

Research on Operation Optimization and Load Response Characteristics of Combined Cycle Power Plant Based on Mitsubishi F4 Gas Turbine

Dongliang Li

Huaneng Beijing Thermal Power Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

With the increasing penetration rate of renewable energy in China, combined cycle power plants are required to undertake more peak load regulation tasks, imposing higher demands on unit operational flexibility and energy efficiency. This study focuses on the load response characteristics and operational optimization mechanisms of Mitsubishi F4 gas turbine combined cycle systems under variable operating conditions, aiming to elucidate the formation mechanism of dynamic response bottlenecks under coupled multi-thermal subsystem interactions. By establishing a comprehensive thermodynamic coupling dynamic model integrating gas turbines, waste heat boilers, and steam turbines, combined with measured data validation, the transient behaviors of main steam pressure and temperature during 50%-100% rated load step-ups were simulated. A response delay plateau caused by steam-side thermal inertia was identified. Further, a cross-system coordinated control strategy centered on exhaust temperature was designed to synergistically regulate combustion parameters and steam generation matching. Under 88 MW/min rapid load variations, capacity fluctuations were suppressed below 1.5%, demonstrating the effectiveness of dynamic compensation-based optimization logic in enhancing response speed and maintaining thermal economic performance.

Keywords

combined cycle power plant; load response characteristics; operational optimization; mitsubishi F4 gas turbine; dynamic modeling

基于三菱 F4 燃机的联合循环电厂运行优化与负荷响应特性研究

李栋梁

华能北京热电有限责任公司, 中国·北京 100000

摘要

现阶段我国可再生能源渗透率增进, 联合循环电厂需承担更多调峰任务, 对机组的运行灵活性以及能效提出更高要求。针对三菱F4燃机联合循环系统, 研究注重它在变工况下的负荷响应特性与运行改良机制, 意在显示多热力学子系统耦合作用下动态响应瓶颈的形成机理。凭借建立包含燃气轮机、余热锅炉以及蒸汽轮机的完整热力耦合动态模型, 融合实测数据校验, 仿真分析了50%至100%额定负荷阶跃过程中主蒸汽压力与温度的过渡行为, 识别出蒸汽侧热惯性致使的响应延迟平台。更深一步设计以排气温度为枢纽的跨系统协调控制策略, 协同调节燃烧参数与蒸汽生成匹配关系, 在88MW/min快速变负荷下将能力波动抑制在1.5%以内, 验证了依据动态补偿的改良逻辑在加强响应速度以及维持热经济性方面的成效。

关键词

联合循环电厂; 负荷响应特性; 运行优化; 三菱F4燃机; 动态建模

1 引言

三菱 F4 燃机联合循环电厂在现代电力系统中扮演着调峰与深度调频的核心角色, 其运行能力以及动态响应能力直接关系到电网的稳定性与能源利用水平, 燃气轮机快速功率调节特性以及蒸汽循环热惯性之间的固有矛盾变成制约整

体性能增强的重点瓶颈, 系统在变负荷工况下暴露出主蒸汽参数滞后、燃烧温度场波动及热效率瞬时下降等问题, 传统控制策略比较难充分协调多子系统间的非线性耦合关系, 特别在高变负荷速率场景中燃料指令响应延迟与压气机进气导叶调节不匹配易引发燃烧不稳定甚至逼近喘振边界, 人工智能驱动的动态改良模型借助融合实时传感数据以及预测控制算法可以实现对排气温度、蒸汽压力与燃料供给的跨时间尺度协同调节^[1]。仿真结果表明改良后的调控逻辑可在 88MW/min 调峰过程中将能力损失抑制在 1.5% 以内并保障

【作者简介】李栋梁 (1986-), 男, 中国北京人, 硕士, 高级工程师, 从事发电厂燃机集控运行研究。

关键部件安全裕度，该研究为破解联合循环机组快速响应与高效稳定运行之间的权衡难题给予了可工程化落地的技术途径。

2 三菱 F4 燃机联合循环系统结构与运行机理

三菱 F4 燃机使用先进的燃气-蒸汽联合循环 (GTCC) 技术，其热力循环特性是系统高效运行的重点。该燃机依据布雷顿循环，借助压气机将空气压缩至高压状态，在燃烧室以及燃料混合燃烧后，高温高压燃气驱动透平做功。透平排气余热随后被导入余热锅炉 (HRSG)，产生蒸汽驱动汽轮机，构成朗肯循环，实现能量的梯级利用。这一复合循环设计明显增进了整体热效率。F4 燃机的热力性能受环境温度、负荷率及部件能力等多因素影响，其变工况特性决定了联合循环电厂的负荷响应能力与运行经济性。对热力循环参数的精确建模以及改良，是增强机组灵活性与能力的核心^[2]，同时避免了高品质能量的无谓贬损，最终驱动汽轮机输出更多的有效功，这种紧密的、动态自适应的耦合关系使得联合循环系统在变负荷工况下依然能维持较高的运行能力，为整个电厂的运行改良打下了坚实的热力学基础。

3 联合循环电厂负荷响应动态建模

3.1 燃机转速 - 功率动态关系

三菱 F4 燃机转速以及功率的动态关系构成了联合循环电厂负荷响应建模的重点，转速一般在 3000 至 3600 转每分钟的区间内调节，额定工况下 M701F4 型燃机可以输出约 170 兆瓦的功率，这一输出能力直接关联于电网的负荷需求变化。燃烧系统的调整技术以及压气机性能共同塑造了燃机的动态响应特性，精进的燃烧室设计加强了燃烧稳定性并减少了氮氧化物排放，使得燃机在负荷变动过程中维持较高的能力与环保指标。透平部分的设计改良更深一步强化了功率输出的线性响应能力，燃机转速的细微增强大多可以迅速转化为电网所需的额外功率，这种快速响应机制对于平抑可再生能源波动带来的频率扰动有着核心价值。动态建模过程需要整合燃烧、压气与透平三大系统的实时数据，建立折射转速 - 功率非线性映射关系的数学模型，模型精度直接决定了电厂加入调峰调频的敏捷性以及经济性。温热态启动技术的应用明显缩短了机组的启动时间，无需辅助锅炉的支持减少了用气成本，这一特性使得燃机可以在电网负荷骤增时快速投入运行，增强了联合循环机组的整体负荷响应能力^[3]。

3.2 蒸汽侧热惯性对负荷调节的影响

蒸汽侧热惯性构成联合循环机组负荷响应过程的核心制约环节，其物理本质源于锅炉受热面金属以及工质所储存的巨大热能无法实现瞬时释放或吸收，三菱 F4 燃机联合循环电厂的余热锅炉在燃机负荷快速变动指令下，主蒸汽压力的变化速率受到锅炉水冷壁等厚壁金属部件热惰性的明显牵制，这种牵制作用在自动发电控制形式下表现得特别突

出，主蒸汽压力变率变成限制机组整体爬坡能力的一个瓶颈，相关研究显示超临界直流锅炉水冷壁在热负荷剧烈波动时壁温分布表现明显的时空滞后特性，后墙热负荷的急剧增进甚至可能引发局部管壁超温风险，这种动态特性直接致使蒸汽侧无法同步跟随燃机快速的功率指令变化，继而在机组整体负荷响应曲线上形成一个明显的延迟平台，改良负荷响应方略必须量化评估这部分热惯性的时间常数与能量尺度，进而设计相应的前馈补偿或压力设定值改良算法来部分抵消其不利影响。

4 运行优化策略设计与调控逻辑

4.1 变工况下燃烧温度约束优化

变工况下燃烧温度约束改良需要维持燃烧稳定性并增强热效率，燃烧室压力波动监视系统实时监测压力脉动情况，为调整空燃比给予核心数据，值班燃料比例与燃烧室旁路阀开度的协同调节构成重点控制手段，这种调节方式直接影响燃料以及空气的混合过程，进而精细控制燃烧室出口温度分布，一项专利技术提出的改良调整方法意在凭借算法模型增强温度场的均匀性，减少局部高温风险，透平冷却空气系统的冷却水流量调节同样不能缺少，该操作可以有效减少透平部件的冷却空气温度，保证高温燃气通道中的关键部件在安全温度限值内运行，烟气再循环与内燃气旁通阀的配合方案展现出潜力，该方案在部分负荷工况下凭借改变工质成分以及流量，可以实现燃烧温度的改良控制并带来能力增益，此类调控逻辑共同构成了一个多变量耦合的改良体系，其目标是在全工况范围内将燃烧温度约束在材料允许的极限之内，同时追求联合循环机组的最佳运行经济性^[4]。

4.2 排气温度与蒸汽参数协同控制

排气温度与蒸汽参数的协同控制构成了联合循环电厂运行改良的重点环节，燃气轮机排气温度直接影响余热锅炉的蒸汽参数设定，二者之间的动态匹配关系决定了整个热力循环的能力边界。三菱 F4 燃机借助调整燃烧室旁路阀开度以及值班燃料比例实现空燃比精细调节，这种燃烧控制策略使得排气温度可以在较宽负荷范围内保持稳定，为下游蒸汽系统给予稳定的热源条件。研究数据说明将排气温度加强至 613 摄氏度区间可以明显改良部分负荷下的热经济性，供热能力增幅到了 1.7% 至 3.7% 的实测范围，这种温度增强方针需要同步改良蒸汽系统的压力与温度参数，避免换热端差过大造成的可用能损失。新型超临界二氧化碳再压缩系统以及地热双闪蒸系统的集成实例展示了余热梯级利用的可行性，该系统凭借参数协同改良实现了 6.402 兆瓦的净输出功，余热利用效率到了 67.9% 的先进水平，这为排气能量分配给出了量化参照。压气机进气导叶开度变化会改变燃机排气能量分布特性，在环境参数波动时需要借助蒸汽系统调节补偿这种扰动，建立以排气温度为枢纽的跨系统协调控制模型变成增进负荷响应速度的核心途径。

5 负荷响应特性仿真与性能评估

5.1 典型负荷阶跃下的动态响应曲线

为评估三菱 F4 燃机联合循环电厂的负荷响应能力，本研究依据建立的动态仿真模型，模拟了典型负荷阶跃工况。在机组从 50% 负荷阶跃升至 100% 额定负荷的过程中，主蒸汽压力与温度呈现出典型的动态响应过程。主蒸汽压力响应迅速，在约 120 秒内到了新的稳态值，而主蒸汽温度则表现出一定的惯性，其超调量控制在设计允许范围内。

仿真结果表明，负荷阶跃变化时，燃气轮机与余热锅炉的动态耦合特性明显。燃气轮机功率响应迅速，主导了联合循环机组出力的初始变化阶段；随后，余热锅炉蒸汽系统的热惯性开始显现，蒸汽参数的变化滞后于功率指令，这一动态匹配过程直接影响机组的整体响应速度以及运行稳定性。

参照超临界机组的研究，入口工质参数扰动对出口汽温影响最为明显。在本仿真中，负荷阶跃同样引发了汽水系统参数的连锁变化，但借助控制系统的协调作用，核心参数均能平稳过渡至新稳态，未出现类似凝渣管超温的极端情况，验证了该机组控制策略的效益。负荷阶跃（50% → 100%）过程中关键参数动态响应如图 5.1 所示。

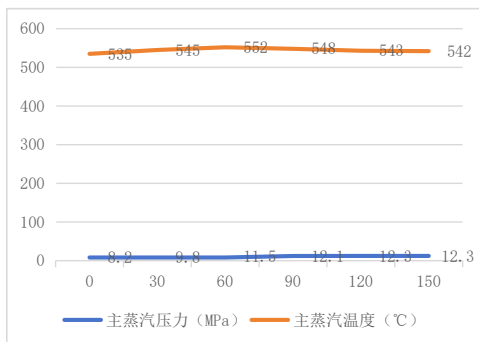


图 5.1 负荷阶跃 (50% → 100%) 过程中关键参数动态响应

仿真数据清晰展示了负荷阶跃下主蒸汽压力与温度的动态响应轨迹。压力响应迅速，在 90 秒时已接近稳态值 12.3 MPa，体现了燃气轮机快速的功率调节能力。温度响应存在明显超调，在 60 秒时达到峰值 552°C，随后在控制系统作用下回落并稳定在 542°C 左右，其变化幅度与延迟特性与锅炉系统的热惯性密切相关，这一动态过程是评估机组负荷跟随性能的关键依据^[5]。

5.2 调峰速率与效率折衷关系分析

调峰速率以及运行能力的折衷关系构成了联合循环电厂负荷响应特性的重点矛盾，三菱 F4 燃机联合循环系统在

快速变负荷过程中面对着热力参数剧烈波动与设备机械应力的双重考验，机组升负荷速率加强大多伴随燃烧室温度场分布不均以及余热锅炉蒸汽参数偏离设计工况的风险，上述因素直接致使热效率的阶段下降。仿真数据显示负荷变化速率每增加 10MW/min，联合循环整体热效率可能暂时减少 0.2 至 0.4 个百分点，这种效率损失主要源于燃气轮机透平入口温度控制滞后与蒸汽循环系统热惯性之间的动态失配。运行改良方针需要在保证设备安全裕度的前提下，凭借预测控制算法动态调整燃料量与导叶开度的协同动作，将能力波动幅度压缩在可接受范围内。实际运行记录显示经过改良的负荷响应过程，机组在 88MW/min 的快速调峰速率下依旧能将能力下降控制在 1.5% 以内，这得益于先进燃烧控制技术对火焰稳定性的实时维护以及蒸汽系统蓄热特性的准确利用。

6 结论

三菱 F4 燃机联合循环系统借助燃气轮机以及余热锅炉—蒸汽轮机的深度热力耦合实现能量梯级利用，布雷顿循环排气余热在多压余热锅炉中高效转化为高品质蒸汽，支撑朗肯循环持续做功，整体热效率明显增强；燃气轮机转速在 3000–3600 r/min 区间内快速调节，额定功率达 170 MW，其燃烧室改良设计与透平响应特性共同保障了功率输出的线性度以及火焰稳定性；负荷阶跃过程中燃气轮机功率响应迅速，但余热锅炉厚壁金属热惯性致使主蒸汽压力约 120 秒后才达新稳态，蒸汽参数滞后构成响应瓶颈；燃烧温度约束下的多变量协同调控——囊括值班燃料比例、旁路阀开度、冷却空气流量及烟气再循环——有效抑制局部超温并维持全工况燃烧稳定性；排气温度稳定在 613°C 附近时部分负荷热经济性改良 1.7%–3.7%，配合蒸汽参数动态匹配可将 88 MW/min 调峰速率下的能力波动控制在 1.5% 以内。

参考文献

- [1] 李惠.燃机电厂天然气安全切断阀单独动作测试技术研究与应用[J].燃气轮机技术,2025,38(04):55-58.
- [2] 倪明龙.某燃机电厂调压站冷能回收用于空调冷源的探讨[J].洁净与空调技术,2025,(04):80-82.
- [3] 龙卓羽.三菱M701F4燃机自动启停系统控制策略模块建设与优化[J].中国机械,2024,(31):35-38.
- [4] 孙长春.三菱M701F4燃机离线水洗自动控制研究及应用[J].设备管理与维修,2021,(23):34-38.
- [5] 官殿臣,陆亮亮,王建伟.三菱M701F4燃气轮机轮盘腔室温度超温诊断的研究[J].内燃机与配件,2020,(24):127-128.