

负荷结构对冷热电联供系统优化配置的影响

李朝振, 石玉美, 黄兴华

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 负荷结构是联供系统优化中特有的因素, 对联供系统的配置规律有重要影响; 这方面的研究有利于我国对这一技术的正确推广。建立了冷热电三联供系统的混合整型非线性集成优化模型。基于某宾馆实测负荷计算了不同负荷比例下的多个算例, 利用灵敏度分析考查了热电比、冷电比对各设备最佳容量的影响。研究结果表明: 不同负荷结构时设备最佳容量及其变化趋势有明显变化; 常见的以电定热或以热定电的方式难以获得燃气轮机的最佳容量; 吸收式制冷机最佳容量也受各负荷的影响; 锅炉和电制冷机的最佳容量可以分别单独由热电比和冷电比近似确定。研究结果可以对不同气候地区三联供系统的推广提供借鉴。

关 键 词: 冷热电三联供; 负荷比例; 灵敏度分析; 配置优化; 燃气轮机

中图分类号: TM611.3 文献标识码: A

引 言

冷热电联供(CCHP)是从一次能源中得到电能(或机械能)和热量, 并进一步产生冷量, 将冷、热、电同时提供给用户使用的一种系统。现行 CCHP 系统主要以燃气轮机为原动机。这种供能方式实现了一次能源的梯级利用, 可以达到节能和环保的目的, 并可以广泛地应用于工、民用建筑以及大型船舶。我国对联供系统的发展十分重视, 2007 年 10 月新修订的《中华人民共和国节约能源法》提出鼓励发展热电联产技术, 并规定电网企业安排热电联产机组按照规定电价与电网并网。

然而, 与传统分供系统相比, CCHP 系统的复杂性大大提高。对这项技术的推广需要建立在对其的正确理解和优化的基础上, 否则其效果可能还不如分供式系统, 国内已有这种案例。现在工程中常用的以电定热或以热定电的配置方法虽简单易行^[1-2], 却无法真正发挥出联供系统的优势^[3]。负

荷与设备优化配置之间的关系需要进一步的研究。在三联供优化模型中设备最优配置属于待优化的变量, 负荷属于输入的常数, 研究二者的关系需要用到灵敏度分析。灵敏度分析即改变优化模型中的常数项, 考察优化解的变化规律。灵敏度分析是了解三联供性能的一个重要方法, 已有很多文献对 CCHP 系统中的天然气价格、购电价格、设备效率等进行了灵敏度分析^[4-5]。天然气价格等属于单因素常数, 灵敏度分析较易实现; 而负荷是包含大量数据的常数矩阵, 其灵敏度分析比较复杂。Kazuki Takahashi 等人采用信息论理论对年总负荷、日负荷因子等 5 个负荷特征值进行了灵敏度分析^[6]。Gamou S 等人分析了不同最大热、电负荷时系统的经济可行性^[7]。而我国幅员辽阔, 包括 7 种气候类型, 不同地区冷热负荷会明显受到气候的影响, 相同建筑会有不同的负荷结构。因此关于负荷结构对最优配置的影响的研究对促进我国三联供系统的正确推广具有重要意义。本文采用 MINLP (Mix-integer nonlinear programming) 混合整型非线性集成优化模型^[8], 以年度化总费用最小为目标, 对负荷结构和配置优化之间的关系进行了研究。

1 CCHP 系统结构

采用目前比较常见的一种 CCHP 系统结构进行分析, 如图 1 所示, 系统可以同时满足冷热电 3 种负荷需求。该系统以燃气轮机(GT)为原动机, GT 消耗天然气发电, 发电产生的余热可以直接用来供热, 或通过吸收式制冷机(AR)供冷, 多余热量通过废热换热器(DH)排出。另外系统还通过燃气锅炉(GB)供热, 通过电制冷机(ER)供冷, 并可以从外网购电(PG), 系统自耗电记为 EC。Q、C 和 E 分别代表热

收稿日期: 2007-11-05; 修订日期: 2008-09-17

基金项目: 上海市科委基础研究重点基金资助项目(02DJ14043)

作者简介: 李朝振(1978-)男, 山东菏泽人, 上海交通大学博士研究生

负荷、冷负荷和电负荷。

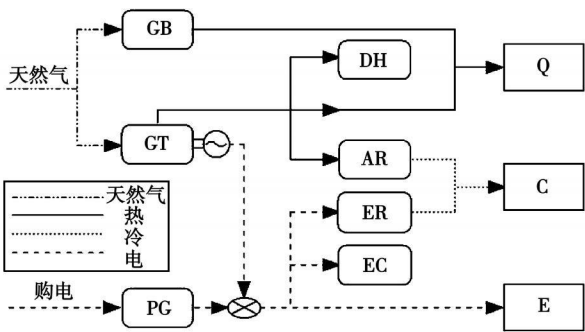


图 1 燃气轮机联供系统示意图

三联供系统的复杂性的主要原因是系统中对多的能源供需关系:同样的负荷可以由多个设备满足,一个设备可以产生多种能源,各设备与负荷之间不再是独立的关系。

2 优化模型

针对以上系统结构的 CCHP 系统建立优化模型,模型中包含 3 类变量,设计变量 x 和运行变量 y 、 z 。设计变量 x 包括设备容量、天然气最大订购量和最大购电量等,这类变量需要在设计阶段完成;运行变量表示各设备的各时段运行状态, y 表示连续运行变量, z 表示整型运行变量(表示设备开/停状态)。优化时,运行变量数量庞大,且和设计变量互相影响,关系复杂,本文采用集成优化方法对这两类变量同时进行优化。

2.1 目标函数

根据长期经济学的观点以年度化总费用为目标函数。目标函数为:

$$J = \min(CC + CO) \tag{1}$$

式中: CC —固定投资,包括年度化初投资(初投资折合到每一年)和年维护费用。该项费用表达见式(2)。

$$CC = \{ [R(1 - \nu) + i\nu] + \lambda \} \times \sum_f \gamma_f N_f \tag{2}$$

式中: ν —残值率; λ —系统设备年维修费用占初投资的比例; γ —设备单位容量初投资; N —设备容量; f —设备编号; R —投资回收系数。

$$R = i(1 + i)^n / \{ (1 + i)^n - 1 \} \tag{3}$$

式中: i —年利率; n —设备寿命,假设所有设备寿命相同。

式(1)中 CO 代表运行费用,表达式为:

$$CO = \sum_m T_m \sum_k (PG \times GV_{mk} + PP_{mk} \times PG_{mk}) \tag{4}$$

式中: m —季节; k —小时; T_m —每个季节的天数; PG —天然气价格; GV —天然气流量; PP —电价; PG —电量。

2.2 约束条件

约束条件包括设备约束和能量平衡约束。

设备约束:

$$\left. \begin{aligned} OP_{fmk} &= \eta(x) \times IP_{fmk} + \delta_{fmk} \times \mu(x) \\ 0 \leq OP_{fmk} &\leq N_f \times \delta_{fmk} \\ \delta_{fmk} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中: OP —设备输出功率; IP —输入能量; η 、 μ —设备特征参数; δ —设备开启/停止状态的二进制变量。

能量平衡约束:

$$A \times Y_{mk} = D_{mk} \tag{6}$$

式中: A —系统特性常数组成的矩阵; Y_{mk} —运行变量组成的矩阵; D_{mk} —冷热电负荷组成的矩阵。等式的实际意义为各时段系统能源供给等于负荷需求,等式左端代表各时段系统能源的供给,右端为各时段负荷需求。

式(1)~式(6)组成了 CCHP 系统的混合整型非线性优化(MINLP)集成优化模型,另外以上所有变量均不小于零。经过线性化处理可以消去模型中的非线性项^[8],然后采用分支定界法求解。

3 计算实例

3.1 建筑负荷

以上海市某宾馆为例,以 3 个代表日负荷曲线分别代表 3 个季节(夏季、冬季和过渡季节)的建筑负荷,3 个代表日的负荷曲线如图 2 所示。定义热电比为年总热负荷与年总电负荷之比,冷电比为年总冷负荷与年总电负荷之比,该宾馆负荷的热电比和冷电比分别为 1.1 和 1.15。

在天然气价格等单因素常数的灵敏度分析中,只需直接给出不同的数值即可,灵敏度分析中获得不同参数对应的负荷数据要复杂一些。文献[7]中,以某宾馆负荷数据为基础,假设冷、热负荷之比为常数,减少一个独立变化负荷;同时假设不同工况下负荷曲线趋势不变,通过给定的不同的最大负荷可以反算出相应代表日的所有负荷值。本文采用类似的方法获得不同参数的负荷,但由于研究目的不同采用的负荷参数和假设有所不同。本文研究不同负荷结构对三联供系统优化配置的影响,并主要考虑气候对负荷结构的影响;因此采用负荷参数为冷电比和热电比,考虑到电负荷(不包括空调用电)基本不受气候影响,假设电负荷保持不变;同时假设负荷曲

线趋势不变, 给定热电比和冷电比则可以根据已知宾馆负荷计算出相应的代表日的所有负荷值。

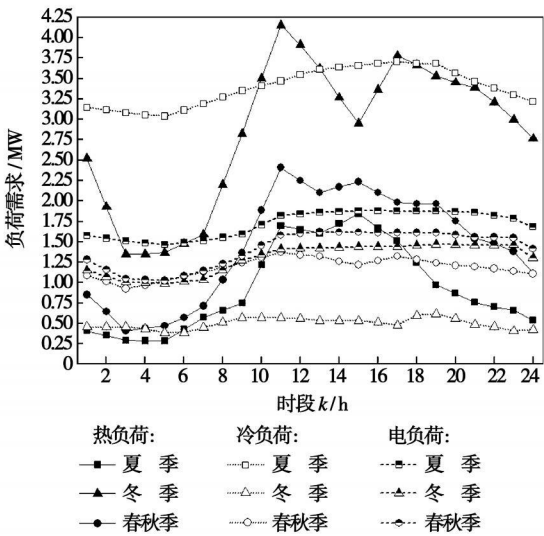


图 2 宾馆逐时负荷需求

3.2 系统参数

表 1 为所取的设备性能参数和设备单位容量价格, η_{GT} 、 η_{RE} 分别为燃气轮机的发电效率和余热回收效率。计算年度初投资时设所有设备的使用年限为 15 年, 年利率为 5%, 残值率为零; 设备的维护费占其初投资的 3%^[9]。

上海地区单一制分时电价为: 6~21 时为峰时, 电价为 0.964 元/(kWh); 22~次日 5 时为谷时, 电价为 0.435 元/(kWh)。气价为 1.8 元/m³, 天然气热值取 35.2 MJ/m³。

表 1 设备性能特征、单位初投资^[8]

设备	效率	$\gamma/\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}$
GT	η_{GT}	0.27
	η_{RE}	0.48
GB	η_{GB}	0.90
AR	COP_{AR}	0.70
ER	COP_{ER}	4.5
DH	—	—
		450

3.3 算例

宾馆负荷的热电比和冷电比分别记为 HP_0 、 CP_0 。根据 3.1 节中的说明, 所有宾馆热负荷值都乘以因子 HP/HP_0 , 所有宾馆冷负荷值都乘以因子 CP/CP_0 , 则可以得到热电比 HP 和冷电比 CP 时的负荷, 将这些负荷输入优化模型, 即可以计算出该热电比和冷电比下的系统最优配置。一个二维数对

(HP, CP) 对应一个算例, 本文对热电比 HP 和冷电比 CP 分别按等比数列取 5 个数值 {0.25, 0.5, 1, 2, 4}, 则对应 25 个算例。

4 优化结果及分析

对 25 个算例计算后, 每个设备有 25 个最优值。25 个优化值对应 HP 和 CP 组成的二维平面中的 25 个点。进一步将结果直观化, 根据 25 个点的数据, 利用线性插值法在 $0.25 \leq HP \leq 4, 0.25 \leq CP \leq 4$ 的二维平面区域内获得各个设备的等值曲线图^[7]。

4.1 燃气轮机

燃气轮机是 CCHP 系统中的核心设备, 其配置容量对系统性能有决定性的影响。为了分析燃气轮机和最大电负荷的关系, 将优化的燃气轮机容量除以最大电负荷进行无量纲化。25 算例对应的燃气轮机无量纲容量如表 2 所示。

表 2 燃气轮机无量纲容量

CP/HP	0.25	0.5	1	2	4
4	1.47	1.35	1.39	1.58	1.94
2	1.27	1.05	1.06	0.99	1.47
1	0.99	0.95	0.97	1.05	1.12
0.5	0.71	0.88	0.92	1.00	1.06
0.25	0.55	0.87	0.89	0.96	1.02

根据表 2 中的数据, 利用线性插分得到图 3 所示的燃气轮机无量纲容量等值线图, 纵横坐标变化范围均为 [0.25, 4]。

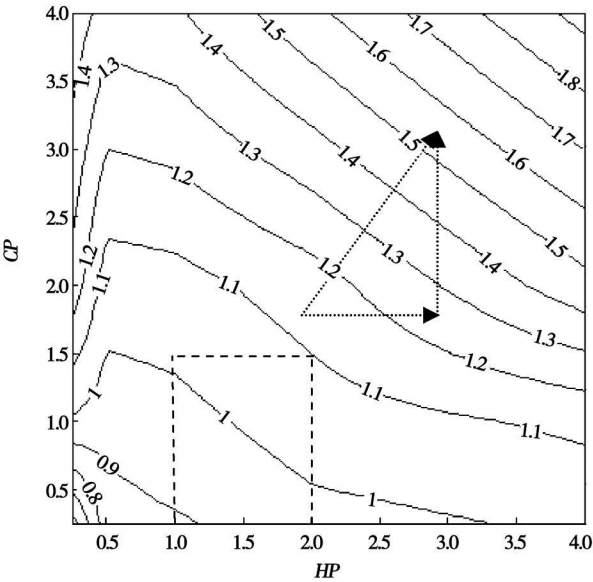


图 3 燃气轮机无量纲最佳容量等值线分布

从图 3 可以看出:在 HP 较小时,燃气轮机容量等值线分布较密,说明热负荷较小时燃气轮机容量随负荷的变化比较剧烈。在 $HP < 0.5$ 、 $CP > 1.0$ 时,设备容量随着热电比的增加而减小,其它情况下设备容量均随冷电比、热电比的增加而增加。在 $HP < 0.5$ 、 $CP < 1.0$ 时,等值线较密,燃气轮机容量随冷热负荷的增加而迅速增加;说明在电负荷比例较大时,燃气轮机最佳容量更多地受到冷热负荷的影响。在大多数情况下,冷电负荷比对燃气轮机优化配置容量的影响要大于热电负荷比的影响,这与冷量的能量品位较高相关。如图 3 中容量等值线的梯度三角形所示,冷电比分量约是热电比分量的 1.4 倍,和系统中余热供热的效率是余热供冷效率的 1.4 倍相对应。

梯度沿 HP 、 CP 的分量都不等于零,说明燃气轮机最佳容量是由建筑的热电比和冷电比共同决定的。假如根据一种负荷来确定燃气轮机的容量(比如以电定热),就无法得到燃气轮机的最佳容量,配置结果也就很难充分发挥 CCHP 系统的优势。由图 3 可以看出,只有在特定的负荷范围内,如图中虚线所示的范围($1 < HP < 2$ 、 $0.25 < CP < 1.5$),燃气轮机最佳容量才大致等于用户的最大电负荷。

4.2 吸收式制冷机

吸收式制冷机利用燃气轮机提供的余热制冷,与电制冷机共同满足建筑冷负荷需求。同 4.1 节,可以得到吸收式制冷机最佳配置容量的等值线图,如图 4 所示。

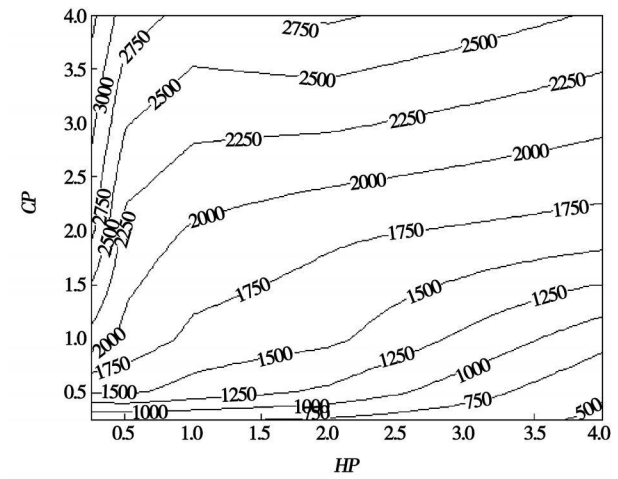


图 4 吸收式制冷机最佳容量等值线分布(kW)

由图 4 可见,在一个小区域内($HP < 0.5$ 、 $CP > 1$),吸收式制冷机容量随 HP 的增大而减小,此时设

备容量主要受热负荷的影响。其它区域内,吸收式制冷机容量随着热电比的增大而减小,随着冷电比的增大而增大,其配置容量主要取决于建筑冷负荷。

4.3 锅炉和电制冷机

锅炉优化配置容量的等值线分布如图 5 所示,图 6 表示电制冷机配置容量的等值线分布。由图 5 可见,锅炉的优化配置容量主要和热负荷有关,在热电比大于 1 时这个特征尤为明显,其配置容量随热电比的增大而增大;热电比较小时($HP < 1$),对应锅炉容量及变化幅度均较小,且变化规律不明显;这是由于此时燃气轮机余热相对较多、对锅炉单独供热的需求量较小所致。由图 6 可知,电制冷机的优化配置容量主要取决于冷负荷,其配置容量随冷电比的增加而增加。相对于电制冷机,吸收式制冷机利用余热制冷,所以吸收式制冷机的优化配置容量受热电比的影响要大一些,如图 4 所示。

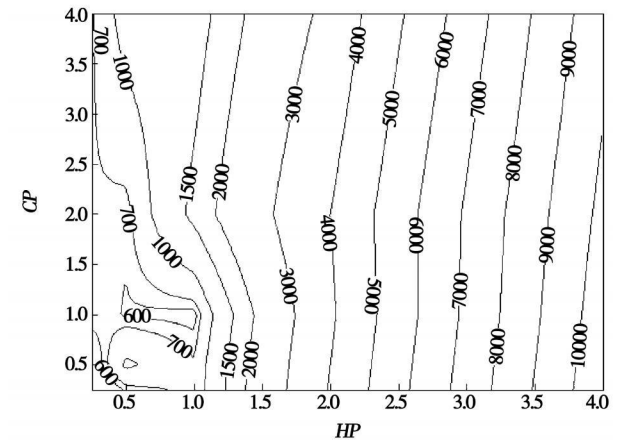


图 5 锅炉最佳容量等值线分布(kW)

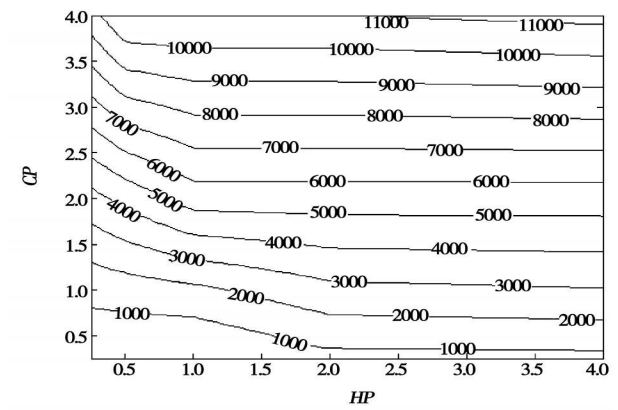


图 6 电制冷机最佳容量等值线分布(kW)

锅炉与电制冷机的优化配置容量随负荷的变化有特殊的规律,可以近似认为锅炉、电制冷机的优化

配置容量分别由热电比和冷电比确定(电负荷已知),根据优化结果,拟合得到如下关系式:

$$Q_{GB}=451.1HP^2+763.05HP+143.8 \quad (7)$$

$$Q_{ER}=2\,751.9CP-402.93 \quad (8)$$

式中: Q_{GB} —锅炉的最佳容量; Q_{ER} —电制冷机的优化配置容量, kW。

5 结 论

基于上海某宾馆的负荷数据,改变热电比和冷电比,对25个不同算例进行了计算。研究表明,联供系统中燃气轮机、余热型吸收式制冷机的优化配置容量受冷热电负荷的共同影响,仅根据单一负荷不能得到燃气轮机和吸收式制冷机的优化配置容量。因而通常的以热定电或以电定热模式不能充分发挥联供系统的优势。

随着热电比和冷电比的变化,燃气轮机的最佳容量在大幅度变化;在大部分情况下,冷负荷对燃气轮机配置容量的影响大于热负荷的影响。

锅炉和电制冷机的优化配置容量随负荷的变化规律较为简单,锅炉优化配置容量基本由热电比决定,而电制冷机优化配置容量基本由冷电比决定。

本文的结论对三联供系统在不同气候地区的推

广有借鉴意义;但是对不同建筑类型以及内扰负荷的影响需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘莉,黄锦涛,丰镇平. 100 kW 微型燃气轮机冷热电联产的经济性分析[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(6): 909—912
- [2] SALEM S, BORGHETTI S, TIOMNO T. Economic potential of natural gas-fired cogeneration in Brazil: two case Studies[J]. Applied Energy, 67(3): 245—263.
- [3] ZHANG BEIHONG, LONG WEI DING. An optimal sizing method for cogeneration plants[J]. Energy and Buildings 2005, 38: 189—195
- [4] 罗勇,尤占平,胡定科. 楼宇级冷热电联产的技术经济分析[J]. 暖通空调, 2005, 35(7): 47—49.
- [5] 冯志兵,金红光. 燃气轮机冷热电联产技术与经济性分析[J]. 热能动力工程, 2005, 20(4): 425—429.
- [6] KAZUKI TAKAHASHI, TADASHI ISHIZAKA. Application of information theory for the analysis of cogeneration system performance[J]. Applied energy, 1998, 61: 147—162
- [7] GAMOU S, YOKOYAMA R, ITO K. Parametric study on economic feasibility of microturbine cogeneration systems by an optimization approach[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127: 390—396.
- [8] 李赞,黄兴华. 冷热电三联供系统配置与运行策略的优化[J]. 动力工程, 2006, 26(6): 894—898.
- [9] 张士杰,李宇红,叶大均. 燃机热电冷联供自备电站优化配置研究[J]. 中国动力工程学报 2004, 24(10): 183—188

(编辑 董 斌)

新技术、新工艺

DLE 燃烧技术应用到可变负荷的压缩机装置

据《Gas Turbine World》2008年3~4月号报道,通过优化并协调其标准的DLE(干低排放)燃烧室和发动机控制系统,在英格兰的Siemens Industrial Turbomachinery正在把干低排放运行扩大到在减少负荷下的压缩机驱动装置。

燃烧管线质量的天然气燃料,这些最新的DLE装置已被证明在部分负荷试验条件下可以明显减少排放。

NO_x 排放: 在100%全负荷下,略微超过12 mg/kg; 在50%部分负荷输出功率下,增加到小于20 mg/kg NO_x 。

CO 排放: 在100%全负荷下,可忽略不计,接近零; 在50%部分负荷输出功率下,增加到小于10 mg/kg CO。

NO_x 与火焰温度的关系: 由于 NO_x 量随火焰温度成指数增加,重要的是空气和燃料要恰当地混合,这导致贫燃燃烧; 在燃烧室内的局部最大火焰温度约为1 600~1 635 °C,从而减少了初始的 NO_x 产生。

部分负荷是常规性的: 对于管线压缩机装置,部分负荷运行是经常遇到的,所以能够在宽广范围的负荷和环境条件下运行是极为重要的。因此,在压缩机驱动装置上采用干低排放燃烧技术尤为迫切。

(吉桂明 供稿)

负荷结构对冷热电联供系统优化配置的影响= **Influence of Load composition on the Optimized Configuration of a Combined Cooling, Heating and Power (CCHP) Cogeneration System** [刊, 汉] / LI Zhao-zhen, SHI Yu-mei, HUANG Xing-hua (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 606 ~ 610

Being a factor specific to the optimization of a cogeneration system, load composition exercises a major influence on the configuration mechanism of the system in question. The research in this regard will be certainly beneficial to the proper popularization of this technology in China. The authors have established a nonlinear integrated optimization model of mixed integer type for the cogeneration system featuring a simultaneous supply of cooling, heating and electrical power. Several specific cases were calculated at different load proportions based on the loads actually measured from a hotel. The influence of heating/ electric power ratio and cooling/ electric power ratio on the optimal capacity of various equipment items was examined by making use of a sensitivity analysis. The results of the study show that at different load make-ups, the optimal capacity of the equipment items and its variation tendency undergo significant changes. It is difficult for the currently prevalent operating modes, namely heating production determination on the basis of electric power generation or electric power generation determination on the basis of heating requirements, to decide the optimal capacity of a gas turbine. The optimal capacity of an absorption type refrigerator is also influenced by various load settings. The optimal capacity of a boiler and an electric refrigerator may be approximately determined respectively and separately by heating/ electric power ratio and cooling/ electric power ratio. The research results can serve as a reference for the popularization of the cogeneration system (simultaneous supply of heating, cooling and electric power) in various climatic regions. **Key words:** combined supply of cooling, heating and electric power; load ratio; sensitivity analysis; configuration optimization; gas turbine

联合循环机组在线性能试验软件开发与应用= **Development and Application of an On-line Performance Test Software for Combined Cycle Units** [刊, 汉] / GAO Jian-qiang, FAN Xiao-ying, ZHAO Jun-you (College of Energy Source and Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 611 ~ 614

On the basis of the real-time data acquired by a distributed control system (DCS), given were all the process parameters necessary for an on-line performance test along with the description of a method for calculating the main thermodynamic performance indexes of a combined cycle unit, namely, its gross power output and total heat rate etc. Based on an integrated modular model software (IMMS) and by adopting a modular modeling method, an on-line model for calculating the thermodynamic performance indexes was established. Moreover, through an user interface program, the calculated results were real-time displayed. The software in question has been applied in the plant-level supervisory information system (SIS) of a 395 MW gas-steam combined cycle unit in a power plant. The results show that the software can meet the requirement for an on-site real-time monitoring, thus facilitating relevant operating personnel to timely grasp and analyze the operation cost-effectiveness of the unit. **Key words:** combined cycle; performance calculation; on-line model; condition monitoring

微型燃气轮机冷热电联供系统变工况性能研究= **A Study of the Off-design Performance of a Micro Gas Turbine-based Combined Cooling, Heating and Power (CCHP) Cogeneration System** [刊, 汉] / HE Bin-bin, YANG Yong-ping, DUAN Li-qiang (Beijing City Key Laboratory on Safe and Clean Utilization of Energy Sources and Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, College of Energy Source and Power Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 615 ~ 619

A micro gas turbine-based combined cooling, heating and power (CCHP) cogeneration system has been designed and a model for analyzing the off-design performance of the system, established. In combination with specific calculation cases, an analytic computation has been performed of the thermodynamic performance of the system in question operating at an