

发电厂热能与动力工程的现状与优化策略

张宏东

内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司煤矸石热电厂 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要: 发电厂热能与动力工程作为电力生产的核心领域,当前面临重热现象、节流调节低效、湿气损失及调压稳定性不足等挑战。重热现象导致机组熵增增大、效率下降;节流调节引发管道压力波动,造成额外损耗;湿气损失导致机械能损耗与设备腐蚀;调压系统难以快速响应电网负荷变化。优化策略需聚焦动态焓降补偿、智能节流阀、复合除湿及模型预测控制等技术,以提升发电效率与稳定性。

关键词: 发电厂;热能与动力工程;现状;优化策略

引言: 在全球能源需求持续增长与“双碳”目标约束下,发电厂热能与动力工程作为能源转换的核心环节,其效率与稳定性直接关系到电力供应质量及节能减排成效。当前,该领域普遍面临重热损失、节流调节损耗、湿气侵蚀及调压响应滞后等技术瓶颈,导致机组综合能效偏低、设备寿命缩短。本文系统分析热能转换机理与现存问题,提出动态焓降补偿、智能节流优化等创新策略,为行业技术升级提供理论支撑与实践路径。

1 发电厂热能与动力工程现状分析

1.1 核心运行机理

(1) 热能转换路径遵循能量守恒定律,是工程运行的核心逻辑:燃料(煤炭、天然气等)燃烧释放化学能,在锅炉内通过热交换将水加热成高温高压蒸汽,实现化学能向蒸汽热能的转化;蒸汽进入汽轮机后,推动转子高速旋转,将蒸汽热能转化为机械动能;汽轮机与发电机同轴连接,转子旋转切割磁感线,最终将机械动能转化为电能,完成完整的能量转换链条。(2) 关键设备协同保障能量转换效率:锅炉作为能量转换起点,通过炉膛燃烧、受热面传热,将燃料能量传递给工质,其核心是保证燃烧充分性和传热效率;汽轮机依靠蒸汽在各级叶片中的膨胀做功,利用冲动式或反动式原理实现能量传递,叶片型线设计直接影响做功效率;凝汽器通过冷却介质将排汽凝结成水,维持汽轮机排汽端的真空环境,降低背压以提升循环效率;发电机基于电磁感应原理,将机械能精准转化为电能,其定子与转子的配合决定发电稳定性^[1]。

1.2 现存问题

(1) 重热现象普遍存在于多级汽轮机中,由于各级叶片间的焓降不可逆损失,前一级的损失热量部分被后一级利用,虽能提升整体效率,但过度重热会导致机组内部熵增过大,反而降低综合效能。案例显示,某燃煤

电厂300MW机组的重热系数达到0.12,远超行业平均水平0.08,导致机组发电效率较设计值下降2.3%。(2) 节流调节在大容量机组中存在明显缺陷,该调节方式通过改变阀门开度控制蒸汽流量,工况突变时易引发管道内压力剧烈波动,造成蒸汽节流损失增加。数据统计,600MW及以上机组在负荷快速变化时,节流调节导致的额外损耗可达15%以上,严重影响经济运行。(3) 湿气损失是汽轮机末级叶片的主要损耗类型,蒸汽在膨胀过程中温度压力降低,部分蒸汽凝结成水滴,高速流动的水滴冲击末级叶片,不仅造成3%-5%的机械能损耗,还会加剧叶片腐蚀磨损,缩短设备使用寿命。(4) 调压稳定性不足成为制约机组适配电网的关键问题,当电网负荷波动时,传统调节系统难以快速响应,导致发电机输出电压频率偏差超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ 的行业标准,不仅影响电力输送质量,还可能触发电网保护装置动作,影响电网安全稳定运行。

1.3 影响因素

(1) 设备老化是导致效率下降的核心因素,运行年限超过10年的机组,由于锅炉受热面结垢、汽轮机叶片磨损、发电机绝缘老化等问题,发电效率年均下降0.8%,部分老旧机组的效率衰减幅度甚至达到1.2%,同时设备故障发生率显著上升。(2) 控制策略滞后影响调节响应速度,目前多数电厂仍采用传统PID调节系统,其控制参数难以适配复杂多变的运行工况,响应时间超过2秒,无法及时应对负荷波动、燃料品质变化等突发情况,导致调节精度不足,进一步加剧能耗损失。(3) 监测体系缺陷制约运行优化,现有监测系统对锅炉燃烧效率、汽轮机蒸汽参数、发电机运行状态等关键参数的采样频率低于10Hz,数据采集的实时性和准确性不足,无法为运行调整提供精准依据,导致机组长期处于非最优运行状态。

2 发电厂热能与动力工程优化策略体系构建

2.1 重热现象控制技术

(1) 动态焓降补偿算法以弗留格尔公式为核心理论基础,通过实时采集汽轮机各级叶片的压力、温度数据,构建焓降动态计算模型。该算法可根据机组负荷变化,自动修正各级叶片的焓降分配比例,避免因固定焓降设定导致的过度重热问题。相较于传统静态控制方法,其能精准捕捉焓降不可逆损失的动态变化,实现重热系数的实时调控,从理论层面为抑制过度重热提供数学支撑。(2) 分级焓值监测系统通过在汽轮机高压缸、中压缸、低压缸的关键位置布置智能传感器网络,实现全流程焓值数据采集。传感器采用高精度热电偶与压力变送器组合设计,采样频率提升至50Hz,可实时获取各级蒸汽的焓值变化曲线。系统还具备数据异常预警功能,当某级焓值偏差超过阈值时,自动触发调节指令,为动态焓降补偿算法提供精准的数据输入,形成“监测-计算-调节”的闭环控制^[2]。(3) 某300MW燃煤电厂应用该技术体系后,重热系数从0.12降至0.06,低于行业平均水平0.08。通过优化焓降分配,机组发电效率较优化前提升2.3%,按年运行5000小时计算,年增发电量约345万千瓦时,折合节约标煤1100吨,在提升经济性的同时,降低了机组内部熵增,延长了设备使用寿命。

2.2 节流调节优化方案

(1) 智能节流阀采用形状记忆合金材料制作阀芯,该材料具有温度敏感性,可根据蒸汽温度变化自动调整阀门开度,响应时间缩短至0.1秒级,远快于传统钢制阀门的1.5秒响应速度。同时,阀门内置压力传感器与微控制系统,能实时监测管道内压力波动,通过PID自适应算法动态修正开度,避免因阀门骤开骤关引发的压力冲击,从硬件层面提升节流调节的稳定性。(2) 多工况数据库基于机组历史运行数据与仿真实验结果构建,涵盖50%~100%负荷区间内的2000余组运行参数,包括蒸汽流量、压力、温度及阀门开度的最优匹配关系。数据库具备自学习功能,可根据实际运行中的工况变化,自动更新优化参数,确保在不同负荷条件下,节流调节均能处于最优状态,为智能节流阀的精准控制提供数据支撑^[3]。(3) 某600MW机组应用该优化方案后,节流损耗较优化前降低40%,在负荷快速变化(如从70%升至100%)的工况下,管道压力波动幅度从 $\pm 0.8\text{MPa}$ 降至 $\pm 0.3\text{MPa}$ 。按年耗标煤30万吨计算,年节约标煤1.2万吨,减少二氧化碳排放3万吨,不仅提升了机组经济性,还降低了对电网电压的冲击,增强了机组调峰能力。

2.3 湿气损失抑制技术

(1) 复合除湿装置整合离心分离与超声波凝水两种

技术,蒸汽首先进入离心分离器,通过高速旋转产生的离心力将大部分水滴分离出来;剩余含雾蒸汽进入超声波凝水腔,超声波发生器产生高频振动,促使微小水滴聚合变大,再通过疏水阀排出。该集成系统的除湿效率达95%以上,远高于单一离心分离技术的70%效率,有效减少了进入末级叶片的水滴含量。(2) 叶片表面改性采用超疏水纳米涂层技术,通过物理气相沉积工艺在末级叶片表面形成厚度约50纳米的涂层。该涂层具有极低的表面能,水滴在叶片表面的接触角大于 150° ,附着率降低80%以上,同时能抑制水垢与腐蚀产物的沉积。涂层还具备良好的耐磨性与耐高温性,可在 300°C 高温环境下长期稳定工作,保障叶片表面的疏水性能。(3) 实验数据显示,应用该技术后,汽轮机末级叶片的侵蚀速率从 $0.2\text{mm}/\text{年}$ 下降至 $0.07\text{mm}/\text{年}$,降幅达65%,叶片使用寿命延长2倍以上。同时,湿气损失导致的机械能损耗减少,机组发电效率提升1.8%,某1000MW机组应用后,年节约标煤约800吨,在抑制损耗的同时,降低了设备维护成本。

2.4 调压系统升级路径

(1) 二次调频强化引入模型预测控制(MPC)算法,该算法通过建立电网负荷、机组输出功率与电压频率的数学模型,提前预测未来5-10秒的频率变化趋势,据此制定调节策略。相较于传统PID调节,MPC算法的调节精度提升30%,响应时间缩短至0.5秒,可在频率波动前提前介入调节,避免频率偏差扩大,从控制逻辑层面提升调压稳定性。(2) 储能装置协同配置飞轮储能系统,该系统的储能密度达 $15\text{Wh}/\text{kg}$,充放电响应时间小于0.1秒,可快速吸收或释电能,平抑0.5Hz级的频率波动。飞轮储能与机组调压系统联动,当电网负荷突增导致频率下降时,飞轮快速放电补充电能;当负荷突降导致频率上升时,飞轮吸收多余电能,形成“机组调节+储能缓冲”的双重保障机制^[4]。(3) 现场测试表明,升级后的调压系统在负荷波动 $\pm 10\%$ 的工况下,电压调节精度达 $\pm 0.2\text{Hz}$,优于 $\pm 0.5\text{Hz}$ 的国标要求。在电网高峰期,该系统可稳定维持电压频率在 $50 \pm 0.1\text{Hz}$ 范围内,有效避免了因频率偏差触发电网保护装置动作的情况,提升了电网安全稳定运行水平,同时减少了因调压不稳导致的电能质量损耗。

3 发电厂热能与动力工程实施与保障措施

3.1 技术改造路线

(1) 短期(1-2年)以基础数据采集与控制优化为核心,优先完成传感器网络部署,在汽轮机各缸体、锅炉受热面等关键部位加装高精度传感器,实现运行参数实时采集;同步推进控制系统升级,将传统PID调节系统替换为具备数据交互功能的智能控制系统,为后续优化奠

定数据与硬件基础,预计可使参数监测精度提升40%,调节响应速度加快50%。(2)中期(3-5年)聚焦关键设备更新与算法迭代,更换老化的节流阀、凝汽器等设备,引入形状记忆合金阀门、高效除湿装置等新型设备;基于前期运行数据,对动态焓降补偿、MPC等算法进行优化迭代,提升适配不同工况的能力,此阶段可使机组整体效率提升3%-5%,设备故障发生率降低20%。(3)长期(5年以上)推进全厂数字化孪生系统建设,整合设备运行、能耗、维护等全维度数据,构建虚拟机组模型,实现运行模拟、故障预演、优化方案仿真等功能,达成“物理机组-数字孪生”实时联动,从被动运维转向主动预判,推动机组运行效率向行业顶尖水平靠拢。

3.2 管理机制创新

(1)建立热效率KPI考核体系,将单位发电煤耗、机组效率等核心指标与管理层薪酬直接挂钩,设定阶梯式奖惩标准,如煤耗每低于行业均值1g/kWh,给予团队额外奖金,反之则扣减绩效,以激励管理层重视能效提升。(2)实施设备健康管理(EHM),通过采集设备振动、温度、压力等数据,构建故障预测模型,提前识别潜在故障风险,如汽轮机叶片磨损、锅炉结垢等问题,将设备维护从“事后维修”转为“事前预警”,预计可减少非计划停机时间30%。(3)推出人才培养计划,与高校共建热能动力工程联合实验室,开制定制化课程,安排技术人员参与高校科研项目,同时邀请行业专家进厂培训,培养既懂理论又熟实操的复合型人才,解决技术升级中的人才缺口问题。

3.3 政策支持建议

(1)争取节能改造补贴,建议参照光伏补贴模式,

按改造后节能量给予梯度奖励,如年节能量1000吨标煤以下部分每吨补贴200元,1000-5000吨部分每吨补贴300元,降低电厂改造资金压力,激发改造积极性。(2)推动碳交易市场接入,将机组效率提升带来的碳减排量纳入碳交易体系,允许电厂通过出售碳配额获得收益,使节能改造产生经济回报,形成“节能-减排-收益”的良性循环。(3)完善技术标准,建议行业主管部门制定汽轮机湿气损失限值强制性标准,明确不同容量机组的湿气损失上限,同时规范超疏水涂层、复合除湿装置等技术的应用要求,引导行业技术升级方向。

结束语

发电厂热能与动力工程的优化是提升能源利用效率、保障电网稳定运行的关键。通过动态焓降补偿、智能节流调节、复合除湿及模型预测调压等技术创新,可有效破解重热损失、湿气侵蚀等核心难题,实现机组效率提升与碳排放降低的双重目标。未来需持续推进技术迭代与政策协同,构建数字化、智能化的能源转换体系,为全球能源转型与可持续发展提供中国方案。

参考文献

- [1]满永刚.热电厂节能降耗中热能与动力工程的应用[J].电力设备管理,2024,(18):274-276.
- [2]刘艳.热能与动力工程在热电厂中的应用[J].石河子科技,2023,(02):38-40.
- [3]史圻.发电厂热能与动力工程的现状与优化措施分析[J].集成电路应用,2023,40(02):150-151.
- [4]王鑫华.火电厂中热能与动力工程的改进方向[J].科技创新与应用,2021,11(15):129-131.