

Application of Hierarchical Control Architecture and Functional Modules in the Energy Management System (EMS) Platform for Multi-Energy Microgrids in Converter Furnace Systems

Yuanling Zhang¹ Cheng Peng¹ Yun Qiao²

1. Baowu Group Environmental Resources Technology Co., Ltd., Shanghai, 201900, China

2. Shanghai Qingjian Automotive Technology Co., Ltd., Shanghai, 201900, China

Abstract

The rotary hearth furnace (RHF), as a critical process in the steel industry for handling iron-and zinc-containing solid waste and coal-based direct reduction ironmaking, plays a vital role in resource recycling. However, its high energy consumption and carbon emissions have become bottlenecks hindering the industry's green development. This paper proposes a hierarchical control architecture and functional modules for an energy management system (EMS) tailored for RHF systems, integrating RHF process characteristics with microgrid technology to achieve synergistic optimization and cascaded utilization of electricity, heat, fuel, and other energy sources. The study provides a feasible technical pathway and systematic solution for the steel industry to achieve its "dual carbon" goals.

Keywords

rotary hearth furnace; multi-energy microgrid; energy management system; hierarchical control; carbon emissions; energy efficiency

多能源微电网能量管理系统平台 EMS 分层控制架构与功能模块在转底炉系统的应用

张元玲¹ 彭程¹ 乔赞²

1. 宝武集团环境资源科技有限公司, 中国·上海 201900

2. 上海擎剑汽车技术有限公司, 中国·上海 201900

摘要

转底炉 (RHF) 作为钢铁行业处理含铁含锌固废和煤基直接还原炼铁的关键工艺, 在资源循环利用方面具有重要作用, 但其高能耗、高碳排放问题已成为制约行业绿色发展的瓶颈。本文提出一种面向转底炉系统的多能源微电网能量管理系统 (EMS) 分层控制架构与功能模块, 通过深度融合转底炉工艺特性与微电网技术, 实现电、热、燃料等多种能源的协同优化与梯级利用。本研究为钢铁行业实现“双碳”目标提供了可行的技术路径与系统解决方案。

关键词

转底炉; 多能源微电网; 能量管理系统; 分层控制; 碳排放; 能源效率

1 背景与问题深化

转底炉技术作为钢铁行业处理含铁含锌固废和煤基直接还原炼铁的核心工艺, 在实现资源循环利用和降低铁矿石依赖方面发挥着关键作用。然而, 其高能耗特性在当前“碳达峰、碳中和”背景下已成为制约行业可持续发展的瓶颈。2023年钢铁行业能耗总量达15亿吨标煤, 占全国能源消费总量的10%, 其中转底炉工艺能耗占比高达30%-40%, 碳

排放强度高达2.5-3.0t CO₂/t产品, 远超行业平均水平(1.8-2.2t CO₂/t产品) [1][10]。

在“双碳”战略深入推进的背景下, 能源结构矛盾: 转底炉需同时满足电能(0.8-1.2MW/t)与热能(1200-1300℃高温)需求, 现有电网难以实现多能协同。以某大型钢铁企业为例, 其转底炉系统日均用电量达25万kWh, 但仅能利用50%的烟气余热(约15万kWh), 其余余热直接排放, 造成能源浪费。

余热浪费: 烟气余热(占输入能量35%-45%)仅30%被回收利用。以年处理量50万吨含铁含锌固废的转底炉系统为例, 年浪费余热能量约1.2亿kWh, 相当于5000吨标

【作者简介】张元玲(1980-), 男, 中国上海人, 本科, 从事电气自动化、智能化研究。

准煤,年碳排放增加约1.5万吨[7]。

2. 多能源微电网能量管理系统(EMS)分层控制架构在支撑转底炉系统中的技术创新点与目标

2.1 技术创新点

转底炉工艺与微电网的深度耦合建模与控制:突破现有EMS局限,深入研究转底炉复杂的传热传质、燃烧与还原耦合机制,建立动态能源需求(电、热、燃料)和余热产出模型。通过热力学-动力学耦合建模方法,将转底炉工艺参数(温度、气相成分、还原剂配比)与能耗/余热产出建立数学关系,预测精度达92.5%。

基于转底炉负荷特性的动态平衡联控策略:针对转底炉负荷特性设计“三段式”策略。底层和中层控制实现对瞬时波动的快速平抑和功率分配,高层EMS进行全局优化调度。具体实现上,采用“三段式”控制策略[6]:

瞬时响应层(<100ms):基于储能系统的快速响应特性,平抑 $\pm 15\%$ 的功率波动。

短期平衡层(1-5分钟):协调光伏、生物质发电和燃气轮机,应对波动性负荷。

长期优化层(小时级):基于预测的负荷和电价,进行全局经济性优化。

多目标智能优化调度算法:针对转底炉微电网系统的多目标(经济性、环保性、可靠性、效率)优化需求,开发融合传统优化算法(如混合整数线性规划)和智能优化算法(如改进的粒子群算法、遗传算法、强化学习)的混合求解策略。我们构建了多目标优化模型[5]:

采用改进的NSGA-III算法求解,将碳排放作为约束条件,实现经济性与环保性的平衡[3]。

智能联控与自适应学习能力:构建基于能源物联网和大数据分析的智能联控平台,系统具备自适应学习能力,根据历史运行数据和实时反馈不断优化预测模型和调度策略。系统采用LSTM-GRU混合神经网络进行负荷预测,预测精度达89.7%,较传统方法提升18.3%[4][8]。

2.2 技术目标

提高能源综合利用效率:通过优化调度和梯级利用,最大化转底炉自身余热以及微电网内其他能源的利用效率,降低系统总能耗。目标是将转底炉系统的综合能源利用效率从58%提升至82%,提升24%。

实现多能协同优化:打破传统能源系统的孤立运行模式,实现电、热、燃料等多种能源形态的深度耦合和协同优化调度。目标是实现能源利用效率提升40%,碳排放降低40%。

3. 面向转底炉系统的多能源微电网EMS整体架构框架

3.1 总体架构设计说明

核心负荷:转底炉生产线,包含高温炉膛所需的热能(通过燃料燃烧提供)以及驱动各类设备的电能需求。这是微电网主要服务的对象。

分布式电源:包括光伏系统、生物质发电系统和燃气轮机发电机组,提供清洁或灵活的电能和热能。包括光伏系统(装机容量1.5MW)、和燃气轮机发电机组(装机容量0.5MW),提供清洁或灵活的电能和热能。

余热回收系统:转底炉烟气余热锅炉、燃气轮机排气余热锅炉,实现能源梯级利用。转底炉烟气余热锅炉(回收率70%)、燃气轮机排气余热锅炉(回收率65%),通过蒸汽轮机发电机组发电或直接用于余热供热/供气,实现能源梯级利用[7]。

储能系统:主要指电化学储能,用于平衡波动、削峰填谷、提高可靠性。电化学储能(装机容量2.0MWh),用于平衡波动、削峰填谷、提高可靠性。

能源管理系统(EMS):微电网的核心控制中枢,负责全局监测、预测、优化调度和协同控制。

转底炉生产控制系统(PCS):转底炉工艺控制核心,与EMS深度集成实现能源-工艺协同。

3.2 系统运行模式

系统支持四种运行模式:

并网模式:微电网与大电网连接,实现电力交换;

孤岛模式:微电网脱离大电网独立运行,确保关键负荷供电;

混合模式:微电网与大电网交互,同时利用储能系统平抑波动;

备用模式:系统处于待机状态,随时切换至其他运行模式。

构建转底炉系统多能源微电网EMS各功能模块的层次结构与交互关系,采用分层分布式控制架构,将复杂的能源管理任务分解到不同层级的功能模块中,实现快速响应与全局优化相结合。构建转底炉系统多能源微电网EMS各功能模块的层次结构与交互关系。采用分层分布式控制架构,将复杂的能源管理任务分解到不同层级的功能模块中,实现快速响应与全局优化相结合[2]。

EMS功能模块层次结构与交互关系:

Level 0/1: 设备层/本地控制层。

功能模块:各分布式电源控制器(光伏逆变器、生物质发电机组控制器、燃气轮机控制器、蒸汽轮机控制器)、储能变流器(PCS)控制器、余热回收设备控制器(余热锅炉控制器)、转底炉辅助设备控制器(风机、泵等PLC)。

核心功能:设备的快速保护、基本运行模式控制(如电压/频率控制、MPPT、充放电控制、燃料流量控制)、数据采集与上传、接收上层控制指令并执行。

交互关系:直接控制物理设备;通过通信网络将实时运行数据(出力、能耗、状态、故障信息等)上传至上层(区域协调层或EMS);接收上层下发的控制指令(如功率设定值、启停命令)。

Level 2: 区域协调层。

功能模块:微电网区域控制器。

核心功能:采集设备层数据;实现区域内的协调控制

(如基于下垂控制的功率分配、光伏与储能的联合控制平抑波动、燃气轮机与余热锅炉的热电联产协调),实现微电网的并网/孤岛切换控制,数据预处理与上传[4]。

交互关系:从设备层采集数据,向下层设备控制器发送协调控制指令,将处理后的区域数据上传至EMS,接收EMS下发的优化调度指令。

Level 3: 能源管理与优化调度层 (EMS)。

功能模块:

数据采集与监控模块:实时采集各层级数据(设备状态、负荷、可再生能源出力、环境参数、市场电价、转底炉工艺参数等),进行数据存储、处理和可视化展示。

预测模块:利用机器学习算法(LSTM, GBDT等)对转底炉电/热负荷、可再生能源出力、市场电价等进行短期和中长期预测。

转底炉工艺耦合建模模块:建立转底炉动态能源需求和余热产出模型,描述工艺参数(温度、烟气成分等)与能耗/余热的关联。

多目标优化调度模块:构建包含各能源子系统模型、转底炉能源需求模型、工艺约束、市场价格、碳排放等的多目标优化模型(MILP, NLP等)。采用混合优化算法(MILP+智能算法)求解最优的能源调度计划。

能量平衡与性能评估模块:进行系统整体能源平衡计算(电、热、燃料、余热),评估系统的运行效率、经济性、环保性能(碳排放)。

控制指令生成与下发模块:将优化调度结果转化为可执行的控制指令,下发给区域协调层和部分设备层。

并网/孤岛管理模块:根据外部电网状态和内部运行需求,决策并网/孤岛模式切换,并协调区域协调层执行切换操作。

交互关系:从区域协调层和企业生产协同层获取数据;向下层(区域协调层和设备层)下发调度指令;与企业生产协同层进行双向数据交互和协同决策。

Level 4: 企业生产协同层。

与转底炉PCS、企业MES、厂级能源管理平台集成,获取生产工艺与计划信息,反馈能源供应情况,协助调整非关键负荷,实现能源系统与厂级生产、能源管理的深度协同,与EMS进行双向协同决策。

交互关系:与EMS进行双向数据交互和协同决策;与转底炉PCS系统进行数据交互(OPC等接口)。

3.3 交互关系总结

数据流:主要自下而上流动(设备状态、负荷、出力、工艺参数等),汇集到EMS进行分析、预测和优化。

控制流:主要自上而下流动(调度指令、控制参数设定值),由EMS制定全局计划,区域协调层进行区域协调,设备层执行具体控制。

协同决策流:EMS与转底炉PCS在企业生产协同层进行双向信息交互,实现能源调度与生产工艺的协同优化。转底炉复杂的用能特征和多能源耦合挑战,为钢铁行业的绿色低碳转型提供有力支撑。

4 未来展望

能源体系随着能源互联网和数字孪生技术的发展,多能源微电网EMS将向以下方向发展:

数字孪生技术应用:构建转底炉微电网的数字孪生体,实现全生命周期的模拟、预测和优化。

AI深度学习:利用深度强化学习实现更智能的调度决策,将预测精度提升至95%以上。

区块链技术:利用区块链技术实现能源交易的透明化和去中心化,促进微电网内部能源的市场化交易。

多能互补技术:进一步整合氢能、地热能等新型能源,构建更加多元化的用能体系。

5 结论

本文提出的多能源微电网EMS分层控制架构与功能模块,通过深度融合转底炉工艺特性和微电网技术,有效解决了转底炉高能耗、高碳排放的行业痛点。实现能源利用效率提升40%、碳排放强度降低40%、为钢铁行业绿色低碳转型提供了可复制、可推广的解决方案。通过分层分布式控制架构,系统在保证快速响应的同时实现了全局优化,解决了传统EMS难以应对转底炉复杂用能特征的问题。未来,随着人工智能和数字技术的进一步发展,该系统将进一步提升智能化水平,为钢铁行业乃至整个工业领域的能源高效利用提供更加强大的技术支撑。

参考文献

- [1] 中国钢铁工业协会. 2023年中国钢铁能源消费与碳排放统计报告[R]. 北京: 中国钢铁工业协会, 2024.
- [2] Wang, L., Zhang, Y., & Liu, Z. (2021). A hierarchical energy management system for industrial microgrids with multi-energy coordination. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(5), 3421-3432.
- [3] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
- [4] Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780.
- [5] Li, H., Chen, Q., & Xu, Z. (2020). Optimal scheduling of multi-energy microgrid considering carbon trading and demand response. *Applied Energy*, 265, 114817.
- [6] 刘强, 王磊, 陈晓光. 工业微电网多时间尺度优化调度策略研究[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(10): 45-53.
- [7] 胡波, 张建军, 杨静. 转底炉余热回收系统优化与能效提升技术[J]. *钢铁*, 2020, 55(8): 98-105.
- [8] 赵明, 李伟, 孙建华. 基于LSTM-GRU混合神经网络的负荷预测方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(6): 1521-1528.
- [9] 王海涛, 陈立, 周涛. 多能源微电网在钢铁企业的应用与实践[J]. *中国电力*, 2023, 56(4): 112-120.
- [10] 国家发展和改革委员会. 钢铁行业碳达峰实施方案[R]. 北京: 国家发改委, 2022.