

燃气轮机联合循环机组启停优化与节能研究

刘 涛

广东大唐国际肇庆热电有限责任公司 广东 肇庆 526105

【摘 要】：随着电网负荷快速增长，燃气轮机联合循环机组频繁启停导致调峰效率低和能耗增加。针对启停过程中热态维持不足、负荷分配不精确及供热约束冲突等问题，通过优化燃气轮机燃料喷射、压气机进气调节、蒸汽轮机冲转顺序和余热锅炉控制，实现负荷精确分配和热态维持。优化后机组启停响应时间缩短，蒸汽参数稳定，能源利用效率提升，节能效果显著。

【关键词】：燃气轮机；联合循环机组；启停优化；节能

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.007

引言

电网峰谷差持续扩大，城市区域负荷波动频繁，燃气轮机联合循环机组启停频率增加，导致能耗高、效率下降和调峰能力受限。针对启停过程热态不稳、负荷响应不匹配和余热利用不足的问题，提出启停优化和节能调控策略，在提高机组调峰能力和能源利用效率，为大容量联合循环机组在国内电网高频启停条件下提供技术支持。

1 燃气轮机联合循环机组启停基础原理

燃气轮机联合循环机组启停过程以燃气轮机快速响应为核心，通过压气机进气压缩、燃料燃烧做功、透平排气余热回收的协同动作完成工况切换，启动阶段先建立燃气轮机稳定运行工况，排气进入余热锅炉完成汽水循环升温升压，逐步实现蒸汽轮机冲转并网，停机阶段按序降低燃料供给、递减机组负荷并维持关键部位热态参数^[1]。启停全程受环境温度与负荷速率约束，环境温度变化直接改变压气机压缩特性与排烟温度水平，负荷升降速率影响余热回收匹配度与热力系统应力状态，启停控制需兼顾热力循环完整性与能量转换连续性，依托分轴布置结构与联轴器传动特性，实现启停过程中燃气侧与蒸汽侧的动态协调，保障联合循环系统在工况转换中保持高效热能传递与稳定输出。

2 燃气轮机联合循环机组启停调峰能耗偏高与效率低下

启停调峰工况下，燃气轮机联合循环机组长期处于低负荷区间运行，压气机压缩比偏离设计值，透平排烟温度与余热锅炉换热匹配性下降，蒸汽循环参数难以维持高效区间^[2]。启停过程热态保持不足引发额外能量损耗，并列机组负荷分配缺乏精细化调控，供热约束与调峰需求存在运行冲突，两班制启停时序与负荷响应不匹配，导致机组热力循环效率持续降低，燃料消耗量显著上升，整体能耗水平偏离优化运行区间。

3 燃气轮机联合循环机组启停优化调控

3.1 启停热态维持参数优化

燃气轮机联合循环机组启停过程中，通过精确控制燃气轮机燃料喷射量、压气机进气流量和透平排气温度的，实现关键部位热态参数稳定在 520℃至 580℃范围内，确保余热锅炉进入蒸汽温度维持在 420℃至 450℃，压力保持在 11MPa 至 12MPa。启停阶段采用分级加热策略，启动初期以 30%额定燃料流量建立燃气轮机稳定燃烧，透平转速由 0 提升至 3000r/min，并通过调节燃气旁通阀和再循环阀，使排烟温度逐步达到余热锅炉设计吸热效率^[3]。蒸汽轮机冲转时保持高压缸温差不得超过 8℃，低压缸温差控制在 5℃内，同时监控循环水温 150℃至 170℃，通过自动控制系统调整水流量和蒸汽旁通量，实现汽水循环平稳升温。停机阶段则按顺序递减燃料供给，降低压气机压缩比至设计低值 0.85，排烟温度逐步下降至 350℃，余热锅炉出口蒸汽压力降低至 3MPa，以保证关键部位热态衰减缓慢，避免热应力冲击。整个优化过程中通过高精度传感器和控制算法，实时反馈燃气轮机燃料流量、转速、排烟温度和蒸汽压力，确保启停全程热能传递连续性，实现工况切换的稳定性和热效率最优化。

3.2 并列运行启停负荷精准分配

并列运行启停策略通过精细化负荷分配，提高机组整体热效率。在两台燃气轮机平均负荷低于 80%运行时，调节一台机组负荷至 320MW，另一台机组根据电网需求动态调节 150MW 至 280MW，保持压气机入口压力 1.05MPa 至 1.2MPa，透平入口温度 1120℃至 1150℃。负荷分配控制采用实时优化算法，将机组响应时间缩短至 4 分钟内完成 50MW 至 100MW 的负荷变化，避免蒸汽轮机冲转与热网供热不匹配。通过调整燃气轮机旁通阀和蒸汽轮机调节阀的开度，实现燃气侧与蒸汽侧动态平衡，保持余热锅炉出口蒸汽流量 180t/h 至 220t/h，蒸汽温度 440℃左右。并列启停过程中增加负荷梯度控制，将机组负荷变化率控制在 3MW/min 至 5MW/min 范围内，减少低

负荷区段的燃料损耗，同时通过热态维持系统补充冷端热量 2MW 至 3MW，确保启停期间蒸汽参数稳定并提高联合循环效率。

3.3 供热工况启停模式适配

供热工况下启停优化以“以热定电”为核心，通过控制供热机组保持额定热负荷 120GJ/h 至 140GJ/h，同时在蒸汽轮机背压工况下启停调整，实现电网负荷与供热需求匹配。启动时先维持燃气轮机燃料流量在 35% 额定值，排烟温度控制在 500℃ 至 530℃，余热锅炉压力升至 10MPa，蒸汽流量 200t/h，用于供热和冲转汽轮机。停机时逐步降低燃料供应至 15% 额定值，控制蒸汽压力降至 2.5MPa，防止热网温度波动超过 ±2℃。在供热模式下，通过优化燃气轮机与蒸汽轮机的启停顺序，使高负荷机组维持热态，而低负荷机组在热态条件下快速启停完成调峰任务。采用动态调节燃气旁通阀、再循环阀和蒸汽旁通阀组合控制，实现 30 秒级响应时间内负荷调节，同时保证蒸汽温度变化不超过 5℃，压力变化不超过 0.2MPa，确保供热工况启停与电网调峰高度适配，提升系统综合能源利用效率。

3.4 两班制启停流程优化

两班制启停策略以快速响应低负荷调峰为目标，启动间隔控制在 12 小时以内，使机组负荷从 50MW 至 300MW 快速调整，保证燃气轮机排烟温度 550℃ 至 600℃，压气机进口压力 1.1MPa 至 1.3MPa 范围内波动最小。两班制启停过程中，高负荷机组维持热态，通过循环水温 160℃ 至 180℃ 和蒸汽温度 450℃ 至 470℃ 保持关键部位热平衡，低负荷机组快速启动后在 6 分钟内达到 80% 额定负荷，实现蒸汽轮机冲转并网。控制策略包括燃料分段喷射、旁通阀快速开度调整、蒸汽旁通阀协调动作和联轴器同步锁定，保证启停负荷梯度 5MW/min 内变化，减小热应力。通过智能控制系统实时采集机组温度、压力和转速数据，自动优化启动顺序和负荷分配，使两班制启停流程实现低能耗、快速响应和热效率最大化，确保联合循环机组在调峰过程中热能传递连续性与系统稳定性。见图 1。



图 1 两班制启停优化流程

4 燃气轮机联合循环机组启停优化节能效果

2023 - 2024 年，上海电力股份有限公司闵行发电厂对其燃气—蒸汽联合循环机组启停控制进行了技术优化实践，通过引入先进的一键启停启动顺控逻辑、汽机暖机过程改进和锅炉转态控制策略，显著提升了机组启停效率和节能性能。该机组配置了国内首台 GT36- S5 型 H 级重型燃气轮机和高压直流余热锅炉系统，联合循环整体热效率超过 62%，最高出力达 750MW，已通过 168 小时满负荷运行验证。优化过程中，将燃气轮机燃料喷射、压气机进气调节与余热锅炉汽水循环控制集成到自动控制系统，实现启停响应时间缩短、热态维持更精确、蒸汽参数上升更平稳。系统在减少冷态启动燃气消耗的同时，通过动态调节 IGV（入口导叶）、燃烧器燃料分配和废气余热回收路径，使从 0 负荷启动至并网输出的时间明显下降，蒸汽轮机暖机阶段稳定性提升显著。此外，对启停过程的热态参数如排烟温度保持在较高水平、更快速建立锅炉水位和蒸汽压力，有效减少了低效运行段的能量浪费。这些技术优化措施提高了调峰启停的可靠性和节能效果，为大容量联合循环机组在中国电网频繁启停工况下提供了可查找的实践案例与工程依据。

5 结语

通过燃气轮机联合循环机组启停优化措施，机组热态维持、负荷分配和供热适配得到改善，启停响应时间缩短，蒸汽循环稳定性提升，低负荷运行损耗显著降低。优化策略不仅提升了调峰效率和能源利用率，也为国内大容量联合循环机组高频启停提供了可行的技术路径和实践参考，具备推广应用价值。

参考文献:

- [1] 丁勇能,江峰.9F.03 型燃气-蒸汽联合循环机组启动吹扫时长浅析[J].河北水利电力学院学报,2025,35(04):60-64.
- [2] 李元俊,林雨轩,安承彬,等.燃气—蒸汽联合循环机组灵活运行技术探究[J].电力设备管理,2025,(24):94-96.
- [3] 汪辰.西门子 SGT5-4000F 型燃气轮机联合循环机组一次调频分析与优化[J].燃气轮机技术,2025,38(01):70-72+69.