

生物质能驱动的 ORC 三联供系统的参数优化和综合分析

李子申¹, 李惟毅², 赵嘉玮¹, 单东雷¹

(1. 中国能源建设集团天津电力设计院有限公司, 天津 300400; 2. 天津大学中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 提出一种新型的由生物质能驱动的小型有机朗肯循环冷热电三联供系统(biomass-fuelled CCHP-ORC), 并对其进行参数优化、热力学分析和经济性分析。同时建立结构模型和数学模型, 选取玉米秸秆为燃料, 热水为导热介质, R245fa 为 ORC 系统循环工质。运用控制变量法, 分析系统在 4 种运行模式下(纯发电、热电联供 CHP、冷电联供 CCP、冷热电三联供 CCHP)单一变量蒸发温度对各性能参数的影响。比较得出蒸发温度处于 409 K 时系统各项性能参数表现最优, 最佳的运行模式依次为 CCHP、CCP、CHP 和纯发电模式; 随后经焓分析得出生物质锅炉焓损较大, 可进行相应的结构优化。系统在 CCHP 模式下经济性最优, 可持续发展指数 SI 最高。

关键词: 生物质能; 有机朗肯循环; 冷热电三联供; 控制变量法; 焓; 可持续发展指数

中图分类号: TK06

文献标志码: A

0 引 言

生物质能是仅次于煤炭、石油和天然气现居于世界能源消费总量第 4 位的能源, 亦属于国家重点支持推广的新型燃料。因其保有量大和热值高等特点, 更利于应用到实际工程中^[1]。生物质 ORC(有机朗肯循环)三联供是指 ORC 通过生物质能驱动, 同时实现发电、供热和供冷 3 种功能。李新禹等^[2]和王政伟等^[3]针对将生物质能应用于冷热电三联供系统的可行性进行了探讨; 王鹏鹏等^[4]对生物质能冷热电三联供进行了系统构架和能效研究, 得到不同运行策略下系统的能效特性。国内学者极少有对生物质能和 ORC 系统相结合的三联供系统进行研究。国外许多学者^[5-7]已有对小型 ORC 三联供系统的研究, 得到了其可行性以及对节能环保的重要性; Al-Sulaiman 等^[8]对由生物质锅炉驱动的 ORC 三联供进行了能量分析和焓分析, 得出其相对于单一 ORC 发电能源利用率和焓效率较高; Chinese 等^[9]旨在研究一种生物质驱动的多联供系统, 并对系统进行经济性和环保性分析。

本文通过研究一种由生物质能驱动的新型 CCHP-ORC 系统, 构建系统结构模型和数学模型, 应用控制变

量法分析系统在各模式下运行时, 蒸发温度对其性能参数以及经济性的影响; 此外通过焓分析和可持续发展指数 SI , 讨论其对环境的影响。

1 CCHP-ORC 系统介绍

采用热负荷为 1 MW 的 0.7 MPa 的生物质承压锅炉, 燃料为玉米秸秆。通过 Matlab 编程, 搭建小型生物质 ORC 三联供系统的热力学模型, 通过模拟分析有机工质蒸发温度在不同运行模式下对系统性能指标和环境的影响。锅炉额定出水压力 0.7 MPa, 出水温度为 160 °C, 运用控制变量法对其进行分析。

1.1 系统结构模型的构建

如图 1 所示, 该系统主要分为生物质锅炉、ORC 发电、供热和溴化锂吸收式制冷 4 部分。首先生物质燃料和空气一起进入生物质锅炉燃烧, 加热锅炉循环水; 随后经加热的高温高压循环水进入有机工质蒸发器, 加热有机工质使其蒸发, 工作后的低温低压循环水通过水泵加压, 送入生物质锅炉继续被加热从而完成生物质锅炉部分循环; 从有机工质蒸发器中出来的有机工质饱和蒸汽进入膨胀机带动发电机发电, 温度和压力降低后通过

三通阀实现供热和供冷比例的调节。系统的 T - S 图如图 2 所示,图中各点与图 1 对应。

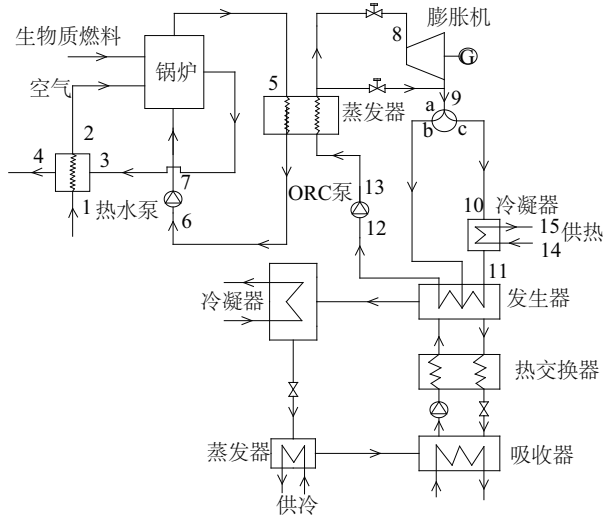


图 1 生物质能驱动的小型 ORC 三联供系统图

Fig. 1 Diagram of novel small-scale CCHP-ORC system driven by biomass

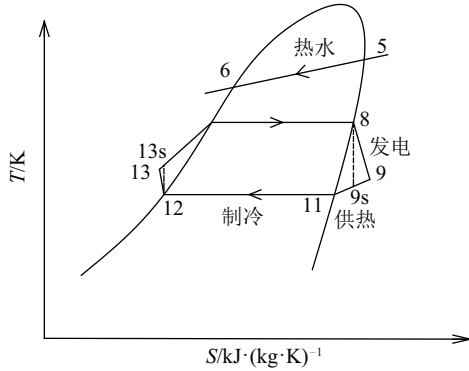


图 2 生物质驱动 ORC 三联供系统 T - S 图

Fig. 2 T - S diagram of ORC tri-generation system driven by biomass fuels

1.2 系统数学模型的构建

1.2.1 系统初始参数的设定和假设

为简化系统研究,本文假设:

1) 稳态运行,有机工质和循环热水物性参数不随温度变化,按常量处理;

2) 溴化锂吸收式制冷机组 COP 随发生器温度变化而变化,忽略溶液泵和阀门的做功损失;

3) 冷凝器冷却水进口温度为 25 °C,出口温度为 50 °C,常压;环境压力 101.3 kPa,环境温度 25 °C。

1.2.2 系统的热力学模型

生物质锅炉热负荷和低位发热量:

$$Q = 1 \text{ MW} \quad (1)$$

$$LHV = 17746 \text{ kJ/kg} \quad (2)$$

生物质消耗量:

$$q_{\text{biomass}} = \frac{Q}{LHV} \quad (3)$$

热水质量流量:

$$q_{\text{rs}} = \frac{Q \times \eta_{\text{boil}}}{c \times (t_5 - t_7)} \quad (4)$$

工质质量流量:

$$q_{\text{orc}} = \frac{q_{\text{rs}} \times c \times (t_5 - t_6) \times \eta_{\text{eva}}}{h_8 - h_{13}} \quad (5)$$

发电量:

$$W_{\text{el}} = q_{\text{orc}} \times (h_8 - h_9) \times \eta_{\text{turb}} \times \eta_{\text{gen}} \quad (6)$$

热水泵和有机工质泵耗功:

$$W_{\text{wp}} = \frac{q_{\text{rs}} \times c \times (t_{13} - t_{12})}{\eta_{\text{wp}}} \quad (7)$$

$$W_{\text{op}} = \frac{q_{\text{orc}} \times (h_{13} - h_{12})}{\eta_{\text{op}}} \quad (8)$$

净输出功:

$$W_{\text{net}} = W_{\text{el}} - W_{\text{wp}} - W_{\text{op}} \quad (9)$$

制热量:

$$Q_{\text{h}} = q_{\text{orc}} \times (h_9 - h_{11}) \quad (10)$$

机组理想性能系数 COP 的表达式为^[10]:

$$COP = \frac{T_{\text{g}} - T_{\text{c}}}{T_{\text{c}} - T_{\text{e}}} \times \frac{T_{\text{e}}}{T_{\text{g}}} \quad (11)$$

制冷量:

$$Q_{\text{c}} = Q_{\text{g}} \times COP \quad (12)$$

1.2.3 系统性能评价指标

热效率:

$$\eta_{\text{echp}} = (W_{\text{net}} + Q_{\text{h}} + Q_{\text{c}}) / Q \quad (13)$$

热量焓:

$$E_{\text{h}} = Q_{\text{h}} \times (1 - T_0 / T_{\text{h}}) \quad (14)$$

冷量焓:

$$E_{\text{c}} = Q_{\text{c}} \times (T_0 / T_{\text{eva}} - 1) \quad (15)$$

整个系统的输入焓即生物质燃料的化学焓,其计算方程式可按式(16)计算,其中, LHV_{mois} 定义如式(17)所示^[11]。

$$E_{\text{biomass}} = q_{\text{bio}} \times \beta \times LHV_{\text{mois}} \quad (16)$$

$$LHV_{\text{mois}} = [1 - \mu_{\text{m}} - H_{\text{u}}] \times LHV - 2500 H_{\text{u}} \quad (17)$$

式中, μ_{m} —— 矿物质含量,对于玉米秸秆取值 0.025^[11]; H_{u} —— 水分含量,取 0.061; LHV —— 燃料低位发热量,可查为 17746 kJ/kg。

在这里,定义 β 为^[11]:

$$\beta = \frac{1.0414 + 0.0177 \times \frac{[H]}{[C]} - 0.3328 \times \frac{[O]}{[C]} \times (1 + 0.0537 \times \frac{[O]}{[C]})}{1 - 0.4021 \times \frac{[O]}{[C]}} \quad (18)$$

可解得: $LHV_{\text{mois}} = 16067 \text{ kJ/kg}$, $\beta = 1.15$ 。

CCHP 模式下的烟效率可定义为:

$$\psi_{\text{cchp}} = (W_{\text{net}} + E_{\text{h}} + E_{\text{c}}) / E_{\text{biomass}} \quad (19)$$

系统不同运行模式下的当量发电成本:

$$Y_{\text{cchp}} = \frac{Y_{\text{biomass}}}{W_{\text{net}} + \alpha Q_{\text{c}} + \gamma Q_{\text{h}}} \quad (20)$$

其中, α 和 γ 用于衡量电量和冷量与热量之间的经济性差异, 由于三者经济地位不同, 因此引入 2 个系数对其当量发电成本进行分析, 其中 $\alpha = 0.8$, $\gamma = 0.5^{[12]}$ 。

为了提高环境的可持续发展性, 不仅需要更多地利用可再生能源和新能源, 还要提高非可再生能源的能源利用率, 从而使其对环境的破坏和影响程度降到最低。本文引入一个可持续发展系数 $SI^{[13-14]}$, 将系统烟和对环境的影响联系起来, 并通过增加 SI 的大小来优化系统并减小环境影响, 定义 SI 为:

$$SI = \frac{1}{D_{\text{p}}} \quad (21)$$

$$D_{\text{p}} = \frac{A_{\text{boiler}} + A_{\text{eva}} + A_{\text{turb}} + A_{\text{h}} + A_{\text{c}}}{E_{\text{biomass}}} \quad (22)$$

式中, D_{p} ——系统各主要部件烟损占系统输入烟的大小。

2 不同运行模式下系统的性能分析

本文使用 R245fa 有机工质, 通过改变系统蒸发温度来分析系统不同运行策略(纯电、热电联供(CHP)、冷电联供(CCP)、冷热电三联供(CCHP))下的各性能指标的变化。

2.1 蒸发温度对系统性能的影响

分析在不同模式下系统运行时, 蒸发温度对各参数的影响及其对环境的影响。为了使蒸发温度在一个较宽的范围内变化, 取热源温度为 433 K, ORC 泵入口温度为 358 K, 当蒸发温度在 373 ~ 423 K 范围内变化时对系统进行研究分析。由图 3 可知, 随着蒸发温度的升高, 热水质量流量逐渐增大, 且增速越来越快, 而有机工质 R245fa 质量流量先减小后增大, 最小值在 409 K 处, 约为 19 kg/h。这主要是因为热源温度不变, 随着蒸发温度的升高, 热平衡锅炉回水温度升高, 而锅炉热负荷 1 MW 条件不变, 致使热水质量流量逐渐增大, 从 12.6 kg/h 增加到 44.8 kg/h; 对于工质 R245fa, 蒸发温度升高, 蒸

发器出口工质焓值增加, 在 ORC 泵入口温度不变的情况下, R245fa 质量流量先减小后增大。当蒸发温度为 407 K 时, 两者质量流量相等。

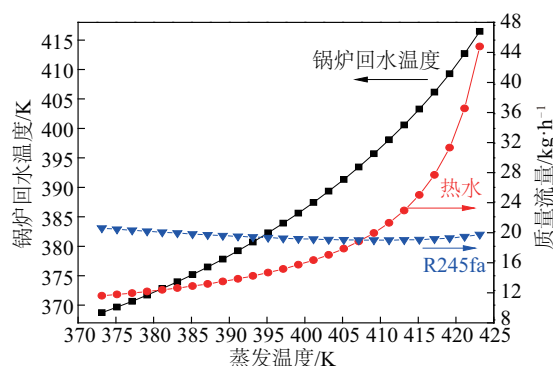


图3 锅炉回水温度和工质质量流量随蒸发温度的变化关系

Fig. 3 Relationship of return water temperature and working fluids mass with changing evaporation temperature

从图 4 可看出, 随着蒸发温度的升高, 净输出功率逐渐增加, 最大值在最大蒸发温度下取得, 约为 66 kW; 制热量随蒸发温度的升高先增大后减小, 存在一个最佳蒸发温度, 使系统制热量最大, 约为 403 K, 相应的最大制热量约为 53 kW; 对于制冷量恰好与制热量相反, 随着蒸发温度的升高先减小后增大, 最小制冷量在 409 K 处, 约为 540 kW。最大制冷量在最低蒸发温度 373 K 处, 约为 586 kW。出现图 4 趋势的主要原因是由于蒸发温度改变有机工质流量和其对焓值有所影响。

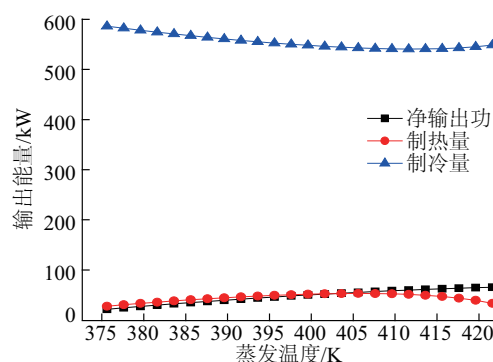


图4 系统输出能量随蒸发温度的变化关系

Fig. 4 Relationship of output energy with changing evaporation temperature

图 5 是不同模式下系统热效率随蒸发温度的变化关系。随着蒸发温度的升高, 系统在纯电发电模式下的热效率从 2% 逐渐增至 6.6%; 在 CCP 模式下, 系统热效率先减小后增大, 最大热效率在最大蒸发温度 423 K 处, 约为 62.8%; 在 CHP 模式下的热效率先增大后减小, 最

大热效率在 409 K 处,约为 11.1%;在 CCHP 模式下,系统热效率先增大后减小,最大热效率约为 65.2%,对应蒸发温度为 409 K。综上可知,在 CCHP 模式下热效率最高。这主要是因为蒸发温度的改变会对系统输出能量造成影响,见图 4。

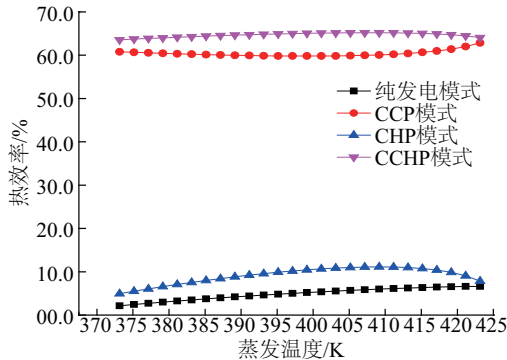


图5 不同模式下系统热效率随蒸发温度的变化关系

Fig. 5 Relationship of thermal efficiency with changing evaporation temperature under different model

图 6 是不同模式下系统炯效率随蒸发温度的变化关系。在纯发电模式下,系统炯效率随蒸发温度的升高逐渐增加,从 2.0%增加到 6.4%;在 CCP 模式下,系统炯效率先减小后增大,最大炯效率为 11.0%,约在最大蒸发温度 423 K 处;CHP 模式下系统的炯效率随蒸发温度的升高先增大后减小,最大值在 409 K 处,相应最大 CHP 炯效率为 9.7%;CCHP 模式下的系统炯效率先增大后减小,最大炯效率同样是在 409 K 处,为 13.9%。综上可知,CCHP 模式下系统炯效率最高,其次是 CCP 模式,纯发电模式下最小。

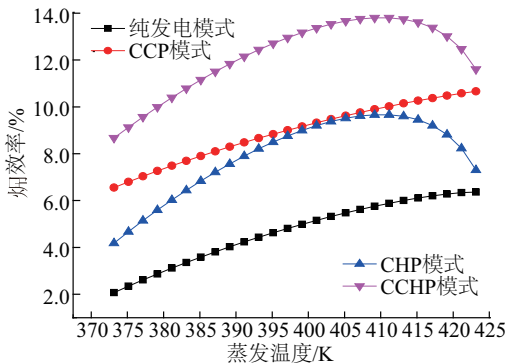


图6 不同模式下系统炯效率随蒸发温度的变化关系

Fig. 6 Relationship of exergy efficiency with changing evaporation temperature under different model

通过对蒸发温度的分析和不同运行模式下的系统热力性能分析得出,当蒸发温度为 409 K 时,系统总的输出能量和热效率等评价指标同比最高。4 种运行模

式下,系统的各性能指标从高到低依次为 CCHP>CCP>CHP>纯发电。由此可见三联供系统可更加有效地提高能源利用率。

2.2 系统对环境影响的综合分析

为了进一步分析本系统对环境的影响,引入炯损和可持续发展指数之间的关系量。由图 7 可得,在 CCHP 运行模式下,系统总炯损和可持续发展指数成负相关关系。蒸发温度升高,系统总炯损逐渐减少,可持续发展指数 SI 逐渐增加。通过上述分析可知,可通过减少系统各部件炯损提高系统可持续发展指数。

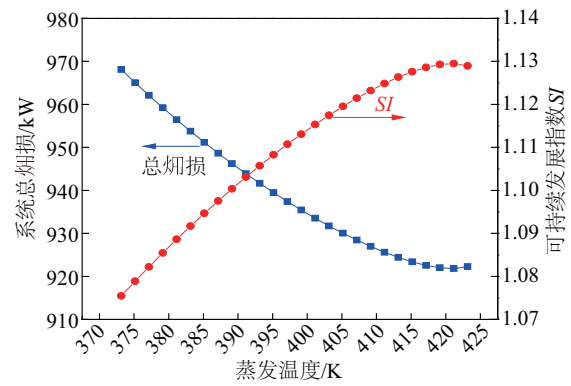


图7 CCHP 模式下总炯损和可持续发展指数随蒸发温度的变化关系

Fig. 7 Relationship of total exergy loss and SI with changing evaporation temperature under CCHP model

图 8 为系统在 CCHP 运行模式下,各主要部件炯损所占总炯损的比例。由图 8 可得,系统中占炯损比例最高的部件是生物质锅炉,其次是膨胀机和蒸发器。为降低炯损,提高可持续发展系数,可通过优化生物质锅炉结构设计,来完成降低生物质锅炉炯损失的目标。

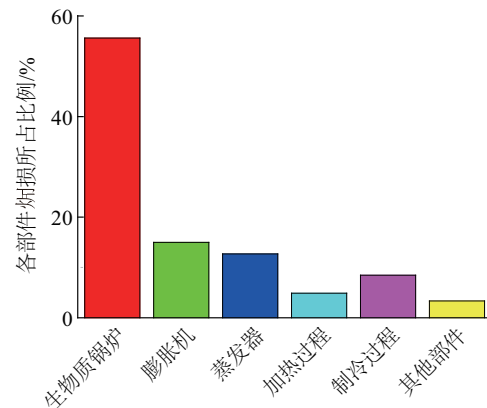


图8 CCHP 模式下各主要部件炯损占总炯损的比例

Fig. 8 Ratio of main exergy loss to total exergy loss under CCHP model

2.3 系统发电经济性计算

系统所用的生物质燃料为玉米秸秆,按当前市场价 600 元/t 进行发电量经济性计算,分析系统在不同运行模式下的发电经济性。图 9 是系统在不同模式下当量发电成本和火力发电成本的比较。系统在纯发电模式和 CHP 模式下发电成本分别为 2.06 和 1.43 元/kWh,远高于火力发电的 0.30 元/kWh;而在 CCP 和 CCHP 模式下,系统当量发电成本约为 0.25 元/kWh 和 0.23 元/kWh,低于火力发电成本的 0.30 元/kWh。经对比可知,系统运行在 CCHP 模式下经济性最优。

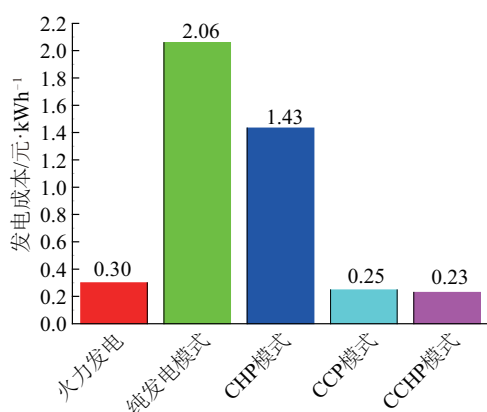


图9 不同模式下的当量发电成本和火力发电成本的比较

Fig. 9 Cost comparison of equivalent power generation and coal-fired power under different model

3 结 论

本文研究了一种生物质燃料驱动的新型 CCHP-ORC 系统。运用 Matlab 对系统进行参数优化和综合分析,得出以下结论:

1)通过 R245fa 工质系统的性能指标分析可知,随着蒸发温度的升高,净输出功逐渐增加,而制热量则先增加后减少,存在一个最佳的蒸发温度使系统制热量达到最大,约为 403 K,相应的最大制热量约为 53 kW。

2)在 CCHP 模式下,系统热效率和烟效率随蒸发温度的升高先增加后减少,最大热效率和烟效率分别为 65.2%和 13.9%,对应的蒸发温度为 409 K,且 CCHP 模式下的热效率和烟效率在 4 种运行模式中最高。

3)Biomass-fuelled CCHP-ORC 系统最主要的烟损部件是生物质锅炉,其次是膨胀机和蒸发器。为了减少烟损,提高可持续发展指数 SI ,可通过优化生物质锅炉结构设计,减少生物质锅炉的烟损损失来实现。

4)Biomass-fuelled CCHP-ORC 系统在热源温度为

433 K、蒸发温度为 409 K、ORC 泵入口温度为 358 K 的条件下性能最优,在 CCHP 模式下运行时,可持续发展指数 SI 和经济性最高。

符号表

A	烟损, kW
c	水的比热容, J/(kg·K)
COP	制冷机组性能系数
E	系统烟, kW
h	焓值, kJ/kg
LHV	燃料低位发热量, kJ/kg
M	摩尔质量, g/mol
Q	热量, kW
q	质量流量, kg/s
SI	可持续发展指数
T	温度, K
t	温度, °C
W	功, kW
Y	发电成本
η	热效率
ψ	烟效率

下标

biomass	玉米秸秆
Q	工质在蒸发器中的吸热量, kW
boil	生物质燃料锅炉
eva	有机工质蒸发器
el	发电量
turb	膨胀机
gen	发电机
wp	热水泵
op	有机工质泵
net	净输出
h	ORC 冷凝器
c	吸收式制冷机组
g	制冷机组发生器
e	制冷机组蒸发器
c	制冷机组冷凝器
a	制冷机组吸收器
mois	水分
eco	经济性
0	外界环境状态

[参考文献]

- [1] 孙立, 张晓东. 生物质发电产业化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 35-46.

- SUN L, ZHANG X D. Industrialized technology on power generation from biomass [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 35-46.
- [2] 李新禹, 苏文. 生物质能用于热电冷三联供系统的可行性[J]. 能源工程, 2005(4): 14-16.
- LI X Y, SU W. Discussion on feasibility of cogenerated heating electricity and refrigeration system used biomass energy[J]. Energy engineering, 2005(4): 14-16.
- [3] 王政伟, 袁玉梅, 马珊, 等. 发展农村生物质冷热电三联供的可行性分析[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(3): 348-350.
- WANG Z W, YUAN Y M, MA S, et al. The feasibility analysis of developing combined cooling heating and power system by using biomass energy in rural [J]. Hubei agricultural science, 2008, 47(3): 348-350.
- [4] 王鹏鹏. 分布式生物质能冷热电联产系统架构及能效研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- WANG K P. Research on architecture and energy efficiency of distributed biomass combined cold hot and power system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [5] WANG H, PETERSON R, HARADA K, et al. Performance of a combined organic Rankine cycle and vapor compression cycle for heat activated cooling [J]. Energy, 2011, 36(1): 447-458.
- [6] WANG H, PETERSON R, HERRON T. Design study of configurations on system *COP* for a combined ORC (organic Rankine cycle) and VCC (vapor compression cycle)[J]. Energy, 2011, 36(8): 4809-4820.
- [7] AL-SULAIMAN F A, DINCER I, HAMDULLAHPUR F. Exergy modeling of a new solar driven tri-generation system[J]. Solar energy, 2011, 85(9): 2228-2243.
- [8] AL-SULAIMAN F A, D I INCER, HAMDULLAHPUR F. Energy and exergy analyses of a biomass tri-generation system using an organic Rankine cycle [J]. Energy, 2012, 45(1): 975-985.
- [9] C HINESE D, M ENEGHETTI A, N ARDIN G. Diffused introduction of organic Rankine cycle for biomass-based power generation in an industrial district: a system analysis [J]. International journal of energy research, 2004, 28(11): 1003-1021.
- [10] 姚庆. 溴化锂吸收式制冷技术在回收低品位工业余热中的应用[J]. 石油和化工节能, 2005(5): 27-31.
- YAO Q. The application of the lithium bromide absorption refrigeration technology in the recovery of the low industrial waste heat [J]. Petroleum & chemical energy conservation, 2005(5): 27-31.
- [11] BASU P. Combustion and gasification in fluidized beds [M]. LLC: Taylor & Francis Group, 2006.
- [12] 杨承, 杨泽亮, 蔡睿贤. 基于全工况性能的冷热电联产系统效率指标比较[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 8-13.
- YANG C, YANG Z L, CAI R X. Comparison of CCHP efficiencies based on off-design characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 8-13.
- [13] BEJAN A, TSATSARONIS G, MORAN M J. Thermal design and optimization [M]. New York: Wiley, 1996.
- [14] AHMADI P, DINCER I. Thermodynamic modeling and thermoeconomic optimization of a dual pressure combined cycle power plant with supplementary firing using evolutionary algorithm [J]. Energy conversion and management, 2011, 52(2): 2296-2308.

PARAMETERS OPTIMIZATION AND COMPREHENSIVE ANALYSIS OF BIOMASS-FUELLED TRI-GENERATION INTEGRATED ORC SYSTEM

Li Zishen¹, Li Weiyi², Zhao Jiawei¹, Shan Donglei¹

(1. *Tianjin Electric Power Design Institute of China Energy Engineering Group, Tianjin 300400, China;*

2. *Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy of Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: Put forward a novel small-scale biomass-fuelled CCHP (combined cooling heat and power) system installed with ORC (Organic Rankine Cycle) system. It was analyzed from the perspective of parameters optimization, thermodynamic analysis and economic analysis. The structure model and mathematical model were established. Take maize straw and hot water as biomass fuel and heat-conducting medium, the organic working fluid is R245fa. Use the control variable method to analyze the effects of the single variable evaporation temperature on the system under four kinds of operation modes (only power generation, combined heat and power CHP, combined cooling and power CCP, CCHP). Through comparison, it shows that when the evaporation temperature is 409 K, the system has the best performance. Under four operation modes, evaluation index from high to low is CCHP, CCP, CHP and only power generation. By exergy analysis, the biomass boiler has highest exergy loss and the structure of biomass boiler should be correspondingly optimized. It can also be concluded that CCHP-ORC system has the best economy and highest sustainable development index *SI*.

Keywords: biomass; organic Rankine cycle(ORC); combined cooling heat and power(CCHP); exergy; control variable method; sustainable development index *SI*