

核电运行风险防控技术及发展方向研究

李丙坤

中广核惠州核电有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21089

[摘要] 本文梳理了核电运行中风险防控技术的应用意义,针对概率风险分析技术、动态风险预警技术以及人因仿真控制技术,在工程应用层面上对其应用进行分析和研究。探索了核安全决策系统与风险控制相结合的途径,并对重要过渡阶段生产准备移交投产阶段的风险特征及其应对措施展开了研究,同时结合智能核电的发展前景展望了一体化集成化、智能自动化以及人机协调化等未来发展方向,推动我国核电事业的安全发展和高质量发展并行前进。

[关键词] 核电运行; 风险控制; 安全决策

中图分类号: TM623 **文献标识码:** A

Research on Risk Prevention and Control Technologies for Nuclear Power Operations and Their Development Directions

Bingkun Li

CGN Huizhou Nuclear Power Co., Ltd.

[Abstract] This paper examines the significance of risk prevention and control technologies in nuclear power operations, conducting analysis and research on their application at the engineering level regarding probabilistic risk analysis, dynamic risk early warning, and human factor simulation control technologies. It explores approaches to integrating nuclear safety decision-making systems with risk control, investigates risk characteristics and corresponding countermeasures during critical transition phases such as production preparation and handover periods, and outlines future development directions—including integrated system design, intelligent automation, and human-machine coordination—based on advancements in smart nuclear technology, thereby advancing both the safety and high-quality development of China's nuclear power sector.

[Key words] Nuclear power operation; Risk control; Safety decision-making

引言

在能源低碳转型的全球发展趋势下,核电具有不排放温室气体、供电稳定性和供能密度高等特点,在替代化石燃料和保证能源供给安全方面发挥着重要作用。随着我国装机容量核电占比逐渐上升以及在役机组运行时间的延长,核电运行环境越来越复杂,设备老化、人为因素和运行工况变化等风险不断积累,给核电机组安全运营管理提出了更高的要求。保障核安全是发展核电事业的生命线。采用简单的静态化的运行风险控制手段无法满足现代化核电厂精细化智能运营的需要,为了有效预防各种运行事故的发生,确保核电的安全,亟须依靠先进技术建立全链条、全周期、智能化的风险防控体系。本文基于核电工程运行现状,分析核电站运营风险管理技术要点和决策融合机制,探讨关键阶段管控对策及未来发展趋势,以期提升核电厂本质安全水平提供技术支持和理论基础。

1 核电运行风险防控技术的应用价值

核电厂作为电网中的电力输出节点,在电网乃至在社会能源供应结构体系中,发挥着重要的作用。核电厂在日常生产运行过程中,涉及设备的工作主要是定期预防性维护工作、出现缺陷后的纠正性消缺工作以及定期试验,这些工作有的在设备处于运转状态下进行,有的需要将设备退出运行并建立安全工作条件后进行,在工作中都不可避免地会对设备本身或周围设备甚至环境产生影响,并引入相关风险。这些风险若控制不好,则会影响机组的安全稳定运行,轻则造成设备可靠性降低或机组功率波动,重则可能造成停机停堆,对电网产生较大冲击,或放射性失控泄漏对公众和环境带来危害。防核风险技术是防止核电机组出现事故、保障核电机组安全运行的有效方法,具有重大的工程应用价值和社会价值。首先,防核风险技术实现了风险防范在前的主动管理,改变了传统的只做事后处理的模式,防核风险通过对核电站风险识别与预警、评估和干预,在事故前期就可能出现的机组设备故障、人因操作失误、控制系统故障等风险

进行有效排除,降低发生堆芯破坏、放射性泄漏等恶性事故的概率,从根源上提升核电的安全水平。其次,精准的风险防范控制有利于提升核电站运营管理的质量和水平,减少非计划性停机停堆、设备维修等因素对发电效率的影响,使核电机组充分利用,提升了核电站的经济效益水平^[1]。

2 核电运行风险防控核心技术与工程实践

2.1 基于概率安全分析(PSA)的静态风险评价技术

概率安全分析(PSA)作为评价核电静态风险的核心技术与核安全审评和风险等级评定的基本方法,通过对核电机组的系统结构、设备及其作用的梳理以及对故障逻辑关系的研究,构造故障树与事件树模型分析研究各种初始事件发生概率,事故发展序列以及后果严重性,从而实现对核电固有风险的系统评价。工程上主要应用于机组设计、在运机组定期安全审评、重大改造的风险评估等工作中,在准确确定系统的薄弱环节方面,识别出高风险设备及工况等具有重要意义。通过静态风险定级量化,可以为资源分配,维护安排及安全重点管理提供信息,避免出现系统化结构性安全问题。概率安全分析是核电风险评价体系中的关键技术。

2.2 基于在线监测与故障预测的动态风险预警技术

相较于静态风险评估,在线监测及故障预测实现了对核电运行的风险动态实时控制,更符合机组变工况运行和设备运行状态的变化的控制需要。该技术基于传感器、数据采集系统、边缘计算仪实时收集反应堆、蒸汽发生器和主泵等核心设备运行过程中的温度、压力、振动、液位和流量等信息,利用大数据分析、机器学习算法将其与正常的工况阈值进行对比,对设备的运行情况进行监测,同时通过历史数据训练预测模型实现提前预判,对设备老化、性能下降以及潜在故障等方面进行分析并提前预警或逻辑旁通(剔除),做到对设备运行风险情况的实时动态分析和干预。在实际工程运用过程中,在线监测及故障预测解决了传统定期检修过修和漏修问题,将状态维修和风险的动态控制有效结合,提高了设备运行可靠性,并降低了运行过程中突发事故风险的概率。

2.3 基于人因工程与虚拟仿真的运行风险管控技术

核电机组运行中半数以上的运行偏差和隐患来源于人因失误,做好人因风险控制是核电风险管理的关键。基于人因工程和虚拟仿真技术,利用三维虚拟仿真系统重现机组主控室、设备厂房等工作环境,结合人因失误理论,模拟机组启停、工况转换和故障处理等典型操作过程。通过训练演练能准确查找作业者疲劳操作、误操作、走错间隔及应急处置等安全隐患,有针对性地进行人员操作训练和应急演练,利用人因工程原理优化机组主控室人机界面和操作过程的安排,杜绝环境和不合理的操作流程而产生的危险,从作业人员、设备、操作规程及工作场所等多个方面准确管控人因风险,补足核电机组运行中的人因不足。

3 核电运行风险防控的有效策略

3.1 核安全决策机制与运行风险防控的融合

3.1.1 基于风险指引的核安全重要决策方法

风险指引决策模式是现代核安全运行管理的核心理念,它改变原有的“过于保守一刀切”的决策方式,使得决策的保守度与其相应的风险值相对应。以PSA静态风险评价和监测结果为决策的主要依据,在核电运行及检修、改造、规程、工况变更等重大决策前进行风险的量化分析,按其风险大小划分为不同的等级,采取不同的决策措施。对风险低的简化审批程序、改善维护方案。对高风险加强全方位监控,分级决策,并制定具体的防范措施。这样,在保证绝对安全的前提下兼顾经济上的安全性,做到安全决策有科学、定量、合理的依据。

3.1.2 运行事件下的应急决策与快速响应机制

在突发运行异常事件,设备故障、人因失误或工况变动等核电运行事故中,完善有效的应急决策和及时响应措施可以有效避免其造成严重后果的可能性。根据风险数据库统计出的各种典型运行事件的变化趋势、危险程度以及处理措施建立分级应急响应机制,在发生异常时动态化的风险预警快速分析得出其危险等级并迅速匹配对应的应急处置措施帮助管理人员进行决断。同时通过扁平化的核应急指挥流程及应急等级划分,运行、检修、技术、安保等部门协调联动,快速完成相应的故障隔离、工况变动、隐患消除等工作,防止小风险变成大灾难,提升突发风险的应急能力^[2]。

3.1.3 风险信息向运行规程与安全限值管理的转化

风险防控的关键是通过常态化、标准化管控将风险信息量化后,转变为运行标准和管理规范。汇总PSA评价结果,实时监控监测数据以及过往的运行经验对核电站的运行规程、操作程序、安全限值动态进行修订和完善。将高风险的步骤进行细化操作、增加控制要求,将设备的风险阈值转变成运行安全限值,给出机组正常状态、非正常工况、故障时的管控标准,同时将其融入日常工作、日常巡检、检修工作之中,实现风险识别—风险评价—风险管控的闭合落地,使风险管控技术分析转化成常态化行为。

3.2 核电生产准备及移交投产阶段的风险防控策略

3.2.1 生产准备期间系统调试与运行风险识别

核电生产准备是核电站由调试到商业运行之前的重要阶段。在这个阶段,机组所面临的系统调试状态极其复杂、操作全新且风险不确定因素很大,所以该阶段的风险控制主要是通过系统的分析调试过程中潜在的风险,对电气系统、热力系统、控制系统等各个系统的单体调试和联动调试的状态下可能会遇到的设备失效、系统配合问题以及操作上的漏洞、超标等问题进行分析。列出调试风险清单,并应用静态风险评价方法对调试项目进行风险分类,在此基础上对高风险调试项目实施具体的控制方案,监督其整个调试过程,避免留下调试过程中的遗留隐患问题,为今后长期稳定的运行打好基础。

3.2.2 移交投产(TOB/TOM/TOTO)过程中的风险传递与控制

调试单位向运行单位的3T移交工作(TOB/TOM/TOTO)是实现设备、系统和管理权限的最后转移阶段,也是最为复杂繁多,交接双方责任频繁交替的过程。容易存在由于设备状态不清楚、调试问题不彻底、程序生效不完整、遗留项关闭不合理、文件资

料提供不全和运行人员对设备了解不足等诸多风险点导致后续投运隐患发生。为此建立规范化的TOTO移交程序,明确设备、系统及资料、权限的交接标准,在设备交接前对其全面核查风险,并检查遗留调试问题。同时确认交接双方职责,确保风险可追溯,从而杜绝移交调试过程向投运后的风险传递,保证整个接管过程处于可控状态之中。

3.2.3从调试向运行过渡的纵深防御组织与技术保障

为确保平稳实现调试到运行的过渡,建立纵深防御的风险防控措施。组织上成立调试向运行过渡控制的项目组或委员会,统筹管理调试收尾、交接验收及试运管控工作,落实各级岗位职责和控制红线,形成多级审查、多级监督机制。技术上通过在线监控系统全过程监控试运工况,以及数字化系统统计和跟踪移交整体进度和数据,通过虚拟仿真进行试运操作预演,预判调试过渡工况波动风险和一、二类遗留项超期风险。同时落实隐患排查制度,全方位堵塞管理漏洞,建立组织、技术、流程三位一体纵深防御机制,确保机组圆满完成从调试到商业运行平稳过渡。

4 核电运行风险防控技术的未来发展方向

4.1一体化集成:构建全范围、全周期的风险防控平台

针对现有核电风险控制技术和数据资源分散乱、孤立分散的系统,未来朝一体化集成发展。通过整合PSA静态风险值,运行在线监测数据,设备状态信息,人因动作信息,应急处置等数据资源,搭建全生命周期大数据一体化平台。融合不同系统的数据资源壁垒,将机组设计、调试、生产、运维和退役过程中的各类全周期风险进行融合分析与统一管理,形成闭环控制的识别—评价—预警—控制—复盘的风险控制链条,提升核电安全防控的系统性与整体性^[3]。

4.2智能自主化:发展自适应、自诊断的风险防控体系

运用AI、数字孪生和物联网等先进技术逐步实现智能化的自主化风险防控,利用机组数字孪生模型对机组设备及系统进行精确描述,实时仿真运行中的风险,准确预测预警并进行自适应调控。通过对深度学习算法研究优化故障诊断预测的风险模型,能够达到设备故障的自诊断以及自适应地风险等级研判与风险防控策略匹配,减少人为干预提高其风险防控的准确性与时效性,促进核电机组风险防控由“被动”应对转化为“主动预

判”及“自主防控”。

4.3人机协同化:强化人因风险识别与辅助决策能力

未来的核电风险管控更加优化人机控制的模式,重点针对精准化的人因风险控制、智能化辅助。利用智能监测装置实时监控人工作的状态和操作行为,通过大数据分析识别不安全动作、疲惫状态、违规操作等行为。建立智能辅助决策系统,在机组运行过程出现异常工况或者故障的情况下,及时自动地给与相应的处置策略、具体的操作流程以及警示,使得工作人员可以更准确地进行操作,实现“预警、人机合作、准确定性”的控制模式,最大程度避免了人因因素,确保整体上的安全性。

5 结论

运行风险防控是保证核电产业安全、可持续发展的基石,涵盖了机组生产准备、移交接管、调试启动、正常运行及应急处置全生命周期。本文认为,以概率安全分析、动态风险预警和人因仿真控制为代表的风险防控技术构成了核电机组运行风险防控的核心基础,风险指引决策和应急响应机制以及风险信息的规范转化实现了技术防范与管理决策的融合,有针对性的过渡阶段风险管控措施能够有效阻断相关性阶段风险传递。随着智慧核电的发展演进,一体化集成、智能化自治和协同化的人机合作是风险防控的未来趋势。在未来的风险研究工作中应不断深化传统的风险方法与人工智能、大数据、数字孪生等新技术的有机融合,持续优化完善全周期、智能型、闭环化风险防控体系,全面提升核电机组的本质安全水平,更好地为我国核电事业高质量、安全发展提供支撑保障。

[参考文献]

- [1]彭克平.核电厂运行期配置管理子领域实践及研究[J].中国核电,2025,18(6):928-935.
- [2]刘志云,付汝师.核电厂智能运行研究探索[J].环境保护,2025,53(23):21-26.
- [3]黄兵,杨宏野,张祥贵,等.核电厂运行文件人因失误概率分析方法研究及应用[J].设备管理与维修,2025,(5):33-35.

作者简介:

李丙坤(1987--),男,汉族,四川省绵阳市人,工程师,大学本科,研究方向:核电运行。