

# 时钟同步技术及其在变电站中的应用

张信权<sup>1</sup>, 梁德胜<sup>2</sup>, 赵希才<sup>1</sup>

(1.南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211106; 2.中国石油独山子石化公司, 新疆 克拉玛依 833600)

**摘要:** 时钟同步对于电力系统的故障分析、监视控制及运行管理具有重要意义。为更好地应用时钟同步技术, 介绍了世界上现有的时钟同步手段、变电站内常用的对时方案, 具体分析了GPS对时方案的误差来源和减小误差的措施, 列举了时钟同步技术在变电站内的应用, 展望了变电站用时钟同步技术的发展趋势。指出GPS是主要的时钟源, 将时间报文和脉冲信号相结合的综合对时方式仍是保证对时精度的有效手段; IEEE 1588可能会逐步成为主要的对时手段; 北斗星导航系统将可以提供另外一个可靠的时钟源; 基于时钟同步技术的新的应用功能, 如同步相量测量必将进一步发展。

**关键词:** 差动保护时钟同步; GPS; 继电保护; 变电站自动化; IED

## Time synchronization and its application in substation

ZHANG Xin-quan<sup>1</sup>, LIANG De-sheng<sup>2</sup>, ZHAO Xi-cai<sup>1</sup>

(1.Nanjing NARI-RELAYS Electric, Co., Ltd, Nanjing 211106, China;

2.CNPC Dushanzi Petrochemical Co., Kelamayi 833600, China)

**Abstract:** Time synchronization is very important for the fault analysis, supervision and control and operation management of electrical power system. To explore further application of time synchronization technology, all the available time synchronization signal sources in the world and practical time synchronization scheme in substations are introduced firstly. Then the error sources of time synchronization are analyzed and corresponding countermeasures are proposed. The application of time synchronization in various areas and its future are pointed out. It is pointed out that GPS remains as the main time resource, time message together with pulse signal is still a good solution to get high accuracy. IEEE 1588 will become the principal way to achieve high accuracy time synchronization in the future; BEIDOU satellite navigation system may provide another reliable time resource; new functions based on time synchronization, such as sync-phasor measurement will be developed furtherly.

**Key words:** time synchronization; GPS; protective relays; substation automation; IED

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)09-0069-04

## 0 引言

时钟同步对于电力系统的故障分析、监视控制及运行管理具有重要意义。电网运行状态瞬息万变, 发生状态变化后特别是发生事故后必须及时掌握实时信息, 才能对其进行及时处理, 将其影响控制在一定范围内, 确保系统安全、稳定、经济运行; 及时掌握实时信息, 也便于事后进行分析, 分析各类事件特别是系统故障的发生、发展过程, 为优化保护和控制、防止灾难性事故发生提供依据。而统一的时间基准是进行处理和分析的基础。电子式互感器的应用和数字化变电站的建设, 更需要同一间隔各个互感器之间, 不同间隔之间、甚至是不同变电

站之间采取时钟同步手段保持采样同步。在变电站中, 测控装置、故障录波器、微机保护装置、功角测量装置 PMU、安全自动装置、电能计量系统 IED (Intelligent Electronic Device, 智能电子设备) 都需要有站内一个统一的时钟对其授时。

本文介绍了世界上现有的时钟同步手段、变电站内常用的对时方案, 具体分析了GPS对时方案的误差来源和减小误差的措施, 列举了时钟同步技术在变电站内的应用, 展望了变电站用时钟同步技术的发展趋势。

## 1 时钟同步源

### 1.1 无线电授时

北美地区的无线电授时包括 WWV, WWVH, WWVB。WWV 和 WWVH 精度一般保持在在 10 ms 以内, 但是因为其绝对时间采用语音报时, 难以转化为数字信号, 并不适用于电力系统; WWVB 将时间信息通过 60 kHz 的载波信号传输, 精度在 1 ms 以内, 其主要问题是载波信号在变电站内容易受到电晕放电的严重干扰。

和美国的 WWVB 类似, 中国的 BPC、英国的 MSF、德国的 DCF、日本的 JJY、瑞士的 HBG 也都是通过 40-70kHz 的载波信号发送本国的标准时标。

Loran-C (Long Range Navigation 远程导航) 传输的是脉冲信号, 而且只通过地波传播信号。但是由于它本身固有的频率为 100kHz, 也容易受到电晕放电的干扰。

OMEGA 导航系统和 Loran-C 类似, 工作在 10~14 kHz, 作用距离可以很远, 其延时时间预测精度可以达到 2~5  $\mu$ s。主要缺点是接收器的花费要比使用卫星系统的高。

### 1.2 卫星授时

卫星全球定位系统是一种以人造地球卫星为载体的全球覆盖、全天候工作的无线电导航定位系统, 可以实现精确导航、定位和授时。目前世界上主要有美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧洲空间局的伽利略计划、中国的北斗导航卫星系统。美国的 GPS 在定位和授时的精度、系统可靠性、用户设备产业化等诸多方面占据绝对优势, 在电力系统中应用最广<sup>[1]</sup>。

### 1.3 网络授时

网络时间协议 NTP (Network Time Protocol) 协议和简单网络时间协议 SNTP (Simple Network Time Protocol) 是使用最普遍的国际互联网时间传输协议。NTP 属于 TCP/IP 协议族, 采用了复杂的时间同步算法, 可提供对时精度在 1~50 ms 之间。而 SNTP 是 NTP 的一个简化版, 没有 NTP 复杂的算法, 应用于简单的网络中。在 IEC61850 中规定的时间同步协议就是 SNTP, 在多数情况下, 其精度可以保持在 1 ms 内<sup>[2]</sup>。

而真正能满足变电站精确对时需要的是 IEEE 1588<sup>[3,4]</sup>。IEEE 1588 的基本功能是使分布式网络内的最精确时钟与其他时钟保持同步, 同时完全兼容原有的以太网协议。它定义了一种精确时间协议 PTP (Precision Time Protocol), 采用“乒乓”对时算法, 在 MAC 层进行时间戳记录, 用于对标准以太网或其他采用多播技术的分布式总线系统中的传感器、执行器以及其他终端设备中的时钟进行亚微秒级同步。经测试, 采用 IEEE1588, 时钟同步的精

准程度可以达到正负 3  $\mu$ s 以下<sup>[5]</sup>, 如果采用一定的补偿算法, 精度还可以进一步提高<sup>[6]</sup>。

## 2 站内对时方案<sup>[1,7]</sup>

### 2.1 脉冲对时(硬对时)

主要有秒脉冲信号 PPS (Pulse per Second, 每秒 1 个脉冲) 和分脉冲信号 (Pulse per Minute, 每分钟 1 个脉冲)。秒脉冲是利用 GPS 所输出的每秒一个脉冲方式进行时间同步校准, 获得与 UTC (Universal Time Coordinated 协调世界时) 同步的时间准确度较高, 上升沿的时间误差不大于 1  $\mu$ s 这是国内外 IED 常用的对时方式。分脉冲是利用 GPS 所输出的每分钟一个脉冲方式进行时间同步校准。

在南瑞继保的 RCS-9000 和 RCS-9700 变电站自动化系统中, 脉冲信号可以通过静态空接点或者 RS-485 差分信号传送。通过 RS-485 总线传送差分脉冲对时信号, 可以同时实现多个 IED 的对时, 同时增加了对时信号传送距离, 具有一定的优越性。

### 2.2 通信对时(软对时)

通信对时是通过通信通道将时钟信息以数据帧的形式向各个 IED 发送。IED 接收到报文后通过解帧获取当前主时钟信息, 来校正自己的时间, 以保持与主时钟的同步。例如 DL/T 667-1999 (idt IEC60870-5-103: 1997) 的 ASDU6。

### 2.3 综合对时

将时间报文和脉冲信号相结合是一种比较完善的对时方式。一般主时钟会在秒脉冲发出的同时, 发出对时报文。而 IED 一般是先接到脉冲对时信号而后接收到对时报文。IED 接收到秒脉冲后, 如果毫秒计数尚未回零, 认为当地时钟偏慢, 则将秒计数加一; 如果毫秒计数已经过零, 认为当地时钟偏快, 则将秒计数保持不变; 与此同时, 将 IED 的秒级以下的计数, 包括毫秒清零。IED 接收到报文后, 只修改秒以及秒以上的计数器, 毫秒及以下的计数保持不变。

### 2.4 编码对时

编码对时信号有多种, 国内常用的是 IRIG-B<sup>[8]</sup>, 有调制和非调制两种。1 kHz 正弦调制信号可达到 1 ms 的对时精度, 非调制信号可达到纳秒精度。非调制的 TTL 电平信号, 用在传输距离不大的场合。南瑞继保开发的 GPS 主时钟可以通过 RS-485 总线传输非调制的 IRIG-B 码。

IRIG-B 码实际上也可以看作是一种综合对时方案, 因为在其报文中包含了秒、分、小时、日期等时间信息, 同时每一帧报文的第一个跳变又对应于整秒, 相当于秒脉冲同步信号。

## 2.5 以太网通信条件下采用 IEEE1588 的可能性

目前在变电站自动化系统中,越来越多地采用以太网作为通信手段。IEEE1588 标准采用软硬件结合的方式,可以实现亚微秒级的网络同步精度,更适用于过程层,比如电子式互感器的交流采样数据同步<sup>[9]</sup>。但要实现该同步协议,交换机必须支持 IEEE1588,这无疑会增加系统造价。在 IEC61850 中规定的时间同步协议是 SNTP,而若系统中同时存在两种同步标准,又将带来兼容性和互操作性问题,并增加系统的复杂度。如何解决这些问题,尚需作大量技术论证和实践验证<sup>[10]</sup>。

## 2.6 对时网络

在大型变电站设计中,通常有多个保护小间,小间之间有一定距离。对于这类变电站有两种对时组网方案:方案一为集中式,全站只设一个主时钟,对时报文通过监控网络全站广播,脉冲在全站传送。保护小间之间可以采用光缆作为通信介质来传送脉冲信号。为此南瑞继保开发了相应的光电转换装置;方案二为分布式,主时钟按保护小间布置。对时报文仍然来自主控制室的主时钟,全站广播。脉冲可以取本小间的。集中式方案是一种简单、可靠的多设备统一对时方式。

## 3 对时系统的误差来源

### 3.1 GPS 时钟的精度

一般 GPS 时钟的精度都好于 50 ns,最好的为 20 ns,最差的 500 ns<sup>[11]</sup>。需要注意的是如果采用 IRIG-B 1kHz 调制信号,其精度低于 1 ms。

### 3.2 信号传播

采用光纤作为传播媒介时,每一次电-光-电转换的时间延迟大约为 15  $\mu$ s,光纤中的传输延迟为 5  $\mu$ s/km。信号在铜导线中的传输延迟也可粗略地用 5  $\mu$ s/km 来计算。

如果采用静态空接点来传送秒脉冲信号,则在接入 IED 时,光耦的延迟时间可按照 2  $\mu$ s 来计算。

### 3.3 IED 对时处理方案和守时钟

IED 对秒脉冲的处理是影响对时精度的关键因素。如果采用硬件中断方式,其精度取决于处理器的处理速度;如果采用查询方式,则还要取决于处理器的负载。在两次秒脉冲之间,时间精度就决定于 IED 的守时钟,晶体振荡器的固有误差和温度漂移都是影响因素,例如一个 100 ppm 的晶振每秒钟的误差最大为 100  $\mu$ s。详细的计算可以参考文献 [12, 13]。根据文献 [13] 的计算结果,必须采用秒脉冲对时才能保证 SOE 分辨率不大于 2 ms 的要求。

### 3.4 IED 对模拟量输入和开入量的处理方式

一般情况下,IED 采用定时中断的方式来处理模拟量和开入量。最坏的情况是,延时一个采样间隔后,IED 才检测到模拟量和开入量的变化。例如,如果在 50 Hz 系统中采用每周波 24 点的采样速率,则最大延迟时间为 0.833 ms。

对于模拟量,采样之后要进行抗混叠滤波和功能要求的其他数字滤波。这些滤波措施也会造成一定的时间延迟。为最大限度地减少延迟,并真实地反映模拟量波形,故障录波等功能应该采用较高的采样速率,并记录未经滤波的原始采样值。

对于开入量,也有一个防抖计算的问题,以滤除触点抖动,并真实地反映开入量的状态变化,不同的防抖措施会产生不同的时间误差。南瑞继保的 RCS-9700 系列测控装置采用可整定的延时来进行防抖处理,如果确实是开入量变位,则选择其第一次跳变时刻作为变位时刻。

## 4 应用

### 4.1 故障录波、事件顺序记录和故障定位

采用时钟同步技术之后,全网就可以维持一个统一的时间基准。这样通过收集分散在各个变电站的故障录波数据和事件顺序记录,可以在全网内更好地复现事故发生发展的过程,监视系统的运行状态。对故障录波和事件顺序记录来说,对时精度不宜低于 1 ms。

基于 GPS 同步时钟的电网故障定位系统可以通过检测各变电站接收到故障反馈信号的精确时间、对比不同站点的时差关系来定位故障发生的位置。理论上,对时精度达到 1  $\mu$ s 时,测距精度可以达到 300 m。

### 4.2 同步相量测量

同步相量测量技术及其为基础的广域监测系统已在电力系统的实时监测中得到了应用。目前投入运行的同步相量测量装置都以 GPS 作为同步时钟源。相量测量的可靠性依赖于 GPS 的可用性以及授时信息的准确程度,要求对时精度达到 1  $\mu$ s。

### 4.3 两个变电站之间的同步试验

可以利用 GPS 同步时钟在线路两侧进行故障暂态同步试验,来检验线路纵联保护装置,包括相差保护、电流差动保护、高频距离保护、高频方向保护装置的特性。对于距离保护和方向保护,由于主要采用就地信息,线路两端只交换逻辑信号,对时精度在几个 ms 内就可以了;但是差动保护、相差保护因为要比较两侧的模拟量,要求对时精度应达到 1 ms 以上。

基于 GPS,也可以在全网内实现同步反事故演

习。

#### 4.4 电子式互感器的同步采样

新型的电子式互感器输出的是采样处理后的数字信号,各相电流和电压互感器输出的信号必须同步,才能为继电保护和其它装置使用<sup>[9,10]</sup>。例如母线保护要求所有间隔的电流采样信号必须同步,而线路差动保护则需要两个变电站之间保持同步。该应用要求对时精度达到 1 μs (用于计量)和 4 μs (用于输电线路保护)。

#### 4.5 未来展望

随着 IEC 61850 系列标准(国内转化标准为 DL 860 系列)的推广应用,IEEE1588 也许会成为主要的对时手段,特别是应用在电子式互感器的同步采样方面<sup>[9]</sup>。

尽管 GPS 已经在变电站内得到广泛应用并取得良好的效果,但是 GPS 是由美国军方掌控的系统,其可用性和授时精度受制于美国的 GPS 政策,存在一定风险和不可依赖性。我国自主开发的北斗卫星导航系统已经在舰船监控、水文测报和气象监测等领域中得到应用,衷心希望她能够在电力系统也同样发挥作用<sup>[14]</sup>。

## 5 结论

时钟同步技术对电力系统运行具有重要意义。目前技术条件下,在变电站内,将时间报文和脉冲信号相综合的综合对时方式(包括 IRIG-B)仍是保证对时精度的有效手段。IEEE 1588 可能会逐步成为主要的对时手段。北斗星导航系统将可以提供继 GPS 之后的另外一个可靠的时钟源。基于时钟同步技术的新的应用功能,如同步相量测量必将进一步发展。

## 参考文献

- [1] 郭一夫, 郜洪亮. 新型变电站时钟同步系统的研制及应用经验探讨[J]. 继电器, 2007, 35(7): 61-64.  
GUO Yi-fu, GAO Hong-liang. Development and Application of a Clock-synchronism System for Substation[J]. Relay, 2007, 35(7): 61-64.
- [2] 高志远, 刘长虹, 刘瑞平. 厂站自动化系统中应用网络时间同步技术探讨[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7): 84-89.  
GAO Zhi-yuan, LIU Chang-hong, LIU Rui-ping. Discussion on Application of Network-based Timing Technology in Power Plant and Substation Automation System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 84-89.
- [3] IEEE 1588-2002 IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems[S].
- [4] 王燕山, 李运华, 刘恩朋, 等. 以太网时间同步技术的研究进展及其应用[J]. 测控技术, 2007, 26(4): 4-6.  
WANG Yan-shan, LI Yun-hua, LIU En-peng, et al. Research and Application of Ethernet Time Synchronization[J]. Measurement & Control Technology, 2007, 26(4): 4-6.
- [5] 刘明哲, 徐皓冬, 赵伟. 基于 IEEE1588 的时钟同步算法软件实现[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 2009-2011.  
LIU Ming-zhe, XU Ai-dong, ZHAO Wei. Implementation Software Method of Clock Synchronization Algorithm by Base on IEEE 1588 Protocol[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 2009-2011.
- [6] 桂本旭, 冯冬芹, 褚健, 等. IEEE 1588 的高精度时间同步算法的分析与实现[J]. 工业仪表与自动化装置, 2006, (4): 20-23.  
GUI Ben-xuan, FENG Dong-qin, CHU Jian, et al. A Study and Analysis of High-accuracy Network Synchronization Based on IEEE1588[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2006, (4): 20-23.
- [7] 温先卫, 戴海燕. 500kV 变电站集中式统一 GPS 对时系统的实现[J]. 湖北电力, 2005, 29(6): 58-60.  
WEN Xian-wei, DAI Hai-yan. Realization of Centralized Unified GPS Time Calibration System for 500kV Substation[J]. Hubei Electric Power, 2005, 29(6): 58-60.
- [8] 周斌, 黄国方, 王耀鑫, 等. 在变电站智能设备中实现 B 码对时[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 86-88.  
ZHOU Bin, HUANG Guo-fang, WANG Yao-xin, et al. Time Synchronization with IRIG-B Code in Substation IED[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 86-88.
- [9] 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.  
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. A New IEEE 1588 Based Technology for Realizing the Sampled Values Synchronization on the Substation Process Bus[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 60-63.
- [10] 张沛超, 高翔, 顾黄晶, 等. 全数字化保护系统的主要问题及解决方案[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(6): 104-107.  
ZHANG Pei-chao, GAO Xiang, GU Huang-jing, et al. Main Issues of All Digital Protection System and Solutions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(6): 104-107.
- [11] Behrendt K, Fodero K. The Perfect Time: An Examination of Time Synchronization Techniques[R]. Schweitzer Engineering Laboratories.
- [12] 王峥, 胡敏强, 郑建勇. 基于 GPS 的变电站内部时间同步方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 36-39, 50.

(下转第 86 页 continued on page 86)

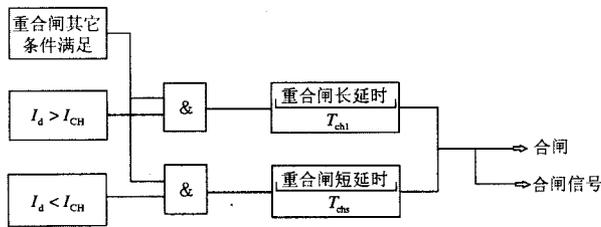


图2 新型重合闸  
Fig.2 New reclosing

综上所述:随着电力系统短路电流的急剧增大,而烧损主变的事件经常发生,为了解决这问题,本文提出了三种方案。而其中第三方案,应为最佳方案,它不但解决了主变在短时间内多次遭受大电流冲击而损害主变的难题,而且又不需要退出线路重合闸,从而提高了供电可靠性。 $I_{ch}$  (主变间歇性冲击电流)还可作为签订变压器技术协议的一项重要指标。

### 参考文献

- [1] 王维俭,电气主设备继电保护原理与应用(2版)[M].北京:中国电力出版社,2002.  
WANG Wei-jian.Principle and Application for Electric Equipment Protection,2nd Edition[M].Beijing: China Electric Power Press,2002.
- [2] 陈松林,文继锋,陆晓平等.变压器保护应用中一些技术问题的探讨[A].2004 全国电力主设备保护学术研讨会论文集[C].南京:2004.

(上接第 53 页 continued from page 53)

- [8] 潘爱民.COM原理与应用[M].北京:清华大学出版社,1999.  
PAN Ai-min. The principle and Application of COM[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.
- [9] 杜松怀.电力系统负荷预测技术[J].华东电力,2000,9: 50-52.

收稿日期:2007-09-11; 修回日期:2007-11-14

(上接第 72 页 continued from page 72)

- WANG Zheng, HU Min-qiang, ZHENG Jian-yong. Synchronization in the Substation Based on Global Positioning System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 39-39,50.
- [13] 匡绍龙.基于GPS的变电站自动化系统校时问题定量分析[J].电力自动化设备,2004,24(11): 26-29.  
KUANG Shao-long. Quantitative Analysis of Time Correction in Substation Automation System Based on GPS[J]. Electric Power Automation Equipment,2004, 24(11): 26-29.
- [14] 李建,谢小荣,韩英铎,等.北斗卫星导航系统与GPS互备授时的分布式相量测量单元[J].电网技术,2005,29(9): 1-4, 9.  
LI Jian, XIE Xiao-rong, HAN Ying-duo, et al. Study on Distributed PMU for Synchronous Phasor Measurement

CHEN Song-lin, WEN Ji-feng, LU Xiao-ping, et al. Research on Technical Problem About Protection of Transformer[A].In:Proceedings of 2004 Chinese Conference on Relay Protection for Main Equipment[C]. Nanjing:2004.

- [3] 王维俭,侯炳蕴.大机组继电保护理论基础[M].北京:水利电力出版社,1989.  
WANG Wei-jian,HOU Bing-yun.The Theory of Large Generator and Transformer Protection[M].Beijing: Hydraulic and Electric Power Press,1989.
- [4] 陈增田.电力变压器保护(第2版)[M].北京:水利电力出版社,1989.  
CHEN Zeng-tian.Protection of Transformer,2nd Edition[M]. Beijing:Hydraulic and Electric Power Press,1989.
- [5] 史世文.大机组继电保护[M].北京:水利电力出版社,1987.  
SHI Shi-wen.Large Scale Generator Transformer Unit Protection[M].Beijing:Hydraulic and Electric Power Press,1987.

收稿日期:2007-10-24

作者简介:

叶生强(1961-),男,工程师,从事调度运行及继电保护工作;

陈纲(1975-),男,工程师,从事调度运行工作;

谢永胜(1971-),男,工程师,江西赣东北供电公司

E-mail:xysectp@163.com

作者简介:

潘爱强(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划、电力系统稳定分析;E-mail:jackain@gmail.com

严正(1964-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统优化运行、电力系统稳定分析、电力市场;

贾燕冰(1980-),女,博士研究生,主要研究方向为电力市场、电力系统稳定分析。

Using Mutually Backup Synchronization Signals from Both Seidou Satellite Navigation System and Global Positioning System[J].Power System Technology, 2005, 29(9): 1-4, 9.

收稿日期:2007-08-28; 修回日期:2007-10-27

作者简介:

张信权(1965-),男,高级工程师,从事继电保护和变电站自动化产品的技术开发、技术管理工作;E-mail:zhangxq@nari-relays.com

梁德胜(1971-),男,工程师,从事自动化运行管理工作;

赵希才(1969-),男,高级工程师,主要从事继电保护与变电站自动化系统的技术开发工作。