

Carbon Emission Monitoring and Low-Carbon Operation Optimization Strategies for Electrical Systems in Thermal Power Plants

Hongyu Lei

Huadian Xinzhou Guangyu Coal Power Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi, 034000, China

Abstract

Under the guidance of the “dual carbon” goal, thermal power plants, as major carbon emitters in the energy production sector, have electrical systems as the core carriers for energy conversion and transmission. The operating status of the electrical system directly affects the carbon emission level of the entire plant. This study focuses on the carbon emission monitoring and low-carbon operation optimization of the electrical systems in thermal power plants. Firstly, it summarizes the main sources of carbon emissions in the electrical system. Then, it proposes a full-process carbon emission monitoring system covering data collection, accounting analysis, and real-time monitoring, and designs multiple low-carbon operation optimization strategies including equipment energy efficiency improvement, operation mode optimization, and energy storage coordinated scheduling. This study validates the effectiveness of the strategies through case analysis, providing theoretical support and practical references for the electrical systems of thermal power plants to achieve precise carbon control and efficient carbon reduction.

Keywords

Electrical System of Thermal Power Plant; Carbon Emission Monitoring; Carbon Operation Optimization

火电厂电气系统碳排放监测与低碳运行优化策略

雷鸿宇

华电忻州广宇煤电有限公司, 中国·山西忻州 034000

摘要

在“双碳”目标引领下,火电厂作为能源生产领域的碳排放大户,电气系统作为火电厂能量转换与传输的核心载体,其运行状态直接影响全厂碳排放水平。本研究针对火电厂电气系统碳排放监测与低碳运行优化展开研究,首先梳理了电气系统碳排放的主要来源,随后提出涵盖数据采集、核算分析、实时监控的全流程碳排放监测体系,并设计包含设备能效提升、运行方式优化、储能协同调度的多元低碳运行优化策略;本研究结合实例分析验证策略有效性,为火电厂电气系统实现精准控碳、高效降碳提供理论支撑与实践参考。

关键词

火电厂电气系统; 碳排放监测; 碳运行优化

1 导语

全球气候变化加剧与能源结构转型加速,推动我国明确提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的战略目标。火电厂作为我国电力系统的重要组成部分,承担着保障能源安全的重要使命,但同时也是二氧化碳等温室气体排放的主要源头之一。本研究探讨构建科学完善的电气系统碳排放监测体系,探索兼顾安全性、经济性与低碳性的运行优化策略,成为火电厂实现低碳转型的重要课题。本研究以此为出发点,系统分析火电厂电气系统碳排放来源与特征,构建全流

程监测体系,提出多元优化策略,为火电厂电气系统低碳高效运行提供解决方案。

2 火电厂电气系统碳排放来源与特征分析

2.1 发电设备运行碳排放

发电机作为电能生产的核心设备,其运行过程中存在机械损耗、电磁损耗等能量损失,这些损耗最终以热能形式散失,需要通过消耗更多的燃煤等化石能源来弥补,从而间接增加碳排放。发电机的碳排放强度与机组容量、运行负荷、效率水平密切相关。例如,小容量机组在低负荷运行时,效率较低,单位发电量的能耗较高,碳排放强度显著高于大容量、高参数机组。此外,发电机的冷却系统运行也会产生能耗,如氢冷发电机的氢气制备、循环系统,空冷发电机的风

【作者简介】雷鸿宇(1991-),男,中国山西朔州人,本科,工程师,从事火电+光伏+储能协同发展研究。

机运行等,均会间接增加碳排放^[1]。

2.2 输变电设备损耗碳排放

输变电设备是电气系统能量传输的关键环节,主要包括变压器、输电线路、开关柜等,其碳排放来源于设备运行过程中的有功损耗。变压器的损耗分为空载损耗与负载损耗,空载损耗主要由铁芯磁滞损耗和涡流损耗组成,与运行负荷无关,持续存在;负载损耗则与负荷电流的平方成正比,随运行负荷变化而变化。输电线路的损耗主要为电阻损耗,同样与负荷电流相关,此外,线路的电晕损耗在恶劣天气条件下也会显著增加。

2.3 辅助电气设备碳排放

火电厂辅助电气设备种类繁多,包括水泵、风机、压缩机、变频器等,其主要功能是为主体设备运行提供保障,如锅炉给水泵、凝结水泵、冷却风机等。此类在运行过程中存在大量无功损耗,需要消耗额外的电能来维持运行,进而间接产生碳排放。此外,部分辅助设备采用传统电机驱动,能效水平较低,单位出力的能耗较高,更加剧碳排放。例如,传统异步电机的效率通常在75%-90%之间,而高效节能电机的效率可提升至95%以上,两者的碳排放强度差异显著。

2.4 储能与调峰设备碳排放

随着新能源电力的大规模并网,火电厂常配套建设储能设备(如蓄电池储能、飞轮储能)与调峰设备,以提升电网调频调峰能力。这类设备在充放电过程中存在能量损耗,如蓄电池的充放电效率通常在80%-90%之间,飞轮储能的能量损耗主要来自机械摩擦与空气阻力。这些能量损耗需要通过火电机组的额外发电来弥补,从而产生间接碳排放。此外,储能设备的制造与回收过程也会产生一定的碳排放,但此类碳排放属于生命周期范畴,本研究主要聚焦于运行阶段的碳排放。

3 火电厂电气系统碳排放监测体系构建

3.1 监测指标体系设计

基于电气系统碳排放来源分析,设计分层级的监测指标体系,分为核心指标与辅助指标。核心指标直接反映碳排放水平,辅助指标用于支撑碳排放核算与运行优化分析。

1. 核心指标:包括单位发电量碳排放量(g/kWh)、设备单位损耗碳排放量(g/kW)、系统综合碳排放量(tCO_2/h)。其中,单位发电量碳排放量是衡量电气系统低碳运行水平的核心指标,反映电能生产过程中碳排放的效率;设备单位损耗碳排放量用于评估单个设备的碳排放强度,为设备能效提升提供依据;系统综合碳排放量反映整个电气系统的碳排放总量,用于宏观管控。

2. 辅助指标:包括设备运行负荷(MW)、电流(A)、电压(kV)、功率因数、能耗(kWh)、煤耗(g/kWh)等。这些指标是碳排放核算的基础数据,例如,通过能耗数据结合对应能源的碳排放系数,可核算出间接碳排放量;通过功率因数可分析无功损耗情况,为无功补偿优化提供依据。

3.2 数据采集与传输

数据采集采用“分布式采集+集中式传输”的模式,依托火电厂现有SCADA系统、电能质量监测系统,结合新增的智能监测终端,实现全维度数据采集。

1. 采集终端部署:在发电机出口、变压器高低压侧、输电线路关键节点、辅助设备电机端等位置,部署智能电表、电流电压传感器、功率因数监测仪等终端设备,实现能耗、电流、电压、功率因数等基础数据实时采集,采集频率设为1分钟/次,确保数据的时效性^[2]。

2. 数据传输与存储:采集的数据通过工业以太网、5G等通信方式传输至集中监控中心,采用边缘计算技术对原始数据进行预处理,过滤异常数据、补充缺失数据,提升数据质量。

3.3 碳排放核算与分析

基于采集的基础数据,采用“能耗折算+系数修正”的方法进行碳排放核算,核算公式为: $E = \sum (E_i \times \delta_i)$ 其中, E 为总碳排放量(tCO_2); E_i 为第*i*类设备的能耗量(kWh); δ_i 为第*i*类能耗对应的碳排放系数(tCO_2/kWh)。碳排放系数根据火电厂能源结构确定,例如,燃煤发电的碳排放系数取 $0.997\text{tCO}_2/\text{MWh}$ (参考IPCC2022年指南),厂用电中外购电能的碳排放系数取区域电网平均碳排放系数。

在核算基础上,本研究可开展多维度分析:一是趋势分析,通过对比不同时间段的碳排放数据,分析碳排放变化趋势,识别碳排放异常波动时段;二是设备对比分析,对比同类型设备的单位损耗碳排放量,筛选高碳排放设备;三是负荷关联分析,探究运行负荷与碳排放量的相关性,确定最优负荷区间。

3.4 实时监控与预警

本研究还需构建可视化实时监控平台,整合碳排放数据、设备运行数据、能耗数据,以图表形式直观呈现电气系统碳排放状态,包括系统综合碳排放量实时曲线、各设备碳排放占比饼图、单位发电量碳排放量趋势图等。同时,设置碳排放预警阈值,根据火电厂低碳运行目标,结合历史运行数据,确定不同运行工况下的碳排放上限。当监测到碳排放量超过预警阈值时,系统自动发出预警信号,并推送至相关运维人员,提示及时采取调控措施。

4 火电厂电气系统低碳运行优化策略

4.1 设备能效提升优化

设备能效是影响电气系统碳排放的核心因素,通过技术改造与设备更新,提升关键设备的能效水平,从源头降低碳排放。

1. 发电设备能效提升:对于老旧发电机,开展通流改造、励磁系统优化等技术升级,提升发电机的效率与出力能力,降低单位发电量的能耗。例如,某300MW机组发电机经过通流改造后,效率提升0.8%,年减少能耗约120万kWh,对应减少碳排放约1196tCO₂。对于新建机组,优先选用高

效大容量机组,如超超临界机组,其发电效率可达45%以上,显著低于传统亚临界机组的效率(38%-40%)。

2. 输变电设备能效优化: 变压器选用节能型产品,如非晶合金变压器,其空载损耗比传统硅钢片变压器降低70%-80%。对现有高损耗变压器进行更换或改造,例如,将S9型变压器更换为S13型节能变压器,单台1000kVA变压器年可减少空载损耗约5000kWh,减少碳排放约4.98tCO₂。输电线路方面,采用截面更大的导线、高温低弧垂导线等节能导线,降低线路电阻损耗;同时,优化线路布局,缩短输电距离,减少能量损耗。

3. 辅助设备节能改造: 将传统异步电机更换为高效节能电机(IE3及以上标准),高效节能电机的效率比传统电机提升3%-5%,对于高负荷运行的辅助设备,节能效果显著^[1]。此外,为风机、水泵等变负荷设备配备变频器,通过变频调速实现负荷的精准控制,避免设备在额定转速下低效运行,降低无功损耗与能耗。例如,某火电厂锅炉引风机配备变频器后,平均运行负荷从80%降至60%,年减少能耗约80万kWh,减少碳排放约798tCO₂。

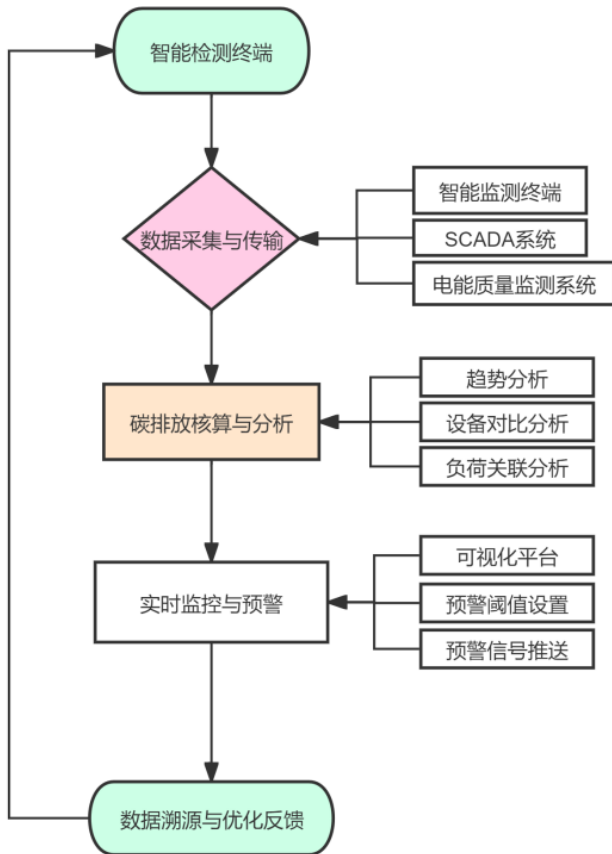


图1 构建监测体系架构

4.2 运行方式优化调整

在保障系统安全稳定的前提下,基于实时碳排放监测数据,优化电气系统的运行方式,实现负荷的合理分配与能耗的精准管控。

1. 发电机负荷优化分配: 采用“低碳优先”的负荷分

配策略,结合各发电机的效率特性与碳排放系数,建立负荷分配优化模型,目标函数为系统总碳排放量最小,约束条件包括发电机出力限制、电网频率约束、机组爬坡速率约束等。例如,在多机组运行时,优先让高效、低碳的机组承担基础负荷,低效机组承担调峰负荷,避免低效机组长期在低负荷工况下运行,从而降低系统整体碳排放。

2. 无功补偿与电压优化: 针对输变电设备的无功损耗,优化无功补偿装置的运行方式,合理配置并联电容器、静止无功发生器(SVG)等设备,将系统功率因数控制在0.95以上,降低无功损耗。同时,优化电网电压水平,在满足设备运行电压要求的前提下,将变压器分接头调整至最优位置,降低输电线路与变压器的损耗。例如,通过无功补偿优化,某火电厂电气系统功率因数从0.9提升至0.96,年减少无功损耗对应的能耗约60万kWh,减少碳排放约598tCO₂。

3. 设备启停优化: 对于辅助设备,根据主体设备的运行负荷与生产需求,优化启停时机,避免设备空转。例如,当锅炉负荷降低时,及时减少引风机、送风机的运行台数;当机组停运时,关闭相关辅助设备电源,避免无效能耗^[4]。同时,建立设备启停台账,通过碳排放监测数据评估启停过程中的碳排放影响,优化启停流程。

4.3 储能与新能源协同优化

结合火电厂现有条件,引入储能设备与新能源发电,构建“火电-储能-新能源”协同运行模式,提升系统调峰能力,降低火电机组的调峰压力,从而减少碳排放。

1. 储能设备协同调度: 利用储能设备的充放电特性,在火电机组低负荷运行时,储能设备充电,吸收多余电能,避免机组低效运行;在机组高负荷运行或电网负荷高峰期,储能设备放电,分担机组出力,降低机组能耗。通过建立储能与火电机组协同调度模型,优化储能设备的充放电策略,实现系统总碳排放量最小。例如,某火电厂配备100MWh蓄电池储能系统后,通过协同调度,机组年平均运行效率提升1.2%,减少碳排放约1500tCO₂。

2. 新能源电力消纳: 在火电厂厂区内或周边建设分布式光伏、风电等新能源项目,利用新能源电力替代部分厂用电,降低厂用电率,从而减少火电机组的发电量与碳排放。例如,某火电厂建设10MW分布式光伏项目,年发电量约1.2亿kWh,全部用于厂用电,年减少火电机组发电量1.2亿kWh,减少碳排放约11.96万tCO₂。并通过储能设备平抑新能源电力的波动性,提升新能源电力的消纳能力^[5]。

5 结语

火电厂电气系统碳排放监测与低碳运行优化是实现火电厂低碳转型的关键环节。本研究通过分析电气系统碳排放来源与特征,为精准控碳提供了数据支撑;从设备能效提升、运行方式优化、储能与新能源协同三个维度提出了低碳运行

优化策略，为高效降碳提供了实践路径。随着技术的不断发展，火电厂电气系统低碳运行优化可进一步向智能化、数字化方向发展；推动火电厂电气系统碳排放监测与优化技术的规模化应用，助力“双碳”目标的实现。

参考文献

- [1] 邹林峰,尹雪梅,侯应权,等.火电厂大型机组电气监控系统一体化分析研究[J].电力设备管理,2025(14)
- [2] 田利胜.基于深度学习的火电厂无人作业斗轮堆取料机电气系统研究[J].电气技术与经济,2025(05).
- [3] 容建华.火力发电厂中电涌保护器（SPD）的应用与防雷效能分析[J].仪器仪表用户,2025,32(05).
- [4] 梅萧.电力系统电气二次设备检修技术分析[J].锅炉制造,2025(03).
- [5] 王文斌.火电厂、光伏、风电混合能源系统电气安装的接地技术优化策略[J].中国高新科技,2025(08).