

双碳目标下火力发电厂电力系统低碳运行优化研究

邓立涛

宁夏电投太阳山能源有限公司 宁夏 银川 750017

摘要：双碳目标驱动火力发电厂低碳转型，需以能源效率提升、碳减排技术集成、系统动态平衡理论为支撑。当前存在碳捕集技术成熟度不足、系统协调困难、运行优化策略缺失等短板。本文提出机组参数优化、能源结构调整、辅助系统改造及电力调度优化策略，通过模型构建与仿真验证其有效性，为构建清洁低碳、安全高效的新型电力系统提供技术路径与实证支撑，助力双碳目标实现。

关键词：双碳目标；火力发电厂；低碳运行优化

引言：全球气候治理推动下，双碳目标对能源体系提出低碳转型硬性要求。火力发电作为传统能源基座，需平衡电力供应安全与碳减排双重目标。当前面临碳捕集技术成本高、新能源消纳压力大、系统灵活性不足等挑战，亟需通过技术创新与运行优化实现从“被动减排”向“主动降碳”转变，支撑新能源大规模接入与能源结构绿色转型，推动电力系统向低碳化、智能化方向演进。

1 双碳目标下火力发电厂电力系统低碳运行理论基础与现状分析

1.1 核心理论与双碳目标要求

双碳目标对火力发电厂电力系统提出低碳转型的硬性要求，需以科学理论为支撑实现运行优化。核心理论框架包含三方面：（1）能源效率提升理论：通过热力学优化与设备升级，提高燃煤机组能量转换效率，减少单位发电量燃料消耗与碳排放；（2）碳减排技术集成理论：聚焦碳捕集、生物质耦合发电等技术路径，构建“减碳-固碳-用碳”技术链，降低全生命周期碳足迹；（3）系统动态平衡理论：基于新能源出力预测与负荷响应模型，优化火电与新能源的协同调度，保障系统稳定性的同时实现碳排放动态管控。这些理论为火力发电厂低碳运行提供方法论指导，推动其从“被动减排”向“主动降碳”转变，在保障电力供应安全的前提下，加速构建与双碳目标适配的新型电力系统运行模式。

1.2 当前运行模式与技术应用现状

双碳目标驱动下，火力发电厂电力系统运行模式正经历深刻变革。当前技术应用现状呈现多元特征：（1）技术迭代加速：传统燃煤机组通过超低排放改造降低污染物排放，但碳减排技术如碳捕集、利用与封存（CCUS）仍处示范阶段，大规模应用面临成本与效率挑战；（2）运行模式转型：为适应新能源大规模接入，火电正从“基荷电源”向“灵活调节电源”转变，通过深度调峰、快

速启停等技术提升系统灵活性；（3）系统协同强化：通过风光火储一体化、虚拟电厂等技术实现多能互补，优化电力系统运行效率与碳排放表现^[1]。这些变革推动火力发电厂向低碳化、智能化方向持续演进，在保障能源安全供应的同时，为构建清洁低碳、安全高效的新型电力系统奠定坚实基础，助力能源绿色低碳转型目标稳步实现。

1.3 现存低碳短板与优化核心难题

双碳目标驱动下，火力发电厂电力系统低碳运行面临诸多复杂且严峻的现实挑战，现存低碳短板主要体现在技术、系统及管理等多个关键维度。（1）技术瓶颈：当前燃煤机组碳捕集与封存技术成熟度不足，能耗高且成本昂贵，难以支撑大规模减排需求；（2）系统协调难题：新能源大规模接入导致电力系统调峰压力激增，传统火电灵活性改造进度滞后，影响新能源消纳与系统稳定性；（3）运行优化困境：缺乏动态响应负荷与新能源出力变化的智能调度策略，难以实现经济与低碳目标的协同优化。突破这些瓶颈需聚焦技术创新、系统协同与管理升级，推动火力发电从“高碳基座”向“低碳支撑”转型，为电力系统绿色低碳发展注入持续动力，助力能源结构优化与生态效益提升。

2 双碳目标下火力发电厂电力系统低碳运行优化策略构建

2.1 火力发电厂机组运行参数低碳优化

双碳目标下，火力发电厂机组运行参数低碳优化需立足技术革新与能效提升，通过精准调控实现碳排放强度降低。（1）燃烧过程优化：采用智能燃烧控制系统，动态调整燃料配比与送风量，提升燃烧效率，减少不完全燃烧产生的碳氧化物排放，同时降低助燃能源消耗。（2）设备运行参数动态匹配：基于机组负荷变化，实时调整汽轮机进汽压力、温度及凝汽器真空度等参数，使设备始终运行在最佳能效区间，减少单位发电量的煤耗与碳排放。

(3) 余热梯级利用强化：通过优化锅炉排烟余热回收装置与汽轮机冷端系统，提高热量回收效率，将原本浪费的热量转化为辅助蒸汽或用于厂区供暖，间接降低整体能耗与碳排放。这些策略通过多维度参数协同优化，推动火力发电从“高碳排放”向“低碳高效”转型，为电力系统低碳运行提供技术支撑，助力双碳目标稳步实现。

2.2 火力发电厂能源消耗结构低碳调整

火力发电厂能源消耗结构低碳调整需从燃料组合优化与能效提升双路径推进，推动传统高碳能源向清洁低碳转型，实现碳排放强度持续下降。(1) 燃料替代策略：逐步引入低硫煤、生物质燃料及氢能等清洁燃料，替代传统高碳煤种，降低燃烧中硫氧化物、氮氧化物及二氧化碳排放，从源头减少碳足迹。(2) 能效提升路径：通过改进锅炉燃烧技术、优化汽轮机热力系统及强化余热回收，减少能源转换与传输损耗，提升单位能源产出效率，降低单位发电量能耗。(3) 多能互补耦合：将风能、太阳能等可再生能源与火力发电系统深度耦合，通过协同配置实现多能源互补运行，降低火电供电占比，提升系统整体低碳属性与可持续性^[2]。能源消耗结构调整需在保障电力供应安全稳定基础上，通过技术迭代与模式创新，推动火力发电清洁化、高效化、低碳化转型，为双碳目标下能源结构优化提供关键支撑。

2.3 火力发电厂辅助系统低碳改造

火力发电厂辅助系统低碳改造需聚焦能耗降低与排放控制，通过技术升级推动系统向高效清洁方向转型，助力双碳目标实现。(1) 冷却系统能效提升：采用空冷技术替代传统水冷，减少水资源消耗与冷却能耗，同时优化冷却塔结构设计，提升热交换效率，降低单位发电冷却能耗及碳排放。(2) 输煤系统智能优化：引入自动化输煤设备与智能调度系统，优化输煤路径与设备运行参数，减少输煤过程中的能源损耗与粉尘排放，提升输煤效率与环保性能。(3) 除灰系统绿色升级：采用干式除灰技术替代湿式除灰，减少水资源使用与废水产生，同时提升除灰效率与灰渣综合利用率，降低除灰环节碳排放强度。辅助系统低碳改造需在保障设备安全稳定运行的基础上，通过技术创新与模式优化，推动火力发电厂向低碳、高效、环保方向深度转型，为双碳目标下电力系统绿色转型提供有力支撑。

2.4 火力发电厂电力调度低碳优化

电力调度作为火力发电厂低碳运行的核心环节，需通过策略优化实现碳排放强度降低与能源利用效率提升，推动电力系统向绿色低碳方向转型。(1) 智能算法动态调峰：运用机器学习算法分析负荷波动规律与可再生能源

出力特性，动态调整机组出力计划，提升新能源消纳能力，减少火电机组频繁启停带来的额外碳排放。(2) 需求侧灵活响应：通过分时电价、容量市场等机制引导用户调整用电时段，平滑负荷曲线，降低高峰时段火电依赖，提升电力系统运行效率与低碳属性。(3) 多能互补协同调度：将火电与风电、光伏等可再生能源发电进行一体化调度规划，通过跨时段储能调节与互补运行，优化电力调度结构，提升新能源消纳水平，增强系统低碳可持续性^[3]。电力调度低碳优化需在保障供电安全的前提下，通过技术迭代与模式创新，推动火力发电厂向智能、高效、低碳方向深度演进，为双碳目标下能源体系转型注入持续动力。

3 双碳目标下火力发电厂电力系统低碳运行优化支撑与验证

3.1 低碳运行优化模型构建

双碳目标驱动下，火力发电厂低碳运行优化需依托科学模型实现精准调控，推动系统向高效低碳方向深度演进，为转型提供理论支撑与技术路径。(1) 系统动力学建模：通过构建能源转换、排放控制、设备运行等环节的动态交互模型，模拟不同参数调整对碳排放的影响规律，识别关键优化变量，为策略制定提供量化依据。(2) 多目标优化算法集成：融合遗传算法、粒子群优化等技术，在降低碳排放、提升能效、保障供电安全等多目标间寻求最优平衡，实现综合效益最大化，避免单一目标优化导致的系统失衡。(3) 数字孪生验证平台搭建：构建虚拟仿真环境，模拟实际运行场景与极端工况，验证优化策略的有效性及设备适应性，降低实际改造风险，提升方案落地可行性。模型构建需在理论推导与实证验证间形成闭环，通过持续迭代优化，推动火力发电厂低碳运行技术向纵深发展，为双碳目标下能源结构绿色转型提供坚实技术保障。

3.2 低碳运行优化仿真分析

双碳目标下，火力发电厂低碳运行优化需通过仿真分析验证策略有效性，推动技术迭代与模式创新，为实际改造提供科学依据，助力绿色转型。(1) 模型参数敏感性分析：调整燃烧效率、排放系数等关键参数，模拟不同工况碳排放变化规律，识别参数敏感区间，为参数优化提供方向，提升模型预测精度与策略针对性。(2) 多场景模拟验证：构建高峰负荷、低谷负荷、可再生能源波动等典型运行场景库，验证优化策略在不同场景下适应性与稳定性，确保策略在复杂工况下鲁棒性与可靠性。(3) 虚拟调试与风险评估：在数字孪生平台中模拟设备改造与参数调整过程，评估改造风险与成本效益，

优化改造方案,降低实际改造不确定性,提升方案落地可行性^[4]。仿真分析需与实际运行数据深度融合,通过持续迭代优化模型参数与策略方案,推动火力发电厂低碳运行技术向更高效、更智能方向演进,为能源结构绿色转型注入技术动力。

3.3 低碳运行优化效果评估

低碳运行优化效果评估需聚焦实际效益验证,通过多维度指标量化转型成效,确保策略落地实现预期减排目标,推动火力发电绿色可持续发展。(1)碳排放强度核验:对比优化前后单位发电量碳排放数据,量化减排效果,识别锅炉燃烧、余热回收等关键环节碳减排贡献度,为后续优化提供精准数据支撑。(2)能效提升实证分析:监测锅炉热效率、汽轮机内效率等核心参数变化,验证优化措施对能源转换效率的提升效果,确保能源利用效率稳步增长,降低单位发电能耗。(3)系统运行稳定性测试:模拟负荷波动、设备故障等异常工况,评估优化后系统抗干扰能力与恢复速度,验证复杂运行环境下系统稳定性与可靠性,保障电力供应安全。效果评估需与实际运行数据深度融合,通过持续监测与迭代优化,推动低碳运行技术高效可靠演进,为双碳目标下能源结构转型提供坚实技术与实证支撑。

3.4 低碳运行稳定性保障措施

火力发电厂低碳运行稳定性保障需从设备维护、系统冗余与智能监测三维度构建防护网,确保优化策略落地后系统稳定运行,支撑双碳目标实现。(1)设备全周期维护体系:建立锅炉、汽轮机等核心设备定期检修与状态监测机制,通过振动分析、油液检测等技术识别设备劣化趋势,延长设备寿命,降低非计划停机风险。(2)系统冗余设计强化:在关键环节配置备用设备或冗余回路,如

备用给水泵、应急电源系统,提升系统抗干扰能力,确保设备故障或负荷波动时电力供应不中断。(3)智能监测预警平台:集成传感器网络与大数据分析技术,实时监测温度、压力、排放等参数,通过算法模型预测潜在故障,实现故障早期预警与快速响应,提升系统运行安全性^[5]。稳定性保障措施是低碳运行优化的基石,通过技术防护与管理协同,确保火力发电厂在低碳转型中保持安全、稳定、高效运行,为能源结构绿色转型提供可靠支撑。

结束语:未来,需持续深化碳捕集技术攻关以突破成本与效率瓶颈,强化风能、太阳能与火力发电的多能互补协同机制,完善基于机器学习的智能调度体系以提升系统灵活性。通过推动火力发电与新能源深度融合,构建清洁低碳、安全高效的新型电力系统,为全球气候治理提供可复制、可推广的低碳转型技术路径与实践范式,助力全球能源绿色低碳发展。

参考文献:

- [1]黄亮.碳中和目标下的新一代电力系统低碳转型分析及控制策略研究[J].现代工业经济和信息化,2023,13(10):181-183.
- [2]刘书纶.“双碳”背景下火力发电厂减污降碳关键技术进展与应用[J].资源节约与环保,2025(4):26-29.
- [3]屈征燕.“双碳”目标下传统火电企业低碳转型路径研究[J].中阿科技论坛(中英文),2025(10):37-41.
- [4]杨勇平,陈衡,郝俊红,等.“双碳”目标下我国燃煤发电转型升级发展路径[J].中国电机工程学报,2024,44(17):6900-6909+I0015.
- [5]姚顺春,刘泽明,卢志民,等.软测量技术赋能燃煤电厂碳排放计量的研究进展[J].洁净煤技术,2024,30(8):18-31.