

压水堆核电站控制棒控制系统的基本原理与常见故障分析

檀一铭

国核示范电站有限责任公司

DOI:10.32629/pe.v4i1.19069

[摘要] 控制棒控制系统属于压水堆核电站反应堆安全运行的关键设备,它肩负着调节功率和紧急保护这两项任务。基于此,本文深入剖析了该系统的原理及其常见的故障状况,首先阐述系统组成结构,包含驱动机构,电源装置和位置监测单元,接着详细说明功率调节,棒位控制和紧急停堆的工作原理,重点分析了驱动机构卡涩、落棒异常、电源异常、信号传输问题等机械类和电气类的常见故障模式,最后提出了对应的故障排查和维护措施。研究结果对提高控制棒系统可靠性、保障核电站安全运行具有重要指导意义。

[关键词] 压水堆核电站; 控制棒控制系统; 功率调节; 驱动机构; 故障分析; 系统维护

中图分类号: TM623 **文献标识码:** A

Basic Principle and Common Fault Analysis of Control Rod Control System in PWR Nuclear Power Plant

Yiming Tan

State Nuclear Demonstration Power Plant Co., Ltd.

[Abstract] The control rod system is a critical component for ensuring safe operation in pressurized water reactor (PWR) nuclear power plants, responsible for both power regulation and emergency protection. This paper provides a comprehensive analysis of the system's principles and common failure modes. It begins by detailing the system architecture, which includes the actuator mechanism, power supply unit, and position monitoring unit. Subsequently, it elaborates on the operational mechanisms of power regulation, rod position control, and emergency shutdown. Special attention is given to mechanical and electrical failure patterns such as actuator jamming, rod drop anomalies, power supply malfunctions, and signal transmission issues. Finally, the paper proposes corresponding troubleshooting and maintenance measures. The research findings offer significant guidance for enhancing the reliability of the control rod system and ensuring the safe operation of nuclear power plants.

[Key words] Pressurized Water Reactor (PWR) nuclear power plant; Control Rod System; Power Regulation; Drive Mechanism; Fault Analysis; System Maintenance

引言

压水堆核电站的安全运行关键在于控制棒控制系统的可靠性,它是反应堆功率调节和安全保护的核心装置,通过精确操控控制棒在堆芯中的插入深度,做到对反应堆功率的稳态调节和紧急工况下的快速停堆,控制系统处在高温,高压,强辐射的恶劣工作环境之中,其机械与电气部件容易产生老化,磨损和故障,从而影响核电站运行安全,深入剖析控制系统的工作原理,探究常见的故障情况及其特性,制订有效的预防和维修手段,这对保证核电站安全稳定运行有着重要的工程意义,本文旨在全面论述控制棒控制系统的组成结构,工作机理,故障种类以及保养策略,为核电站安全运维提供理论依据和实践指导。

1 控制棒控制系统的基本构成

1.1 控制棒驱动机构

控制棒驱动机构属于控制棒运动的执行部件,它的表现好坏关系到反应堆的控制精确度和安全性,这个机构一般采取电磁步进式或者磁力提升式的设计,依靠细致操控电磁线圈的通电次序,实现控制棒的微步进运动,驱动机构要有很高的定位准确度和迅速的响应能力,还要符合核级设备的严格要求,能够在高温、高压、高辐射条件下长时间稳定运转,机构里面包含很多精密的机械零件,比如抓钩装置,棘轮机构等,这些零件的加工精度和装配品质直接影响到机构的运动效果,为了保障可靠性,驱动机构往往采用模块化的规划,方便维修和更换。

1.2 棒控电源与动力装置

棒控电源系统给整个控制棒驱动系统供应稳定可靠的电能,它是保证控制棒准确动作的关键所在,此系统包含多重冗余、正常厂用电供应、备用电源以及应急蓄电池组等诸多供电回路,动力装置包含功率转换单元,控制电路和保护装置,可以将电源能量转化为驱动机构所需要的控制信号和动力输出,电源系统有着完备的监控与保护功能,可以随时监测电压,电流等参数,一旦发生异常就会自动切换供电回路或者执行保护措施,系统还装有滤波和稳压装置,保证输出的电源品质符合控制精度的要求,定时对电源系统展开检测和保养,使其始终处于良好的工作状态。

1.3 控制棒位置监测单元

位置监测单元是控制棒控制系统的眼睛,要准确而即时地检测并反馈控制棒的位置信息,这个系统采用多传感器冗余设计,一般包含主传感器和备用传感器,利用不同的原理,如磁栅、光电、电感等来进行位置检测,监测单元将传感器采集到的模拟信号转换为数字信号,经处理后传送给控制系统,该系统具备自我诊断能力,可以自行察觉传感器发生故障或者信号存在异常情况^[1]。并且立刻发出警报,为了保证测量精确度,监测单元会定时执行校准和校验步骤,从而保障位置指示的准确性,系统还带有数据记录功能,能够储存以往的位置数据,为故障分析和性能评估提供依据。

2 控制棒控制系统原理

2.1 反应堆功率调节机制

反应堆功率调节是一种通过改变控制棒在堆芯内的位置来进行的精确调节过程,当要提高功率的时候,控制棒逐渐抽出堆芯,这样就会减小中子吸收面积,让中子通量增多;要是想降低功率,就让控制棒插进堆芯,加大中子吸收,使得中子通量减小。调节过程采取闭环控制,控制系统随时采集反应堆功率、温度、压力这些参数,利用控制算法算出最佳的控制棒移动策略,调节功率的时候还要顾及响应速度和稳定性,防止出现过调或者振荡的情况。

2.2 控制棒升降与插入逻辑

控制棒的动作逻辑设计要依照严格的安全准则和运行规范,提升操作采取渐进策略,依照功率需求变化速率来决定控制棒的移动速度和距离,插入操作顾及安全优先原则,在异常工况下把保障反应堆安全放在首位,控制系统采取分组控制策略,把控制棒分成若干组别,按照既定顺序和模式开展动作,防止功率分布出现畸变,逻辑控制单元随时监测控制棒的位置和状态,保证实际动作和指令相符,系统设有多重连锁保护,防止在不合适工况下执行控制棒操作,所有操作指令都要经过多重校验和确认,从而保证控制动作的准确性和可靠性。

2.3 紧急停堆控制过程

紧急停堆是控制棒系统最重要的一项安全功能,一旦监测到反应堆参数超过安全限值就立刻触发,停堆信号通过多路独立通道传送,保障信号的可靠性,触发之后,全部控制棒在最短

时间里靠重力快速插入堆芯,迅速终结链式反应,停堆系统采用故障安全设计,也就是说,在动力失效的时候仍然可以执行停堆功能,系统会定时开展停堆时间测试,测量控制棒从释放到完全插入所需的时间,保证符合技术规范的要求,停堆期间,系统会记录相关参数,为事后分析提供数据支持。整个停堆过程的设计以保证反应堆安全为最高原则。

3 控制棒常见机械类故障

3.1 驱动机构卡涩问题

驱动机构卡涩是控制棒系统最常出现的机械故障之一,造成这种故障的原因多种多样,机构内部积垢,润滑剂老化,部件磨损或者变形都会引发运动阻力加大,卡涩常常表现在控制棒移动速度变慢,动作不连续或者完全卡住,轻度卡涩会影响控制精度,严重卡涩甚至威胁到反应堆的安全^[2]。预防卡涩需要定期进行机构清洁和润滑保养,采用专门的清洗剂和润滑剂,针对已经产生的卡涩情况,要按照具体情形采取相应的处理办法,手动操作,震动松动或者替换部件,形成一套完备的卡涩预警体系,通过监测驱动电流和运动特性变化,可以早期发现潜在卡涩风险。

3.2 控制棒落棒异常

落棒异常指紧急停堆时控制棒下落速度或者时间与设计不符的情况,其产生原因可能有导向机构变形,水流阻力改变,驱动机构释放故障等,落棒速度太慢会干扰停堆效果,太快则可能引发冲击破坏,定时做落棒时间测试是察觉异常的关键途径,通过检测实际落棒时间并同设计数值比较,就能评判落棒性能,一旦察觉到异常就要从机械构造,水力状况等方面着手剖析,找出问题所在,应对办法或许包含调整导向间隙,优化水流环境或者检修释放机构。

3.3 位置指示失灵

位置指示失灵故障会影响到操作人员对控制棒状态的判断,进而造成误操作,故障的表现形式多种多样,有指示值不改变、跳变、偏差太大或者完全失效等情况,引起故障的原因有很多,可能是传感器坏掉,信号传送受阻,处理单元出毛病或者多个环节存在毛病,系统一般会用冗余传感器,依靠数据对比就能找出指示异常的地方,要解决这种故障得用系统的排查办法,从传感器开始,再看信号线路,最后查处理单元,定期校准和检测是防止指示失灵的好办法,包含传感器精确度校正,信号通路测试以及显示单元检验,形成完善的故障记录和分析制度,有助于提高故障诊断效率。

4 控制棒常见电气及信号故障分析

4.1 电源供应异常

电源系统出现异常状况,这会直接影响到控制棒的动作可靠性,电压波动,瞬间断电,谐波干扰,接地故障等都是比较常见的问题,这些问题有可能造成控制棒发生误动作,拒动或者动作不准确的情况,电源系统设置了多种监控与保护手段,它可以随时监测输入输出的电压,电流,频率等参数,一旦检测到存在异常情况,就会自动切换备用电源或者启动保护程序^[3]。定期对电

源系统展开测试和维护工作十分重要,这包含蓄电池性能测试,切换装置校验以及滤波装置检查等内容,建立起电源质量监测制度,把电源参数变化趋势记录下来加以分析,这样做可以提前察觉到可能出现的问题。

4.2 控制信号传输故障

控制信号传输故障会造成控制指令失真、延迟或者丢失,进而影响控制精度和响应速度,故障的原因可能是线路老化、连接器松动、电磁干扰或者设备故障等,重要的控制信号选用冗余传输通道和差错校验手段,从而加强传输的可靠性,信号线路采用屏蔽设计,以削减电磁干扰的影响,定时开展信号传输检测,包含通路检测,噪声检测以及延迟检测,保证信号质量达到要求,形成信号传输监测体系,随时监督信号品质和传输状况,尽快找到异常之处,针对发现的传输故障,要全面检查信号来源,传输介质以及接收装置,找出根本原因并采取相应措施。

4.3 监测信号失真与干扰

监测信号失真和干扰会影响控制系统判断和决策,可能会导致误操作或者保护误动,信号失真可能是由于传感器漂移,电路故障或者校准偏差造成的,干扰常常来自电磁环境或者接地问题,系统采用了多种抗干扰手段,包含信号滤波,光电隔离,屏蔽保护等办法,定时开展信号校准和校验,保证测量精确性,形成信号品质评定制度,针对关键监测信号展开持续观测并做趋势分析,察觉到信号出现异常情况的时候,要辨别这是设备故障还是外部干扰,然后采取对应的解决办法,比较重要的监测信号采用多重冗余设置,通过数据融合技术提高信号可靠性。

5 故障排查与日常维护措施

5.1 机械部件检查与维护

机械部件的定时检查与维护是保证控制棒系统正常运转的关键所在,维护工作涵盖驱动机构的清洁润滑,导向装置的检查调整,连接部件的紧固情况检查等等,采用专门的工具和设备来执行精度测量以及性能测试,保证机械参数符合标准要求,做好详细的维护记录,把检查数据,处理办法以及更换部件的信息记录下来,方便日后做趋势分析和寿命评估,维护期间要注意控制好清洁程度,避免异物进入到精密机构当中,对于容易损坏的零件设立定期更换制度,按照运行时长或者动作次数预先更换,维护工作要依照规程来进行,保障人员和设备的安全。

5.2 电气系统测试与校准

电气系统定期测试与校准是保证控制精度与可靠性的关键部分,测试内容包含电源性能,绝缘电阻,接地电阻,信号精度等诸多方面,利用标准仪器和设备执行测量,保证数据准确且可

比较,校准工作主要针对传感器,变送器,测量仪表等,依照既定周期和规程展开,校准完毕之后还要做功能检测,查看整个系统的性能,完善校准记录和证书管理机制,确保量值传递的准确性^[4]。电气系统维护时务必重视安全防护,断电,放电,绝缘测试等都要做好,定期对保护装置实施测试,确保其动作准确可靠。

5.3 定期试验与故障演练

定期试验和故障演练是检验系统功能、锻炼应急能力的重要途径,试验包含功能测试、性能测试、安全测试等诸多内容,落棒时间测试、停堆功能试验等重要试验必须依照规程来开展,记录详细的数据并与以前的数据加以比较,故障演练模仿各种异常状况,训练运维人员的故障诊断与处理能力,演练结束之后要全面评判,总结经验教训,改进应急预案和处理流程,形成试验和演练的规范化程序,保证每次活动都能达成预期目的,通过定期的实践,不断改善系统的可靠程度和人员的技能水准,为核安全提供坚实保障。

6 结语

控制棒控制系统的可靠程度关乎压水堆核电站的安全运行,本文通过系统剖析控制系统的基本原理,组成结构以及工作原理,仔细探究了机械,电气方面常见的故障类型及其成因,而且给出对应的故障识别办法和保养手段,通过研究可知,创建起有效的预防性保养体系,充实故障预报机制,加大定期试验和演习力度,是保证控制系统可靠运转的关键措施。未来还需要不断展开系统优化研究,不断提升控制棒控制系统的智能水准和故障自我识别能力,为核电站的安全稳定运行提供更加坚实的技术保障。

[参考文献]

- [1]王馥郁.压水堆核电站功率控制系统建模及控制方法研究[D].东南大学,2018.
- [2]巴少华,夏虹,王武.反应堆控制棒失步故障诊断系统设计[J].自动化仪表,2021,42(10):102-105+110.
- [3]郭景鸿,魏文,王福厚.某电厂控制棒电源系统励磁故障事件原因分析[J].电工技术,2020,(12):89-90.
- [4]李艺.反应堆控制棒控制系统MDP卡件故障探析[J].电子技术应用,2024,(S2):63-68.

作者简介:

檀一铭(1998--),女,满族,辽宁省北镇市人,大学本科,助理工程师,从事的研究方向或工作领域:压水堆棒控棒位。