

汽轮机节能技术的应用及优化改造措施

张德志

江西赣能股份有限公司丰城发电厂 江西 宜春 331100

摘要:火电机组汽轮机长期运行易出现通流损耗、汽封泄漏、系统匹配失衡等问题,导致能耗偏高、运行效率下降。本文剖析汽轮机工作原理与各类能耗损失成因,梳理通流优化、新型汽封、回热增效及智能调控等节能技术,从设备、系统、运维多维度制定优化改造方案。结合工程实例验证改造成效,结果表明相关改造可有效降低机组热耗与煤耗,兼具经济与环保价值,为同类机组节能升级提供参考。

关键词:汽轮机;节能技术;应用;优化改造措施

引言:双碳目标下,火电行业节能降碳、提质增效成为核心发展方向。汽轮机作为火电机组核心做功设备,其运行效率直接决定机组能耗水平。当前多数在役机组存在设备老化、通流效率低、蒸汽泄漏量大、变工况运行能耗高等诸多问题。为破解机组能耗瓶颈,本文系统性分析汽轮机能耗损失关键因素,探究各类先进节能技术的应用路径,制定针对性优化改造策略,助力火电机组实现高效、低碳、稳定运行。

1 汽轮机工作原理及能耗损失核心分析

1.1 汽轮机基本工作原理与系统构成

(1)原理:汽轮机基于朗肯循环,高温高压蒸汽经喷嘴膨胀加速,热能转为动能;高速气流冲击动叶片,推动叶轮旋转,动能转为转子机械能,驱动发电机。做功能力由蒸汽初参数(压力、温度)与终参数(排汽真空或背压)决定。(2)系统组成:本体含转子、静子、叶片、汽缸及轴承;回热系统由高加、除氧器、低加及抽汽管道构成,用做功蒸汽加热给水提效率;调节系统含调速器、油动机、调节阀,控制进汽与功率;辅机系统有凝汽器、循环水泵、给水泵、真空泵等,保障安全运行。(3)运行与负荷调节:工况含启动、停机、额定及变负荷。负荷调节采用喷嘴或节流调节,改变阀开度或投切喷嘴数调整进汽流量响应电网,同时协调锅炉燃烧与给水维持参数稳定。

1.2 汽轮机主要能耗损失类型及成因

(1)通流损失:包括叶片表面摩擦及叶型气动设计偏差引起的型损、二次流与端部涡流造成的流动损失,以及动叶顶部、隔板与转子间的级间泄漏损失,直接降低蒸汽做功效率。(2)汽封泄漏损失:传统迷宫汽封间隙因长期运行磨损增大,或弹簧片老化导致退让,造成高压侧蒸汽未经充分做功即泄漏至低压侧或轴封外漏,形成能量损耗。(3)系统辅助损失:回热加热器端差过

大、疏水不畅致换热效率偏低;调节阀节流产生压损;辅机选型裕度过大或偏离设计点运行,增加厂用电消耗。(4)运行工况损失:变负荷时调节级效率下降,部分负荷下进汽参数偏离设计值,热耗率显著上升,低负荷工况尤为突出^[1]。

1.3 汽轮机能耗影响关键因素

(1)设备本体因素:通流部件长期运行产生固体颗粒侵蚀或腐蚀,叶片表面粗糙度增大;结构设计存在局部涡流区;汽缸变形、轴封磨损均加剧内漏。(2)运行调控因素:控制系统响应滞后或PID参数整定不当导致参数波动;负荷分配未考虑各机组最优工况,长时间偏离额定工况运行。(3)运维管理因素:检修周期不合理、汽封间隙调整未达标准、无损检测技术落后;系统改造后未进行热力性能复核,设备间匹配性不足,综合能耗升高。

2 汽轮机节能技术应用分析

2.1 汽轮机通流节能优化技术

(1)三元流叶片优化设计技术,降低蒸汽通流损耗:基于计算流体力学全三维数值模拟,采用弯扭联合成型的三元流叶型,使叶片表面载荷分布更趋均匀,有效抑制端部二次流与横向涡流。通过控制叶片攻角沿叶高变化规律,减少激波损失与尾迹掺混损失,级效率可提升1.5%~3%。(2)通流部件精密修复与升级技术,提升机组级效率:针对长期运行后叶片冲蚀、蜂窝磨损及粗糙度恶化问题,采用激光熔覆与超音速喷涂修复叶型轮廓,配合电火花抛光恢复表面光洁度。老旧机组可将原冲动式叶型升级为反力度更高的新型叶型,降低动静叶间轴向间隙漏汽,整体缸效率恢复至设计值甚至超越。(3)多级通流匹配优化技术,适配宽负荷运行工况:通过重新核算各级焓降分配,调整静叶安装角与通流面积,使50%~100%负荷范围内各级马赫数保持合理区

间。采用全周进汽与部分进汽相结合的方式,配合低压缸分流优化,有效缓解低负荷时末级长叶片鼓风与脱流问题,拓宽高效运行区间。

2.2 汽封系统节能密封技术

(1) 蜂窝汽封、布莱登汽封等新型密封技术应用原理:蜂窝汽封在密封面布设正六边形蜂窝网格,利用蜂窝腔室产生涡旋耗散效应,将泄漏蒸汽的动能转化为热能,密封间隙可比传统梳齿汽封减小0.15~0.25mm;布莱登汽封采用自主调整的螺旋弹簧结构,机组启动时保持大间隙避免碰磨,运行后蒸汽力使密封齿径向闭合至最佳间隙,兼具安全性与低泄漏率^[2]。(2) 轴封间隙精准调整技术,减少蒸汽泄漏损耗:采用激光测距与塞尺逐级测量结合,将轴封径向间隙控制在设计值下偏差范围。引入假轴试装工艺,模拟转子挠度影响,确保各汽封块随动性良好,漏汽率较传统粗调方式降低20%~30%。(3) 组合式汽封改造技术的工程应用优势:针对高中压缸不同区段采用“蜂窝+布莱登+刷式”组合方案——高压段选用蜂窝汽封抗磨损,中压段选用布莱登汽封自适应调节,端部轴封选用刷式汽封柔性接触。组合方案兼顾长寿、可靠与低泄漏,改造后轴封漏汽减少约0.5~1.0t/h,缸效率提升0.8%~1.2%。

2.3 回热系统节能增效技术

(1) 高低压加热器优化运行技术,提升给水预热效率:通过在线监测加热器端差与上下端差变化趋势,及时调整疏水水位至最佳运行范围,避免疏水带汽或加热器汽侧淹没。对管束进行高压水射流清洗或机械除垢,恢复换热系数,使给水温度趋近设计值,每提升给水温度1℃,热耗降低约0.03%^[3]。(2) 抽汽系统参数优化,减少抽汽能量损耗:采用抽汽压损在线分析,调整抽汽止回阀及调节阀开度,将各级抽汽压损控制在不大于设计值5%范围内。结合机组负荷变化动态修正抽汽压力设定值,避免高品位蒸汽过度抽汽用于低品位加热。(3) 回热系统故障消缺与全程高效投运技术:针对疏水阀内漏、排汽管道堵塞、抽汽逆止门卡涩等顽疾制定专项消缺方案;优化机组启停阶段加热器投退时序,实现从并网至满负荷全过程加热器高效投运,避免低负荷退出运行导致经济性下降。

2.4 智能调控节能技术

(1) 机组精准负荷调节与配汽优化技术:采用阀门管理优化策略,通过试验获取每个调节阀的流量特性曲线,修正阀门重叠度,使调节级在负荷变化时保持高效区域运行。引入主汽压力滑压优化算法,根据负荷指令实时计算最优初压,部分负荷下热耗率降低1%~2%。

(2) 自动化控制系统升级,减少调节滞后与超调能耗:将原有PID控制升级为预测控制或模糊自适应控制,引入前馈信号协调锅炉与汽机响应速度,抑制蒸汽参数大幅波动。升级后主汽温度控制偏差由±5℃收窄至±2℃,再热汽温偏差由±8℃收窄至±3℃,参数稳定提升直接减少不可逆损失。(3) 宽负荷节能运行控制策略应用:制定全负荷范围内的最优运行曲线,包括滑压运行曲线、凝汽器最佳真空曲线、循环水泵组合运行方案,建立负荷-参数-效率三维寻优模型,实现40%~100%负荷范围内综合能耗最优,年均供电煤耗降低1.5~3.0g/kWh^[4]。

3 汽轮机优化改造措施与工程应用效果

3.1 汽轮机本体结构优化改造措施

(1) 老旧叶片更换与气动性能升级改造方案:针对运行超15年的机组,将原直叶片或扭叶片更换为新一代高效弯扭联合成型叶片,采用三维气动设计降低二次流损失。动叶顶部增设围带护角与径向汽封齿,减少叶顶漏汽;静叶采用表面镀铬或渗氮处理,提高抗冲蚀能力。替换后高压缸效率提升2~3个百分点。(2) 通流间隙精细化调整与流道优化改造工艺:采用激光跟踪仪精准测量各级轴向间隙与径向间隙,将隔板汽封间隙调整至设计值下限,动叶围带间隙控制在0.40~0.55mm范围。流道表面进行抛光处理,消除铸造毛刺与台阶错位,对排汽导流环进行流线型优化,减少排汽阻力损失。(3) 转子、隔板核心部件节能化改造措施:转子叶片叶根采用枞树形或倒T形升级替换,降低叶根应力集中;隔板采用焊接式薄壁结构替代铸造结构,减轻重量同时提高刚性。对末级动叶采取激光硬化处理,增强抗水蚀能力,延长大修周期。主轴轴颈修复后喷涂耐磨涂层,轴承损耗降低5%~8%。

3.2 辅助系统优化改造措施

(1) 汽封系统整体升级改造,根治泄漏能耗问题:高中压缸轴端采用蜂窝汽封+刷式汽封组合方案,隔板汽封全部更换为布莱登可调汽封,低压缸排汽侧采用螺旋齿汽封增强密封效果。同步改造汽封供汽管道和均压箱,增设自动压力调节装置,确保各段汽封供汽压力随负荷自动匹配。改造后轴封漏汽率下降40%~50%,缸效率提升1.0%~1.5%。(2) 回热系统、疏水系统优化改造,提升循环效率:高加增设外置蒸汽冷却器,提高给水出口温度5~8℃;低加疏水由逐级自流改为加装疏水泵打入凝结水系统,减少疏水端差。对全厂疏水阀进行普查更换,消灭内漏阀门20~30处,疏水系统保温层加厚至100mm以上,散热损失减少15%。(3) 循环水、辅机匹配优化改造,降低辅助能耗:循环水泵增设双速电机或

永磁调速,依据循环水进出口温差和环境温度自动调节转速,年节电率12%~15%。给水泵由定速改为液力耦合或变频调速,小流量工况下降低耗电。辅机选型富余系数过大的设备更换高效叶轮或切割调整,综合厂用电率降低0.5~0.8个百分点^[5]。

3.3 运行与运维优化改造策略

(1)精细化运行管控方案,优化变工况运行模式:建立机组负荷-真空-滑压参数三维优化图,每个工况点给出最优主汽压力和凝汽器真空指令。制定低负荷稳燃与汽机调门配合方案,负荷变化率控制在每分钟1%~2%额定负荷以内,减少热应力冲击引起的额外损失。运行值实行小指标竞赛考核,将主汽温度、再热温度、真空度、给水温度等纳入日常绩效。(2)定期能效检测与针对性检修改造机制:每年进行一次热力性能试验,测定缸效率、热耗率与设计值偏差,建立能耗劣化趋势档案。小修重点处理汽封磨损、阀门内漏等可在线消缺项目;大修前依据性能试验数据制定专项改造清单,做到“一机一策”,避免无效检修。(3)节能运维管理制度优化与人员操作规范升级:修订运行规程和检修作业指导书,明确节能操作强制条款。开展通流间隙测量、汽封安装、阀门研磨等关键工艺实操培训与资格认证,杜绝工艺粗糙造成的二次能耗损失。建立节能奖惩机制,将改造后节能效果与运维团队绩效考核挂钩。

3.4 工程改造案例与效果分析

(1)具体机组改造实施方案与技术参数设定:以某亚临界300MW汽轮机为例,实施高中压通流改造(更换三级高压静叶、四级中压动叶)、汽封系统全面升级(高中压轴端蜂窝+刷式、隔板布莱登汽封)、回热系统高加蒸汽冷却器加装及循环水泵双速改造。设定主汽压力16.7MPa、主汽温度537℃、背压4.9kPa,改造施工周期45天。(2)改造前后机组能耗、热效率、煤耗数据

对比:改造前高压缸效率78.2%、中压缸效率88.5%,热耗率8120kJ/kWh,发电煤耗330g/kWh;改造后高压缸效率81.5%、中压缸效率90.2%,热耗率7890kJ/kWh,发电煤耗320g/kWh。热耗率下降230kJ/kWh,煤耗下降10g/kWh。真空度由-92kPa提升至-94.5kPa,给水温度由258℃升至265℃。(3)改造后节能效益、经济效益与环保效益综合分析:按年运行5500h、标煤价800元/吨计算,年节约标煤1.65万吨,节省燃料成本约1320万元/年,项目总投资2600万元,投资回收期约2年。同时年减排CO₂约4.1万吨、SO₂约140吨、NO_x约120吨,综合节能环保效益显著,机组热耗指标进入同类机组先进水平行列。

结束语

本文通过分析汽轮机能耗损失类型与影响因素,整合多项成熟节能技术,构建了本体、辅机、运维全方位的优化改造体系。工程实践证实,通流升级、汽封改造、智能调控等措施可显著提升机组效率、降低煤耗与污染物排放。未来可结合大数据、智能算法,持续优化宽负荷运行策略,深化设备精细化改造,进一步挖掘机组节能潜力,推动火电设备绿色低碳高质量发展。

参考文献

- [1]彭世亮,王卫良,吕俊复,杨海瑞.超低负荷工况下汽轮机末级运行特性及其优化机制探索[J].热力发电,2024,53(06):65-78.
- [2]王建军,李庆,张宏.600MW超临界汽轮机通流改造节能效果分析[J].节能技术,2024,42(02):156-161.
- [3]高原.火电厂汽轮机节能降耗技术优化分析[J].建筑技术开发,2025,52(01):112-114.
- [4]薄强冲.变工况下汽轮机背压优化的节能控制策略[J].电力技术研究,2025,7(10):48-52.
- [5]朱伟峰.浅谈汽轮机高效运行节能优化技术研究[J].中国设备工程,2023,22(10):230-232.