

Dynamic risk assessment and intelligent control decision system construction for nuclear power plant operation

Le Wang

China Nuclear Power Operations Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

With the rapid development of the global nuclear power industry, the safe operation of nuclear power plants has become a critical issue concerning China's energy supply and social sustainability. This paper systematically examines issues such as equipment failures, human errors, natural disasters, and external attacks in nuclear power operations. By integrating big data and IoT technologies, it establishes a dynamic risk assessment index system. Using machine learning and deep learning methods, it constructs a risk assessment model for dynamic evaluation. The research covers system structure design, intelligent decision-making methods, emergency response and collaborative control, human-machine interaction, and auxiliary decision-making. It is hoped that the findings of this project will enhance the safety and reliability of China's nuclear power operations and promote the high-quality development of the nuclear power industry.

Keywords

nuclear power plant; operation risk; dynamic evaluation; intelligent control decision; risk assessment model

核电站运行风险动态评估与智能控制决策体系构建

王乐

中广核核电运营有限公司, 中国·广东 深圳 518000

摘要

随着世界核电工业的迅速发展, 核电厂的安全运行已成为关系到我国能源供给和社会可持续发展的重要课题。本文对核电运行中存在的设备失效、人因失误、自然灾害和外界攻击等问题进行系统的研究, 结合大数据和物联网等技术, 建立风险评价的动态评价指标体系, 利用机器学习、深度学习等方法, 构建风险评价模型, 并进行动态评价。研究内容包括系统结构设计、智能决策方法应用、应急响应与协同控制、人机交互与辅助决策等。希望本项目的研究成果促进我国核电安全可靠运行, 推动核电产业高质量发展。

关键词

核电站; 运行风险; 动态评估; 智能控制决策; 风险评估模型

1 引言

随着世界能源结构的低碳发展, 核电作为一种清洁、高效、稳定的能源形式, 已逐渐被世界各国所重视。但是核电厂在使用过程中也面临着许多安全隐患, 这些隐患一旦出现, 将给人类生命健康、生态环境及社会安定带来不可估量的危害。传统的核电厂操作风险评价方法大多是以经验为主、静态模式为主, 很难适应复杂多变的运行环境要求。随着核电数字化和智能化技术的迅速发展, 建立核电厂安全生产过程中的风险评价和智能管控系统已是大势所趋。智能控制通过对核电厂运行状况的实时监控, 对各种风险进行动态评估, 可以有效地减少事故的发生, 确保核电厂的安全稳定运行。

【作者简介】王乐(1978-), 男, 中国河北保定人, 本科, 工程师, 从事核电站运行与控制研究。

2 核电站运行风险类型分析

2.1 设备风险

核电厂的装备系统规模大、结构复杂, 涉及到许多重要设备, 如核反应堆、蒸汽发生器、汽轮机、泵阀等, 其失效是影响核电厂安全运行的主要原因。装备长期处于高温、高压、强辐射等苛刻条件下, 易造成零部件的磨损、老化和腐蚀, 严重影响装备的使用性能与可靠性。比如核电站压力容器在长时间的高温、高压及中子辐射作用下, 材料的性能会逐步退化、泄漏等缺陷。而受高速旋转及高温流体的冲刷, 主泵叶轮极易产生磨蚀, 会降低冷却剂循环流效, 危及反应堆的安全运行^[1]。

另外, 由于设备设计上的缺陷, 制造工艺上的缺陷和安装和调试上的失误, 都会引起设备的故障, 有些设备在设计时没有充分考虑到实际的工作条件, 造成部分设备不能在复杂的环境中正常工作。生产中对产品质量的严格控制, 会

导致产品出现隐患,使得产品在生产过程中出现问题,从而引起连锁效应,带来严重的后果。

2.2 人为操作风险

人工作业是核电厂安全生产中的一个重要环节,而由于人为错误和违章操作,常常会造成重大的事故。核电厂的生产作业过程十分繁琐,对操作者的专业知识、技术水平及工作态度都有很高的要求。在作业过程中,由于作业人员的疲劳、注意力分散、判断错误等因素,作业人员没有按照作业程序进行作业,造成设备的误动作或参数的异常。例如在运行过程中,如设备启停、参数调试等,若操作人员没有严格遵守,将会造成反应堆功率失控、系统压力异常等严重后果^[2]。另外,员工缺乏足够的训练和安全意识,也是造成人为作业风险的主要原因,核电厂操作人员如果没有经过系统、全面的专业训练,不熟悉设备的原理、操作规程和紧急处置办法,对突发事件的应对能力不足,会给核电厂的运行带来了很大的隐患。

2.3 自然灾害风险

核电厂的选址一般都要考虑到地质和气象等自然因素,然而,这些因素仍然很难完全避免,地震、海啸、洪水、台风等自然灾害都会给核电厂的基础设施带来巨大的损害。其中地震会引起强烈的地面振动,造成建筑物的结构损伤、设备移位或连接松动,从而损坏反应堆的重要设备,如冷却系统、供电系统等,从而影响核电厂的正常运转;海啸会产生大浪,摧毁沿岸的核电厂,破坏周围的保护设施,引起重大的意外,如核泄露;洪水可能导致核电厂厂房被淹,地下的电缆和排水系统等设备受到破坏,从而影响到核电厂的安全、稳定运行;台风带来的强风、暴雨可能损坏核电站的厂房、设备,中断电力供应和通信系统^[3]。

2.4 外部攻击风险

随着信息通信技术的普及,核电厂遭受外来攻击的风险也越来越大,外在的攻击方式分为网络与实体两种。在网络攻击中,黑客可以侵入核电厂的数字化控制系统、监测系统及数据传输网络,窃取机密资料、篡改操作参数或使系统运行失效,从而导致核电厂运行不正常,甚至发生事故。比如黑客可以在系统中植入恶意程序,扰乱反应堆的电源,造成反应堆过载,进而危及核电厂的安全,核电站设计过程中需要确保数字化控制系统与外部互联网在物理隔离。

实体袭击包括恐怖分子的袭击、蓄意的破坏等等。恐怖主义者可能企图袭击核反应堆、核废料贮存区等重要设施,导致辐射材料泄露;不法人员还会破坏核电厂的安全设施,侵入核电厂内部进行破坏性活动,对核电厂的正常运行构成极大的威胁。

3 核电站运行风险动态评估方法

3.1 动态评估指标体系构建

核电厂安全生产过程中各种危险因子的综合评价是评

价核电厂安全运行的重要依据,主要包括通过设备、人员、环境和管理四个方面,选择核电厂运行风险的评价指标。设备尺寸包括设备失效率、设备性能参数偏差、设备剩余寿命等;人员因素包括作业人员资格合格率、作业失误率和培训考核结果等;环境因子包括自然灾害预警级别、周围环境辐射水平和气象条件;安全管理的维度主要是安全制度的完善程度、事故计划的执行效率和安全检查的实施。同时,针对不同机型(如CPR1000、华龙一号等)的特性及操作上的差别,需要开展研究对评估指标进行适当调整和细化,确保指标体系的科学性和适用性。在此基础上,结合核电厂运行经验与技术进步,对评价指标进行动态更新,以确保其能真实地反映核电厂的运行风险状况^[4]。

3.2 数据采集与处理

智能控制通过物联网、传感器等技术手段,全面、实时地获取核设施的运行数据,是进行风险评估的前提。将温度、压力、振动、放射性等不同类型的传感器配置到核设施的重点部位,实现对设备的运行参数和环境参数的实时监测。同时通过员工行为监控系统,对员工的工作行为和工作状态进行详细地记录,也能够运用气象监测设备和地质监测设备,收集有关自然灾害的资料,从核电厂信息文档系统中抽取管理资料,如安全管理制度的实施、应急预案演练等。

在实际应用中,经常会出现噪音、缺失和不一致等现象,因此必须对其进行预处理。通过数据净化,剔除噪音和离群点,采用数据内插、补全等算法对缺少的数据进行处理,通过数据规范化、规范化等手段,解决数据一致性问题,提升数据质量,为后续风险评估提供可靠数据支撑。

3.3 风险评估模型建立

基于数据驱动和模型驱动相结合的方法建立核电站运行风险评估模型,以机器学习、长短期记忆网络等深度学习算法为基础,构建基于机器学习的模型。利用已有的运行及风险事件作为训练样本,通过对模型进行训练,获取风险因子与风险水平间的映射关系。比如基于长短期记忆网络,通过对设备操作参数的时序分析,实现对设备失效风险水平的预测。

模式驱动模式以核电厂操作机理为基础,结合物理模式,对其进行风险评估,例如从反应堆物理方程和热工水力方程出发,建立反应堆安全运行的风险评估模型,对各种情况下的反应堆进行了危险概率分析。在此基础上,采用基于数据与模型驱动的方法,充分利用两种模式的优势,以提升风险评估的精度与可靠性。

3.4 动态评估机制

智能控制通过构建实时动态风险评估机制,对核电厂的运行风险进行连续监控与评价。在此基础上,结合核电厂的工作特性及资料收集频次,制定分钟级、小时级或天级的评价周期。在每一次评价期间,根据所收集的实际资料,将其导入风险评估模型中,并对该时间点的风险水平进行估

算。当监控系统中的重要指标有明显的改变或者有异常的时候,就会启动实时评价机制,对潜在的危险进行预警,由此结合历史评价结果与趋势分析,对区域气候变化趋势进行预测,为区域气候变暖风险的预防与控制提供科学依据,对核电厂的运行风险进行全程监测,为智能控制决策提供依据^[5]。

4 核电站智能控制决策体系构建

4.1 智能控制决策系统架构设计

智能控制决策系统由数据层、感知层、分析层、决策层、执行层组成,采用层次化的分布式结构。其中数据层主要用于对核电厂生产过程中所需的各种数据进行存储,包括实时采集的数据、历史数据以及气象、地质等外部数据。感知层是利用物联网技术、传感网络等技术,对核电厂的运行状况进行实时监测与监测。分析层利用大数据分析、人工智能等技术,对所收集的数据进行深入分析,包括风险评估、故障诊断和性能优化等。决策层将预先设定的决策准则与最优目标相结合,根据决策层次的判断,提出最优的控制决策方案。由此各层次通过高速可靠的通讯网络实现信息的交换与交互,保证了整个系统的协调工作。

4.2 智能决策方法应用

将各种智能化的决策方法运用到智能控制系统中,可以提高决策的科学性精确性,基于规则的决策方法依据核电厂的安全规范、运行经验以及专家的知识,建立起一整套的决策准则。在监控到某一具体状况后,根据预先设定的规则迅速作出决定,比如,如果一个反应堆的功率超出安全的临界值,可按照一定的规则在操纵员允许的情况下实现一键自动的降低功率运行。

模型决策法综合运用核电厂的物理、数学、模拟等多种模型,模拟、预测各种备选方案的影响,并从中选出最佳的方案。例如在进行设备失效处理时,通过仿真模型模拟不同维修策略下设备的恢复情况和对核电站运行的影响,从而确定最佳维修方案。在此基础上,将强化学习和遗传算法等多种智能算法引入到复杂的决策情境中,寻找最优的决策方案并且提升决策的智能程度。

4.3 应急响应与协同控制

建立完备的突发事件应急预案,可以对各类突发事件的处理程序及职责划分进行详细的阐述。在风险评价系统发现有重大危险或突发事件时,智能的控制决策系统会立刻启动紧急反应机制对有关人员进行预警。通过搭建突发事件应急指挥平台,将各方面的信息资源进行集成,从而能够迅速

地形成和实施突发事件的应急决策,提高核电站应对突发事件的能力。

4.4 人机交互与决策支持

智能控制通过设计一个友好、直观的人机对话接口,使操作者能够更好地与智能化的控制决策系统进行信息交流。该系统将核电厂的运行状况、风险评估结果和决策过程等信息直观地显示出来,将核电站设施的运行状况以3D模拟的形式展现出来,并通过图表和曲线将风险的变动趋势呈现出来。同时为作业人员提供智能化的决策支持,并可依据作业者的要求,提出相应的决策依据、历史案例及专家意见,协助作业者进行决策。比如,在作业人员面对复杂的装备失效决策时,该系统可以自动提取出同类失效案例,并将其处理流程及结果呈现给操作员。另外,支持操作人员对决策方案进行调整和优化,实现人机协同决策,提高决策的准确性和可靠性。

5 结语

综上所述,建立核电厂安全稳定运行的风险评价和智能调控决策系统,对保障核电厂的安全稳定运行具有重大意义。本文在深入剖析核电运行风险类型的基础上,建立一套科学、合理的核电运行风险评价指标体系,并将先进的数据收集处理技术与智能算法相结合,建立核电运行风险评价模型与动态评价机制。在此基础上,从系统结构、智能决策、应急响应和人机交互等角度,建立智能管控决策系统。但是,这一系统还存在着数字化控制系统的安全、生产数据在安全性与隐私保护、智能算法的解释性、系统的可靠性与稳定性等问题。未来,需要进一步加强相关技术研究,不断完善风险动态评估与智能控制决策体系,提高核电站运行的安全性和智能化水平,推动核电行业向更高质量、更可持续的方向发展。

参考文献

- [1] 王建召.核电厂运行风险管理分析[J].科技视界,2018,(04):176-177.
- [2] 葛腾飞.对核电站生产运行系统风险分析与决策方法的分析[J].科技资讯,2021,19(26):30-31+34.
- [3] 戈道川,王金凯,张冰,等.基于风险指引理论的核电站运行风险监测与预警系统平台[J].软件导刊,2022,21(10):48-52.
- [4] 葛腾飞.对核电站生产运行系统风险分析与决策方法的分析[J].科技资讯,2021,19(26):30-31+34.
- [5] 陆雪华.秦山核电站日常运行计划风险及优化[J].科技视界,2015,(20):242+313.