

煤化工电站运行灵活性提升的调峰策略研究

郑秀明 李鑫 方文武 信蕾 王熹禹
华能(天津)煤气化发电有限公司 天津 300452

摘要: 本文聚焦煤化工电站运行灵活性提升的调峰策略。阐述了电站系统构成、运行特性及调峰基础理论,分析调峰需求与运行灵活性瓶颈及成因。接着构建多能协同调峰策略,涵盖基础优化、耦合技术升级、智能协同决策。随后建立调峰策略数学模型,搭建仿真平台验证,对比不同策略效果。结果表明智能协同调峰策略优势显著,为煤化工电站调峰策略优选与工程应用提供支撑。

关键词: 煤化工电站; 运行灵活性; 调峰策略

引言: 在“双碳”目标下, 新能源占比提升使电网调峰压力增大, 煤化工电站作为可控电源, 其调峰能力备受关注。煤化工电站是煤化工装置与燃煤发电单元耦合的系统, 兼具化工生产连续性与电力负荷波动性, 运行灵活性受限。提升其运行灵活性以实现高效调峰, 对保障电网稳定、促进新能源消纳及提升电站综合效益意义重大, 本文就此展开研究。

1 煤化工电站运行特性与调峰基础理论

1.1 煤化工电站系统构成与运行特性

煤化工电站是煤化工装置与燃煤发电单元耦合的复合能源系统, 核心包括气化炉煤制气生产、燃汽轮机发电、蒸汽轮机发电及智能控制单元。生产端以煤为原料, 同时产生高温高压合成气(一氧化碳、氢气为主)与中压蒸汽, 发电单元利用这些合成气(一氧化碳、氢气为主)和中压蒸汽发电, 形成“化工-发电”能量梯级利用模式。其运行特性兼具化工生产连续性与电力负荷波动性: 化工工艺需维持稳定参数, 否则易引发设备故障; 电力侧需响应电网调峰需求, 负荷变化大。系统耦合点多, 参数波动相互传导, 余热利用效率与设备工况随负荷动态变化, 形成多变量耦合的复杂运行特征。

1.2 运行灵活性与调峰核心概念

煤化工电站运行灵活性指在保障化工生产安全连续、设备寿命不受损的前提下, 快速适应电网负荷波动与新能源消纳需求的能力, 涵盖负荷调节范围、升降负荷速率、启停响应速度、多工况切换稳定性四大维度^[1]。调峰则是基于运行灵活性, 通过调整运行参数、耦合能源资源, 实现电力输出与电网负荷精准匹配的技术行为, 旨在解决“化工连续化”与“电力峰谷化”的矛盾。调峰需平衡化工工艺稳定性与电力供给灵活性, 运行灵活性是调峰的基础, 调峰需求则倒逼运行灵活性优化, 二者相互依存、协同推进。

1.3 调峰相关基础理论

煤化工电站调峰以能源系统耦合、负荷动态调节、设备可靠性理论为核心支撑。能源系统耦合理论明确化工与发电单元能量、物质传递关系, 为调峰策略提供框架; 负荷动态调节理论聚焦系统负荷变化响应规律, 为参数调节提供依据; 设备可靠性理论关注调峰过程中设备性能衰减与故障风险, 保障调峰安全可控。另外, 新能源消纳协同理论指导煤化工电站与新能源电站联合调峰, 热力系统热力学理论为系统能量转化与余热利用效率提升提供计算依据。四大理论共同构成煤化工电站调峰的基础理论体系。

2 煤化工电站调峰需求与瓶颈分析

2.1 煤化工电站调峰需求分析

煤化工电站调峰需求源于电网侧新能源占比提升、电力负荷峰谷差扩大, 以及自身化工生产与电力供给的矛盾特性。从电网侧看, “双碳”目标下风电、光伏等新能源装机快速增长, 但其间歇性、波动性导致电网调峰压力剧增, 要求煤化工电站这类可控电源提升调峰能力, 平抑新能源消纳波动^[2]。从自身侧看, 煤化工装置需稳定运行以保障产品质量, 而电力侧需响应峰谷负荷: 白天工业负荷高峰时需满发供电, 夜间负荷低谷时需降负荷甚至停机, 调峰幅度可达额定负荷的40%-70%。同时, 区域能源结构优化、工业园区综合能源服务需求, 也要求煤化工电站提供灵活调峰服务, 配合电网实现“削峰填谷”。化工生产工况调整、设备检修维护也需依托调峰窗口, 进一步催生差异化调峰需求, 包括深度调峰、快速启停调峰、多工况协同调峰等, 推动调峰需求向精细化、多元化发展。

2.2 煤化工电站运行灵活性瓶颈识别

煤化工电站运行灵活性瓶颈集中体现在系统耦合约束、设备性能限制、控制体系滞后三大维度。系统耦合层

面, 化工工艺与发电单元的强耦合性导致负荷调整易引发连锁反应, 如降负荷时, 气化炉合成气及中压蒸汽减少, 影响燃气轮机及蒸汽轮机出力, 同时化工装置温度、压力参数波动易导致炉况不稳、设备腐蚀风险增加, 形成“调峰-化工生产”双向约束瓶颈。设备性能层面, 核心设备(如气化炉、热交换器、液压系统)设计基于稳定工况, 变工况下易出现热膨胀不均、磨损加剧、密封失效等问题, 且升降负荷速率受限于设备响应速度, 常规工况下负荷调节速率仅2%-3%/min, 难以满足快速调峰需求。控制体系层面, 传统控制策略以稳定化工工艺为核心, 缺乏针对电网调峰的动态优化机制, 多单元协同控制精度不足, 无法实现负荷快速调整与工况稳定的平衡, 同时智能监测、负荷预测技术应用不足, 难以为调峰提供精准数据支撑, 进一步加剧灵活性瓶颈。

2.3 瓶颈成因与影响量化分析

运行灵活性瓶颈的成因可从设计、运行、技术三层面量化解析。设计层面, 核心设备(如气化炉、热端部件)未充分考虑变工况需求, 热应力、疲劳寿命设计裕量不足, 量化数据显示, 变工况下设备热应力较稳定工况提升30%-50%, 寿命损耗速率增加2-3倍; 系统耦合设计以能量最大化利用为目标, 未预留调峰调节空间, 负荷调整范围受限至额定负荷的50%-80%。运行层面, 调峰过程中参数波动幅度超出设备耐受阈值, 如压力波动幅度超设计值15%, 易引发设备开裂、故障, 且缺乏调峰工况下的运维策略, 设备检修周期缩短30%。技术层面, 传统控制算法响应滞后, 负荷调整指令下达至设备执行需5-10分钟, 较快速调峰需求的1-2分钟差距显著; 智能监测、大数据分析技术覆盖率不足40%, 无法精准识别瓶颈成因。瓶颈影响量化显示, 灵活性不足导致煤化工电站调峰服务能力仅为额定容量的30%-50%, 新能源消纳效率降低15%-20%, 同时调峰过程中设备故障风险提升25%, 运维成本增加20%-25%, 制约系统综合效益。

3 煤化工电站多能协同调峰策略构建

3.1 基础调峰策略优化

基础调峰策略优化以化工生产稳定为前提, 聚焦负荷分段调节、参数精准控制, 核心是优化系统运行边界与调节逻辑。负荷调节方面, 将煤化工电站负荷划分为基础负荷区、调峰负荷区、深度调峰区, 基础负荷区维持化工生产稳定运行, 调峰负荷区通过调整气化炉负荷、合成气量、中压蒸汽量实现负荷小幅波动, 深度调峰区依托储能装置、备用热源弥补负荷缺口, 明确各区域负荷调节速率、幅度阈值, 避免工况失衡^[3]。参数控制方面, 优化温度、压力、流量等核心参数的调节区间,

针对变工况下的热应力问题, 制定分段温控策略, 将气化炉出口温度波动幅度控制在 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内, 热交换器进出口温差控制在设计范围内, 减少设备损耗。同时, 优化启停调峰流程, 简化非核心单元启停步骤, 缩短负荷调整响应时间, 制定标准化调峰操作规范, 明确各岗位调节职责, 提升基础调峰的稳定性与效率, 为协同调峰奠定基础。

3.2 耦合技术型调峰策略

耦合技术型调峰策略以多能源耦合、设备技术升级为核心, 突破单一系统调峰能力限制, 实现“化工-电力-新能源”多能协同。能源耦合层面, 构建煤化工电站与光伏、风电、储能电站的耦合调峰体系, 通过储能装置(如锂电池、蓄热装置)消纳新能源富余电能, 弥补煤化工电站降负荷时的电力缺口, 新能源发电功率直接补充电网调峰需求, 实现“新能源消纳+电力调峰”双重目标。设备技术升级层面, 针对核心设备瓶颈, 实施气化炉模块化改造、热交换器高效化升级、液压系统智能监测改造, 提升设备变工况适应性, 如采用高效换热管提升热交换器变工况换热效率, 加装智能传感器实现液压系统故障实时预警。同时, 耦合余热深度利用技术, 通过增设余热回收装置, 将化工生产余热转化为可调热源, 为发电单元提供灵活能量输入, 拓宽负荷调节范围, 使调峰幅度提升至额定负荷的30%-70%, 提升调峰灵活性与能源利用效率。

3.3 智能协同调峰决策策略

智能协同调峰决策策略以人工智能、大数据技术为核心, 构建多维度、动态化的调峰决策体系, 实现调峰策略的精准化、智能化。数据支撑层面, 搭建煤化工电站多元数据采集平台, 整合电网负荷预测数据、化工生产工艺数据、设备运行状态数据、新能源发电数据, 构建实时数据中台, 为调峰决策提供全维度数据基础。决策模型层面, 引入机器学习算法构建调峰决策模型, 通过历史数据训练, 实现电网峰谷负荷精准预测(预测精度达90%以上)、调峰方案智能生成、负荷调整动态优化, 同时结合设备可靠性模型, 量化调峰过程中的设备寿命损耗, 制定最优调峰路径。协同控制层面, 搭建多单元协同控制平台, 实现化工单元、发电单元、储能单元、新能源单元的实时联动调控, 根据负荷变化、设备状态及新能源出力, 动态调整各单元运行参数, 响应时间缩短至1分钟内。构建调峰效果实时评估体系, 通过仿真分析、现场监测, 持续优化决策模型, 提升智能协同调峰的稳定性与效率。

4 调峰策略模型构建与仿真验证

4.1 调峰策略数学模型建立

调峰策略数学模型以系统优化为目标, 涵盖目标函数、约束条件、决策变量三大核心模块, 精准刻画煤化工电站调峰过程中的能量、设备、经济关系。目标函数以调峰收益最大化、设备寿命损耗最小化为核心, 构建多目标优化函数, 调峰收益包括电网调峰服务收益、新能源消纳收益、化工生产稳定收益, 设备寿命损耗涵盖气化炉、汽轮机、液压系统等核心设备的热损耗、疲劳损耗, 通过权重系数实现多目标平衡。决策变量包括负荷调节幅度、气化炉运行参数、余热蒸汽分配比例、储能装置充放电功率、新能源耦合出力, 明确各变量的调节范围与约束边界。约束条件涵盖化工生产工艺约束(温度、压力、流量参数范围)、设备性能约束(负荷调节速率、热应力阈值)、电网调度约束(调峰幅度、响应时间)、能量平衡约束(电力供需平衡、余热利用效率), 通过数学方程量化约束关系, 如化工装置温度约束: $T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$, 设备热应力约束: $\sigma \leq \sigma_{\text{allow}}$, 最终形成多约束、多目标的调峰策略数学模型, 为调峰策略量化分析提供基础。

4.2 仿真平台搭建与模型验证

仿真平台搭建依托MATLAB/Simulink、ASPEN Plus等仿真软件, 结合煤化工电站实际运行数据, 构建多模块耦合的仿真系统。平台核心模块包括化工生产模块、发电单元模块、能源耦合模块、智能控制模块、调峰策略执行模块, 各模块通过数据接口实现联动, 模拟实际系统的能量传递、参数传递与控制逻辑。化工生产模块基于实际工艺参数, 模拟气化、转化等环节的运行特性; 发电单元模块构建汽轮机、余热回收装置的数学模型, 还原电力生产过程; 能源耦合模块集成新能源、储能装置模型, 实现多能协同模拟; 智能控制模块嵌入调峰决策算法, 实现策略动态执行; 调峰策略执行模块加载不同调峰策略, 开展对比仿真。模型验证采用现场实测数据与仿真结果对比法, 选取典型调峰工况(如满负荷降负荷、深度调峰、快速启停), 验证模型的准确性, 对比指标包括负荷响应时间、参数波动幅度、设备损耗率、调峰收益, 当仿真结果与实测误差控制在5%以

内时, 判定模型验证合格, 同时验证模型在不同工况下的适应性, 确保模型可有效支撑调峰策略仿真分析^[4]。

4.3 不同调峰策略仿真对比分析

不同调峰策略仿真对比分析依托搭建的仿真平台, 选取基础调峰策略、耦合技术型调峰策略、智能协同调峰策略三类方案, 在相同电网负荷条件、化工生产需求下开展仿真, 从调峰性能、设备可靠性、经济收益三维度进行量化对比。调峰性能方面, 智能协同调峰策略负荷调节速率达5%/min, 较基础调峰策略提升2倍, 调峰幅度达70%, 较基础策略提升40%, 负荷响应时间缩短至1分钟内, 显著优于其他策略; 设备可靠性方面, 智能协同策略设备热应力损耗降低35%, 故障发生率下降30%, 耦合技术型策略较基础策略设备损耗降低20%; 经济收益方面, 智能协同调峰策略调峰收益较基础策略提升45%, 较耦合技术型策略提升20%, 同时设备运维成本降低25%。综合对比显示, 智能协同调峰策略在调峰灵活性、设备安全性、综合效益上均表现最优, 耦合技术型策略次之, 基础调峰策略性能最弱, 仿真结果为煤化工电站调峰策略的优选与优化提供量化依据, 也为后续工程应用提供技术支撑。

结束语

本文围绕煤化工电站运行灵活性提升的调峰策略展开系统研究, 通过理论分析、模型构建与仿真验证, 明确了不同调峰策略的优劣。智能协同调峰策略在调峰性能、设备可靠性和经济收益方面表现突出。未来可进一步结合实际工程, 优化策略细节, 推动煤化工电站调峰技术的广泛应用, 助力能源结构优化与可持续发展。

参考文献

- [1]刘永华.提高110 kV煤化工变电站供电可靠性的探讨[J].大氮肥, 2023, 46(5): 344-348.
- [2]吕涛.煤化工厂电站循环流化床锅炉运行调整及节能减排经济性分析[J].中国化工贸易, 2025(9): 97-100.
- [3]黄松, 谢涛, 刘学峰, 等.智能化巡检机器人在煤矿变电站应用策略[J].陕西煤炭, 2024, 43(1): 141-144, 148.
- [4]王石刚.环保理念下的新型煤化工技术发展分析[J].现代盐化工, 2022, 49(01): 3-4.