

热力燃气耦合供能系统运行优化与能效提升策略研究

张 涛

中土大地国际建筑设计有限公司 河北 石家庄 050000

摘要: 本文针对热力燃气耦合供能系统,开展运行优化与能效提升策略研究。通过深入分析系统构成、耦合特性及运行约束条件,构建核心设备与整体系统数学模型并验证。建立涵盖经济性、能效、环保的多目标优化体系,改进优化算法以提升求解性能。设计常规与极端工况下的运行优化方案,提出设备、系统、智能管控层面的能效提升策略,为系统高效稳定运行及能效提升提供全面理论支撑与实践指导。

关键词: 热力燃气耦合供能系统; 运行优化; 能效提升策略

引言: 随着能源需求攀升与碳减排要求提高,热力燃气耦合供能系统作为高效利用能源的重要方式,受到广泛关注。该系统整合多种设备,实现热电联产与能量梯级利用,但运行中存在成本较高、能效较低、碳排放较多等问题。研究其运行优化与能效提升策略,有助于降低运行成本、提高能源利用效率、减少碳排放,对推动能源系统可持续发展、满足社会用能需求具有重要的现实意义和应用价值。

1 热力燃气耦合供能系统机理分析与建模

1.1 热力燃气耦合供能系统构成与耦合特性

(1) 系统核心构成: 燃气轮机作为核心动力设备,负责将燃气能量转化为电能与热能; 余热锅炉回收燃气轮机排气余热,产生蒸汽满足供热需求; 热力管网承担热能输送任务,保障热量稳定供给终端; 燃气管网负责燃气输送与分配,为发电、供热设备提供原料; 储能装置可平抑能量波动,提升系统灵活性; 控制单元实现各设备协同运行,保障系统高效可控。(2) 系统耦合机理: 核心是热力与燃气系统的能量协同与互补,热电联产(CHP)机组通过能量梯级利用,将燃气的高品位能量用于发电,低品位余热用于供热,提升能源利用效率; 电转气(P2G)技术可将富余电能转化为燃气储存,实现电能与燃气能的双向转换,缓解能源供需矛盾,强化两大系统的耦合关联。(3) 系统运行约束条件: 安全约束包括燃气管道压力限值、热力管网温度阈值,避免泄漏或超温损坏; 稳定约束要求供需平衡,防止负荷骤变导致系统波动; 高效约束需控制设备运行效率,减少能量损耗,同时兼顾热力与燃气系统的协同匹配,避免单一系统过载^[1]。

1.2 核心设备数学建模

(1) 燃气发电与供热设备建模: 基于能量守恒定律,构建燃气轮机输入(燃气流量)与输出(电能、排气余

热)特性模型,引入效率-负荷关联函数,反映不同负荷下的运行效率; 热电联产机组模型结合发电效率与供热系数,量化电、热输出的耦合关系,适配负荷变化需求。(2) 热力与燃气传输设备建模: 热力管网模型考虑管道热惯性与热损耗,结合环境温度、传输距离,建立温度衰减动态方程; 燃气管网采用节点压力法,构建压力与流量的动态关联模型,反映管网阻力、泄漏等因素对传输特性的影响。(3) 储能与辅助设备建模: 相变储热模型基于相变材料的热物理特性,描述储热、释热过程的能量变化; 管道储能模型量化燃气在管道内的储存容量与压力变化关系; 辅助系统模型简化描述水泵、风机等设备的运行特性,保障系统协同运转。

1.3 系统整体建模与验证

(1) 系统整体模型构建: 整合各核心设备数学模型,嵌入热力与燃气系统的耦合机理,明确设备间的能量流、物质流关联,通过联立方程组形成完整的系统数学模型,实现对系统整体运行状态的精准描述。(2) 模型验证: 选取实际工程的运行数据,包括燃气消耗量、发电量、供热量及管网参数等,将数据代入整体模型进行仿真计算,对比仿真结果与实际数据的偏差,修正模型参数,验证模型的准确性与适用性,确保模型能真实反映系统实际运行状态。

2 热力燃气耦合供能系统运行优化研究

2.1 运行优化目标体系构建

(1) 经济性目标: 以系统运行成本最小化为核心,全面涵盖燃料成本、设备运维成本、能耗成本等关键组成部分。其中燃料成本主要取决于燃气采购量及市场价格波动,需结合燃气消耗规律与价格走势动态调整; 设备运维成本包括燃气轮机、余热锅炉、管网等核心设备的日常检修、故障维护及老化更换费用,按设备运行时长与负荷强度合理量化; 能耗成本重点考虑电能损耗、热

能损耗带来的额外支出,通过优化设备运行参数与管网传输效率降低损耗,最终构建兼顾各类成本的经济性目标函数。(2)能效目标:以系统综合能源利用效率最大化为核心目标,聚焦能源传输与转换全流程的损耗控制。一方面优化热电联产机组、燃气轮机的运行工况,提升能量梯级利用效率,减少能量转换过程中的无效损耗;另一方面优化热力管网、燃气管网的传输参数,降低管道散热、燃气泄漏等传输损耗,同时协调储能装置与各设备的协同运行,避免能源闲置与浪费,实现系统能源利用效率的最大化^[2]。(3)环保目标:结合当前碳减排政策要求,以碳排放总量最小化为辅助目标,将阶梯碳交易机制融入优化体系。明确系统碳排放主要来源为燃气燃烧过程,通过优化燃气消耗结构、提升能源利用效率,从源头减少碳排放;同时结合阶梯碳交易规则,量化碳排放成本,将其纳入整体优化目标,实现经济性、能效性与环保性的协同平衡。

2.2 运行优化算法选择与改进

(1)常用优化算法对比:系统分析遗传算法、粒子群算法、多宇宙算法(MVO)等在耦合系统优化中的适用性与局限性。遗传算法具备全局搜索能力强、鲁棒性好的优势,适用于多目标、多约束的耦合系统优化,但存在收敛速度慢、易早熟的问题;粒子群算法结构简单、求解速度快,适合处理连续变量优化问题,但在复杂约束场景下易陷入局部最优;多宇宙算法(MVO)全局搜索能力突出,收敛精度较高,但对耦合系统的复杂约束适配性不足,需结合系统特性调整参数。(2)优化算法改进:针对传统算法易陷入局部最优、收敛性不足的问题,引入双重改进策略提升算法性能。一方面采用自适应权重调整机制,根据算法迭代进程动态调整搜索权重,平衡全局搜索与局部寻优能力;另一方面融入交叉变异优化策略,避免算法早熟收敛,同时结合热力燃气耦合系统的约束条件,添加约束处理算子,提升算法对复杂约束的适配性,最终形成改进型优化算法,增强其收敛稳定性与优化精度^[3]。(3)算法验证:通过仿真测试验证改进算法的性能优势,以系统整体模型为基础,设置相同的初始参数、约束条件与优化目标,分别采用传统算法与改进算法进行仿真计算。对比两种算法的求解速度、优化精度及收敛稳定性,重点分析改进算法在降低运行成本、提升能源效率、减少碳排放方面的优化效果,验证改进算法在热力燃气耦合供能系统优化中的适用性与优越性。

2.3 不同工况下的运行优化方案设计

(1)常规工况优化:基于典型负荷场景(如工作日

平稳负荷、夜间低谷负荷),结合系统约束条件与优化目标,设计系统最优运行参数与设备调度方案。优化燃气轮机、热电联产机组的负荷分配,协调热力管网与燃气管网的传输参数,合理调度储能装置的储放能时机,确保系统在满足终端供能需求的前提下,实现运行成本最低、能源效率最高、碳排放最少的优化目标。(2)极端工况优化:针对高峰负荷(如冬季采暖高峰、夏季用电高峰)、设备故障(如燃气轮机停机、管网泄漏)、燃气供应波动(如燃气短缺、价格骤涨)等极端场景,设计鲁棒性优化方案。高峰负荷时,优先调度储能装置释能,合理调整热电联产机组负荷,保障供能稳定;设备故障时,快速切换备用设备,优化剩余设备运行参数,降低故障对系统的影响;燃气供应波动时,调整能源供给结构,结合电转气技术实现能源互补,确保系统稳定运行。(3)多场景优化对比:系统分析常规工况与极端工况下优化方案的经济性、能效性与环保性指标,对比不同方案的运行成本、综合能源利用效率、碳排放总量等核心参数。验证优化方案在不同工况下的适应性与灵活性,针对不同场景的短板的问题,进一步调整优化策略,形成兼顾稳定性、经济性与环保性的多场景适配优化方案,为系统实际运行提供理论支撑。

3 热力燃气耦合供能系统能效提升策略

3.1 设备层面能效提升策略

(1)核心设备能效优化:聚焦燃气轮机、余热回收装置等核心设备,通过运行参数精准调整与技术改造提升能效。优化燃气轮机的空燃比、点火时机等运行参数,使其处于最优工作区间,降低单位能耗;在余热回收装置中应用新型高效工质,优化换热结构,提升余热回收效率,减少高温烟气的能量浪费;对燃烧系统进行优化改造,采用低氮燃烧技术,在降低污染物排放的同时,提升燃料燃烧充分性,进一步提升设备能效。(2)设备运维优化:建立基于物联网的预测性维护体系,实现设备运维的智能化与精细化。通过在核心设备上安装传感器,实时采集运行参数、振动频率、温度变化等数据,结合大数据分析技术,精准预判设备潜在故障,提前开展维护作业,减少非计划停机时间;定期对设备进行全面检修与校准,及时更换老化部件,优化润滑、冷却等辅助系统,提升设备运行稳定性,延长设备使用寿命,间接提升系统整体能效^[4]。(3)新型设备应用:积极推广高效节能新型设备,拓宽系统能效提升空间。引入燃料电池供能技术,其能量转换效率远高于传统燃气轮机,且运行过程清洁无噪声,可与现有系统协同运行,提升局部供能效率;试点应用超临界二氧化碳循环技术,替

代传统蒸汽循环,大幅提升能量转换效率,减少能源损耗,同时降低系统占地面积,推动系统向高效化、小型化发展。

3.2 系统层面能效提升策略

(1) 能量梯级利用优化:基于能量品位差异,优化热力与燃气系统的能量分配,实现不同品位能源的梯级利用。将燃气的高品位能量优先用于发电,发电过程中产生的中低品位余热,通过余热锅炉回收后用于集中供热、工业用汽等场景,避免高品位能源的低效率利用;合理分配热力管网的供热量,根据终端用户的用能需求,分级供给不同温度的热能,减少热能降级损耗,提升整体能源利用效率。(2) 多能源协同优化:结合光伏、风电等可再生能源,构建热力、燃气与可再生能源协同运行体系。利用光伏、风电产生的清洁电能,补充系统用电需求,减少燃气轮机的发电负荷,降低燃气消耗;通过储能装置协调可再生能源与热力、燃气系统的运行,缓解可再生能源波动性带来的影响,提升系统消纳能力;优化多能源的调度策略,实现各类能源的互补利用,进一步提升系统整体能效水平。(3) 管网能效优化:针对热力、燃气管网的传输损耗问题,优化管网运行参数,提升传输效率。对热力管网进行保温改造,采用高效保温材料,减少管道散热损耗,同时优化管网流量与压力参数,降低输送过程中的动力损耗;对燃气管网进行泄漏检测与修复,采用智能泄漏监测技术,及时发现并处理泄漏点,减少燃气浪费,同时优化管网压力调节策略,降低输送能耗,提升管网传输的经济性与高效性^[5]。

3.3 智能管控层面能效提升策略

(1) 数字孪生技术应用:构建热力燃气耦合供能系统的数字孪生虚拟模型,实现系统运行状态的实时监控与参数动态优化。将物理系统的设备参数、运行数据、环境条件等实时映射至虚拟模型,通过虚拟仿真模拟不同运行场景下的系统状态,预判能效瓶颈;基于仿真结果,动态调整设备运行参数与调度策略,实现系统能效的实时优化,提升运行管控的精准度。(2) 智能调度系

统搭建:基于人工智能算法,搭建系统智能调度平台,实现负荷精准预测与设备协同调度。利用机器学习算法分析历史用能数据、气象数据等,精准预测终端热、电负荷需求;结合预测结果,优化燃气轮机、热电联产机组、储能装置等设备的运行调度,实现设备协同高效运转,避免设备空载、过载运行,提升系统运行智能化水平与能效。(3) 需求侧响应优化:建立需求侧响应机制,引导用户合理用能,实现供需平衡,减少能源浪费。通过价格杠杆、激励政策等方式,引导用户错峰用能,避开负荷高峰时段,降低系统峰值负荷压力;向用户推送用能建议,鼓励用户采用节能设备,优化用能习惯,减少无效用能;建立用户用能反馈机制,根据用户用能需求调整系统供能方案,实现供需精准匹配,提升能源利用效率。

结束语

本文围绕热力燃气耦合供能系统,从机理建模、运行优化目标体系构建、优化算法改进,到不同工况运行优化方案设计与能效提升策略提出,进行了全面系统研究。通过构建多目标优化体系与改进算法,实现系统在不同工况下经济、高效、环保运行。所提出的能效提升策略,为系统优化升级提供了有效路径。未来可进一步探索多能源互补与智能调控技术,推动系统向更高水平发展。

参考文献

- [1]杨爽.新能源系统格局下辽河油田地面工程发展对策[J].油气田地面工程,2023,42(08):6-11.
- [2]陈立波.AI负荷预测模型在智慧供热系统中的应用研究[J].区域供热,2022,(04):123-131.
- [3]樊兴,尹甲丁.供热系统中节能技术的实施策略[J].智慧中国,2023,21(05):90-91.
- [4]杨亮.节能技术在集中供热系统改造工程中的应用[J].江苏建材,2022,35(03):104-106.
- [5]郭秀芬,赵波.供热系统安全管理的实践与探索[J].热能动力工程,2023,41(05):56-61.