

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 山东省威海市荣成市 264300

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,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,重点分析析驱动机构卡涩,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

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流序,做到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回应能力,还要符合核级设备的严格需求,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,这些零件的加工精准程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,此系统带有多重冗余,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确度的要求,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况。

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,比如磁栅,光电,电感等来执行位置检测,监测单元把传感器搜集到的模拟信号转变为数字信号,通过处理之后传送给控制系统,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内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 and 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,太快则也许引发冲击破坏,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,形成完备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,创建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,干扰常常来自于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去,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。

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,组成结构以及工作机理,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, 出生 1998 年 2 月, 性别: 女, 民族: 满族, 籍贯辽宁省北镇市, 学历: 大学本科, 职称: 助理工程师, 从事的研究方向或工作领域: 压水堆棒控棒位