

Capstone C 系列微型燃气轮机特性的研究

孙洁¹, 孙五一¹, 国旭涛², 李金芳¹, 谢娜¹

(1. 杭州意能电力技术有限公司, 杭州 310014;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014)

摘要:以 C200 为主要研究对象, 对于 Capstone C 系列微型燃气轮机结构原理、工作特点、性能指标等方面进行现场试验、数据分析、横向比对。Capstone C 系列微型燃气轮机具有结构简单、高可靠性、启停迅速、负荷调节范围广、污染物排放低、对各种类型电网适应性强等优点。

关键词:微型燃气轮机; 机械结构; 工作原理; 性能指标; 电气性能

中图分类号: TK479

文献标志码: A

文章编号: 1009-2889(2021)03-0039-04

微型燃气轮机是一类新近发展起来的小型热力发动机, 其单机功率范围为 25 ~ 300 kW, 基本技术特征是采用径流式叶轮机械(向心式透平和离心式压缩机)以及回热循环。微型燃气轮机发电技术掀起了“分布式能源”的技术革新热潮。同时我国“十三五”规划中明确指出清洁能源与核能及可再生能源等其它低排放能源形成良性互补, 是能源供应清洁化的最现实选择^[1-2]。

1 分布式能源技术

分布式能源是靠近用户端的能源综合利用系统, 可以利用包括天然气、生物质、风能、太阳能、地热能等多种能源, 还可以与余热、余压、余气等能源形式耦合互补。由于采用的能源形式不同, 分布式能源系统形式多样, 结构各不相同, 可以独立运行, 也可以并网运行^[3-5]。

园区级常用的分布式能源主要以天然气分布式能源系统为主, 通过能量的梯级利用, 在产生 25% ~ 45% 电能时, 将 40% ~ 50% 的低温余热加以利用, 综合能源利用率超过 75%。与传统电空调方式相比, 天然气分布式供能项目能源综合利用效率可高出 30% 以上, 从而最大限度降低不必要的电煤消

耗, 减少燃煤过程中的二氧化碳(CO₂)、二氧化硫(SO₂)排放。同时天然气冷热电三联供是对大电网有益的补充, 是一种环保节能的能源供应方式^[6-8]。

2 Capstone C 系列微型燃气轮机特点

天然气分布式供能项目常用的原动机有活塞发动机和透平发动机。活塞发动机已有 100 多年的发展历史, 技术已经非常成熟。但由于活塞发动机自身结构所固有的特点, 使得活塞发动机有很多靠自身难以克服的缺陷, 如噪声大、振动大、排放高、结构复杂等。随着航空工业的不断发展, 透平发动机的性能大大提升, 成本显著降低。透平发动机避开了活塞发动机结构上的缺陷, 在细分市场领域取得了较好的业绩。其中 Capstone C 系列微型燃气轮机以其独有的结构特点, 占有很高的微型燃气轮机市场份额。Capstone C 系列主要机型有 C30(功率 30 kW)、C65(功率 65 kW)、C200(功率 200 kW)。随着用电、用冷需求的增加以及目前能源使用的便捷性, 对于分布式天然气三联供原动机的出力需求也增加了。本文以 Capstone C200 微型燃气轮机(以下简称 C200)为主要对象进行研究。

2.1 微型燃气轮机结构

典型 Capstone C 系列微型燃气轮机发动机剖视

收稿日期: 2020-11-10 改稿日期: 2020-12-23

基金项目: 杭州意能电力技术有限公司科技项目(EPRD2019-16)

作者简介: 孙洁(1985—), 女, 杭州人, 工程师, 主要从事分布式能源及可再生能源节能优化方面工作, E-mail: s. 51@qq.com。

图见图 1,结构上整个系统(燃气轮机和控制器)采用空气轴承设计,无需液体润滑剂。当微型燃气轮机运行时,一层气体膜将轴与轴承分开,防止磨损。发电机、压缩机、涡轮同轴布置且只有一个运动部件,无齿轮箱,无传输带,无燃气轮机驱动附件,集成环形回热器,用以提高热效率。

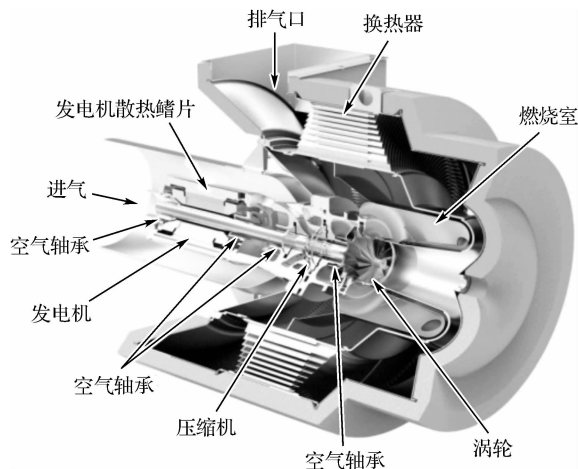


图 1 典型 Capstone C 系列微型燃气轮机发动机剖视图

2.2 工作原理

典型 Capstone C 系列微型燃气轮机工作流程见图 2。以 C200 为例,工作开始时吸入大量空气,被压缩机以 $0.5 \sim 0.6 \text{ MPa}$ 压力压缩后与燃料充分混合燃烧。燃烧后的高温($800 \sim 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$)高压气体推动涡轮旋转(C200 额定转速为 $61\,000 \text{ r/min}$)带动同轴发电线圈发电,产生高频电。然后通过电力电子系统转变为 760 V 直流电输出,也可以逆变成符合要求的交流电输出,发电同时将机组启动,蓄电池充至满电备用。作功以后的高温烟气($500 \sim 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$)排出涡轮,经过内置的环形回热器吸收余热来预热进入燃烧的空气,使得进燃烧器的空气温度达到 $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$,同时使排出烟气降温到 $280 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。排出的烟气可以通过溴化锂等低品位热源利用手段进一步利用,充分利用了热能的同时提高了机组发电效率,也减少了热排放。

2.3 功率、效率的影响因素

在实际应用中有诸多因素影响微型燃气轮机的功率和效率,这些因素主要有气压、进口压损、背压、环境温度等。秦绪山^[9]等人针对 C30 在不同海拔高度下进行研究,表明海拔高度每上升 $1\,000 \text{ m}$,输出功率下降约 10% 。

微型燃气轮机使用工厂模块化预制,机组内部结构压损在预制时已有考虑并进行相应消除用以满

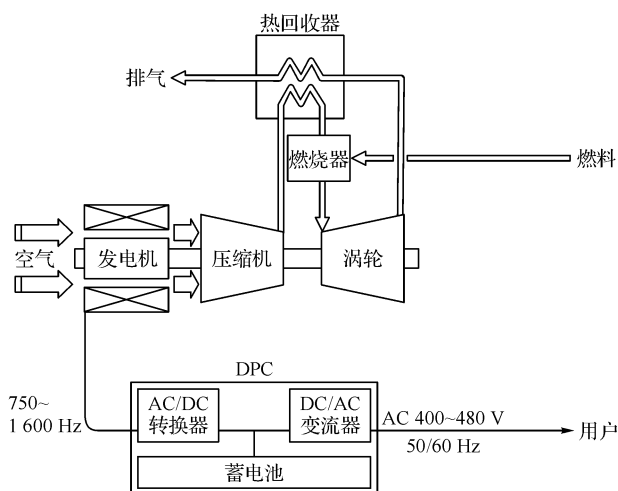


图 2 典型 Capstone C 系列微型燃气轮机工作流程图
足铭牌出力。用户需要考虑的进口压损主要是空气滤网和微型燃气轮机天然气进口压力,这些都可以及时清洗和更换滤网以及相应的参数调整将影响缩减至可控范围内。

由背压-功率和背压-效率曲线(图 3)可知随着背压的增加,发电功率和发电效率逐渐下降,两者与背压呈反比趋势,修正曲线的斜率亦无重大突变。在这几个影响因素中背压的影响可以通过合理的结构设计进行降低,在实际工艺中应尽量缩短微型燃气轮机排气口至换热设备的烟道、减少弯头等来降低背压以减少对发电功率和发电效率的影响。

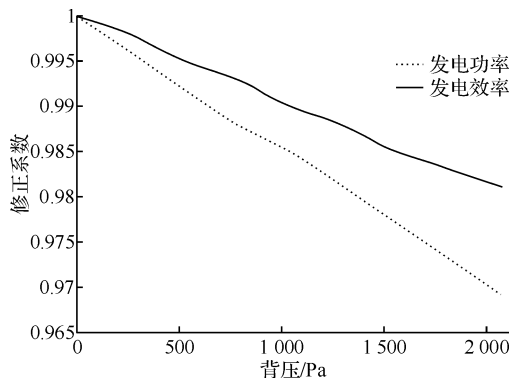


图 3 背压-功率和背压-效率修正曲线

对 4 台同类型的 15 MW 燃气轮机在不同环境温度下进行研究,表明环境温度 $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为一个临界点,超过该临界点时环境温度对发电量的影响大幅上升,温度每升高 $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$,发电效率降低约 7% ,温度的负效应表现明显^[10]。通过横向对比可知环境温度在这几个影响因素中对功率、效率的影响最大。在典型的三联供系统中,随着环境温度的升高,燃气轮机的热效率和发电量都降低了,但是输入系统的

燃料总热量降幅更大,即系统输出能量的总和比输入系统的燃料总热量的降幅小,因此系统的一次能源利用率反而升高^[11]。

环境温度 35.8 ℃ 时对某露天布置 C200 进行发电功率和发电效率测试。环境温度、大气压力和排气背压(测量值见表 1)以上三项参数依据厂家提供的修正曲线进行修正,最终修正前后燃气轮机效率、功率数据见表 2。通过修正微型燃气轮机的功率和效率均能达到设计值。

表 1 某 C200 微型燃气轮机效率、功率影响因素测量值

环境温度/℃	大气压力/kPa	排气背压/kPa
35.8	101.078	1 150.25

表 2 某 C200 微型燃气轮机效率、功率修正前后对比

	发电效率/%	输出功率/kW
修正前	28.79	164.6
修正后	31.72	190.2

2.4 污染物排放特性

天然气中硫元素含量极少,SO₂ 污染物在烟气中浓度极小且符合排放要求,微型燃气轮机在 SO₂ 和粉尘排放方面具有明显的优势,其污染物的排放以烟气中的 NO_x 为主^[12]。通过整理、归纳、采集数据表明,C 系列微型燃气轮机 NO_x 排放量与发电机出力呈一类反比趋势。

对某 C200 进行污染物排放实测,绘制发电机出力 和 NO_x 曲线见图 4。随着发电机出力的增加 NO_x 排放呈明显下降趋势。以 45% ~ 55% 发电机出力带为一个突变节点,发电机出力 45% 以下时,随着出力的增加 NO_x 排放的减小趋势较 55% 以上时更加明显。当发电机出力 80% 时即可满足微型燃气轮机 ISO 工况中标的 NO_x 排放值 18.5 mg/m³,发电机出力 100% 时实测 NO_x 含量仅为 9.04 mg/m³。NO_x 排放当量远小于同出力内燃机。

2.5 良好的电气性能

Capstone C 系列微型燃气轮机具有快速启动及带载能力,通过采集某 C200 的冷态启动曲线(见图 5)可以看出,冷态自收到点火指令并自检完成后输出功率由零升至额定用时约 80 s。

微型燃气轮机所在的微电网可根据外电网的情况在并网和孤网模式下工作。当微型燃气轮机所在的微电网与外电网连接时进入并网模式。该种模式下,微型燃气轮机能够根据用户的需求调整输出功率,作为一个电流源,此时微型燃气轮机的输出电压

和频率由电网决定。当微型燃气轮机所在微电网与外电网断开时,则进入孤网模式。微型燃气轮机以电压源的形式向微电网输出功率,同时还肩负调节微电网中电压和频率的任务。对某孤网运行的 C200 进行测试,通过微电网孤网时的三相电压的变化曲线(图 6)可以看出,C200 对微电网电压控制的稳定性很高,负荷增减时电压的波动幅度均小于 1.5%。

C200 通过简单的控制器并联输出功率就能达到电池组累加的效果,对 3 台 C200 并联机组进行变负荷试验。试验时负荷的瞬时变化量最高达 50%

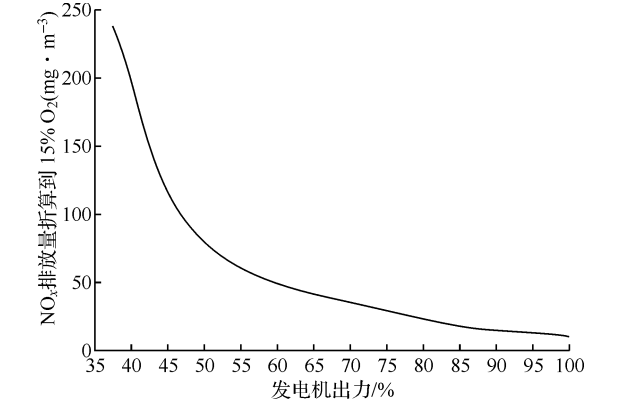


图 4 发电机出力 和 NO_x 排放量曲线

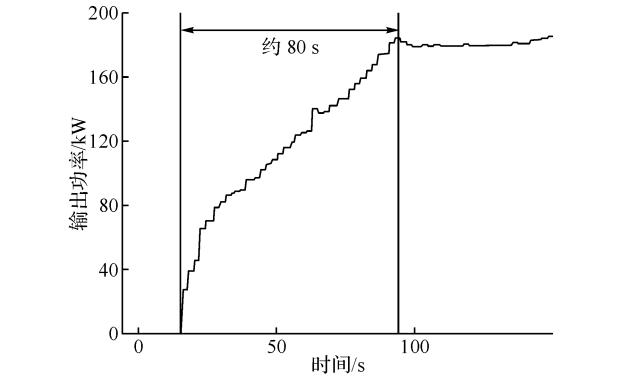


图 5 某 C200 冷态启动曲线

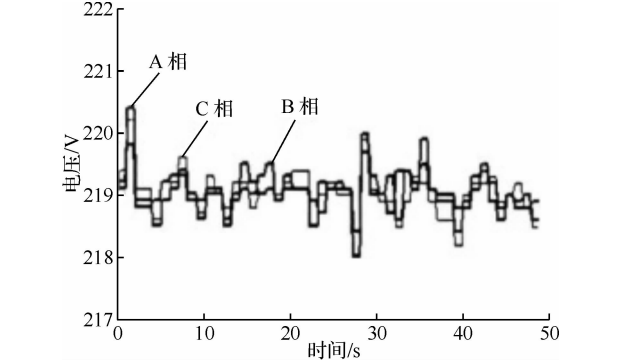


图 6 C200 孤网运行时三相电压变化

以上,C200 并联机组表现出良好的变负荷特性和很强的负荷跟踪能力。目标功率大幅变化时均能在 80 s 内完成调节功能^[13]。

3 结语

天然气分布式供能提高了能源利用率,将不同能级的热量分配给不同需求的用户,使得能源结构更合理的同时也减轻高峰电网压力,环保效益显著,是未来的主要发展方向^[14]。

通过对 Capstone C 系列微型燃气轮机现场试验、数据分析、横向比对可知,燃气轮机功率、效率易受外部环境影响的典型特征依旧存在,但相较同类型燃气轮机仍具有简单的机械结构、极低的污染物排放特性,同时还具有快速启动、迅速带载、良好的变负荷特性、较强的负荷跟踪能力和极强的电网适应性等优点^[15-16]。

参考文献:

[1] 童家麟,吕洪坤,蔡洁聪,等. 国内天然气分布式能源发展现状与应用前景综述[J]. 浙江电力,2018,37(12):4-10.

[2] IBRAHIM O, FARDOUN F, YOUNES R, et al. Review of water-heating systems; general selection approach based on energy and environmental aspects [J]. Build and Environment, 2014, 72: 259-286.

[3] 国旭涛,蔡洁聪,韩高岩,等. 分布式能源技术与发展现状[J]. 分布式能源, 2019, 4(01):55-62.

[4] 何文凯,王玉璋,高威. 分布式供能系统设计与优化研究[J]. 燃气轮机技术,2015,28(03):18-23.

[5] AL MOUSSAWI H, FARDOUN F, LOUAHLIA-GUALOUS H. Review of tri-generation technologies: design evaluation, optimization, decision-making, and selection approach [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 120:157-196.

[6] 李正茂,张峰,梁军,等. 含电热联合系统的微电网运行优化 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14):3569-3576.

[7] 孙五一,孙洁,韩高岩,等. 锅炉冲管技术在分布式能源站中的应用[J]. 浙江电力, 2019, 38(02):92-96.

[8] 韩高岩,楼可炜,孙五一,等. 数据中心能源站运行经济性策略分析[J]. 浙江电力, 2018, 37(12):103-107.

[9] 秦绪山,吴勋,孟宪君,等. 涡轮发电机组作为军用移动电站的可行性研究[C]//中国工程热物理学会学术会议论文. 2006.

[10] 刘景龙,袁本雄,齐伟. 环境温度对燃机发电能力的影响分析 [J]. 山东化工,2015(14):117-119.

[11] 谢娜,韩高岩,吕洪坤,等. 微燃机冷热电三联供系统建模及热力学分析[J]. 浙江电力,2020,39(04):94-101.

[12] 徐国群. 江苏省燃气电厂环保现状及政策趋势[J]. 燃气轮机技术, 2017,30(04):9-15.

[13] 肖小清,郑国荣,阚伟民,等. C200 微型燃气轮机结构及控制研究[J]. 燃气轮机技术,2010,23(4):18-21.

[14] 李金芳,叶琪超,应光耀,等. 分布式能源电站低温余热利用技术研究进展[J]. 浙江电力,2020,39(08):88-94.

[15] 高威,王玉璋,翁一武. 改善国内分布式供能系统经济性的建议 [J]. 燃气轮机技术,2014,27(01):5-9,51.

[16] 张丹,周大汉. 微型燃气轮机发电机组发展及国产化[J]. 上海节能, 2013(4):3-8.

Research on the Characteristics of Capstone C Series Micro-turbine

Sun Jie¹, Sun Wuyi¹, Guo Xutao², Li Jinfang¹, Xie Na¹

(1. E. Energy Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: With C200 as the research object, field tests, data analysis, and horizontal comparison of Capstone C series micro-turbine structure principle, working characteristics, performance indicators, etc. are carried out. Capstone C series micro-turbines have the advantages of simple structure, high reliability, rapid start and stop, wide load adjustment range, low pollutant emissions, and strong adaptability to various types of power grids.

Key words: micro-turbine; mechanical structure; working principle; performance indicators; electrical performance