

双碳目标下汽轮机组变工况运行优化与能耗管控策略研究——基于深度调峰需求的实践

岳伟, 陆志强, 邵利强

锡林郭勒热电有限公司, 内蒙古 锡林郭勒 026000

DOI:10.61369/ERA.2025110034

摘 要 : 本文聚焦于深度调峰需求, 系统研究了汽轮机组变工况运行优化与能耗管控策略。深入剖析了深度调峰下汽轮机组的热力过程特性变化, 识别出导致供电煤耗率升高的关键因素, 并揭示了其协同放大的能耗机理。以“安全—经济—调峰能力”协同提升为核心目标, 构建了“机理建模+数据校正+多目标协同”的变工况运行优化模型, 明确了涵盖物理限制、设备安全、环保法规及操作可行性的约束体系。在此基础上, 提出了“数据驱动—模型支撑—分层执行—闭环优化”的四级能耗管控总体框架, 并制定了三大核心策略。本研究旨在为深度调峰工况下的汽轮机组提供一套系统化、精细化的运行优化与能耗管控方案, 对提升火电机组运行经济性、促进电网安全稳定及助力“双碳”目标实现具有重要的理论指导意义和工程应用价值。

关 键 词 : 双碳目标; 深度调峰; 汽轮机组; 变工况运行

Research on Operation Optimization and Energy Consumption Control Strategies for Steam Turbine Units under Variable Operating Conditions amid the Dual Carbon Goals—A Practice Based on Deep Peak-shaving Requirements

Yue Wei, Lu Zhiqiang, Tai Liqiang

Xilingol Thermal Power Co., Ltd., Xilingol, Inner Mongolia 026000

Abstract : This paper systematically investigates the operation optimization and energy consumption control strategies for steam turbine units under variable operating conditions, with a focus on meeting deep peak-shaving requirements. It delves into the changes in thermodynamic process characteristics of steam turbine units under deep peak-shaving conditions, identifies key factors contributing to an increase in the coal consumption rate for power supply, and reveals their synergistic and amplifying energy consumption mechanisms. With the core objective of achieving synergistic improvements in "safety—economy—peak-shaving capacity," an operation optimization model for variable operating conditions is constructed, incorporating "mechanism modeling + data correction + multi-objective collaboration," and a constraint system covering physical limitations, equipment safety, environmental regulations, and operational feasibility is defined. Building on this foundation, a four-tier overall framework for energy consumption control is proposed, following the approach of "data-driven—model-supported—hierarchical execution—closed-loop optimization," along with the formulation of three core strategies. This study aims to provide a systematic and refined operation optimization and energy consumption control solution for steam turbine units under deep peak-shaving conditions. It holds significant theoretical guidance and engineering application value for enhancing the operational economy of thermal power units, promoting grid safety and stability, and facilitating the achievement of the "dual carbon" goals.

Keywords : dual carbon goals; deep peak-shaving; steam turbine units; variable operating conditions

引言

为保障电网安全稳定运行, 承担着基础负荷的火电机组, 尤其是其中的核心设备——汽轮机组, 必须从传统的“基荷运行”模式转向“深度调峰”运行模式, 即频繁、大幅度地调整出力, 以配合新能源消纳, 平衡电网供需。如何有效应对深度调峰带来的变工况运行挑战, 精准识别能耗激增的内在机理, 并据此提出科学的运行优化与能耗管控策略, 已成为当前火电行业亟待解决的重大技术课题。鉴

于此，本文以“双碳”目标为战略导向，以深度调峰的迫切需求为实践背景，聚焦于汽轮机组变工况运行优化与能耗管控策略研究，旨在通过深入剖析深度调峰下汽轮机组的热力过程特性与能耗机理，揭示低负荷运行时效率损失的关键节点与影响因素。在此基础上，构建一套集“主动调控、动态优化、闭环管理”于一体的综合能耗管控策略，以期为提升深度调峰工况下汽轮机组的经济性、安全性和灵活性提供理论依据和实践指导，为推动火电行业在新型电力系统中的高质量转型发展贡献力量。

一、深度调峰下汽轮机组变工况特性与能耗机理分析

（一）汽轮机组热力系统与工作原理

汽轮机组热力系统作为火电生产的核心能量转换载体，通过热能—机械能—电能的阶梯式转化实现燃料化学能向电能的高效输出^[1]。整个系统由蒸汽发生、汽轮机组、回热循环和凝汽四大子系统构成闭环热力网络，锅炉将燃料化学能转化为高温高压蒸汽，蒸汽在汽轮机中膨胀做功驱动发电机发电，回热系统利用抽汽加热给水以提升效率，凝汽系统则将排汽冷凝为水并维持真空，完成工质循环。在额定工况下，系统各参数处于最优区间，供电效率可达40%–45%；而进入深度调峰低负荷运行后，系统偏离设计状态，热力特性与能量转换效率显著改变。

（二）深度调峰工况下的热力过程特性变化

深度调峰工况下，机组负荷大幅下降导致热力系统整体从稳定高效转向波动低效。在蒸汽参数方面，主蒸汽压力和温度显著降低，单位蒸汽做功能力下降，需通过增加流量来维持负荷，形成低效循环；再热蒸汽压力下降且温度偏差增大，进一步降低中压缸效率^[2]。回热循环中，各段抽汽压力和流量大幅减少，导致加热器换热效率下降，端差扩大，甚至出现汽塞现象，削弱了回热效果。凝汽器方面，排汽量减少和冷却水流量降低共同导致真空度下降，冷源损失增加，端差扩大，加剧了系统热耗。同时汽轮机内部蒸汽流速降低，易产生气流分离和涡流，使内效率下降，低压缸末级叶片还面临颤振风险，增加了机械损耗和安全隐患。

（三）深度调峰下的能耗关键影响因素识别

在深度调峰工况下，汽轮机组供电煤耗率较额定工况升高50–80g/kWh，主要由热力系统效率下降与辅机电耗占比上升叠加所致^[3]。其中，热力参数偏离贡献最大，主蒸汽压力与温度下降导致蒸汽焓降减少，单位做功能力下降，需增加蒸汽流量维持负荷，从而增加燃料消耗；回热效率下降，加热器端差扩大与汽塞使回热回收减少，锅炉需额外加热给水，同时排烟温度升高加剧热损失；凝汽真空恶化则导致排汽压力升高、做功能力降低，需增加燃料补偿出力损失；辅机电耗占比上升，发电量减少而辅机无法同比例降负荷，其电耗占比显著增加；此外，燃烧效率下降，因稳燃需要，排烟与不完全燃烧损失增加。这些因素并非独立作用，而是存在协同放大效应，形成能耗上升的恶性循环。

二、汽轮机组变工况运行优化模型构建

（一）优化模型构建的总体思路

在保证安全运行的条件下，怎样让机组在变工况运行时依然保持最佳状态，以有效降低供电成本是机组节能降耗工作的研究热点^[4]。汽轮机组变工况运行优化模型以深度调峰下“安全—经

济—调峰能力”协同提升为核心目标，采用“机理建模+数据校正+多目标协同”的一体化构建思路。基于热力循环机理建立反映各子系统动态特性的基础模型框架，确保物理意义明确；引入实际运行数据通过算法校正模型参数，将预测误差控制在5%以内，提升模型准确性；构建多目标协同优化机制，将降低能耗、保障安全与提升调峰响应纳入统一框架，通过动态权重分配与分层迭代求解策略，实现宽负荷波动下的快速优化调控，为机组精准运行提供指导。

（二）约束条件的确定

优化模型的约束条件基于物理限制、设备安全、环保法规和操作可行性四大类制定，确保优化结果可落地执行^[5]。其中，热力参数约束明确了主蒸汽压力、温度、凝汽器真空度等关键参数的合理运行范围；设备安全约束则根据材质与设计标准，为转子热应力、叶片振动、阀门泄漏率等设定安全阈值；环保排放约束严格遵循超低排放标准，对NO_x、SO₂和颗粒物浓度进行限值；操作可行性约束则考虑现场调控能力，限制了负荷变化率、阀门调节速度等^[6]。此外，针对深度调峰等特殊工况，还额外增加了低负荷稳燃等约束，所有条件共同构成了一个完整、严谨的约束体系，保障优化方案的安全性与可行性。

（三）优化变量的选取

优化变量的选取遵循“关键影响、可调控、易测量”原则，基于能耗影响因素与系统特性分析，筛选出对能耗、安全及调峰能力影响显著且可现场调控的参数，分为蒸汽参数、回热系统、辅机运行与阀门控制四大类^[7]。蒸汽参数变量作为影响做功效率的核心，包括主蒸汽压力与温度设定值，通过锅炉侧调节实现，在深度调峰区间压力范围为9–15MPa，温度为480–520℃，并纳入再热蒸汽温度修正值以平衡温差；回热系统变量主要影响回热效率，选取高、低压加热器抽汽阀门开度及除氧器压力设定值，通过调节抽汽量和进汽量优化换热效果与蒸汽损失；辅机运行变量关联电耗与系统稳定性，包括循环水泵转速与真空泵运行台数，通过变频或启停控制以平衡凝汽器真空与辅机电耗；阀门控制变量则直接影响调峰响应速度，选取高压主汽门、调门开度及低压缸喷水阀开度，通过DEH系统快速调节负荷指令并控制排汽温度^[8]。所有变量均配备传感器，通过DCS系统实现“测量–调节–反馈”的闭环控制，为优化模型求解与实际调控提供可靠支撑。

三、基于深度调峰需求的能耗管控策略研究

（一）能耗管控策略的总体框架

为满足深度调峰下汽轮机组“多目标协同、全流程覆盖、动态化适配”的管控需求，构建了“数据驱动—模型支撑—分层执行—闭环优化”的四级能耗管控框架，实现从负荷需求到运行

调整的全链条精细化管控^[9]。该框架以“数据层—模型层—执行层—评估层”为核心架构,各层级相互衔接、动态联动。数据层整合电网调度指令、历史运行数据、实时监测参数及环境数据,经清洗融合后形成标准化数据库;模型层依托变工况优化模型与负荷预测算法,实现“负荷需求—优化参数—能耗预测”的关联计算,输出最优运行方案;执行层将优化方案转化为“预调度—实时调控—应急响应”三级操作指令,确保在不同调峰场景下精准执行;评估层通过对比实际与预测数据,从能耗、安全、调峰三个维度评估管控效果,形成“数据—模型—执行—评估—迭代”的闭环优化机制。此外,框架融入“人机协同”机制,在自动化精准调控基础上保留人工干预权限,兼顾科学性与灵活性,确保机组在复杂工况下安全高效运行。

(二) 基于负荷预测的优化运行指导策略

基于负荷预测的优化运行指导策略以“提前预判、精准预测”为核心,通过构建“短期+超短期”双层负荷预测模型,结合机组变工况特性,制定分时段、分场景的运行优化方案,实现从“被动响应”到“主动调控”的转变,降低深度调峰期间的能耗波动^[10]。短期负荷预测融合电网指令、历史数据与气象信息,通过 LSTM 模型将预测误差控制在 $\pm 5\%$ 以内,为次日整体运行计划提供依据;超短期预测则基于实时电网频率和新能源出力变化率,采用 XGBoost 算法滚动更新,误差控制在 $\pm 2\%$,为实时调控提供指导。根据预测结果,次日运行被划分为低谷调峰段、平稳过渡段和高峰响应段,并针对各时段制定差异化策略。低谷段以“低耗稳燃”为目标,优化主蒸汽参数并调整辅机运行模式;平稳段以“效率最优”为目标,提前调整回热系统参数;高峰段则兼顾“快速响应”与“低耗”,维持主蒸汽参数在高效区间并预留阀门调节裕度。每日 20:00 生成《优化运行指导手册》,明确各时段关键参数目标值,运行人员据此提前调整机组状态,并通过实时偏差对比启动预测修正,形成“预测—制定—执行—修正”的闭环机制,确保优化策略与负荷变化动态匹配。

(三) 实时在线监测与动态优化调整策略

实时在线监测与动态优化调整策略以“实时感知、动态适配、精准调控”为核心,构建多维度监测体系与快速优化算法,解决深度调峰期间负荷频繁波动、参数易偏离最优区间的问题,确保能耗可控。监测体系围绕“热力参数—设备状态—能耗指标—环保排放”四大维度,部署高精度传感器,实现主蒸汽压

力、温度、凝汽器真空度、汽轮机热应力、振动、煤耗率及排放浓度等关键参数的秒级/分钟级实时采集与跟踪。动态优化机制采用“偏差识别—原因分析—参数调整—效果验证”闭环流程,每 5 分钟对比实际值与目标值,偏差超限时触发优化;通过关联分析定位原因,如煤耗升高源于真空下降或回热系统异常;自动输出调整指令,或推送人工建议;调整后 10 分钟内验证效果,确保优化有效。针对负荷骤变等极端场景,设置“紧急优化通道”,优先保障安全与调峰响应,待稳定后再优化能耗,实现动态波动下的安全低耗运行。

(四) 运行效果评估与持续改进策略

运行效果评估与持续改进策略是能耗管控体系的闭环保障,通过构建多维度、可量化的评估体系,精准衡量管控策略的实施效果,并建立动态迭代机制,持续优化策略与模型,确保机组在深度调峰下始终处于“安全—经济—高效”状态。该策略分为效果评估与持续改进两大模块,形成“评估发现问题—改进解决问题—再评估验证效果”的循环迭代流程。效果评估以“数据为基、多维度协同、分级量化”为原则,从能耗控制、安全保障、调峰响应、环保合规四个维度设置评估指标,并采用“日统计—周分析—月总结”机制,结合层次分析法(AHP)计算综合得分,生成评估报告,为改进提供依据。持续改进以“问题导向、数据驱动、分层迭代”为核心,针对评估短板从策略优化、模型迭代、设备升级、人员培训四个层面制定改进措施。通过“改进任务跟踪表”明确责任与验收标准,并持续验证效果,形成“问题识别—措施制定—执行跟踪—效果验证—再优化”的闭环迭代,推动能耗管控策略持续完善,实现机组运行性能的提升。

四、结束语

本文围绕双碳”目标下火电机组深度调峰的核心需求,对汽轮机组变工况运行优化与能耗管控策略进行了系统性研究。通过深入剖析深度调峰工况下汽轮机组的热力过程特性与能耗机理,揭示了主蒸汽参数偏离、回热效率下降、凝汽真空恶化以及通流部分效率损失是导致机组能耗急剧攀升的关键因素。针对这些核心问题,本文构建了一套涵盖主动调控、动态优化与闭环管理的综合能耗管控策略体系,旨在为解决深度调峰带来的经济性与安全性挑战提供有效的技术路径。

参考文献

- [1] 狄淑娟. 汽轮机变工况运行对机组的影响 [C]//2006 年中国石化节能技术交流会论文集. 2006:353-356.
- [2] 王晓刚, 胡洪华, 庞顺, 等. 超临界汽轮机组变工况下运行参数目标值的计算分析 [J]. 热力发电, 2006, 35(5): 16-18, 37. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2006.05.005.
- [3] 王统, 洪大智, 吴旭, 等. 变负荷工况下燃煤机组汽轮机深度调峰节能优化控制方法 [J]. 能源与环保, 2025, 47(7): 183-188. DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2025.07.027.
- [4] 李友良. 汽轮机系统变工况建模及滑压运行优化研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2017. DOI: 10.7666/d.D01312240.
- [5] 徐敏. 凝汽式汽轮机变工况及回热加热器优化运行试验研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2016.
- [6] 聂雨. 大型燃煤发电机组汽轮机系统仿真建模与变工况特性研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2014. DOI: 10.7666/d.D610401.
- [7] 王金明. 有效控制汽轮机变工况运行 [J]. 热能动力工程, 2001, 16(5): 566-566. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2060.2001.05.033.
- [8] 孙友源. 汽轮机组变工况特性分析与优化研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2015. DOI: 10.7666/d.Y2921769.
- [9] 王泉, 张艳, 王培红. 汽轮机组动力系数及其变工况特性响应研究 [J]. 华东电力, 2013, 41(10): 2178-2182.
- [10] 闫顺林, 刘帅, 李玉辉. 汽轮机变工况优化运行模型的研究 [J]. 陕西电力, 2009, 37(7): 24-27. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7598.2009.07.007.