

基于稳态建模技术的燃气多联供机组经济性分析

郭祚刚,黎小林,周长城,马溪原

(南方电网科学研究院,广东广州 510663)

摘要:针对综合能源系统内的燃气多联供展开稳态建模研究,结合成本模型及收益模型开展机组经济性分析。选取 GE 公司 6F.03 燃机,研究了燃气多联供机组的供热功率及供电功率耦合关系,开展了包含天然气价格、蒸汽销售价格、蒸汽抽取量、年利用小时数和上网电价在内的多因素敏感性分析。结果表明:通过外供蒸汽流量调节,可满足不同供热及供电功率需求,当外供 20 t/h 蒸汽时,可提供 16.17 MW 的供热功率及 109 MW 供电功率;天然气价格敏感性分析表明,要实现低于 10 年的投资回收期,应将天然气价格控制在 3.25 元/m³ 以内;增大蒸汽供应量能够提高机组的经济性;上网电价的敏感性最为显著,当低于 0.5 元/(kW·h),投资回收期会超过 24 年,但当上网电价达到 0.7 元/(kW·h),投资回收期可降低至 5 年。

关键词:综合能源系统;燃气多联供机组;稳态建模;经济性分析;敏感性分析

中图分类号:TK121

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2020.02.005

[引用本文格式]郭祚刚,黎小林,周长城,等.基于稳态建模技术的燃气多联供机组经济性分析[J].热能动力工程,2020,35(2):32-37. GUO Zuo-gang, LI Xiao-lin, ZHOU Chang-cheng, et al. Economic analysis of CHP unit based on steady-state modeling technology [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2): 32-37.

Economic Analysis of CHP Unit based on Steady-State Modeling Technology

GUO Zuo-gang, LI Xiao-lin, ZHOU Chang-cheng, MA Xi-yuan

(Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou, China, Post Code: 510663)

Abstract: The energy supply system of Integrated Energy System (IES) usually contains renewable energy and Combined Heat and Power unit (CHP). Heat and electricity can be transported to different end users through transporting networks. In this paper, the steady-state model of CHP unit, as well as its cost and income model were established. The performance and economic analysis of CHP unit was done based on these models. 6F.03 gas turbine was adopted in a case study to investigate the coupling relationship between heat and power supply, and to study the multi-factor sensitivity analysis including natural gas price, steam sale price, steam extraction amount, annual utilization hours and electricity price. It has been found that the different ranges of heat and electricity demands can be met by adjusting the steam extraction amount. The heat supply power reaches 16.17 MW, and the electricity power reaches 109 MW when the steam extraction amount reaches 20 t/h. The natural gas price sensitivity analysis shows that the investment recovery period can be less than 10 years if the natural gas price is less than 3.25 RMB/m³. The steam extraction amount sensitivity analysis shows that the investment recovery period will decline when the steam extraction amount is increased. Electricity price has the most noticeable influence on the investment recovery period. The investment recovery period is up to 24 years if electricity price is less than 0.5 RMB/kWh, and it will decline to 5 years if the electricity price is 0.7 RMB/kWh.

收稿日期:2019-05-24; 修订日期:2019-07-11

基金项目:南方电网公司科技项目(ZBKJXM20180080)

Fund-supported Project: Supported by the Science & Technology Project of China Southern Power Grid (ZBKJXM20180080)

作者简介:郭祚刚(1985-),男,湖南永州人,南方电网科学研究院高级工程师, E-mail: guozg@csg.cn.

Key words: integrated energy system, combined heat and power unit, steady-state modeling technology, economic analysis, sensitivity analysis

引言

燃气多联供机组(CHP)为综合能源系统供能端的重要组成部分,能够通过机组性能调节促进综合能源系统内风力发电及光伏发电等新能源电能的消纳,同时基于能量梯级利用理念的燃气多联供机组能够实现能源综合利用效率的提升^[1-3]。黄培东等人^[4]构建了包括燃气多联供机组及风电的联合优化模型,研究发现可通过优化控制燃气多联供机组的储热环节来增强系统的调节能力,进而促进风电的消纳。刘涤尘等人^[5]构建了含燃气多联供及储能的区域综合能源系统,可通过储能设备解耦燃气多联供机组的热电运行约束,提高能源利用效率。马力等人^[6]将小容量 CHP 多联供机组应用到微电网当中,研究了燃气多联供机组接入对微电网控制方式及运行特性的影响。

燃气多联供机组的经济性影响着综合能源系统的应用场景^[7-10]。燃气多联供机组稳态建模技术能够模拟燃气多联供机组的供热及供电特性,大幅度降低研究过程对硬件设备的依赖性。在燃气多联供机组的燃气锅炉预测控制器建模^[11],热负荷侧压力控制器建模等方面已有相关的建模报道。本文主要对燃气多联供机组的燃气轮机、余热锅炉及蒸汽轮机发电机组开展稳态建模研究,同时结合燃气多联供机组的经济性分析模型开展投资经济性分析。

1 燃气多联供机组及稳态模型

1.1 燃气多联供机组概述

燃气轮机在利用天然气燃烧热输出电能后,将余热以排烟的形式送入余热锅炉,通过余热锅炉产生蒸汽,驱动蒸汽轮机发电机组输出电能。燃气轮机与蒸汽轮机的联合、蒸汽轮机发电机组供热及供电的耦合,均在能量梯级利用角度上实现了能量高效利用。

1.2 燃气轮机模型

燃气轮机包含压气机、燃烧器、燃气透平及配套

发电机,燃气轮机消耗天然气输出电能,同时排出温度较高的烟气。燃气轮机的数学模型可用稳态关系式描述:

$$P_{GT} = \eta_{GT} \cdot Q_{Fuel} \quad (1)$$

式中: P_{GT} —燃气轮机单循环输出的电功率, MW; Q_{Fuel} —消耗的天然气热功率, MW; η_{GT} —燃气轮机单循环的发电效率。

1.3 余热锅炉模型

余热锅炉接受燃气轮机排出的烟气,通过布置蒸汽换热器制备蒸汽,通过布置生活热水换热器制备生活热水。

$$Q_{ST} = \eta_B \cdot (Q_{BI} - Q_{BO}) \quad (2)$$

式中: Q_{ST} —余热锅炉制备蒸汽携带的热功率, MW; Q_{BI} —排入余热锅炉的烟气总热功率, MW; Q_{BO} —进入余热锅炉尾部烟道的烟气热功率, MW; η_B —余热锅炉制备蒸汽的锅炉效率。

$$Q_{HW} = \eta_{HW} \cdot Q_{BO} \quad (3)$$

式中: Q_{HW} —余热锅炉外供生活热水热功率, MW; η_{HW} —余热锅炉制备生活热水的锅炉效率。

1.4 蒸汽轮机发电机组模型

蒸汽轮机发电机组将蒸汽携带的内能转变为电能输出,当配置抽凝式蒸汽轮机时,能够通过汽轮机抽汽实现对外供应蒸汽,数学模型描述:

$$P_{ST} = \eta_{ST1} \cdot Q_{ST} - \eta_{ST2} \cdot Q_{STs} \quad (4)$$

式中: P_{ST} —蒸汽轮机抽取外供蒸汽后,剩余蒸汽可输出的电功率, MW; Q_{STs} —外供蒸汽携带的热功率, MW; η_{ST1} —新蒸汽热功率向电功率的转换效率; η_{ST2} —抽汽热功率向电功率的转换效率。

1.5 燃气多联供机组的热电比

燃气多联供机组的热电比为机组对外输出的热功率与输出的电功率之间的比值,热电比是燃气多联供机组的重要指标之一。

$$\lambda_{CHP} = (Q_{HW} + Q_{STs}) / (P_{GT} + P_{ST}) \quad (5)$$

式中: λ_{CHP} —燃气多联供机组的热电比。

2 燃气多联供机组经济性分析模型

2.1 设备投资成本模型

燃气多联供机组的投资成本参照对应容量等级的多联供机组工程建设单位千瓦成本进行估算,当附加生活热水销售时,额外考虑制备生活热水的换热器等附加成本。

$$COST_{CHP1} = \delta_{CHP} \cdot P_{CHP} \tag{6}$$

式中: $COST_{CHP1}$ —外供电能及蒸汽的双联供模式下的燃气多联供机组设备投资单本,万元; δ_{CHP} —多联供机组单位千瓦造价成本,万元/kW; P_{CHP} —燃气多联供机组的装机容量,MW。

$$COST_{CHP2} = COST_{CHP1} + COST_{HW} \tag{7}$$

式中: $COST_{CHP2}$ —考虑余热锅炉尾部烟道布置生活热水换热器制备生活热水时,燃气多联供机组的投资成本,万元; $COST_{HW}$ —增设生活热水换热器等附加成本,万元。

2.2 天然气消耗成本模型

燃气多联供机组运行时消耗天然气,天然气成本与天然气结算价格以及天然气耗量相关:

$$COST_{GAS} = \delta_{GAS} \cdot Q_{GAS} \tag{8}$$

式中: $COST_{GAS}$ —天然消耗成本,元/h; δ_{GAS} —天然气结算价格,元/m³; Q_{GAS} —天然气耗量,m³/h。

2.3 耗水成本模型

燃气多联供机组在对外输送蒸汽及生活热水时,多联供机组的用水成本也同步上升,多联供机组的耗水成本模型:

$$COST_W = \delta_W \cdot Q_W \tag{9}$$

式中: $COST_W$ —耗水成本,元/h; δ_W —机组补给水的结算价格,元/t; Q_W —补给水耗量,t/h。

2.4 售电收益模型

燃气多联供机组外送电量为燃气轮机发电机及蒸汽轮机发电机输出电能之和,售电收益收益模型:

$$M_{CHP,ELE} = (P_{CT} + P_{ST}) \cdot H \cdot \delta_{ELE} \tag{10}$$

式中: P_{ST} —蒸汽轮机发电机输出的电功率,MW; H —一年利用小时数,h; δ_{ELE} —上网电价,元/(kW·h)。

2.5 蒸汽及热水收益模型

燃气多联供机组的蒸汽销售收益与热水销售收

益取决于对应供热产品的销售量及销售单价。

蒸汽销售收益模型:

$$M_{STs} = Q_{STs} \cdot H \cdot \delta_{STs} \tag{11}$$

式中: M_{STs} —蒸汽销售收益,万元; Q_{STs} —外供蒸汽携带的热功率,MW; H —一年利用小时数,h; δ_{STs} —蒸汽售价,元/GJ。

热水销售收益模型:

$$M_{HW} = Q_{HW} \cdot H \cdot \delta_{HW} \tag{12}$$

式中: M_{HW} —生活热水销售收益,万元; Q_{HW} —余热锅炉外供生活热水的热功率,MW; δ_{HW} —生活热水售价,元/GJ。

2.6 静态投资回收年限

燃气多联供机组的投资经济性以静态投资回收年限进行评估,其中投资收益包括售电收益、蒸汽及热水收益,成本包括设备投资成本、天然气消耗成本、耗水成本。

燃气多联供机组在电能与蒸汽双联供模式下的静态投资回收年限为:

$$Y_1 = \frac{M_{CHP,ELE} + M_{STs}}{COST_{CHP1} + COST_{GAS} + COST_W} \tag{13}$$

燃气多联供机组在电能、蒸汽及生活热水三联供模式下的静态投资回收年限为:

$$Y_2 = \frac{M_{CHP,ELE} + M_{STs} + M_{HW}}{COST_{CHP2} + COST_{GAS} + COST_W} \tag{14}$$

3 案例及结果分析

选取美国 GE 公司的 6F.03 机型开展基于稳态模型的案例研究,燃机在环境压力 0.101 3 MPa,年平均温度 22.2 ℃ 及空气相对湿度 81% 的气候条件下,性能保证参数如表 1 所示。

表 1 保证工况下的燃气轮机性能参数

Tab.1 Gas turbine performance parameters

参 数	数 值
天然气/MJ·m ⁻³	34.11
天然气输入热功率/kW	219 364
燃机出力/MW	77.17
单循环效率/%	35.17
排烟流量/t·h ⁻¹	742.7
排烟温度/℃	622.7

在燃气多联供机组投资经济性分析过程中,采用的典型边界参数如表 2 所示。其中,工业天然气价格典型值取 2.7 元/ m^3 ,天然气发电上网电价 0.70 元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})^{[12]}$ 。

表 2 燃气多联供机组经济性分析的典型边界参数

Tab.2 Typical boundary parameters for CHP economic analysis	
参 数	数 值
工业天然气价格/元· m^{-3}	2.7
补给水价格/元· t^{-1}	4.0
上网电价/元· $(\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	0.70
蒸汽热价(1.25 MPa/240 $^{\circ}\text{C}$)/元· GJ^{-1}	80
额定工况供汽量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	75
生活热水价格(65 $^{\circ}\text{C}$)/元· t^{-1}	20
机组年利用小时数/h	4 500
机组静态单位投资/元· kW^{-1}	4 800
热水换热器等附加投资/万元	700

3.1 典型边界参数下的经济性结果

在表 2 给出的典型边界参数下,结合建立的燃气多联供机组稳态模型、成本及收益模型,开展了典型边界参数下的单台 6F.03 机型多联供模式下的投资经济性分析,结果输出如表 3 所示。

表 3 6F.03 燃机多联供机组的投资经济性分析结果

Tab.3 Investment economic results of CHP unit with 6F.03 gas turbine

参 数	电能 + 蒸汽 双联供模式	电能 + 蒸汽 + 热 水三联供模式
总投资/万元	57 600	58 300
年度天然气成本/万元	28 130	28 130
年度补给水成本/万元	135	228.75
年度售电收益/万元	31 398	31 398
年度售蒸汽收益/万元	7 857	7 857
年度售热水收益/万元	-	468.78
机组年度利润/万元	10 991	11 366
热电比/%	60.82	64.77
静态投资回收年限/a	5.24	5.13

在 4 500 h/a 的燃气多联供机组年利用小时数,2.7 元/ m^3 天然气价格,0.70 元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ 上网电

价,80 元/ GJ 蒸汽销售价格等表 2 边界参数条件下,单台多联供机组在“电能 + 蒸汽双联供模式”下的年度利润为 10 991 万元,在“电能 + 蒸汽 + 热水三联供模式”下的年度利润为 11 366 万元,两种模式下的静态投资回收年限分别为 5.24 及 5.13 a。

3.2 供蒸汽热功率及供电功率耦合关系

结合建立的燃气多联供机组各系统的稳态模型,研究了蒸汽抽汽流量在 20 ~ 80 t/h 范围内,蒸汽供热功率、蒸汽轮机电功率及燃气多联供机组输出总电功率之间的耦合关系,结果如图 1 所示。

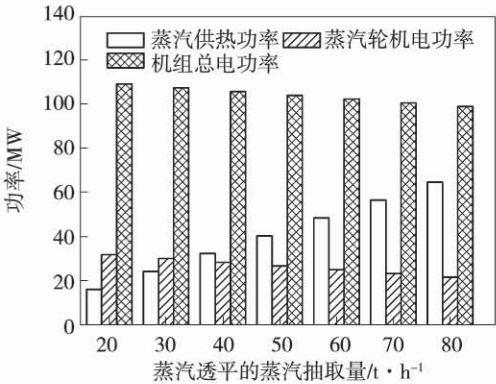


图 1 透平蒸汽抽取量与机组供热/供电功率间关系
Fig.1 Relationship between turbine steam extraction and CHP unit electric power

燃气多联供机组蒸汽透平的蒸汽抽取量及蒸汽轮机发电机组发电功率之间存在耦合关系,燃气多联供机组在允许的最大抽汽流量下可实现灵活抽汽。如图 1 所示,20 t/h 的蒸汽抽取流量能提供 16.17 MW 的蒸汽供热功率,对应的蒸汽发电机组功率为 31.83 MW,燃气多联供机组总电功率为 109 MW;随着外供蒸汽流量的增大,燃气多联供机组的总体电功率相应下降。

3.3 天然气价格敏感性分析

在典型边界参数条件下,改变天然气结算价格,开展了天然气价格敏感性分析,敏感性分析结果如图 2 所示。由图 2 分析结果可知,天然气价格对燃气多联供机组的投资回收年限影响十分明显,当天然价格为 3 元/ m^3 时,燃气多联供机组静态投资回收年限为 7 a;若天然气价格达到 3.25 元/ m^3 ,静态投资回收年限将突破 10 a。

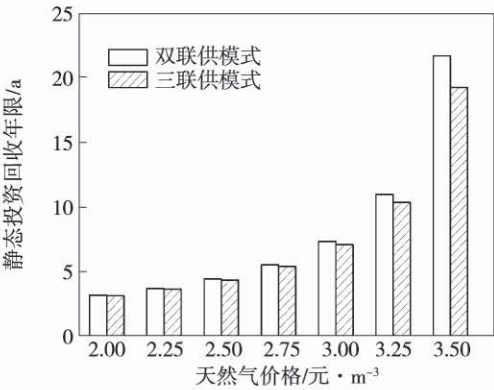


图2 投资回收年限对天然气价格的敏感性分析
Fig.2 Sensitivity analysis of natural gas price on investment recovery period

3.4 蒸汽销售价格敏感性分析

由图3分析结果可知,蒸汽销售价格对燃气多联供机组的投资回收年限有较大影响,当蒸汽销售价格 在 40 ~ 100 元/GJ 波动时,机组静态投资回收年限在 8 ~ 4 a 之间变化。结合蒸汽销售价格及天然气价格的敏感性分析结果,蒸汽销售价格的影响程度弱于天然气价格。

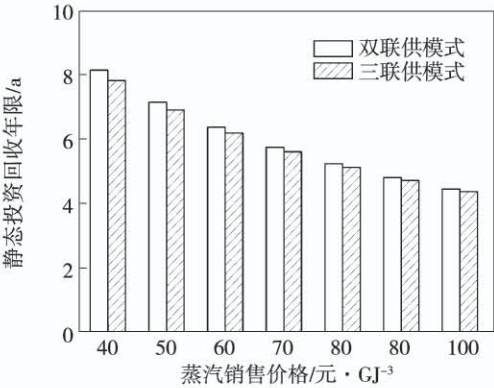


图3 投资回收年限对蒸汽销售价格的敏感性分析
Fig.3 Sensitivity analysis of steam sales price on investment recovery period

3.5 蒸汽抽取量敏感性分析

在燃气多联供机组的经济性分析中,供热蒸汽抽取量及供热蒸汽销售价格直接影响着供热蒸汽收益,在蒸汽抽取量敏感性分析中,当蒸汽抽汽量在 20 ~ 80 t/h 波动时,机组静态投资回收年限在 7 ~ 5 a 之间变化。增大蒸汽抽取量能够较大幅度的提

高燃气多联供机组的经济性。

表4 投资回收年限对蒸汽抽取量的敏感性分析结果

Tab.4 Sensitivity analysis of turbine steam extraction on investment recovery period

蒸汽抽取量/ t · h ⁻¹	双联供模式 回收年限/a	三联供模式 回收年限/a
20	6.97	6.75
30	6.58	6.38
40	6.22	6.05
50	5.91	5.76
60	5.62	5.49
70	5.36	5.24
80	5.13	5.02

3.6 机组年利用小时数敏感性分析

提高燃气多联供机组的年利用小时数能够提高机组的设备利用率,可有效减少投资回收年限。燃气多联供机组静态投资回收年限对年利用小时数的敏感性分析结果如表5所示。

表5 年利用小时数对投资回收年限的敏感性分析结果

Tab.5 Sensitivity analysis of CHP unit utilization hours on investment recovery period

年利用小 时数/h	双联供模式 回收年限/a	三联供模式 回收年限/a
2 500	9.43	9.23
3 000	7.86	7.69
3 500	6.74	6.59
4 000	5.90	5.77
4 500	5.24	5.13
5 000	4.72	4.62

3.7 上网电价敏感性分析

表6给出了上网电价对燃气多联供机组的投资回收年限的影响分析数据,依据分析结果可知燃气多联供机组的投资经济性受上网电价的影响十分明显。当上网电价低于 0.55 元/(kW · h),投资回收年限将超过 12 a。

表 6 上网电价对投资回收年限的敏感性分析结果

Tab.6 Sensitivity analysis of electricity price on investment recovery period		
上网电价/ 元·(kW·h) ⁻¹	双联供模式 回收年限/a	三联供模式 回收年限/a
0.50	28.52	24.34
0.55	13.51	12.57
0.60	8.85	8.47
0.65	6.58	6.39
0.70	5.24	5.13
0.75	4.35	4.28
0.80	3.72	3.68

4 结 论

(1) 生活热水达到 20 元/t 的条件下,在余热锅炉尾部布置生活热水换热器能够提高机组的整体经济性。在给定的典型参数边界条件下,“电能+蒸汽”双联供模式静态投资回收年限约 5.24 a;当增加生活热水供应后,“电能+蒸汽+热水”三联供模式的静态投资回收年限可以缩短至 5.13 a。

(2) 燃气多联供机组的电能输出及蒸汽输出之间存在耦合关系,在燃气多联供机组汽轮机允许的抽汽量范围内,通过调整抽汽量可以改变机组的整体电能输出特性。蒸汽发电机组在外供 20 t/h 的蒸汽(1.25 MPa/240 ℃)时,蒸汽发电机组仍能够输出电功率 31.83 MW,燃气多联供机组总电功率为 109 MW。

(3) 天然气价格及上网电价对燃气多联供机组的经济性影响最为显著,当天然气价格超过 3.25 元/m³,机组静态投资回收年限将突破 10 a;当上网电价低于 0.55 元/(kW·h),投资回收年限将超过 12 a。

参考文献:

[1] 许志斌,王 玗,欧阳春明.考虑 CHP 设备补贴的楼宇型综合能源系统规划[J].可再生能源,2018,36(12): 1806-1811.
XU Zhi-bin, WANG Gan, OUYANG Chun-ming. Configuration of building integrated energy system considering subsidy of CHP facil-

ities [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36 (12): 1806-1811.

[2] 黄国日,刘伟佳,文福拴,等.具有电转气装置的电-气混联综合能源系统的协同规划[J].电力建设,2016,37(9):1-13.
HUANG Guo-ri, LIU Wei-jia, WEN Fu-shuan, et al. Collaborative planning of integrated electricity and natural gas energy systems with power-to-gas stations[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(9): 1-13.

[3] 张 磊,刘昌盛.天然气三联供技术在城市综合体中应用分析[J].建筑节能,2014,42(8):52-55,96.
ZHANG Lei, LIU Chang-sheng. Application of gas technology combined cooling, heating and power in the urban complex[J]. Building Energy Efficiency, 2014, 42(8): 52-55, 96.

[4] 黄培东,詹红霞,彭光斌,等.促进风电消纳的需求响应与储热 CHP 联合优化模型[J].电测与仪表,2017,54(14):1-6.
HUANG Pei-dong, ZHAN Hong-xia, PENG Guang-bin, et al. An optimization model of promoting accommodation of wind power combining demand response and CHP with heat storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(14): 1-6.

[5] 刘涤尘,马恒瑞,王 波,等.含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J].电力系统自动化,2018,42(4):113-120.
LIU Di-chen, MA Heng-rui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 113-120.

[6] 马 力. CCHP 及其所构成微网的运行特性研究[D].天津:天津大学,2008.
MA Li. The research on the operation characteristic of CCHP and micro-grid composed of CCHP[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.

[7] 冯志兵,金红光.燃气轮机冷热电联产系统技术与经济性分析[J].热能动力工程,2005,20(4):425-429.
FENG Zhi-bing, JIN Hong-guang. Technology of gas turbine tri-generation (cooling, heating and electric power) system and its economic analysis[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(4): 425-429.

[8] 张晓晖.热电冷联产系统经济性诊断方法研究[J].中国电机工程学报,2009,29(11):8-13.
ZHANG Xiao-hui. Research on thermo-economics diagnostic method for the combined heating cooling and power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(11): 8-13.