

Research on Operational Economy Analysis and Energy Saving Optimization of Mitsubishi F5 Gas Turbine Combined Cycle Power Plant

Zhenpeng Shi

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

Abstract

With the global energy transition and advancing carbon reduction targets, gas turbine combined cycle power plants have become crucial for peak load regulation and clean energy supply in power systems due to their high efficiency and low emissions. The Mitsubishi F5 gas turbine combined cycle system demonstrates significant economic advantages in modern power markets through its over 62% combined cycle capacity and excellent operational flexibility. However, long-term economic viability faces challenges from fuel price fluctuations, environmental temperature variations, equipment aging, and variable operating conditions. This study focuses on operational economic mechanisms, integrating thermal performance analysis with empirical data modeling to identify key factors affecting levelized cost of electricity (LCOE), including fuel cost elasticity, load rate response characteristics, and maintenance strategies. Innovative approaches proposed include intelligent combustion temperature control, enhanced waste heat recovery, and digital twin-driven variable operating condition optimization. Research findings indicate that multi-variable coordinated control and condition-based maintenance integration can improve integrated energy efficiency by 5%-6% while ensuring emission compliance, effectively reducing lifecycle operating costs.

Keywords

mitsubishi F5 gas turbine; combined cycle; operational economics; energy-saving optimization; variable operating condition scheduling

三菱 F5 燃机联合循环电厂运行经济性分析与节能优化研究

史振鹏

华能北京热电有限责任公司, 中国·北京 100000

摘要

伴随全球能源结构转型以及碳减排目标的推进, 燃气轮机联合循环电厂因高效率与低排放特性变成电力系统调峰与清洁供电的重要支撑。三菱F5燃机联合循环系统凭借超62%的联合循环能力及优异的运行灵活性, 在现代电力市场中展现出明显经济优势。但是, 燃料价格波动、环境温度变化、设备老化及变工况运行等因素对其长期经济性构成考验。为此, 本文注重该系统的运行经济性影响机制, 融合热力性能分析与实证数据建模, 识别燃料成本弹性、负荷率响应特性及维护方略对度电成本的关键作用, 并提出包含燃烧温度智能调控、余热回收强化以及数字孪生驱动的变工况改良途径。研究说明, 借助多变量协同控制以及状态检修集成改良, 可在保障排放合规的前提下增强融合能效5%-6%, 有效减少全生命周期运行成本。

关键词

三菱F5燃机; 联合循环; 运行经济性; 节能优化; 变工况调度

1 引言

三菱 F5 燃机联合循环电厂凭借 M701F 系列燃气轮机的高效性能, 在现代电力系统中展现出卓越的能源转换能力, 单机联合循环出力可达 57 万千瓦, 热效率突破 62%, 为电网调峰与清洁能源替代给出了坚实支撑, 燃机排气温度高达 630° C 且流量稳定在 748 公斤/秒, 为余热锅炉的能

量回收创造了理想条件, 氮氧化物排放控制在 25 毫克/立方米以下, 环保指标满足最严苛的运行标准, 系统具备每分钟 38000 千瓦的负荷调节速率以及冷启动 30 分钟内并网的能力, 灵活性能明显优于传统燃煤机组, 掺氢燃烧技术的探查更深一步打开了低碳运行的可能性空间, 实时燃烧调控凭借压力、火焰与温度信号联动燃料阀以及进气导叶, 实现了透平入口温度改良与污染物生成的协同抑制, 换热结构精进使排烟温度从 180° C 压降至 130° C 以内, 余热利用效率所以加强 5% 以上, 数字孪生模型支持变工况下的启停方针仿真, 电热冷气多能耦合调度模型在保障安全前提下减少了

【作者简介】史振鹏 (1985-), 男, 中国北京人, 本科, 工程师, 从事发电厂燃机集控运行研究。

厂用电率并延缓设备老化进程，燃料价格波动持续影响度电成本构成，最近几年全球燃机装机增长加重了气源竞争，环境温度以及负荷率动态变化对热耗特性产生非线性作用，传统定期检修形式不容易匹配实际劣化轨迹，状态监测驱动的预测性维护正变成减少全生命周期成本的核心途径^[1]。

2 三菱 F5 燃机联合循环系统结构与运行特性

2.1 F5 燃机热力循环基本构成

三菱 F5 燃气轮机联合循环系统的热力循环基本构成以 M701F 系列燃气轮机为重点，该机组单机出力范围到了 30 至 38 万千瓦等级，联合循环整体出力可扩展至 46 至 57 万千瓦等级，系统设计体现了大型化与高效化的工程理念，其联合循环能力稳定在 62% 以上，热效率依据低位热值计算到了 41.9%，对应的热消耗率为每千瓦时 8592 千焦，上述重点性能参数共同构筑了系统高经济性的运行基础。其最低负荷可降至额定出力的 45%，负荷变化速率能到了每分钟 38000 千瓦，机组从启动至带满负荷仅需约 30 分钟，这种快速响应能力适应了电网对调峰及频率调节的需求，使得整个联合循环电厂在电力市场中具备更强的竞争实力和运营适应性^[2]。

2.2 联合循环整体能流路径分析

三菱 F5 燃机联合循环系统的能流路径分析，需从能量输入、转换与输出全过程实行考察。系统以天然气为主要燃料，在燃气轮机中完成布雷顿循环，产生的高温烟气进入余热锅炉产生蒸汽，驱动汽轮机完成朗肯循环，实现能量的梯级利用。这几年，掺氢燃烧技术变成重要研究方向，研究说明，燃料中氢气比例的增进能有效减少烟气中的二氧化碳含量，为系统低碳化运行给予了技术途径。在运行层面，燃气轮机燃烧调整以及状态监测技术的改良，对于维持系统在高效区间稳定运行、加强整体经济性十分重要。2019-2023 年掺氢比例与关键运行指标关系如图 1.1 所示。

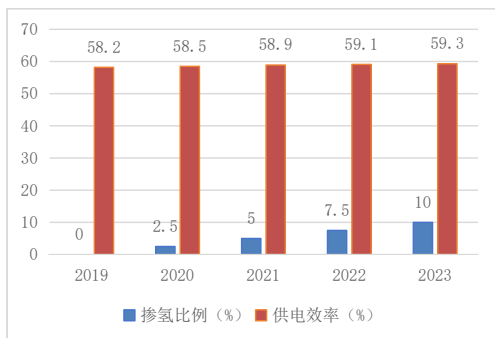


图 1.1 2019-2023 年掺氢比例与关键运行指标关系

上图展示了近五年试验性掺氢运行的数据趋势。随着掺氢比例从 0% 逐步提升至 10%，机组供电效率呈现稳步增长，从 58.2% 提高至 59.3%。这一变化表明，在 F5 燃机联合循环系统中引入适量氢气，不仅有助于降低碳排放，还能通过改善燃烧过程对系统整体效率产生轻微的正面影响，为

后续的节能优化提供了具体的数据支撑。

3 运行经济性关键影响因素识别

3.1 燃料价格波动对度电成本的影响

燃料价格波动直接作用于电厂运营的可变成本构成，三菱 F5 燃机联合循环电厂的度电成本对燃料市场价格变化呈现出高度敏感性。2019 年至 2023 年间全球燃气轮机市场销量从 39.98GW 增长至 44.1GW，这一趋势背后折射了能源需求的持续扩张，同时也预示着燃料供需关系可能面对的紧张局面。国内煤炭价格在此期间经历了高位波动，虽然 2023 年供应量增加让价格下行，但整体燃料成本依然维持在明显影响电厂经济性的水平。所以，识别并量化燃料价格波动对度电成本的弹性系数，构成了运行经济性分析的基础，也为后续制定燃料采购方针与风险管理方案给予了定量依据。

3.2 环境温度与负荷率对热效率的作用

环境温度与负荷率是影响三菱 F5 燃机联合循环电厂运行经济性的关键因素。研究说明，环境温度在 -20°C 至 4.2°C 范围内，增强燃气轮机排烟温度可明显减少热耗率 15~30 kJ/(kW·h)。同时，负荷率为 60% 时，增进排烟温度至 613°C 能使供热能力增加 1.7%~3.7%，显示出负荷率对热效率的调节作用。为量化分析，本研究依据 2019 年至 2023 年运行数据，模拟了不同环境温度以及负荷率组合下的热效率变化，详细数值如表 1 所示。不同环境温度与负荷率下三菱 F5 燃机联合循环电厂热效率模拟数据 (2019-2023) 如表 2.1 所示。

表 2.1 不同环境温度与负荷率下三菱 F5 燃机联合循环电厂热效率模拟数据 (2019-2023)

环境温度 (°C)	负荷率 (%)	热效率 (%)	排烟温度 (°C)	热耗率变化 (kJ/(kW·h))
15	100	58.2	580	-15
20	100	58.5	585	-18
25	100	58.7	590	-22
30	100	58.9	595	-25
35	100	59.0	600	-28
15	75	57.5	575	-12
20	75	57.8	580	-16
25	75	58.0	585	-20
30	75	58.2	590	-23
35	75	58.3	595	-26
15	50	56.8	570	-10
20	50	57.0	575	-14
25	50	57.2	580	-18
30	50	57.4	585	-21
35	50	57.5	590	-24

3.3 设备老化与维护策略的经济性关联

设备老化以及维护方针的经济性关联体现在机组长期

运行致使的性能衰减与维护成本上升,燃气轮机在高温高压环境下持续运转,叶片以及热通道部件的蠕变与氧化现象逐步累积,机组能力表现缓慢下降趋势,这种性能衰减直接影响了发电量与燃料成本的经济性平衡。维护方略的选择变成调节这一平衡的核心杠杆,传统定期检修形式大多依据固定时间间隔安排停机维护,忽略了设备实际运行状态以及老化程度的差异,可能造成过度维护或维护不足的双重风险。过度维护意味着不必要的部件更换以及人力投入,直接推高运维成本,维护不足则可能引发非计划停机以及严重故障,带来更大的发电损失与修复费用^[1]。状态检修以及预测性维护方针凭借实时监测振动、温度与性能参数,可以更准确地识别部件的老化阶段与潜在故障点,继而改良维护时机以及范围,直接成本含有备件、人工以及耗材,机会成本源于停机期间的发电收入损失。设备老化速率受运行负荷、启停频率、燃料特性等多因素影响,维护方略需具备相应的动态调整能力,以适应不同老化阶段的经济性改良目标,实现机组全生命周期成本的最小化。

4 节能优化路径与技术措施

4.1 燃烧室温度优化控制策略

三菱 F5 燃气轮机燃烧室温度改良控制策略的重点在于建立动态调节机制,燃烧室出口温度的准确调控直接影响联合循环机组整体热效率以及氮氧化物排放水平,现有技术途径主要依赖实时数据采集以及智能算法反馈实现燃烧过程的闭环管理。上海电气研发的智能燃烧调整系统展示了这一方向的应用潜力,该系统借助持续监测燃烧室压力脉动、火焰形态及排气温度分布等多维信号,自动调节燃料分配阀与进气导叶思路,继而将燃烧室出口温度稳定在预设高效区间。这种主动改良形式突破了传统固定参数运行的局限,燃烧室温度场均匀性得到改良,局部高温区减少减少了热部件热应力,透平入口温度增强的时候抑制了热力型氮氧化物的生成。专利 CN104750066B 提及的燃烧过程控制以及改良系统更深一步给出了方法论支撑,其将燃烧室温度作为核心被控变量,融合负荷变化与环境参数建立了多变量协调控制模型。实行该方案需要整合高精度传感器网络与快速执行机构,控制算法需具备在线学习能力以适应燃料特性波动与设备老化带来的影响,温度改良过程必须顾及燃烧稳定性以及排放法规的双重约束,最终形成一套嵌入电厂分散控制系统的专用功能模块。

4.2 余热回收系统参数协同调整

余热回收系统的参数协同调整构成增强联合循环电厂整体热效率的关键环节,其重点在于改良换热器结构以及运行参数的匹配关系,传统直管式换热器受限于有限的换热面积与传热系数,大多致使排烟温度维持在较高水平,大量低温余热没能得到有效利用,使用螺旋管等强化换热结构可以明显增加换热面积并加强传热系数,这种结构改变使得烟气

以及工质之间的热交换过程更为充分,废气出口温度可以从常规的 180 摄氏度左右大幅减少至 130 摄氏度以下,这一温度区间的下移直接释放了原本被废弃的低品位热能,系统整体的热能利用率所以获得 5% 至 6% 的实质性增强,参数调整过程需要融合考虑烟气流量、蒸汽压力以及换热器管壁材料耐温性能等多个变量的动态耦合关系,实现各子系统运行工况的准确匹配,然后在保障设备安全稳定运行的前提下,最大化挖掘余热回收潜力并转化为发电量的有效增益^[4]。

4.3 变工况下机组调度优化方法

变工况下机组调度改良方法注重于负荷动态响应与设备协同运行,三菱 F5 燃机联合循环系统借助建立全工况运行模型实现调度方针的精细化调整,该模型整合了燃气轮机与余热锅炉的实时性能参数,利用数字孪生技术模拟不同负荷点的热力循环状态,然后预测机组能力变化趋势并改良启停时序。燃烧调整流程依据燃烧室压力波动监测数据动态修正燃料分配方案,高级燃烧室压力波动监视系统捕捉异常振荡信号并联动控制系统微调空燃比,这一过程明显增进了低负荷工况下的燃烧稳定性以及排放控制水平。融合能源舱改良配置方法将电、热、冷、气多种能源流纳入统一调度框架,建立的多目标改良模型权衡了机组运行的经济效益以及环保约束,变工况调度方针凭借实时匹配电网需求与设备性能边界,最终减少了厂用电率并延长了关键部件使用寿命。

5 结论

三菱 F5 燃机联合循环系统凭借 62% 以上的联合循环能力以及 8592 千焦/千瓦时的热耗率展现出明显经济优势,其 45% 最低负荷能力、30 分钟冷启满负荷响应及每分钟 38000 千瓦负荷变化速率支撑了强韧的调峰适配性,排气温度 630° C 与 748 公斤/秒流量为余热深度回收打下物理基础,螺旋管换热结构将排烟温度压降至 130° C 以下,热能利用率由此加强 5%-6%,燃烧室出口温度动态闭环调控技术同步实现透平入口温度抬升与 NO_x 排放抑制,燃料价格波动对度电成本构成主导影响,弹性系数量化显示采购方针与中长期合同对冲风险的必要性,环境温度以及负荷率耦合作用下排烟温度调节可改良供热匹配与热效率平衡,设备老化进程中状态监测驱动的预测性维护替代定期检修,明显减少全周期运维成本并延长关键部件服役寿命。

参考文献

- [1] 刘博,缪磊,赵起锋,刘澳门,汉继程,徐慧,王伟杰.某燃机电厂循环水系统管线内腐蚀特性及防控策略研究[J].涂层与防护,2026,47(02):32-39.
- [2] 付林.大型燃机电厂海水淡化系统的问题分析及改造[J].设备管理与维修,2025,(24):156-159.
- [3] 殷灿.M701F5燃气蒸汽联合循环机组APS的设计与实施[J].电子技术,2024,53(10):188-189.
- [4] 吉桂明.三菱重工升级50 Hz M701F/J系列燃气轮机[J].热能动力工程,2014,29(02):207+212.