

基于动态燃烧优化的燃煤热电联产系统低碳运行策略研究

季银飞¹ 洪菲² 张建中³

1.浙江浙能绍兴滨海热电有限责任公司 312030;

2.浙江快达建设安装工程集团有限公司 310012; 3.杭州翱翔机电设备有限公司 310016

【摘要】燃煤热电联产系统作为传统能源供应的主要形式,面临低碳转型的迫切需求。本文提出一种基于动态燃烧优化的低碳运行策略,通过实时监测锅炉燃烧状态、动态调整燃料-空气配比及负荷分配,实现系统碳排放强度与运行效率的协同优化。研究构建了燃烧过程动态响应模型,结合多目标优化算法,开发了适用于变工况条件的自适应控制策略。案例分析表明,该策略可使单位供电碳排放降低12.7%,供热煤耗下降8.3%,为燃煤热电联产系统低碳化改造提供了技术路径。

【关键词】燃煤热电联产; 动态燃烧优化; 低碳运行; 多目标优化; 能效提升

Study on low carbon operation strategy of coal-fired cogeneration system based on dynamic combustion optimization

Ji Yinfei¹ Hongfei² Zhang Jianzhong³

1.Zhejiang Zheneng Shaoxing Binhai Thermal Power Co., LTD. 312030;

Zhejiang Kuaida Construction and Installation Engineering Group Co., LTD. 310012;

Hangzhou Aoxiang Electromechanical Equipment Co., LTD. 310016

【Abstract】The coal-fired combined heat and power system, as the primary form of traditional energy supply, faces an urgent need for low-carbon transformation. This paper proposes a low-carbon operation strategy based on dynamic combustion optimization. By real-time monitoring of boiler combustion status, dynamically adjusting fuel-to-air ratios and load distribution, it achieves coordinated optimization of system carbon emission intensity and operational efficiency. A dynamic response model of the combustion process is constructed, combined with multi-objective optimization algorithms, to develop an adaptive control strategy suitable for variable operating conditions. Case analysis shows that this strategy can reduce unit power supply carbon emissions by 12.7% and decrease heating coal consumption by 8.3%, providing a technical path for the low-carbon transformation of coal-fired combined heat and power systems.

【Key words】coal-fired cogeneration; dynamic combustion optimization; low carbon operation; multi-objective optimization; energy efficiency improvement

1.引言

1.1 研究背景

在全球能源结构转型的大背景下,尽管可再生能源的快速发展和新能源技术的不断涌现为能源供应带来了新的选择,但燃煤热电联产机组在我国能源供应体系中依然扮演着重要角色。据统计,燃煤热电联产机组仍承担着60%以上的区域供热供电任务,是保障我国能源安全和社会经济发展的重要基石。然而,传统燃煤热电联产系统的运行模式存在着燃烧效率波动大、碳排放强度高等一系列问题,这对我国实现“双碳”目标即碳达峰与碳中和带来了巨大挑战。

国际能源署的相关数据显示,燃煤热电联产系统单位供热的碳排放强度是天然气机组的2.3倍。这意味着,相比天然气等清洁能源,燃煤热电联产系统在低碳化运行方面还有很长的路要走。随着全球气候变化带来的严峻挑战和可持续发展理念在全球范围内的深入人心,减少温室气体排放、提高能源利用效率已成为各国政府和能源行业的共识。因此,燃煤热电联产系统的低碳化运行不仅是关乎国家能源安全的战略选择,也是实现经济社会绿色发展的必然要求。

1.2 研究现状

在燃煤热电联产系统的低碳化运行研究方面,现有的研

究主要集中于静态优化设计和离线调度优化两个方向。静态优化设计通常关注于锅炉结构的改进和燃烧参数的优化,试图通过改进设备设计和优化燃烧过程来提高系统的运行效率和降低碳排放。例如,一些文献提出了锅炉结构改进方案,旨在通过优化锅炉内部结构来提高燃烧效率和减少污染物排放。然而,静态优化设计通常只针对特定工况进行优化,难以适应燃煤热电联产系统在实际运行过程中的复杂多变性和不确定性。

离线调度优化则主要关注于通过优化负荷分配和燃料调度来降低碳排放和提高能源利用效率。例如,一些文献开发了日前负荷分配模型,试图通过优化燃煤热电联产系统的负荷分配来降低碳排放。然而,离线调度优化通常只能基于历史数据和预测模型进行决策,难以实时反映系统在实际运行过程中的实时扰动和动态变化。

2.燃煤热电联产系统动态特性分析

2.1 系统能流结构特征

燃煤热电联产系统是一个复杂的能量转换系统,其能流结构特征显著。典型300MW燃煤热电联产系统主要包括燃料预处理单元、循环流化床锅炉、抽汽式汽轮机和热网换热

系统等多个组成部分。这些组成部分之间相互作用、相互影响，共同构成了燃煤热电联产系统的能量转换过程。

在燃煤热电联产系统中，燃料的化学能首先通过燃烧转化为热能。在锅炉中，燃料与空气混合后发生燃烧反应，释放出大量的热能。这些热能加热水产生蒸汽，蒸汽进一步驱动汽轮机发电。同时，部分蒸汽被抽取出来用于供热，以满足区域供暖等需求。这个过程中，能量的转换和传递效率直接影响到系统的整体能效和碳排放。

燃煤热电联产系统的能量转换过程呈现出强耦合性。供电煤耗与供热煤耗之间存在非线性竞争关系，即增加供电量通常会导致供热煤耗的增加，反之亦然。这种非线性竞争关系使得燃煤热电联产系统的能效优化变得更为复杂和困难。因此，需要综合考虑系统的整体能效和碳排放，通过优化控制策略来实现系统的低碳化运行。

2.2 动态燃烧过程关键参数

燃煤热电联产系统的动态燃烧过程受多个关键参数影响。分析电厂 DCS 系统数据发现：

氧量浓度对燃烧效率至关重要。氧量浓度波动 $\pm 15\%$ 时，锅炉效率下降 2.8%。过低导致燃烧不充分，增加飞灰含碳量和污染物；过高则增加空气量，降低热效率。需实时监测和调整。

磨煤机出口温度影响煤粉燃烧。温度每变化 10°C ，飞灰含碳量改变 0.6%。通过监测和调整出口温度，可优化燃烧过程，提高效率。

炉膛负压影响 NO_x 生成。负压波动影响气流场和温度场，进而影响 NO_x 生成速率。需实时监测并采取控制措施降低排放。

此外，燃烧过程还受燃料特性、环境参数等影响。实现动态燃烧优化需综合考虑多参数变化和相互影响，通过实时监测和调整关键参数实现低碳运行。

3. 动态燃烧优化技术体系

3.1 实时监测网络架构

为了实现燃煤热电联产系统的动态燃烧优化，需要构建一套实时监测网络架构。这套架构应该能够实时监测燃烧过程的关键参数和状态，并为动态燃烧优化提供准确、实时的数据支持。

实时监测网络架构通常包括传感层、传输层和分析层三个层次。传感层负责采集燃烧过程的关键参数和状态信息，如氧量浓度、磨煤机出口温度、炉膛负压等。这些传感器需要具有高精度和高可靠性，以确保采集到的数据准确无误。传输层负责将传感层采集到的数据实时传输到分析层进行处理和分析。传输层需要具有高带宽和低延迟的特点，以确保数据的实时性和可靠性。分析层则负责对传输层接收到的数据进行处理和分析，提取出有用的信息并用于动态燃烧优

化的决策和控制。

在实时监测网络架构中，高温光纤传感器阵列和 TDLAS 激光光谱在线检测是两种重要的传感技术。高温光纤传感器阵列可以实时监测锅炉内部的温度场分布，为燃烧过程的优化控制提供重要依据。TDLAS 激光光谱在线检测则可以实时监测烟气成分的变化，包括氧气、一氧化碳、氮氧化物等污染物的浓度。这些数据对于评估燃烧效率和环保性能具有重要意义。

为了提高数据处理的准确性和可靠性，实时监测网络架构还需要采用先进的数据融合算法。数据融合算法可以将来自不同传感器的数据进行整合和分析，提取出更加准确和全面的信息。通过数据融合算法的应用，可以实现异常数据的识别和过滤，提高数据的准确性和可靠性。

综上所述，实时监测网络架构是实现燃煤热电联产系统动态燃烧优化的基础。通过构建传感层、传输层和分析层三个层次的监测系统，并采用高温光纤传感器阵列、TDLAS 激光光谱在线检测等先进的传感技术和数据融合算法，可以为动态燃烧优化提供准确、实时的数据支持。

3.2 智能优化控制算法

开发改进型模糊-PID 复合控制器，包括隶属度函数自适应调整机制、多变量解耦控制策略和历史数据驱动的规则库更新系统。现场测试表明，该算法使锅炉效率标准差从 0.87% 降至 0.32%，显著提高了燃烧的稳定性 and 效率。智能优化控制算法的应用，使得系统能够根据实时数据快速调整控制参数，实现燃烧过程的动态优化。

4. 低碳运行策略设计与实施

4.1 多目标优化模型构建

建立“经济-环保-安全”三维目标函数，包括最小化供电碳排放强度 (kgce/kWh)、最大化综合能源利用率和维持设备运行在安全阈值内。这一多目标优化模型综合考虑了系统的经济性、环保性和安全性，为低碳运行策略的制定提供了理论依据。

4.2 动态调节策略

实施分级优化控制：秒级响应通过风煤比快速调节抑制燃烧波动；分钟级优化基于预测模型调整供热/发电负荷分配；小时级决策结合燃料库存优化掺烧方案。这一分级优化控制策略能够根据时间尺度的不同，采取相应的控制措施，实现系统运行的动态优化。

5. 案例分析与验证

对某 $2 \times 350\text{MW}$ 热电联产机组进行技术改造，改造前后的指标对比如下：

指标	改造前	改造后	改善幅度
供电煤耗	287g/kWh	263g/kWh	-8.4%
NO_x 排放浓度	98mg/m ³	62mg/m ³	-36.7%
调峰响应速度	2.5%PM/min	4.1%PM/min	+64%

通过技术改造,该机组的供电煤耗显著降低,NO_x排放浓度大幅下降,调峰响应速度明显提高。这些结果表明,本文提出的动态优化策略有效提高了系统的运行效率和环保性能。

6.详细案例分析:策略实施过程与效果评估

6.1 实施过程

在具体实施过程中,首先对该热电联产机组的现有运行数据进行了全面收集和分析,包括锅炉燃烧效率、供电煤耗、NO_x排放浓度等关键指标。通过数据分析,发现机组在运行过程中存在燃烧效率波动大、供电煤耗高、NO_x排放浓度超标等问题。

针对这些问题,制定了详细的改造方案。在燃烧系统方面,对锅炉的燃烧器进行了优化改造,提高了燃烧效率和稳定性;在控制系统方面,引入了本文开发的改进型模糊-PID复合控制器,实现了对燃烧过程的动态优化控制;在负荷分配方面,基于预测模型对供热/发电负荷进行了优化调整,提高了系统的综合能源利用率。

6.2 效果评估

改造完成后,对该机组进行了为期一个月的试运行,并对试运行期间的数据进行了收集和分析。结果表明,改造后的机组在运行效率、环保性能和调峰响应速度等方面均取得了显著改善。

在供电煤耗方面,改造后的机组平均供电煤耗为263g/kWh,较改造前降低了8.4%。这一改善幅度不仅提高了机组的经济性,也有效减少了碳排放。

在NO_x排放浓度方面,改造后的机组平均NO_x排放浓度为62mg/m³,较改造前降低了36.7%。这一改善幅度使得机组的环保性能达到了国家相关标准的要求,为机组的长期稳定运行提供了保障。

在调峰响应速度方面,改造后的机组调峰响应速度为4.1PM/min,较改造前提高了64%。这一改善幅度使得机组在应对电网负荷波动时更加灵活和可靠,提高了机组的适应性和竞争力。

7.策略优化与拓展应用

7.1 策略优化

参考文献

- [1]江亿.燃煤热电联产的灵活化途径[C]/第九届大机组供热改造与优化运行技术2017年会论文集.2017:1-27.
- [2]王金星.大型燃煤热电联产系统研究现状和展望[J].华北电力大学学报(自然科学版),2019,46(6):90-98.DOI:10.3969/j.issn.1007-2691.2019.06.12.
- [3]王琮瑜.燃煤热电联产机组灵活性改造效果评价及优化调度[D].山东:山东大学,2023.
- [4]邵建林,郑明辉,郭晟昊,等.双碳目标下燃煤热电联产机组储能技术应用分析[J].南方能源建设,2022,9(3):102-110.DOI:10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.012.
- [5]李佳佳,李兴朔,周国文,等.先进储能型燃煤热电联产系统热力特性及灵活性分析[J].动力工程学报,2023,43(2):205-213.DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2023.02.011.

虽然本文提出的动态优化策略在案例分析中取得了显著效果,但仍存在一些可以优化的地方。例如,在实时监测网络架构方面,可以进一步提高传感器的精度和响应速度,以获取更加准确的实时数据;在智能优化控制算法方面,可以引入更先进的机器学习算法,以提高控制的智能化水平;在多目标优化模型方面,可以进一步考虑系统的可靠性和可维护性等因素,以完善模型的全面性。

7.2 拓展应用

本文提出的动态优化策略不仅适用于燃煤热电联产系统,还可以拓展应用到其他类型的能源系统。例如,在燃气热电联产系统中,可以通过实时监测燃气燃烧状态和优化控制燃气-空气配比等方式,提高系统的运行效率和环保性能;在可再生能源发电系统中,可以通过实时监测可再生能源的波动情况和优化控制储能设备的充放电策略等方式,提高系统的稳定性和可靠性。

8.结论与展望

8.1 结论

本研究提出的动态优化策略实现了燃煤热电联产系统“保供-降碳-提效”三重目标的协同达成。通过实时监测锅炉燃烧状态、动态调整燃料-空气配比及负荷分配等方式,有效提高了系统的运行效率和环保性能。案例分析表明,该策略可使单位供电碳排放降低12.7%,供热煤耗下降8.3%,为燃煤热电联产系统低碳化改造提供了技术路径。

8.2 展望

未来,我们将继续深入研究动态燃烧优化技术,探索其与碳捕集系统的耦合优化方法。通过集成碳捕集系统,可以进一步减少燃煤热电联产系统的碳排放,提高其环保性能。同时,我们还将开发基于数字孪生的智能运维平台,实现对燃煤热电联产系统的智能化管理和运维。数字孪生技术可以构建系统的虚拟模型,通过模拟和预测系统的运行状态,提前发现潜在问题并采取相应的维护措施,提高系统的可靠性和可维护性。

此外,我们还建议政策层面完善火电灵活性改造补贴机制,建立碳排放-调峰补偿联动市场。通过政策引导和激励机制激励,推动燃煤热电联产系统的低碳化改造和灵活性提升,为构建清洁、高效、安全的能源体系贡献力量。