

Research on Energy Saving, Emission Reduction, and Low-Carbon Transformation Technology for Large Coal-Fired Power Units

Tao Huang

Zheneng Wuwei Energy Co., Ltd., Wuwei, Gansu, 733000, China

Abstract

With the global emphasis on environmental protection and accelerated energy transition, China is striving to achieve its “dual carbon” goals and transform into a new power system. This paper examines four technological pathways for large coal-fired units: low-carbon co-firing technology, multi-energy complementary synergy, hydrogen-ammonia biomass fuel substitution, and surplus power resource utilization. Through theoretical analysis, case validation, and economic evaluation, we propose an integrated energy-saving and emission-reduction solution combining “fuel substitution, system synergy, and resource recycling.” The deep peak regulation and low-carbon transformation of large coal-fired units provide technical paradigms and practical references, aiming to explore new pathways for energy conservation and emission reduction in 1000MW coal-fired peak-shaving units. This research offers theoretical support and practical guidance for the sustainable development of the thermal power industry.

Keywords

Energy conservation and emission reduction of large coal-fired units; low-carbon co-firing; multi-energy complementarity

大型燃煤火电机组节能减排及低碳转型技术研究

黄涛

浙能武威能源有限公司, 中国·甘肃 武威 733000

摘 要

随着全球对环境保护的重视和能源转型的加速,为实现我国能源“双碳”目标与新型电力系统转型。本文针对大型燃煤机组在低碳掺烧技术、多能互补协同、氢氨生物质燃料替代及富裕电量资源化利用四大技术路径。通过理论分析、案例验证与经济性评估,提出了“燃料替代-系统协同-资源循环”三位一体的节能减排方案。大型燃煤机组深度调峰与低碳转型提供了技术范式与实践参考,旨在探索1000MW燃电调峰机组的节能减排新路径,为火电行业的可持续发展提供理论支持和实践指导。

关键词

大型燃煤机组节能减排; 低碳掺烧; 多能互补; 电解制氢制氨

1 引言

研究背景,中国火力发电行业在能源转型浪潮中呈现出“总量维稳、结构优化”的独特发展趋势。据国家能源局数据,2020-2024年我国火电机组发电量从53302.48亿千瓦时增长至63742.6亿千瓦时,年均增速达4.5%。尽管新能源装机占比突破45%,但火电仍承担着60%以上的电力供应,并在极端天气与电网调峰中发挥关键作用,本文的研究目的,即探索1000MW燃电调峰机组的节能减排技术,为火电行业的可持续发展提供参考。研究方法:介绍本文采用的研究方法,包括文献综述、技术分析、案例研究等。

【作者简介】黄涛(1993-),男,中国甘肃张掖人,本科,助理工程师,从事大型火电厂低碳节能减排研究。

2 1000MW 燃煤机组低碳掺烧技术研究

2.1 技术背景及原理

传统燃煤机组主要燃烧单一的煤炭资源,能源利用效率相对较低且碳排放量大,而低碳掺烧技术是指在保证机组稳定运行的前提下,将一定比例的低碳燃料与煤炭进行混合燃烧,以达到降低碳排放、提高能源利用效率的目的。本技术的核心在于优化燃料的燃烧过程,通过合理选择和配比低碳燃料,改变燃烧反应的热力学和动力学条件,从而实现低碳燃烧,在燃烧过程中能够有效减少二氧化碳等温室气体的排放,从热力学角度来看,低碳燃料与煤炭的混合燃烧可以改变燃烧反应的热力学平衡。低碳燃料具有较高的氢碳比,在燃烧过程中能够释放更多的氢气,从而提高燃烧反应的热值和燃烧效率。

2.2 应用技术

在锅炉选择低碳燃料，燃烧过程的动力学特性对燃烧效率和污染物排放有着重要影响。低碳燃料的燃烧动力学特性与常用煤炭有所不同，其燃烧速度较快、燃烧稳定性较好。在混合燃烧过程中，低碳燃料的加入可以改变燃烧反应的动力学条件，促进燃烧反应的进行，减少不完全燃烧产生的污染物（如一氧化碳、颗粒物等）的排放。

3.3 采用燃料预处理与混合方法

传统的燃料输送和混合方式往往存在燃料分布不均匀、燃烧效率低等问题。本技术开发一套先进的燃料预处理与混合系统，能够对不同类型的低碳燃料进行精确的破碎、干燥和筛分处理，确保燃料的粒度、湿度等参数符合燃烧要求。同时，通过特殊的混合装置，将处理后的低碳燃料与煤炭按照精确的比例进行混合，使燃料在燃烧室内能够均匀分布，提高燃烧效率，常规制粉系统提供的粉温度约 60-80℃，通过预加热系统使煤粉温度提高至 140-160 摄氏度（煤粉气流的着火温度通常为 400℃ -600℃）。

2.4 采用智慧化燃烧控制系统

燃烧过程的控制是低碳掺烧技术的关键环节。本技术引入了智能燃烧控制系统，该系统基于先进的传感器技术和大数据分析算法，能够实时监测燃烧室内的温度、压力、氧气含量等参数，并根据这些参数的变化自动调整燃料的供给量、空气的配比以及燃烧器的运行状态。通过智能控制，可以实现燃烧过程的精准优化，快速响应锅炉燃烧工况，最大限度地提高燃料的燃烧效率，减少不完全燃烧产生的污染物排放，同时降低碳排放量。本技术采用协同脱硝与脱硫技术，将脱硝和脱硫装置进行一体化设计和优化。通过在燃烧过程中添加合适的催化剂和吸收剂，同时结合先进的烟气处理工艺，能够在脱硝和脱硫过程中实现协同作用，提高脱除效率，降低运行成本。此外，该技术还可以根据燃烧过程中产生的氮氧化物和二氧化硫的浓度变化，自动调整催化剂和吸收剂的用量，确保排放指标始终满足环保要求。

3 煤电机组低碳掺烧技术体系构建

3.1 煤电机组氢燃料掺烧技术

利用电网富裕电能，电解水制氢气进行储存，在锅炉燃烧室具备条件时进行掺烧。氢气具有高燃烧速度（2.83m/s）和宽可燃极限（4%-75%），在低负荷工况下可改善炉膛温度场分布。使用双通道燃烧器改造，采用氢气-煤粉分级喷入设计，避免氢燃速过高导致的火焰刷墙问题。采用动态氧量控制算法：通过 200+ 传感器实时调整空燃比，将 NOx 生成量控制在 30mg/Nm³ 以下^[1]。

3.2 氨燃料掺烧技术

利用电网富裕电能，电解水制氢气进行二次转化生成氨气，在锅炉燃烧室具备条件时进行掺烧。氨作为无碳燃料（燃烧产物 N₂ 和 H₂O），其掺烧技术受到广泛关注。氨燃

烧易生成 NOx（热力型 + 燃料型），采用“分级燃烧 + SCR 脱硝协同控制”技术，一级燃烧区：富燃料燃烧（过量空气系数 0.85）抑制 NOx 生成，二级还原区：喷入氨逃逸控制 < 2ppm 的还原剂，总脱硝效率达 98%。同时，采用 316L 不锈钢材质改造氨输送管道，耐蚀寿命延长至 8 年。

3.3 生物质与牛粪掺烧技术

生物质燃料具有高挥发分（> 70%）、低硫氮（< 0.5%）特性，但存在热值波动大（± 800kcal/kg）、易结渣等问题。通过“破碎 - 干燥 - 成型”预处理工艺，将牛粪制成直径 5cm 颗粒燃料，热值稳定至 2000kcal/kg，含杂率 < 5%。掺烧系统采用“独立给料 + 磨煤机改造”方案，单台 660MW 机组年掺烧 20 万吨牛粪，节约标煤 8.5 万吨。

4 风力电、光伏发电、火电、化学储能互相补给

随着我国电力生产形势的不断发展，能源结构转型成为迫在眉睫。风电、光伏发电装机规模及发电量占比持续提升。然而，可再生能源发电的间歇性和不稳定性问题依然存在，而火电作为传统能源，在灵活性改造后可为电力系统提供重要支撑。在此背景下，风力发电、光伏发电、火电与化学储能的互相补给技术应运而生，以满足不同地区的用电需求。

技术原理与优势，火电通过灵活性改造，煤电可从基荷电源向调节电源、备用电源转型。在新能源发电充足时，火电可降低出力，甚至停机备用，在新能源发电不足时，火电可迅速启动，提供稳定的电力输出。化学储能技术，化学储能技术是解决可再生能源发电间歇性问题的的重要手段。当前，化学储能技术呈现多元化发展趋势，包括锂离子电池、液流电池、钠离子电池等多种类型。这些储能技术各有优势，可满足不同场景下的储能需求。

风力发电 + 光伏发电互补与燃煤发电在电量富裕时的制氢、制氨进而应用，通常从晚上 23:00 到次日早晨 7:00，这是一天中电价的低谷时段。此时的电价可能低至每度电 0.1 元到 0.2 元。原因非常直观，绝大多数工厂停工，居民用电也降至最低。然而在风资源丰富的北方地区，夜间往往是大风时段，风机发电量较高。在电量富裕时段，风电、光伏发电出力远超负荷需求时，制氢、制氨成为一种有效的储能方式。利用可再生能源发电进行电解水制氢，可将电能转化为便于长期存储和运输的氢气。氢气不仅可以用于燃料电池发电，可进行锅炉掺烧氢气，替代燃料，还可作为化工原料，用于合成氨、甲醇等化学品，这些电能的产物储存加以销售，为企业带来较为可观的收益。可有效解决弃风问题，提升电能消纳能力^[2]。

5 利用新能源降低燃煤发电机组厂用电率

燃煤火电机组长期以来是国家能源供应的“压舱石”和“稳定器”。然而，随着“双碳”目标的深入推进，高碳

排放的燃煤机组必须寻求绿色、高效的转型之路。燃煤火电机组厂用电率，即电厂自身耗电量与发电量的比率，是衡量机组运行经济性的核心指标之一，尤其大型燃煤火电机组厂用电率约 4.16%，在低负荷调峰期间会更高，增大了燃煤火电机组的能源损耗。传统模式下，机组辅机（如引风机、送风机、给水泵、循环水泵等）的耗电是厂用电的绝对主体，其运行方式相对粗放，灵活性差。与此同时，风力发电与光伏发电具有清洁、零碳的特点，但其出力的间歇性、波动性和反调峰特性（光伏日间出力高峰与用电高峰部分重合，但夜间为零）给电网稳定带来了巨大压力。化学储能（以电化学储能为代表）则具有快速响应、精准控制的能力，是平滑波动、移峰填谷的理想手段。

利用新能源降低燃煤发电机组厂用电率技术的关键思路在于不再将火电、风电、光伏视为独立的电源点，而是将其与化学储能整合为一个“虚拟的整体电厂”。通过智慧化的协同控制策略，让风、光、储成为燃煤机组的“虚拟辅机”或“外部能量包”，直接或间接地减少机组辅机的能耗，从而系统性、创新性地降低整个能源供应单元的厂用电率。此技术的理论根基源于系统工程的“整体最优”原则，而非“局部最优”。其科学性体现在以下几个方面：

能量时空转移原理：化学储能是实现能量时空转移的核心。它可以将不可控、波动的风、光能量，转换为稳定、可控的电力输出。这不仅平滑了新能源出力，更为火电机组提供了一种“外部缓冲”，使其不必频繁调整出力来跟踪负荷变化，从而稳定运行在更高效区间。

动力耦合理论：在物理层面，可以考虑将部分厂用电负荷（如厂区照明、部分循环水泵、脱硫系统的部分浆液循环泵等设备）由自发的风电、光伏直接供电，形成“自发自用”的微电网模式。这相当于用“零碳电”替代了“高碳电”，直接降低了厂用电量的绝对值。利用智慧化协调厂用电系统微电网最优控制理论：整个互补系统的“大脑”是一个高级算法控制中心（如 A-AGC）。它基于超短期风光功率预测、电网调度指令、机组实时运行状态和储能 SOC (state of charge, 荷电状态)，进行毫秒级至分钟级的优化计算，决策出最优的功率分配指令^[3]。

创新性技术方案与实践路径，作为一名从事电力生产的人员，我认为该技术的创新性并非空中楼阁，而是可落地、可操作的工程实践。

方案一：“储能平滑+火电调峰”间接降低厂用电率，场景：风电场/光伏电站与燃煤电厂位于同一厂区或同一输电走廊，形成风光火储一体化基地。风电、光伏发出的波动性电力先经过储能系统进行平滑处理，形成一个稳定、可预测的“绿色电源包”。然后，这个“绿色电源包”与火电机组打捆，共同响应电网调度。降低厂用电率机理，火电机组不必再为了“削峰填谷”而频繁启停磨煤机、大幅调整风机、

凝泵转速等。机组可以维持在一个更平稳、更接近设计工况的高效负荷点运行。众所周知，辅机在额定工况附近效率最高，频繁变工况会导致额外能耗。机组运行平稳后，其自身的厂用电率会自然下降。储能在此扮演了“稳定器”角色，让火电“减负”。

方案二：“绿电直供厂用电”直接降低厂用电率，在火电厂区内或邻近区域建设分布式风电和光伏，并配套建设小型储能系统。构建一个面向厂用电的“微电网”。优先使用风电和光伏电力供给厂内照明、空调、循环水系统、化学水处理等公用负荷。多余绿电可存入储能或上网；绿电不足时，由厂用电系统或储能补充。这是最直接、最显著的方式，原本需要从发电机端经过变压器、配电装置“取用”的电能，现在被自发自用的绿电所替代。厂用电量（分子）直接减少，而机组的上网电量（分母）不变甚至因运行更稳定而增加，厂用电率指标将得到极大改善。这相当于为电厂穿上了一件“绿色节能外套”。

方案三：“储能替代机组黑启动/辅机应急电源”提升系统经济性，电厂需配置昂贵的柴油发电机作为黑启动电源和重要辅机的应急电源。利用大容量化学储能系统（如锂离子电池储能电站）替代传统的柴油发电机。虽然这不直接降低日常厂用电率，但从全生命周期成本看，储能系统在完成应急功能的同时，日常还可参与调峰调频服务，产生收益。其充放电效率远高于柴油发电，且维护成本低、无污染。这优化了电厂的资产结构，间接提升了整体经济性，为综合节能降耗提供了新思路。

6 结语

预期效益与总结展望，通过构建风-光-火-储多元互补系统，我们能够在三个层面上降低厂用电率：直接降低，绿电直供厂用电，减少厂用电量的绝对值。间接降低，稳定火电运行工况，提高辅机运行效率，减少变工况损耗。系统降低，提升整个能源基地的可靠性和经济性，减少非计划停运和启停损耗。这项技术具有很强的创新性，它打破了传统电源形式的壁垒，实现了跨能源类别的协同优化；其理论性建立在坚实的系统工程、控制理论和能源科学基础之上；其科学性则体现在通过可量化、可预测、可控制的手段，达成明确的节能降耗目标。

参考文献

- [1] 王丽, 张强, 李强. 火电厂厂用电节能改造技术研究[J]. 热能动力工程, 2019, 34(5): 1-6.
- [2] 赵兵, 王鑫, 孙宏斌. 智能电网背景下火力发电灵活性改造技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3105-3118.
- [3] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望: 试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1-11+25.