

火电厂汽轮机运行优化策略及节能效果研究

王建文

国电电力邯郸东郊热电有限责任公司 河北 邯郸 057550

摘要: 电力与人们日常生活息息相关,同时也是提升人们日常生活质量的关键部分之一。火电厂汽轮机运行优化策略的核心在于提升热效率、降低能耗并增强电网响应能力,需结合动态建模、参数调控及设备管理等多维度技术手段。以当前电厂汽轮机运行效率为基础,结合近年来的工作经验,提出如何提升电厂汽轮机运行效率及其经济性。

关键词: 电厂;汽轮机;运行效率;经济性

经济全球化的深入推进加快了我国城乡发展的步伐,与此同时,也使得能源的需求与消耗逐步增加,因此,电厂在日常的运营中承担着供应能源的重要作用。汽轮机是电厂生产与运行中必不可少的设备,其运行效率与电厂的经济效益等有着直接关系。

1 火电厂汽轮机技术原理与工作流程

1.1 技术原理。能量转换机制,汽轮机通过喷嘴和动叶片结构实现蒸汽热能与机械能的转换。高温高压蒸汽在喷嘴中膨胀加速(压力下降至约0.1MPa,流速提升至超音速),高速蒸汽冲击动叶片形成旋转力矩,驱动转子旋转并带动发电机发电。能量转化分为两次:蒸汽热能→转子机械能→发电机电能,整体效率可达40%-45%。核心结构特点,冲动式汽轮机:蒸汽仅在喷嘴中膨胀,动能通过冲击叶片传递,动叶片仅改变蒸汽流向。反动式汽轮机:蒸汽在喷嘴和动叶片中均膨胀,压力梯度作用于叶片两侧产生反作用力。

1.2 工作流程详解。燃烧系统(化学能→热能),燃料(煤粉或天然气)在锅炉内燃烧,加热给水生成高温高压蒸汽(压力可达25MPa,温度570°C)。烟气经脱硝、除尘、脱硫处理后排放,灰渣通过专用系统收集。汽水系统(热能→机械能),蒸汽做功流程:过热蒸汽依次进入高压缸、中压缸、低压缸膨胀做功,推动汽轮机转子旋转(转速3000r/min)。循环冷却:做功后的低压蒸汽进入凝汽器冷凝为水,经凝结水泵和给水加热器返回锅炉,形成闭式循环。发电与能量输出(机械能→电能),汽轮机转子通过联轴器与发电机连接,转子切割磁感线产生电能(频率50Hz,电压10-27kV)。电能经升压变压器输送至电网,冷凝水循环系统维持热效率稳定(循环水温差每降低1°C,真空度可提升0.25kPa)。

2 火电厂汽轮机技术推广与应用前景

2.1 技术发展现状与核心优势。超超临界(USC)技

术普及,新一代超超临界汽轮机蒸汽参数已突破25MPa、600°C,热效率达45%以上,较亚临界机组提升10%-15%,成为火力发电主流技术。国内超超临界机组占比超60%,且单机容量向660-1000MW级扩展,形成规模化应用基础。二次再热技术突破,二次再热技术通过两次蒸汽加热优化热力循环,煤耗较传统机组降低5-8g/kWh,已在660-1000MW级机组实现全谱系装备覆盖。国家能源集团等龙头企业通过二次再热技术实现年均节煤超1万吨,推动行业能效水平跻身全球前5%。智能化与绿色化升级,物联网、动态蒸汽分配技术应用于汽轮机调控,碳排放强度降幅达18%,配套清洁燃烧技术(如超低NOx燃烧)助力环保达标。

2.2 市场推广驱动力。政策与经济性驱动,国家“双碳”目标下,超超临界技术被列为煤电升级核心方向,新建机组能效标准提升至45%以上,倒逼技术改造。技术升级后煤耗降低10-15g/kWh,单台1000MW机组年节约标煤超1.2万吨,投资回收期缩短至5-7年。行业竞争格局优化,国内头部企业(东方电气、上海电气)占据近60%市场份额,超临界/超超临界机组国产化率超90%,成本较进口设备降低30%。国际市场中,中国汽轮机出口额年均增长超20%,东南亚、中东地区需求旺盛,“一带一路”沿线市场成新增长点。

2.3 应用前景与新兴领域。传统电力领域深化应用,火电在电网调峰中仍占主导地位,汽轮机灵活运行技术(如快速启停、低负荷稳燃)适配新能源消纳需求。多能互补与工业拓展,燃煤-生物质混燃、燃煤-储能耦合等新型发电模式推动汽轮机技术向综合能源领域延伸。工业汽轮机在化工、冶金领域应用加速,2025年市场规模预计突破200亿元,年增速超15%。

3 火电厂汽轮机运行优化策略概述

3.1 动态建模与实时优化控制。多层次动态模型构

建,通过采集机组运行数据(如蒸汽参数、循环水流量等),建立动态非线性模型,并实时辨识模型参数,形成多维度运行特性数据库。

自适应控制策略,设计面向调峰需求的优化控制方案,结合电网负荷预测结果动态调整运行参数,并通过在线仿真持续验证策略有效性。

3.2 真空系统优化。最佳真空定义与平衡,基于经济性与安全性平衡原则,动态调整凝汽器真空值,综合考虑燃料成本、循环水泵电耗及设备寿命等因素。循环水参数调控,优化循环水流量与入口温度(每降低 1°C 可提升真空约 0.25kPa),兼顾冷却效率与水泵能耗。

3.3 调峰调频策略。一次调频优化,调整机组转速不等率(δ)以适配电网需求:调峰机组需降低 δ 值以提升响应速度,同时控制动态飞升风险。深度调峰技术,通过灵活性改造(如汽轮机通流优化、辅机变频控制)实现低负荷稳定运行,结合短期-中期负荷预测生成控制策略。

3.4 循环效率提升技术。朗肯循环参数优化,提高主蒸汽压力($24.5\sim 26\text{MPa}$)及温度($535\sim 757^{\circ}\text{C}$),采用超临界技术优化热能转换效率。回热与再热系统改造,增设抽汽回热装置,利用余热预热锅炉给水,减少冷源损失。

3.5 设备运行管理与维护。启停过程能耗控制,基于转子应力监测数据优化启停参数,减少热应力导致的能量损失及设备寿命损耗。密封系统与气阀调节,优化顺序阀控制逻辑,避免单阀调节下喷嘴变形造成的漏汽损失,提升气密性。

4 火电厂汽轮机最佳真空的定义与优化策略

4.1 最佳真空的定义。经济性平衡定义,最佳真空是指提高凝汽器真空后,汽轮机发电功率的增量与循环水泵等辅助设备的能耗成本差值达到最大值时的真空值,其核心在于经济效益与能源效率的权衡。传统定义:仅考虑发电功率增量与循环水泵电耗的平衡;现代扩展:新增燃料成本、环境成本(如冷却水消耗)及设备寿命(如末级叶片磨损风险)等综合因素。极限真空,指汽轮机末级叶片膨胀能力对应的最高真空值,超过此值后真空提升不再增加发电量,且可能因高能耗导致经济性下降。

4.2 最佳真空的优化策略。动态平衡调控,循环水参数优化:根据环境温度动态调整循环水流量与入口温度,每降低水温 1°C 可提升真空约 0.25kPa ;经济运行区间选择:通过试验建立真空与循环水泵电耗关系曲线,选取功率增益与能耗成本差值最大的运行区间。真空严密性维护,定期试验与查漏:每月执行真空严密性试

验,真空下降速率 $\leq 0.267\text{kPa}/\text{min}$ (优)、 $\leq 0.399\text{kPa}/\text{min}$ (良);泄漏点治理:重点检查轴封系统、水封设备及凝汽器管道密封性,降低空气泄漏风险。智能优化技术,冷端系统监测:基于大数据分析平台,实时监测凝汽器端差、循环水泵效率等指标,构建多变量特征矩阵;自动寻优模型:结合机组负荷、循环水参数,动态计算最佳背压值并推荐循环水泵运行方式(如单泵/双泵切换)。设备运行管理,凝汽器清洁维护:定期清理管壁污垢,降低传热阻力,保持端差 $\leq 5^{\circ}\text{C}$;抽气系统优化:调整轴封供汽压力与凝结水流量,确保抽气器高效运行;凝汽器水位控制:维持水位在 $50\%\sim 60\%$ 范围内,避免过高导致换热面积减少或过低引发漏真空。

4.3 综合效益分析。通过上述策略,可实现真空系统综合能耗降低 $10\%\sim 15\%$,煤耗下降 $1.5\sim 3\text{g}/\text{kWh}$ 。例如,某案例中真空优化结合抽汽供热协同调控,使碳排放强度减少 18% ,同时延长设备寿命 15% 以上。

5 火电厂汽轮机运行优化策略实施方案

5.1 热力参数调控。蒸汽参数优化,主蒸汽温度压红线运行($535\sim 757^{\circ}\text{C}$),减少减温水用量;通过燃烧优化与受热面吹灰频率调整,降低排烟温度 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$,提升锅炉效率 $0.3\%\sim 0.5\%$ 。滑参数启停:基于转子应力监测数据优化启停曲线,降低启停阶段能耗损失。抽汽与回热系统协同,调整抽排汽流量分配,结合供热需求减少冷源损失;提高高加投入率至 98% 以上,维持给水温度稳定以提高传热效率。

5.2 设备运维管理。气阀运行模式改进,将单阀调节切换为顺序阀调节,减少节流损失 $5\%\sim 8\%$,避免喷嘴与外缸变形导致的额外能耗。密封系统优化,控制电动机三态逻辑实现滑启滑停,减少温度骤变引发的漏泄风险;优化轴封供汽压力,降低空气渗入概率。凝汽器水位控制,水位维持在 $50\%\sim 60\%$ 区间,避免过高导致换热面积缩减或过低引发真空泄漏。

5.3 调频响应优化。一次调频参数调整,通过汽机、锅炉、电气专业协同,优化机组转速不等率(δ),平衡调频响应速度与动态飞升风险。深度调峰改造,采用汽轮机通流优化、辅机变频控制等技术,提升低负荷工况稳定性;结合负荷预测制定动态控制策略。

5.4 智能化协同升级。冷端智能监控,部署大数据分析平台,实时监测凝汽器端差、末级叶片摩擦风险等参数,构建多变量特征矩阵并推荐最优运行参数。数字孪生应用,建立汽轮机全生命周期模型,模拟不同工况下的设备状态,预判故障并优化维护周期。实施效益,通过上述策略,可实现煤耗下降 $1.5\sim 3\text{g}/\text{kWh}$,综合能耗降低

10%-15%，典型案例中碳排放强度减少18%⁵，设备寿命延长15%以上。需注意优先推进高回报率项目（如严密性治理、凝汽器清洁），再逐步实施系统性升级（如智能化平台部署）。

6 火电厂汽轮机节能效果评估

6.1 技术措施效能评估。二次再热技术应用，660-1000MW等级机组采用二次再热技术后，热效率较传统一次再热机组提升2-3%，综合煤耗降低5-8g/kWh。典型案例显示，某超临界机组通过二次再热技术优化，年均节约标煤超1万吨，减排二氧化碳约3万吨。真空系统优化，真空度每提升1kPa，煤耗可降低1.5-2.5g/kWh。某300MW机组通过凝汽器胶球清洗改造，端差从16℃降至4℃，传热效率提升30%。循环水系统动态调控（如季节性调整水泵运行台数）可使厂用电率下降0.2-0.5个百分点。通流部件与汽封改造，汽轮机叶片型线优化后，流动损失减少，典型机组煤耗下降5-8g/kWh。轴封系统改造（如优化供汽压力至0.12-0.15MPa）可减少冷空气渗入，摩擦损耗降低15%-20%。

6.2 管理措施效果验证。能耗监测与试验，按时开展全厂能量平衡试验与主辅设备性能试验，可精准识别能耗漏洞（如抽汽超温问题），修后热耗率同比降低3%-5%。某案例中，机组大修后通过热耗率对比评估，实际运行效率较设计值提升1.8%。智能化调控，动态蒸汽分配技术（抽排汽与减温减压器协同调控）可使供热碳排放强度下降18%，年节约燃料成本超500万元。

6.3 节能效果综合量化。

评估维度	典型节能效果（以300MW机组为例）
煤耗降低	10-15g/kWh
厂用电率下降	0.5-1.2个百分点
年节约标煤量	约1.2万吨
碳排放强度降幅	15%-20%

6.4 行业对标与推广价值。国家能源集团部分机组通过综合节能改造，能效水平位列行业前5%（如1000MW超超临界机组中90%的5A级机组采用优化技术）。二次再热技术已形成全谱系装备，推广后预计全国煤电行业年节煤量可达千万吨级，经济与环境效益显著。

当前优化策略呈现智能化、多目标协同趋势，需融合实时数据驱动模型（如专利提及的多层次动态模型）与传统热力学分析（如真空系统经济性评估），以实现全工况高效运行。未来可进一步探索数字孪生技术在汽轮机全生命周期管理中的应用。

参考文献

- [1]李俊.电厂汽轮机运行效率优化措施探讨[J].科技与创新,2022(2):79-80.
- [2]郎凌.电厂汽轮机高效节能与经济性改进潜力研究[J].中国科技纵横,2022(21):93.
- [3]傅惠.火电厂汽轮机组经济运行研究分析[J].化工设计通讯,2022,43(5):174.
- [4]安胜.提高电厂汽轮机效率与经济性研究[J].化工设计通讯,2022,43(10):71.
- [5]丁家.提高电厂汽轮机效率标准与经济性研究[J].中国标准化,2022(13):225-226.
- [6]程强.不同波形填料对冷却塔出塔水温及电厂机组热经济性的影响[J].水电能源科学,221,(2):187-191+175
- [7]荣超.提高电厂汽轮机效率与经济性研究[J].科技风,2021,(24):135-136.
- [8]王侠.提高汽轮机组运行经济性途径的分析与探讨[J].贵州电力技术,2021,(2):24-25.