

Optimization Suggestions for Redundancy Design of CAP1000 Unit Signals

Dafei Wu

China National Nuclear Zhanjiang Nuclear Power Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong, 524000, China

Abstract

This paper conducts a comparative analysis of the design principles and control signals on the non-safety side of the CAP1000 unit, a third-generation nuclear power project, focusing on the five common redundancy requirements for control signal loops in nuclear power plants. It finds that the design of some control signals in the current CAP1000 unit does not fully meet the upstream design requirements. Based on unplanned load reduction events in similar power plants caused by failures in important analog output signals, this study proposes further optimization ideas for signal allocation. This optimization approach enhances the reliability of important control signals in nuclear power plants. Additionally, from an operational and maintenance perspective, the replacement and calibration of modules are carried out to ensure the reliability of signal transmission, thereby preventing unexpected unit shutdowns, reactor trips, and load reduction events that could impact power generation reliability.

Keywords

control signal; redundancy; condensate system

CAP1000 机组信号冗余设计优化建议

武大飞

国核湛江核电有限公司, 中国 · 广东 湛江 524000

摘要

本文对某三代核电项目CAP1000机组的非安侧的设计原则和控制信号进行比对分析,重点分析了核电厂控制信号回路常见的5种冗余要求,发现目前CAP1000机组的部分控制信号的设计未完全满足上游设计的要求,结合同行电厂重要模拟量输出信号故障导致的机组非计划降负荷事件,提出了进一步优化信号分配的思路,通过此种优化方式,提高了核电厂重要控制信号的可靠性,同时从运维的角度开展卡件更换和校准,确保卡件信号传输的可靠性,可避免非预期的机组停机停堆降负荷事件,对发电可靠性造成影响。

关键词

控制信号; 冗余; 凝结水系统

1 引言

CAP1000 机组在进行 DCS 系统架构设计时,根据信号的重要性原则从设计上考虑了部分模拟量输出信号的冗余配置,但未充分结合 CAP1000 上游设计要求对各个信号的功能进行充分的分析,导致部分重要输出信号从设计上不满足 DCS 重要信号冗余配置的要求。

2 DCS 结构设计要求

在核电厂中,通过对物项进行发电可靠性分级识别发现相关重要设备来保证核电厂运行的可靠性。按照分级可分为 R-1 和 R-2 设备,设备本身故障或相关电厂控制系统(PLS)

相关控制卡件、通道等单一故障导致设备误动作,可能会导致电厂停堆、停机或者发电可靠性降低。而电厂控制系统(PLS)系统通过冗余配置,可避免其单一故障导致的电厂停堆、停机或发电可靠性降低,在冗余配置规范要求中,明确以下 3 个层面需进行冗余配置。

2.1 控制器冗余

电厂控制系统(PLS)所有控制器应冗余配置,且具有可靠性的冗余切换功能,冗余控制器的数据同步和切换时间应满足工艺系统的实时性要求,当某个工作的控制器发生故障时,系统应能自动以无扰的方式快速切换至冗余的控制器,应保证系统的控制和保护不会因冗余切换造成信号丢失或延迟,也不会引发设备误动和拒动,同时自动产生报警信息。

2.2 I/O 总线以及 I/O 通信模块冗余

I/O 模块通过 IO 通信模块和 IO 总线与控制器建立通信

【作者简介】武大飞(1988-),男,中国安徽蚌埠人,本科,工程师,从事电厂自动控制研究。

接口，也即 IO 通信模块以及 IO 总线构成了 IO 模块与控制器之间的通信链路。因此，IO 通信模块和 IO 总线应冗余配置，且相互独立。当通信链路发生故障或者通信超时，另一通信链路能保证数据完整并及时传输。

2.3 信号输出冗余

电厂控制系统（PLS）信号输出模块的单一故障可能会导致 R-1、R-2 设备误动或拒动。基于发电可靠性分级和可靠性分析，为避免电厂控制系统（PLS）任何单一故障导致电厂停堆、停机或发电可靠性降低，电厂控制系统（PLS）内信号输出应满足以下冗余配置要求：

在设计中，已通过系统冗余保证系统可靠性的情况，输出模块可不作冗余配置。

由输出模块故障引起被控设备的误动作，导致电厂立即停堆、停机或发电可靠性降低的情况，对应的输出模块应进行冗余配置。

由输出模块故障引起被控设备的误动作，在一段时间后导致电厂停堆或发电可靠性降低的情况，并且卡件更换和恢复时间超过该时间的，对应的输出模块应进行冗余配置。

对于应进行冗余配置的信号输出模块，需要满足如下配置规范。

2.3.1 模拟量输出冗余

模拟量输出（AO，含带 HART 协议的输出模块）冗余应满足单卡故障时，输出信号无扰动影响，不会对系统产生扰动，且对故障卡件产生报警。

2.3.2 数字量输出冗余

数字量输出（DO）冗余应包含从卡件接驱动级控制回路前的所有模块，包括可能使用的中间继电器扩展等。根据应用场景的不同，数字量输出模块冗余配置分为串联冗余和并联冗余，串联冗余针对防止设备误触发工况，并联冗余针对设备拒动工况。

2.3.3 Profibus/Modbus 冗余

Profibus/Modbus 总线冗余应根据从站接口情况采取适当的冗余配置方式，对于从站设备均有两个独立的通讯接口，应使用链路冗余配置，电厂控制系统（PLS）应为链路冗余配置两块通讯卡，对于从站设备只有 1 个通讯接口，应使用单链路主站冗余。[1]

2.3.4 安全级优选模块接口通讯冗余

安全级优选模块（PCM）接口是电厂控制系统（PLS）与保护和安​​全监测系统（PMS）之间的通信接口，应冗余配置，在 PCM 接口中，电厂控制系统（PLS）应配置 2 块通信卡，通过主备链路发送或接收信号，分别与保护和安​​全监测系统（PMS）侧的控制优选模块进行通信。

3 DCS 系统介绍

廉江核电项目的非安全级控制系统使用国核自仪 NuCON N100 控制系统，主要包括控制柜、扩展柜和远程柜，通过 NuCON 系统的 I/O 模块和就地设备通信，也使用

Profibus 模块、Modbus 模块与现场设备通信。电厂控制系统（PLS）控制器和控制柜的功能分配是建立在单故障容错能力、纵深防御能力和工厂布置等众多因素的基础上的，电厂控制系统（PLS）的功能将分配到各自独立的控制器以使故障影响最小化。

电厂控制系统（PLS）系统功能为执行信号采集、计算、整定值比较、逻辑计算和设备控制，用以在所有操作模式下维护电厂系统的运行。若电站系统和控制系统处于恰当运行模式下，电厂控制系统（PLS）接收从 DDS 来的操纵员手动软操命令，并执行命令。过程变量、设备状态以及报警数据在电厂控制系统（PLS）内生成并予以处理，并传送至 DDS 予以显示和记录。

电厂控制系统（PLS）机柜由 EDS 系统经过逆变后的电源进行供电。EDS 设计为在发生厂外电源丧失时可以保证对电厂控制系统（PLS）至少 2 个小时的供电，这使得电厂控制系统（PLS）的控制可以在这段时间内持续运行。

电厂控制系统（PLS）机柜为 220VAC 双路供电，柜内主辅 24VDC 电源为冗余配置，主要设备也采用双路供电，组件部分采用冗余 24V 高频输出的方式供电，在一路 220VAC 电源丧失或主辅 24V 电源模块其中一个故障的情况下，柜内设备仍能正常工作。

电厂控制系统（PLS）机柜控制器采用冗余配置，一主一备，当主控故障时，备用能够检测并及时接替控制功能，主副控为无扰切换，过程中不会对系统产生扰动。

电厂控制系统（PLS）网络通信采用冗余方式，包括控制网 C-Net 和实时网 R-Net，当任意一路网络故障时，不影响电厂控制系统（PLS）控制功能的执行和网络实时数据的传输。[2]

对于关键现场设备的控制，电厂控制系统（PLS）采用 AO 卡件冗余或 DO 卡件冗余与现场设备接口，当其中一块 AO 卡件或 DO 卡件故障的情况下，另一块 AO 卡件或 DO 卡件仍能正常输出以控制现场设备，不会导致现场设备（阀门、电机）异常动作。AO 卡件通过端子板的信号高选电路实现冗余。其中 Profibus 和 Modbus 现场总线冗余分为卡件冗余和链路冗余。如图 1 所示

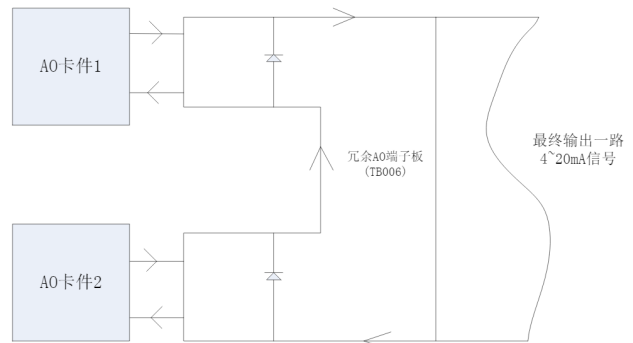


图 1 冗余模拟量 AO 端子板冗余配置图

4 廉江项目设计现状

根据廉江核电项目的设计文件实际配置,其中化学和容积控制系统(CVS)、蒸汽发生器系统(SGS)、中央冷冻水系统VWS、反应堆冷却剂系统(RCS)、非能动堆芯冷却系统(PXS)系统的重要控制信号采用了冗余AO输出设计。

CVS-V059-COPN(下泄管道隔离阀孔板侧控制命令)
 CVS-V115-ORD(补水泵入口母管混合阀超越控制)
 CVS-V157-ORD(补水流量控制阀超越控制)
 CVS-V081-CCLS(CVS补水管道气动截止止回阀控制命令)

SGS-V250A-DMD(SG1主给水调节阀控制命令)
 SGS-V250B-DMD(SG2主给水调节阀控制命令)
 SGS-V255A-DMD(SG1启动给水调节阀控制命令)
 SGS-V255B-DMD(SG2启动给水调节阀控制命令)
 CVS-V047-DMD(下泄管道安全壳外隔离阀控制命令)
 CVS-V115-DMD(补水泵入口母管混合阀控制命令)
 CVS-V157-DMD(补水流量控制阀控制命令)
 RCS-V110A-DMD(稳压器喷雾阀A控制命令)
 RCS-V110B-DMD(稳压器喷雾阀B控制命令)
 PXS-V108B-DMD(PRHR HX流量控制阀B(V108B)

控制命令)
 VWS-V052-DMD(大容量冷冻机组循环冷冻水流量控制阀控制命令)

SGS-V233A-DMD(1号SG大气释放阀控制命令)
 SGS-V233B-DMD(2号SG大气释放阀控制命令)

以上信号均为CAP1000核岛侧设计的重要控制信号,

同步梳理常规岛侧的设计资料,从系统实现功能的角度对信号进行分析,重点排查FWS、TOS、TBS、CDS系统,其中,6个旁路排放阀(TBS-V1001A/B/C、TBS-V1002A/B/C)的开度指令,FWS系统主给水泵A/B/C/D的4个转速命令信号,8个汽轮机高中压调节阀的阀位命令均考虑了冗余设计,但CDS系统重要模拟量信号并未完全按照上海核工院出版的设计要求开展重要信号设计。

CDS系统通过低压加热器凝结水进口的主副调节阀来调节除氧器的主凝结水流量,其中主调节阀调节70%的额定流量,副调节阀调节30%的额定流量,机组在启动和低负荷时由副调节阀CDS-V1008B进行调节,主调节阀保持关闭,当机组负荷升高至30%额定负荷时,CDS-V1008B达到全开位置,主调节阀CDS-V1008A会逐步开启,当机

组负荷持续增加时,CDS-V1008B保持全开,二回路给水通过CDS-V1008A进行调节,一旦CDS-V1008B控制指令失效,阀门调节大范围波动或异常关闭,将会导致除氧器液位控制异常,机组被迫降功率,CDS-V1008A因承担70%的额定流量,控制指令异常时对机组影响较大,水位异常可能导致主给水泵组跳泵,机组停机停堆。同类电厂均将CDS-V1008A/B纳入SPV设备管理体系进行管理,定位为SPV关键敏感设备,由于主调节阀CDS-V1008A和副调节阀CDS-V1008B从功能上并不是冗余配置,从上游设计要求分析,两个调节阀均需考虑控制信号冗余的配置,确保每个阀门调节控制的可靠性。[3]

某三代核电厂曾发生一起DCS系统AO输出卡件故障问题,2024年3月9日,某电厂2号机组处于功率运行状态,反应堆功率为97.2%,汽机功率1220MW,高加6B/7B应急疏水突开100%,疏水全部切至凝汽器,最终确认为AO卡件故障导致疏水阀全开,机组降负荷至1090MWe。

结合对CAP1000机组核岛侧和常规岛侧重要控制信号从功能上进行分析,凝结水流量调节阀作为电厂重要的关键敏感设备,需设计冗余配置的调节命令信号,建议增加CDS-V1008A-DMD1和CDS-V1008B-DMD1两路输出控制命令进行冗余,需在机柜增加2个IO通道和模拟量输出端子板,并修改组态。

同时,针对冗余配置的模拟量输出信号,在大修期间应考虑卡件的运维策略,大修期间定期对卡件进行校准,确保卡件传输精度,并制定定期更换的维护策略。

5 结语

当前CAP1000机组核岛和常规岛采用不同的设计方开展设计,部分重要信号的设计并不完全满足上游文件的设计要求,结合同类机组AO卡件的故障率,卡件一旦故障,可能造成重要输出信号异常,导致机组停机停堆,影响发电可靠性,若能对该类信号进一步优化,同步考虑该类信号的维护策略,可提升机组的可靠性。

参考文献

- [1] 仝兴业 张健 潘海波 PROFIBUS总线技术在核电DCS中的研究和应用[J].自动化博览 2025 05: 76-79;
- [2] 刘中明 陆荆 李红英 核电厂数字化仪表与控制系统的现状与发展趋势[J].中小企业管理与科技(下旬刊) 2016 01(03): 244
- [3] 罗吉江 邹伟明 冯建 海阳核电凝结水系统的调试经验及反馈[J].电站辅机 2016 37(01) 25-41