

Optimization and Simulation of Nuclear Power Plant Core Reactivity Control under Load Tracking Condition

Jing Liu Xing Chen Peng Xiao Tao Gao

CGN Lufeng Nuclear Power Co., Ltd., Lufeng, Guangdong, 516500, China

Abstract

With the increasing integration of renewable energy into power grids, the demand for load regulation capabilities in nuclear power plants has grown significantly. Load tracking has become a critical operational scenario for these facilities. As the core mechanism ensuring safe and economical plant operation, reactor core reactivity control faces multiple challenges during frequent load fluctuations. This paper first analyzes the key influencing factors of reactor core reactivity control under load tracking conditions, then proposes optimization strategies. Additionally, it provides specific recommendations for constructing simulation models, validating processes, and applying results, aiming to help nuclear power plants better adapt to grid load variations.

Keywords

load tracking condition; nuclear power plant; reactor core reactivity control; optimization strategy; simulation verification

负荷跟踪工况下核电站堆芯反应性控制的优化与仿真分析

刘静 陈兴 肖鹏 高涛

中广核陆丰核电有限公司, 中国·广东 陆丰 516500

摘要

随着新能源并网比例提升, 电网对于核电站负荷调节能力的需求也在日益增加, 负荷跟踪工况成为了核电站运行的重要场景。其中堆芯反应性控制作为保障核电站安全、经济运行的核心环节, 在负荷频繁变化过程中面临着诸多的挑战。本文先分析了负荷跟踪工况下堆芯反应性控制的核心影响因素, 随后提出了堆芯反应性控制的优化策略, 还给出了仿真模型构建、验证流程及结果应用的具体建议, 希望能够助力核电站更好地适应电网的负荷波动。

关键词

负荷跟踪工况; 核电站; 堆芯反应性控制; 优化策略; 仿真验证

1 引言

在“双碳”目标的推动之下, 风电、光伏等新能源的发电规模在持续地扩大, 但此类能源具有间歇性、波动性特点, 使得电网的负荷波动幅度增大、频率加快。实践中当中, 作为电网中重要的基荷电源, 核电站需逐步具备负荷跟踪能力, 要能够通过调整输出功率以平抑电网的负荷波动, 以此维持电网的稳定运行。堆芯反应性则是决定核电站堆芯功率水平的关键参数, 其控制效果直接影响着堆芯的安全性、经济性及设备使用寿命。基于负荷跟踪的工况来说, 堆芯功率需根据电网的需求进行频繁地调整, 这使得堆芯反应性处于动态变化的状态, 传统的反应性控制方式已然难以满足复杂工况下的控制要求, 容易出现反应性控制滞后、燃料消耗不均、设备损耗加剧等问题。本文旨在通过系统地分析影响因

素、提出优化策略及仿真验证建议, 为核电站在负荷跟踪工况下实现高效、安全的堆芯反应性控制提供解决方案。

2 负荷跟踪工况下堆芯反应性控制的核心影响因素

2.1 堆芯内部动态因素

堆芯内部动态因素是影响反应性控制的基础因素, 在负荷跟踪的工况之下, 堆芯内部物理与热工过程的动态变化更为显著, 且会直接作用于反应性水平。其中燃料消耗与燃料分布的变化对于反应性的影响最为突出。因为负荷跟踪的过程中, 堆芯功率的频繁调整会改变燃料的燃耗速率, 高功率运行时段燃料消耗得到加快, 低功率时段的消耗减缓, 进而导致堆芯内的燃耗分布不均。此时燃耗较深区域的燃料反应性下降明显, 但燃耗较浅区域反应性相对比较高, 这种不均匀性会使堆芯反应性的分布产生一定的偏差, 进而增加反应性控制的难度。同时堆芯温度场的动态变化对于反应性也具有显著的影响, 即堆芯功率调整时, 燃料元件温度、冷

【作者简介】刘静(1986-), 男, 中国湖北仙桃人, 本科, 工程师, 从事核电运行研究。

却剂温度均会随之发生变化,根据 reactivity 温度系数特性可知,温度升高会导致反应性下降,温度降低将会使反应性上升。实际在负荷提升的过程中,堆芯温度逐渐升高时反应性会随之降低,就需要及时地补充反应性以维持功率提升的需求,若负荷降低时温度下降将使反应性上升,那么要采取措施来抑制反应性增长,以避免堆芯功率的异常波动。

2.2 外部电网负荷因素

外部电网负荷因素的波动特性决定着堆芯负荷跟踪的频率与幅度,随着影响着反应性控制策略的制定与实施。结合实际情况来看,电网负荷波动的频率与幅度对于反应性的控制节奏影响非常显著。若电网负荷的波动频繁且幅度较大,堆芯就需快速地调整功率以响应需求,便要求反应性控制系统具备较高的响应速度,应该能够在短时间内完成反应性的补充或抑制。如果负荷波动平缓且幅度较小,反应性调整的频率就较低,控制节奏就相对平缓,可是仍然需保持对于负荷变化的敏感性,目的是避免控制滞后。另外电网负荷预测的准确性也会影响反应性控制的前瞻性。在负荷预测准确时,核电站可提前制定出反应性控制计划,通过提前调整控制手段,来实现反应性的平稳过渡,达到减少控制过程波动情况的效果^[1]。

2.3 系统协同因素

系统协同因素在实践中是保障堆芯反应性控制效果的关键支撑,因为堆芯的反应性控制并非孤立的过程,而是要与核电站多个系统进行协同工作,所以各个系统的协同能力会直接影响到反应性控制的稳定性与可靠性。在众多影响因素之中,反应性控制系统与功率控制系统的协同是至关重要的。一般功率控制系统需要根据电网负荷需求确定堆芯的目标功率,反应性控制系统则通过调整控制手段实现了反应性的变化,进而达到目标功率。一旦两者协同不畅,就可能出现功率控制系统发出功率调整指令后,反应性控制系统无法及时地响应,从而导致功率调整滞后,又或者是反应性的调整幅度与功率需求不匹配,最终造成功率超调或欠调。

3 负荷跟踪工况下堆芯反应性控制的优化

3.1 多手段协同控制

单一的反应性控制手段在负荷跟踪工况之下难以满足复杂的控制需求,因此需采用多手段协同的控制方式,经由整合不同控制手段的优势,来实现反应性的精准、平稳控制。目前核电站常用的反应性控制手段包括了控制棒、硼酸溶液及可燃毒物,上述各手段均具有不同的特点:控制棒的响应速度快,其可实现反应性的快速调整,但控制的范围有限,且频繁移动容易造成磨损;硼酸溶液得以实现大范围、平稳的反应性调整,更为适合长期维持反应性水平,可是调整的速度较慢;可燃毒物则主要用于补偿堆芯初始剩余反应性,此举能够减少其他控制手段的负担^[2]。

3.2 预测性控制

首先要加强电网的负荷预测能力,要求相关人员结合历史负荷数据、新能源发电预测信息、气象数据等多源信息,再结合机器学习、时间序列分析等方法,构建起高精度的负荷预测模型,从而实现对未来一段时间内电网负荷变化趋势的准确预测,为堆芯反应性控制提供提前量。基于负荷的预测结果,能够确定堆芯未来的功率变化轨迹,随之推算出所需的反应性变化曲线,然后提前制定出反应性控制计划。其次是开展堆芯的内部动态参数预测,该环节可利用堆芯物理与热工分析模型,再根据当前堆芯的状态参数,预测出在未来功率变化过程中堆芯内部参数的动态变化,接着根据预测的结果来调整反应性控制策略,即可避免因堆芯内部参数异常变化导致的控制风险。最后是建立预测性控制的反馈机制,经由实时的对比预测结果与实际运行数据,分析出预测出现偏差的原因,以此为基础不断地优化预测模型与控制策略,促使预测的准确性与控制效果得到提升,使反应性控制始终能够处于主动状态,更好地适应负荷跟踪工况的变化。

3.3 系统协同优化

为了提升堆芯反应性控制的整体效果,一定要关注系统的协同优化,而该部分需要打破各系统之间的信息壁垒,建立起高效的协同机制,才能实现反应性控制系统与其他相关系统的深度融合。第一步是构建统一的信息共享平台,在其中整合反应性控制系统、功率控制系统、冷却剂系统、燃料管理系统等多个系统的运行数据,以实现各系统数据的实时交互与共享,确保能够为系统的协同决策提供数据支撑。基于上述信息共享平台,再建立系统协同控制的决策模型,便能根据电网的负荷需求与堆芯运行状态,综合地考虑到各系统的约束条件与运行目标,制定出全局最优的控制方案,有效地避免了单一系统优化导致的整体效率下降。在此基础上,还要优化系统之间的控制逻辑与通信机制,只有明确了各系统在协同控制中的职责与接口,才能够减少系统之间的通信延迟与指令冲突。

3.4 设备与燃料寿命协同

在负荷跟踪地的工况之下,反应性控制过程中设备的频繁操作与燃料的动态消耗会对设备寿命与燃料经济性产生一定的影响,那么就需将设备与燃料寿命协同纳入反应性控制优化的范畴之中,进而在满足反应性控制需求的同时,最大限度的延长设备的使用寿命、提高燃料利用效率。具体来说,要针对设备寿命协同建设设备损耗模型,旨在分析反应性控制手段操作(如控制棒移动、硼酸溶液调整)对设备的损耗规律。基于损耗模型,便能在制定反应性控制策略时,合理地规划控制手段的操作频率与幅度,有利于减少不必要的设备操作。例如在负荷波动较小时,可以优先采用硼酸溶液进行小幅度的调整,进而避免控制棒的频繁移动;在设备接近损耗阈值时,则可以调整控制策略,以此降低该设备的

使用频率,延长其剩余寿命。

4 负荷跟踪工况下堆芯反应性控制的仿真验证建议

4.1 仿真模型构建

仿真模型的构建核心是准确地反映出负荷跟踪工况下堆芯物理、热工及系统协同过程的多维度、高精度模型。该模型需涵盖中子动力学、燃料燃耗、反应性系数等核心物理过程,以确保可准确地计算出不同功率水平、不同控制手段作用下堆芯的反应性变化。实际在模型构建中,需采用合理的网格划分方式,并引入先进的核数据库。基于此,再构建堆芯热工水力模型,构建时需考虑到冷却剂的流动阻力、相变等复杂现象,再结合堆芯物理模型的功率输出数据,以确保能够实现物理过程与热工过程的耦合计算,真实地反映出堆芯功率、反应性与热工参数之间的相互作用。

4.2 仿真验证流程

只有科学合理的仿真验证流程,才可以确保仿真结果有效性与可靠性的关键,一般流程要按照“场景设计—模型运行—结果分析—模型优化”的逻辑开展仿真验证工作。第一步是进行仿真场景设计,要结合电网负荷特性与核电站实际运行需求,设计多种典型的负荷跟踪场景,当中包括负荷快速波动场景、负荷平缓变化场景、负荷大幅调整场景等,务必覆盖不同的负荷变化频率、幅度与持续时间。而在场景地设计中,一定要明确各场景下的电网负荷目标曲线、堆芯初始运行状态(如初始功率、燃料燃耗、反应性水平等)以及控制约束条件(如设备操作极限、热工参数安全阈值等),以确保其能够为仿真运行提供明确的输入条件。第二步是开展仿真模型运行,即将设计好的场景参数输入至仿真模型中,启动模型运行的同时实时地记录堆芯反应性、功率、温度场、冷却剂参数以及各控制手段的操作过程等关键数据。实际在模型运行的过程中,需监控模型的稳定性,要避免出现计算发散、参数异常等问题。第三步是仿真结果分析,相关人员应该从安全性、经济性、控制效果三个维度对结果进行评估,其中安全性方面重点检查堆芯热工参数(如燃料元件温度、冷却剂压力)是否在安全范围内,旨在明确反应性的控制过程中是否存在功率超调、反应性突升突降等风险;经济性方面需要分析燃料消耗速率、设备操作频率等指标,目的是评估控制策略对于燃料经济性与设备寿命的影响;控制效果方面则经由对比堆芯实际功率输出与电网负荷目标曲线的偏差,来评估反应性控制的响应速度与精度。

第四步便是根据结果的分析情况进行模型优化,若仿真结果与预期目标存在着偏差,或者是模型存在部分不足,就需调整模型参数、优化控制逻辑或改进场景设计,然后重新开展仿真验证,直至模型能够准确地模拟实际运行过程。

4.3 仿真结果应用

仿真结果能否得到有效地应用是实现堆芯反应性控制优化闭环的关键,就是要将仿真验证过程中获取的信息转化为实际的控制策略改进措施与运行指导方案,才能推动核电站堆芯反应性控制水平的提升。即将仿真结果用于优化反应性控制策略,再通过对不同控制策略在各仿真场景下的表现,分析出各策略的优势与不足,再根据仿真结果确定出各控制手段的最优操作参数,目的是为实际运行中的控制操作提供量化依据,最大程度避免因操作参数不合理导致的控制效果不佳。同时还应该将仿真结果用于指导实际运行操作与人员培训。对此,需要基于不同负荷跟踪场景的仿真数据,梳理出各场景下的最优操作流程,并制定针对性的运行操作手册,在手册中明确在负荷快速提升、缓慢调整、大幅下降等不同工况下,反应性控制手段的操作顺序、调整幅度及时机,为进而现场操作人员提供标准化的指导,减少了人为的操作误差^[9]。

5 结语

核电站这一电网核心基荷电源的负荷跟踪能力,在新能源大规模并网与新型电力系统加速构建的背景下,已经成为了平抑新能源波动、保障电网稳定的关键支撑,而堆芯反应性控制的有效性直接决定了负荷跟踪工况下核电站的安全运行与经济收益。在本文当中,经过梳理负荷跟踪工况下堆芯反应性控制的核心影响因素,揭示了堆芯内部动态变化(燃料燃耗、温度场、冷却剂参数)的基础性作用、外部电网负荷特性(波动频率、预测精度、响应要求)的驱动性影响,以及多系统协同(反应性控制、功率控制、冷却剂系统等)的支撑性价值,有效地为控制策略的优化提供了清晰的问题导向。

参考文献

- [1] 丁明.秦山核电参与电网负荷调节的现状与思考[J].科技视界,2020,(08):248-249.
- [2] 方惠捷.核电站负荷跟踪预测控制及其攻击检测研究[D].上海大学,2024.
- [3] 徐志辉,刘鹏,贾明,等.基于国际项目实践的核电站人因安全分析方法研究[J].核科学与工程,2023,43(05):996-1003.