

DOI:10. 3969/j. issn. 1674 - 1951. 2019. 11. 012

环境温度及负荷率对燃气 - 蒸汽联合循环 热电联产机组性能的影响

Effects of ambient temperature and load ratio on performance of
gas-steam combined cycle cogeneration units

祖航,王秋颖
ZU Hang,WANG Qiuying

(东南大学 能源与环境学院,南京 210096)
(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

摘 要:燃气 - 蒸汽联合循环热电联产机组的出力和热耗受环境温度和运行参数等因素影响,为更好地了解联合循环的热力学性质,为机组的优化运行提供理论支持和数据支撑,以 GE 公司 6F 型燃气轮机为研究对象,分析了不同环境温度和燃气轮机负荷率对其运行特性的影响。分析结果表明:随着环境温度的升高,燃气轮机发电功率和效率大幅降低,联合循环输出功率下降明显;满负荷时,由于底循环的影响,存在最佳环境温度,使得联合循环效率取得最大值;燃气轮机负荷率的变化会使机组调峰能力发生改变,随着供热量的增加,联合循环发电功率线性下降,存在临界供热值,使得燃气轮机负荷率与联合循环效率成反相关。

关键词:燃气 - 蒸汽联合循环;环境温度;负荷率;发电功率;效率;调峰

中图分类号:TM 611. 31 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 1951(2019)11 - 0049 - 04

Abstract:The output and heat consumption of the gas-steam combined cycle cogeneration units are affected by ambient temperature and operating parameters. To have a better understanding on the thermodynamic property of cogeneration units, and provide a sound theoretical and data basis for the optimized operation, taking a GE 6F gas turbine as the research object, effects of ambient temperature and load ratio on the performance of gas turbines are analyzed. The study results show that with the increase of ambient temperature, the power output and efficiency of gas turbine decreases greatly, and so does the combined cycle output. At full load, due to the influence of bottom cycle,there is an optimum ambient temperature for maximized combined cycle efficiency. The fluctuation of gas turbine load ratio will impact the peak load regulating capacity of cogeneration units. With the increase of heat supply, the combined cycle power output shows a linear decrease and a critical heating value, which means load ratio of gas turbine anticorrelated with the efficiency of combined cycle.

Keywords:gas-steam combined cycle;ambient temperature;load ratio;power output;efficiency;peak load regulating

0 引言

不同于传统燃煤电厂,燃气 - 蒸汽联合循环发电能够有效促进能源的梯级利用,提高循环效率,具有启停速度快、调峰能力强、环保等优点,有较大的市场容量,今后将成为占据市场重要地位的火力发电方式^[1]。热电联产是燃料热能的有效使用,避免一些能量被当作废热丢弃,可进一步提高联合循环机组运行的经济性^[2]。随着越来越多的燃气 - 蒸汽联合循环机组投入运行,精准地了解机组的特性,对

于指导运行人员调整运行状态、降低运行成本、节约能源、实现联合循环机组经济运行具有重要意义。国内外学者对此开展了大量的研究工作,对联合循环性能分析的方法主要有理论分析法和仿真建模分析法^[3],通过深入研究机组变工况运行性能,开展机组动态特性分析以及经济性分析,探索机组的节能潜力。杨承等人^[4]研究了不同抽汽系数和进口导叶(IGV)开度下,燃气轮机负荷变化对热电联产系统性能和评价指标的影响。白子为等人^[5]针对现存 PG9351FA 燃气轮机对应的燃气 - 蒸汽联合循环,分析了 3 类调节方案下燃气轮机循环、蒸汽轮机循环和联合循环的变工况特性。

本文以 GE 公司在燃气轮机行业内运行经验最丰富的 F 级燃气轮机为例,分析燃气-蒸汽联合循环热电联产机组在不同环境温度和燃气轮机负荷率下的运行特性,以利于该燃气轮机在实际生产中得到更好的应用,也为研究多台机组间的热/电负荷优化调度和经济运行提供理论支持。

1 机组概况和热力系统

1.1 6F.01 燃气轮机概况

GE 公司 F 级燃气轮机全球应用广泛,截至 2017 年 4 月,已投运机组有 12 000 多台,有累计运行 5 000 万 h 和启动 100 万次的业绩,6F 燃气轮机目前在国内共有近 30 台机组,全球近 200 台。6F.01 燃气轮机在 ISO 工况下(环境温度为 15 ℃,大气压力为 101 325 Pa)性能参数见表 1。其出力与 6B 机组接近,均属于中小型机组,但具有先进的性能和较高的可靠性。6F.01 燃气轮机借鉴 GE 公司发动机和 9H 燃气轮机压气机的设计,采用高压比的 12 级轴流压气机,IGV 和 1,2 级静叶共 3 级可调,可改善部分负荷效率,易于检修和维护。它使用单晶材料和先进的冷却技术以及密封技术,透平进口温度可达 1 350 ℃,排气温度在 ISO 工况下为 603 ℃,相比目前已知的同等或较小容量的机型,循环效率高,非常适用于中小型热电联产和分布式能源项目。

表 1 6F.01 燃气轮机主要性能参数

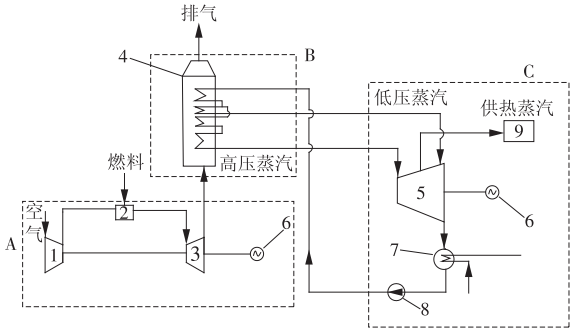
Tab.1 Main performance parameters of 6F.01 gas turbine	
项目	参数
单循环净出力/MW	54
单循环净热耗率(低热值)/[kJ·(kW·h) ⁻¹]	9 369
单循环净效率/%	38.4
压比	21.4
燃气轮机发电机冷却方式	空冷
燃烧室数量	6
压气机级数	12
透平级数	3
排烟温度/℃	603
最低排放保证负荷率/%	40
华白指数范围/%	±10
启动时间(常规/峰值)/min	12/10

1.2 热力系统

燃气-蒸汽联合循环热电联产热力系统结合了燃气轮机布雷顿循环高温加热和蒸汽轮机朗肯循环低温排热损失少的优势,实现了能源的有效利用^[6],其流程如图 1 所示^[2]。

热力系统由顶部循环和底部循环 2 部分组成,顶部循环为燃气轮机发电机组(图 1 中 A),底部循

环过程为余热锅炉(图 1 中 B)和蒸汽轮机等(图 1 中 C)组成的蒸汽轮机发电供热机组。空气经压缩后在燃烧室中与燃料(气体燃料或液体燃料)混合后燃烧,产生的高温高压燃气经过燃气透平膨胀做功后排向余热锅炉,加热给水产生的高温高压蒸汽进入蒸汽轮机做功带动发电机发电,部分经过减温减压的蒸汽被送入供热联箱进行供热。系统配套双压无再热式余热锅炉,产生高、低压 2 种参数的蒸汽,蒸汽轮机为抽凝式机组。此联合循环机组为供热、调峰运行机组,在供热或用电高峰期根据需要转换运行模式。



1.压气机; 2.燃烧室; 3.燃气透平; 4.余热锅炉; 5.蒸汽轮机; 6.发电机; 7.凝汽器; 8.水泵; 9.供热联箱。

图 1 燃气-蒸汽联合循环热力系统流程
Fig.1 Flow chart of a gas-steam combined cycle thermodynamic system

2 环境温度对机组性能的影响

2.1 环境温度对顶部循环的影响

大气环境变化对动力装置的安全高效运行具有很大的影响,燃气轮机对环境温度的变化尤其敏感^[7]。从图 2 和图 3 可见,随着环境温度的升高,燃气轮机发电功率和效率大幅度减小。这是因为环境温度上升会使空气密度减小,在吸入相同体积空气时质量流量减少,对应条件下燃料量减少;同时,压气机耗功量与环境温度成正比,随着环境温度的升高,压气机压比和温比将有所下降,燃气轮机排气温度升高,排气流量下降,最终使得燃气轮机发电功率和燃气轮机效率都发生改变^[8-9]。

2.2 环境温度对底部循环的影响

底部循环过程中产生 2 种参数的蒸汽,低压蒸汽流量和温度约为高压蒸汽的 11% 和 46%。高压蒸汽作为主蒸汽决定了底部循环的热力性能,受金属材料温度限制,主蒸汽温度到达 565 ℃ 后维持不变。燃气轮机排气流量和排气温度是决定主蒸汽流量和温度的关键因素,燃气轮机排气温度升高虽然降低了燃气透平做功量,但有益于底部循环吸热。如图 4 所示,受主蒸汽温度和流量的共同影响,在燃气轮机 100% 和 75% 负荷率条件下,较低温度时蒸

汽轮机发电功率有所上升,随着环境温度的升高,蒸汽轮机发电功率下降,趋势从缓慢变得较为明显;燃气轮机 50% 负荷率下,随着环境温度的升高,蒸汽轮机发电功率持续下降。

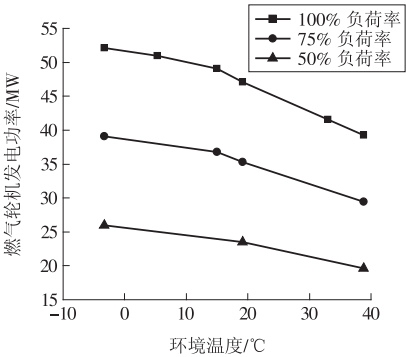


图 2 燃气轮机发电功率随环境温度变化规律

Fig. 2 Trend of gas turbine power output changing with ambient temperature

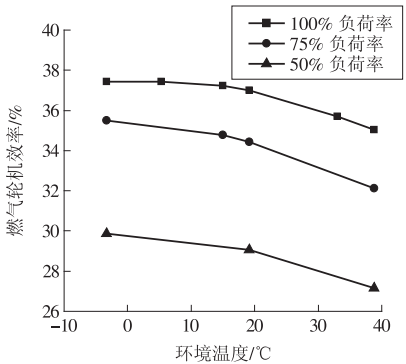


图 3 燃气轮机效率随环境温度变化规律

Fig. 3 Trend of gas turbine efficiency changing with ambient temperature

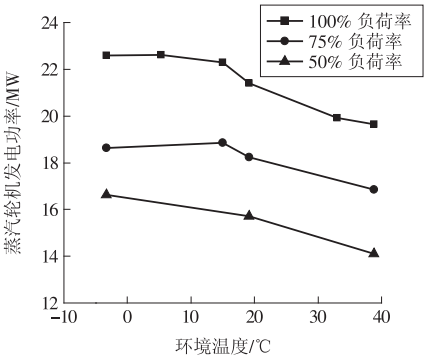


图 4 蒸汽轮机发电功率随环境温度变化规律

Fig. 4 Trend of steam turbine power output changing with ambient temperature

2.3 环境温度对联合循环的影响

联合循环发电功率和效率受顶部循环和底部循环的双重影响,其变化趋势如图 5 所示。随着环境温度的升高,由于燃气轮机和蒸汽轮机发电功率同步降低,使得联合循环发电功率下降更为显著。当环境温度改变时,受底部循环凝汽器压力变化等因

素的影响,存在最佳环境温度,使得联合循环效率取得最大值。从图 6 可看出,燃气轮机负荷率为 100% 和 75% 状态下,当环境温度 $\leq 15^{\circ}\text{C}$ 时,联合循环效率与环境温度成正相关,环境温度 $> 15^{\circ}\text{C}$ 时成反相关,50% 负荷率下,联合循环效率维持下降趋势。

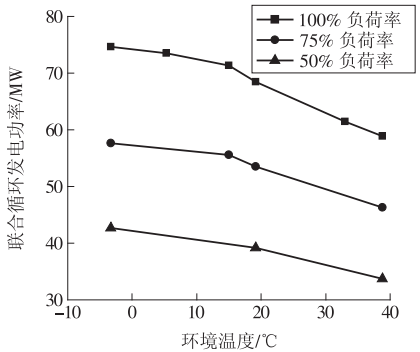


图 5 联合循环发电功率随环境温度变化规律

Fig. 5 Trend of combined cycle power output changing with ambient temperature

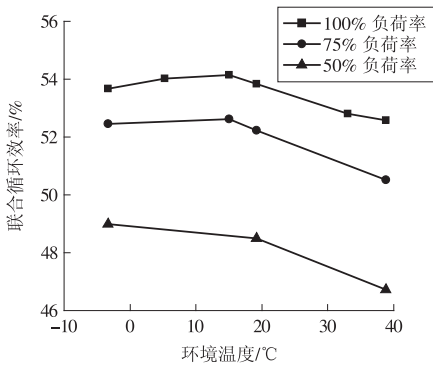


图 6 联合循环效率随环境温度变化规律

Fig. 6 Trend of combined cycle efficiency changing with ambient temperature

3 联合循环变负荷性能分析

3.1 负荷率变化对输出功率的影响

热电联产机组运行时,经常要根据用户实际需要改变发电负荷和供热负荷。图 7 为环境条件为性能保证工况时,燃气轮机 4 种负荷率下联合循环发电功率随着供热量的变化。

从图 7 可以看出,在 4 种负荷率运行状态下,随着供热量的增加,联合循环发电功率呈线性下降,并且下降斜率接近相同。机组从供热量为 0 调整到最大供热量时对应的联合循环功率差值发生变化,机组的调峰能力分别为 11.39,10.00,8.80,7.10 MW。由此可见,燃气轮机负荷率降低不仅导致发电功率降低,同时还会减小汽轮机的可运行功率范围,即降低机组的调峰能力^[10]。

3.2 负荷率变化对循环效率的影响

由图 8 可以看出,供热量增加,联合循环效率会

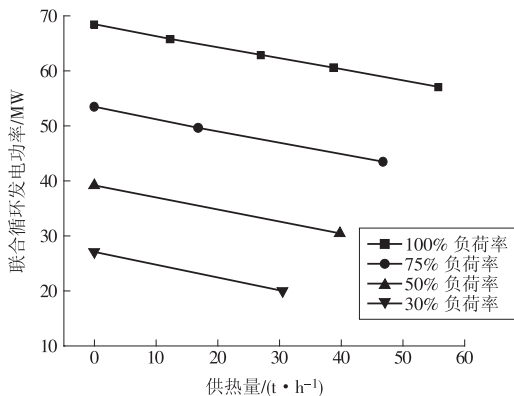


图 7 供热工况下燃气轮机变负荷对功率的影响

Fig. 7 The influence of varied gas turbine loads on the output under heating condition

随之上升,这是因为增加的供热量可以降低冷源损失,减少天然气消耗量,从而提高联合循环效率^[11]。每个负荷率所对应的效率上升速率各不相同,随着供热量的增加,存在某一临界值,使得在相同供热量条件下联合循环效率与负荷率成负相关,不同环境温度对应的临界供热量不同。当供热量小于 15.5 t/h 时,负荷率与联合循环效率成正比,100% 负荷率下循环效率最高;供热量超过 25.8 t/h 后,负荷率与联合循环效率成反比,30% 负荷率下循环效率最高。

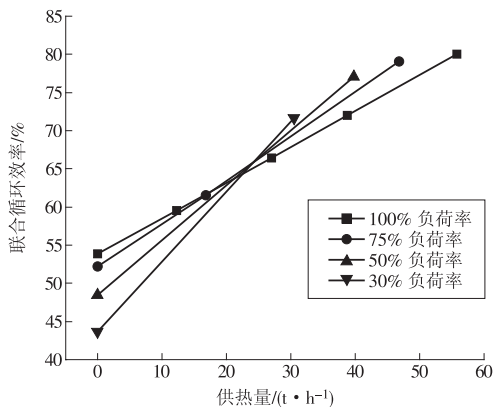


图 8 供热工况下燃气轮机变负荷对效率的影响

Fig. 8 The influence of varied gas turbine loads on the efficiency under heating condition

4 结论

本文以 GE 公司 6F 燃气 - 蒸汽联合循环热电联产机组为例,分析不同环境温度和燃气轮机负荷率对机组运行特性的影响,得出以下结论。

(1) 环境温度升高会降低燃气轮机输出功率和运行效率,联合循环功率降低趋势明显。满负荷时,由于底循环的影响,存在最佳环境温度,使得联合循环效率取得最大值。

(2) 燃气轮机负荷率的下降会缩小供热范围和降低发电量,减弱联合循环机组的调峰能力。

(3) 随着供热量的增加,存在一临界点,使得在相同供热量条件下联合循环效率与燃气轮机负荷率成反比。

鉴于 GE 燃气轮机在全球的广泛应用,本文的相关分析有利于更好地了解 GE 6F 级燃气轮机性能和参数变化特点,使其在中小型热电联产和分布式能源项目中得到更好的应用。同时,所得结论也可为研究多台机组间的热/电负荷优化调度和经济运行提供理论支持。

参考文献:

- [1] 吴敏杰,汤明峰. 燃气 - 蒸汽联合循环供热调峰机组热态启动优化[J]. 华电技术,2016,38(7):25-27,77.
- [2] 何青,罗宁. 燃气蒸汽联合循环热电联产机组热经济性分析[J]. 热力发电,2018,47(5):49-56.
- [3] 韩朝兵. 燃气 - 蒸汽联合循环机组的能效监测及经济性诊断[D]. 南京:东南大学,2015.
- [4] 杨承,黄志峰,马晓茜. 联合循环热电联产机组变工况性能分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(12):3514-3524,3680.
- [5] 白子为,张国强,付旭晨,等. 燃气 - 蒸汽联合循环变工况调节方案对比分析[J]. 动力工程学报,2017,37(8):663-672.
- [6] 曲胜,佟轶杰,李杨. 某型燃气轮机燃气 - 蒸汽联合循环方案分析[J]. 航空发动机,2012,38(2):36-40,50.
- [7] 秦锋. 环境条件对燃气 - 蒸汽联合循环机组性能影响[J]. 煤气与热力,2016,36(7):41-43.
- [8] 焦树建. 论“热电联产”型燃气 - 蒸汽联合循环的特性[J]. 燃气轮机技术,2001,14(4):12-19,56.
- [9] 李志鑫. S109A 燃气 - 蒸汽联合循环机组发电热耗率影响因素分析[J]. 华电技术,2018,40(9):66-69,80.
- [10] 钱江波,周伟伟,谷青峰,等. 环境温度对 E 级燃气 - 蒸汽联合循环机组全工况影响[J]. 北京理工大学学报,2018,38(9):905-911.
- [11] 许可,李蔚,李明超,等. 燃气 - 蒸汽联合循环热电联产机组供热特性分析[J]. 热力发电,2019,48(5):1-7.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

祖航(1996—),女,贵州毕节人,在读硕士研究生,从事燃气 - 蒸汽联合循环热力系统优化调度方面的研究(E-mail:1754189494@qq.com)。

王秋颖(1971—),女,辽宁营口人,副教授,工学博士,从事电厂热动力、流体力学、能源转化利用、热工测量等方面的研究。