

主给水泵转速自动控制器故障原因分析

戴勇

大亚湾核电运行管理有限责任公司，广东 深圳 518000

摘 要： 核电厂二回路给水系统是为了给蒸汽发生器提供冷却水，导出反应堆热量，水转换为蒸汽，去往汽轮发电机做功发电，其中主给水泵调节系统尤为重要，本文针对某电厂出现的3号主给水泵转速控制系统故障的原理、现象及原因进行论述，分析故障的机理及原因，并针对可能原因进行排查，有利于后续同类故障时，机组控制及原因分析。

关 键 词： 主给水泵；转速控制系统；自动控制器；勺管位置驱动器；CPU软硬件

Analysis of Speed Automatic Controller of Main Feed Pump

Dai Yong

Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., LTD., Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract： The second circuit water supply system of nuclear power plant is to provide cooling water for steam generator, export reactor heat, water conversion into steam, to steam turbine generator do power generation, the main feed water pump regulation system is particularly important, this paper discusses the principle of 3 main feed water pump speed control system in a power plant failure, phenomenon and reason, analyze the mechanism and cause of the fault, and is conducive to the subsequent similar fault, unit control and cause analysis.

Keywords： main feed water pump; speed control system; automatic controller; spoon pipe position driver; CPU hardware and software

引言

2023年8月，国内某电厂出现3号主给水泵转速控制系统故障的报警和相关仪控报警，主控发现正在运行的一台主给水泵转速下降，立即手动启动备用状态的主给水泵并停运故障运行的主给水泵，期间监视蒸汽发生器水位稳定。后续电厂仪控人员现场检查发现故障主给水泵的自动控制器 SLC500 上 CPU “RUN” 灯熄灭、“FLT” 灯点亮，两块数字量输出板件无输出信号，就地面板显示与 SLC 通讯失去，交换机与 SLC500 连接端口（蓝色网线）指示灯灭，故障主给水泵的转速控制已自动无扰切为手动控制器（S7-200）控制^[1]。

一、风险描述

主给水泵自动控制器故障后自动无扰切换置手动转速控制，无法跟随来自蒸汽发生器水位变化的外部设定值变化，需主控操纵员手动控制；主给水泵转速控制系统故障可能影响其供水能力，增加核电厂丧失主给水始发事件的概率，蒸汽发生器正常给水丧失导致二回路排出反应堆堆芯释热的能力减弱；需要主控操纵员快速响应和手动控制，存在控制不及时导致蒸汽发生器水位低低或者高高，存在跳机跳堆的风险^[2]。

二、系统原理

核电厂二回路冷却水回路基本原理如下：凝结水泵将经过低加、除氧器和高加加热除氧后的凝结水通过主给水泵可控地送往三台蒸汽发生器。主给水泵和主给水阀系统负责控制向蒸汽发生器的供水量，以获得与汽机功率所决定的蒸汽发生器二次侧水位

参考值相一致的蒸汽发生器的二次侧水位。

（一）该核电厂蒸汽发生器主给水泵的控制原理

所谓主给水泵转速控制，就是通过调节液力联轴器输入输出转速比控制压力级泵转速，继而调节给水压力。主给水泵转速控制的目的是保证蒸汽发生器的给水母管和蒸汽母管之间的压差等于一个随负荷变化的整定值，以便维持给水流量控制系统调节阀前后压差近似恒定，从而消除三台蒸汽发生器水位调节过程中的相互耦合影响，便于水位控制。

给水泵转速控制可分为两个部分

1. 给水泵转速整定值

蒸汽母管和给水母管的实际压差测量值与压差整定值偏差经比例积分调节计算出给水泵转速整定值，用以控制三台给水泵的转速。若控制器失效或根据需要，操纵员可分别手动控制三台给水泵转速。手动控制时，ME 跟踪记忆手动值，以便手自动实现无扰切换。

压差整定值根据三台蒸汽发生器蒸汽流量由函数发生器产

作者简介：戴勇（1982.12—），男，汉族，湖南省涟源市，大学本科，工程师，从事核电运行技术研究。

生, 低于20%额定蒸汽流量时, 压差整定值为0.42MPa, 蒸汽流量在20~100%额定流量时, 压差定值在0.42~0.94MPa线性变化。每台蒸汽发生器配置两个流量表测量, 经压力校正后, 再高选参与压差整定值生成^[3]。

主控操纵员根据需要手动设置压差整定值, 410ME跟踪记忆手动定值, 便于手自动无扰切换。

2. 主给水泵转速调节执行机构

调节器产生的泵转速定值信号(4~20mA)送至给水泵液力联轴器转速调节执行机构, 改变液力联轴器的输入输出转速比, 继而实现压力级泵的转速调节。

(二) 整个主给水泵调节环节中, 其转速控制原理

1. 转速控制器由 SLC500 自动控制器与 S7-200 手动控制器构成; SLC500 控制器实现 APA 泵转速的自动闭环调节, 在机组正常运行时, 都由 SLC500 实现主给水泵的转速控制; S7-200 手动控制器实现主给水泵转速的手动控制, 该控制器主要在泵启停阶段使用。

2. SLC500 自动控制器的转速设定值自动状态时, 来源于 ARE410KU; 手动状态时由操作员手动给出。S7-200 自动控制器的转速设定值由 301RR 给出, 301RR 的手自动切换实现 SLC500 与 S7-200 之间的切换, 通过就地机柜内的继电器实现; 301RR 的 Raise/Lower 实现操作员手动调节 S7-200 控制器的设定值。

3. 此次故障发生时, SLC500 控制器自动切换至 S7-200 控制器, 缺省逻辑设置起作用, 自动控制板件故障后无扰切换至手动控制并触发报警, 切至手动切换后转速不再随自动转速定值变化。

三、SLC500 自动控制器原理介绍

SLC500 控制器的电源模块 A200、CPU 板件 A201 及 I/O 板件 A202/203/204/205/206/A207 安装在同一个背板机架上, A201 通过背板机架上电路与 I/O 板件 A202/203/204/205/206/A207 进行数据传输。正常运行时, 现场数据通过模拟量和开关量板件采集转换后送到 CPU 运算, CPU 通过模拟量和开关量板件输出 PLC 指令控制现场设备动作; 当 CPU 停运时, 现场数据仍能通过模拟量和开关量板件采集转换后送到 CPU, 但 CPU 无法通过模拟量和开关量板件输出 PLC 指令。

四、S7-200 控制器原理介绍

S7-200 控制器主要功能是实现核电厂主给水泵的手动调速过程。其模拟量输入板接受来自 DCS 的 OM 中手动升速/降速信号和由勺管位置传感器反馈来的位置实际值。在 CPU 板件中处理计算, 得到勺管位置的设定值。正常运行状态下, 调速系统为自动状态, VEHS 接受来自 SLC500 的勺管设定值信号; 若是调速系统出现“FAULT”信号或是出现 OM 中调速系统打到手动状态, VEHS 接受来自 S7-200 的勺管位置设定值^[4-5]。

五、勺管位置驱动器 VEHS 控制原理介绍

电液耦合器位置控制器 (VEHS) 采用电磁工作原理, 使用 24VDC 供电, 用于对调速耦合器的勺管位置进行精确和连续的控制, 改变调速耦合器内充油量, 实现机械转动设备的可变速度调节。

VEHS 的构成主要包括如下部分:

PID 调节电路: PID 调节电路用于将主控制器给出的勺管位置设定值和勺管位置反馈器反馈的实际勺管位置的偏差值, 经 PID 调节送到电磁力调节器

电磁力调节器: 用于将经 PID 调节电路给出的电流信号转换成电磁力, 控制 3/4 阀的阀芯位置。

3/4 阀: 用于液力耦合器勺管活塞上下腔的进油排油, 改变勺管联动活塞的位置, 从而调节勺管位置, 实现耦合器的速度调节。

机械手轮: 用于手动将勺管置于最大位置 (100%) 和最小两个位置 (0%), 机械手轮只能将勺管置于这两个位置。

微波位置传感器: 采用微波方式, 实现勺管实际位置的测量, 根据勺管对应的 0% ~ 100% 位置, 反馈 20 ~ 4mA 电流信号, 需注意的是: 对应勺管 0% 位置, 传感器反馈 20mA 到 VEHS, 对应勺管 100%, 传感器反馈 4mA 电流信号到 VEHS。

VEHS 工作原理: 根据 PLC 程序送出的勺管位置设定值和位置传感器反馈的实际位置设定值偏差值经 PID 调节后控制 4/3 阀阀芯的位置, 改变勺管活塞两侧腔室的充油量, 进而改变活塞位置, 带动勺管移动位置^[6]。

六、原因分析

1) 主控操纵员通过该故障给水泵的手动调速系统进行转速控制, 能正常升降转速, 说明转速手动控制器 S7-200 控制功能正常。

2) 按照预案进行核实, 包括主控相关报警, 就地机柜内的状态指示等判断 SLC500 控制器故障。

3) 连接专用笔记本查看 SLC500 控制器 CPU 故障信息, 无法连接成功 (面板可以与笔记本电脑正常通讯)。

4) 为尽快恢复泵可用, 对机架断电重启, SLC500 控制器自动恢复正常运行, 笔记本与 CPU 能正常通讯, 但查询无故障代码 (故障代码断电重启会被清除)。

5) 确认现场及主控状态正常后, 主控操纵员手动操作勺管 0% ~ 100%, 在就地面板确认指示动作正常, 主控操纵员将该故障恢复后的主给水泵恢复到正常热备用状态^[7]。

6) 现场恢复正常约 40 分钟后异常再次复现, 与主控沟通后连接专用笔记本读取故障代码仍无法与 CPU 进行通讯。

7) 采用 CPU 新备件更换, 目视检查背板插孔均无异常, 重新下装程序, 确认现场 PLC 恢复正常运行, 确认相关 IO 板件的指示灯点亮与熄灭的状态与泵热备用时对应的 IO 板件指示灯一致。

结合上述排查过程, 进一步进行故障原因分析与定位, 具体

如下：

1) 与以往看门狗超时故障的不同点：本次异常与出现看门狗故障时现象基本一致，不同点为 CPU 模块上的 ENET 灯灭、交换机端口指示灯熄灭，而历史上出现看门狗超时故障时指示灯正常点亮。ENET 指示灯正常应为点亮状态，表示有外部连接通过以太网端口与 PLC 进行通讯（SLC500 可以通过 RS232 端口或以太网端口进行通讯，在该电厂主给水泵 SLC500 控制器完成配置后只能通过以太网端口通讯）。此以太网端口连接至交换机，交换机连接至现场面板，实现数据交互。现场用专用笔记本连接至 PLC 时，可以将笔记本与交换机的网口连接，也可以将笔记本与 PLC 网口连接。本次 PLC 故障后无论是采取哪种方法，均不能实现笔记本与 PLC 的通讯。

2) 维修手册对故障的分析：查维修手册，造成通讯异常为控制器故障或过度的噪声导致，结合现场指示灯指示，为控制器故障导致通讯异常。

3) 厂家分析：本次 CPU 故障的相关信息已整理并发泵厂家，协助分析软件设计是否存在异常，厂家核实信息后，答复不认为软件设计存在异常，引起故障的原因为硬件故障。

4) 离线平台烤机验证情况：将该故障主给水泵故障的 CPU 安装至离线平台，烤机一段时间后故障未复现。联系厂家技术人员到厂，对 CPU 软硬件进行了检查分析，未发现异常^[8-9]。

七、故障历史及经验反馈

历史上该电厂及外部电厂也出现看门狗超时导致 CPU 故障停运事件，具体如下：

1) 2019 年 11 月，该电厂一台主给水泵自动控制 PLC（SLC500）CPU 出现看门狗超时，导致 CPU 停运（该 CPU 在该主给水泵上使用仅 8 个月）。

2) 2020 年 2 月，外电厂一台主给水泵转速控制自动切为手动控制器（S7-200）控制，现场检查，为 CPU 出现看门狗超

时，导致 CPU 停运（该 CPU 在该主给水泵上使用不到 2 个循环周期）。

3) 2022 年 6 月，该电厂自动控制器 SLC500 出现看门狗超时异常导致 CPU 停运（该 CPU 使用不到 4 年）。

4) 外部核电厂发生过由于上游供电失去，导致机柜失电，两台主给水泵（一台主给水泵运行中，另一台主给水泵热备用中）的液力耦合器全部同时失去供电。液力耦合器失电导致运行中的一台主给水泵转速缓慢下降到最低，启动备用主给水泵后发现转速也无法上调，最终因为蒸汽发生器水位低低导致反应堆停堆^[10-11]。

八、检查项目及进展

经过该核电厂仪表组、技术组、工程改造部和厂家的讨论，针对可能的故障原因进行检查，同时针对故障带来的影响进行分析，并制定一系列的措施：

1) 已完成故障 CPU 更换，更换新备件后，跟踪运行无异常；

2) 已制定主控及仪表针对主给水泵系统自动控制器 CPU 故障的干预预案。

九、后续行动

- 跟踪更换完的 CPU 板件运行情况；
- 联系厂家对更换下来的 CPU 板件进行最小系统烤机运行，分析定位根本原因。

十、结语

综上所述，本次主给水泵转速自动控制器故障问题是由 CPU 硬件闪发故障导致 CPU 停运的可能性最高。

参考文献

- [1] 肖彦梅，贺治国. 核电厂主给水泵仪表可靠性提升策略 [J]. 电子技术应用, 2022, (S1): 141-145.
- [2] 田涛，徐强，江腊涛. 核电厂主给水泵机械密封失效分析及改进 [J]. 水泵技术, 2023, (01): 29-33.
- [3] 王晓辉，王芝荃. 高效液力调速产品在核电厂给水泵中的应用 [J]. GM 通用机械, 2011, (1): 37-38.
- [4] 汤吉星，严亮，黄毓鑫. 福清核电主给水泵勺管故障保位研究与工程实践 [J]. 核科学与工程, 2024 (2): 367-376.
- [5] 楼贤根，熊朋帆，钟利波. 主给水泵控制系统可靠性研究与实践 [J]. 电工技术, 2021, (17): 173-175.
- [6] 王立，马省委. 核电厂电动主给水泵液力耦合器常见故障及影响 [J]. 技术与市场, 2021, 28(05): 115-116.
- [7] 徐颖，王志先，张强，等. 基于运行事件的核电厂电动主给水泵联启方案改进 [J]. 核科学与工程, 2022, 42(04): 857-862.
- [8] 王金红，陈志，刘凡，等. 密封环支撑边界条件对机械密封端面变形的影响 [J]. 化工学报, 2020, 71(04): 1744-1753.
- [9] 郭鸿培. 田湾核电 5、6 号机组主给水泵组运行可靠性研究 [J]. 电子技术应用, 2023, (S1): 233-236.
- [10] 魏邦华. 主给水泵机械密封漏量超标分析及改进优化 [J]. 中国核电, 2023, 16(03): 427-435.
- [11] 方吉赢，赵正兴. 核电站主给水泵出力下降原因分析及处理 [J]. 设备管理与维修, 2022, (01): 42-43.