

智能变电站 IEEE1588 时钟同步冗余技术研究

李俊刚^{1,2}, 刘星², 张爱民¹, 张杭¹, 耿英三¹, 魏勇²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 许继电气, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对智能变电站时钟同步系统现状, 提出了基于 IEEE1588 的时钟同步系统冗余方案。在分析 IEEE1588 的实现原理及其特点的基础上, 提出了单钟方案、双钟互备方案和双钟双扩展方案。重点对双钟互备方案进行了阐述, 并详细分析了时钟冗余切换原理和过程。同时, 进一步对双钟互备方案在变电站单网和双网模式下, 不同网络方案对时钟冗余造成的影响进行了研究。

关键词: IEEE1588; 变电站; 时钟冗余; 网络方案

Research on redundant technology of IEEE1588 clock synchronization system in smart substation

LI Jungang^{1,2}, LIU Xing², ZHANG Aimin¹, ZHANG Hang¹, GENG Yingsan¹, WEI Yong²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. XJ Electric Corporation Limited, Xuchang 461000, China)

Abstract: Aiming at the present situation of smart substation clock synchronization system, this paper proposes the redundancy scheme of clock synchronization system based on IEEE1588. By analyzing the realization principle and characteristics of IEEE1588, a single clock scheme, double clock backup scheme and dual clock double extension scheme are proposed. The double clock backup scheme is emphasized, and the clock redundancy switching principle and process are detailed. At the same time, the double clock backup scheme in substation single network and dual network mode, and the effects of different network schemes on clock redundancy are studied.

Key words: IEEE 1588; substation; clock redundancy; network scheme

中图分类号: TM764

文章编号: 1674-3415(2015)20-0097-05

0 引言

智能变电站设计和建设过程中, 可靠性方面的要求极为重要。冗余配置作为提高可靠性的主要措施之一, 在变电站中得到广泛应用, 诸如: 保护装置冗余和通信网络冗余。然而时钟系统作为变电站控制系统的决策前提, 其重要性不言而喻。但是, 时钟系统的冗余设计一直停留在较浅的层面, 对时钟信号的传输以及处理过程中的冗余研究, 很少有文献加以研究。

目前, 智能变电站时钟同步系统采用多种方式实现, 如 NTP、IRIG-B、GPS 等。IEEE1588 时钟同步与这些方式相比, 其不仅能以标准的方式实现亚微妙的时钟同步, 还能实现不同系统的兼容和互操作^[1-7]。这些特质适合很多电力业务的拓展, 能很好地满足电力系统的需求。因此, 基于 IEEE1588 的时钟同步方式在智能变电站中具有较好的应用前

景^[8-11], 而如何做好智能变电站 IEEE1588 时钟同步系统的冗余亟待研究。

1 IEEE1588 时钟冗余系统

智能变电站中 IEEE1588 时钟同步系统冗余设计中, 其方案大致有三种: 单钟方案、双钟互备方案、双钟双扩展方案。虽然, 其时钟同步系统有多种冗余方式, 但是从设计难度和可靠性程度而言, 如图 1 所示, 最适合智能变电站需求的即为双钟互备方案。

在时钟冗余系统中, 存在一个主时钟和备用时钟。当主时钟与外部同步源(如 GPS)同步时, 主时钟输出 PTP 时间同步信息, 而备用时钟不输出 PTP 时间同步信息。当主时钟与外部同步源(如 GPS)失去同步时, 不再输出 PTP 时间同步信息, 由备用时钟输出 PTP 时间同步信息给自动化设备进行校时。一旦主时钟装置与外部同步源(如 GPS)恢复同步

时,主用时钟装置恢复输出 PTP 时间同步信息给自动化设备;备用时钟装置不再输出 PTP 时间同步信息给自动化设备。

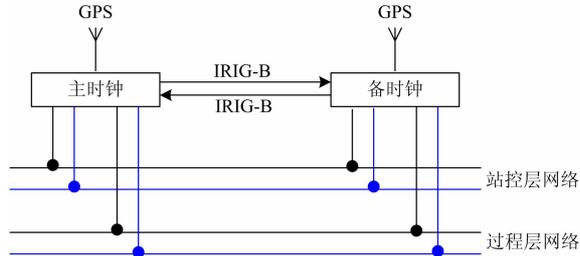


图 1 双钟互备方案

Fig. 1 Double clock backup scheme

2 双钟互备方案分析

2.1 切换原理分析

智能变电站外部基准时间源多采用 GPS 信号、上游 B 码等。外部基准时间源的优先级由时钟装置确定。图 1 所示为时钟装置外部时间源仅包括 GPS 信号和备用 B 码。GPS 信号存在则首先选取 GPS 信号，GPS 信号失去后选择备用 B 码(另一时钟装置送来)。如果 GPS 信号源，备用 B 码源均失去，时钟装置输出失步告警信号。

此双钟互备方案中，(1)主时钟装置、备用时钟装置事先确定；(2)主用时钟装置的失步告警信号要接入备用时钟装置。假设开始运行时，主用时钟装置为主，发送 PTP 同步报文，当主用时钟装置失步时，输出失步告警信号给备用时钟装置，改由备用时钟装置发送 PTP 同步报文。主用时钟装置与外部基准时间源同步时，时钟质量参数 clockClass 为 6。主用时钟装置与外部基准时间源失步时，时钟质量参数 clockClass 为 7，并且输出失步告警信号。

备用时钟装置与外部基准时间源同步时，且没有接收到主用时钟装置的失步告警信号，时钟质量参数 clockClass 为 8。当备用时钟装置与外部基准时间源同步，且接收到主用时钟装置的失步告警信号时，时钟质量参数 clockClass 切换为 6。

IEEE1588 时钟装置 Announce 报文中 clockClass 参数表征时钟质量。Announce 报文中 clockClass 参数，可以反映时钟装置与外部基准时间源(如 GPS)是同步还是守时状态。如果 IEEE1588 时钟装置与外部基准时间源(如 GPS)同步，则 clockClass 为 6，如果 IEEE1588 时钟装置处于守时状态，则 clockClass 为 7。clockClass 为 8 规约中未规定(reserved)，是本方案的扩展。

根据 BMC 机制，如果一个网络中有两个主时钟，那么 clockClass 小的主时钟将竞争为最好时钟，状态机仍为 Master 状态，clockClass 大的主时钟状态会从 Master 状态切到 Passive 状态，不再发送同步报文。一旦 clockClass 小的主时钟退出网络，clockClass 大的主时钟将立即从 Passive 状态切回到 Master 状态，开始发送同步报文，即 clockClass 大的主时钟起到了“热备”的效果。利用 clockClass 可以可靠地切换 IEEE1588 时钟装置；但是，由于两个 IEEE1588 时钟装置时间存在误差，因此，在切换过程中将会出现时钟抖动，抖动的大小决定是否引起合并器失步；时钟抖动较大，装置之间切换会引起合并器失步从而导致保护闭锁。

2.2 切换时间分析

两个互备的时钟和装置 1 均接入一个网络。如图 2 所示，根据 BMC 竞争机制，主时钟装置的 PTP 端口为 Master 状态，发出 PTP 同步报文，装置 1 接收同步报文，与主用时钟装置保持同步。备用时钟装置处于 Passive 状态，虽然不发出同步报文，但一直在监听主用时钟装置发出的报文。

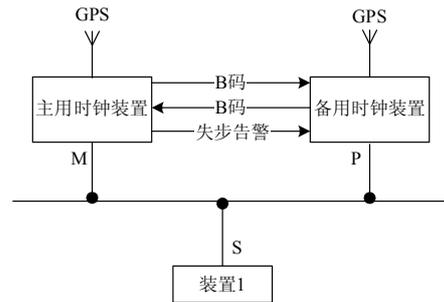


图 2 时钟同步系统

Fig. 2 IEEE 1588 clock synchronization system

如果主时钟装置 PTP 输出断线(如图 3 示)，那么备用时钟装置的 PTP 端口将接收不到 master 的 announce 报文。当持续设定时间后时钟仍接收不到原来 master 的 announce 报文，将引起备用时钟装置 PTP 端口的 Announce 报文接收超时事件，此事件触发 PTP 端口状态机从 Passive 状态切换到 Master 状态。

这个设定时间就是 announce 接收超时时间。

Announce 接收超时时间等于 announce 接收超时计数与 announce 周期的乘积。IEEE1588-2008 规定 announce 接收超时计数最小为 3。Announce 报文周期一般选取为 20=1 s，因此 Announce 接收超时时间=announce 接收超时计数×announce 周期=3×1 s=3 s。

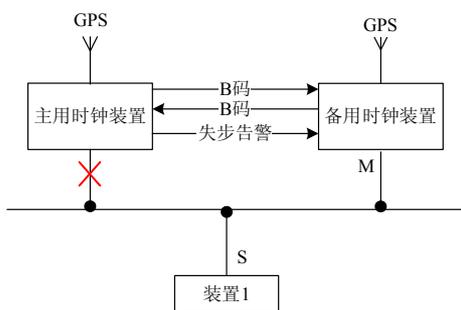


图3 主时钟装置 PTP 输出断线

Fig. 3 PTP output disconnection

也就是说,主用时钟装置 PTP 输出断线大约 3 s 后,备用时钟装置才切换到 master 状态,发出 PTP 同步报文。如果需要更短的切换时间,可以缩短 Announce 报文周期。主备钟切换时间不能过长,否则会引起合并器失步而造成保护闭锁。基于主备时钟的切换时间,可以进行从钟设备的守时精度测试,依此来衡量。

3 双钟互备与网络冗余分析

IEEE1588 时钟冗余和智能变电站的网络有极大的关系,单网或者双网对时钟冗余的设计影响不同。

3.1 单网模式分析

主时钟装置与 GPS 同步后,主时钟装置的 PTP 端口发出的 Announce 报文中, $clockClass = 6$ (同步状态,表示已经与外部基准时间源同步)。备用时钟装置 PTP 端口发出的 Announce 报文中, $clockClass = 8$ (备用状态,表示已经与外部基准时间源同步)。

图 4 中 M 表示时钟装置 PTP 端口为 Master 状态, P 表示时钟装置 PTP 端口为 Passive 状态, S 表示时钟装置 PTP 端口为 Slave 状态。只有 Master 状态发出同步报文。只有 Slave 状态接收同步报文并校时。各种异常分析如下:

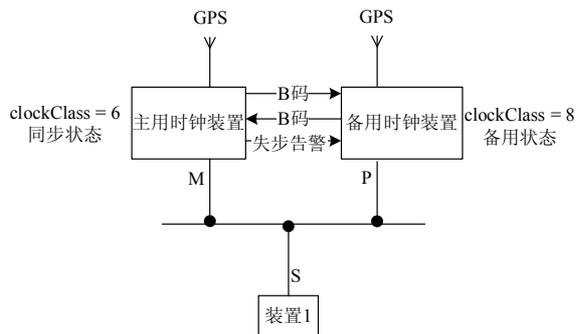


图4 单网模式

Fig. 4 Single network mode

1) 主用时钟装置 GPS 信号失步

主用时钟装置 GPS 信号失步,但仍接收到备用时钟装置的 B 码,主用时钟装置仍保持同步状态。

2) 主用时钟装置进入守时状态,备用时钟装置切换为主钟

主用时钟装置 GPS 信号失步,同时接收不到备用时钟装置的 B 码,主用时钟装置失步报警信号输出。主用时钟装置进入守时状态, $clockClass$ 变为 7。备用时钟装置切换为同步状态, $clockClass = 6$ 。备用时钟装置的 PTP 端口竞争为 Master,开始向网络中发送 PTP 报文。

3) 主用时钟装置恢复为主钟,备用时钟装置恢复为备钟

主用时钟装置 GPS 信号恢复, B 码信号恢复,主用时钟装置失步报警信号消失。主用时钟装置转为主状态, $clockClass$ 变为 6。备用时钟装置又切换为备用状态, $clockClass = 8$ 。

4) 时钟装置输出断线分析

断线前由主用时钟装置发送 PTP 同步报文,断线后由备用时钟装置发送 PTP 同步报文。

5) 备用时钟装置失步分析

备用时钟装置与 GPS 失去同步,但仍有 B 码信号。备用时钟装置失步前后都是由主用时钟装置发送 PTP 同步报文,即备用时钟装置失步对主用时钟装置发送 PTP 报文没有影响。

6) 主用时钟装置备用时钟装置均失步分析

此时主用时钟装置和备用时钟装置 $clockClass$ 均为 7,则主用时钟装置端口为 M 还是备用时钟装置的端口为 M 由时钟 ID (identify) 决定。时钟 identify 小的端口竞争为 M 状态。

3.2 双网模式分析

图 5 所示为双网模式下的双钟互备方案,当主用时钟装置与外部基准时间源同步时,主用时钟装置 $clockClass = 6$ 。备用时钟装置 $clockClass = 8$ 。因此主用时钟装置的 A 网口是 A 网上的 Master,主时钟装置的 B 网口是 B 网上的 Master。对于装置 2,通过 A、B 双网接入, A、B 双网 PTP 同步报文均来自主用时钟装置。

其时钟系统异常分析如下:

1) 主用时钟装置失去 GPS 信号、备用时钟装置的 GPS 信号正常。

主用时钟装置与 GPS 失步,但通过外部备用 B 码源得到基准时间,主用时钟装置 $clockClass$ 仍为 6。因此各个端口的状态不变。

2) 主用时钟装置失步、备用时钟装置 GPS 信号正常。

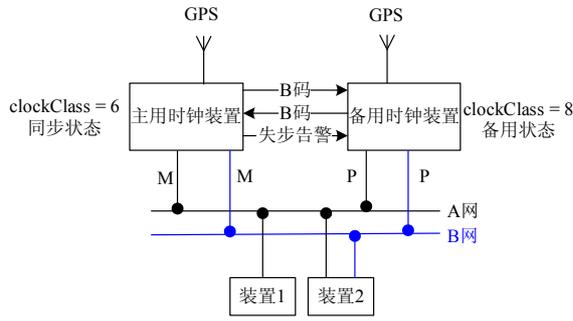


图 5 双网模式

Fig. 5 Dual network mode

当主用时钟装置的外部基准时间源均失去时，主用时钟装置处于守时状态，clockClass 切换为 7，并输出失步告警信号。备用时钟装置接收到失步告警信号，clockClass 切换为 6。因此备用时钟装置的 A 网口是 A 网上的 Master，备用时钟装置的 B 网口是 B 网上的 Master。对于装置 2，通过 A、B 双网接入，A、B 双网 PTP 同步报文均来自备用时钟装置。

3) 主用时钟装置恢复同步

主用时钟装置恢复同步时，clockClass 切换为 6，失步告警信号返回，备用时钟装置的 clockClass 切回到 8。

4) 时钟装置输出断线分析

若主用时钟装置的 A 网 PTP 输出断线，如图 6 所示，装置 2 的 A 网口接收不到的 PTP 信号，装置 2 的 B 网口接收到来自主用时钟装置的 B 网口的 PTP 信号。则即装置 2 的 B 网口发送时钟同步响应报文，而 A 网口将不再发送同步报文。

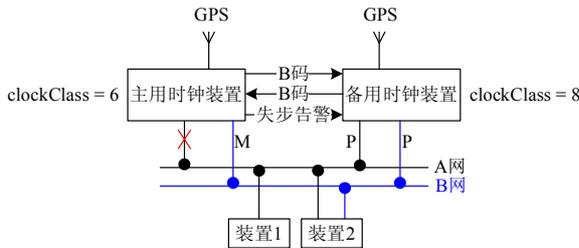


图 6 时钟装置输出断线

Fig. 6 PTP output disconnection

此时，主用时钟 B 网口将接收到从钟装置的时钟响应报文，若主用时钟 A 网口在持续设定时间后未能收到任何从钟装置的响应报文，则认为主用时钟 A 网口 PTP 输出断开。

同时，备用时钟装置的 A 网口将接收不到 master 的 announce 报文。当持续设定时间后时间仍接收不到原来 master 的 announce 报文，将引起备用

时钟装置 PTP 端口的 Announce 报文接收超时事件，此事件触发 PTP 端口状态机从 Passive 状态切换到 Master 状态。Announce 报文接收超时时间可以与主用时钟 A 网口未能收到任何响应报文的时间相配合。

因此，主用时钟装置只要检测有一个 PTP 输出断开，则所有其他的 PTP 输出端口均不再发出 PTP 同步报文，这样，备用时钟装置的两个端口在 A 网 B 网上都是 Master，确保装置 2 无论从哪个网段接收 PTP 报文，均来自同一个时钟源。

当主用时钟装置的 A 网 PTP 输出和 B 网 PTP 输出同时断线，则装置 2 的 A 网口、B 网口的同步报文均来自备用时钟装置。

5) 备用时钟装置 PTP 输出断线

当备用时钟装置的一个或两个 PTP 输出断线时，主用时钟装置的 A 端口在 A 网上是 Master，主用时钟装置的 B 端口在 B 网上是 Master。对于装置 1 或装置 2 来说，与没有断线时一样。

4 总结

IEEE1588 在智能变电站中具有良好的应用前景，因此，如何对基于 IEEE1588 时钟同步的系统进行设计非常有意义。本文针对 IEEE1588 的实现原理及其特点，分析时钟冗余切换原理和过程，并阐述了单网模式和双网模式下的冗余设计。本文对 IEEE1588 时钟系统的冗余设计，将会提高现有变电站时钟系统的可靠性，保障保护控制系统的安全实施。因此，本文所做的研究将会对 IEEE1588 在智能变电站中的推广起着重要作用。

参考文献

- [1] System test for devices implementing IEEE 1588-2008[C] // ISPCS, Brescia, Italy, October 12-16, 2009: 1-4.
- [2] 崔全胜, 魏勇, 何永吉, 等. PTP1588 协议的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 148-154. CUI Quansheng, WEI Yong, HE Yongji, et al. Analysis of PTP 1588 protocol[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 148-154.
- [3] 于鹏飞, 喻强, 邓辉, 等. IEEE1588 精确时间同步协议的应用方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 99-103. YU Pengfei, YU Qiang, DENG Hui, et al. The research of precision time protocol IEEE1588[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 99-103.
- [4] 戴志辉, 王增平, 焦彦军, 等. 阶段式保护原理性失效风险的概率评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 175-182.

- DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun, et al. Probabilistic assessment method for failure risk of stepped protection philosophy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 175-182.
- [5] 李振兴, 尹项根. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 179-186.
LI Zhenxing, YIN Xianggen. A study of wide-area protection algorithm based on integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 179-186.
- [6] 姜宪国, 王增平. 区域自治式后备保护分区方案[J]. 电工技术学报, 2013, 23(1): 234-241.
JIANG Xianguo, WANG Zengping. Zoning scheme of regional autonomy backup protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 23(1): 234-241.
- [7] 李鹏, 刘成斌, 姜涛, 等. 智能电网下的电网安全性与稳定性[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(2): 33-37.
LI Peng, LIU Chengbin, JIANG Tao, et al. Power system security and stability in smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(2): 33-37.
- [8] 冯秀宾. 智能变电站的涵义及发展探讨[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 116-120.
FENG Xiubin. Discussion on intelligent substation[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 116-120.
- [9] RHEE Ill-keun, LEE J, KIM J, et al. Clock synchronization in wireless sensor networks: an overview[J]. Sensors, 2009(9): 56-85.
- [10] FERRARI P, MARIOLI D. IEEE 1588-based synchronization system for a displacement sensor network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(2): 254-260.
- [11] 王晓芳, 周有庆. 基于时钟状态估计的电力系统广域冗余对时模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 55-59.
WANG Xiaofang, ZHOU Youqing. Synchronization redundant model for wide-area power system based on clocks' state estimation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 55-59.
- [12] 于跃海, 张道农, 胡永辉. 电力系统时间同步方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 82-86.
YU Yuehai, ZHANG Daonong, HU Yonghui. Time synchronizing system for power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 82-86.
- [13] 汪祺航, 吴在军. IEEE1588 时钟同步技术在数字化变电站中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 137-141.
WANG Qihang, WU Zaijun. IEEE1588 clock synchronization technique in the application of digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 137-141.
- [14] 彭飞进, 车磊, 邓智广. 变电站时钟系统同步异常的判断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(2): 98-102.
PENG Feijin, CHE Lei, DENG Zhiguang. Method to assess the situation of the time synchronizing system in the Substation[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2015, 27(2): 98-102.

收稿日期: 2014-02-26; 修回日期: 2014-03-13

作者简介:

李俊刚 (1981-), 男, 博士生, 工程师, 从事智能化变电站系统以及相关产品研究。E-mail: aogusdu@gmail.com

(编辑 魏小丽)