

概率安全分析技术在核电厂的应用

石炜

大亚湾核电运营管理有限责任公司

DOI:10.12238/pe.v3i2.12474

[摘要] 本论文是通过使用概率安全分析技术,将其部分研究成果和研究方法,应用在核电厂配置风险管理,建立一套适用于核电厂配置风险管理方法,包括风险识别、风险评价、风险管理和风险应对等环节,通过运用概率安全分析技术,对核电厂配置管理量化分析、优化核电厂配置风险管理、提高核电厂安全水平和整体绩效。

[关键词] 核电厂; 概率安全分析; 配置风险管理

中图分类号: TM623 **文献标识码:** A

Application of probabilistic safety analysis technology in nuclear power plants

Wei Shi

Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., LTD.

[Abstract] This paper is to establish a set of risk management methods suitable for nuclear power plant configuration by using probabilistic safety analysis technology, applying some of its research results and research methods to nuclear power plant configuration risk management, including risk identification, risk evaluation, risk management and risk response, through the use of probability safety analysis technology, the nuclear power plant configuration management quantitative analysis, optimization of nuclear power plant configuration risk management, improving the safety level and overall performance of nuclear power plants.

[Key words] Nuclear power plant probabilistic safety analysis, configuration risk management

引言

核安全是核能可持续发展的生命线。如何利用现有科学技术,及时有效的实时评价与管理运行核电站的风险,做到对核电站风险的全面“可知”、“可控”,是核安全领域的重大关键问题。基于实时风险监测的配置风险管理技术则是解决该问题的有效方法。

配置风险管理根据系统和部件的实际运行状况量化评价核电站的实时风险,可实现对核电站实施风险的监测与管理,用于核电站运行安全管理、试验维修计划制定、核电站配置状态控制等,是风险指引型综合决策技术的重要风险评价与管理工具,核电站配置风险管理与核电站实时风险监测是概率风险评价技术在核电站最成功的应用之一。

概率安全分析技术使用概率安全分析技术,通过理论分析和数据建模确定核电厂配置风险管理相关配套指标和文件体系。

1 国内外研究现状分析、课题的研究意义

1.1 背景

随着全球能源需求的增长,核能作为一种清洁、高效的能源形式,在各国能源战略中的地位日益凸显、为了实现碳达峰,碳

中和的目标,核电建设在我国也进入快车道。核电厂的安全问题一直是公众关注的重点。如何有效地管理核电厂的风险,确保其在各种情况下都能安全运行,是当前核电发展必须要面临的重要课题^[1]。

配置风险管理通常使用风险监测工具来开展,为了使风险评估的结果便于理解,使可接受的和不可接受的风险水平有清楚明确的定义,大多数核电厂都会在建立配置风险管理流程的同时,建立一套风险阈值和相应的风险管理矩阵来对不同的风险水平分类并进行分级管理^[2]。

概率安全分析技术(Probabilistic Safety Assessment, (简称PSA): 概率安全评价是一种对不希望事件进行评价的方法。这种评价分两个方面,即分析不希望事件的发生频率及不希望事件产生的后果。同时它是评价风险、认识风险、并帮助人们管理风险、降低风险的一项有效工具。

1.2 国内外研究现状

概率安全分析技术在国内外核电厂的应用。

1.2.1 国外研究现状

(1) 美国: 美国EPRI以及NEI等都针对核电站实时风险评价与风险管理开展了大量研究,出版了相关技术文件,开发了工具

软件。OECD以及IAEA也针对核电站的实时风险监测与评价中的实时风险模型转换、实时风险监测与管理功能需求、运行安全准则、风险管理限值等开展了广泛研究,出版相关技术文件。(2)英国:国际上,英国最早开展核电站实时概率安全分析和风险监测与评价研究,全球首款核电站风险监测软件ESSM于1988年首次在英国核电站投入使用。截止目前,全球能够进行风险监测模型分析的软件约有十多款,应用风险监测系统的核电站超过110个。但这些软件基本上都是离线系统,尚未实现与电站数据的在线实时传输。

1.2.2国内研究现状

中国国家核安全监管部一直鼓励和推动PSA在核电站的应用,以识别核电站薄弱环节、优化设计及提高运行核电站安全性,2010年国家核安全局制定并发布了《概率安全分析技术在核安全领域中的应用》技术政策,技术文件《风险监测器在核电站的应用》,鼓励核电站使用风险监测器进行日常风险评价和管理,以及维修计划的制订和优化等工作。

1.2.3概率安全分析技术在国内外核电厂配置风险管理的研究

目前国内部分在运核电厂逐步在使用概率安全分析技术,应用到核电厂配置风险管理。相继开展核电站实时风险监测、评价的理论与方法研究;部分运行核电站开发风险监测器,尝试开展核电站实时风险监测、风险指标管理与控制、维修计划排程以及日常维修活动的风险评价等。

美国核安全法规10 CFR 50.65《核电厂维修有效性监测要求》中要求,在维修活动实施之前(包括但不限于监测、维修后试验、纠正性和预防性维修),营运单位应该对维修活动可能引起的风险增量进行评估和管理。

2 核电厂PSA模型原理图

PSA是二十世纪七十年代以后发展起来的一种系统工程方法。核电厂概率论分析所研究的是某一事件发生的原因是什么、有什么可能的后果和发生的可能性有多大,它采用系统可靠性(即故障树、事件树分析)和概率风险分析方法,对复杂系统的各种可能事故的发生和发展过程进行分析^[3]。

风险=概率(频率)×后果。

PSA分析首先要找出可能导致事故的各种事件组合,然后估计每一组合的发生频率,最后再确定其后果,事件树和故障树相结合的方法是PSA最基本的方法^[4]。

2.1概念

概率安全分析模型使用一系列风险指标来评估核电厂的风险,包括事故发生的概率、事故的严重程度、事故发生的可能性与严重程度的比值(也称为“失效频率-失效影响”图谱)等。这些指标能够全面地反映出核电厂的风险状况。

2.1.1故障树分析(FTA)

将事故原因分解为一系列相互关联的因素,形成故障树,从而找出导致事故的根本原因。事件用于描述故障后果、故障原因,故障后果包括最终后果(顶事件)和中间后果(中间事件),故

障原因包括基本原因(基本事件)和待发展原因(待发展事件)。

2.1.2事件分析法

由始发事件出发,按照各安全功能的成功或失败形成若干事件序列的两岔逻辑树,了解核电厂为缓解始发事件后果所必需的安全功能,确定那些实现或影响安全功能的缓解系统和人员。

2.2概率安全分析模型同国内A核电厂配置风险管理的关系
活态概率安全分析(Living PSA):在核电厂运行期间,以充分反映核电厂即时风险实际情况。

配置风险管理是利用活态概率安全分析模型(活态PSA模型),应用概率安全分析方法,考虑核电厂设计和运行的变更、新的技术信息、更加精确的方法和工具及从核电厂运行中得到的新信息等,及时更新概率安全分析模型和数据,根据核电厂实际运行配置计算风险指标,开展核电厂风险管理的一种方法^[5]。

2.3核电厂概率安全分析模型说明:

2.3.1确定风险阈值

根据《核电厂配置风险管理的技术政策(试行)》中《风险阈值的确定方法》,对于计划事件,累积风险对应的风险管理区下限值和上限值用所评价模型范围在全范围模型中风险占比求得;瞬时风险对应的风险管理区下限值取2倍基准风险,上限值由风险占比求得。

2.3.2随机事件的风险阈值

对于随机事件,瞬时风险对应的风险管理区下限值取2倍基准风险,上限值取由风险占比求的;允许配置时间计算阈值由风险占比求的。

2.3.3建立风险管理矩阵

在电厂已有风险管控措施的基础上,风险管理矩阵主要从风险监测器可提供的风险见解制定管控措施。

对于计划事件,风险评价是在计划工作开展前进行,用来识别计划工作执行期间的风险等级,并根据风险等级确定计划工作的可执行性及对应的风险管控措施。处于风险可接受区,电厂无额外风险管控措施,执行已有工作风险控制即可。

处于风险管控区,调整计划排程,降低计划作业风险;若计划排程无法调整,则电厂在已有工作风险控制的基础上,应避免在该作业窗口期安排与“重要功能”有关的工作;处于风险不可接受区域,禁止安排计划工作。

对于随机事件,风险评价是在事件出现后进行,用来识别随机事件出现时及处理期间的风险等级,并根据风险等级确定机组采取的应对措施。

处于风险可接受区,电厂无额外风险管控措施,尽快组织资源进行维修即可;处于风险管控区,应在允许配置时间内尽快完成维修工作,同时在维修期间应避免安排与“重要功能”有关的工作;处于风险不可接受区域,若机组处于功率运行工况应立即停堆后撤。

2.4核电厂配置风险管理可行性研究

配置风险管理大纲提供了一种程序化的风险指引型评价方

法,用于管理构筑物、系统或设备不可用或参数不在限值内时的风险。配置风险管理包括以下内容:

(1)风险阈值的规定;(2)风险管理矩阵的规定;(3)配置风险管理的实施(包括运行配置风险管理、维修配置风险管理和风险管理措施等)。

2.5配置风险管理的风险管理矩阵

同时技术政策中说明“如果核电厂发生突发运行异常,瞬时风险进入黄区,而相应维修活动的累积风险增量仍处于绿区,核电厂可以进行正常工作控制”。结合上述要求以及A核电厂(DYW核电厂)多专业反馈,最终制定试运行期间的风险管理矩阵。

2.6配置风险管理监测工具

2.6.1计算引擎选型

国内外成熟的风险监测工具的核心计算引擎分为重解法和最小割集法。结合设备不可用数据实时风险评价、计划排程多组态风险评价等应用需求,风险监测工具的核心计算引擎将采用最小割集法。该算法可支持500万割集的快速、准确定量计算,单个组态的计算可在10秒内完成,将极大提升使用人员的操作体验。同时,该算法可提供全面的风险信息结果^[6]。

2.6.2计划排程评价方案

本项目中采用风险监测工具与电厂计划排程软件一体化的方式实现计划排程风险评价。该方案中,计划工程师将在计划排程软件内直接启动风险评价,调用风险监测工具核心计算引擎,并将计算结果直接在计划排程软件中进行展示。同时,在计划排程软件内可快速识别/查看中、高风险组态对应的计划作业,并对需要调整的排程提供明确的方案。

2.6.3不可用数据评价方案

机组设备不可用数据实时传送至风险监测工具,风险监测工具将实时获取机组设备不可用数据信息(包含未产生设备不可用数据但可通过PSA模型评价的不可用设备信息)并在核安全监管平台实时显示风险评价结果,实现电厂风险的即时评价。同时,该环节核安全监管平台中新设中、高风险警示功能,若机组出现中、高风险组态,软件将第一时间提醒相关人员,并提供风险见解,以便电厂进行风险管控。

2.6.4风险监测工具

运行配置风险评价:主要是在日常和大修期间机组出现运行异常事件时采用风险监测工具进行配置风险评价。评价范围为既属于运行配置风险管理的系统又属于维修风险管理确定的风险重要的构筑物、系统和设备。

维修配置风险评价:维修配置风险主要是在日常和大修期间对机组计划排程采用“一体化方式”进行配置风险管理。根据技术方案,计划工程师可直接在计划排程软件中启动风险评价,并将风险评价结果同生效排程计划一并输出。

2.7建立核电厂配置管理实时风险监测系统

实时风险监测系统根据系统和部件的实际运行状况量化评价核电站的实时风险,可实现对核电站实时风险的监测与管理,用于核电站运行安全管理、试验维修计划制定、核电站配置状态控制等。

实时风险监测系统分为运行配置风险监测器和维修(计划)配置风险监测器。

2.7.1运行配置风险监测器

运行配置风险监测器除满足基本功能(输入:工况切换、定期切换、不可用输入;输出:当前配置、风险水平、风险视图、ACT、风险建议信息等)外,与电厂主控日志平台对接,实现了电厂不可用设备信息数据与风险监测器的对接:并实现不可用与PSA信息的自动匹配和风险计算。

2.7.2维修(计划)配置风险监测器

结合核电厂目前实际情况,已将维修(计划)配置风险管理风险监测器集成在计划排程软件(powerplan)中,使得风险评价的操作风格与计划排程软件操作风格保持一致。同时,风险评价整个操作过程包括风险评价设备填充、启动风险评价、风险显示、风险结果输出等均在计划排程软件完成。

3 结语

配置风险管理是以概率安全分析模型为基础的定量风险评价方式,可在保证核电站设计安全水平的前提下合理优化设计,挖掘在役核电站运行潜力,降低核电站运行维护成本,为运行管理等决策提供技术支持。

[参考文献]

[1]冯丙辰,王晗丁,杨志超,等.基于概率安全分析技术的CPR1000核电厂台风情况下运行控制策略研究[J].核科学与工程,2023,03(11):0258-0918.

[2]刘维理,贾龙飞.基于概率安全评价重要度分析的提升核电厂设计阶段经济性研究[J].核科学与工程,2021,41(5):1004-1007.

[3]冯云馨,赵玲.概率安全分析技术在核电厂设计和运行期间的技术特征及应用[D].核安全,2023.02.

[4]邓纯锐,张明.概率安全分析技术在核电厂安全设计中的应用研究[D].核安全,2020.02.

[5]李若鲲,蔡国杰,朱钢梁.核电厂概率安全分析技术方法及应用[J].科技世界,2016(11):2095-2457.

[6]成杰.多时空尺度核反应堆风险监测方法与关键技术研究[D].中国科学技术大学,2023.

作者简介:

石炜(1976—),男,汉族,甘肃兰州人,高级工程师,本科,研究方向:概率安全分析。