

核电机组负荷跟踪运行优化策略研究

冉松林

中广核苍南核电有限公司 浙江 温州 325000

摘要：本文针对核电机组负荷跟踪运行展开研究，阐述其运行特性、概念要求及影响因素，分析全球及我国运行现状。提出以安全为前提，通过技术创新、管理优化等提升负荷跟踪能力的优化策略，涵盖负荷预测调度、功率调节技术、智能控制应用及设备维护检修等方面。结合实际案例表明，优化策略显著提高机组负荷跟踪精度与速度，降低成本，保障安全，对核电机组适应电力系统发展意义重大。

关键词：核电机组；负荷跟踪；优化策略

1 核电机组负荷跟踪运行理论基础

1.1 核电机组运行特性概述

核电机组作为特殊电力生产装置，运行特性与常规火电机组差异显著，深刻影响其运行与管理。其能量源于核反应堆内复杂且具强放射性的核裂变反应，运行必须严格遵循核安全法规标准，精确监测控制核燃料消耗、反应性变化及堆芯物理特性演变，以保障人员与环境安全。在功率调节方面，核电机组调节缓慢。核反应堆反应性变化到功率输出体现存在延迟，且因核燃料特殊性，调节需极为谨慎，以防功率突变引发安全问题。同时，其启动和停堆过程漫长，启动时要逐步提升功率并建立各系统稳定状态，停堆也需逐步降功率并做好冷却监测，与常规火电机组快速启停形成鲜明对比^[1]。核电机组对运行稳定性要求极高。由于反应堆物理化学过程复杂，微小扰动都可能引发连锁反应，威胁安全，因此通常在相对稳定功率水平下运行，以维持堆芯平衡，降低风险。

1.2 负荷跟踪运行的概念与要求

负荷跟踪运行是核电机组依据电力系统负荷动态变化，调整发电功率以实现供需平衡的运行方式。现代电力系统中，用电需求昼夜波动大，核电机组要融入其中，必须具备负荷跟踪能力。核电机组负荷跟踪运行需满足多方面严格要求。安全性是首要考量，任何功率调整都要确保反应堆安全稳定，防止堆芯熔毁、放射性物质泄漏等事故。运行中需实时精确监测反应性、冷却剂温度和压力等关键参数，异常时迅速处置。经济性方面，鉴于核电机组运行成本高，涵盖核燃料、设备维护、安全保障等费用，需通过优化功率调节策略，降低能耗，提高核燃料利用率，减少设备损耗，实现经济效益最大化。灵活性要求机组能快速、准确响应负荷变化，在保障安全与经济的前提下，缩短功率调节时间，

提升电力供应的及时性与可靠性，这对控制系统、调节设备及运行人员操作水平都提出了更高标准。

1.3 负荷跟踪运行的影响因素分析

核电机组负荷跟踪运行受多种因素共同作用，这些因素相互关联，决定运行的可行性与效果。核反应堆自身特性是关键影响因素。不同类型反应堆，如压水堆、沸水堆等，反应性控制、功率调节范围和速度各异。压水堆常用控制棒和化学补偿调节，功率调节较慢；新型反应堆通过优化策略和设备提升了灵活性。同时，堆芯结构、核燃料特性及燃耗深度，也会改变反应性规律，影响功率调节难度。设备系统性能至关重要，功率调节系统精度与响应速度，直接影响机组功率调整的准确性与及时性；冷却剂系统的冷却能力和稳定性，关乎反应堆在功率变化时的安全温度与压力；蒸汽系统的蒸汽产生和输送效率，则决定机组功率输出。设备故障或性能不佳，将严重制约负荷跟踪能力，甚至引发安全隐患。外部电网因素同样不容忽视，电网负荷波动频繁、幅度过大，会考验机组运行稳定性与设备寿命；电网频率和电压稳定性影响机组功率调节，超出范围可能导致无法跟踪负荷甚至停机。另外，核电机组与其他电源的协调配合程度，也关系到电力系统整体稳定与经济运行，合理调度有助于提升负荷跟踪效果。

2 核电机组负荷跟踪运行现状分析

目前，全球范围内核电机组的负荷跟踪运行水平存在较大差异。在一些发达国家，如法国、美国等，由于拥有较为先进的核电技术和丰富的运行经验，部分核电机组已经具备了一定的负荷跟踪能力。法国的许多压水堆核电机组通过采用先进的功率调节技术和优化的运行策略，能够较好地适应电力系统负荷的变化，在满足国内电力需求的同时，还实现了电力的对外输出。美国的部分核电机组也在不断探索负荷跟踪运行的优化方法，

通过改进控制系统和设备，提高了机组的灵活性。然而，总体而言，核电机组的负荷跟踪运行仍面临诸多挑战^[2]。一方面，核电机组的传统设计理念主要侧重于稳定基荷运行，以确保反应堆的安全和长期稳定发电，这使得现有核电机组在结构和控制系统上对负荷跟踪运行的适应性不足。许多核电机组的功率调节系统响应速度较慢，难以快速满足电力系统负荷快速变化的需求。另一方面，核安全法规和监管要求对核电机组的负荷跟踪运行形成了一定限制。为确保核反应堆的安全，监管部门对核电机组的功率变化速率、参数波动范围等制定了严格的规定，这在一定程度上制约了核电机组负荷跟踪能力的充分发挥。公众对核电安全的高度关注也使得核电机组在进行负荷跟踪运行调整时更加谨慎，进一步影响了负荷跟踪的效率和效果。在我国，随着核电产业的快速发展，对核电机组负荷跟踪运行的研究和实践也在逐步推进。但与国际先进水平相比，仍存在一定差距。部分核电机组在负荷跟踪运行过程中，还存在功率调节精度不高、设备可靠性有待提高、运行成本较高等问题，需要进一步加强技术研发和管理创新，提升核电机组的负荷跟踪运行水平。

3 核电机组负荷跟踪运行优化策略研究

3.1 优化策略的总体思路与目标

核电机组负荷跟踪运行优化策略的总体思路是在确保核反应堆安全稳定运行的前提下，通过技术创新、管理优化和系统协调，提高核电机组的功率调节能力和灵活性，降低运行成本，实现与电力系统负荷需求的更好匹配。具体目标包括：首先，提高核电机组的负荷跟踪精度和速度，使其能够更快速、准确地响应电力系统负荷的变化，减少功率调节过程中的偏差和延迟。其次，降低负荷跟踪运行过程中的能耗和设备损耗，通过优化功率调节策略和设备运行参数，提高核燃料的利用率，延长设备的使用寿命，降低运行成本。再次，增强核电机组与电力系统的协调性，通过与其他电源的合理配合和优化调度，提高整个电力系统的稳定性和经济性。最后，满足核安全法规和监管要求，在负荷跟踪运行过程中，确保核反应堆的各项安全指标始终处于可控范围内，保障人员和环境的安全。

3.2 负荷预测与调度优化策略

准确的负荷预测是实现核电机组负荷跟踪优化运行的前提。通过建立先进的负荷预测模型，综合考虑历史负荷数据、气象条件、经济发展趋势、节假日等多种因素，提高负荷预测的准确性和可靠性。可以采用时间序列分析、神经网络、机器学习等方法，对电力系统的负

荷进行短期和中长期预测，为核电机组的功率调节提供科学依据。在调度优化方面，建立核电机组与其他电源的协同调度机制。根据负荷预测结果，合理安排核电机组、火电机组、水电机组、风电机组、光伏机组等各类电源的发电计划，实现电力资源的优化配置。在用电高峰时段，充分发挥核电机组的稳定发电能力，同时合理调度其他灵活电源，满足负荷需求；在用电低谷时段，适当降低核电机组功率，减少不必要的能耗，同时利用其他电源的调节能力，维持电力系统的稳定运行，还可以通过参与电力市场交易，根据市场价格信号调整核电机组的发电计划，提高经济效益。

3.3 反应堆功率调节与负荷跟踪技术

针对核反应堆功率调节相对缓慢的问题，研发新型的反应堆功率调节技术至关重要。一方面，可以改进控制棒的设计和驱动系统，提高控制棒的插入和提出速度，从而加快反应性的调节速度，实现功率的快速调整。另一方面，优化化学补偿控制策略，通过精确控制冷却剂中化学毒物的浓度，更有效地调节反应性，减少功率调节过程中的延迟^[3]。另外，还可以探索采用先进的负荷跟踪技术，如基于模型预测控制的功率调节方法。该方法通过建立核反应堆的动态模型，预测未来一段时间内的功率变化趋势，提前制定功率调节策略，提高功率调节的准确性和及时性。同时结合先进的传感器技术和数据采集系统，实时获取反应堆的关键参数，为功率调节提供更准确的信息支持。

3.4 智能控制系统在负荷跟踪中的应用

随着人工智能、大数据、物联网等新兴技术的蓬勃发展，智能控制系统为核电机组负荷跟踪运行开辟了全新路径，带来了前所未有的机遇。基于人工智能算法，构建智能化的核电机组控制系统，能够深度挖掘和分析海量的运行数据。通过对历史运行数据、设备参数变化、环境因素等多维数据的处理，系统可以实现对核电机组运行状态的全方位实时监测和智能诊断。在功率调节策略生成方面，智能控制系统展现出强大优势。它能够根据准确的负荷预测结果以及实时采集的机组运行数据，通过复杂的优化算法自动生成最优的功率调节策略。以机器学习算法为例，系统可以不断学习历史运行工况下的最优调节方案，持续优化调节策略，逐步提高负荷跟踪的精度和效率，使核电机组能够更精准地匹配电力系统负荷变化。智能控制系统具备良好的交互协同能力，通过与电力系统调度中心建立高速、稳定的实时通信网络，实现信息的无缝共享和交互。调度中心能够及时向核电机组发送负荷需求指令，核电机组也可反馈

自身运行状态和调节能力，双方协同配合，使核电机组更好地适应电力系统整体的运行调度要求，保障电力系统的稳定、高效运行。

3.5 设备维护与检修策略优化

优化设备维护与检修策略是保障核电机组负荷跟踪运行的重要环节。传统的定期维护和检修模式存在一定的局限性，可能导致设备过度维护或维护不足。采用基于状态监测的预防性维护策略，通过安装各类传感器，实时监测设备的运行状态，如振动、温度、压力、磨损等参数，根据设备的实际状态制定个性化的维护和检修计划，避免不必要的停机和维修，提高设备的可用率。同时，加强设备的可靠性管理，建立设备可靠性数据库，对设备的故障数据进行分析和统计，找出设备的薄弱环节，进行针对性的改进和优化。还可以引入先进的维修技术和工具，提高维修效率和质量，缩短设备的维修时间，确保核电机组在负荷跟踪运行过程中始终保持良好的设备状态。

4 核电机组负荷跟踪运行优化策略实施案例与效果评估

4.1 优化策略实施案例

以某核电站的一台压水堆核电机组为例，该机组在实施负荷跟踪运行优化策略前，存在功率调节速度慢、负荷跟踪精度低、运行成本较高等问题。为解决这些问题，该核电站实施了一系列优化策略。在负荷预测与调度方面，引入了先进的机器学习负荷预测模型，结合气象数据、节假日安排等因素，对电力系统负荷进行精确预测。同时，与电网调度中心建立了紧密的协同调度机制，根据负荷预测结果，合理安排机组的发电计划，实现与其他电源的优化配合。在反应堆功率调节与负荷跟踪技术上，对控制棒驱动系统进行升级改造，提高控制棒的响应速度；优化化学补偿控制策略，增强反应性调节能力。另外，采用基于模型预测控制的功率调节方法，显著提高功率调节的准确性和及时性。在智能控制系统应用方面，构建智能化的核电机组控制系统，实现对机组运行状态的实时监测和故障诊断，同时通过机器学习算法自动生成最优的功率调节策略，实现自适应控制。在设备维护与检修方面，实施基于状态监测的预防

性维护策略，安装大量传感器对设备进行实时监测，根据设备状态制定维护计划，减少不必要的停机时间，提高了设备的可靠性。

4.2 效果评估与分析

经过一段时间的运行实践，该核电机组的负荷跟踪运行优化策略取得了显著效果。在负荷跟踪能力方面，功率调节速度提高了30%，负荷跟踪精度提升25%，能够更快速、准确地响应电力系统负荷的变化，有效减少功率调节过程中的偏差和延迟^[4]。在经济性方面，通过优化功率调节策略和设备运行参数，核燃料的利用率提高了15%，设备维护成本降低了20%，运行成本显著下降。通过参与电力市场交易，根据市场价格信号调整发电计划，提高了经济效益。在安全性方面，智能化的控制系统实现对机组运行状态的实时监测和故障诊断，提前发现并处理多起潜在的安全隐患，确保核反应堆的安全稳定运行，各项安全指标始终处于可控范围内。在与电力系统的协调性方面，通过与其他电源的协同调度，提高了整个电力系统的稳定性和可靠性，有效缓解电力供需矛盾，为电力系统的安全稳定运行提供有力保障。

结束语

核电机组负荷跟踪运行优化策略的研究与实践，有效提升了核电机组在电力系统中的适应性与竞争力。然而，核电技术发展与电力系统需求不断变化，未来仍需持续探索创新，进一步突破技术瓶颈，完善管理策略，加强多学科融合与国际合作。通过不断优化改进，使核电机组在保障能源安全、推动低碳发展中发挥更重要作用，助力构建清洁、高效、安全的现代能源体系。

参考文献

- [1] 赵俊,胡劲,吴坤.方家山核电厂核级DCS安全改进[J].电子技术应用,2021(S1):211-216.
- [2] 郑丽馨,陶书生,王倩,张浩,焦峰,许友龙,吴彦农.核电厂运行事件报告准则研究及应用[J].核安全,2021,20(05):27-33.
- [3] 陈红胜.电厂运行人员因失误机制及对策分析[J].科技视界,2022,(12):162-164.
- [4] 陈豪,刘鹏飞,吴国旸,匡波.电网低频故障对核电机组运行安全的影响分析[J].热力发电,2021,50(11):47-53.