

基于 ZK1200 国产燃气轮机的工业分布式 供能系统的经济性分析

孙文嘉¹, 张海磊², 高 闯³

- (1. 上海和兰透平动力技术有限公司, 上海 201800;
2. 中国石油物资上海有限公司, 上海 200050;
3. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210)

摘 要: 本文以采用 ZK1200 国产燃气轮机的苏州蓝天燃气热电有限公司金鸡湖项目的工业分布式供能系统为研究对象, 利用商业 NPSS 软件, 通过现场采集实际用能数据、建立并修正模型和计算实时收益对系统经济性进行分析, 并针对三种运行模式下的经济性作出对比, 最终提出优化运营策略, 为机组的运行提供了参考。

关 键 词: ZK1200; 工业分布式供能; NPSS; 经济性; 优化

中图分类号: TK472

文献标志码: A

文章编号: 1009-2889(2021)02-0043-09

近年来, 分布式供能系统因其污染物排放少^[1-2]、能源利用率高^[3-4]、靠近负荷中心更安全^[5]的优势, 逐步得到重视并快速发展。同时, 分布式供能系统的经济性分析也逐渐成为当前研究的热点。由于原动机承担着分布式供能系统的所有能量来源的角色, 所以经济性分析以及供能系统建设初期的可行性研究, 均离不开原动机。然而由于我国在这方面的技术差距, 已建设的分布式供能系统, 均采用国外进口机组, 原动机厂商不提供运行中各部件特性曲线, 无法真实模拟原动机在偏离设计工况等条件下的实际状况, 燃气轮机尤其如此。

ZK1200 为中国科学院上海高等研究院研发设计、上海和兰透平动力技术有限公司制造并成套的机组。机组研制成功后, 经过了短期的厂内测试。但由于无法解决余电利用的问题无法进行长期考核, 因而无法获得机组长期运行的稳定性情况以及机组与余热利用设备配套后的综合运行情况。

苏州工业园区金鸡湖某分布式能源站作为该机组的首个示范用户, 经过 1 年的调试和 1 年的实际运行, 现对机组实际运行过程的经济性进行分析, 供

业内了解国产燃气轮机的实际情况。

本文在分析了分布式供能系统原动机选型的基础上, 以苏州工业园区金鸡湖某分布式能源站供能系统为研究对象, 考虑经济性计算影响因素, 基于机组实际运行数据建立并修正计算模型, 计算分析了 2017 年苏州工业园区金鸡湖某分布式能源站(以下简称“分布式能源站”)的经济性, 并基于现有运行模式最终确定机组运行优化方案。

1 工业分布式供能系统

1.1 工业分布式供能系统概述

分布式供能系统按照系统规模和应用对象可以分为工业型和商业型。由于工业分布式供能系统的负荷主要取决于生产的工艺需求, 不存在商业分布式明显的潮汐性。如果进一步对区域内多个用户集中供能, 不同用户间的负荷可互补分配, 使得负荷特性更加平稳。如果分布式供能系统配置合理, 则可使机组全年高负荷运行, 产生更高的收益, 同时满足多类型的需求^[6]。商业分布式供能系统则适用于能源需求性质相同或相近且分布集中的建筑群, 如

收稿日期: 2020-11-10 改稿日期: 2021-01-12

基金项目: 中国科学院重点部署项目(ZDRW-CN-2017-2); 国家自然科学基金(51306199)

作者简介: 孙文嘉(1992—), 女, 山东省龙口市人, 硕士研究生, 主要从事小型燃气轮机的性能分析研究工作, E-mail: sunwj@helanturbines.com; 通信作者: 高闯, 副研究员, E-mail: gaoc@sari.ac.cn。

酒店、商场、医院、办公楼等,系统规模较小,运行灵活^[7]。本文研究对象分布式能源站供能系统即为工业分布式供能系统。

1.2 工业分布式供能系统原动机选型

分布式供能系统常使用的原动机有燃气轮机、内燃机(通常指往复式内燃机,燃气轮机与往复式内燃机同属内燃机,由于国内长期称呼的习惯,在此尊重习惯,不再修改)、斯特林发动机、燃料电池等。由于斯特林发动机和燃料电池的技术尚不成熟,且成本较高,目前在世界范围内还未得到广泛应用^[8]。现有的分布式供能系统基本以燃气轮机和内燃机为主^[9]。

小型机组相比于大型机组具有装置容量小、占地面积小、启停快捷、初投资少、自动化程度高、维修简单、污染物排放低等优势。因此,分布式供能系统多选用微型燃气轮机、小型燃气轮机和内燃机。表 1 对比了微型燃气轮机、小型燃气轮机和燃气内燃机的特点。相比之下,尽管小型燃气轮机的发电效率较低,但其具备低排放、余热利用效率高的优势,特别适用于对于余热品质要求较高的场合,这也是分布式能源站选择 ZK1200 型燃气轮机作为原动机的原因。

表 1 三种原动机特点比较^[8]

类型	微型燃气轮机	小型燃气轮机	燃气内燃机
结构	结构简单、便于移动	结构简单、紧凑、质量轻、体积小	结构紧凑、质量轻、尺寸小
排放	NO _x 排放低、污染低	NO _x 排放低、污染低	NO _x 排放较高、污染高
余热利用	废热仅高温烟气,但烟气温度较低	系统较简单,废热仅高温烟气,余热利用效率高	系统较复杂,废热包含高温烟气和缸套热水
启动	时间短 ^[9]	时间短	时间短
发电效率	低,一般在 25 % ~ 35 % ^[10]	较低,一般约为 20 % ~ 35 % ^[10]	高,一般在 30 % ~ 45 % ^[10]

2 分布式能源站的经济性计算

2.1 分布式能源站结构

分布式能源站现场各设备的组成结构如图 1 所示,其中燃气轮机的设计点参数见表 2。该燃气轮机发电为分布式能源站提供电力,多余电力上网,不足电负荷由电网补充,燃气轮机的高温烟气经余热锅炉(设计点参数见表 3)产生 1.65 MPa 的高压蒸汽供给工业园区若干特殊用户。其中部分高温蒸汽

经板式换热器加热冷水,为锅炉及 116 kW 热水型溴化锂吸收式制冷机组提供热水。另有两台 20 t/h 燃气锅炉根据需要轮流开启为用户补足高温蒸汽。系统采用以热定电的控制方式,依据用户及分布式能源站的冷热负荷决定机器的启停与运行工况,从而实现冷热电三联供。

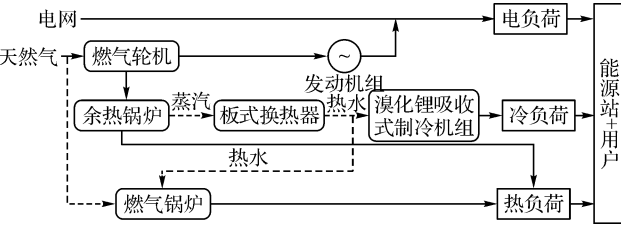


图 1 分布式能源站运行结构图

表 2 ZK1200 型燃气轮机设计参数

发电功率/ kW	热效率/ %	涡轮前温/ K	排气温度/ K	发电机 效率/%
1 150	16	1 055	823	98

表 3 余热锅炉设计参数

蒸汽压 力/MPa	蒸汽温度/ ℃	蒸汽产量/ (t · h ⁻¹)	给水温度/ ℃	锅炉入口 烟气温度/ ℃	锅炉入口 烟气流量/ (kg · s ⁻¹)
1.65	210	7.55	104	556	11.31

2.2 系统经济性计算流程图

在 1 年的试运行期间,仅 10 月份因为工艺需求的原因,整月连续运行,而其余各月份属于间断运行,为此拟利用 10 月份燃气轮机运行数据验证 NPSS(Numerical Propulsion System Simulation,即推进系统数值仿真)模型,然后结合其余月份计算得到的蒸汽产量、发电量和燃料消耗量、水消耗量的逐时数据,在以燃气轮机作为主供蒸汽的情况下,计算得到全年经济性,流程见图 2。



图 2 系统经济性计算流程图

2.3 技术经济指标分析

该能源站的收益包含蒸汽收益和发电收益,而其主要支出包含:

- (1) 燃料天然气消耗;
- (2) 水消耗,其中包含 14 % 的汽包排污水;
- (3) 气体污染物 NO_x 排放费用;
- (4) 分布式能源机组附属设备电耗、分布式能源站公用系统电耗;
- (5) 蒸汽损耗,有 6% 的蒸汽用于加热供水。

上述各项价格指标见表 4,为分布式能源站实际使用的价格体系。燃料组分及参数分别见表 5 和表 6,取自中石油东桥分输站提供的 2017 年 11 月 5 日至 6 日的实测数据。本文中天然气体积均为标准工况。由于分布式能源站的设备实际运行的耗电量不会超过其额定功率,保守计算,采用分布式能源站提供的站内设备额定功率作为设备耗电量计算指标,详细数据见表 7。

表 4 价格指标表			
上网电价/ (元·kW ⁻¹ · h ⁻¹)	供水价格/ (元·t ⁻¹)	燃气轮机 维护价格/ (元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	蒸汽价格/ (元·t ⁻¹)
0.784	5.5	0.05	272
天然气价格 (4 月—10 月)/ (元·m ⁻³)	天然气价格 (11 月—3 月)/ (元·m ⁻³)	NO _x 排放费用 (体积浓度低于 2.5×10 ⁻⁵)/ (元·当量 ⁻¹)	
2.44	2.66	4.5	

表 5 天然气组分	
组分	体积比/%
CH ₄	93.585
C ₂ H ₆	3.247
C ₃ H ₈	0.435
IC ₄ H ₁₀	0.059
NC ₄ H ₁₀	0.074
IC ₅ H ₁₂	0.025
NC ₅ H ₁₂	0.019
C ₆ H ₁₄	0.047
N ₂	1.629
CO ₂	0.880

表 6 天然气参数	
高位发热量/(MJ·m ⁻³)	绝对密度/(kg·m ⁻³)
37.58	0.72

表 7 分布式能源站设备额定功率汇总表	
分布式能源机组附属设备总功率/kW	公用系统总功率/kW
102.6	18

2.4 经济性影响因素分析

实际运行中,众多因素会对机组运行工况产生影响,使其低于设计值,降低经济性。因素考虑如下:

- (1) 用户蒸汽需求量。系统采用以热定电的控制方式,下游用户热负荷需求的不稳定使得机组常运行于较低工况,在热负荷需求为 0 时,机组的启停会进一步降低经济性。
- (2) 用户蒸汽需求压力。
- (3) 涡轮前温限值,最大不可以超过 1 055 K。考虑热平衡,涡轮前温的提升可以极大提高蒸汽产量、热效率及经济性,但由于燃气轮机结构和材料的限制,即使在热天经济性降低,也不能通过提高涡轮前温来保持较高工况点。
- (4) 排气温度限值,最大不超过 560 ℃。余热锅炉的设计限制使得燃气轮机排烟温度不能超过 560 ℃,燃气轮机在热天排烟温度会升高,为适应余热锅炉温度要求,燃气轮机须降低运行工况。
- (5) 发电功率限值,最大不可以超过 1 150 kW。冷天燃气轮机的输出功率大幅度增大,但由于轴、齿轮箱等配套机械的设计限制,燃气轮机最高电功率不得超过额定发电功率,考虑到发电机效率,发电功率不得高于 1 150 kW。
- (6) 实时变化的大气温度、压力、相对湿度。
- (7) 年运行小时数。在项目上报江苏省发展和改革委员会立项时,基于分布式能源站目前已运行的大型燃气轮机调峰机组年运行 4 000~4 500 h,保守估算了 3 000 h,这其中也含有了对首台国产机组的信心不足的因素。当然,机组在合理工况点连续运行的时间越长,收益越高。

2.5 模型建立与修正

2.5.1 NPSS 软件

NPSS 软件由美国 NASA Glenn 研究中心联合国防部、军方、研究机构等组织实施并发展而来。NPSS 是一款基于组件的面向对象、多学科结合的商业软件,提供用于系统模型的开发、合作及无缝集成的工程设计和模拟环境,可以用于演示循环设计工况、预测稳态和瞬态非设计工况的性能等。因此,本文选用 NPSS 软件作为建模工具。

2.5.2 ZK1200 型燃气轮机计算模型修正

任何机组的实际运行工况与设计工况都会存在一定差异。使用 NPSS 建立如图 3 所示的 ZK1200 联合循环模型,计算设计值并同实际运行数据对比,

发现分布式能源站的 ZK1200 实测压气机压比较设计值偏低,燃气轮机排气温度较设计值偏高。这是由于上海高等研究院与上海和兰透平动力技术有限公司首次研制与成套的自主燃气轮机缺乏冷态与热态折合过程的实际经验,担心长期运行中出现刮蹭,在前期调试阶段有意识地增加了涡轮与压气机侧的转静子间隙,而压气机、涡轮的转静子间隙对效率的

影响见式(1)和式(2)。

$$\Delta\eta_c = 0.2 \times (G_c/h_c - 0.02) \quad (1)$$

$$\Delta\eta_t = 0.1 \times C_t/h_t \quad (2)$$

式中: $\Delta\eta_c$ 和 $\Delta\eta_t$ 分别为压气机和涡轮等熵效率变化量; G_c 和 G_t 分别为压气机和涡轮转静子间隙,mm; h_c 和 h_t 分别为压气机和涡轮转静子叶片出口高度,mm。

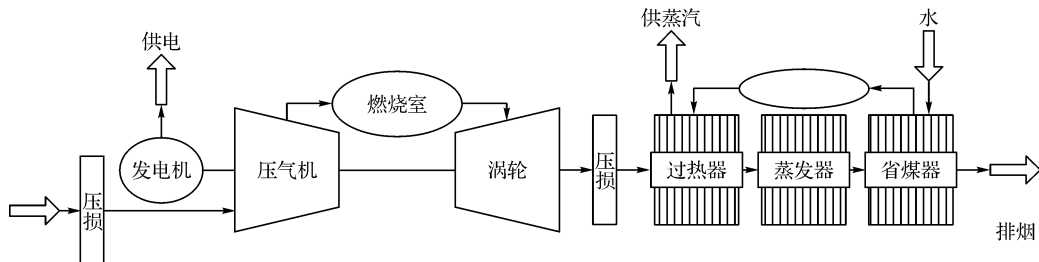


图3 ZK1200 联合循环计算模型

当压气机、涡轮的转静子间隙增大,叶片出口高度不变时,压气机、涡轮的效率均降低,导致机组效率也低于设计值。后期在产品大修检查时将进行处理,并在完成出厂试验后交付。

为实现非设计工况的性能计算,NPSS 建模需输入部件特性曲线,而上述分析可知转静子间隙增大的压气机和涡轮效率均低于设计值,因此需要修正压气机和涡轮的部件特性曲线以使模型贴合实际性能。这里使用 GasTurb 软件中特性线的传统修正方法^[11]:以压气机为例,将压气机按几何缩放(所有尺寸缩放系数相同)时,其流场也被几何缩放,在忽略雷诺数的影响下,缩放后的压气机特性线上指定参考点的效率和压比将与缩放前压气机相同,针对缩放前压气机的折合流量和折合转速应用修正系数,即保证缩放前后压气机特性线的一致性。压比的缩放需以恒定压升的形式表示,引入修正系数 f_w 、 f_{Eff} 、 f_π 、 f_{speed} 。同时流体的可压缩性导致雷诺数对部件性能的影响,引入雷诺修正系数 $f_{w,\text{RNI}}$ 和 $f_{\eta,\text{RNI}}$ 。修正公式见式(3)~式(7)^[12]。

$$f_w = \frac{(W\sqrt{\theta/\delta})_{\text{des}}}{(W\sqrt{\theta/\delta})_{\text{ref}} \times f_{w,\text{RNI}}} \quad (3)$$

$$f_{\text{Eff}} = \frac{\eta_{\text{des}}}{\eta_{\text{ref}} \times f_{\eta,\text{RNI}}} \quad (4)$$

$$f_\pi = \frac{\pi_{\text{des}} - 1}{\pi_{\text{ref}} - 1} \quad (5)$$

$$f_{\text{speed}} = \frac{(N/\sqrt{\theta})_{\text{des}}}{(N/\sqrt{\theta})_{\text{ref}}} \quad (6)$$

$$\delta = p/101.325, \theta = T/288.15 \quad (7)$$

式中: f_w 为折合流量修正系数; f_{Eff} 为等熵效率修正系数; f_π 为压比修正系数; f_{speed} 为折合转速修正系数; $f_{w,\text{RNI}}$ 为雷诺数影响流量因子; $f_{\eta,\text{RNI}}$ 为雷诺数影响效率因子; W 为流量,kg/s; η 为等熵效率; π 为压比; N 为转速,r/min; p 为压力,kPa; T 为温度,K;des 代表设计点;ref 代表参考点。

修正系数是针对特性线上所有点的修正,涡轮特性线修正同压气机特性线类似,不再赘述。

利用 10 月份连续运行段的运行数据推算得到性能曲线修正系数,经修正的模型计算所得压气机参数与实测值完全一致,同时保证模型中余热锅炉各处温度、蒸汽条件与实测数据相同。在实测数据中,天然气流量采用燃气轮机用燃料控制阀的反馈流量数据,而非专用的流量测量仪表的测量数据(后期在计算机组特性时发现燃料控制阀的流量反馈存在偏差,并与能源站的天然气计量表进行比对,确定了燃料控制阀的流量反馈较实际流量偏高,实际流量约为反馈流量的 92.5 %);而燃气轮机的发电功率实时变化且报表间隔周期长,因此功率实测值采用每小时平均值,仅可用作趋势分析。从图 4 和图 5 可见,模拟值与实测值趋势均相同,且图 5 中燃气轮机发电功率模拟值低于实测值,保证了依此所得收益数据的保守性。从上述两种趋势的比较看,修正的 ZK1200 燃气轮机计算模型与实际运行情况吻合。

2.5.3 余热锅炉计算模型修正

余热锅炉性能基于 ε -NTU 传热单元数法计算,余热锅炉的非设计工况主要由换热系数和冷热

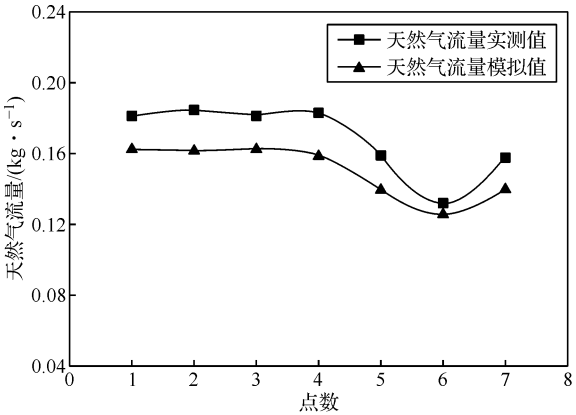


图4 天然气流量实测值与模拟值对比

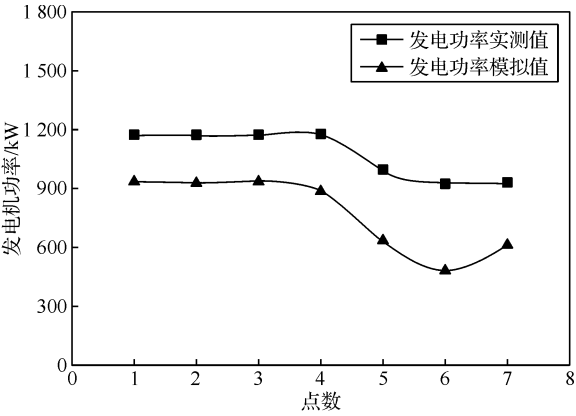


图5 燃气轮机发电功率实测值与模拟值对比

侧压损决定。根据换热系数、换热面积以及工质流量、定压比容计算得到传热单元数 NTU,继而得到效率值,最后通过压力损失计算得换热器出口参数。

压力损失采用如下修正公式^[13]计算,见式(8)、式(9)。换热系数主要受入口烟气流量影响,修正公式^[13]见式(10)。

热端: $dp = dp_{des} \times (W/W_{des})^{1.84} \times (T/T_{des}) \times (p_{des}/p)$ (8)

冷端: $dp = dp_{des} \times (W/W_{des})^{1.98} \times (v/v_{des})$ (9)

$U = U_{des} \times (W/W_{des})^\beta$ (10)

式中: v 为比体积, m^3/kg ; U 为换热系数, $kJ/(s \cdot m^2 \cdot K)$; β 为换热系数修正系数。

由于余热锅炉性能受入口烟气的影响较大,且报表数据间隔时间较长,导致由实测值计算得到的余热锅炉修正系数在小范围内波动,取平均值为:过热器换热系数的修正系数为 2.47,蒸发器换热系数的修正系数为 2.605,省煤器换热系数的修正系数为 4.845。

燃气轮机和余热锅炉计算模型均由实际运行数据修正得到,符合分布式能源站联合循环机组实际

性能。图 6 给出了根据 10 月份连续运行段的实际运行数据计算所得的小时净收益与 NPSS 模型计算所得的小时净收益的对比,其中已考虑燃料控制阀的反馈偏差。由于除 10 月份以外的其余各月份均属于间断运行(运行 1 d 或运行 2 d,且燃气轮机负荷不到额定值一半,蒸汽产量很小),无法作为对比参考依据。由图 6 可见,小时净收益趋势基本一致,且模拟所得净收益小于实际净收益,保证了模拟数据的保守性,个别数据偏差较大是由于发电功率的数据影响,已在第 2.5.2 节说明。

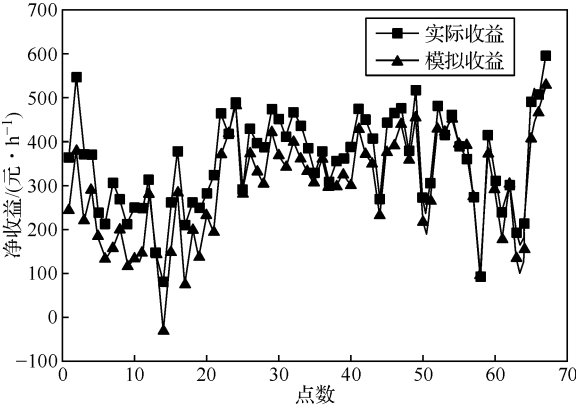


图6 10月份连续运行段的实际收益与模拟收益对比

2.6 机组全年经济性计算

2.6.1 全年客观参数数据来源

(1) 气象条件

分布式能源站所在地苏州的 2017 年实时温度数据通过查询江苏省气象局官网获得,月平均温度、大气压力及大气湿度数据取自权威软件 RETScreen 软件。RETScreen 由加拿大自然资源部开发,可根据地点获得全球范围内的气候数据,详细数据见表 8。

表 8 RETScreen 软件 2017 年各月苏州气候数据

月份	平均温度/℃	平均相对湿度/%	平均大气压力/kPa
1	3.9	76.5	102.3
2	5.4	75.3	102.2
3	9.1	75.5	101.8
4	14.7	76.2	101.2
5	19.2	78.7	100.8
6	22.9	83.4	100.3
7	26.1	86.2	100.1
8	25.6	86.5	100.3
9	22.1	82.6	100.9
10	17.0	77.9	101.6
11	11.6	76.7	102.1
12	6.0	76.4	102.4

(2) 用户蒸汽需求条件

以分布式能源站 2017 年逐时燃气锅炉的蒸汽产量和蒸汽压力作为蒸汽条件。

2.6.2 经济性计算公式

(1) 净收益

分析系统收益与支出,净收益计算公式见式(11),其中污染物排放当量数按式(12)计算。

$$R = (P - P_i) \times C_e - W_n \times C_n + W_s \times C_s - W_w \times C_w - P \times C_r - M_i \times C_m \tag{11}$$

$$M_i = M_j / M_k \tag{12}$$

式中: P 为发电功率,kW; P_i 为分布式能源站设备总额定功率,kW; C_e 为上网电价,元/(kW·h); C_n 为天然气价格,元/m³; C_s 为蒸汽价格,元/t; C_w 为供水价格,元/t; C_r 为燃气轮机维护价格,元/(kW·h); C_m 为 NO_x 排放费用,元/当量; W_n 为天然气流量,kg/s; W_s 为蒸汽产量,kg/s; W_w 为水耗量,kg/s; M_i 为 NO_x 排放当量数; M_j 为 NO_x 排放量,kg,由表 9 计算; M_k 为 NO_x 的污染当量值,为 0.95 kg。

表 9 分布式能源站机组 NO_x 排放监测数据表

标态风量均值/ (m ³ ·h ⁻¹)	排放浓度均值/ (mg·m ⁻³)	平均排放速率均值/ (kg·h ⁻¹)
33 953	28	0.95

表 10 2017 年 1 月 1 日 0 时机组性能参数计算值

发电功率/ kW	天然气流量/ (kg·s ⁻¹)	压气机排气 压力/kPa	排气流量/ (kg·s ⁻¹)	排气温度/ K	涡轮前温/ K	蒸汽流量/ (kg·s ⁻¹)	蒸汽温度/ K	热效率/%	给水流量/ (kg·s ⁻¹)	NO _x 当量数
1 150	0.174	351.7	12.19	796	1 016	2.017	482.9	14.17	2.345	1

3 三种运行模式下的经济性对比

燃气轮机机组的实际运行受到诸多条件的限制,影响分布式供能系统经济性,而分布式能源站机组因下游用户蒸汽需求量和自身性能的影响,经济性受限,因此下面将针对实际运行条件与排除受限影响因素的三种模式下的经济性作出对比,以获得机组的优化运行方案。

3.1 模式一:实际运行条件

此模式按照机组实际运行条件,以热定电,工况受下游用户逐时蒸汽需求量限制。经计算得 2017 年各月平均每小时净收益,见表 11 所示,变化趋势如图 7 所示,其中 R 为每小时净收益,元/h。分析发现,冬季由于同时受燃气轮机最大发电功率 1 150

(2) 投资回收期

考虑 ZK1200 型燃气轮机投资费用为 720 万元,余热锅炉投资费用为 180 万元,故项目总造价 900 万元。采用全额投资,无贷款。

采用直线法计算折旧额,见式(13),折旧年限为 15 a。静态回收期可由式(15)计算。

$$D_C = V \times (1 - \sigma) / 15 \tag{13}$$

$$A = R_{\text{annual}} \times (1 - \varepsilon) + D_C \times \varepsilon \tag{14}$$

$$Y_l = V / A \tag{15}$$

式中: D_C 为折旧费,万元; V 为总投资,万元; σ 为残值率,为 5 %; A 为净现金流量,万元; R_{annual} 为年运行费用,万元; ε 为所得税率,为 25 %; Y_l 为静态回收期,a。

2.6.3 算例

以 1 月 1 日 0 时为例,利用修正的 NPSS 模型,输入环境条件和蒸汽条件,此时系统最大蒸汽产量低于用户需求量,受 2.4 节所述(2)~(6)因素的限制。模拟计算结果见表 10。计算式(11)、式(12)得净收益为 241 元/h。其余月份净收益均按上述过程进行判定和计算,最后汇总得到全年收益。

kW 的限制和天然气价格的影响,净收益偏低;而夏季受排烟温度 560 ℃ 的限制,净收益也降低。

根据表 11 得全年 12 个月的净收益平均值为 295 元/h,估算全年运行 3 000 h 的总收益为 88.6 万元,静态回收期为 11.2 a。

3.2 模式二:下游蒸汽需求量始终超出系统产量

此模式假设下游蒸汽需求量提高,不再限制燃气轮机工况。采用月为单位进行平均值估算。月平均每小时产物及收益见表 11 所示。全年 12 个月的净收益平均值为 313 元/h,全年运行 3 000 h 的总收益为 93.8 万元,静态回收期为 10.6 a。分析图 7 发现,去除蒸汽产量限制,模式二较模式一经济性略有提高。

表 11 三种模式下的经济性对比

月份	模式一		模式二		模式三		
	平均净收益/ (元·h ⁻¹)	发电功率/MW	蒸汽产量/ (kg·s ⁻¹)	平均净收益/ (元·h ⁻¹)	发电功率/MW	蒸汽产量/ (kg·s ⁻¹)	平均净收益/ (元·h ⁻¹)
1	210	1.15	2.01	222	1.15	2.00	231
2	214	1.15	2.02	232	1.15	2.01	242
3	212	1.15	2.06	253	1.15	2.05	268
4	389	1.08	2.00	417	1.14	2.10	491
5	338	1.01	1.93	380	1.08	2.05	465
6	329	0.96	1.87	346	1.03	2.01	439
7	316	0.92	1.82	319	0.99	1.97	420
8	320	0.92	1.84	325	1.00	1.98	425
9	358	0.98	1.90	360	1.05	2.03	451
10	381	1.05	1.98	406	1.12	2.09	485
11	241	1.14	2.06	258	1.15	2.08	285
12	233	1.15	2.03	235	1.15	2.02	247

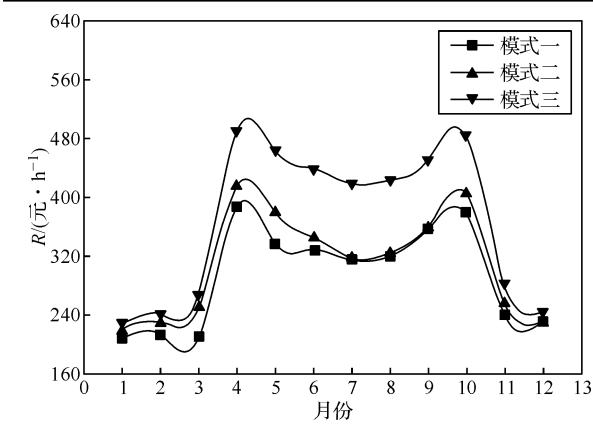


图 7 三种运行模式的各月平均净收益对比图

3.3 模式三:燃气轮机改造至设计性能

2.5.2 节中提到 ZK1200 型燃气轮机为防止热态刚蹭,适当调大了一些部件间隙,从而降低了机组的性能。经过后期的大量试验及在公司研发新型 ZK2000 型燃气轮机的过程中积累的大量经验,可以将 ZK1200 改造达到前期设计的性能,系统经济性将有所提升。此模式即在燃气轮机模型中去除修正系数,同时去除下游蒸汽需求量的限制。采用月为单位进行平均值估算。产物及收益见表 11 所示。燃气轮机改进优化后全年 12 个月的净收益平均值为 371 元/h,全年运行 3 000 h 的总收益为 111.2 万元,静态回收期为 9.2 a,与现有模式一相比提前了 2 a。

图 8 给出了模式二、三各月平均蒸汽产量对比图。燃气轮机改造后,压气机压比和涡轮前温的提

升使得夏季的运行工况大幅提高,蒸汽产量和净收益随之提升。十一月至三月对比并不明显是由于最大发电功率的限制。

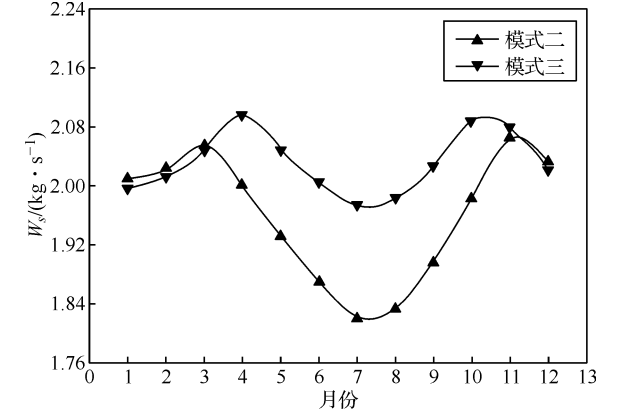


图 8 运行模式二、三各月平均蒸汽产量对比图

4 运营建议

目前分布式能源站以两台 20 t/h 燃气锅炉作为提供蒸汽的主体,表 12 给出了全年各月的月平均实际蒸汽需求量(因全年数据量过大,以月均值代表整体变化趋势,全年实际蒸汽需求量最大值为 17 t/h,最小值为 3 t/h),分析发现月平均实际蒸汽需求量仅为燃气锅炉额定产量的一半左右,燃气锅炉经常处于低效率运行,经济性降低。

如表 12 所示,实际蒸汽需求量几乎始终超过 ZK1200 的最大供汽能力,因此 ZK1200 机组在大多数情况能够以模式二中的较高工况运行,经济性较

好。蒸汽缺口量见表 12,为 1~4 t/h,考虑全年实际用 2 台 5 t/h 小锅炉填补蒸汽空缺。
蒸汽需求量最大值为 17 t/h,建议分布式能源站使

表 12 全年月平均实际蒸汽需求量与模式二、三蒸汽产量对比

月份	实际蒸汽需求量/ (t·h ⁻¹)	模式二蒸汽产量/ (t·h ⁻¹)	模式二蒸汽产量缺口/ (t·h ⁻¹)	模式三蒸汽产量/ (t·h ⁻¹)	模式三蒸汽产量缺口/ (t·h ⁻¹)
1	11.00	7.236	3.764	7.200	3.800
2	10.58	7.308	3.272	7.236	3.344
3	9.47	7.416	2.054	7.380	2.090
4	9.22	7.200	2.020	7.560	1.660
5	8.18	6.948	1.232	7.632	0.548
6	9.43	6.732	2.698	7.452	1.978
7	9.43	6.552	2.878	7.344	2.086
8	10.14	6.624	3.516	7.380	2.760
9	9.66	6.840	2.820	7.524	2.136
10	8.84	7.128	1.712	7.632	1.208
11	9.63	7.452	2.178	7.488	2.142
12	10.50	7.308	3.192	7.272	3.228

5 结论

(1) 使用商业软件 NPSS 建立了 ZK1200 联合循环的计算模型,并运用能源站 2017 年 10 月的连续运行数据对模型进行修正,模型计算结果与实际运行结果趋势一致,且能够保证净收益的保守性。结合选取的气象条件和蒸汽需求条件对 2017 年实时净收益进行了推算。

(2) 针对三种运行模式下的经济性作出了对比,发现去除下游蒸汽产量限制,经济性较实际运行条件略有提升,能源站后期可扩大供热范围,提高蒸汽需求;通过后期对燃气轮机进行改造,调整部件间隙至设计性能可以有效地提高系统经济性,可提前两年回收投资。在当前价格体系下,估算净收益为 88.6 万元/3 000 h~111.2 万元/3 000 h。

(3) 当前下游蒸汽需求量条件下,能源站内燃气锅炉常运行于低效率工况,下游用户的平均月蒸汽需求量始终超过 ZK1200 机组的最大产汽能力,可以保证机组在大部分时段以较高工况运行,经济性较高,因此建议以 ZK1200 机组为主力,购置 2 台 5 t/h 小型燃气锅炉填补蒸汽缺口,原 20 t/h 的燃气锅炉中 1 台作为备用,另 1 台可作为二手锅炉回收,补贴小型燃气锅炉购置费。

参考文献:

[1] 王琅,陆建锋,王维龙,等. 楼宇型蓄能联产系统热力学及经济性分析[J]. 工程热物理学报,2017,38(12):2530-2536.

[2] 刘殿海,杨勇平,杨昆,等. 分布式能量系统的综合评价[J]. 工程热物理学报,2005,26(3):382-384.

[3] 董福贵,张也,尚美美. 分布式能源系统多指标综合评价研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(12):3214-3222.

[4] 李沛峰,杨勇平,戈志华,等. 300MW 热电联产供热系统分析与能耗计算[J]. 中国电机工程学报,2012,32(23):15-20.

[5] 刘爱斌,翁一武,刘宏波. 一种新型分布式供能系统的研究[J]. 燃气轮机技术,2009,22(1):1-5.

[6] 廖志伟,王妍,王路. 电网企业参与的分布式能源运营模式及发展空间研究[J]. 控制理论与应用,2017,34(8):1120-1126.

[7] 杨允. 区域型分布式供能系统优化配置研究及不确定性优化探索[D]. 北京:中国科学院大学,2016:2.

[8] 史宇丰. 分布式供能系统用原动机类型分析和特点比较[C]//中国建筑学会建筑热能动力分会第十八届学术交流大会暨第四届全国区域能源专业委员会年会论文集. 牡丹江:中国建筑学会建筑热能动力分会,2013.

[9] 陆伟,张士杰,肖云汉. 燃气轮机与燃气内燃机在联供系统中的应用比较[J]. 工程热物理学报,2008,29(6):905-910.

[10] 杨昆,武海滨,朱晓军,等. 内燃机、燃气轮机和微燃机在冷热电联供系统中的性能分析[J]. 电力与能源,2016,37(4):476-482.

[11] KURZKE J, RIEGLER C. A new compressor map scaling procedure for preliminary conceptional design of gas turbines [C]//ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Munich, Germany: ASME, 2000.

[12] KURZKE J. GasTurb 13: User's manual, Part IV: compressor

maps[R]. Aachen, Germany:GasTurb GmbH, 2018.

模型及分析[J]. 华北电力大学学报,2010,37(4):53-5.

[13] 张学镭,王松岭,陈海平,等. 非补燃余热锅炉变工况性能计算

Economic Analysis of Industrial Distributed Energy Supply System Based on ZK1200 Domestic Gas Turbine

Sun Wenjia¹, Zhang Hailei², Gao Chuang³

- (1. Helan Turbines, Co. , Ltd. , Shanghai 201800, China;
2. China Petroleum Goods & Materials Shanghai Company, Shanghai 200050, China;
3. Shanghai Advanced Research Insititute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

Abstract: This paper takes the industrial distributed energy supply system of a distributed energy station project at Jinji Lake in Suzhou industrial park with ZK1200 domestic gas turbine as the study object. Using the commercial software NPSS, the system economy is analysed by processing actual data from field, establishing and correcting model and calculating the real time income. The economy of three operation modes is compared as well. Finally the optimal operation strategy is proposed which provides a reference for the operation of the unit.

Key words: ZK1200; industrial distributed energy supply system; NPSS; economy; optimize

.....

(上接第 72 页)

Heat Dissipation Analysis and Structural Transformation of an Industrial Switch for Compressor Unit

Yang Fang¹, Chen Jinxiao¹, Wang Peng², Deng Linna¹, Li Zhen¹, Zou Yu²

- (1. Operation Department, Sino-Pipeline International Company Limited, Beijing 100007, China;
2. Beijing Key Laboratory of Key Technologies and Equipment for Deepwater Oil and Gas Pipelines, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: In order to solve the problem caused by high temperature that the industrial switch in the compressor control system operates unstable and then affect the system information exchange, based on the non-contact temperature measurement method, the heat dissipation performance of an industrial switch in practical application process is analyzed and studied. Through a comprehensive comparison analysis of the temperature in different ambient temperature conditions when the equipment is running, the main cause of the switch high frequency fault is that the component layout density on both sides of CPU is different, and this leads to great difference in heat dissipation ability of both sides. Based on the above analysis, this paper proposes a structural optimization method to increase forced convection heat transfer by adding CPU micro cooling fan. The test results show that the switch with forced convection fan has lower and more reasonable temperature distribution, and the operation is more stable, which can effectively solve the high temperature problem of the switch equipment.

Key words: switch; heat dissipation analysis; structural modification