

DOI: 10.7652/xjtuxb201601004

一种压缩空气储能与内燃机技术耦合的 冷热电联产系统

姚尔人, 王焕然, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为探索可再生能源的高效利用方法,基于热力学定律和能量按品质利用的原则,提出了一种以压缩空气储能技术为基础的与内燃机技术耦合的冷热电联产分布式能量系统,建立了该系统的热力学模型并自编程序对系统进行了热力学分析,重点研究了系统中的压气机、换热器、透平膨胀机、内燃机等主要设备性能以及关键节点参数,如透平膨胀机入口压力和温度以及压气机压比对系统性能的影响规律。研究表明:所提系统具有较高的能量效率和炯效率,其中透平膨胀机、内燃机及换热器是系统关键设备;增加系统设备的效率可以提高系统的能量效率、折合发电效率及炯效率,增加内燃机发电效率获得的效果更加明显。该结果可为系统的工程应用提供理论依据。

关键词: 压缩空气储能;冷热电联产;分布式能量系统;热力学分析

中图分类号: TK02 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)01-0022-06

A Novel Combined Cooling Heating and Power System with Coupled Compressed Air Energy Storage and Combustion Engine

YAO Erren, WANG Huanran, XI Guang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the laws of thermodynamics and the principle of cascade energy utilization, a novel combined cooling heating and power (CCHP) system consisting of compressed air energy storage (CAES) technology and combustion engine is proposed to explore the strategy for efficient renewable energy application. The thermodynamic model of the system is established and the thermodynamic properties of the system are analyzed with a newly developed code. The thermodynamic analysis focuses on the performance of major equipment, including compressor, heat exchangers, turbine expander, and combustion engine. And the effects of key parameters such as the inlet pressure and temperature of turbine expander and the pressure ratio of compressor on the system performance are emphatically discussed. The simulation indicates that this system has higher value of both energy efficiency and exergy efficiency where system turbine expander, combustion engine and heat exchangers serve as the crucial roles. The energy efficiency, exergy efficiency and electricity conversion efficiency increase with the rising efficiency of system equipment, especially with the rising combustion engine efficiency.

Keywords: compressed air energy storage; combined cooling; heating and power system; distributed energy resources system; thermodynamic analysis

随着传统化石能源的日益枯竭,可再生能源的利用受到越来越多的重视^[1]。风能、太阳能等可再生能源所固有的随机性和波动性给可再生能源的开发带来了巨大的挑战^[2-3],然而储能技术可以有效解决这一问题^[4]。分布式能源系统是目前能源技术发展的重要方向之一,其优势主要体现在冷热电联产技术,该技术可以实现余热的高效综合利用,这不仅实现我国节能减排战略目标的重要途径,也符合吴仲华先生提出的总能系统的“温度对口、梯级利用”的准则^[5-6]。

国内学者对压缩空气储能技术与冷热电联产的复合系统进行了研究^[7-8],但是存在空气透平的入口空气温度不高使得空气透平做功发电能力不足的问题,而 Ibrahim 等提出的将内燃机与压缩空气储能技术相耦合的复合系统^[9]解决了做功能力不足的问题,但是系统中仍有大量余热直接排向大气。本文提出的基于压缩空气储能和内燃机技术的冷热电联产系统,不仅具有较强的做功发电能力,而且可以实现能量的完全利用,并且针对 1 MW 以下规模的分布式能源系统,提出选取内燃机作为系统动力装置的建议,其更加适合小型分布式储能发电系统^[10-11],且具有造价、运营和维护成本低等优势^[12]。

1 系统描述

图 1 为以压缩空气储能技术为基础的冷热电联产系统模型。其工作过程如下:在储能过程中,该系统利用可再生能源驱动压气机机组工作,并且回收压气机机组的压缩热,冷却水经换热器冷却高压空气,冷却后的高压空气存储在高压储气室中;在发电过程中,预热后的高压空气通过透平膨胀机驱动发电机发电,在透平膨胀机中完成膨胀做功的空气先进入换热器换热,待温度降低后进入内燃机且与天

然气混合燃烧,由此驱动发电机发电。内燃机可回收的余热主要来自排气及缸套水两部分。系统利用内燃机排气余热首先对高压储气室的出口高压空气进行预热,然后进入吸收式制冷机进行制冷,最后进入换热器向用户供热;内燃机缸套水通过与冷却水换热使冷却水升温且向用户直接供热,而冷却后的内燃机缸套水再次进入内燃机进行循环。

1.1 能量效率

对图 1 系统中各主要部件进行了建模和计算,计算内容如下。

(1)根据压气机在等熵过程中的做功公式,计算压气机的耗功和压气机出口空气温度,即

$$W_c = \frac{kR_g T_1 m_a}{(k-1)\eta_c} (\epsilon_c^{(k-1)/k} - 1) \tag{1}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{\epsilon_c^{(k-1)/k} - 1}{\eta_c} + 1 \right) \tag{2}$$

式中: T_1 为压气机进气温度,在本系统中等于环境温度; T_2 为压气机实际排气温度; m_a 为压气机压缩空气量; η_c 为压气机等熵效率; ϵ_c 为压气机压比; W_c 为压气机的耗功。

(2)假设 $c_a m_a = c_w m_{w1}$, 其中 c_a 为空气的比热容, c_w 为冷却水的比热容, m_{w1} 为换热器 1 所需冷却水的质量,根据换热器能效的定义,通过换热器 1 获得的热量

$$Q_{h1} = m_a c_a (T_2 - T_{w1}) \eta_h \tag{3}$$

式中: T_{w1} 为进入换热器 1 的冷却水温度; η_h 为换热器能效。

(3)高压储气室采用等温模型,进气过程和放气过程均为等温过程,且不考虑进放气过程中空气的压力损失。受热耗散效应的影响,高压储气室内空气温度最终等于环境温度,高压储气室出口空气温度为环境温度,则有

$$T_4 = T_1 \tag{4}$$

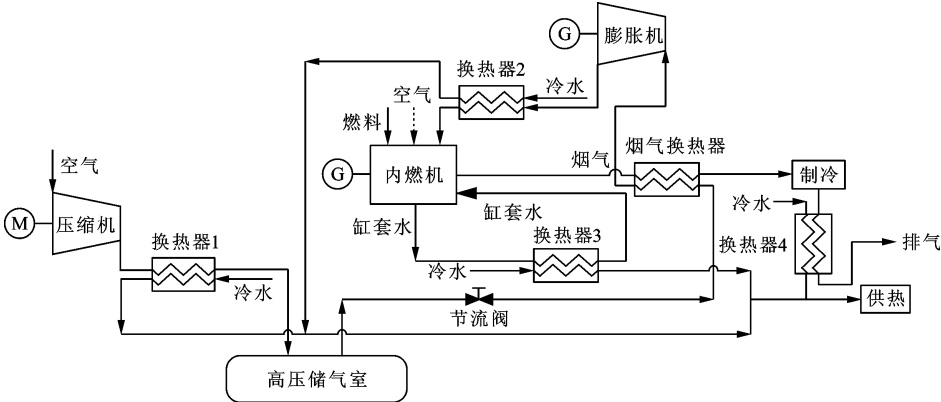


图 1 压缩空气储能技术与内燃机耦合的冷热电联产系统图

(4) 烟气换热器利用内燃机的高温排气对高压储气室出口的高压空气进行预热, 达到预定温度后的高压空气进入透平膨胀机膨胀做功。进入透平膨胀机的空气温度

$$T_5 = T_4 + \frac{(mc)_{\min}(T_8 - T_4)\eta_h}{m_a c_a} \quad (5)$$

式中: $(mc)_{\min}$ 为 $m_a c_a$ 和 $m_y c_y$ 中的较小值, m_y 为内燃机排气的质量, c_y 为内燃机排气的比热容。

(5) 根据高压空气在透平膨胀机中的等熵膨胀公式计算输出功

$$W_t = \frac{kR_g T_6 m_a}{(k-1)\eta_t} (1 - \epsilon_t^{(k-1)/k}) \quad (6)$$

透平膨胀机出口空气温度

$$T_7 = T_6 [1 - \eta_t (1 - \epsilon_t^{(k-1)/k})] \quad (7)$$

式中: T_6 为透平膨胀机进气温度; η_t 为透平膨胀机等熵效率; ϵ_t 为膨胀比。

(6) 换热器 2 用来回收透平膨胀机出口的带有一定温度的排气热量, 参考换热器 1 假设, 则换热器 2 所回收的热量

$$Q_{h2} = m_a c_a (T_6 - T_{w2}) \eta_h \quad (8)$$

(7) 内燃机的输出功和内燃机消耗的一次能源总量分别为

$$W_e = P_e t \eta_e \quad (9)$$

$$Q_{\text{cog}} = f H_u \quad (10)$$

式中: P_e 为内燃机功率; η_e 为内燃机发电效率; t 为内燃机的工作时间; f 为燃料消耗量; H_u 为燃料的低热值。

(8) 换热器 3 用来回收内燃机缸套循环水的热量, 结合换热器 1 假设, 则换热器 3 所能回收的热量

$$Q_{h3} = m_{\text{gw}} c_w (T_{12} - T_{w3}) \eta_h \quad (11)$$

式中: m_{gw} 为在换热器 3 中参与换热的内燃机缸套循环水的质量。

(9) 吸收式制冷机在忽略溶液泵消耗的少量功时的制冷量

$$Q_{\text{cool}} = m_a c_a (T_9 - T_{10}) C_{\text{COP}} \quad (12)$$

式中: C_{COP} 为制冷循环的制冷系数。

(10) 换热器 4 用来回收经过吸收式制冷循环后空气中所含热量, 根据换热器 1 假设, 则换热器 4 回收的热量

$$Q_{h4} = m_a c_a (T_{10} - T_{w4}) \eta_h \quad (13)$$

因此, 系统获得的总热量

$$Q_h = Q_{h1} + Q_{h2} + Q_{h3} + Q_{h4} \quad (14)$$

系统能量效率

$$\eta = \frac{W_t + W_e + Q_h + Q_{\text{cool}}}{W_c + Q_{\text{cog}}} \quad (15)$$

1.2 焓效率

(1) 对于压缩机, 耗费焓

$$E_c^{\text{pay}} = W_c \quad (16)$$

收益焓

$$E_c^{\text{gain}} = m_a \left[c_a (T_2 - T_1) - T_1 \left(c_a \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \epsilon_c \right) \right] \quad (17)$$

焓损失

$$E_c^L = E_c^{\text{pay}} - E_c^{\text{gain}} \quad (18)$$

(2) 对于换热器 1, 耗费焓

$$E_{h1}^{\text{pay}} = m_a \left[c_a (T_2 - T_3) - T_1 c_a \ln \frac{T_2}{T_3} \right] \quad (19)$$

收益焓

$$E_{h1}^{\text{gain}} = m_{w1} \left[c_w (T_{w1'} - T_{w1}) - T_1 c_w \ln \frac{T_{w1'}}{T_{w1}} \right] \quad (20)$$

焓损失

$$E_{h1}^L = E_{h1}^{\text{pay}} - E_{h1}^{\text{gain}} \quad (21)$$

由于高压储气室的进/排气过程为等温过程, 且不考虑进/排气过程中空气的压力损失, 因此高压储气室的焓损失仅需考虑高压储气室的进气温度和出气温度, 则有

$$E_v^L = m_a \left[c_a (T_3 - T_4) - T_1 c_a \ln \frac{T_3}{T_4} \right] \quad (22)$$

(3) 对于烟气换热器, 耗费焓

$$E_{hh}^{\text{pay}} = m_y \left[c_y (T_8 - T_9) - T_1 c_y \ln \frac{T_8}{T_9} \right] \quad (23)$$

收益焓

$$E_{hh}^{\text{gain}} = m_a \left[c_a (T_5 - T_4) - T_1 c_a \ln \frac{T_5}{T_4} \right] \quad (24)$$

焓损失

$$E_{hh}^L = E_{hh}^{\text{pay}} - E_{hh}^{\text{gain}} \quad (25)$$

(4) 对于透平膨胀机, 耗费焓

$$E_t^{\text{pay}} = m_a \left[c_a (T_5 - T_6) - T_1 \left(c_a \ln \frac{T_5}{T_6} - R_g \ln \epsilon_t \right) \right] \quad (26)$$

收益焓

$$E_t^{\text{gain}} = W_t \quad (27)$$

焓损失

$$E_t^L = E_t^{\text{pay}} - E_t^{\text{gain}} \quad (28)$$

(5) 对于换热器 2, 耗费焓

$$E_{h2}^{\text{pay}} = m_a \left[c_a (T_6 - T_7) - T_1 c_a \ln \frac{T_6}{T_7} \right] \quad (29)$$

收益焓

$$E_{h2}^{\text{gain}} = m_{w2} \left[c_w (T_{w2'} - T_{w2}) - T_1 c_w \ln \frac{T_{w2'}}{T_{w2}} \right] \quad (30)$$

焓损失

$$E_{h2}^L = E_{h2}^{pay} - E_{h2}^{gain}$$

(6)对于内燃机,耗费烟

$$E_e^{pay} = fH_u$$

收益烟

$$E_e^{gain} = P_e \eta_e$$

烟损失

$$E_e^L = E_e^{pay} - E_e^{gain}$$

(8)对于换热器 3,耗费烟

$$E_{h3}^{pay} = m_{gw} \left[c_w (T_{12} - T_{13}) - T_1 c_w \ln \frac{T_{12}}{T_{13}} \right]$$

收益烟

$$E_{h3}^{gain} = m_{w3} \left[c_w (T_{w3'} - T_{w3}) - T_1 c_w \ln \frac{T_{w3'}}{T_{w3}} \right]$$

烟损失

$$E_{h3}^L = E_{h3}^{pay} - E_{h3}^{gain}$$

(9)对于吸收式制冷机,耗费烟

$$E_{cool}^{pay} = \int_H \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \partial Q_{cool}$$

收益烟

$$E_{cool}^{gain} = \left(1 - \frac{T_0}{T_L} \right) Q_L$$

烟损失

$$E_{cool}^L = E_{cool}^{pay} - E_{cool}^{gain}$$

(10)对于换热器 4,耗费烟

$$E_{h4}^{pay} = m_a \left[c_a (T_{10} - T_{11}) - T_1 c_a \ln \frac{T_{10}}{T_{11}} \right]$$

收益烟

$$E_{h4}^{gain} = m_{w4} \left[c_w (T_{w4'} - T_{w4}) - T_1 c_w \ln \frac{T_{w4'}}{T_{w4}} \right]$$

烟损失

$$E_{h4}^L = E_{h4}^{pay} - E_{h4}^{gain}$$

系统输出热量烟

$$E_h^{gain} = E_{h1}^{gain} + E_{h2}^{gain} + E_{h3}^{gain} + E_{h4}^{gain}$$

系统烟效率

$$\eta_e = \frac{E_t^{gain} + E_e^{gain} + E_{cool}^{gain} + E_h^{gain}}{E_c^{pay} + E_e^{pay}}$$

1.3 折合发电效率

当联产系统中存在多种产品输出时,若其中几种产品的能量利用数量与参照的分产系统相同,则推算出来的剩下一产品的能量利用效率被称为联产系统的折合性能效率。例如,假定联产系统中的输出冷量和热量均与参照的分产系统相等,推算得到的发电效率就称为联产系统的折合发电效率^[13]

$$\eta_z = (W_t + W_e) / \left(W_c + Q_{cog} - \frac{Q_h}{\eta_{dh}} - \frac{Q_{cool}}{\eta_{dc}} \right)$$

式中: Q_{cool}/η_{dc} 为参照的分产系统中产生与联产系统相同的冷量所需能量; Q_h/η_{dh} 为参照系统中生产与联产系统相同的热量所需能量。

2 结果分析

压缩空气冷热电联产系统中的各设备运行参数如表 1 所示。

表 1 冷热电联产系统运行参数值

参数	数值	参数	数值
压比	5	内燃机排气温度/K	773.15
压气机等熵效率	0.9	环境温度/K	298.15
膨胀比	4	水的比热容/ $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	4 200
膨胀机等熵效率	0.9	空气等熵系数	1.4
换热器 1~4 能效	0.85	制冷系数	1.3
烟气换热器能效	0.85	环境压力/kPa	101
内燃机发电效率	0.38	空气比定压热容/ $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	1 004

2.1 压气机压比对系统的影响

图 2 为压缩空气冷热电联产系统各评价指标随压气机压比的变化。从图 2 可以看出:随着压气机压比的升高,联产系统的能量效率和折合发电效率有所降低,但下降幅度小于 1%,可以近似认为保持不变;系统的效率有所下降,下降幅度为 1.69%。因此,可以忽略压气机压比对系统性能的影响,这是因为随着压气机压比的升高,需要向系统输入更多的电能来驱动压气机工作,而系统中节流稳压阀使得透平膨胀机的入口压力保持恒定,系统的总输出电能和供冷量保持不变,供热量升高,因此系统的总输出能量升高,但系统总输出能量升高的幅度小于向系统输入电能的增幅。

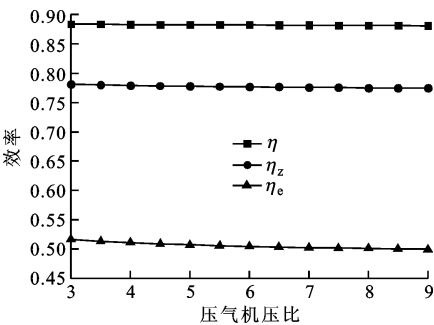


图 2 系统评价指标随压气机压比的变化

2.2 压气机等熵效率对系统的影响

图 3 为压缩空气冷热电联产系统各评价指标随压气机等熵效率的变化。在其他参数不变的前提下,随着压气机等熵效率的提高,系统所消耗的电能

减少,但是与透平膨胀机和内燃机所发出的总电能相比,压气机所消耗的电能较小,因此从图 3 中可以看出,系统的能量效率和折合发电效率几乎不变,而系统的效率则小幅升高。

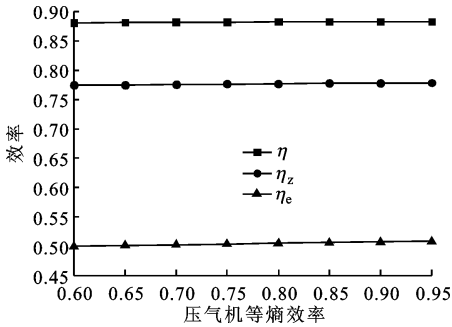


图 3 系统评价指标随压气机等熵效率的变化

2.3 透平膨胀机入口温度对系统的影响

图 4 为压缩空气冷热电联产系统各评价指标随透平膨胀机入口温度的变化。由图 4 可以看出,系统的能量效率、折合发电效率以及焓效率均随透平膨胀机入口温度的升高而升高,其中系统的折合发电效率增长速度随膨胀机入口温度升高得最快,能量效率次之,焓效率受透平膨胀机入口温度的影响最小。由于透平膨胀机入口的空气温度主要来源于内燃机的高温排气,当排气热量一定时,透平膨胀机入口的空气温度取决于烟气换热器的能效,因此烟气换热器能效的高低对系统的性能指标有着重要影响。

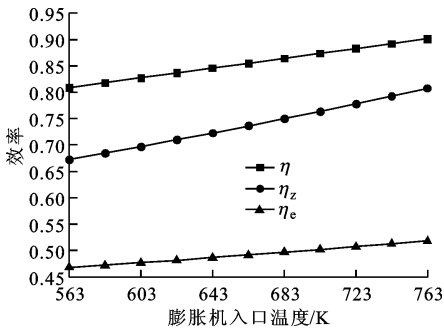


图 4 系统评价指标随透平膨胀机入口温度的变化

2.4 透平膨胀机入口压力对系统的影响

图 5 为压缩空气冷热电联产系统各评价指标随透平膨胀机入口压力的变化。由图 5 可以看出,随透平膨胀机入口压力的不断升高,系统的能量效率、折合发电效率以及焓效率均有所升高,但是能量效率的增长幅度相对缓慢,而折合发电效率和焓效率的增长较快,也就是说系统的折合发电效率和焓效率受透平膨胀机入口压力的影响更加明显。由于系统中使用了节流稳压阀,透平入口压力受节流效应

影响使得进入透平膨胀机的空气压力与在高压储气室中的空气压力相比有所下降,从而导致系统损失了部分输出功,但是对系统的性能影响很小,这样系统发电时的变工况问题得以改善。

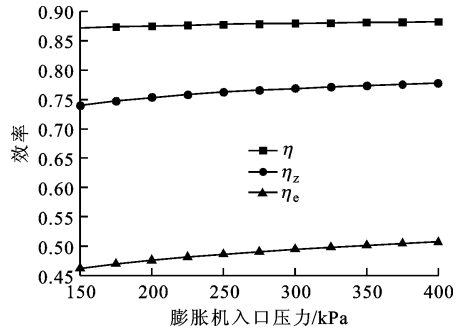


图 5 系统评价指标随透平膨胀机入口压力的变化

2.5 透平膨胀机等熵效率对系统的影响

图 6 为压缩空气冷热电联产系统各评价指标随透平膨胀机等熵效率的变化。从图 6 可以看出,系统的能量效率基本不变,折合发电效率和焓效率均随透平膨胀机等熵效率的升高而缓慢升高,但增长率不超过 3%。根据折合发电效率变化曲线可以看出,透平膨胀机的等熵效率对系统的折合发电效率的影响很小,也就是说在不改变透平膨胀机进口压力或者进口温度等条件下,仅提升透平膨胀机的等熵效率对整个系统的输出电能影响较小。

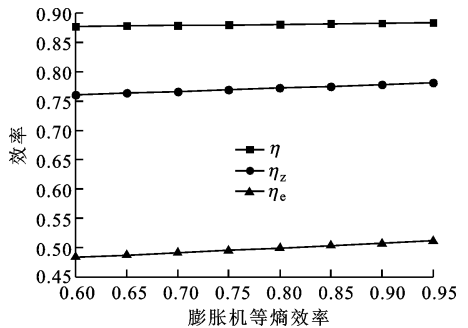


图 6 系统评价指标随透平膨胀机等熵效率的变化

2.6 内燃机发电效率对系统的影响

图 7 为压缩空气冷热电联产系统各评价指标随内燃机发电效率的变化。从图 7 可以看出,系统的能量效率、系统折合发电效率和焓效率均随内燃机效率的升高而升高,内燃机发电效率对折合发电效率的影响要大于其对能量效率和焓效率的影响。从图中还可以看出,如果内燃机效率升高到 40% 左右,系统的能量效率可以达到 90% 以上,随着内燃机发电效率的进一步升高,系统的折合发电效率也将达到 90% 左右。因此,内燃机发电效率对系统性能具有决定性的作用。

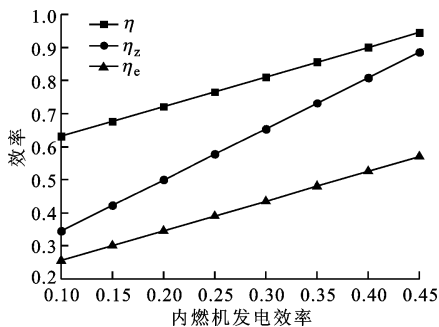


图 7 系统评价指标随内燃机发电效率的变化

2.7 换热器能效对系统的影响

图 8 为压缩空气冷热电联产系统各评价指标随换热器能效的变化。从图 8 可以看出,系统的能量效率、折合发电效率以及烟效率均随换热器能效的升高而升高,但是系统的效率增长缓慢,当换热器能效升高到 90% 以上时,系统的能量效率也超过了 90%,烟效率超过了 50%,从而实现了能量的高效利用。

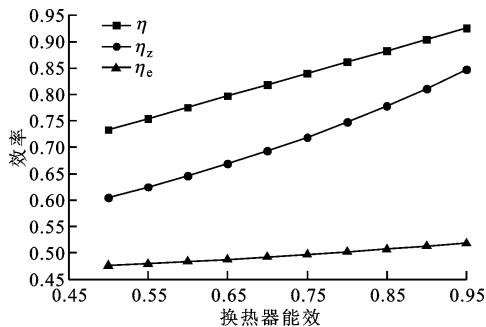


图 8 系统评价指标随换热器能效的变化

3 结 论

(1) 基于热力学定律和能量按品质利用的原则,提出了一种压缩空气储能与内燃机技术相耦合的冷热电联产复合系统。

(2) 通过建立冷热电联产复合系统的热力学模型,获得了系统主要设备的性能参数及系统关键节点参数对系统性能的影响规律。从分析结果可知,透平膨胀机、内燃机以及换热器是系统的关键设备。

(3) 增加系统设备的效率可以提高系统的能量效率、折合发电效率以及烟效率,增加内燃机发电效率获得的效果更加明显。

参考文献:

[1] BAZMI A A, ZAHEDI G. Sustainable energy systems; role of optimization modeling techniques in power generation and supply: a review [J]. Renewable and

Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(8): 3480-3500.

[2] LIU W, LUND H, MATHIESEN B V. Large-scale integration of wind power into the existing Chinese energy system [J]. Energy, 2011, 36(8): 4753-4760.

[3] BLARKE M B, LUND H. The effectiveness of storage and relocation options in renewable energy systems [J]. Renewable Energy, 2008, 33(7): 1499-1507.

[4] CHEN H, CONG T N, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: a critical review [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 291-312.

[5] 蔡睿贤, 张娜. 关于分布式能源系统的思考 [J]. 科技导报, 2005(9): 7-8.

CAI Ruixian, ZHANG Na. On distributed energy system [J]. Science & Technology Review, 2005(9): 7-8.

[6] 席奂, 李明佳, 何雅玲, 等. CE 图: 一种余热利用循环及工质选择的定量评价方法 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(9): 8-15.

XI Huan, LI Mingjia, HE Yaling, et al. CE diagram: a quantitative evaluation criterion for waste heat recovery power system and working fluids with applications [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(9): 8-15.

[7] 尹建国, 傅秦生, 郭晓坤, 等. 带压缩空气储能的冷热电联产系统的烟分析 [J]. 热能动力工程, 2006, 21(2): 193-196.

YIN Jianguo, FU Qinsheng, GUO Xiaokun, et al. Exergy analysis of a cogeneration system with compressed-air energy storage for the simultaneous supply of electric power, heat and cooling energy [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, 21(2): 193-196.

[8] 张远, 杨科, 李雪梅, 等. 基于先进绝热压缩空气储能的冷热电联产系统 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(11): 1991-1996.

ZHANG Yuan, YANG Ke, LI Xuemei, et al. A combined cooling, heating and power (CCHP) system based on advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES) technology [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(11): 1991-1996.

[9] IBRAHIM H, YOUNÈ R, ILINCA A, et al. Study and design of a hybrid wind-diesel-compressed air energy storage system for remote areas [J]. Applied Energy, 2010, 87(5): 1749-1762.

[10] 叶彩花, 白一, 乔丽洁. 燃气冷热电联供分布式能源系统中发电机组选择的分析探讨 [J]. 城市燃气, 2014(2): 21-24.

(下转第 40 页)