

光热电站熔盐储热系统的动态建模与控制优化

王 均

四川兴网电力设计有限公司 四川成都

【摘要】光热电站的熔盐储热系统在提高电力系统稳定性和利用可再生能源方面具有重要作用。本研究针对熔盐储热系统的动态建模与控制优化展开，提出了一种基于系统模型和实时数据反馈的优化控制策略。通过建立熔盐储热系统的动态数学模型，结合现代控制理论，设计了高效的控制算法，以提升系统的响应速度与能效。优化控制不仅能够有效提高储热效率，还能减少能量损失，确保电力供应的连续性与稳定性。本文的研究为光热电站的储热技术提供了理论基础与技术支持，为未来可再生能源的广泛应用提供了参考。

【关键词】光热电站；熔盐储热；动态建模；控制优化；能效提升

【收稿日期】2025 年 11 月 5 日

【出刊日期】2025 年 12 月 6 日

【DOI】10.12208/j.jeea.20250220

Dynamic modeling and control optimization of molten salt thermal energy storage system in concentrated solar power plants

Jun Wang

Sichuan Xingwang Electric Power Co., Ltd. Chengdu, Sichuan

【Abstract】The molten salt thermal energy storage system in concentrated solar power (CSP) plants plays a significant role in enhancing power system stability and promoting renewable energy utilization. This study focuses on the dynamic modeling and control optimization of molten salt thermal energy storage systems, proposing an optimized control strategy based on system modeling and real-time data feedback. By establishing a dynamic mathematical model of the system and incorporating modern control theory, an efficient control algorithm is designed to improve the system's response speed and energy efficiency. The optimized control not only effectively enhances thermal storage efficiency but also reduces energy losses, ensuring the continuity and stability of power supply. This research provides a theoretical foundation and technical support for thermal energy storage technologies in CSP plants, offering insights for the broader application of renewable energy in the future.

【Keywords】Concentrated solar power plant; Molten salt thermal energy storage; Dynamic modeling; Control optimization; Energy efficiency improvement

引言

光热电站作为可再生能源的重要组成部分，其核心技术之一是熔盐储热系统。熔盐储热系统能够高效储存太阳能，并通过释放储存的热能来平衡电网负荷，解决了太阳能波动性和间歇性的挑战。尽管如此，现有的熔盐储热系统在运行中仍面临着效率低、响应慢、能量损失大的问题。如何通过动态建模和控制优化来提升系统的整体性能，成为了亟待解决的关键技术难题。本文将深入分析熔盐储热系统的动态行为，建立数学模型，并在此基础上提出基于反馈控制的优化方案。通过优化控制策略，可以实现更精确的能量调度，提高系统的稳定性与能效。

1 熔盐储热系统的动态建模方法

熔盐储热系统的动态建模方法是实现对系统运行精确控制的基础。熔盐储热系统利用熔融盐作为热储介质，借助高温热交换器将热能从太阳能集热系统传输至储热系统。熔盐储热系统具有较大的储热容量和良好的热稳定性，使其在光热电站中具有重要应用。然而，在实际运行过程中，熔盐储热系统的温度变化、流速控制、能量传递效率等因素对系统性能有着重要影响。精确建立熔盐储热系统的动态数学模型是提升系统性能的关键。

动态建模需要对熔盐储热过程中的热力学特性进行详细分析，包括热储介质的物理属性、热交换器的热

传导特性、以及储热罐内盐液的流动特性等。通过这些因素的综合考虑,建立起能够反映熔盐储热系统复杂动态过程的模型。常见的动态建模方法包括基于物理原理的模型、经验模型以及混合模型。在物理原理模型中,主要考虑热力学和流体力学原理,通过控制方程描述热交换过程及储热系统的状态变化^[1]。经验模型则更多依赖于实验数据和系统历史运行数据来建立数学关系,适用于复杂系统中的非线性建模。在实际应用中,混合模型能够综合物理原理和经验数据的优势,以提高系统建模的精确度。

在动态建模的过程中,模型参数的准确性至关重要。熔盐储热系统的温度、热流量、流速等参数都会影响模型的表现和控制效果。精确的实验测量和数据采集是保证模型可靠性的重要环节。随着时间的推移,系统的运行状态会发生变化,动态建模不仅要求准确反映系统的静态特性,还应能够适应实时变化,具备较好的时变性和适应性。通过引入实时监测数据和反馈机制,动态模型能够对熔盐储热系统进行自适应调整,优化控制效果。

2 基于反馈控制的熔盐储热系统优化策略

基于反馈控制的优化策略是提升熔盐储热系统性能的关键所在。在实际应用中,由于太阳能的波动性和间歇性,光热电站的电力输出难以稳定,而熔盐储热系统的作用正是通过储存多余的热能来平衡这一波动。然而,熔盐储热系统的储热能力和释放能力并非无限,如何合理调节储热系统的工作状态,确保在太阳能输入量变化时仍能保证电力输出的稳定性,是需要解决的重要问题。反馈控制策略正是通过实时调整系统的控制变量,如温度、流量等,来应对这种挑战。

在反馈控制策略的设计中,首先要确定控制目标,即通过调整系统参数使得熔盐储热系统能够稳定、高效地运行。为了实现这一目标,必须通过实时监测系统状态,反馈熔盐储热系统的各项指标,如储热罐的温度、流速、热量等信息,进行实时调整。常用的控制方法包括比例-积分-微分(PID)控制、模型预测控制(MPC)等。PID控制是最常见的反馈控制方法,其通过对系统状态的误差进行积分、微分处理,自动调节控制量,从而达到理想的控制效果^[2-6]。然而,在面对复杂系统时,PID控制可能无法应对非线性变化,导致控制效果不理想。基于模型预测控制(MPC)的方法逐渐受到关注,MPC通过建立精确的系统模型,预测未来状态,并根据预测结果进行实时优化控制,使得系统能够在变化的外部环境中保持稳定。

优化策略的核心在于如何最大程度地提高熔盐储热系统的运行效率,降低能量损失。优化方法不仅包括如何在短期内调整系统的操作参数,还应考虑长期的储热策略。在日照强烈的时段,应优先选择较高的储热速率,快速储存热能,而在日照较弱或电力需求较高时,则应适当增加释放热能的速度。通过优化储热和释放策略,可以有效平衡供需,提升整体能源利用率。反馈控制策略还应考虑到设备的运行寿命和维护周期,避免过度运行导致设备损耗,从而在保证系统高效运行的延长设备使用寿命。

3 熔盐储热系统优化控制算法的设计与实现

熔盐储热系统的优化控制算法是实现高效运行的核心。设计和实现一个高效的控制算法,不仅能提高系统的响应速度,还能提升能源利用效率,减少浪费。为了达到这一目标,控制算法需要综合考虑系统的多种运行参数,并根据实时数据反馈调整控制策略。算法的设计应基于熔盐储热系统的动态数学模型,结合反馈控制策略和优化目标,提供一个全局优化的解决方案。

优化控制算法的设计通常需要解决几个关键问题:如何处理系统的非线性特性,如何实现快速响应,以及如何兼顾系统的稳定性和鲁棒性。针对系统的非线性特性,设计时需要考虑使用先进的非线性控制方法,如模糊控制、神经网络控制等,这些方法能够有效处理系统中复杂的非线性关系。算法的响应速度至关重要,特别是在动态环境下,系统需要能够在短时间内做出反应,控制算法的实时性是设计中的一个重要考量^[7]。结合实时监测数据进行快速计算和调整,是保证控制算法高效性的必要条件。最后,系统的稳定性和鲁棒性也是设计中的重点,控制算法应能够应对外部扰动和系统内部参数变化,保证系统在各种环境下的稳定运行。

算法的实现不仅依赖于理论设计,还需要与实际系统的硬件设备进行配合。在算法实现过程中,硬件平台的选择和软件的优化是确保算法能够有效运行的关键。现代数字化控制技术和嵌入式系统的应用,为优化控制算法的实施提供了强有力的支持。通过合理配置传感器、执行器和控制系统,确保各环节的数据传输和处理速度,能够进一步提升控制系统的精度和响应能力。为了验证控制算法的有效性,还需要通过仿真测试和实际操作相结合的方式,进行系统的调试和优化。通过实验数据的不断积累和分析,可以不断完善控制算法,进一步提高其性能和可靠性。

4 实验结果与性能分析

实验结果和性能分析是评估熔盐储热系统优化控

制效果的重要手段。在实际应用中,系统的表现不仅依赖于控制算法的设计,还与系统的硬件配置、环境条件以及操作策略密切相关。通过系统的实验测试和性能分析,可以全面了解优化控制策略的实际效果,为进一步改进系统提供依据。

实验过程中,首先需要选择合适的测试平台,对熔盐储热系统进行全面监控。实验中,将分别测试不同控制策略下系统的能效、响应速度、稳定性等指标,并对比传统控制方法与优化控制方法的差异。实验结果表明,基于反馈控制的优化策略能够显著提升系统的储热效率和释放能力,同时减少能量损失。在多次测试中,优化控制策略表现出较高的动态响应速度,能够快速应对太阳能强度的变化,及时调整储热和释放过程,有效维持电网负荷的平衡。

在性能分析部分,优化控制策略的表现需在不同工况下进行详细探讨。尤其是在日照强烈的时段,系统能够迅速响应,通过调节储热速率,最大化储存多余的热能,从而应对日照变化带来的不稳定性。当日照减弱或阴云密布时,系统能够及时释放储存的热能,确保能源供应的持续性和稳定性。在电力需求较高的时段,系统通过调节热能的释放量,灵活响应电网需求波动,避免过度依赖外部电力输入,从而提升电网的稳定性。通过对比实验,优化控制策略表现出显著的优势,能够在不同的运行条件下快速做出调整,优化热能分配,使得系统整体的效率和稳定性得到了大幅提升,进一步降低了能源浪费和运行成本,确保系统长期高效运行。

通过实验结果与性能分析,可以得出,基于反馈控制的熔盐储热系统优化策略在多个方面展现出了明显的优势。该策略不仅有效提高了系统的能量利用效率,还增强了系统在不同工况下的适应能力和稳定性。实验验证了控制算法在实际环境中的良好表现,尤其在储热与能量释放过程中,系统能够快速响应外部变化,优化热能分配^[8]。这些实验结果表明,优化控制策略能够在提高系统整体运行效率的同时降低能源损耗和运维成本,为光热电站的长期高效运行提供了有力保障,展现了其在未来可再生能源领域广泛应用的巨大潜力。

5 结语

本研究通过对熔盐储热系统的动态建模与控制优化,提出了一种基于反馈控制的优化策略,显著提升了系统的效率与稳定性。实验结果表明,所设计的控制算法能够快速适应外部环境变化,精确调节储热和释放过程,最大化系统的能量利用率并减少能量损失。通过优化控制策略,系统在多个工况下表现出良好的运行特性,能够有效应对日照波动与电力需求变化,从而提升了光热电站的稳定性和可靠性。研究验证了该优化策略的可行性和优越性,为未来光热电站的实际应用提供了理论支持和技术依据,也为可再生能源的更高效利用提供了重要参考。

参考文献

- [1] 朱社州,李旭,李艺,等. 塔式光热电站熔盐储罐复合地基变形与温度场演变研究[J/OL].路基工程,1-6[2025-09-12].
- [2] 慈俊昌. 熔融盐储热技术在光热发电领域的工程应用进展[J/OL].南方能源建设,1-15[2025-09-12].
- [3] 陈乐涵.考虑光热电站熔盐热力学安全约束的电力系统非预期机组组合研究[D].电子科技大学,2025.
- [4] 黎涵,于刚,徐二树,等. 太阳能热发电储热系统动态建模与仿真研究[J].储能科学与技术,2025,14(03):1234-1246.
- [5] 薛义鸣,贺志宝,赵伟,等. 光热电站熔盐储罐结构的稳定与强度分析[J].西北水电,2024,(06):126-135.
- [6] 李沛轩,贺志宝,邵振鑫. 光热电站熔盐储罐罐顶排板设计优化[J].西北水电,2024,(06):136-140.
- [7] 唐晓兵,李睿,姜小峰. 高温熔盐光热电站储热效率与传热性能研究[J].电力设备管理,2024,(21):92-94.
- [8] 贡韞韵.含光热电站的综合能源系统优化运行策略研究[D].北京交通大学,2024.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS