计算出网络延迟  $T_{\text{Delay}}$ 。

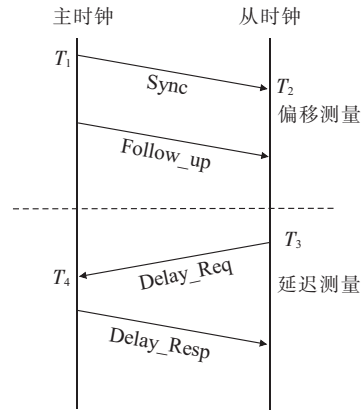


图 1 IEEE 1588 协议对时原理

$$T_{\text{Delay}} = T_4 - T_3 + T_{\text{offset}} \quad (2)$$

综合式(1)、式(2)可以计算出:

$$T_{\text{offset}} = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} \quad (3)$$

$$T_{\text{Delay}} = \frac{(T_4 - T_3) + (T_2 - T_1)}{2} \quad (4)$$

基于式(3)、式(4)所得到的  $T_{\text{offset}}$ 、 $T_{\text{Delay}}$  数据,从时钟就能够修正到与主时钟一致的时间标准。这种同步方法将时标的测量和报文的传送分离,使得报文时标的确定更加精确。在专门的硬件配合下,时标的测量能够精确到报文从 PHY 层芯片发出时刻,完全排除报文在芯片内部的接收、解码和传输的时延影响,从而使系统能够达到亚微秒级的精度。

## 2 站内 IEEE 1588 对时方案

IEC 61850 标准将变电站分为变电站层、间隔层和过程层,通过站级总线和过程总线相连。对数据同步精度的要求,间隔层设备需要达到  $\text{ms}$  精度;而过程层设备,由于传输采样值信息和跳闸信息,需要达到  $\mu\text{s}$  级的同步精度。根据以上要求,并考虑时间同步系统的可靠性、稳定性、可扩展性和易维护性,以及备用基准时钟源系统和抗干扰措施,可以将变电站站内同步时钟系统按如下 3 种方式配置。

配置方案 1 如图 2 所示。在变电站过程层智能设备加装一块支持 IEEE 1588 功能的硬件模块(例如美国 NS 公司生产的 DP 83640 芯片),通过该模块与过程层总线相连,选取时钟精度最高、最稳定的智能设备时钟源作为系统主时钟,通过过程总线将过程层设备统一到与主时钟同步。

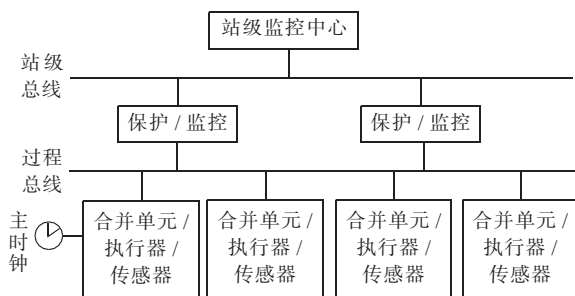


图2 变电站站内配置方案1

站级总线由于要求的同步精度相对较低,可以采用仅软件支持的 IEEE 1588 对时,或是 IEC 61850 推荐的 SNTP 对时,或是现在广泛应用的 GPS 对时。若采用 IEEE 1588 对时,可将过程层主时钟源同时作为站级主时钟,但是需要对站级总线设备增加相应的软件支持,更新软件配置;若采用 SNTP 和 GPS 对时,由于这2种方法现阶段广泛的应用和设备厂商的模块支持,只需对现有变电站做较小的改造。但后一种方案需考虑站级总线和过程总线之间的时钟偏差校正。可以将 SNTP(或 GPS)时钟信号源与 IEEE 1588 主时钟相接,使其相互校正时间和互为冗余备用。

配置方案2如图3所示。将主时钟源从智能装置中独立出来,作为一个专门的时钟源。这样做虽然增加了装置数量,增加了变电站一定的维护工作量,但是一方面能够增强系统的扩展性和兼容性;另一方面增加了系统的稳定性,使得过程层设备同步于确定的时钟源装置,更方便于变电站检修和维护以及备用设备的配置和切换。

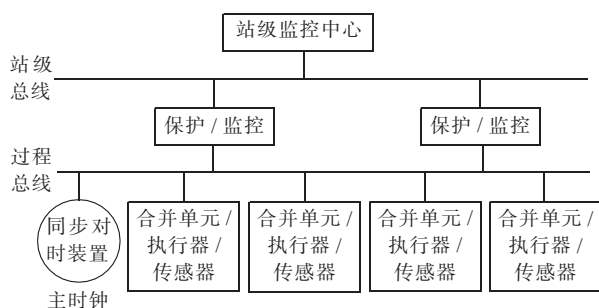


图3 变电站站内配置方案2

配置方案3如图4所示。将过程层总线按保护区域设置为不同的段,使得过程总线段与段之间的数据交换很少,并将段与段之间通过交换机相连。这种方案降低了总线负载,增加了总线数据的传输效率和数据流量冗余,同时降低了  $T_{Delay}$  的变化范围和频率。虽然加装了交换机,增加了段与段间数据交换的网络时延和延时的不确定性。但是 IEEE 1588 协议提供了边界时钟来解决时延问题;加装支持边界时钟功能的交换机,主时钟网段授时给边界时钟,

从网段再通过与边界时钟对时保持与主时钟的同步。同时亦可配合 VLAN 技术,优化逻辑网段划分和数据交换,提高变电站过程层信息交换的安全性和可靠性。

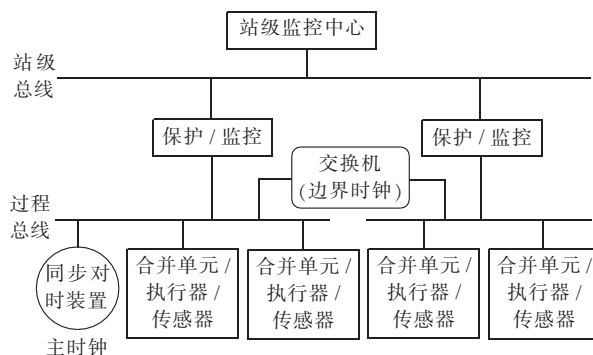


图4 变电站站内配置方案3

### 3 站间 IEEE 1588 对时方案

站间使用 IEEE 1588 对时方案,其最大优势在于可以实现区域变电站之间的互联对时,其亚微秒级的精度可以保证区域内重要节点电压向量同步测量、母差保护线路两端合并单元的采样同步,以及故障测距和事件顺序记录功能的实现。

将 IEEE 1588 引入站间对时,可选取控制中心或变电站(一般为枢纽变电站)作为基准主时钟站,通过支持边界时钟的路由器网络将时钟源信号发送给区域内的其他变电站,从变电站通过网络接收时钟源信号后将站内所有时钟同步到边界时钟的授时标准。但是,由于站间线路的增长、网络线路和交换机等设备的增多,在交换机延时、线路延时、队列延时等因素的相互作用下,报文的响应时间和网络时延的不确定性将大大增加。

图1所示的 IEEE 1588 对时过程是建立在主从时钟间的偏差  $T_{offset}$  在对时过程中保持不变,以及报文传输的网络时延完全对称的基础之上的。假设在时标  $T_2$  和  $T_3$  产生时刻从时钟与主时钟间的偏差分别为  $T_{offset}$  和  $T_{offset1}$ ;报文在主时钟到从时钟和从时钟到主时钟之间的网络延时分别为  $T_{delay}$  和  $T_{delay1}$ ,则可令:

$$\Delta T_1 = T_{offset} - T_{offset1} \quad (5)$$

$$\Delta T_2 = T_{delay} - T_{delay1} \quad (6)$$

重新计算主从时钟的偏移量和延迟量,得

$$T_{offset} = \frac{(T_2 - T_1) + (T_3 - T_4) + \Delta T_1 - \Delta T_2}{2} \quad (7)$$

$$T_{delay} = \frac{(T_2 - T_3) + (T_4 - T_1) - \Delta T_1 + \Delta T_2}{2} \quad (8)$$

对比式(3)、式(4)和式(7)、式(8)可看出报文响应时间的增加和报文传输的不对称性将使对时精度

受到很大影响,难以保证变电站间的同步精度。

现阶段国内变电站主要采用接收 GPS 同步信号实现定时, GPS 可向各站 PTP 系统主时钟提供时钟源信号。由于使用了两级定时方案,站间定时精度会有一定程度的下降。但现阶段 IEEE 1588 精确定时应用于广域网的定时精度还有待进一步检验。考虑到目前多数变电站均安装有 GPS 定时装置,可以在原有 GPS 设备基础上对站内装置进行优化配置,实现一种比较可行和经济的站间高精度定时优化配置方案,如图 5 所示。

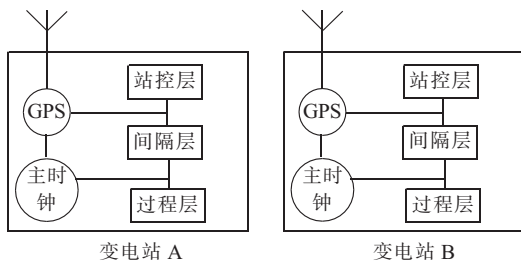


图 5 变电站时钟同步系统优化配置方案

站间通过 GPS 信号定时,为区域内各个变电站提供精确绝对时钟。在变电站站内部,利用各层对同步精度要求的不同,采用不同的同步手段。站控层利用 GPS 信号同步;过程层采用 IEEE 1588 定时方案,用一专门定时 PTP 时钟装置为过程层设备提供同步信号,其精确时钟源由 GPS 提供。同时,PTP 时钟与 GPS 信号进行互相校验。在 GPS 信号失效的情况下,PTP 时钟仍可保证站内设备时钟的同步并向控制中心报警。同理,若 PTP 时钟失效, GPS 则可通过互校验确定,并启动冗余备用 PTP 时钟。

#### 4 结束语

现阶段, IEEE 1588 协议在数字化变电站中的应用还处在探索阶段。作为一种能提供亚微秒级精

度的定时协议,如何与变电站设备和网络配合发挥出最大的效益是现阶段亟待解决的难题。本文提出的方案为 IEEE 1588 协议在数字化变电站中的应用提供了参考。若能进一步解决好广域网的应用方案和与 IEC 61850 推荐的 SNTP 定时方法的兼容问题, IEEE 1588 协议一定能在电力系统的发展中发挥出更大的作用。

#### 参考文献:

- [1] 张信权,梁德胜,赵希才. 时钟同步技术及其在变电站中的应用[J]. 继电器, 2008, 36(9): 69-72.
- [2] 张春鹏. 电子式互感器合并单元同步时钟模块的设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [3] 黄云水,冯玉光. IEEE 1588 精密时钟同步分析[J]. 国外电子测量技术, 2005, 24(9): 9-12.
- [4] 赵上林,胡敏强,窦晓波,等. 基于 IEEE 1588 的数字化变电站时钟同步技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 97-102.
- [5] 殷志良,刘万顺,杨奇逊,等. 基于 IEEE 1588 实现变电站过程总线采样值同步新技术[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(13): 60-63.
- [6] 张 妍,孙鹤旭,林 涛,等. IEEE 1588 在实时工业以太网中的应用[J]. 微计算机信息, 2005, 21(9): 19-21.
- [7] 曹津平,李伟,秦应力,等. 数字化变电站过程层的通信技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 60-63.
- [8] 刘慧源,郝后堂,李延新,等. 数字化变电站同步方案分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 55-58.

#### 作者简介:

- 汪祺航(1985-),男,四川南充人,硕士研究生,研究方向为变电站自动化技术;
- 黄 伟(1980-),男,江西临川人,工程师,从事数字化变电站, IEC 61850 标准相关技术研究工作;
- 吴在军(1975-),男,江苏南京人,副教授,研究方向为变电站自动化技术;
- 赵上林(1981-),男,江苏南京人,博士研究生,研究方向为变电站自动化系统及分布式发电。

## Research Based on IEEE1588 Time Synchronization Network in Digital Substation

WANG Qi-hang<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>2</sup>, WU Zai-jun<sup>1</sup>, ZHAO Shang-lin<sup>1</sup>

(1.Southeast University, Nanjing 210096, China;

2.Jiangsu Electric Power Research Institute Co.,Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** This paper introduces the application of time synchronization schemes in digital substation and compares the technical characteristics of them. Aim to meet high-accuracy synchronization requirement of new digital substation, a time synchronization system based on IEEE 1588 which can support sub-microsecond level of accuracy is put forward. The theory of IEEE 1588 is expatiated at the same time. According to IEEE 1588, this paper expounds three application schemes on time synchronization network in substation, and analyzes the limits of IEEE 1588 applied to time synchronization between substations. Lastly, an optimal configuration synchronization network is proposed, on the basis of integrating the GPS and IEEE 1588 technology.

**Key words:** time synchronization; IEEE 1588; digital substation