

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.010

热电联产机组的电力调峰运行模式研究

曾勇¹, 曾颖²

(1. 中国能源建设集团广东电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 广州供电局有限公司, 广州 510620)

摘要: 随着社会发展和产业结构的不断调整, 用电结构不断变化, 广东电力系统面临着日益加剧的调峰问题, 系统调峰能力的不足成为制约电力发展的一个重要因素。利用热电联产机组参与调峰是解决上述问题的有效途径。文章从热电联产机组的建模出发, 研究发电热耗、供电气耗、热电比与联合循环供电出力、供热量之间的关系, 得出影响机组调峰能力的因素及调峰范围, 通过对热电联产机组调峰能力的分析, 提出热电联产机组应对电力系统调峰的运行模式。

关键词: 热电联产机组; 调峰能力; 运行模式; 热电比

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-0051-06

Research of Cogeneration Units Acting on Electric Peak-shaving Operating Mode

ZENG Yong¹, ZENG Ying²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: With the social development and industrial structure adjusting constantly, the changing in electricity structure, Guangdong power system is facing a growing problem on peak-shaving capability, the lack of power load has become an important factor restricting the development of electric power. To involve cogeneration units in peak shaving is an effective way to solve the problem above. In this paper, by modeling the cogeneration units, We study the different relationship between combined cycle net output, heat supply and the generating heat rate, the power supply gas consumption, the heat-electricity ratio, and conclude the factors which affect the peak shaving regulating capacity and the range of peak shaving. Base on the analysis of peak-shaving capability of the cogeneration units, we can know the operating mode of regulating peak-load of the power system.

Key words: cogeneration units; peak-shaving capability; operating mode; heat-electricity ratio

随着经济社会可持续发展, 对提高能源综合利用效率、降低能源利用成本、减少大气污染物排放水平提出了更高的要求。热电联产机组是可以同时生成电、热能的发电机组, 在世界范围得到广泛应用, 能适应未来能源发展的态势。自国家发改委、建设部 2007 年发布《热电联产和煤矸石综合利用发电项目建设管理暂行规定》以来, 各地普遍重视编制热电联产规划工作, 积极筹划建设燃气热电联产项目。目前广东电力系统峰谷差和峰谷差率随着社会经济发展和产业结构调整不断增大。珠三角区域

新建项目禁止配套建设自备燃煤电站, 除热电联产外, 禁止审批新建燃煤发电项目, 用热电联产逐步取代低效分散小锅炉供热成为必然的趋势。随着核电、风电装机规模的持续增长, 常规煤电或气电发展在满足电力供需平衡的情况下, 难以解决系统调峰问题, 急需充分发挥热电联产机组的调峰性能^[1-8]。受供热机组自身的调节范围限制, 发电量的大小随供热量变化而改变, 要在保证供热质量的前提下让供热机组参与电网调峰需满足一定的条件。目前, 只有较少的文献针对热电联产机组的调峰能力进行研究。文献[9]利用电网和建筑物热迟滞性大的特点提出热电联产机组参与调峰的方法, 但尚未给出具体算例的应用。文献[10]研究了热电联产机组东北地区采暖期调峰能力并建立了热力曲

收稿日期: 2015-05-28

作者简介: 曾勇(1960), 男, 广东五华人, 高级工程师, 学士, 主要从事燃气轮机发电技术及火力发电厂设计(e-mail)zengyong@gedi.com.cn。

线数学模型。现在大部分的研究只是在建立数学模型的基础上分析说明相关参数机组的调峰能力,不具有普遍性,本文将基于广东省内大多数燃气热电联产项目所选机型,对电力系统调峰的运行模式进行研究分析。

1 热电联产与电网调峰

1.1 热电联产的基本原理

热电联产作为先进的能源利用形式,按照“高能高用、低能低用、温度对口、梯级利用”的科学用能理念,利用发电余热满足附近区域的工业和家庭的冷热需求,进而提高能源综合利用效率。

典型热电联产四级能源利用的基本原理示意图1。

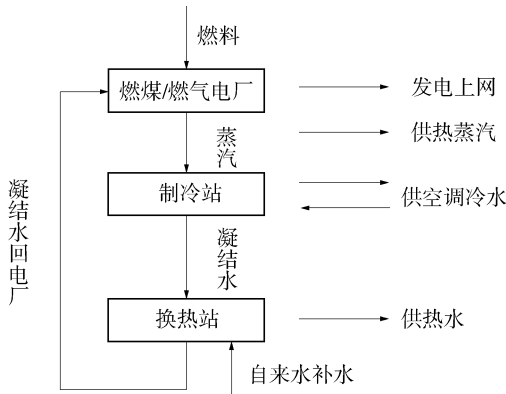


图1 热电联产余热梯级利用流程图

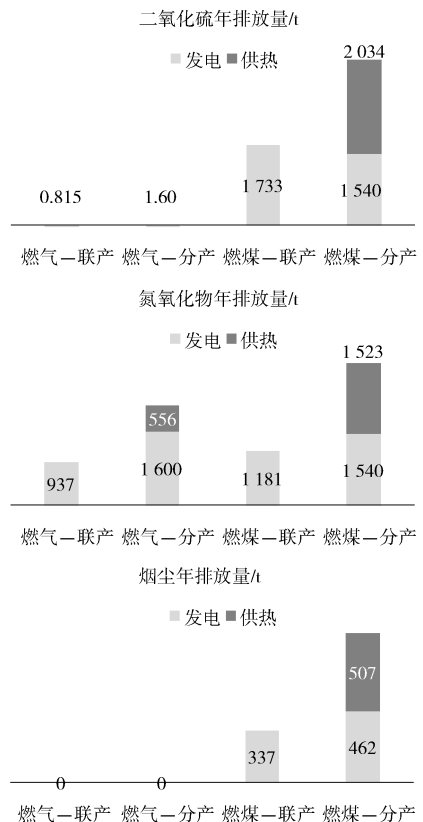
Fig. 1 Utilization Process of Waste Heat in Cogeneration Units

热电联产电厂通过燃气轮机实现了第一级燃气燃烧发电^[8],同时利用燃气轮机排出的烟气在余热锅炉内加热成高温高压蒸汽再次通过蒸汽轮机进行发电,第二级利用汽轮机抽出的供热蒸汽经蒸汽管道输送至各工业用热点或规划的集中制冷站。第三级通过制冷站采用双效型溴化锂制冷机,制出6℃的冷水输送至各个用户进行空调制冷。第四级在集中制冷站内设置水-水换热器,利用溴化锂制冷机组排出的85℃凝结水经换热把自来水加热到60℃,送到各用户做生活热水之用。为了节省水资源,高温凝结水经换热后,由凝结水泵输送回热电厂再利用。

1.2 热电联产的优势分析

热电联产系统的节能效益显著,以提供同样的电量和热量作比较:燃煤热电联产消耗的一次能源仅为燃煤热电分产的69%;燃气热电联产消耗的一

次能源仅为燃气热电分产的84%;燃气热电联产消耗的一次能源仅为燃煤热电联产的86%^[3]。各种能源供应方式中,燃气热电联产能源利用效率最高。热电联产的减排效益如图2所示。以天然气为原料基本不会产生二氧化硫和烟尘。从氮氧化物排放量来看,提供同样的电量和热量:燃煤热电联产排放的氮氧化物为燃煤分产的38.6%;燃气热电联产排放的氮氧化物为燃气分产的43.5%;燃气热电联产排放的氮氧化物为燃煤热电联产的79.3%。整体来看,燃气热电联产污染物排放大大降低。



注:两套9F改进型机组,热电比50%(年发电量4.600 GWh;年供给热量828 GJ)

图2 不同热电联产与分产形式相比减排效益图

Fig. 2 Emission Benefits of Different Cogenerations and Other form of Producing

1.3 利用热电联产机组调峰的迫切性

根据广东电网公司2012年广东省电源结构,见表1。在热负荷需求方面,广东省热电联产供热主要用户是工业,因此广东省的热电联产机组主要分布在产业聚集、工业基础好的珠三角地区。在电力需求方面,珠三角地区自身电源缺乏,主要通过500 kV主网由东、西两翼电源基地向其送电,在面对大型事故或者自然灾害时,缺乏足够

的事故应急电源以及黑启动电源, 电网抵御严重故障的能力较弱, 负荷中心地区电网安全稳定得不到充分保障。因此在珠三角地区建设热电联产机组, 满足珠三角工业用户的供热需求, 加强负荷中心地区电源支撑能力, 是十分必要的。通过对热电联产机组的分析可以了解其调峰能力并作出对应的调峰运行方式。

表1 2012年广东省电源结构

Table 1 Guangdong Power Structure in 2012

能源项目	装机容量/kW	比例/%
省内合计	78 101.1	100.0
火电	57 516	73.6
其中: 煤电	45 246	57.9
油电	327	0.4
气电	11 341	14.5
其它(垃圾等)	602	0.8
水电	8 261.5	10.6
抽水蓄能	4 800	6.1
核电	6 120	7.8
风电	1 392.5	1.8
其他	11.1	0.1

2 数学建模及计算公式

2.1 对燃气热电联产机组的计算

1) 联合循环机组总出力^[11-17]

$$P_T = P_O - P_E \quad (1)$$

式中: P_T 为每套联合循环机组总出力; P_O 为每套联合循环机组发电机端出力; P_E 为每套联合循环机组励磁系统(由其他动力驱动)消耗的功率。

2) 联合循环机组总热耗率

$$H_{RT} = \frac{Q_{fg}(LHV + H_f) + Q - Q_h \times H_h}{P_T} \quad (2)$$

式中: H_{RT} 为每套联合循环机组的总热耗率, kJ/kWh; Q_{fg} 为进入每台燃机的天然气燃料流量, kg/h; Q 为联合循环以外的热源对天然气燃料加热所耗的热能, kJ/h, 若此能量由联合循环内的高温空气或蒸汽提供, 则 Q 等于 0; Q_h 为联合循环对外供热蒸汽量(暂不考虑回水), kg/h, 纯凝时, 则 Q_h 等于 0; LHV 为天然气燃料的低位发热量, kJ/kg; H_f 为燃气轮机天然气加热器前的天然气燃料热焓, kJ/kg; H_h 为联合循环对外供热蒸汽热焓, kJ/kg。

3) 联合循环机组总热效率

$$\eta_T = \frac{P_T + Q_h \times H_h}{Q_{fg}(LHV + H_f) + Q} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η_T 为每套联合循环机组的供热总效率。

4) 联合循环机组的发电热耗(不含供热部分)

$$H_R = \frac{Q_{fg}(LHV + H_f) + Q}{P_T} \quad (4)$$

式中: H_R 为每套联合循环机组的发电热耗, kJ/kWh。

5) 联合循环机组供电出力

$$P_G = P_T(1 - \tau) \quad (5)$$

式中: P_G 为联合循环机组的供电出力, kW; τ 为厂用电率, 取 2.5%。

6) 联合循环机组供电气耗

$$d_G = \frac{Q_{fg} \times LHV - Q_h \times H_h}{P_G \times LHV} \quad (6)$$

式中: d_G 为供电气耗, kg/kWh。

7) 热电比 k

$$k = \frac{Q_h \times H_h}{P_G} \quad (7)$$

2.2 燃气热电联产机组模型的计算条件

根据广东省 50 MW 以上热电联产燃机项目梳理分析, 正在开展前期工作的以及正在建设的项目大多数为 F 级(F 级改进型)的机组。对热电联产机组调峰能力分析有针对性地在典型的 F 级(F 级改进型)约 390~460 MW 的机组中, 选取功率最大的 MHI 公司 M701F4 机组为例进行计算分析其调峰能力^[11]。

对热电联产典型用户行业热负荷特性进行分析, 机组供热抽汽参数考虑供热半径内压损、温降的影响, 选用抽汽压力 1.8 MPa、温度 250 ℃; 抽汽流量 230 t/h, 额定工况热电比约 50%; 可能的最大抽汽暂定为 300 t/h(最终由供货商确定)。计算工况选用机组额定供热性能保证工况下的大气参数(压力 1 004 hPa; 温度 28 ℃; 相对湿度 82%); 机组背压 7.8 kPa。天然气暂按西气东输二线的相关天然气品质资料数据, 低位热值(LHV)为 35 112 kJ/m³。

采用 GT PRO 软件计算机组变工况出力, 计算范围按燃机降负荷至 75%, 分不同的抽汽量进行计算。随着抽汽量的减少, 理论上燃机的负荷还可以降低, 但燃机供货商对环保的排放指标会超标, 且燃机运行效率在低负荷时下降很多, 故不考虑燃机降负荷至 75% 以下的工况。

3 热电联产机组调峰运行模式分析

3.1 F级改进型机组调峰能力计算结果分析

以M701F4机组为例按上述公式计算得：联合循环机组在额定供热工况条件下的总效率为75.38%；热电比为49.78%；供热气耗为29.98 m³/GJ，其中考虑了0.95的供热换热效率；供电气耗0.153 5 m³/kWh；发电热耗为7 094 kJ/kWh。当燃机降负荷运行或抽汽供热量变化时，联合循环供电出力、供电气耗、热电比、发电热耗也将发生变化。

经过对不同供热量下机组变工况计算，范围按燃机从100%降负荷至75%，分别得：联合循环供电出力、热电比、发电热耗、供电气耗与供热量的关系见图3、图4和图5。

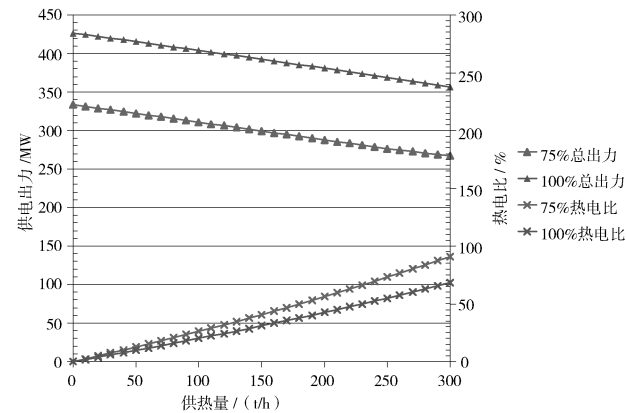


图3 联合循环供电出力、热电比与供热量的关系

Fig. 3 The Relationship Between Net Output, Heat-electricity Ratio and Heat Supply

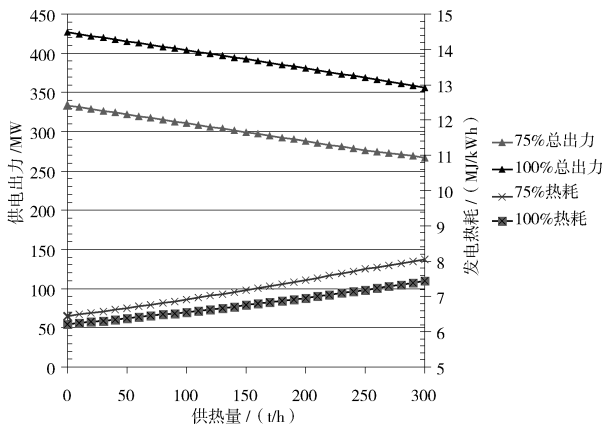


图4 联合循环供电出力、发电热耗与供热量关系

Fig. 4 The Relationship Between Net Output, Generating Heat Rate and Heat Supply

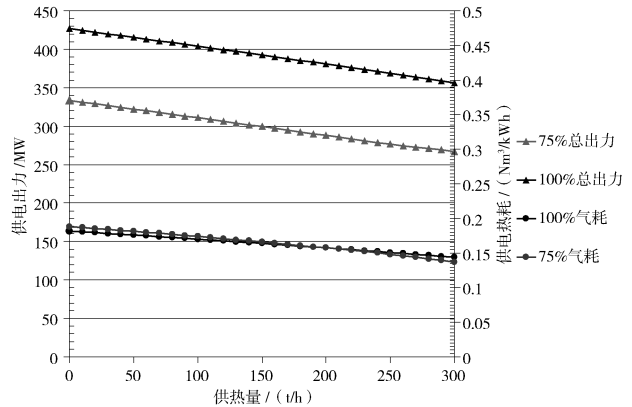


图5 联合循环供电出力、供电气耗与供热量关系

Fig. 5 The Relationship Between Net Output, Power Supply Gas Consumption and Heat Supply

从图3可以看出：对应一定抽汽量下，机组存在一个最小电出力工况，如图上75%总出力曲线所示，只要供热就必须保证供电大于最小电出力，不能随网上调度要求再减少，否则环保的排放指标会超标。

通过计算可知，即使在75%总出力曲线下运行仍可保证供热参数不变，故只要运行工况点落入100%总出力与75%总出力两条曲线范围内，热电联产机组均可以实现部分热、电负荷的独立调节。当相同供热抽汽量下，在75%总出力下运行比在100%总出力下运行的热电比更高。

从图4可以看出：对于不同的供热抽汽量，随着供热抽汽量的增加，机组热耗均是升高的，即效率降低；但在75%总出力下运行比在100%总出力下运行的热耗更高，即效率更低，运行经济性相对差一些。

从图5可以看出：随着供热抽汽量的增加，不论在100%总出力下运行，还是在75%总出力下运行，供电气耗均会有所减少；机组供热抽汽量在200 t/h附近，100%总出力运行与75%总出力运行的气耗相当；在小于供热抽汽量200 t/h区间，对于相同的供热抽汽量，75%总出力运行的气耗比100%总出力运行的气耗略高一些；在大于供热抽汽量200 t/h区间，对于相同的供热抽汽量，75%总出力运行的气耗比100%总出力运行的气耗略低一些。

3.2 燃气热电联产机组调峰运行模式分析

3.2.1 单套热电联产机组运行调节方式

单套联合循环机组在一定范围内，可以同时满足部分热负荷和电负荷的变化需要。如图6所示，

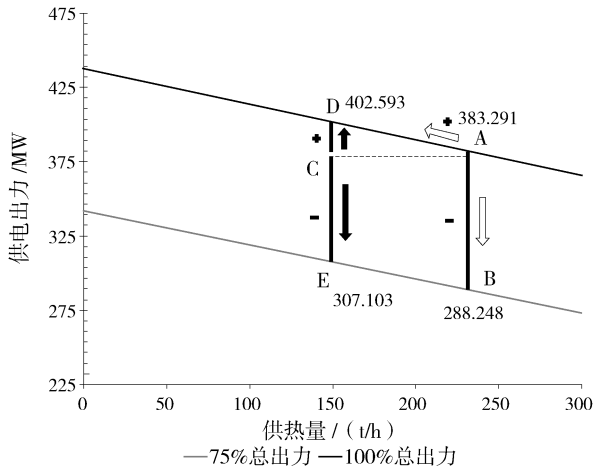


图6 单套联合循环机组出力调整示意图

Fig. 6 Schemes of a Set of Cogeneration Units' Output Adjustment

若机组运行在额定供热状态(抽汽 230 t/h), 机组发电出力可在 A 点所在的线上调节运行, 最低可允许降负荷至 B 点运行; 若机组低于额定供热状态(如抽汽 150 t/h), 机组发电出力可在 C 点所在的线上调节运行, 与额定供热状态时机组出力相比, 此时允许降负荷至 E 点, 也允许增加负荷至 D 点。

3.2.2 两套热电联产机组同时运行调节方式

当供热抽汽量大于单套机组额定供热抽汽量时, 通常以两套机组同时平均分担供热负荷来升降出力; 当供热抽汽量小于单套机组额定供热抽汽量时, 可以有两种运行方式: 一种是均匀带负荷运行方式, 即两套机组保持同时平均分担供热负荷升降出力; 另一种是停机调峰运行方式, 即实际供热抽汽量低于单套机组额定供热抽汽量时停运一套机组, 所有热负荷由另一套机组独立承担。如图 7 两套机组供热抽气量与出力的关系所示。停机调峰运行模式下只有一套机组运行带全部热负荷, 有必要分析对供热的影响: 若在运汽轮机故障甩负荷, 仍可利用配套余热锅炉的备用减温减压装置将高压蒸汽减温减压后用于供热, 以保证供热的可靠; 若在运燃机出现故障跳闸, 将会导致供热中断, 重启另一套机组也需要一定时间才能恢复正常供热。即停机调峰模式下, 燃气轮机跳闸会直接影响供热, 蒸汽轮机跳闸仍可保证持续供热, 故必要时需同时配套应急备用锅炉。据供货商提供的数据, 燃气轮机可靠性较高(F 级燃机可靠性可达 99.4%)。

分析表明: 在实际供热抽汽量低于单套机组额

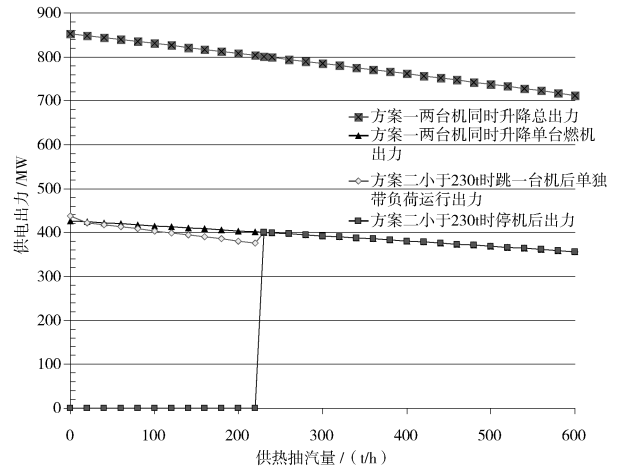


图7 两套机组供热抽汽量与出力的关系

Fig. 7 Schemes of two Sets of Cogeneration Units' Output Adjustment

定供热抽汽量情况下, 停机调峰运行模式机组出力仅为两套机组同时均匀带负荷运行模式的 47% ~ 50%, 可有效发挥燃气热电联产机组的调峰能力。

3.3 机组调峰的环保指标

表 2 为 M701F4 机组按 100% 总出力工况和 75% 总出力工况两种方案的污染物排放计算结果:

表 2 100% 工况与 75% 工况下的环保排放数据

Table 2 Environmental Emissions Data Under 100% Output and 75% Output

项目	单位	100% 工况	75% 工况
SO ₂ 年排放量	t/a	0.815	0.661
SO ₂ 每千瓦时排放量	t/kWh	3.544×10^{-10}	3.822×10^{-10}
NO _x 年排放量	t/a	816	664
NO _x 每千瓦时排放量	t/kWh	3.548×10^{-7}	3.839×10^{-7}

注: 年利用小时数按 6 000 h 计。

可见, 机组在降负荷调峰状态下, 每千瓦时单位 NO_x 和 SO₂ 排放指标会增大, 但由于在 75% 工况下, 机组的总出力减少, 烟气量和天然气耗量也相应减少, 因此 NO_x 和 SO₂ 的年排放总量有所减少。

4 结论

1) 热电联产具备显著的节能减排效益。广东燃气热电联产将呈现规模发展的态势。

2) 研究表明无论单套热电联产机组或两套热电联产机组同时运行的调峰模式, 都可以在满足环保排放指标不超标的前提下充分发挥燃气热电联产机

组的调峰能力。

3) 停机调峰运行模式下只有一套机组运行带全部热负荷,有必要分析对供热的影响。在满足供热可靠性的前提下,可选择停机调峰运行方式,以有效发挥燃气热电联产电厂的调峰能力。

4) 燃气热电联产机组调峰能力受供热和环保两个因素制约。目前在燃机75%负荷能保证满足 NO_x 排放不超过 50 mg/m^3 (标准态)的条件下,供热抽汽量越大,机组的最小电出力越低。当燃机制造厂设备减排技术提升后,有可能使机组的变负荷调峰范围加大。此时,燃气热电联产机组调峰能力更主要关注的是保障供热参数的要求。

参考文献:

- [1] 胡玉清, 马先才. 我国热电联产领域现状及发展方向 [J]. 黑龙江电力, 2008, 30(1): 79-80.
HU Yuqing, MA Xiancai. Situation and Developing Trend on Combining Heat and Power System [J]. Heilongjiang Electric Power, 2008, 30(1): 79-80.
- [2] 康艳兵, 张建国, 张杨. 我国热电联产集中供热的发展现状、问题与建议 [J]. 中国能源, 30(10): 8-13.
KANG Yanbing, ZHANG Jianguo, ZHANG Yang. The Development Status, Problems and Suggestions of Centralized Heating for Cogeneration Units in China [J]. Energy of China, 30(10): 8-13.
- [3] 贺茂石. 热电联产机组电力调峰运行可行性研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
HE Maoshi. Feasibility Study on Operation for Power Peaking of Cogeneration Units [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [4] 曾勇, 曾颖. 燃气热电联产机组选型、调峰能力及电价机制分析 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(1): 66-70.
ZENG Yong, ZENG Ying. Research on Unit Selection, Peak Regulation Capability and Electricity Pricing Mechanism of Gas-fired Cogeneration [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(1): 66-70.
- [5] 黄大为, 郭君宜. 热电联产机组参与系统调峰的调度策略 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(3): 35-39.
HUANG Dawei, GUO Junyi. Cogeneration Units Involved in System Peak-shaving Scheduling Policy [J]. Journal of Electric Power System and Automation, 2014, 26(3): 35-39.
- [6] 张宇, 鄂志军, 刘卫平, 等. 热电联产机组调峰能力的研究与应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(3): 115-118.
ZHANG Yu, E Zhijun, LIU Weiping, et al. Cogeneration Units Peak-shaving Ability Research and Application [J]. Journal of Electric Power System and Automation, 2013, 25(3): 115-118.
- [7] 吕学勤, 刘刚, 黄自元. 电力调峰方式及其存在的问题 [J]. 电站系统工程, 2007, 23(5): 37-40.
LÜ Xueqin, LIU Gang, HUANG Ziyuan. The Adjusting Discharge Peak Methods and the Existing Questions [J]. Power System Engineering, 2007, 23(5): 37-40.
- [8] 张晓晖, 陈钟硕. 热电冷联产系统的能耗特性 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5): 93-98.
ZHANG Xiaohui, CHEN Zhongqi. Energy Consumption Characteristics of Thermal Power Plant System [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(5): 93-98.
- [9] 郭君宜, 王玉坤, 吴刚. 热电联产电力调峰运行模式研究 [J]. 黑龙江科技信息, 2013(29): 125.
GUO Junyi, WANG Yukun, WU Gang. Cogeneration Peak-shaving Operating Mode Study [J]. Journal of Heilongjiang Science and Technology Information, 2013(29): 125.
- [10] 邱张华, 戴辉阳, 阚安康. 燃气热电联产系统的节能分析 [J]. 能源研究与信息, 2007, 23(4): 237-242.
QIU Zhanghua, DAI Huiyang, KAN Ankang. Gas Cogeneration System Energy Saving Analysis [J]. Journal of Energy Research and Information, 2007, 23(4): 237-242.
- [11] 张建业, 徐述. 热电联产项目中机组的选型及参数确定方法 [J]. 电力设备, 2008, 9(1): 72-75.
ZHANG Jianye, XU Shu. Selection and Parameter Determination Method in Cogeneration Units Project [J]. Electrical Equipment, 2008, 9(1): 72-75.
- [12] 吴华. 燃气热电厂供热调峰的运行优化研究 [D]. 华北电力大学. 2012.
- [13] 忻祎. 燃气—蒸汽联合循环电厂热电联产的优化配置 [D]. 上海交通大学, 2007.
- [14] 孙科, 郭江龙, 常澍平. 热电联产机组定电负荷下热负荷经济调度的试验研究 [J]. 节能, 2013(9): 14-17.
SUN Ke, GUO Jianglong, CHANG Shuping. Cogeneration Units Heat Load Economic Dispatch Test Research Under Electricity Load [J]. Energy Conservation, 2013(9): 14-17.
- [15] 周云, 徐彤, 王新雷. 300MW 热电联产机组热经济性研究 [J]. 能源技术经济, 2012, 24(4): 57-61.
ZHOU Yun, XU Tong, WANG Xinlei. 300MW Cogeneration Units Thermal Efficiency Study [J]. Energy Technology and Economics, 2012, 24(4): 57-61.
- [16] 吕红缨, 朱宁. 300 MW 供热机组选型问题的探讨 [J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2006, 11(2): 8-10.
LÜ Hongying, ZHU Ning. An Approach to the Problem About Type Selection of 300 MW Cogeneration Unit [J]. Journal of Chongqing Electric Power College, 2006, 11(2): 8-10.
- [17] 宋伟明, 丁军威. 热电联产电厂供热的直接和间接效益分析 [J]. 华电技术, 2015, 37(1): 1-4, 76.
SONG Weiming, DING Junwei. Analysis of Direct and Indirect Benefit of Cogeneration Power Plants [J]. Huadian Technology, 2015, 37(1): 1-4, 76.

(责任编辑 林希平)