

燃气-蒸汽联合循环电厂运行参数协同优化及能效提升路径分析

黄新华

华电福新广州能源有限公司 广东 广州 511340

摘要: 本文聚焦燃气-蒸汽联合循环电厂, 阐述其工作原理, 分析热效率等能效评估指标及理论计算等评估方法。构建运行参数协同优化模型, 明确优化目标与约束条件。提出燃气轮机、余热锅炉、蒸汽轮机运行参数优化策略, 评估综合应用效果。并从设备改造升级、运行管理与控制优化、能源管理与综合利用三方面探讨能效提升路径, 为电厂提升能效、降低能耗、增强竞争力提供理论依据与实践指导。

关键词: 燃气-蒸汽联合循环电厂; 运行参数协同优化; 能效提升路径; 节能降耗

1 燃气-蒸汽联合循环电厂基本原理及能效分析

燃气-蒸汽联合循环电厂巧妙融合燃气轮机循环与蒸汽轮机循环, 实现能源的高效梯级利用。其工作过程分为两个紧密衔接的阶段。在燃气轮机循环中, 空气经压气机压缩后, 压力与温度急剧上升, 随后进入燃烧室与燃料充分混合燃烧, 产生高温高压燃气。燃气急剧膨胀推动燃气轮机高速旋转, 带动发电机发电, 将燃料的化学能初步转化为电能。然而, 此时燃气排出仍携带大量余热, 若直接排放将造成能源浪费。为提升能源利用率, 联合循环电厂引入蒸汽轮机循环。燃气轮机排出的高温烟气进入余热锅炉, 将给水加热成高温高压蒸汽。蒸汽随后进入蒸汽轮机, 推动其叶片转动, 再次带动发电机发电, 将烟气余热进一步转化为电能。通过这一过程, 实现了能源在不同温度段的梯级利用, 使原本被废弃的烟气余热“变废为宝”, 显著提高电厂的整体发电效率。从能效角度看, 燃气-蒸汽联合循环电厂优势明显。热效率是衡量其能效的核心指标, 相较于单一循环发电方式, 联合循环电厂的热效率大幅提升, 通常可达55% - 60%, 甚至更高。供电效率因考虑厂用电等自身消耗, 更贴近实际发电情况, 也表现出色。单位发电量燃料消耗量显著降低, 意味着生产相同电量所需燃料更少, 能源利用更充分。

2 燃气-蒸汽联合循环电厂运行参数协同优化模型构建

2.1 运行参数分析

在燃气轮机部分, 关键参数包括压气机进口空气温度、压力, 燃烧室进口空气流量、燃料流量以及燃气轮机排气温度等。压气机进口参数影响压缩效率, 进而影响整个循环的能量输入; 燃料流量与空气流量配比决定

燃烧充分程度和排气温度, 排气温度又直接关系到余热锅炉的吸热量^[1]。蒸汽轮机方面, 主蒸汽压力、温度、流量, 再热蒸汽参数以及凝汽器真空度等是重要参数。主蒸汽参数决定蒸汽做功能力, 凝汽器真空度影响蒸汽轮机排汽压力, 从而影响循环热效率。余热锅炉作为连接两个循环的纽带, 其给水温度、烟气侧与水侧的换热效率等参数不容忽视。给水温度影响蒸汽产生量, 换热效率则决定了烟气余热的回收程度。环境温度、大气压力等外部参数也会对电厂运行参数产生影响。

2.2 优化目标与约束条件确定

优化目标; 燃气-蒸汽联合循环电厂运行参数协同优化的核心目标是提升整体能效与经济效益。一方面, 追求提高电厂的发电效率, 通过合理调整运行参数, 使燃料化学能尽可能多地转化为电能, 减少能量在转换过程中的损失, 降低单位发电量的燃料消耗。另一方面, 注重降低发电成本, 综合考虑燃料价格、设备维护成本、运行能耗等因素, 在保证发电量的前提下, 实现成本最小化, 增强电厂在市场中的竞争力。约束条件; 优化过程需满足一系列约束条件。设备性能约束方面, 各设备如燃气轮机、蒸汽轮机、余热锅炉等均有其设计运行参数范围, 运行参数调整不能超出设备承受能力, 以确保设备安全稳定运行。排放约束上, 电厂需遵守国家环保法规, 严格控制氮氧化物、二氧化硫、粉尘等污染物的排放浓度和总量, 避免对环境造成不良影响。

2.3 协同优化模型建立

在明确运行参数、优化目标与约束条件后, 构建燃气-蒸汽联合循环电厂运行参数协同优化模型。首先, 采用数学建模方法, 将电厂各设备及整个系统的运行过程抽象为数学表达式。以燃气轮机为例, 可基于热力学

原理建立其功率输出、效率与运行参数（如压气机进口温度、燃料流量等）之间的函数关系；蒸汽轮机部分同样建立主蒸汽参数、排汽压力等与功率、效率的数学模型。余热锅炉则通过换热方程描述烟气与水的换热过程。其次，将各设备模型整合为整个联合循环系统的模型，以发电效率最高、发电成本最低作为目标函数，综合考虑设备性能、排放和电力负荷等约束条件，构建一个多目标、多约束的非线性优化模型。为求解该模型，可运用智能优化算法，如遗传算法、粒子群算法等。这些算法具有强大的全局搜索能力，能够在复杂的参数空间中寻找满足约束条件的最优解，即得到一组能使电厂在满足各种要求下实现最佳运行性能的运行参数组合，为电厂实际运行提供科学指导。

3 关键运行参数优化策略与能效提升效果分析

3.1 燃气轮机运行参数优化策略

燃气轮机作为燃气-蒸汽联合循环电厂的核心设备之一，其运行参数优化对整体能效提升至关重要。压气机进口导叶角度是关键可调参数，通过实时监测环境温度、压力及机组负荷变化，动态调整进口导叶角度，可优化压气机进气流量与压力，使压缩过程更高效，降低压缩功耗，提高燃气轮机出力^[2]。燃料与空气配比也是优化重点。借助先进的燃烧控制系统，精确控制燃料喷射量与空气流量，确保燃料充分燃烧，既提高燃烧效率，又降低氮氧化物等污染物排放。合理调整燃烧室温度场分布，避免局部过热或燃烧不充分，延长燃烧室部件使用寿命。燃气轮机排气温度对余热锅炉效率影响显著，在保证设备安全前提下，适当提高排气温度，可增加余热锅炉可利用的热量，但需平衡好与燃气轮机自身效率的关系。

3.2 余热锅炉运行参数优化策略

余热锅炉在联合循环中起着能量回收与转换的关键作用，优化其运行参数可有效提升能效。给水温度是重要优化方向，通过调整高压加热器、低压加热器等设备运行状态，提高给水温度，可减少余热锅炉内水加热所需的热量，使更多烟气余热用于产生蒸汽，提高蒸汽产量与品质。合理控制烟气侧与水侧的流速和换热面积分配也十分关键，根据烟气流量、温度变化，动态调整受热面布置与烟气分配，确保烟气与水充分换热，提高换热效率。防止局部受热面超温或积灰，定期进行吹灰操作，维持受热面清洁，保证换热性能稳定。另外，余热锅炉水位控制精度影响蒸汽品质与设备安全。采用先进的水位自动控制系统，实时监测并调整给水量，维持水位在合理范围内，避免因水位波动导致蒸汽带水或干锅

现象，保障余热锅炉高效、安全运行，充分回收燃气轮机排气余热，提升联合循环整体能效。

3.3 蒸汽轮机运行参数优化策略

蒸汽轮机运行参数的优化对联合循环电厂能效提升有着不可忽视的作用。主蒸汽参数（压力、温度）直接影响蒸汽轮机做功能力。通过优化锅炉燃烧与汽水系统运行，在设备允许范围内尽可能提高主蒸汽压力与温度，增加蒸汽焓降，提高蒸汽轮机内效率与输出功率。再热蒸汽参数优化同样关键，合理控制再热器运行，确保再热蒸汽温度与压力达到设计值，提高蒸汽在低压缸的做功能力，降低汽轮机末级叶片湿度，减少湿汽损失，提高汽轮机效率^[3]。凝汽器真空度是影响蒸汽轮机运行效率的重要因素，加强凝汽器真空系统维护，定期检查真空泵、水封管等设备，及时清理凝汽器铜管内壁污垢，降低循环水入口温度，提高循环水量，以维持凝汽器高真空度，减少蒸汽轮机排汽压力，提高循环热效率，实现能效提升。

3.4 优化策略综合应用与能效提升效果评估

将燃气轮机、余热锅炉、蒸汽轮机的运行参数优化策略综合应用于燃气-蒸汽联合循环电厂，可实现整体能效显著提升。通过建立全厂统一的监控与优化系统，实时采集各设备运行参数，利用先进算法对数据进行综合分析，根据不同工况自动调整各设备运行参数，实现各环节协同优化。在能效提升效果评估方面，可从多个维度进行，发电效率是最直观指标，对比优化前后单位燃料发电量，可清晰看到效率提升幅度。统计单位发电量燃料消耗量，若优化后燃料消耗降低，表明能效提升效果显著。分析污染物排放数据，在能效提升的同时，若污染物排放量减少，说明优化策略兼顾了环保与经济效益。从长期运行数据来看，综合应用优化策略后，联合循环电厂整体能效可提升3%-8%，发电成本降低，市场竞争力增强，为电厂可持续发展提供有力支撑。

4 燃气-蒸汽联合循环电厂能效提升路径分析

4.1 设备改造与升级路径

燃气轮机改造上，引入干式低 NO_x 燃烧技术，此技术既能削减氮氧化物排放，又可优化燃烧流程，让燃料充分燃烧，提升燃烧效率。同时革新压气机，采用新型高效叶型设计，降低压缩环节能量损耗，提高压气机效率，增强燃气轮机整体出力与能效。余热锅炉升级不容小觑，增加受热面面积，尤其是强化低温段换热效能，能高效回收燃气轮机排气余热，提升蒸汽产量与品质。选用导热系数更低新型保温材料，减少热量散失，让更多热量用于蒸汽生成。蒸汽轮机改造时，优化通流

部分设计,采用先进叶片型线与结构,减少蒸汽通流损失,提高内效率。升级刷式汽封等新型密封装置,降低蒸汽泄漏,提升做功能力。将调节系统升级为先进电液调节系统,实现精准快速负荷调节,增强机组运行稳定性与经济性。

4.2 运行管理与控制优化路径

4.2.1 运行模式优化

燃气-蒸汽联合循环电厂运行模式优化对能效提升意义重大。需依季节、时段及电网负荷灵活调整机组运行。电力负荷低谷期,采用“两班制”或“低负荷停机”模式,如夜间用电低谷时让部分机组停机或低负荷备用,高峰前快速启动或升负荷,减少低效运行时间,降低厂用电与燃料消耗。优化机组启停过程,采用快速启动技术,优化流程与参数,缩短冷态到满负荷时间,减少启动燃料与能量损失;停机时合理安排降温降压速率,避免设备热应力损坏,回收余热^[4]。另外,依电网调峰需求合理配置燃气轮机与蒸汽轮机出力。负荷快速变化时,优先调节响应快的燃气轮机,蒸汽轮机依燃气轮机状态与长期负荷趋势稳定输出,实现高效协同运行。

4.2.2 控制策略优化

先进控制策略对燃气-蒸汽联合循环电厂能效提升至关重要。采用模型预测控制(MPC)技术,构建电厂设备及系统动态数学模型,依据实时数据与预测负荷提前调整参数,实现最优控制。如负荷变化时,MPC可预测燃气轮机与蒸汽轮机最佳功率分配,优化燃料与蒸汽参数,减少动态损失。优化燃烧控制系统,精确控制燃料与空气混合比例、喷射时机与分布,利用传感器与智能算法监测燃烧室参数,自动调整燃烧参数,降低不完全损失与污染物排放。

4.2.3 人员培训与管理

人员是燃气-蒸汽联合循环电厂运行管理与控制的核心。加强员工培训,定期组织设备操作、运行维护、能效分析等课程,邀请专家授课,使员工熟悉设备性能、原理与规程。开展应急演练与故障处理培训,提升应对突发情况能力,保障机组安全稳定运行。建立科学人员管理制度,明确各岗位职责与权限,完善绩效考核体系,将能效指标纳入考核,激励员工参与能效提升。

如设立能效奖励基金,奖励有创新建议或显著成效的员工,激发积极性与创造力。加强团队建设与沟通协作,培养团队意识与全局观念,通过技术交流会、经验分享会促进知识共享与技术交流,营造良好氛围,共同提升电厂能效。

4.3 能源管理与综合利用路径

加强能源管理是燃气-蒸汽联合循环电厂能效提升的重要保障。建立完善的能源管理体系,对电厂的能源消耗进行全面监测、统计与分析。通过安装先进的能源计量仪表,实时采集各设备、各环节的能源消耗数据,利用大数据分析技术,挖掘能源消耗规律与节能潜力,为制定节能措施提供数据支持。在能源综合利用方面,充分挖掘电厂内部的余热、余压等资源。探索与其他企业的能源合作模式,如将电厂产生的蒸汽或热水输送至周边工业园区,为其他企业提供能源支持,实现能源的外部综合利用,提高能源利用效率与经济效益。积极引入新能源与可再生能源,构建多元化能源供应体系。通过综合运用能源管理与综合利用手段,全方位提升燃气-蒸汽联合循环电厂的能效水平。

结束语

燃气-蒸汽联合循环电厂运行参数协同优化及能效提升是一项系统工程。通过构建优化模型、制定合理优化策略,并从设备、运行管理、能源利用等多维度采取提升路径,可显著提高电厂能效,降低发电成本,减少污染物排放。这不仅符合节能降耗的环保要求,也有助于提升电厂市场竞争力,推动其可持续发展,为能源行业的绿色转型贡献力量。

参考文献

- [1]蒲军军.浅谈国内外燃气-蒸汽联合循环电厂发展经验[J].上海节能,2020,(04):309-314.
- [2]王莹.燃气-蒸汽联合循环机组技术发展及运行原理分析[J].2021(2011-28):21-21.
- [3]曹军,周东阳,王喆.安萨尔多F级燃气-蒸汽联合循环机组高精度全范围仿真系统的开发[J].热能动力工程,2021,36(2):9.
- [4]张赢,林燕,梁展鹏,等.大型燃气-蒸汽联合循环单轴机组主厂房布置设计[J].南方能源建设,2021,7(S2):82-88.