

热电负荷耦合下汽轮机抽汽供热的优化运行方法

闫卫宾

国能亿利能源有限责任公司电厂 内蒙古 鄂尔多斯 014300

摘要: 热电负荷耦合下, 汽轮机抽汽供热优化运行需综合考虑热电耦合特性。通过构建基于热耗修正的负荷分配模型, 结合遗传算法与非线性规划求解, 实现全厂热耗最小化; 采用对角矩阵解耦法设计解耦器, 消除抽汽调整对发电负荷的交叉干扰; 引入蓄热罐与热泵技术, 实现梯级供热与余热回收, 提升能源利用效率。这些方法显著降低煤耗与排放, 增强机组调峰能力与运行灵活性。

关键词: 热电负荷耦合; 汽轮机; 抽汽供热; 优化运行方法

引言: 在能源需求持续增长与“双碳”目标约束下, 热电联产机组的高效运行成为能源转型的关键。汽轮机抽汽供热作为热电联产的核心环节, 其热电负荷的强耦合特性导致传统调控方式存在能耗高、调峰能力弱、负荷响应滞后等问题。如何突破热电耦合约束, 实现供热与发电的协同优化, 成为提升机组经济性与灵活性的重要课题。本文从机理建模、解耦控制、余热利用三方面提出优化策略, 为热电联产机组智能化运行提供理论支撑。

1 热电负荷耦合机理与特性分析

1.1 汽轮机抽汽供热系统结构

(1) 双抽供热机组工作流程: 机组运行时, 主蒸汽先进入高压缸做功, 完成一次能量转换后, 部分蒸汽作为高压抽汽引出, 用于高温供热需求; 其余蒸汽进入中压缸继续膨胀做功, 之后引出中压抽汽, 满足常规供热负荷; 剩余蒸汽进入低压缸完成最终做功, 推动发电机发电, 形成“高压缸-中压缸-低压缸”分级抽汽、功热联供的工作路径, 实现电能与热能的同步产出。(2) 热网侧连接方式: 直连供热直接将机组抽汽与热用户管网连通, 流程简单、损耗小, 适用于近距离供热; 间连供热通过换热器实现抽汽与用户循环水的热量交换, 隔离机组与热网, 运行安全性高, 适配远距离、大温差供热场景; 梯级供热结合高、中压抽汽特点, 按用户温度需求分级供能, 提升热能利用效率, 降低能源浪费。

1.2 热电耦合关系建模

(1) 基于汽轮机工况图的热电参数关系: 结合汽轮机工况曲线, 明确主蒸汽流量、电功率与供热量的耦合关联, 主蒸汽流量增加时, 电功率与供热量同步提升, 但三者增长速率存在差异, 工况图可直观反映不同运行状态下三者的匹配关系, 为耦合建模提供基础依据。(2) 动态模型构建: 以机组运行参数为核心, 构建包含燃料量、调节阀开度、抽汽蝶阀开度的动态模型, 燃料量变化直

接影响主蒸汽参数, 调节阀开度调控蒸汽进缸流量, 抽汽蝶阀开度决定抽汽量, 三者协同作用, 共同影响机组电功率与供热量的动态响应特性。(3) 耦合路径分析: 以抽汽蝶阀开度为例, 其开度变化会直接改变抽汽量, 进而影响汽轮机内蒸汽做功分配, 通过建立传递函数, 量化抽汽蝶阀开度对发电负荷的影响程度, 明确热电耦合的关键路径与作用规律^[1]。

1.3 耦合特性对运行的影响

(1) 热电牵连现象: 热电负荷存在强耦合关系, 电负荷突然变化会导致汽轮机做功改变, 进而影响抽汽压力与抽汽量, 引发热负荷波动; 反之, 热用户需求变化导致抽汽量调整, 会改变汽轮机内蒸汽流量分配, 影响发电负荷稳定性, 形成相互牵连的局面。(2) 传统控制方式的局限性: 传统机炉协调控制以稳定发电负荷为核心, 而抽汽压力控制以保障供热质量为目标, 两者控制优先级存在冲突, 当热电负荷发生波动时, 传统控制方式难以实现两者协同调控, 易出现供热质量不达标或发电负荷不稳定的问题, 无法适配热电耦合运行需求。

2 热电负荷耦合下汽轮机抽汽供热的优化运行方法体系构建

2.1 基于热耗修正的负荷分配优化

(1) 热耗计算方法: 以ASME标准为核心计算依据, 通过精准测量机组主蒸汽压力、温度、流量, 各段抽汽参数及排汽参数, 结合标准规定的计算流程与公式, 完成机组热耗的初始理论计算。考虑到机组长期运行过程中, 部件老化、结垢、磨损及运行工况偏离设计值等因素会导致理论热耗与实际热耗存在偏差, 引入实验热耗曲线进行修正, 通过多次工况试验拟合实际热耗特性曲线, 修正理论计算误差, 确保热耗计算结果能够真实反映机组运行状态, 为后续负荷分配优化提供精准的数据支撑。(2) 耗差信号引入: 针对机组实际运行中主汽压、

背压、给水温度等关键运行参数易偏离设计值,进而影响热耗效率的问题,引入耗差信号量化参数偏差带来的热耗损失。其中,主汽压偏低会增加蒸汽在汽轮机内的做功损耗,背压升高会降低汽轮机排汽可用能,给水温度偏离设计值会影响锅炉吸热效率与机组循环效率,将这些参数的耗差信号纳入优化体系,使负荷分配方案更贴合机组实际运行工况,提升优化的实用性^[2]。(3)优化模型构建:以全厂热耗最小化为核心目标函数,实现机组能源利用效率的最大化,降低发电供热综合能耗。同时,明确双重约束条件,一是满足电网电负荷调度需求与热用户实时供热需求,保障供能的稳定性与可靠性;二是严格遵循设备安全运行边界,包括汽轮机缸体温度、抽汽压力、锅炉蒸发量、给水泵出力等关键参数的限值,防止设备过载、超温、超压运行,构建兼顾经济性、安全性与可靠性的负荷分配优化模型。(4)求解算法:采用遗传算法与非线性规划相结合的混合求解策略,充分发挥两种算法的优势互补作用。遗传算法具备强大的全局寻优能力,能够有效规避局部最优解,快速筛选出符合各项约束条件的可行解范围;非线性规划则用于局部精细化寻优,对遗传算法得到的可行解进行迭代优化,进一步提升求解精度与效率,最终得到最优负荷分配方案,确保算法能够适配复杂的热电耦合工况,快速响应负荷波动。

2.2 解耦协调控制策略

(1)解耦器设计:针对热电耦合过程中,抽汽蝶阀开度调整会直接干扰汽轮机内蒸汽做功分配,进而影响发电负荷稳定性的问题,采用对角矩阵解耦法设计解耦器。通过建立抽汽蝶阀开度与发电负荷、抽汽压力之间的耦合关联矩阵,通过矩阵变换实现耦合关系的解耦处理,将多变量耦合控制系统转化为相互独立的单变量控制系统,有效消除抽汽蝶阀操作对发电负荷的交叉干扰,实现热电负荷的独立、精准调控。(2)控制回路优化:重构机组控制回路结构,形成三大协同联动的控制回路,解决传统控制方式的调控冲突问题。燃料-压力控制回路通过实时调节燃料供应量,稳定主蒸汽压力,为机组做功与供热提供稳定的蒸汽源;调节门-功率控制回路通过精准调整汽轮机调节门开度,跟踪电网电负荷调度需求,保障发电负荷稳定性;抽汽压力闭环控制回路实时监测抽汽压力变化,通过调节抽汽蝶阀开度,维持抽汽压力稳定,保障供热质量,三大回路协同工作,实现热电负荷的协调优化调控。(3)动态响应仿真:基于机组实际运行参数,搭建热电耦合动态仿真模型,模拟热电负荷突变、参数扰动等典型运行场景,对比传统控制策略与

解耦协调控制策略的负荷跟踪能力与动态响应特性。仿真结果表明,解耦协调控制下,电负荷、热负荷的动态响应速度显著提升,负荷波动幅度大幅减小,在负荷突变时能够快速恢复稳定状态,有效解决了传统控制方式下热电调控冲突、响应滞后的问题,显著提升了机组运行的稳定性与灵活性^[3]。

2.3 梯级供热与余热回收技术

(1)低真空供热与抽汽耦合:打破传统机组低压缸排汽直接进入凝汽器冷却、余热浪费的运行模式,采用低真空供热技术,通过调整凝汽器运行参数,降低低压缸排汽真空度,提高排汽温度,将低压缸排汽余热引入热网系统。与高、中压抽汽形成梯级供热模式,根据热用户温度需求,合理分配高、中压抽汽量与低压缸排汽余热供应量,最大限度利用汽轮机排汽余热,减少高品位蒸汽消耗,显著提升全厂热能利用效率。(2)热泵技术应用:在热网循环水系统中配套引入热泵装置,重点回收循环水排放的低品位余热,通过热泵系统的能量提升作用,将低品位余热升温至符合用户需求的供热温度后,送入热网补充供热。此举可有效减少高品位抽汽量,将节省的高品位蒸汽用于汽轮机做功发电,实现“余热回收-节能发电-稳定供热”的协同效益,进一步优化热电耦合运行模式,提升机组经济运行水平^[4]。(3)蓄热调峰系统:配套建设大容量蓄热罐,采用高效蓄热介质,实现富余热能的存储与短缺热能的释放,平衡热负荷的日内、日间波动。当热负荷处于低谷时段,机组产生的富余热能存储于蓄热罐中,避免热能浪费;当热负荷处于高峰时段,蓄热罐释放存储的热能,补充机组供热不足,有效缓解热电负荷波动带来的调控压力,增强机组调峰能力,在保障供热稳定性与连续性的同时,提升机组运行灵活性,适配热电负荷的动态变化需求。

3 热电负荷耦合下汽轮机抽汽供热优化运行方法的案例分析与应用验证

3.1 案例背景

(1)某热电厂双抽供热机组参数:该热电厂配备2台300MW亚临界双抽凝汽式供热汽轮机,机组采用高压缸、中压缸、低压缸三级做功+双抽汽供热模式,设计主蒸汽压力16.7MPa、主蒸汽温度538℃,额定发电负荷300MW。其中,中压抽汽最大抽汽量为280t/h,抽汽压力0.98MPa,用于远程间连热网高温供热;低压抽汽最大抽汽量为320t/h,抽汽压力0.25MPa,适配近程直连热网供热,两台机组联合运行可满足周边工业用户与居民用户的综合供热需求,机组投产运行5年,存在热电耦合干扰明显、能耗偏高的问题。(2)供热需求特征:该热电厂

供热范围涵盖近程居民供热与远程工业供热,采用“近程直连+远程间连”双热网布局。近程直连热网服务周边3个居民小区,供热面积约180万 m^2 ,负荷波动较大,昼夜负荷差达45%,主要需求为冬季采暖;远程间连热网服务8家工业企业,供热负荷相对稳定,昼夜负荷差控制在15%以内,主要需求为生产用汽与采暖兼顾,两套热网负荷分配需结合抽汽参数与供热距离,实现热能高效输送与供需匹配。

3.2 优化方法实施

(1) 负荷分配优化软件应用:基于前文构建的热耗修正优化模型,部署负荷分配优化软件,软件集成ASME热耗计算、耗差分析与混合算法求解模块。运行过程中,实时输入电网电负荷调度指令、两套热网的实时供热需求,软件自动采集机组主汽压、背压、给水温度等运行参数,计算耗差信号,输出两台机组的最优主蒸汽流量、抽汽量及负荷分配设定值,实现全厂热耗最小化运行,操作人员可根据软件提示完成参数调整,提升优化便捷性。(2) 解耦控制策略改造:对机组原有DEH(数字电液调节)系统进行升级,增加抽汽蝶阀解耦控制模块,采用对角矩阵解耦法,构建抽汽蝶阀开度与发电负荷、抽汽压力的解耦模型,消除抽汽调整对发电负荷的交叉干扰。同时,优化DEH系统控制逻辑,整合燃料-压力、调节门-功率、抽汽压力闭环三大控制回路,实现热电负荷独立调控,解决传统控制中调控冲突的问题。(3) 梯级供热系统改造:结合机组运行特点,增设1台1000 m^3 蓄热罐与2台高温热泵装置,调整热网循环水流程。蓄热罐与热网主干管并联,用于平衡热负荷昼夜波动;热泵装置接入循环水回水管道,回收低品位循环水余热并升温至85 $^{\circ}\text{C}$ 后送入热网;同时,优化低真空供热与双抽汽的耦合流程,调整低压缸排汽参数,提高排汽余热利用率,形成“高/中压抽汽+余热回收+蓄热调峰”的梯级供热系统。

3.3 效果评估

(1) 经济性指标:优化方案实施后,机组供热期发

电煤耗较改造前降低18.6g/(kWh),年节约标准煤约1.2万吨,按当前燃煤价格计算,年减少运行成本约960万元;同时,梯级供热与余热回收技术的应用,降低了高品位抽汽消耗量,进一步提升了机组能源利用效率,经济性效益显著。(2) 灵活性指标:解耦协调控制与蓄热调峰系统的投入,使机组调峰深度从改造前的60%提升至45%,可更好适配电网调峰需求;AGC(自动发电控制)响应速度从改造前的3.5%额定负荷/分钟,加快至5.2%额定负荷/分钟,提升了机组对电网负荷调度的响应能力,解决了热电耦合导致的负荷调整滞后问题。(3) 环保性指标:随着年燃煤量的减少,机组 CO_2 年排放量减少约3.2万吨,污染物排放得到有效控制;热泵装置与低真空供热技术的应用,使低品位热能利用率从改造前的38%提高至62%,减少了热能浪费,实现了“节能+环保”的双重效益,契合绿色能源发展要求。

结束语

热电负荷耦合下汽轮机抽汽供热的优化运行,通过热耗修正分配、解耦协调控制及梯级余热利用等创新方法,有效破解了传统调控中热电牵连、能耗偏高、调峰受限等难题。实践表明,优化策略可显著降低发电煤耗、提升负荷响应速度,并实现节能减排目标。未来,随着智能控制与储能技术的融合应用,热电联产机组将向更高效、更强灵活性的方向演进,为能源绿色转型提供关键支撑。

参考文献

- [1]陈刚,刘伟.基于模型预测控制的背压式汽轮机负荷调节策略[J].电力系统自动化,2022,46(12):112-119.
- [2]赵鹏,孙丽,何军.智能控制技术在热电厂汽轮机负荷调节中的应用研究[J].控制工程,2020,27(7):85-91.
- [3]刘志鹏.集控运行汽轮机运行优化措施分析[J].中国设备工程,2024(2):102-104.
- [4]曹云鹏.集控运行汽轮机运行优化措施分析[J].现代工业经济和信化,2022,12(9):273-274.