

Research on CIGS Photovoltaic Power Generation and Heat Pump Cogeneration System

Xiaoming Xu, Xiaohui Zhong*, Lizhi Wang, Pengfei Zhao

Shenhua Engineering Technology Co., Ltd., Beijing
Email: *zhongxiaohui1017@163.com

Received: Feb. 5th, 2019; accepted: Feb. 20th, 2019; published: Feb. 28th, 2019

Abstract

In order to maximize the use of solar energy in the building, CIGS photovoltaic modules and heat pumps are combined to build CIGS cogeneration system. The system model is established, and its thermoelectric output characteristics are simulated. The results show that the system thermal efficiency and power efficiency increase gradually with the increase of working medium inlet flow, and the power efficiency of system decrease with the increase of evaporation temperature, when the working medium temperature is 0°C, the power efficiency can reach 16.88%. The research results can provide some reference for the combined operation of CIGS photovoltaic power generation system and heat pump system.

Keywords

CIGS, Photovoltaic Power Generation, Heat Pump, Cogeneration

CIGS光伏发电与热泵热电联产系统研究

徐晓明, 钟晓晖*, 王立志, 赵鹏飞

神华工程技术有限公司, 北京
Email: *zhongxiaohui1017@163.com

收稿日期: 2019年2月5日; 录用日期: 2019年2月20日; 发布日期: 2019年2月28日

摘要

为最大限度地建筑上利用太阳能, 将CIGS光伏组件与热泵结合, 构建CIGS热电联产模式, 建立了系统

*通讯作者。

的模型, 并对其热电输出特性进行仿真计算。计算结果表明, 系统热效率与电效率随着工质入口流量的增加都逐渐增加, 随着蒸发温度的升高, 系统的发电效率会线性下降, 工质温度为 0°C 时, 发电效率可达到16.88%。其研究结果可为CIGS光伏发电系统与热泵系统联合运行提供参考。

关键词

CIGS, 光伏发电, 热泵, 热电联产

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池的转化效率是所有薄膜太阳能电池中最高的, 已成为全球光伏领域研究热点之一, 由于对光照角度要求低, CIGS 光伏组件作为建材产品可安装于建筑物外立面, 同时它能够以多种方式嵌入屋顶, 非常适合太阳能光伏建筑一体化和大型并网电站项目。随着百分之百新能源城市概念的提出, 其潜在的市场需求十分巨大。由于 CIGS 光伏组件的发电效率与其背板温度成反比[1], 组件温度每上升 1°C , 效率将下降0.36%。如果 CIGS 光伏组件工作环境温度过高将导致其发电效率大幅降低。目前, CIGS 薄膜太阳能电池在标况下光电转换效率仅有13%~20%左右, 其吸收的太阳辐射能80%以上未被利用, 这部分太阳辐射能被电池吸收转化为热能, 导致光电转换效率下降[2]。为降低光伏背板温度及提高光电转换效率, 国内外学者主要采用水和空气作为工作介质对光伏电池进行冷却散热, 并做了大量相关研究工作[3] [4] [5], 这种技术被称为光伏光热(PV/T)技术。太阳能和热泵联合运行技术是太阳能利用技术的另一种形式, 太阳能和热泵结合形式是多种多样的, 研究主要集中于太阳能与空气源热泵或水源热泵联合运行[6] [7] [8], 但相关理论的研究尚需完善。本论文将 CIGS 光伏组件与直膨式热泵蒸发器合二为一, 构建了一种新型 PV/T 热电联供系统, 使得制冷剂可以在 CIGS 光伏背板中直接蒸发吸热, 节省了常规的空气或水循环系统与热泵循环之间的换热设备, 不仅简化了系统结构, 还可以有效提高光伏组件和热泵的制热性能。

2. CIGS 光伏发电与热泵热电联产系统

CIGS 光伏组件的光电转换效率与电池本身的温度以及辐射强度有关, 当太阳能辐射强度一定时, 光伏电池的光电转换效率与电池温度的变化成反比, 即随着光伏电池板的温度升高, 光电转换效率降低。通过对现有标准 CIGS 光伏组件的测试结果可知, CIGS 光伏板的工作温度每降低 1°C , 光电转换效率可提高0.36%左右。热泵循环的理论性能系数与蒸发温度和冷凝温度有关, 冷凝温度一定时, 蒸发温度越高, 热泵制热性能系数越高。CIGS 光伏发电与热泵热电联产系统可以充分利用光伏背板产生的余热, 有效提高光伏组件和热泵的制热性能, 满足建筑物用电、供热或生活热水的需求。

CIGS 与热泵热电联产系统如图1所示, 主要包括 CIGS 光伏组件、热泵和组件监测装置, CIGS 光伏发电系统包括 CIGS 光伏组件、逆变器和交流汇流箱; 热泵包括压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器盘管; 组件监测装置用来测量 CIGS 光伏组件光电转换效率和光热转换效率。CIGS 与热泵联合运行模式下, CIGS 光伏组件与热泵独立运行又互相耦合, 当热泵系统工作时, 低温低压制冷剂气体经压缩机压缩成高温高压制冷剂气体, 经膨胀阀后进入冷凝器, 冷凝器产生的热水供用户使用, 经冷凝器冷凝后的高压低

温制冷剂液体经膨胀阀节流后变为低压低温制冷剂气液两相共存，而后进入盘管式蒸发器，制冷剂在盘管式蒸发器中吸收来自光伏背板的余热，成为低压低温制冷剂气体后进入压缩机，完成一个工作循环。

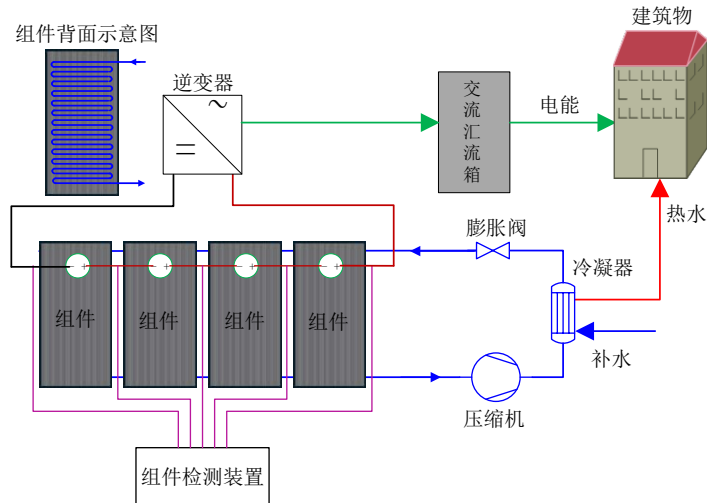


Figure 1. CIGS photovoltaic power generation and heat pump cogeneration system

图 1. CIGS 光伏发电与热泵热电联产系统

3. 系统模型

光伏电池的输出功率可用下式计算[9]:

$$P_{pv} = \tau_g \alpha \eta_{pv} E_s A_p \quad (1)$$

上式中, η_{pv} 为光伏组件的光电输出效率, 其表达式为:

$$\eta_{pv} = \eta_{p0} \left[1 - \beta (t_p - t_{p0}) \right] \quad (2)$$

式中 η_{p0} 表示光伏组件在标准工况下的发电效率, β 为光伏组件效率温度因素, $1/^\circ\text{C}$; t_{p0} 为参考温度, 一般取为 25°C 。

对于热泵机组盘管蒸发器, 由能量守恒有:

$$\frac{(T_k - T_w)}{R_{wk}} - a_i A_r (T_w - T_r) = 0 \quad (3)$$

其中, T_k 为 CIGS 组件背板温度, K; T_w 为盘管蒸发器铜管温度, K; T_r 为制冷剂的温度, K。

制冷剂工质与管壁之间的对流换热系数, 在单相区采用 Dittus-Boelter 关系式[10]:

$$\alpha_r = 0.023 \frac{\text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \lambda}{D_i} \quad (4)$$

式中: Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; λ 为工质的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; D_i 为管壁的内径, m。

两相区工质的对流换热系数:

$$\alpha_{tp} = \begin{cases} \alpha_r(x), & 0.2 < x < x_d \\ \alpha_r(x_d) - \left(\frac{x - x_d}{1 - x_d} \right)^2 (\alpha_r(x_d) - \alpha_s), & x \geq x_d \end{cases} \quad (5)$$

4. 模拟结果及分析

工质焓值随管长的变化曲线图 2 可以看出, 工质的焓值随管道长度的增加而增加; 且随着工质质量流量的增加, 斜率呈减小的趋势。

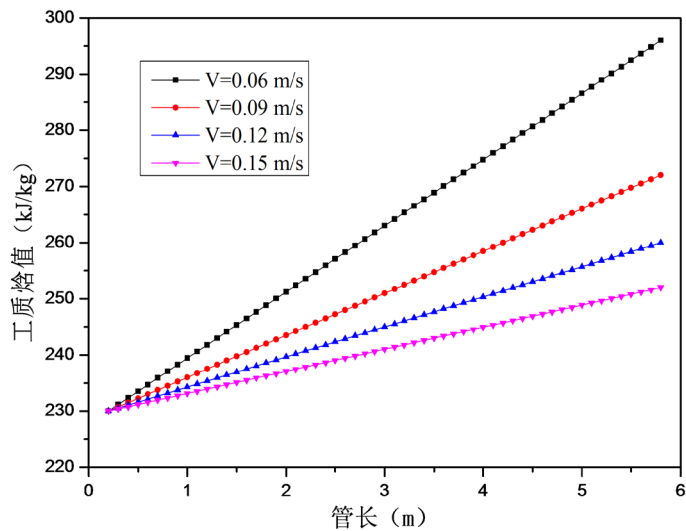


Figure 2. Working fluid enthalpy curve with tube length

图 2. 工质焓值随管长的变化曲线

工质流速随管长的变化如图 3 所示。从图中可以看出, 工质的对流换热系数随管长的增加而增加, 这主要是由于两相区, 随着干度的增加, 气体所占比例逐渐增加, 同等条件下, 气体的对流换热效果优于液体的对流换热效果。

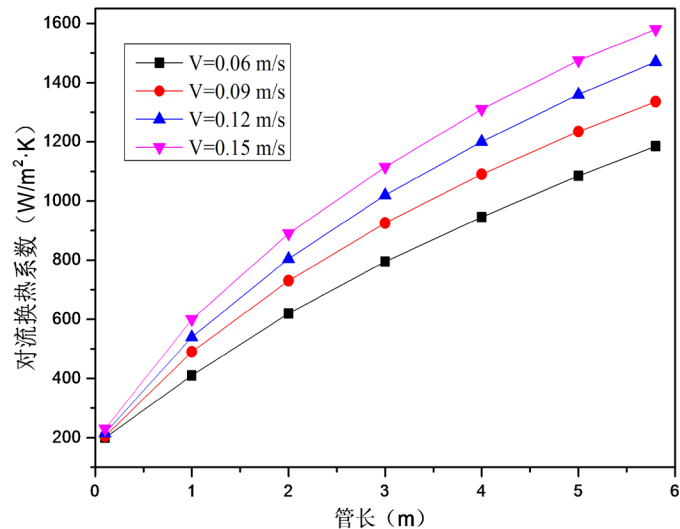


Figure 3. Convective heat transfer coefficient curve with tube length

图 3. 对流换热系数随管长的变化曲线

系统热效率与电效率随工质入口流量的变化如图 4 所示。随着工质入口流量的增加, 系统的热效率与电效率都逐渐增加, 热效率可达到 52.3%, 电效率为 15.3%, (质量流量为 0.012 kg/s 的情况下)。发电

效率、热泵 COP 随蒸发温度变化曲线如图 5 所示。可见，当蒸发温度升高时，系统的发电效率会线性下降，工质温度为 0℃时，发电效率可达到 16.88%；当冷凝温度一定时，随着蒸发温度降低，热泵机组 COP 降低，在蒸发温度为 16℃时 COP 降低速率放缓。

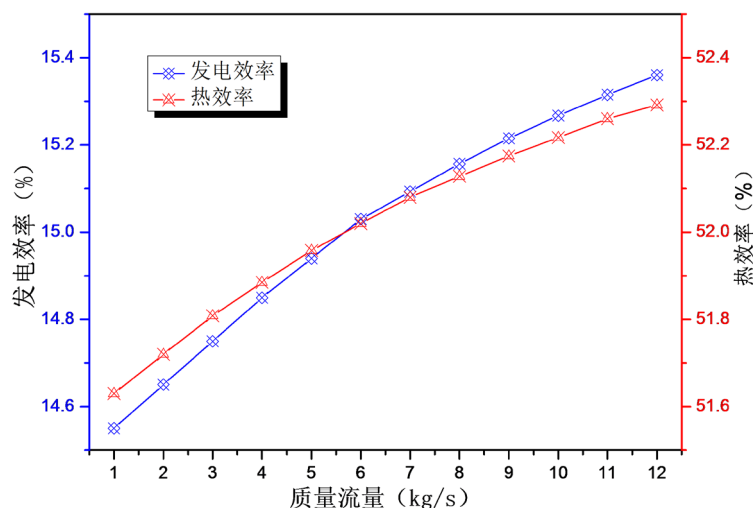


Figure 4. Electrical and thermal efficiency curve with the mass flow rate of the working fluid

图 4. 电效率热效率随工质流量变化曲线

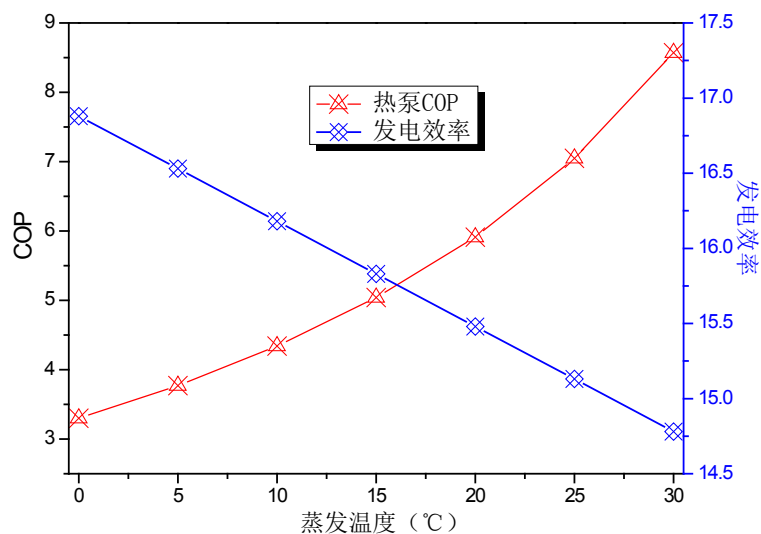


Figure 5. Electrical and thermal efficiency curve with the temperature of inlet working fluid

图 5. 电效率、热效率随工质入口温度变化曲线

5. 结论

- 1) 随着冷却工质温度下降，CIGS 光伏板发电效率线性增加，工质温度为 0℃时，发电效率可达到 16.88%；
- 2) 随着工质入口流量和换热器管长的增加，系统的热效率与电效率都逐渐增加；
- 3) 当蒸发温度升高时，光伏组件发电效率下降，而热泵 COP 随着蒸发温度升高而降低，蒸发温度

为 16℃时, 热泵 COP 的降低速率放缓。

基金项目

住建部《CIGS 太阳能薄膜发电技术在光伏建筑一体化中的应用研究》(2017-K1-027)。

参考文献

- [1] 季杰, 程洪波, 何伟, 等. 太阳能光伏光热一体化系统的实验研究[J]. 太阳能学报, 2005, 26(2): 170-173.
- [2] Zondag, H.A., De Vries, D.W., *et al.* (2003) The Yield of Different Combined PV-Thermal Collector Designs. *Solar Energy*, **74**, 253-269. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00121-X)
- [3] Kratter, S. (2004) Development of an Integrated Solar Home System. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **82**, 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.01.010>
- [4] Chow, T.T. and Pei, G. (2009) Energy and Exergy Analysis of Photovoltaic-Thermal Collector with and without Glass Cover. *Applied Energy*, **86**, 310-316. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.016>
- [5] 季杰, 刘可亮, 裴刚, 等. 对太阳能热泵 PV 蒸发器的理论研究及基于分布式参数法的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2006, 27(12): 1202-1207.
- [6] Huang, B.J. and Chyng, J.P. (2001) Performance Characteristics of Integralttype Solar-Assisted Heat Pump. *Solar Energy*, **71**, 403-414. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00076-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00076-7)
- [7] Chyng, J.P., Lee, C.P. and Huang, B.J. (2003) Performance Analysis of a Solar-Assisted Heat Pump Water Heater. *Solar Energy*, **74**, 33-44. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00110-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00110-5)
- [8] Bellos, E., Tzivanidis, C., Moschos, K., *et al.* (2016) Energetic and Financial Evaluation of Solar Assisted Heat Pump Space Heating Systems. *Energy Conversion & Management*, **120**, 306-319. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.004>
- [9] 何汉峰, 季杰, 裴刚, 等. 基于稳态分布参数模型的光伏蒸发器的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2007, 28(11): 1173-1181.
- [10] 丁国良, 张春路. 制冷空调装置仿真与优化[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-9219, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: se@hanspub.org