

220 kV 变电站 GPS 时间同步系统实现技术

雷霆,李 斌,黄太贵

(安徽电力调度通信中心,安徽 合肥 230022)

摘要: 基于 220 kV 变电站全球定位系统(GPS)时间同步系统项目的实施经验,总结了实现时间同步系统需要考虑的关键技术和问题,主要从对时设计、运行监测、对时校验、对时误差等进行了分析探讨。要求在变电站内实现 GPS 统一对时,给出了一个典型的站内设备对时架构图,设计了单主钟和冗余互备等 3 种 GPS 时钟架构设计模式,并加以说明。为实现站内对时的运行监测,设计了基于时脉冲事件顺序记录的分析方法来计算对时误差。站内对时校验应依据 GPS 校验仪进行,介绍了校验原理和相应校验方法,并分析影响校验精度的主要因素。对站内对时误差出现的常见原因和解决方法进行了分析介绍,并针对软、硬协同对时误差问题提出了一种基于公式化分析的误差定量分析方法。

关键词: GPS; 统一时钟; 时间同步; 变电站自动化

中图分类号: TM 63; TM 935.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)11-0071-04

随着电网微机化自动化水平的不断提高,电力系统对高精度时钟的要求愈来愈迫切^[1]。基于全球定位系统 GPS(Global Positioning System)等卫星定位对时技术^[2],可实现高精度的时间基准。变电站时间同步系统是在站内配置一套 GPS 对时标准时间主钟装置与时钟扩展装置^[3],通过输出各种类型的对时信号将站内所有微机设备的时间与国际标准时间同步。通过建设变电站 GPS 时间同步系统,可为系统故障的分析和处理提供准确的时间依据^[4],同时也是提高电网运行管理水平的必要技术手段^[5-6]。文中基于安徽电网 220 kV 变电站 GPS 时间同步系统建设实践,从系统设计、系统监测、对时校验、误差分析等角度,介绍探讨了变电站 GPS 时间同步系统的实现技术。

1 站内对时设计

除少数新建变电站外,省网多数 220 kV 变电站均未实现 GPS 统一对时,已有部分变电站的部分装置自带 GPS 时钟,但对时效果不理想,运行管理也需加以规范。因此,应针对省网内 220 kV 变电站,在站内实现 GPS 统一时钟系统,为全站提供统一时间基准,进而实现站内二次设备的 GPS 统一有效对时。

图 1 是一个较典型的 220 kV 变电站主要二次设备对时结构图。GPS 主时钟和扩展装置单独组屏,需对时的二次设备主要包括通信服务器、保护管理机(保护子站)、故障录波器、各类测控装置、各类保护装置和监测系统等。

在 GPS 时钟架构设计模式方面考虑了 3 种方案,如图 2 所示。

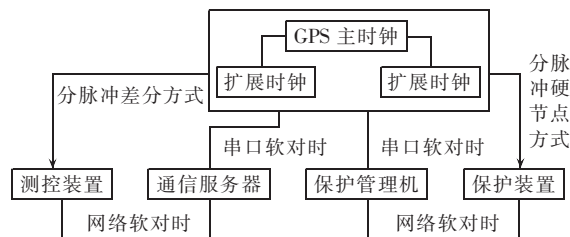


图 1 一个典型的站内设备对时架构

Fig.1 Typical synchronization system architecture for substation devices

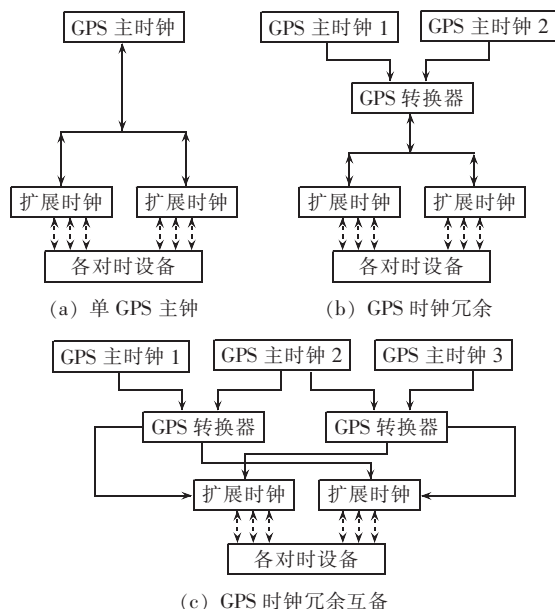


图 2 3 种 GPS 时钟架构设计模式

Fig.2 Three configurations of GPS clocks

图 2 中 3 种架构设计模式有着不同的冗余度和可靠性。图 2(a)是一种单 GPS 主钟架构设计,图 2(a)和图 2 (b) 给出了 2 种不同的多主钟互备的架构设

计。图 2(a)给出了一种由 2 台主时钟互为热备方式,任意一台主时钟故障并不影响扩展装置接收 GPS 时钟,但是信号切换器成为单点故障源。图 2(c)是一种冗余度更高的多主钟互备模式,系统中任意一台主时钟或者切换器的故障都不影响时钟扩展装置接收对时信号。

考虑到电压等级、电网结构重要性和资金预算等多方面因素,在多数 220 kV 变电站采用了单 GPS 主钟架构设计(图 2(a)),在少数新建变电站中采用了 GPS 时钟冗余架构(图 2(b))。鉴于上述 3 种模式之间的平滑升级关系,今后可通过系统改造,可以从单主钟模式方便地升级到对时可靠性更高的 GPS 时钟冗余互备设计模式(图 2(b)和图 2(c))。此外应考虑在多主钟互备设计模式中,采用国产北斗星等其它卫星对时设备^[7]或者原子钟设备,从而卫星时钟装置的可用性、可依赖性和安全性将得到提高。

图 1 中站内设备对时架构目前采用了规约软对时和脉冲硬对时共存的对时方式^[8-9]。但层次化对时结构和多种方式组合对时策略会给对时误差带来更多不确定因素。软对时方式通过层次化软对时结构来实现,首先是 GPS 时钟和站控层设备如通信管理机、保护管理机之间实现串口软对时,其次是通信管理机及保护管理机和所管理的保护装置、自动化装置实现规约软对时。硬对时信号是直接由 GPS 时钟发送到各装置^[10]。图 1 中没有列出站内可能存在的行波测距装置和功角测量装置,这类装置往往要求使用专用 GPS 装置^[11]。

目前,仅在少数装置上实现了 IRIG-B(B time code of Inter-Range Instrumentation Group)码对时方式^[12],今后将逐步要求各二次设备实现对 IRIG-B 对时方式的支持,从而完全实现 IRIG-B 这种高精度全时间信息对时规约的扁平化对时架构。此外,基于网络时间协议 NTP(Network Time Protocol)而实现基于延迟补偿的站内高精度对时也是值得进一步实践探索的方向^[13-14]。

2 系统运行监测

为实现 GPS 时钟和装置对时情况的监测,需实现 GPS 统一对时监测系统,完成 GPS 对时的日常在线监测功能。监测内容包括 2 个方面。

a. GPS 时钟走时是否准确,是否存在失步等异常。可基于 NTP 协议获取远方时钟时间,监测时钟失步等遥信记录而发现异常。

b. 测控装置对时精度是否在技术标准内。可通过分析时脉冲 1PPH(1 Pulse Per Hour)的事件顺序记录(SOE)记录中来计算对时误差。现要求对时误差不超过 2 ms。

运行分析功能实现对 1PPH SOE 记录进行用户自定义方式的查询,并根据所接收到 1PPH SOE 记录进行月度分析计算。在月度分析方面,设计了 2 个计

算公式。

GPS 系统投运率:

$$\text{投运率} = \frac{\text{1PPH SOE 正常收到总时间}}{\text{全月总时间}} \times 100\% \quad (1)$$

测控装置对时准确率:

$$\text{对时准确率} = \frac{\text{1PPH SOE 精度合格累计个数}}{\text{全月 1PPH SOE 总个数}} \times 100\% \quad (2)$$

3 对时校验和精度分析

对时精度校验是系统实现和运行管理中的重要环节。对时校验需依据 GPS 校验仪进行,GPS 校验仪的基本原理可概括为 2 类:

a. 设计原理 1,校验仪在规定时刻向授时装置发送对时信号,分析授时装置 SOE 记录得出对时精度;

b. 设计原理 2,校验仪接收授时装置发来的对时信号,分析授时装置时间记录和校验仪 SOE 记录得出对时精度。

基于校验仪设计原理,针对各类装置特点设计校验方法。可根据校验原理 1 设计实现,将校验仪发出的对时信号接入测控装置的开入量,实施步骤为

a. 校验仪发出对时脉冲信号(可采用 1PPS),取其绝对时间为 t_1 ;

b. 测控装置显示相应 SOE 事件记录,取其绝对时间为 t_2 ;

c. 计算 $\Delta t = |t_2 - t_1|$, Δt 为被测装置的对时精度。

实际测试中测控装置对时精度一般 ≤ 2 ms。在现场不具备校验仪的情况下,可实现基于 GPS 秒脉冲的校验方法,相应的只需要更改上述步骤 **a**,由 GPS 时钟发出秒脉冲信号即可。

保护装置校验方法如果采用校验原理 1,需要向保护装置发出脉冲信号,但是较多保护装置往往不具备开入量,此时还可采用基于基本原理 2 的校验方法,这是一种保护动作的方式,可结合保护年检工作进行。GPS 时钟校验也根据校验原理 2 实现,将 GPS 时钟发出的分/秒/时脉冲对时信号接入 GPS 校验仪输入端子中实现。

在对时精度标准方面,以测控装置对时精度为例,针对上述测控装置校验方法,做如下分析。设 X 为测控装置, Y 为 GPS 校验仪, Z 为 GPS 时钟,分析分脉冲对时下的校验误差。

需考虑以下影响对时精度误差的主要因素^[15]: X 自身走时误差每分钟为 t_a 、 Y 的卫星对时误差为 t_b 、 Y 从时钟脉冲开始触发至到达 X 的延迟时间为 t_n 、 Z 从对时脉冲开始触发至到达 X 的延迟时间为 t_f 、 X 的 SOE 记录的分辨率误差为 t_y 。

设对时后 $x(1 < x < 60)$ s 时,校验仪发出校验脉冲,有硬对时误差 t_x 为

$$t_x = (t_a \times x) / 60 + t_b + t_f + t_y + t_n \quad (3)$$

分析误差级别, t_b 、 t_n 及 t_f 为微秒级误差, t_a 和 t_y 为毫秒级误差。考虑到实践中二次设备多数只需要

毫秒级定时精度,忽略上述 3 类微秒级误差因素,进一步简化 t_{ξ} 为

$$t_{\xi} = t_{\alpha} \times x / 60 + t_{\gamma} \quad (4)$$

换言之,在被测装置已实现正确硬定时接口的前提下,影响校验精度结果的主要因素是被测装置的走时精度和 SOE 分辨率误差。

4 定时误差分析

运行监测和现场校验表明还需要重点关注变电站内二次系统存在的定时问题,主要有 3 点。

a. 站控层设备和 GPS 时钟的串口定时问题。串口定时规约无通用标准,需双方协商一致,并且串口传输从开始至结束有一定延迟,接受装置要正确计算延迟时间,保证定时精度。

b. 软定时问题。例如,站控层设备如通信服务器由于负载过重或者设计缺陷,导致时间报文发送、接收、存储、转发等环节存在较多误差,必须通过提高定时机制的优先级别来确保定时精度,间隔层设备也需要准确接受软定时报文。

c. 间隔层设备在实现硬定时时,要通过有效的硬件机制确保毫秒级定时精度。

上述问题的出现也说明了,由于系统定时问题往往不受厂家和运行人员重视,从而成为容易出错的环节。为此需要和二次设备厂家进行充分沟通,加强重视各设备的定时问题,并在设备出厂和升级维护时,确保定时程序版本的准确性和一致性。

在日常运行管理中,站内层次化软定时架构出错往往会出现定时误差。例如,在一起跳闸事故分析中,两侧变电站断路器变位 SOE 记录相差 9 min,毫秒却完全一致。检查发现站内软定时方面存在问题。针对该问题,下面提出一个软硬定时配合下的定时误差定量分析方法,可指导定时误差的分析。

以分脉冲硬定时和软定时配合实现定时为例,基于分脉冲可以在整分钟时刻实现准确的秒及毫秒级定时。软定时方式可实现年、月、日、时、分、秒等时间信息的定时。设软定时时间信息为 $t_h t_m t_s$,分脉冲硬定时后,时间信息改变为 $t_{hl} t_{ml} t_{sl}$,软定时周期为 $T_p(\text{min})$ 。这里, t_h 表示小时及以上时间信息, t_m 表示分钟信息, t_s 表示秒信息。分析可发现,时间信息 Y 和当前标准时刻 x 为一种离散函数关系,定义为 $Y = F(x)$,有

$$F(x) = \begin{cases} t_h t_m t_s & k t_p \leq x < (k+1) t_p \\ t_{hl} t_{ml} t_{sl} & (k+1) t_p \leq x < (k+1) t_p \\ k=0,1,2,\dots \end{cases} \quad (5)$$

分析 $t_h t_m t_s$ 和 $t_{hl} t_{ml} t_{sl}$ 的关系。设分脉冲定时原理为 $\leq 30 \text{ s}$ 清零, $> 30 \text{ s}$ 清零且分钟进位,有

$$\begin{aligned} t_{hl} t_{ml} t_{sl} &= t_h t_m t_s - t_s & t_s \leq 30 \\ t_{hl} t_{ml} t_{sl} &= t_h t_m t_s + 60 - t_s & t_s > 30 \end{aligned} \quad (6)$$

设标准时间为 t_{GPS} ,将式(5)(6)应用于现场中。考虑现场 A,设 $0 \leq t_h t_m t_s - t_{\text{GPS}} \leq 30 \text{ s}$,可推出

$t_{hl} t_{ml} t_{sl} = t_{\text{GPS}}$ 定时情况则为

$$F(x) = \begin{cases} t_h t_m t_s & k t_p \leq x < (k+1) t_p \\ t_{\text{GPS}} & (k+1) t_p \leq x < (k+1) t_p \\ k=0,1,2,\dots \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可推出,在分脉冲到来后至下次软定时出现的时间内,装置时间为标准时间;其余时段内装置时间为软定时时间,此时定时精度取决于软定时。如果软定时有误,则装置定时有误。

考虑现场 B,设 $30 \leq t_h t_m t_s - t_{\text{GPS}} \leq 60 \text{ s}$,可推出 $t_{hl} t_{ml} t_{sl} = t_{\text{GPS}} + 60$ 。相应的,定时情况为

$$F(x) = \begin{cases} t_h t_m t_s & (k t_p) \leq x < (k+1) t_p \\ t_{\text{GPS}} + 60 & (k+1) t_p \leq x < [(k+1) t_p] \\ k=0,1,2,\dots \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可推出,在分脉冲到来后至下次软定时出现的时间内,装置时间比标准时间快 1 min,其余时段内装置时间为软定时时间,此时定时精度取决于软定时。

考虑现场 C,设 $60 \leq t_h t_m t_s - t_{\text{GPS}} \leq 90 \text{ s}$,有 $t_{hl} t_{ml} t_{sl} = t_{\text{GPS}} + 60$ 。定时情况分析结果类似于现场 B。其它场景可根据上述公式依次类推。

5 结论

GPS 时间同步技术需要在变电站中得到更广泛统一的有效应用。文中基于安徽电网 220 kV 变电站 GPS 时间同步系统项目的实践经验,总结了系统实现技术和运行管理中需考虑的关键问题,从系统设计、运行监测、定时校验、定时误差分析等角度进行了分析探讨,所提出的解决方案和建议具有较好的指导意义和参考价值。进一步工作将考虑如何准确监测 GPS 时钟及二次设备的定时精度,并充分探讨全站 GPS 统一精确定时在电网运行管理中的深入应用。

参考文献:

- [1] 朱文治,肖晓刚. GPS 卫星时钟在电网自动化系统中的应用[J]. 电网技术,1997,21(3):32-33.
ZHU Wen-zhi,XIAO Xiao-gang. Application of global positioning system clock in power system automation[J]. Power System Technology,1997,21(3):32-33.
- [2] 张海雯,张鹏,王少荣,等. 高性能 GPS 时间同步装置研制[J]. 电力自动化设备,2003,23(4):37-40.
ZHANG Hai-wen,ZHANG Peng,WANG Shao-rong,et al. Development of high quality time synchronous device based on GPS [J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(4):37-40.
- [3] 陈飞,孙云. 500 kV 变电站时间同步系统设计[J]. 电力系统自动化,2004,28(22):97-99.
CHEN Fei,SUN Yun. Design of 500 kV substation time synchronization system[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(22):97-99.
- [4] 张文涛,邱宇峰,郑旭军. GPS 及其在电力系统中的应用[J]. 电网技术,1996,20(5):38-40.
ZHANG Wen-tao,QIU Yu-feng,ZHENG Xu-jun. GPS and its application in power system[J]. Power System Technology,1996,20(5):38-40.
- [5] 苗世洪,王少荣,刘沛,等. 基于 GPS 的电网状态监测系统的设计和实现[J]. 电力系统自动化,2000,24(12):52-54.

- MIAO Shi-hong, WANG Shao-rong, LIU Pei, et al. The design and implementation of the GPS based real-time monitoring system for the states of power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(12): 52-54.
- [6] 吕冬, 刘学国, 李林川. 以 SCADA、GPS 为基础的电力系统实时网损计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(5): 7-12.
- LÜ Dong, LIU Xue-guo, LI Lin-chuan. Real-time calculation of power system losses base on SCADA, GPS[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(5): 7-12.
- [7] 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.
- LI Jian, XIE Xiao-rong, HAN Ying-duo, et al. Study on distributed PMU for synchronous phasor measurement using mutually backup synchronization signals from both Beidou satellite navigation system and global positioning system[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 1-4.
- [8] 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.
- WANG Zheng, HU Min-qiang, ZHENG Jian-yong. Synchro-nization in the substation based on global positioning system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 36-39.
- [9] 邹红艳, 郑建勇. 基于 GPS 同步时钟的统一校时方案[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 59-61.
- ZOU Hong-yan, ZHENG Jian-yong. Time synchronization based on GPS clock[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 59-61.
- [10] 龚庆武, 刘美观, 左克锋, 等. GPS 同步采样装置中防止干扰 GPS 秒脉冲信号的措施[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 45-47.
- GONG Qing-wu, LIU Mei-guan, ZUO Ke-feng, et al. Anti-jamming methods for pulse per second signal in synchronized sampling unit based on GPS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 45-47.
- [11] 钟山, 付家伟, 王晓茹. 高性能同步相量测量装置守时钟研制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 68-73.
- ZHONG Shan, FU Jia-wei, WANG Xiao-ru. Development of high quality backup clock for synchronized phasor measurement unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 68-73.
- [12] 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): 86-89.
- 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): 86-89.
- [13] 黄小耘. NTP 在电力自动化设备时钟同步中的应用探讨[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 93-95.
- HUANG Xiao-yun. Discussion on the application of NTP in the time synchronization of power automation devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 93-95.
- [14] 冉懋海, 陈小川, 徐毅. 网络时间协议在电力监控系统时钟同步中的应用[J]. 电力系统通信, 2006, 27(1): 29-33.
- RAN Mao-hai, CHEN Xiao-chuan, XU Yi. Application of network time protocol in clock synchronization in power SCADA system[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2006, 7(1): 29-33.
- [15] 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.
- [16] 李泽文, 曾祥君, 黄智伟, 等. 基于高精度晶振的 GPS 秒时钟误差在线修正方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 55-59.
- LI Ze-wen, ZENG Xiang-jun, HUANG Zhi-wei, et al. Method for correcting errors of the GPS-clock based on the high precision crystal oscillator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 55-59.
- [17] 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 systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 84-89.

(责任编辑: 汪仪珍)

作者简介:

雷 霆(1977-), 男, 安徽桐城人, 博士, 现从事电网调度自动化运行及研究工作(E-mai: leiting05@163.com);

李 斌(1963-), 男, 安徽马鞍山人, 硕士, 现从事电网调度自动化方面的管理、研究工作;

黄太贵(1963-), 男, 安徽无为为人, 硕士, 现从事电网调度自动化、研究管理方面的工作。

Implementation of GPS synchronization system in 220 kV substation

LEI Ting, LI Bin, HUANG Tai-gui

(Dispatching & Communication Center, Hefei 230022, China)

Abstract: The key techniques in the implementation of 220 kV substation GPS (Global Positioning System) synchronization system are summarized, mainly in design, monitoring, verification and error analysis. A typical architecture of time synchronization system for substation devices is presented, as well as three configurations of GPS clocks: single, double and multiple. The synchronization error is calculated based on the on-line analysis of PPH (Pulse Per Hour) SOE (Sequence Of Events) for synchronization monitoring. Time accuracy verification is carried out with GPS verification instrument. Its working principle and verification method are presented and its main influencing factors are introduced. The causes of synchronization error are summarized and the countermeasures are proposed. A quantitative analytical method of synchronization error is presented for software-hardware coordinating synchronization.

Key words: GPS; uniform clock; time synchronization; substation automation system