

核电站 DCS 系统数字通信网络的时钟同步研究

张明月, 马斌

(中核核电运行管理有限公司 维修二处, 浙江 海盐 314300)

摘要: 随着核电二代加或三代机组中全数字化 (DCS) 控制系统的应用, 以网络交互技术为基础的数据通讯成为 DCS 系统核心组成。DCS 系统时钟网络为数据处理及显示系统、电厂控制系统和汽轮机控制系统等核电站众多仪表设备提供授时服务, 因此数字通信网络的时钟同步对电厂安全稳定运行尤为重要。结合某核电站 DCS 一层时钟跨年跳变导致电站计算机信息和控制系统 (KIC) 历史曲线记录不更新的事件处理, 研究了数字通信网络的同步模式和数字通信中网络时钟滑动。通过研究, 探索改进时钟授时系统提高可靠性的方法, 对现役核电厂授时系统的改造和新建核电厂授时系统的设计有良好的指导作用。

关键词: 核电站; DCS; 时钟同步; 时钟滑动

中图分类号: TM623

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.2023.S1.028

中文引用格式: 张明月, 马斌. 核电站 DCS 系统数字通信网络的时钟同步研究 [J]. 电子技术应用, 2023, 49 (S1): 131-135.

英文引用格式: Zhang Mingyue, Ma Bin. Research on clock synchronization of digital communication network in DCS system of nuclear power plant [J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(S1): 131-135.

Research on clock synchronization of digital communication network in DCS system of nuclear power plant

Zhang Mingyue, Ma Bin

(CNNC Nuclear Power Operations Management Co., Ltd., Jiaxing 314300, China)

Abstract: With the application of fully digital (DCS) control system in second and third generation nuclear power plants, data communication based on network interaction technology has become the core component of DCS system. DCS clock network provides time service for many instrumentation equipment in nuclear power plant, such as data processing and display system, power plant control system and steam turbine control system. Therefore, clock synchronization of digital communication network is particularly important for the safe and stable operation of power plant. In this paper, the synchronization mode of digital communication network and the network clock slip in digital communication are studied based on the event processing that the KIC history curve record is not updated due to the clock jump at the first layer of DCS in a nuclear power plant. Through the research of this paper, the method of improving the clock timing system to improve the reliability is explored, which has a good guiding effect on the reform of the time timing system of the current nuclear power plant and the design of the time timing system of the new nuclear power plant.

Key words: nuclear power plant; DCS; clock synchronization; clock slip

0 引言

2023 年 1 月 1 日, 某核电站 2 号机组曾出现 DCS 一层时钟跨年跳变导致电站计算机信息和控制系统 KIC 历史曲线记录不更新的运行事件, 经排查发现, DCS 一层主时钟站 2MTKHC 的时间由 2023 年 1 月 1 日跳变

至 2024 年 1 月 1 日, 而 KIC 系统时间准确, DCS 一二层之间产生时间偏差导致 KIC 历史库功能不可用。同类型机组也曾出现类似问题, 2017 年 1 月 1 日, 某同类型核电站 3 号机组时钟系统二级母钟发生跳变至 2016 年 12 月 1 日, 下游交流 B 码分配器也同时发生跳变, 导致

3号机组 KIC 系统前端服务器收到的时钟信号发生了跳变,进而导致 KIC 系统内部事件紊乱,造成 KIC 平台失效。机组运行期间多次出现由于授时故障、授时跳变等授时系统异常导致机组状态后撤的运行事件,严重威胁核电机组的安全稳定运行。

本文结合某核电站 DCS 一层时钟跨年跳变导致电站计算机信息和控制系统 KIC 历史曲线记录不更新的事件处理,分析 DCS 一层时钟跨年跳变原理,研究了数字通信网络的同步模式和数字通信中网络时钟滑动。通过此文研究,探索改进时钟授时系统提高可靠性的方法,对现役核电厂授时系统的改造和新建核电厂授时系统的设计有良好的指导作用。

1 某核电站 DCS 系统的对时系统

1.1 DCS 系统授时系统结构

某核电站 NC 级 DCS 系统划分为两个层级:实现控制与组态的一层和实现操作与监视的二层,其中 NC 级 DCS 一层采用了 Invensys 公司的 I/A Series 平台,二层采用 ATOS 公司的 ADACS-N 平台,DCS 一层和二层通过 API 站进行数据交互。全厂授时系统 DTV 采用三层架构,如图 1 所示。两台一级母钟分别设置于不同厂房接收北斗及 GPS 信号,作为双路冗余时间源,无损切换。二级母钟接收一级母钟的标准时基信号,同时为三级扩展母钟提供授时信号。三级扩展母钟为下游其他系统提供授时,传输信号采用 IRIG-B 信号。DCS 一层时钟站、二层接口服务器部署在三级扩展母钟下,与北斗/GPS 时间源同步。DCS 一层 I/A 系统通过冗余的时钟站为下游 CP 控制器及其他工程师站授时,DCS 二层 KIC 系统通过冗余的接口服务器为整个二层服务器授时,从而实现 DCS 一层和二层系统时钟同步^[1]。

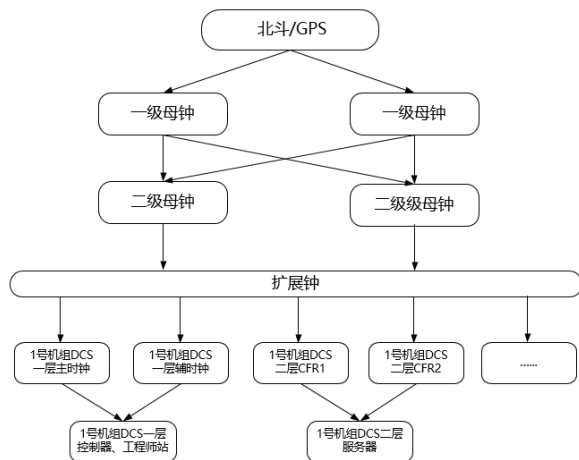


图 1 DCS 系统授时系统架构

1.2 DCS 授时协议 IRIG-B 码

某核电站 DTV 系统向 DCS 系统一层时钟站与二层接口服务器的授时协议为 IRIG-B。IRIG 时间编码序列是由美国国防部下属的靶场仪器组 (IRIG) 提出并被普遍应用的时间信息传输系统。该时码序列分为 G, A, B, E, H, D 共六种编码格式,应用最广泛的是 IRIG-B 格式,简称 B 码,其突出优点是将时间同步信号和秒、分、时、天、年等时间码信息加载到频率为 1 kHz 的信号载体中。DTV 母钟系统接受卫星时间信号,输出 IRIG-B 时间码序列至 DCS 系统。

B 码信号是每秒一帧的时间串码,其基本的码元是“0”码元、“1”码元和“P”码元,每个码元占用 10ms 时间,一帧串码含 100 个码元。码元“0”和“1”对应的脉冲宽度为 2 ms 和 5 ms,“P”码元是位置码元,对应的脉冲宽度为 8 ms, B 码信息的基本码元的示意图如图 2 所示。通过码元组合,编制时间序列信息。



图 2 0、1、P 码元示意图

1.3 DCS 一层 IA 系统授时原理

1.3.1 DCS 工程师站授时原理

某核电站 2 号机组 DCS 系统包含控制器管理站、主时钟站、辅时钟站、一二层通讯服务器、辅助报警通讯服务器、辅助二层操作站、辅助二层历史站、试验数据采集站等共计 14 台工程师站。主时钟 2MTKHC 和辅时钟 2HS1HC 的授时来自 DTV 系统三级扩展母钟,其他所有工程师站采用主从时钟同步模式,通过冗余网络交换机向 DCS 一层时钟站获取授时信号。当主时钟工程师站退出时,其他工程师站的授时自动切换至辅时钟工程师站。工程师站授时原理图如图 3 所示。

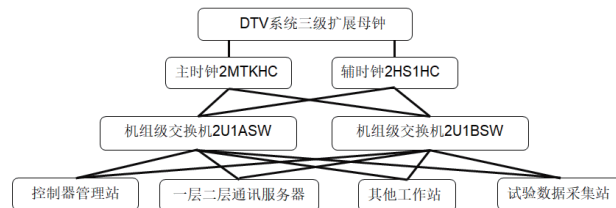


图 3 工程师站授时原理图

1.3.2 DCS 控制器授时原理

某核电站 DCS 控制器 FCP270 分布在 LX 厂房 4 个

房间，由两路时钟源提供授时信号。正常情况下，由主时钟工程师站 2MTKHC 授时，当 2MTKHC 退出时，系统自动切换至辅时钟工程师站 2HS1HC 对下游设备进行授时。2MTKHC 解析信号后，通过电 - 光转换模块，并由 HUB 将输入 1 路信号分为 4 路信号，发送至 DCS4 个不同房间。4 个 DCS 房间布置了数量不等的 KCP 机柜，时钟信号依次进入 KCP 机柜，对机柜内的 FCP270 进行授时。DCS 一层辅时钟的授时原理相同，不同点是：辅时钟与主时钟在 KCP 机柜的布线方向是相反的，同时时钟模块具备冗余供电。DCS 时钟站向 FCP270 的授时频率为每 5 s 一次^[2]。DCS 控制器授时原理图见图 4。

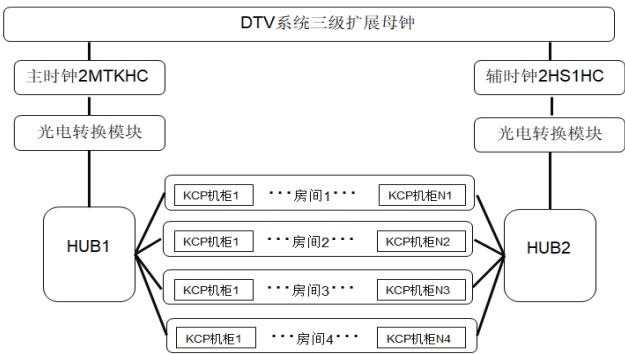


图 4 DCS 控制器授时原理图

1.4 DCS 二层 KIC 系统授时原理

KIC 系统的授时上游来自 DTV 系统，通过安装在 CFR1 服务器和 CFR2 服务器上的 IRIG-B 卡接受授时，授时原理与 DCS 一层工程师站授时一致。但是当 KIC 系统当前授时 CFR 服务器接收到的外部时钟源信号与当前设备内部时钟信号偏差超过 10 s 时，KIC 系统将不接受 DTV 系统时钟授时而采用内部时钟授时，直到 CFR 服务器接收到的外部时钟信号与本机内部时钟信号偏差小于 10 s 时，KIC 系统才会使用外部时钟授时。

2 时钟系统故障确认及原因分析

2.1 时钟系统故障确认

DCS 一层通过 API 站送至 KIC 系统的实时数据带有时间标签。2022 年 12 月 31 日，某核电站 DCS 一层时钟跨年跳变导致电站计算机信息和控制系统 KIC 历史曲线记录不更新的运行事件中，DCS 一层时间向前跳变一年，由 2022 年跳变到 2024 年，KIC 收到了 DCS 一层时间标签为 2024 年的数据，同时 KIC 系统自身的时间准确，同时刻为 2023 年数据，DCS 一二层之间数据产生时间偏差导致历史曲线无法呈现。

经排查，DCS 一层 6 台时钟站的实际情况（1/2/9

号机各两台），确认 2MTKHC 的时间异常，其余 5 台时钟站时间正常；2 号机组下游 CP 时间异常；同时确认了 KIC、NCS 等 DTV 三级母钟下游系统授时正常。本次事件可排除 DTV 授时系统故障，明确事件的故障原因为 2MTKHC 自身问题导致 DCS 时间异常。

2.2 DCS 时钟跳变原因分析

DTV 系统提供了包含年、天、时、分、秒在内的 IRIG-B 标准信号至 DCS 一层服务器，发送的时区为 0 时区，既 UTC 时间，又称格林尼治时间。而 I/A 平台是 Invensys 公司在上世纪 80 年代开发的平台，在当时通讯速率和 CPU 计算速率的限制条件下，Invensys 公司在设计对时系统的接收算法上，不接收“年”的信息，只保留天、时、分、秒的信息。DCS 一层时钟站中，“年”的计算通过 12 月 31 日 23:59:59 至 1 月 1 日 00:00:00 时（UTC 时间）、由时钟站本机进位计算确定结果。同时，时钟站将年、天、时、分、秒传递给下游设备（包含控制器和工程师站）。因时钟站和所有工程师站本机设置了北京时间，既 UTC+8 时区，故时钟站和所有工程师站显示的时间，比 UTC 时间多 8 小时。本次事件发生时，在 1 月 1 日北京时间 8 时，既格林尼治时间 0 时^[3]。

本次事件中，跨年错误发生的时间序列如下，以下所有时间均为 UTC 时间。

- (1) 事件发生前，工程师站的时间略快于 DTV 授时时间。2MTKHC 时间：2022 年 12 月 31 日 23: 59:59（此时，DTV 授时时间 2022 年 12 月 31 日 23: 59:58）。
- (2) 过了一秒钟后，2MTKHC 时间：2023 年 1 月 1 日 00: 00:00（此时，DTV 授时时间 2022 年 12 月 31 日 23: 59:59）。
- (3) 此时，DTV 对 2MTKHC 进行了一次授时。2MTKHC 因为只接受天、时、分、秒，年份不变，故 2MTKHC 时间跳变至：2023 年 12 月 31 日 23: 59:59（此时，DTV 授时时间 2022 年 12 月 31 日 23: 59:59）。
- (4) 过了一秒钟，2MTKHC 时间：2024 年 1 月 1 日 00: 00:00（此时，DTV 授时时间 2023 年 1 月 1 日 00: 00:00）。

时间错误发生的时序简述如图 5。



图 5 CS 时钟跳变时序图

2.3 KIC 不可用原因分析

本次事件导致 KIC 系统在 14:45 至 16:10 时不可用, 记随机第一组 I0。KIC 不可用原因分析如下。

DCS 一层通过 API 服务器将实时数据送至 KIC 系统, 实时数据自带时间标签。KIC 在画面上显示的数据, 自动选择最新时间的数据进行显示。当 DTC 系统跨年时, KIC 收到了未来一年后的数据。系统实时显示未来的最新时间的数据, 故显示功能不受影响。在 KIC 的历史库中, 因 KIC 系统的时间准确, 当前 KIC 时间的数据即 2023 年数据, DCS 一层时间为 2024 年, 没有送上来过 2023 年历史数据, 故历史库中无法呈现曲线。故此时历史库功能不可用。此时 KIC 的控制功能, 因 KIC 下发至 DCS 一层的信号, DCS 一层不判断时间, 故实时控制功能正常^[4]。

3 数字通信网络时钟同步模式

数字通信网络系统中的网络时间相位同步, 就是同时实现整个系统中各网络时钟节点上使用的载波在时钟频率范围之外及其时间相位范围之间的同步, 同时调节整个传输节点网络系统中各网络传输时钟节点网络或其网络交换点之间传输的载波的时钟频率间隔同步。

DCS 系统数字通信网络中常见有五种时钟同步模式, 包括脉冲进入同步模式、准同步模式、主从同步模式、主时钟同步模式和互锁同步模式。其中, 主从时钟同步模式在核电站 DCS 系统中应用广泛。

主从时钟同步是在整个数字通信系统的主干网络结构中设置至少一个高精度数据的参考时钟源。即现有 DCS 一层通信网络中的主时钟站辅时钟站和 DCS 二层接口服务器。通过现有的数字链路, 链路主参考时钟可以传输到网络任意主节点。要求参考时钟具备即使在主节点不能完全消除数字链路时钟抖动等干扰信号, 网络链路上的主、从参考时钟信号也能够传输给少数需要交换和传输高精度数据参考时钟电平数据的主节点的功能。点中传输的主参考时钟也必须能够通过锁相环与链路主参考时钟和从参考时钟同步, 保证参考时钟频率运行在同一个频率上^[5]。

在 DCS 系统设计中, 主时钟通过网络时间协议 (NTP) 同步其他工作站和处理器。若主时钟站没有外部时钟源, 将采用系统时钟作为主时钟, 将时钟同步给下游设备。当主时钟站失效, 或者当主时钟站丧失 DTV 系统信号时, 主辅时钟将进行切换, 辅时钟将在 5 s 内成为主时钟, 执行主时钟站的工作, 对下游设备进行授时。

在本次事件中, 由于主时钟两次跨年并非设备失效状态, 所以下游设备仍接收主时钟信号, 通过 NTP 与主时钟时间同步, 而辅时钟由于接收 DTV 系统直接信号, 保持在正确时间年份。

在使用主从时钟频率同步方法的过程中, 为了尽可能克服过分依赖主从时钟频率系统的主要弊端可以引入互锁同步频率的概念结合使用。在整个网络频率稳定后, 一些相邻网络节点之间的频率相对于频率的变化或者频率相位的变化时间仍然会随时间缓慢变化, 网络频率从网络初始稳定到整个网络最后时刻的相对稳定还需要相当一段时间。互锁同步频率的运行方式是在网络系统区域内的各节点之间, 保持一个具有自身运动规律的同步频率时钟, 该频率时钟将在一定时间内保持相对稳定地固定在网络中的某个频率定值水平方向上。正是因为两个时钟之间会存在一定的瞬态现象, 才会直接导致 DCS 网络控制和信号系统中一定频率和一定范围内的误码^[6]。这样做的好处是, 如果网络系统中的任何位置都有一定数量的节点, 那么它只会直接受到线路故障的影响。缺点是由于网络中控制节点过多, 节点设备的配置往往比较复杂。

4 数字通信网络的时钟滑动

DCS 系统数字交换通信网络中常见的时钟相位滑移溢出现象一般可由以下原因引起: 当模拟数字信号在模拟数字信号网络、信号处理系统网络或模拟数字网络中传输时, 如果几个模拟数字信号交换机的相位或相应系统的实际时钟频率相位不稳定、不均匀、不一致, 或者由于设备受到信号频率和相位漂移以及信号频率和相位抖动现象的严重影响, 数字信号交换网络系统的内部时钟缓冲器可能同时发生滑移和溢出。时钟的频率与其变化信号的传输速率不一致, 必然导致环境变化时网络中设备的滑动现象, 以及信号传输中设备链路的滑动问题, 这可能是由于数字网络的信号传输环境与设备的环境温度之间的瞬时温度突变造成的。时钟系统设计应在满足 DCS 系统响应时间、首出故障判断等 DCS 逻辑功能需求、控制功能需求下, 尽可能减少数字通信网络时钟滑动带来的影响^[7]。

5 结论

综上所述, 造成某核电站 DCS 一层时钟跨年跳变导致电站计算机信息和控制系统 (KIC) 历史曲线记录不更新的运行事件直接原因为 DCS 一二层之间产生时间偏差, 根本原因为 IA 平台在授时算法上不接收“年”的信息, 靠自身时钟跨年, 导致一层主时钟站 2MTKHC 出现短

时内跨年两次的计算错误,该核电站数字通信网络时钟采用的是主从同步模式,其深层原因为数字通信网络设备 2MTKHC 时钟站自身出现时钟相位滑动。

针对时钟同步的影响,KIC 系统号已进行了提高授时稳定性的优化:取消了 KIC 系统每个整点强制对外部时钟源信号的机制。但从技术上,目前无法完全杜绝授数字通信网络的时钟滑动,故需要识别其风险和后果,并制定 DCS 一层和二层应急预案以缓解时钟故障发生造成的后果。

随着核电装机容量的增大,且电网对上网电量品质要求日益增高,数字化电厂 DCS 控制系统的稳定性、可靠性显得越来越重要。时钟网络作为 DCS 系统设备的信号源头,数字通信网络的时钟同步在数字化控制中发挥了重要作用。本文结合某核电站 DCS 一层时钟跨年跳变导致电站计算机信息和控制系统(KIC)历史曲线记录不更新的运行事件分析,对数字通信网络时钟同步模式深入研究,探索改进时钟授时系统提高可靠性的方法。清晰地认识数字通信网络时钟同步模式对现役核电厂授时系统的改造和新建核电厂授时系统的设计有良好的指导作用。

参考文献

[1] 刘立月,王更生.分布式系统时钟同步设计与实现[J].计算机工程,2006(1).

[2] 梁广民.TCP/IP 协议时间同步系统设计与实现[J].计算机工程与设计,2006(2).

[3] 熊朋帆,徐辛酉.IA DCS 系统时钟同步配置优化策略研究[J].电子技术应用,2022(S1).

[4] 翟守阳.核电厂全厂时钟系统授时改进方案研究[J].智能建筑与城市信息,2014(5).

[5] 王元虎,周东明.卫星时钟在电网中应用的若干技术问题[J].中国电力,1998(2).

[6] 郭云,李红海.IEC 63096 核电厂仪控系统网络安全管控标准分析[J].核科学与工程,2021(4).

[7] 汪洋,伍小波,赵宏波,陈喆,滕玲,卢利锋.电力时钟同步网建设及应用的思考[J].电力系统通信,2011(2).

(收稿日期:2023-10-16)

作者简介

张明月(1995-),男,本科,工程师,主要研究方向:核电厂 DCS 系统安装、维护、调试、技术改进研究与应用。

马斌(1984-),男,本科,高级工程师,主要研究方向:核电厂 DCS 系统维护、调试、技术提升。