

基于 TRNSYS 的太阳能-天然气冷热电三联供最优配比研究

于水,常忠浩,杨江辉

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 建立太阳能-天然气冷热电三联供高效能源耦合系统,并且求出在实际工况下的太阳能天然气最优耦合比例。方法 应用 DeST 软件对典型办公楼建筑进行动态负荷计算,根据计算所得负荷选择合适机组,并在 Trnsys 中建立冬季与夏季的机组仿真模型。在保证机组实际运行工况条件下,以制冷机组效率为目标函数,根据非线性规划和遗传算法,求得最优耦合比例。结果 求解得到当太阳能所占份额为 0.25 时,机组能源利用效率达到最大值 0.696。当太阳能与天然气的耦合比例为 1:3 时,机组能源效率达到最大。结论 在太阳能-天然气冷热电三联供系统中太阳能所占比例会影响到机组的能源利用效率。

关键词 DeST;TRNSYS;冷热电三联供系统;遗传算法

中图分类号 TU83;TU99 文献标志码 A

Optimal Ratio of Solar-Gas Cooling, Heating and Power Triple Supply Based on TRNSYS

YU Shui, CHANG Zhonghao, YANG Jianghui

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to establish a high-efficiency energy coupling system of solar-natural gas cold, heat and power, dynamic load of a typical office building is calculated to find the optimal coupling ratio between solar and natural gas under actual operating conditions by DeST software. A appropriate unit is selected based on the calculated load, and a simulation model of winter and summer unit is established in Trnsys. Under ensuring the actual operating conditions of the unit, the cooling unit efficiency is taken as the objective function to find the optimal coupling ratio based on nonlinear programming and genetic algorithms. When the solar energy share is 0.25, the unit's energy utilization efficiency reaches a maximum of 0.696. When the coupling ratio of solar energy and natural gas is 1:3, the energy efficiency of the unit reaches the maximum. So in a solar-natural gas combined heat and power system The proportion of solar energy will affect the energy

收稿日期:2019-10-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0604000)

作者简介:于水(1983—),女,教授,博士,主要从建筑节能方面研究。

efficiency of the unit.

Key words: DeSt; TRNSYS; cold, heat and power triple supply system; genetic algorithm

冷热电三联供系统(Combined Cooling Heating and Power System, CCHP)是指以天然气为主要燃料的发电装置或发电设备在发电的同时,不仅满足用户的电需求,还能将排放的大量余热进行回收并继续利用相关的设备向热用户或者冷用户提供热量以及冷量。沈岑等^[1]采用 PCA-AHP 法将主观因素与客观因素相结合,通过不同的配置方案进行研究,克服了传统层次分析法的缺陷。王江江等^[2]研究了单一供冷情况下的冷热电三联供,分析了系统不同工况下的热力学性能。A. Lorestani 等^[3]以经济性为目标函数,通过改进粒子群算法,求出效益最好的太阳能天然气冷热电三联供结合方式。但是研究仅仅分析了太阳能与天然气宏观方面的耦合问题^[4-10],并未涉及太阳能与天然气的具体工程最优配比。笔者通过对典型办公建筑的负荷计算,建立了太阳能-天然气的冷热电三联供系统,并且以机组效率为目标函数获得了太阳能与天然气的最优配比。

1 建立仿真优化模型

1.1 仿真模型

建立夏季制冷系统^[11-15]如图1所示。由图1可知该系统主要由燃气轮机、热水型单效式溴化锂吸收式制冷机、余热锅炉和太阳能平板集热器和冷却塔等模块组成。整个系统分为两条供能路线,一部分是由燃气轮机产生的余热,通过余热锅炉回收产生热水;另一部分由平板式太阳能集热器产生热水。太阳能平板集热器的启停由自控模块控制。当光照不充足时,太阳能集热器出口温度低于 20℃,自控模块控制水泵减少集热器出水口出水量,增加余热锅炉的出水量,以保证用户端的冷量供应。两部分通过三通器以后作为混合热水通入单效式热水型吸收式溴化

锂制冷机的发生器中,其中冷却水通过冷却塔循环回到制冷机组的吸收器中,蒸发器中的冷冻水用于满足负荷侧的冷负荷需求。

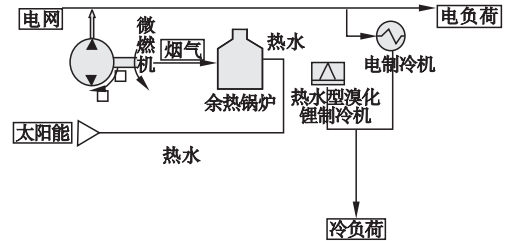


图1 夏季制冷系统

Fig. 1 Insummer refrigeration system diagram

建立冬季供暖系统如图2所示。由图2可知,该系统主要由太阳能集热器,燃气轮机,余热锅炉和换热器等模块组成。整体构造与夏季制冷系统类似,其中太阳能集热器和余热锅炉产生的热水通过三通器以后作为混合热水通入平板换热器的一次侧,经过换热以后的热水由二次侧供给用户的热负荷需求。在制冷季节机组不变的情况下模拟采暖季节在此工况下能否正常运行。

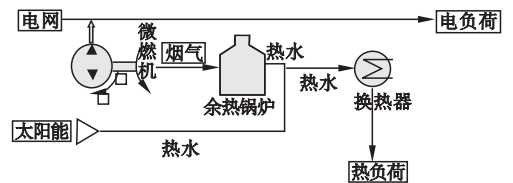


图2 冬季供热系统

Fig. 2 In winter heating system diagram

1.2 目标函数

能源利用效率^[16-19]为用户侧获得的能量比上消耗的太阳能与天然气能量之和。

$$\eta = \frac{W_{\text{useful}}}{W_{\text{solar}} + W_{\text{gas}}} \quad (1)$$

式中: η 为能源利用效率; W_{useful} 为用户侧获得能量; W_{solar} 为消耗太阳能的能量; W_{gas} 为消耗天然气的能量。

1.3 约束条件

为定量分析太阳能与天然气的配比,定

义太阳能份额与天然气份额。

太阳能份额:

$$R_s = \frac{Q_{sol,v}}{Q_{sol,v} + Q_{ng,n}} \quad (2)$$

天然气的份额:

$$R_n = \frac{Q_{ng,v}}{Q_{sol,n} + Q_{ng,n}} \quad (3)$$

式中: R_s 、 R_n 为太阳能、天然气份额; $Q_{sol,v}$ 、 $Q_{ng,v}$ 为变工况下输入的太阳能与天然气, kW; $Q_{sol,n}$ 、 $Q_{ng,n}$ 为设计工况下输入的太阳能与天然气能, kW。

确定用户侧获得的能量,使太阳能集热器面积在 $0 \sim 580 \text{ m}^2$ 内变化,对应太阳能份额变化为 $0.1 \sim 0.6$ 。因为当太阳能份额大于 0.6 时无法维持机组的正常运行,所以笔者设计太阳能变化范围小于 0.6 。

电量平衡:燃气轮机总发电量等于供给电网的电量,设备辅机耗电量以及用户所需电量之和。

$$E_{GT}(k) = E_{send}(k) + E^a(k) + E^d(k) \quad (4)$$

式中: E_{GT} 为燃气轮机的发电量, kW; E_{send} 为燃气轮机供给电网的电量, kW; E^a 为辅助机的耗电量, kW; E^d 为用户电量需求, kW。

烟气热量平衡:燃气轮机排烟废热可回收量等于溴化锂吸收式制冷机总耗热量与多余废弃热量之和。

$$Q_{GT}(k) = Q_R^{sh}(k) + Q_R^{xc}(k) + Q_{RD}(k) \quad (5)$$

式中: Q_{GT} 为燃气轮机的排烟废热可回收量, kW; Q_R^{sh} 为余热回收利用烟气热量, kW; Q_R^{xc} 为供冷利用烟气热量, kW; Q_{RD} 为多余废弃热量, kW。

天然气消耗量平衡^[5]:天然气消耗总量等于燃气轮机消耗量。

$$F_{gas}(k) = F_{GT}(k) \quad (6)$$

式中: F_{gas} 为天然气消耗总量, m^3 ; F_{GT} 为燃气轮机消耗天然气的量, m^3 。

供热量平衡:燃气轮机排烟废热回收量与太阳能吸收的能量等于用户所需热量。

$$Q_R^h(k) + Q_{solar}^h(k) = Q^{hd}(k) \quad (7)$$

式中: Q_R^h 为燃气轮机废热回收量, kW; Q_{solar}^h

为太阳能吸收热量, kW; Q^{hd} 为用户所需热量, kW。

供冷量平衡:吸收式制冷机的制冷量等于用户所需冷量。

$$Q_R^c(k) = Q^d(k) \quad (8)$$

式中: Q_R^c 为吸收式制冷的制冷量, kW; Q^d 为用户所需冷量, kW。

2 工程实例

笔者以沈阳市某办公区为研究对象,该办公区占地面积约为 $2\,000 \text{ m}^2$,以一栋典型办公楼为例计算能耗,估算整个区域内用能特点和能量。

2.1 负荷分析

使用 DeST-c 建立建筑模型,通过模拟计算得到该办公楼建筑全年的逐时冷热负荷(见图3),图3中负数值表示冷负荷。

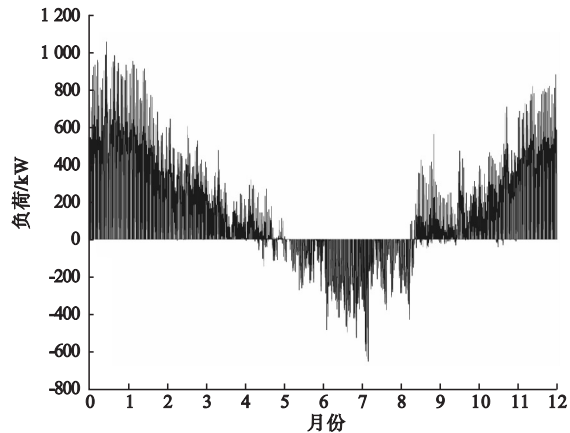


图3 全年逐时冷热负荷

Fig. 3 Year-round hot and cold load

因为过渡季节的冷热负荷并不典型,所以忽略过渡季节的影响,着重分析夏冬两季的能耗,其中全年中最大的热负荷达到 $1\,051.86 \text{ kW}$,最大冷负荷达到 -652.01 kW ,全年累计热负荷为 $1\,107\,553.61 \text{ kW}$,全年累计冷负荷为 $-229\,242.34 \text{ kW}$ 。

2.2 设备选型

根据全年最大的热负荷 $1\,051.86 \text{ kW}$ 和最大冷负荷 652.01 kW 进行设备选型,设备基本参数如表1所示。

表1 设备基本参数

Table 1 Basic parameters of equipment

溴化锂吸收式制冷机额定功率/kW	微燃机额定功率/kW	太阳能集热器面积/m ²	余热锅炉额定功率/kW	板式换热器效率
488	788	580	263	0.95

2.3 搭建仿真平台

2.3.1 运行策略

沈阳属于严寒地区,冬季太阳能资源并不丰富,难以满足用户的基本需求,笔者以满

足夏季制冷为主来设计夏季制冷系统(见图4),求出最优的太阳能与天然气的配比,然后根据此配比建立冬季供暖系统(见图5),校验冬季供暖是否满足条件。

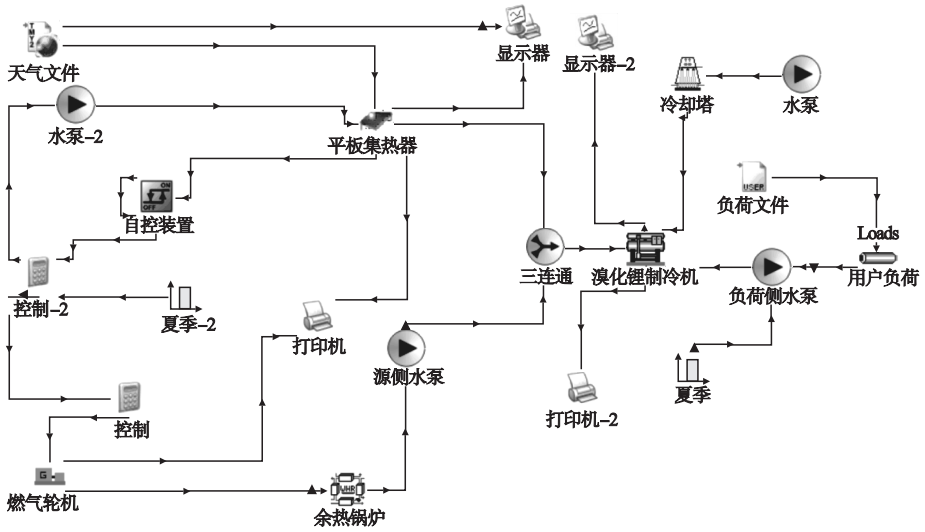


图4 夏季制冷仿真系统

Fig. 4 In summer refrigeration simulation system

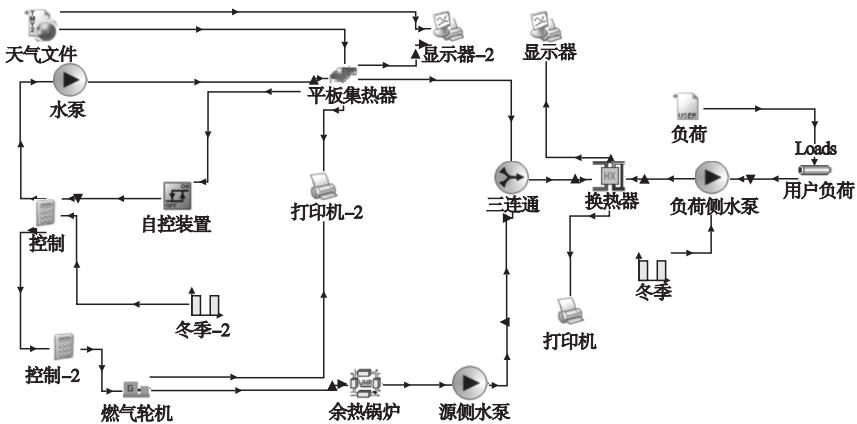


图5 冬季供暖仿真系统

Fig. 5 In winter heating simulation system

在改变每一次配比关系的同时验证溴化锂制冷机组在夏季制冷季节蒸发器出水后温度与发生器入水口温度数值是否高于最低温

度 85 ℃ 和 7 ℃。

在 TRNSYS 中将计算出的建筑物逐时冷热负荷编写入系统模型之中,模拟计算在全

生命周期内单效式热水型溴化锂制冷机组源侧的温度,冷冻水的出口温度变化的情况,针对该系统运行效率进行分析计算。笔者选取太阳能所占份额为0.3时建立夏季制冷与冬季供暖系统来进行典型案例分析。

2.3.2 溴化锂机组出入水口温度

图6为进入溴化锂制冷机组发生器的热水温度在88℃左右。因为设备基本参数规定进入制冷机组的热水温度大于85℃时制冷机可以正常运行,并且可以保证供冷量。所以热水的温度满足制冷机运行温度。同时得到溴化锂机组从蒸发器出来的冷冻水温度稳定在7.48℃,满足用户端的制冷需求。

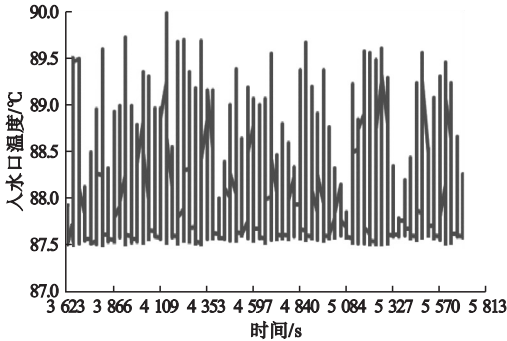


图6 发生器入水口温度

Fig. 6 Inlet temperature of generator

在冬季供暖仿真系统中集热器和余热锅炉产生的热水通过三通阀后作为混合热水通入平板换热器的一次侧,经过换热后的热水由二次侧供给用户的热负荷需求。在制冷季节机组不变的情况下模拟采暖季节在此工况下的运行良好。

2.4 优化计算

2.4.1 曲线拟合

将式(1)至式(8)中计算目标函数在约束条件下的取值。取太阳能份额为0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6进行求解,即对应的天然气份额在0.9~0.4变化,始终满足两者份额和为1。

图7为能源利用效率。将得到的数据运用三次多项式拟合,其中 $R^2 = 0.8$,拟合效果

良好。能源利用效率可由拟合的三次多项式表示为

$$y = 0.778 3x^3 - 1.122 8x^2 + 0.408 5x + 0.652. \quad (9)$$

式中: y 为机组能源利用效率; x 为太阳能所占份额($0.1 < x < 0.6$)。

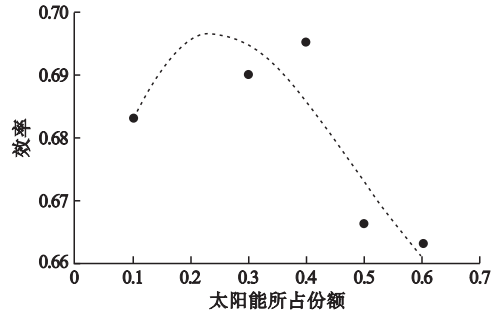


图7 能源利用效率

Fig. 7 Energy efficiency

2.4.2 遗传算法求解最优配比

将三次多项式带入编写好的MATLAB程序中,由遗传算法^[20]求出的最大值即当太阳能份额0.25时,机组能源利用效率达到0.696,将此时得出的配比带入供暖仿真系统进行验证,换热器一次侧的温度在81℃左右,二次侧的温度在61℃左右,可知换热效果良好。

3 结论

(1)通过遗传算法求解模型得出当太阳能所占份额为0.25时,机组能源利用效率达到最大值0.696。确定了在此工况下的能源系统中太阳能与天然气的最优配比为1:3。

(2)在太阳能-天然气冷热电三联供系统中太阳能与天然气份额的变化会影响制冷机组的效率,所以确定合理的配比关系可以提高机组的效率。

参考文献

- [1] 沈岑,凌莉,王巍巍,等.基于PCA-AHP法的CCHP系统综合评价模型[J].煤气与热力,2013,33(9):25-29.
(SHEN Cen, LING Li, WANG Weiwei, et al. Comprehensive evaluation model of CCHP

- system based on PCA-AHP[J]. Gas and heat, 2013, 33(9): 25-29.)
- [2] 王江江,杨颖. 基于太阳能利用的天然气冷热电联供系统热力性能研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(5): 111-117.
(WANG Jiangjiang, YANG Ying. Research on thermal performance of natural gas combined heat and power system based on solar energy utilization [J]. Journal of engineering for thermal energy and power, 2017, 32(5): 111-117.)
- [3] LORESTTANI A, ARDEHALI M M. Optimal integration of renewable energy source for autonomous tri-generation combined cooling, heating and power system based on evolutionary particle swarm optimization algorithm[J]. Energy, 2018, 145: 839-855.
- [4] 王蓁. 太阳能供暖系统与冷热电三联供系统的互补研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
(WANG Qian. Research on the combined cooling heating and power system and solar heating complementary [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.)
- [5] 田静宜. 分布式综合能源系统视角下的区域能源规划模式初探[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
(TIAN Jingyi. A preliminary exploration of regional energy planning model from the perspective of distributed integrated energy system [D]. Shanghai: Fudan University, 2013.)
- [6] 王凯. 冷热电三联供系统联合优化关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
(WANG Kai. Research on key technologies of joint optimization for CCHP system [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.)
- [7] 施晓丽. 基于可再生能源的冷热电联供系统模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
(SHI Xiaoli. The CCHP system simulation based on renewable energy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.)
- [8] 高茜. 冷热电三联供方案可行性及技术经济分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.
(GAO Qian. CHP project feasibility and the technical and economic analysis [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.)
- [9] 谈孜超. 分布式冷热电三联供系统集成优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
(TAN Zichao. Integrated optimization research on distributed cooling heating and power system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.)
- [10] 陈江娜. 建筑冷热电联供系统容量配置方案研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
(CHEN Jiangna. The research on schemes of capacity' selection of building cooling heating and power system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [11] 安圣才. 用于办公楼建筑的分布式能源系统方案研究及评价分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
(AN Shengcai. Scheme research and evaluation analysis of the distributed energy system used in office Building [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.)
- [12] 夏宏伟. 冷热电三联供耦合多能源系统配置和运行优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
(XIA Hongwei. Study on the configuration and operation optimization of combined cooling, heating and power coupling multiple energy system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.)
- [13] 孙鹏, 由世俊, 张欢等. 三联供系统中综合性评价方法的应用研究[J]. 热能动力工程, 2015, 30(2): 187-192.
(SUN Peng, YOU Shijun, ZHANG Huan, et al. Application research on comprehensive performance evaluation method in trigeneration system [J]. Journal of engineering for thermal energy and power, 2015, 30(2): 187-192.)
- [14] 胡燕飞, 吴静怡, 李胜. 冷热电联供系统的优化运行分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2010, 37(1): 5-9.
(HU Yanfei, WU Jingyi, LI Sheng. Optimal operation analysis of combined cooling heating and power (CCHP) system [J]. Journal of north China electric power university (natural science edition), 2010, 37(1): 5-9.)
- [15] 张涛, 朱彤, 陈上, 等. 多能源耦合系统的运行优化与改进分析[J]. 科学通报, 2017, 62(32): 3693-3702.
(ZHANG Tao, ZHU Tong, CHEN Shang, et al. Operation optimization and improvement analysis of multi-energy system [J]. Chinese science bulletin, 2017, 62(32): 3693-3702.)
- [16] WANG M, WANG J F, WANG L G, et al. Multi-objective optimization of a combined cooling, heating and power system driven by solar energy [J]. Energy conversion and management, 2015, 89: 289-297.
- [17] HOSSEIN Y, MOHAMMAD H G, YOUNES N. GA/ AHP-based optimal design of a hybrid CCHP system considering economy, energy and emission [J]. Energy and buildings, 2017, 138: 309-317.
- [18] 张晓明, 刘晓畅, 李洪波. 基于 Matlab/Simulink 的液压式风力致热系统仿真研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(1): 147-155.
(ZHANG Xiaoming, LIU Xiaochang, LI Hongbo. Simulation of hydraulic wind-heating system based on Matlab/Simulink [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(1): 147-155.)
- [19] LUO Z, WU Zi, LI Z Y, et al. A two-stage optimization and control for CCHP microgrid energy management [J]. Applied thermal engineering, 2017, 125: 513-522.
- [20] MARYAM F, AMIRHASSAN S. Solar assisted CCHP system, energetic, economic and environmental analysis, case study: educational office buildings [J]. Energy and buildings, 2017, 136: 100-109.
(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)