

一种新型沼气和太阳能互补的分布式能量系统

苏博生^{1,2} 张筱松³ 韩巍^{1,2} 王泽峰^{1,2}

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 分布式冷热电联供系统北京市重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100190;
3. 海南大学机电工程学院, 海口 570228)

摘要 利用可再生能源, 有望进一步提升分布式能量系统的热力性能, 降低对化石能源的依赖, 从而降低碳排放。本文基于污水处理厂的用能情况, 提出一种沼气和太阳能互补的新型分布式能源系统。相比于沼气直接燃烧利用, 沼气在新系统中首先参与沼气重整过程, 吸收聚集的太阳能转变为更高热值的合成气, 进而在冷热电系统中进行利用。新系统实现了沼气的间接燃烧, 减少了沼气燃烧过程的不可逆损失, 实现了太阳能品位的提升和化学储存。本文建立了该新系统的动态热力过程模型, 以西藏拉萨作为参考地域, 得到了系统全年的热力性能。研究表明: 相比于沼气和太阳能单独利用系统, 新系统多生产 299.3 MWh (7%) 电能和 58.7 MWh (54.9%) 冷能, 每年节省 16340 m³(标况)(11.7%) 天然气。本研究为沼气高效利用提供了一种新型技术方案。

关键词 沼气重整; 太阳能利用; 冷热电三联供; 热力性能分析

中图分类号: O414.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2018)09-1879-05

A New Distributed Energy System Assisted by Biogas and Solar Energy

SU Bo-Sheng^{1,2} ZHANG Xiao-Song³ HAN Wei^{1,2} WANG Ze-Feng^{1,2}

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing Key Laboratory of Distributed CCHP System, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. Mechanical and Electrical Engineering College, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract Using renewable energy has potential to improve the performance of the distributed energy systems, as a result of which, it can reduce the consumption of the fossil fuels and ease the greenhouse effect. This study proposes a new distributed energy system assisted by biogas and solar energy based on sewage treatment plants. Compared with the conventional way of using biogas, the biogas participates in a reforming reaction, and converts into the syngas with the aid of solar heat in the new system. The syngas is then used in a high-efficient CCHP subsystem. This new method realizes the indirect use of biogas and energy quality improvement of the solar energy, thus reduce the irreversible loss of the combustion process. The hourly dynamic simulations of the proposed systems were conducted by the established mathematic models under Tibet Lhasa weather data. Compared with the separate utilization systems for biogas and solar energy, the new system annually produces 299.3 MWh (7%) more power, 58.7 MWh (54.9%) more refrigeration, and saves 16340 m³ (11.7%) natural gas. This study provides a new way to efficiently use the biogas.

Key words biogas reforming; solar energy utilization; tri-generation; thermal performance analysis

0 前言

污水处理厂在污水处理、中水制造、改善排放水质以及实现河道湖泊的生态补水功能等方面具有重要作用。能耗大、运行费用高在一定程度上阻碍了城市污水处理厂的建设, 在今后相当长的一段时期内, 我国污水处理事业与经济矛盾的矛盾将十分

突出, 能耗问题将成为污水处理的瓶颈, 必须予以高度重视。

目前, 污水处理过程产生的活性污泥, 需要首先经过生物厌氧发酵, 降解成稳定且无毒的沼渣再进行处理或利用。为了维持 35 °C 左右的中温厌氧

收稿日期: 2018-01-26; 修订日期: 2018-08-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(No.2014CB249202); 国家自然科学基金 (No.51576191); 海南大学科研启动基金 (No.KYQD(ZR)1841)

作者简介: 苏博生 (1991-), 男, 博士生, 主要从事分布式能源系统集成和可再生能源利用方面的研究工作。通信作者: 韩巍, 研究员, hanwei@iet.cn

发酵过程的温度,将发酵过程产生的沼气作为燃料以提供该过程所需热量。由于沼气产量有限,一般在除高温夏季以外的时间,往往需要天然气管网供气补燃以维持发酵池恒温的条件。在高温夏季,一部分沼气用于沼气池保温,多余沼气经燃烧后不经利用直接排入大气。目前污水处理厂对于沼气的利用方式简单粗放,不仅造成了可燃性沼气能量品位的严重浪费,还存在着对化石能源严重的依赖性,不利于节能减排。探寻新型高效的沼气利用手段,为减少化石能源消耗,提升污水处理厂经济和环境效益具有显著的作用。

分布式热电以及冷热电联供系统作为一种面向终端用户、同时解决多重用能需求和实现多重目标的总系统,可对沼气进行更好的利用。沼气用于充当发电机械的燃料,产生的电能用于污水处理厂内的电耗,而发电机械的排热可为沼气池保温提供热量。沼气热电联供系统在一定程度上改善对沼气粗放利用的问题,但在亚热带或热带等气温较高的地域,沼气热电联供系统在夏季运行时,其中发电机械的排热只需部分用于沼气池保温,剩余热量通过散热器释放到环境中,造成了可用热能的浪费,同时加剧了热岛效应。Chen 等^[1]针对上述问题,将吸收式制冷集成到分布式沼气热电联产系统,并研究了四种结构形式的冷热电联供系统的热力性能和经济性能。冷热电三联供系统虽然缓解了热电联供系统夏季余热浪费的问题,但全年沼气池保温仍然需要大量天然气进行补燃。

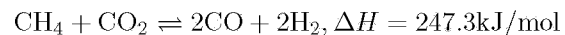
太阳能作为一种清洁的可再生能源,对进一步减少污水处理厂对化石能源的依赖有很大潜力。目前太阳能与沼气的互补利用还停留在太阳能和沼气

的单独利用层面,比如利用太阳能产生热水,或者是利用太阳能光伏单元作为能源补充。本文提出了一种沼气和太阳能热化学互补的分布式冷热电联供系统。相比于传统分布式能量系统对沼气的直接燃烧利用,沼气在新系统中首先通过沼气重整反应吸收聚集的太阳能而转变为更高热值的合成气,同时实现了太阳能品位的提升和化学储存。本文选取西藏拉萨典型年天气数据,研究了新系统全年的热力性能。

1 系统描述

1.1 新系统

图 1 为沼气与太阳能互补的新型分布式冷热电联供系统流程图。发酵池内部温度全年维持在 35℃。沼气首先在沼气加热器中被高温合成气预热后,进入重整器吸收碟式集热器聚集的太阳能,在 750℃ 左右发生沼气重整反应:



在设计工况下(全年辐照最大的时刻),全部沼气经过重整器转变为合成气。当太阳辐照下降时,部分沼气通过重整器发生反应,剩余沼气经过重整器旁路与合成气混合后进行利用。当太阳能不可用时,沼气直接在分布式子系统中进行利用。重整器出口的高温合成气经换热冷却后在下游的冷热电联供系统中进行能量的梯级利用。内燃机排烟余热通过发酵池实时热负荷进行调节分配,当内燃机缸套水热量不足时,排烟余热部分或者全部用于在换热器 I 中加热缸套水,以满足沼气池保温需求,剩余排烟

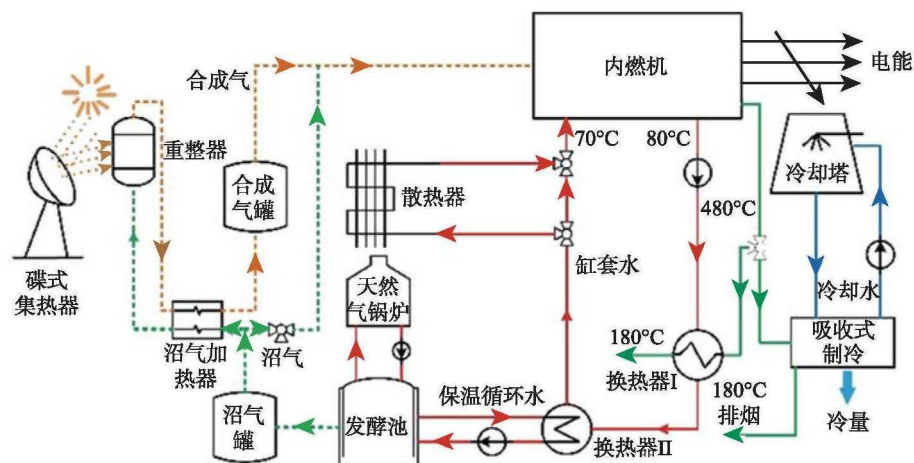


图 1 沼气和太阳能互补新系统流程图

Fig. 1 Flow chart of the new system assisted by biogas and solar energy

余热用于驱动双效吸收式制冷机输出冷量。当缸套水热量富余时,缸套水中必须将多余热量通过散热器释放到环境中,从而保证其在内燃机内部的冷却性能,此时全部排烟余热用于驱动双效吸收式制冷机输出冷量。当缸套水和烟气余热都不能满足沼气保温需求时,天然气作为补充燃料进行供热。

1.2 参比系统

本文选取的参比系统为沼气和太阳能的单独利用系统,分别为常规沼气冷热电三联供系统和太阳能碟式斯特林发电系统。在沼气驱动的三联供系统中,对于其内燃机缸套水和烟气余热的利用方法与新系统中一致。模拟过程中,使得新系统和参比系统中的沼气和太阳能输入相同,进而考察两者全年的产能情况。

2 系统建模与评价准则

2.1 循环模拟计算和基本假设

本文采用 Matlab 对系统进行模拟计算。系统模型包括沼气池产气模型^[1]、沼气池保温模型^[1]、太阳能集热模型^[2,3]、沼气重整模型^[3]、内燃机模型^[4]、吸收式制冷模型^[5]以及换热模型^[6]。系统运行基于西藏拉萨的典型年天气数据。西藏拉萨全年干球温度和太阳能辐照的变化如图 2 所示。

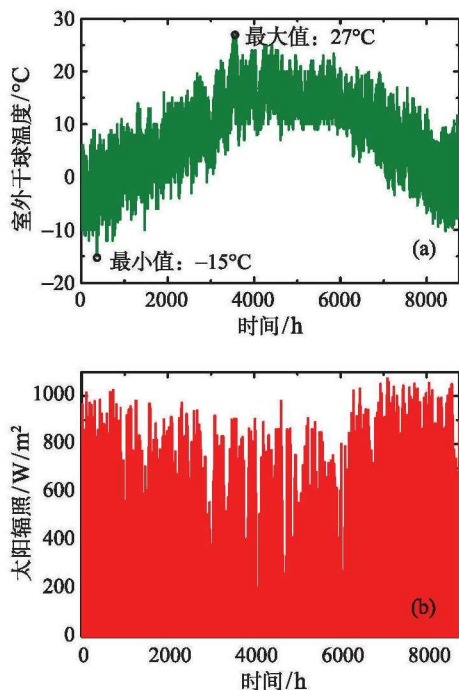


图 2 西藏拉萨全年温度和辐照变化

Fig. 2 Change of temperature and solar irradiation in Tibet Lhasa

2.2 系统评价准则

本文选取产电增加率 (I_e)、产冷增加率 (I_c) 和天然气节约率 (S_f) 来衡量新系统的热力性能,定义式如下:

$$I_e = \frac{W_{\text{new}} - W_{\text{ref}}}{W_{\text{ref}}} \quad (1)$$

$$I_c = \frac{Q_{c,\text{new}} - Q_{c,\text{ref}}}{Q_{c,\text{ref}}} \quad (2)$$

$$S_f = \frac{V_{\text{new}} - V_{\text{ref}}}{V_{\text{ref}}} \quad (3)$$

式中, W 为系统发电量; Q_c 为系统产冷量; V 为系统天然气消耗量。下标 “new” 和 “ref” 分别代表新系统和参比系统。

3 结果与分析

3.1 全年发电量对比

全年沼气产气量稳定,日产沼气的量为 5000 m^3 (标况) 左右。由于太阳能不连续性的特征,太阳能份额(太阳能占输入可再生能源总和的比例)波动较大,如图 3 所示。在设计工况下,太阳能份额为最大值,达到 16.88%。

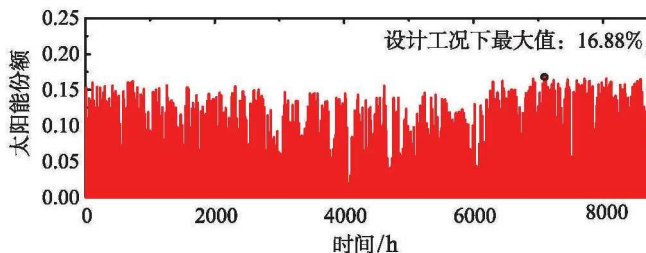


图 3 全年输入太阳能份额
Fig. 3 Solar share in the whole year

图 4 给出了新系统和沼气单独利用系统中全年的沼气发电效率。太阳能的引入,使得新系统中内燃机装机容量大于单独利用沼气的内燃机装机容量,从而使得新系统中的额定发电效率达到 38.46%,然而参比系统中的沼气发电效率为 38.06%。当发电功率减小时,内燃机发电效率先升高后减小^[5],使得新系统中的发电效率在 38.46%到 40.79%之间波动。

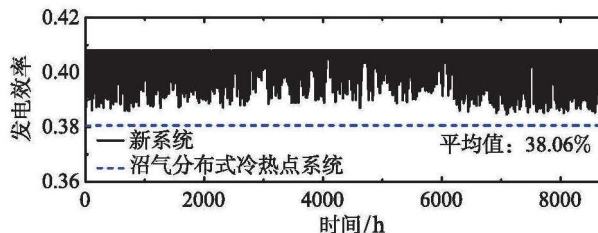


图 4 新系统和参比系统全年沼气发电效率对比

Fig. 4 Power efficiency for the biogas in proposed and reference systems

图 5 表示新系统和参比系统的全年发电量。为了清晰地对比出系统间的产能差异,全年发电量以逐月进行展示。太阳能碟式斯特林机的逐月发电量按照其全年平均发电效率(20%)确定。碟式斯特林机的逐月发电量受太阳辐照的影响,其最大发电量出现在11月,为12 MWh;其最低发电量出现在八月,为5.9 MWh。由于沼气产量稳定,单独利用沼气的分布式冷热电联供系统全年始终处于额定工况运行,每月发电量为346.4 MWh。在新系统中,太阳能通过沼气重整反应,使得其以合成气的能量形式在内燃机中发电。相比于碟式斯特林机,新系统中的太阳能发电效率大幅提升。因而在新系统中,其逐月发电量均高于参比系统,其全年发电总量达到4,557.5 MWh,其产电增加率(I_e)达到7%。

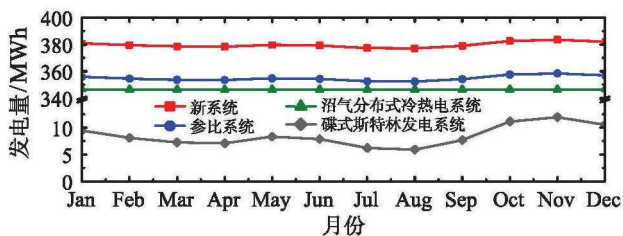


图 5 新系统和参比系统全年发电量对比

Fig. 5 Annual power generation in proposed and reference systems

3.2 全年天然气消耗量对比

沼气池保温所需的热负荷取决于大气温度,当内燃机缸套水和排烟余热均不能满足该热负荷时,天然气作为补充燃料进行供热。图 6 显示出了全年两系统动力机械中可用余热的变化情况。在参比系统中,太阳能仅通过碟式斯特林机产出电能,而在新系统中,太阳能通过沼气重整的方式转化为合成气的化学能,再依次转化为电、冷和热。因而在有太阳能输入的时刻里,新系统中可用的余热均高于参比系统。当太阳能不可用时,新系统中的内燃机处于部分负荷下运行,其可用余热仍高于参比系统。

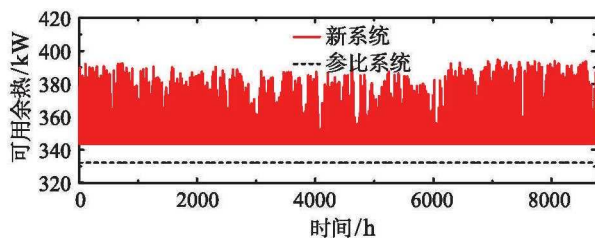


图 6 新系统和参比系统可用余热情况

Fig. 6 Available heat in proposed and reference systems

图 7 为全年新系统和参比系统中天然气的消耗情况。无论是新系统和参比系统,冬季天然气消耗量远高于夏季消耗量。天然气消耗量最高值出现在1月份,最小值出现在7月份。对于新系统,全年天然气消耗量达到123095 m^3 ,天然气节约率(S_f)达到11.72%。

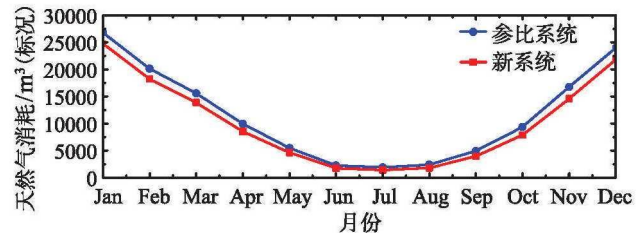


图 7 新系统和参比系统全年天然气消耗量

Fig. 7 Natural gas consumption in proposed and reference systems

3.3 全年产冷量对比

当缸套水热量超过沼气池保温所需热负荷时,多余热量需通过散热器排出,以保证对内燃机的冷却效果。图 8 显现出了全年新系统和参比系统中缸套水的散热量情况。在参比系统中,全年散热时长为27 h,最大散热量为35.41 kW。由于太阳能的引入,新系统中的散热时长达到了58 h,最大散热量为58.78 kW。

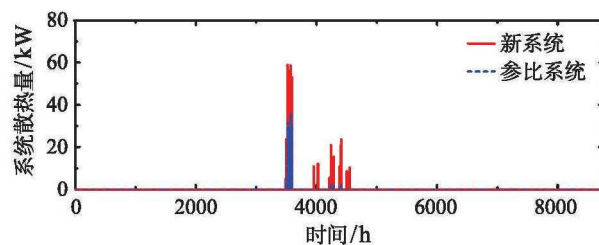


图 8 新系统和参比系统全年散热量

Fig. 8 Released heat in proposed and reference systems

图 9 展示了新系统和参比系统全年可用制冷的余热分布情况。对于新系统和参比系统,其制冷可用余热在夏季达到最大值,在过渡季节时较小,在冬季时无可用制冷余热。由于新系统中实现了太阳能和沼气的综合梯级利用,其制冷可用余热均高于参比系统。

图 10 展示了新系统和参比系统全年的产冷量。对于两系统,其制冷量从每年四月份逐渐增加,在六月份达到峰值后逐渐降低,在十一月份时制冷量降低为0。新系统中全年制冷量达到165.5 MWh,产冷增加率(I_c)达到54.96%。

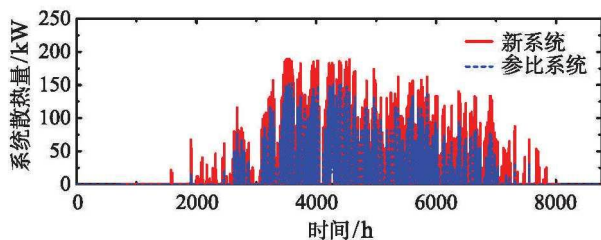


图9 新系统和参比系统全年可用制冷的余热

Fig. 9 Available heat for cooling in proposed and reference systems

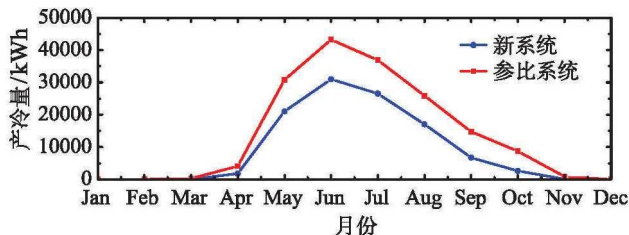


图10 新系统和参比系统全年产冷量

Fig. 10 Cold energy production in proposed and reference systems

4 结 论

本文提出了一种沼气和太阳能热化学互补的分布式能量系统,对其全年基本热力性能进行了评估,阐释了沼气和太阳能互补利用的优势,研究得出以下结论:

1) 通过沼气重整反应,太阳能首先转变为合成气的化学能再加以利用,提升了太阳能的利用品位,使得太阳能发电效率进一步升高。新系统中的产电增加率(I_e)达到7%。

2) 太阳能以合成气的形式进行利用,使得动力机械的可用余热量增加,减少了沼气池保温所需的天然气补燃量。新系统中的天然气节约率(S_f)达到11.7%。

3) 新系统中动力余热的增加使得其全年产冷量大幅增加。其产冷增加率(I_c)达到54.9%。

本研究为沼气的高效利用提供了一种新型技术方案。

参 考 文 献

- [1] CHEN Yi, ZHANG Tiantian, YANG Hongxing, et al. Study on Energy and Economic Benefits of Converting a Combined Heating and Power System to a Tri-generation System for Sewage Treatment Plants in Subtropical Area [J]. Applied Thermal Energy, 2016, 94: 24–39
- [2] ZHANG Ge, LI Yong, DAI Yanjun, et al. Design and Analysis of a Biogas Production System Utilizing Residual Energy for a Hybrid CSP and Biogas Power Plant [J]. Applied Thermal Energy, 2016, 109, Part A: 423–431
- [3] WU Shuangying, XIAO Lan, CAO Yiding, et al. A Parabolic Dish/AMTEC Solar Thermal Power System and its Performance Evaluation [J]. Applied Energy, 2010, 87: 452–462
- [4] SU Bosheng, HAN Wei, JIN Hongguang. Proposal and Assessment of a Novel Integrated CCHP System with Biogas Steam Reforming Using Solar Energy [J]. Applied Energy, 2017, 206: 1–11
- [5] HE Xiaohong, CAI Ruixian. Typical Off-Design Analytical Performances of Internal Combustion Engine Cogeneration [J]. Frontiers of Energy and Power Engineering in China, 2009, 3: 184–192
- [6] WANG Jiangjiang, JING Youyin, ZHANG Chunfa. Optimization of Capacity and Operation for CCHP System by Genetic Algorithm [J]. Applied Energy, 2010, 87: 1325–1335