

汽轮机滑压运行策略优化与机组热耗特性研究

刘佳琦

内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司煤研石热电厂 内蒙古 鄂尔多斯 017100

摘要: 针对汽轮机滑压运行适配性不足、机组热耗偏高的问题,结合内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司煤研石热电厂机组运行特点,系统研究滑压运行基础理论、建模优化方法及热耗特性,分析滑压参数与热耗的耦合关系。通过构建滑压运行数学模型、设计多目标优化算法、界定优化约束边界,结合热耗特性建模与敏感性分析,揭示滑压运行与热耗特性的内在关联,形成兼顾安全性、经济性的滑压运行优化思路,为电厂机组节能降耗、提升运行稳定性提供实际参考。

关键词: 汽轮机;滑压运行;热耗特性;滑压运行策略优化;耦合关系

引言: 当前火电行业面临节能降耗与电网调峰双重压力,煤研石热电厂机组低负荷运行场景增多,传统滑压运行策略存在参数匹配不合理、热耗偏高的问题,影响机组运行经济性与稳定性。本文结合内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司煤研石热电厂实际工况,围绕汽轮机滑压运行策略优化与机组热耗特性展开研究,梳理滑压运行理论与技术体系,构建建模优化方法,分析热耗形成机理及耦合关系,解决实际运行中的核心痛点,助力电厂实现节能增效目标。

1 汽轮机滑压运行基础理论与技术体系

1.1 滑压运行基本原理与核心优势

汽轮机滑压运行的核心是在机组负荷变化时,保持调速汽门全开或接近全开状态,通过调节锅炉出口主蒸汽压力来适应负荷需求,而非依靠改变汽门开度调节流量。这种运行方式的核心机理的是,当负荷降低时,主蒸汽压力同步下降,避免了定压运行中汽门节流产生的能量损失,使汽轮机高压缸始终在接近设计工况的状态下运行。与定压运行相比,滑压运行的优势较为显著,不仅能有效降低节流损失,提升机组变工况运行效率,还能减少汽门频繁动作带来的磨损,降低设备热应力,延长汽轮机及其辅助设备的使用寿命,同时在低负荷工况下,能有效改善机组运行的稳定性和经济性。

1.2 滑压运行关键参数与影响因素

主蒸汽压力、主蒸汽温度、负荷区间是影响滑压运行效果的核心参数。主蒸汽压力直接决定机组做功能力,压力设定需与负荷精准匹配,过高会增加能耗,过低则无法满足负荷需求;主蒸汽温度需保持稳定,温度波动会影响机组热效率和设备安全;负荷区间则决定滑压运行的适配范围,不同负荷段需对应不同的压力调节策略。机组结构特性、运行工况、环境条件等外部因素

也会与滑压运行策略形成耦合,机组通流结构、给水系统性能等结构特性决定了滑压调节的极限,变负荷速率、持续低负荷运行时间等工况因素影响策略适配性,环境温度、气压等条件则会间接影响主蒸汽参数的稳定性。

1.3 滑压运行技术体系架构

滑压运行技术体系以安全、高效运行为核心,搭建涵盖控制逻辑、参数匹配、安全约束三大核心模块的框架。控制逻辑模块是体系核心,负责根据负荷变化信号,精准调节主蒸汽压力,协调锅炉与汽轮机的运行节奏,确保参数调节的平稳性;参数匹配模块主要实现主蒸汽压力、温度与机组负荷的动态适配,结合运行数据实时调整参数设定,保障机组在不同工况下的经济性;安全约束模块则明确滑压运行的参数极限、设备运行边界,规避因压力、温度异常导致的设备损坏,同时兼顾机组启停、负荷突变等特殊工况的安全控制。各模块协同作用,形成完整的技术支撑,为后续滑压运行策略优化提供坚实的理论和技術基础^[1]。

2 汽轮机滑压运行策略建模与优化方法

2.1 滑压运行策略数学建模

滑压运行策略数学建模以汽轮机实际运行数据为基础,结合热力学第一、第二定律及汽轮机变工况特性,构建能精准反映负荷、主蒸汽压力、机组效率等核心变量动态关联的量化模型,为策略优化提供可靠计算依据。建模过程围绕参数选取、模型构建、精度验证三个核心环节展开,具体如下:(1)建模参数选取。结合机组实际运行特点,筛选核心输入输出参数,输入参数包括机组负荷、主蒸汽温度、给水温度、凝汽器真空度等可实时监测参数;输出参数包括主蒸汽压力最优设定值、机组热耗率、高压缸效率等关键性能指标。参数选取遵循实用性、可测性原则,剔除冗余参数,确保模型

简洁且贴合实际工况。(2)模型构建。基于汽轮机变工况热力计算方法,结合实际运行数据拟合,构建滑压运行核心数学模型。以热力学第一定律为基础,建立机组能量平衡方程,刻画主蒸汽压力与机组做功能力的关联;结合汽轮机变工况特性曲线,建立主蒸汽压力与高压缸效率、节流损失的关联方程,精准描述参数间动态关系;整合各子方程,形成完整数学模型,实现不同负荷下滑压运行状态的精准刻画。(3)模型精度验证。选取机组低、中、高负荷段实际运行数据,代入模型计算,将结果与现场实测数据对比,通过绝对误差、相对误差分析验证模型精度。针对误差超标环节,结合实际运行偏差原因,修正模型参数及关联方程,确保计算误差控制在工程允许范围内,满足策略优化的量化需求。

2.2 多目标优化算法设计

针对机组效率提升、能耗降低、运行稳定性保障的多元目标,结合各目标间的冲突性,设计融合遗传算法与粒子群优化的多目标优化算法,实现滑压运行参数全局最优匹配,算法设计重点包括三方面:(1)目标函数构建。明确多目标优化核心目标,构建标准化目标函数。以机组热耗率最小化为能耗目标,高压缸效率最大化为效率目标,主蒸汽压力、温度波动幅度最小化为稳定性目标,通过归一化处理统一不同量纲目标参数,形成多目标综合优化函数,量化各目标权重分配,平衡效率、能耗与稳定性的冲突。(2)算法融合设计。融合遗传算法的全局搜索能力与粒子群优化算法的局部搜索效率,弥补单一算法不足。采用遗传算法在全局范围内寻优,筛选最优解区间;在该区间内,利用粒子群优化算法精细化搜索,加快收敛速度,避免陷入局部最优,确保优化结果的全局性与精准性。(3)算法参数设置。结合汽轮机实际运行参数范围,设置算法关键参数,包括种群规模、迭代次数、交叉概率、变异概率及粒子飞行速度范围等。参数设置以工程实际为依据,经多次调试优化,确保算法收敛速度与寻优精度满足需求,避免优化结果偏离实际运行工况^[2]。

2.3 策略优化约束条件与边界界定

滑压运行策略优化以机组安全稳定运行为前提,梳理实际运行各类约束条件,明确策略可行边界,确保优化方案兼具高效性与可行性,具体如下:(1)安全运行约束。结合汽轮机设备设计规范,明确主蒸汽压力、温度上下限,避免超压、温度波动产生热应力;界定机组负荷调整速率,防止负荷突变导致振动超标、轴系损伤;明确凝汽器真空度、给水压力等辅助系统参数约束范围,保障机组整体安全。(2)设备寿命约束。结合高

压缸、汽门、转子等关键部件疲劳寿命特性,界定滑压参数变化范围,避免频繁波动加剧部件磨损;明确低负荷下滑压运行持续时间约束,防止设备积灰、腐蚀等问题。(3)环保与运行约束。结合环保排放要求,界定排烟温度、氮氧化物排放浓度等约束,确保满足环保标准;明确经济性约束,避免单一目标导致能耗反弹;结合电网调度需求,界定负荷响应速度约束,确保优化策略适配电网调峰需求^[3]。

3 机组热耗特性理论分析与建模

3.1 热耗特性形成机理剖析

机组热耗特性的形成与能量转换全过程密切相关,从能量转换、能量损耗双维度,系统剖析热耗核心来源及作用机制,具体如下:(1)能量转换过程中的热耗形成。汽轮机运行的核心是蒸汽热能向机械能的转换,锅炉产生的主蒸汽进入汽轮机后,依次通过高压缸、中压缸、低压缸做功,完成能量转换。在此过程中,蒸汽膨胀做功的充分程度直接决定热耗水平,蒸汽参数与机组负荷的不匹配,会导致能量转换效率下降,进而增加热耗。(2)各类能量损耗的作用机制。蒸汽能量损失是热耗的主要来源,包括蒸汽在通流部分的节流损失、漏汽损失,以及排汽余热损失,其中排汽余热损失占比最大,直接取决于凝汽器真空度及排汽温度。机械损耗主要来自汽轮机转子与轴承的摩擦损耗、传动机构的能量损耗,随机组负荷变化呈现规律性波动。散热损耗则源于机组本体、管道的散热,受环境温度、保温效果影响,在低负荷工况下占比相对提升。

3.2 热耗特性多维度建模

依据机组实际运行数据,融合热力学计算与数据驱动方法,构建涵盖多变量的热耗特性模型,实现不同工况下热耗水平的精准预测,建模过程如下:(1)模型变量选取。筛选影响热耗的核心变量,输入变量包括机组负荷、主蒸汽压力、主蒸汽温度、给水温度、凝汽器真空度等可实时监测的运行参数;输出变量为机组热耗率,同时将环境温度作为辅助变量,提升模型适配性。变量选取兼顾实用性与关联性,剔除与热耗关联度低的冗余参数。(2)多维度建模实现。基于热力学定律,通过热力计算建立热耗率与核心参数的理论关联方程,刻画能量转换过程中的热耗变化规律;结合数据驱动方法,利用机组历史运行数据,拟合参数间的非线性关联,修正理论模型偏差。整合理论计算与数据驱动模型,形成多维度热耗特性模型,兼顾理论严谨性与实际适配性,可精准预测不同负荷、不同参数组合下的机组热耗水平。

3.3 热耗特性影响因素敏感性分析

采用控制变量法,结合机组实际运行数据,量化分析各关键运行参数对热耗的影响程度,识别核心敏感因素,具体分析过程如下:(1)试验设计与数据采集。选取机组典型运行工况,固定其他参数不变,单独调整某一目标参数(如主蒸汽压力、负荷),采集不同参数值对应的热耗率数据,确保数据覆盖低、中、高负荷全区间,且数据具有代表性和稳定性。(2)敏感性量化分析。通过计算参数变化率与热耗率变化率的比值,量化各参数对热耗的影响程度,排序得出敏感优先级。其中,主蒸汽压力、机组负荷对热耗影响最为显著,主蒸汽温度、凝汽器真空度次之,给水温度、环境温度影响相对较小。明确各参数的敏感系数,为后续滑压运行策略优化提供靶向依据,聚焦核心敏感参数开展优化设计^[4]。

4 滑压运行策略与热耗特性耦合关系

聚焦滑压参数与热耗的内在关联,开展耦合关系研究并界定协同优化边界,具体如下:(1)滑压参数对热耗的动态影响规律。基于汽轮机变工况热力学理论,结合滑压运行数学模型开展仿真分析,探究核心滑压参数对热耗的动态影响。主蒸汽压力调整方面,在中低负荷段,压力提升可降低节流损失,热耗随之下降,但压力超过适配阈值后,会增加锅炉能耗,导致热耗上升;滑压速率方面,速率过快会造成参数波动,加剧能量损耗,热耗瞬时升高,速率过慢则无法及时适配负荷变化,同样影响热耗稳定性,据此揭示滑压运行与热耗特性的内在耦合机制。(2)耦合关系量化模型构建。整合滑压运行模型与热耗特性模型,选取机组负荷、主蒸汽压力、滑压速率为输入参数,热耗率为输出参数,建立两者耦合量化模型。通过机组历史运行数据校准模型参数,明确低、中、高不同负荷区间内,滑压参数与热耗水平的定量关联,量化不同滑压策略下热耗的变化幅

度,为后续协同优化提供理论支撑。(3)协同优化目标与约束条件界定。确定协同优化核心目标为机组综合能耗最低、运行稳定性最优,兼顾两者平衡。约束条件严格贴合实际运行要求,包括主蒸汽压力、温度等参数安全边界,汽轮机关键部件热应力、疲劳寿命等设备约束,以及氮氧化物排放、排烟温度等环保约束,据此界定滑压运行与热耗控制的协同优化边界,构建完整协同优化框架^[5]。

结束语:本文围绕汽轮机滑压运行策略优化与机组热耗特性,完成了基础理论分析、建模优化、热耗特性研究及耦合关系探究等工作,结合电厂实际运行数据,明确了滑压参数对热耗的影响规律,构建了适配实际工况的优化框架与量化模型。研究有效解决了滑压策略适配性差、热耗偏高的问题。后续可结合机组长期运行数据,进一步优化模型参数,完善协同优化方案,持续提升机组运行的经济性与稳定性,为同类电厂提供借鉴。

参考文献

- [1]袁名康.双碳目标下火电汽轮机深度滑压运行的能耗特性分析与参数优化[J].中国科技期刊数据库工业A,2026(3):025-028.
- [2]沈超.火力发电厂集控运行中汽轮机滑压运行优化策略研究[J].行车指南,2023(6):0118-0119.
- [3]陈明,战东,李丰杞.汽轮机滑压运行模式下热控系统自适应负荷调节策略分析[J].新潮电子,2026(8):67-69.
- [4]张久洋.火电机组集控运行中汽轮机热耗率降低的技术优化策略研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(10):032-035.
- [5]黄庆华,严卫春,阳虹,彭泽瑛.降低大功率煤电汽轮机宽低负荷调峰运行热耗的关键技术[J].动力工程学报,2022,42(11):1161-1166.