

文章编号:0253-4339(2026)03-0093-07
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250321001

寒冷地区 PV/T 耦合地源热泵跨季蓄能系统全年运行分析

吕雪平¹ 于涛¹ 宋恩强² 李向东³ 庄兆意¹

(1 山东建筑大学热能工程学院 济南 250101; 2 山东万邦科技发展集团有限公司 济南 250100;

3 山东省建筑设计研究院有限公司 济南 250001)

摘 要 基于济南市某办公建筑的 PV/T 耦合地源热泵跨季蓄能系统,将实测与 TRNSYS 仿真和 GeoStar 模拟相结合,探讨耦合系统的全年运行特性,对比分析耦合系统与单一地源热泵系统运行 10 年的地温和能效变化。结果表明:耦合系统制冷季与供暖季综合能效比均高于 1.5,最高可达 2.21;可再生能源分数在过渡季表现最佳,4 月可达 0.9;夏季, PV/T 余热的注入对热泵性能存在抑制,热泵平均 COP 比冬季降低 10.5%,综合能效比冬季低 4.97%。运行 10 年,耦合系统土壤温度下降 0.13 °C,综合能效比由 1.24 降至 1.22,可再生热分数从 0.459 降至 0.443;单一地源热泵系统的土壤温度下降 0.7 °C,综合能效比由 1.195 降至 1.15。 PV/T 耦合地源热泵系统通过“夏蓄冬用”实现了土壤热平衡调控与冷热电协同优化,为寒冷地区提供了高效可持续的清洁能源解决方案。

关键词 PV/T;地源热泵;地温平衡;跨季蓄能

中图分类号: TK513.5;TK529;TU83

文献标识码: A

Annual Operation Analysis of a PV/T-Coupled Ground-Source Heat Pump System with Cross-Seasonal Heat Storage in Cold Regions

Lü Xueping¹ Yu Tao¹ Song Enqiang² Li Xiangdong³ Zhuang Zhaoyi¹

(1. School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, 250101, China; 2. Shandong Wanbang Technology Development Group Co., Ltd., Jinan, 250100, China; 3. Shandong Provincial Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Jinan, 250001, China)

Abstract The annual operating characteristics of a photovoltaic/thermal (PV/T)-coupled ground-source heat-pump (GSHP) system with cross-seasonal heat storage for an office building in Jinan were investigated via on-site testing combined with TRNSYS and GeoStar simulations. For a ten-year operation period, the ground temperature and energy efficiency of the coupled and single GSHP systems were compared and analyzed. The results showed that the integrated energy efficiency ratio (IEER) of the coupled system exceeded 1.5 during the heating/cooling seasons, peaking at 2.21. The renewable energy fraction contributed by the PV/T components was highest during the transition season, peaking at 0.9 in April. In summer, the injected heat from PV/T inhibited the performance of the heat pumps, and the coefficient of performance (COP) and the IEER were 10.5% and 4.97% lower than those in winter. Over the ten-year operation period, for the coupled system, the soil temperature decreased by 0.13 °C, IEER decreased from 1.24 to 1.22, and the renewable heat fraction decreased from 0.459 to 0.443. For the standalone GSHP system, in contrast, the soil temperature decreased by 0.7 °C and the IEER decreased from 1.195 to 1.15. The PV/T-coupled ground source heat pump system achieved soil thermal balance regulation and coordinated optimization of cooling, heating, and power, thus providing an efficient and sustainable clean energy solution for cold regions.

Keywords photovoltaic/thermal; ground-source heat pump; ground thermal balance; cross-season heat storage

近年来我国能源消费呈低碳化趋势,低碳能源消费占比从 2013 年的 15.5% 稳步提升至 2023 年的 25.9%,清洁能源的强劲发展势头也推进了供暖方式的绿色低碳转型^[1-2]。

PV/T(太阳能光伏光热,photovoltaic/thermal)技术集成光伏发电和光热利用,实现了太阳能的热电联产。但 PV/T 组件在接收太阳辐射时会导致热量堆

积,极大影响光电效率^[3]。因此,早在光伏光热一体化研究初始,E. Bertram 等^[4]就提出将 PV/T 与 GSHP(地源热泵,ground-source heat pump)耦合,在提高 PV/T 光电产出的同时,解决地源热泵在工程应用中普遍存在的热失衡问题。国内外已有诸多关于 PV/T-GSHP 系统制热性能的研究。王海涛等^[5]搭建了 PV/T-GCHP 实验台,研究了制热工况下地埋管出水

温度对发电的影响,指出PV/T发电效率在热泵负荷为75%、地埋管出口水温度为8℃时可提高6.4%,PV/T-GSHPs平均制热性能系数比GSHPs提高2.2%。刘仙萍等^[6]以长沙某居住建筑为例,利用TRNSYS软件分析了设备配置对PV/T-GSHPs供热性能的影响,指出热泵能效提高了43.8%,PV/T组件温降可达35℃。M. Abu-Rumman等^[7]则指出PV/T-GSHPs可将PV/T组件降温20℃,发电效率提高9.5%,采暖季热泵耗电减少25.7%。张俊等^[8]采用TRNSYS模拟了PV/T-GSHP系统的供暖特性,指出集热水箱温度为5℃时系统能效最高。T. Gurler等^[9]实验研究了英国寒冷地区的PV/T-GSHPs系统,得出热泵在供热季的COP(性能系数,coefficient of performance)为2.30~2.43,PV/T组件的发电量与热泵机组能耗相当。Qiu Guodong等^[10]采用遗传算法优化地埋管长度与PV/T面积的匹配,指出PVT-GSHPs可使总埋管长度减少48.3%,系统COP提高10%。C. Pourier等^[11]将办公建筑的自然冷却与PV/T-GSHP集成,确定了PV/T模块的最优数量为96个,此时系统干扰比仅为0.89%,热不平衡率降低65%。

已有研究体现了PV/T-GSHP系统在提高PV/T发电效率和地源热泵冬季能效方面的优越性,但多数限于对供热工况的研究,缺少对系统制冷性能的表征,无法满足我国绝大部分地区都需要夏季制冷、冬季供热的实际需求。因此,本文搭建济南市某公共建筑PV/T-GSHP跨季蓄能系统,通过模拟和实测相结合的方法,研究系统的全年运行特性,为该系统在寒冷地区的全年运行提供基础数据和技术支撑。

1 工程概况与实测数据分析

1.1 工程概况

项目位于山东省济南市,属寒冷地区及太阳能资源Ⅲ类区,年平均日照时间为2 616.8 h,年日照百分率为55%,年太阳辐射为5 020~5 860 MJ/m²。

PV/T-GSHP系统为某面积为8 404.3 m²、高度为11 m的办公建筑提供空调冷热源,冬季和夏季室内设计温度分别为20℃和26℃。利用Sketchup对建筑进行建模,利用TRNSYS模拟建筑全年负荷(图1)。建筑最大冷负荷为1 006 kW,冷负荷指标为119.7 W/m²,最大热负荷为721 kW,热负荷指标为85.8 W/m²。

PV/T-GSHP跨季蓄能系统流程如图2所示,系统主要由PV/T组件、板式换热器、地埋管及地源热泵构成。地埋管循环流体流经PV/T背板,带走光伏板热量并将之蓄存于土壤。制冷季,太阳辐射强,PV/T组件出水温度高,为避免其对热泵机组性能的过度抑

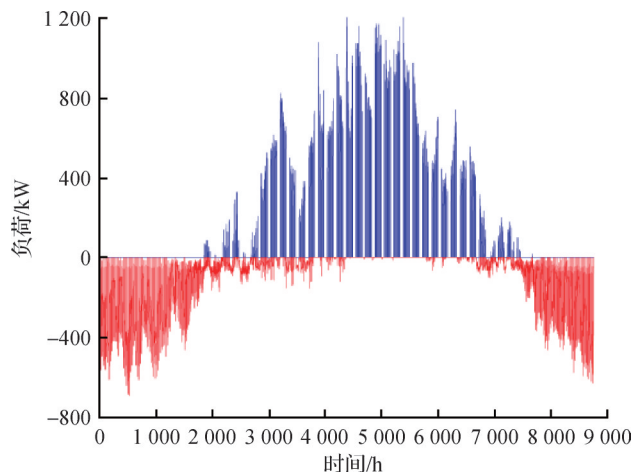


图1 建筑物全年负荷

Fig.1 Heating and cooling load of the building

制,将PV/T与热泵机组并联。地埋管出水被平分两路,一路流经热泵机组冷凝器侧进行热交换,另一路经板式换热器对光伏组件进行冷却,而后两路循环水通过地埋管回水管返回地下。根据温度变化控制系统启停:当PV/T组件出水温度 T_1 和地埋管进水温度 T_4 的温差超过5℃时($T_1-T_4>5℃$),集热泵和换热泵启动;当 T_1 和 T_4 的温差小于2℃时($T_1-T_4<2℃$),集热泵和换热泵停止运行。

根据地源热泵每年从土壤取热量和向土壤释热量的差值进行回灌配置,系统主要设备配置如表1所示。

1.2 评价指标

构建PV/T-GSHP多维度评价指标:以IEER(综合能效比,integrated energy efficiency ratio)评估系统能源综合利用效率,以RHF(可再生热分数,renewable heat fraction)量化PV/T组件对土壤补热的贡献,以RPF(可再生能源分数,renewable power fraction)评价PV/T组件发电替代传统电力的程度,以COP评价热泵运行性能。

1) 系统综合能效比IEER。

IEER是系统输出的总能量(电能、热能)与系统输入的总电能的比值,如式(1)所示^[12]。

$$\eta_{\text{IEER}} = \frac{\varepsilon_E E + \varepsilon_Q Q}{\varepsilon_E F_E} \quad (1)$$

式中: E 为系统发电量,kW·h; Q 为系统制冷量、制热量,kW; F_E 为系统总耗电量,kW·h,根据《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350—2019)^[13]确定; ε_E 为电力换算系数,取2.6; ε_Q 为热力换算系数,取1.22。

2) 可再生热分数RHF。

RHF为PV/T组件蓄热时向土壤释放的热量占系统总热交换量的比例^[10,14],计算式如下:

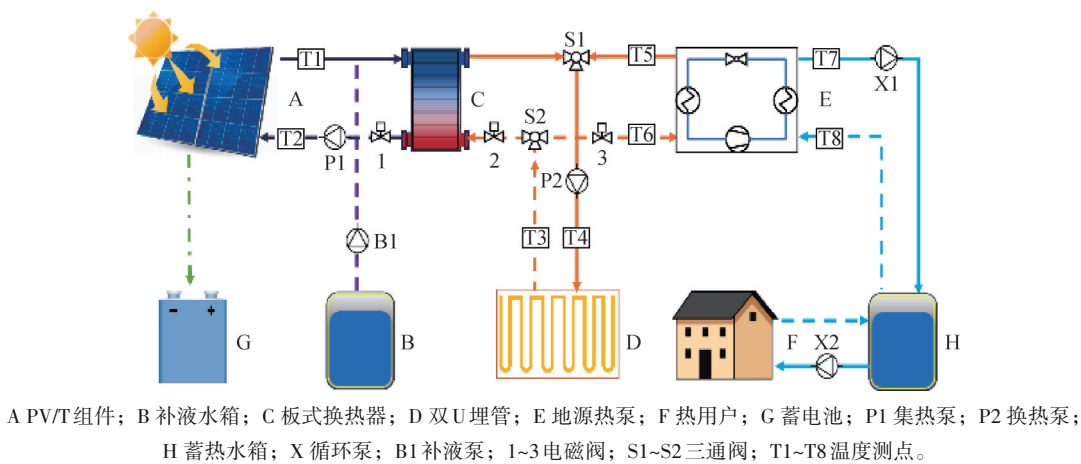


图 2 PV/T-GSHP 系统原理
Fig.2 Principle of PV/T-GSHPs system

表 1 PV/T-GSHP 主要设备参数
Tab.1 Parameters of main equipment in the PV/T-GSHP

设备	主要参数	数量
PV/T 组件	单板集热面积 2.56 m ² , 倾斜角 30°, 平均集热效率 0.45, 光电效率 0.2	290 组
双 U 埋管	钻孔 68 个, 钻孔间距 5 m, 埋管深度 200 m, 管道外径 32 mm	
螺杆式地源热泵	额定制冷量 1 074 kW, 额定制热量 1 108.3 kW, COP 5.90, IPLV 6.87	1 台
板式换热器	传热系数 2 550 W/(m ² ·K), 传热面积 33.9 m ²	1 台
集热循环泵	功率 7.5 kW, 流量 50 t/h, 扬程 28 mH ₂ O	2 台
热水换热泵	功率 18.5 kW, 流量 80 t/h, 扬程 47 mH ₂ O	2 台

注: IPLV (综合部分负荷性能系数, integrated part load value)。

$$\eta_{\text{RHF}} = \frac{\sum |Q_s|}{\sum (|Q_s| + |Q_{\text{hp}}|)}$$

(2)

式中: Q_{hp} 为热泵机组制热时从土壤中提取的热量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; Q_s 为 PV/T 组件蓄热时向土壤释放的热量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

3) 可再生能源分数 RPF。

RPF 为 PV/T 组件发电量在系统总功耗中的比例^[10,14], 计算式如下:

$$\eta_{\text{RPF}} = \frac{\sum E}{\sum (E_{\text{hp}} + E_{\text{pu}})}$$

(3)

式中: E_{hp} 为系统中泵的耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; E_{pu} 为系统中热泵机组的耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

4) 性能系数 COP。

COP 为制冷量或供热量与热泵机组功耗的比例^[15]:

$$\text{COP} = \frac{Q}{E_{\text{pu}}}$$

(4)

1.3 实测与数据分析

于 2024 年 8—9 月对该 PV/T-GSHP 进行实测, 实测结果如图 3 所示, 每 14 块 PV/T 板设置 1 个感温探头, 同时在地埋管和热泵进出口设置温度传感器和超声波热量表以监测温度和流量变化; 在蓄电池前设置 MPPT 控制器监测 PV/T 板的输出电压和电流; 在屋顶设太阳能辐射记录仪测试太阳辐射强度。数据由 PLC 控制柜采集并存储于云平台, 主要测试仪表参数如表 2 所示。

表 2 主要测试仪表参数
Tab.2 Main testing instrument parameters

系统部件	主要参数	数量
MPPT 太阳能控制器	系统电压: 12 V/24 V 自适应, 转换效率: 98%, MPPT 追踪效率: 99%, 空载损耗: 0.4 W	1 台
ST1004 温度传感器	测量范围: $-50 \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测量精度: $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	2 台
RLB 超声波热量表	温度范围: $4 \sim 95\text{ }^{\circ}\text{C}$, 流量范围: $0.07 \sim 7\text{ m}^3/\text{h}$, 温差范围: $3 \sim 75\text{ K}$	2 台
YGY-TBQ 太阳能辐射记录仪	测量范围: $0 \sim 2\text{ }000\text{ W}/\text{m}^2$, 测量精度: $\pm 5\%$	1 台

选取 2024 年 8 月 4 日 (夏季典型晴朗日) 的实测数据整理于图 3。

由图 3 可知, PV/T 出水温度 T_1 、热泵 COP 与当日太阳辐射强度显著相关, 13:30 时 T_1 达到顶峰 $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。地埋管进水温度变化滞后于 PV/T 出水, 介于 $14 \sim 22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 热泵在 07:00—20:00 时工作, 09:00 时 COP 最高可达 4.85, 随后因用户负荷及冷凝侧散热需求增加而略有下降, 当日热泵平均 COP 为 2.09; PV/T 累计发电量为 $154.49\text{ kW} \cdot \text{h}$, 平均发电功率为 6.44 kW ; IEER 为 1.80, RPF 为 0.44。

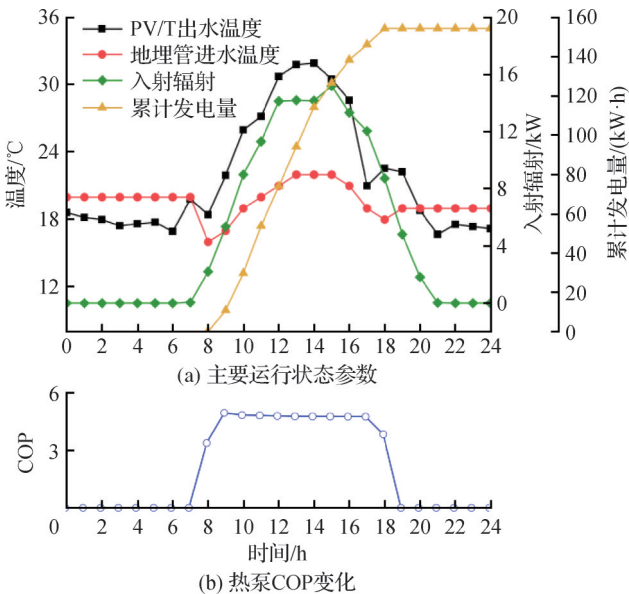


图 3 实测系统运行曲线

Fig.3 Typical daily system operating curve in summer

2 模型搭建与验证

2.1 模型搭建

采用 TRNSYS 搭建如图 4 所示的动态仿真模型,将周期性负荷导入负荷读取模块 Type9e,选取 Type225 作为热泵模块,该模块解决了软件自带模型机组冷热负荷匹配不均的问题。制冷季地源侧流体分流会导致热泵机组水流量下降,因此制冷季设置 COP 修正系数为 0.907^[16]。

为追求实验与模拟条件的一致性,仿真模型严格按照设备的实际参数进行设置。济南市实时气象数据由 NASA POWER 全球气象数据库导出,通过 Type15-6 模块读取。

2.2 模型验证

提取 2024 年 9 月 14 日 PV/T 出口水温和地埋管进口水温的模拟值,并与实测值进行对比,如图 5 所示。由图 5 可知,PV/T 组件出口水温和地埋管进口水温的实测值与模拟值的变化趋势基本一致,实测值与模拟值的相对误差多数在 10% 以内,表明了所建模型可靠,可用于耦合系统的仿真模拟。

3 结果与分析

为分析系统全年运行性能,选取 2024 年 1 月 1 日—12 月 31 日进行模拟,设置模拟起始时间为 0 h,结束时间为 8 760 h,时间步长为 1 h。

3.1 跨季蓄热

图 6(a)所示为 PV/T-GSHP 系统的逐月蓄热量,蓄热量为负表示从土壤中取热,为正表示向土壤蓄热。图 6(b)所示为耦合系统运行 10 年内的年取热量与年蓄热量的变化。

由图 6 可知,蓄热量在 6 月达到峰值 175.3 kW·h;系统运行 10 年,蓄热量由首年的 418.06 kW·h 降至 406.86 kW·h,降幅约为 2.72%,取热量则由 492.05 kW·h 增至 511.9 kW·h,增幅约为 3.4%。虽然 PV/T 组件余热的注入减缓了土壤温度的下降,但未能彻

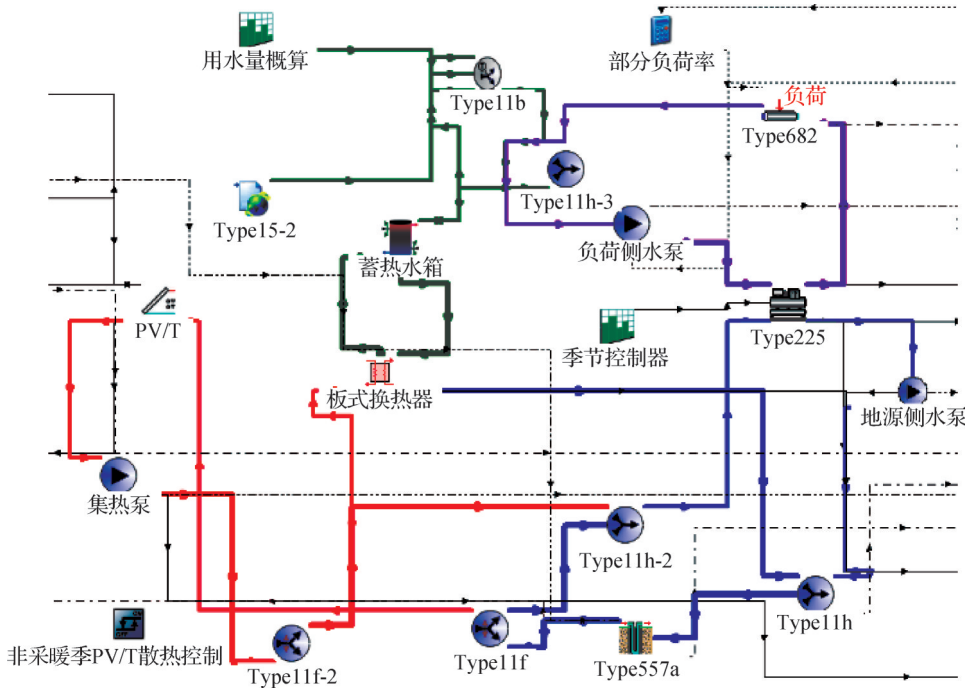


图 4 PV/T-GSHP 跨季蓄能系统仿真模型

Fig.4 Simulation model of PV/T-GSHP cross-season heat storage system

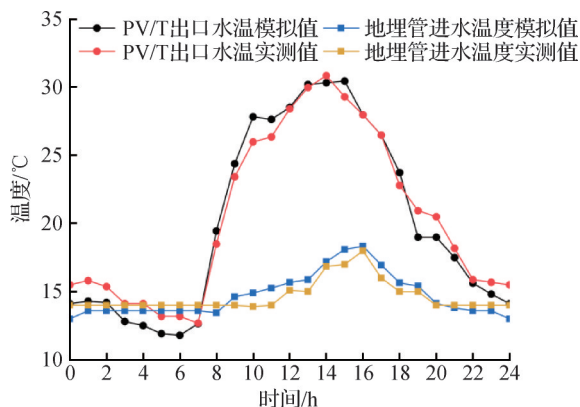
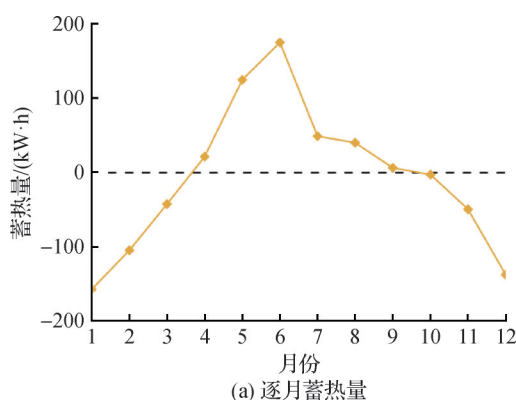
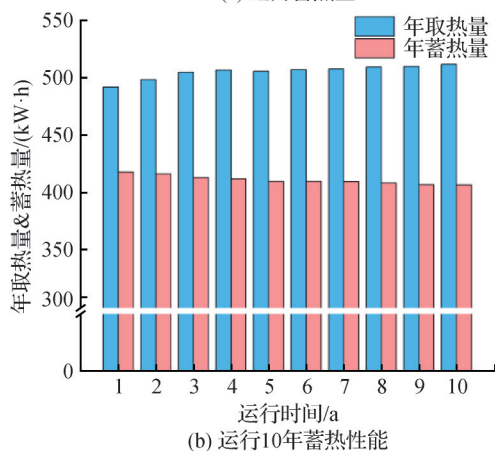


图 5 仿真模型验证

Fig.5 Validation of the simulation model



(a) 逐月蓄热量



(b) 运行10年蓄热性能

图 6 PV/T-GSHP 系统蓄热性能

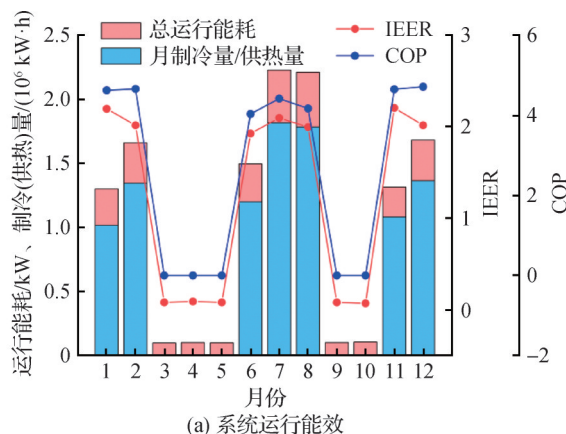
Fig.6 Thermal storage performance of PV/T-GSHP

底阻断由热不平衡导致的土壤温度微小但持续的下降趋势,这与用户供暖季长于制冷季且冬季取热量高于夏季蓄热量相关。

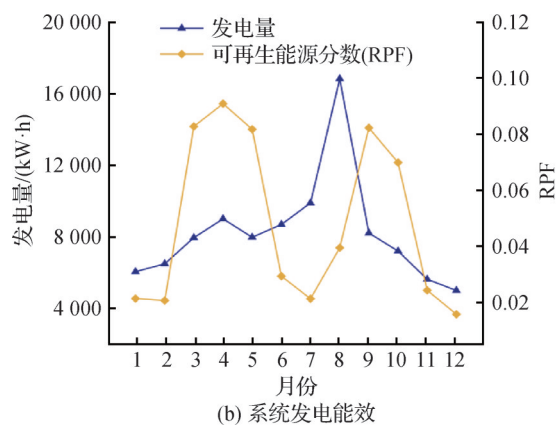
3.2 系统能效分析

模拟周期内, PV/T-GSHP 系统运行能效如图 7 所示。

由图 7(a)可知,系统在夏季与冬季的平均 IEER 均保持在 1.5 以上,在 11 月可达 2.21,全年 IEER 为 1.24。夏季制冷工况下,热泵平均 COP 比冬季低 10.5%, IEER 比冬季低 4.97%,这是因为 PV/T 余热注



(a) 系统运行能效



(b) 系统发电能效

图 7 系统运行能效分析

Fig.7 Simulated energy efficiency the system

入和对土壤温度的提升在冬季对热泵系统是正效应,在夏季则为负效应。由图 7(b)可知,系统发电量在 8 月达到顶峰,但该月 RPF 仅为 0.29,这与供冷需求和热泵耗电增加有关。RPF 在过渡季高于冬夏季,在 4 月达到峰值 0.9,此时用户几乎无用热/冷需求,系统专注于直接利用太阳能发电及储存余热,环境效益显著。

夏季,由负荷需求增高及 PV/T 余热注入引发的土壤热干扰削弱了热泵的运行效率,这一方面可由夏季 PV/T 组件发电量的显著提升来弥补;另一方面,可建立地温梯度补偿机制,通过地埋管井群控制和增加热量去向等方式,提高 PV/T-GSHP 系统在制冷工况下的能效。

3.3 耦合系统与单一 GSHP 系统对比

3.3.1 运行 10 年地温对比

地埋管换热器周围土壤温度变化是衡量土壤热积累的重要指标,因此,采用地热之星 GeoStar 软件对 PV/T-GSHP 系统与单一 GSHP 系统的土壤温度变化进行模拟。设定土壤平均温度初始值为 13.6 °C,钻孔采用几何排列,回填材料导热系数为 2.07 W/(m·K)。运行 10 年, PV/T-GSHP 系统与单一 GSHP 系统的土壤温度及热泵进出口水温度变化如图 8 所示。

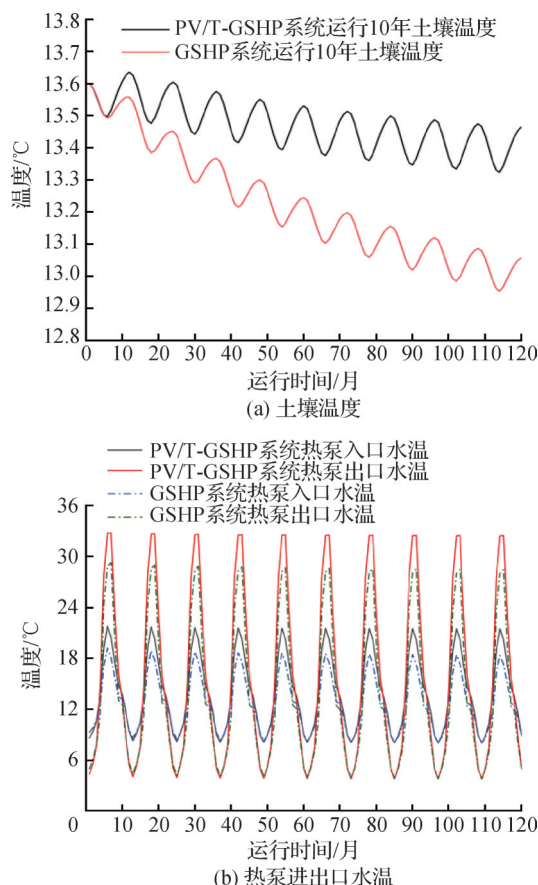


图8 土壤温度及热泵进出口水温

Fig.8 Soil temperature and heat pump inlet/ outlet water temperature

由图8(a)可知,得益于PV/T组件在夏季对土壤的回灌,耦合系统运行10年后的土壤温度为13.47℃,较初始温度下降了0.13℃,降幅为0.9%。但对于单一地源热泵系统,从土壤中提取的热量多于向土壤释放的热量,导致土壤温度逐年下降,在第10年土壤温度为12.9℃,较初始温度降幅达5%。由图8(b)可知,PV/T-GSHP系统热泵进出口水温基本稳定,平均入口温度为13.99℃,较单一GSHP系统高1.25℃,这表明PV/T组件对土壤的补热有效抑制了地下热场的单向耗散,所形成“夏蓄冬用”的动态平衡机制实现了对地温的修复。

3.3.2 运行10年综合能效对比

运行10年,PV/T-GSHP系统与单一GSHP系统的综合能效及PV/T-GSHP系统的可再生热分数如图9所示。

由图9可知,耦合系统的IEER从第1年的1.24降至第10年的1.22,降幅仅为1.6%,而单一GSHP系统的IEER则由1.195降至1.15,降幅达3.7%。与此同时,PV/T-GSHP系统的RHF由0.459略降至0.443,这与年蓄热量的下降相吻合。PV/T-GSHP系

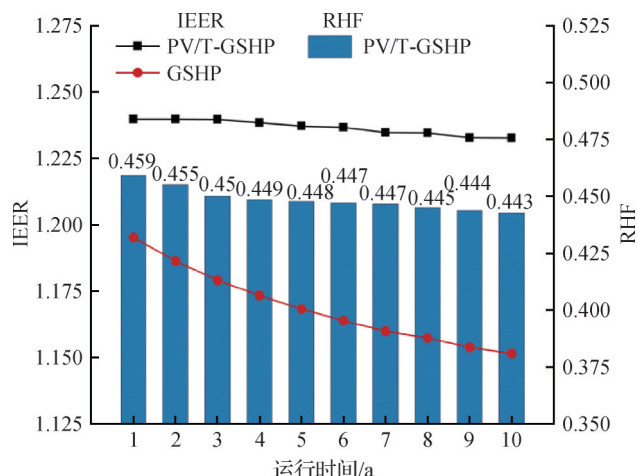


图9 PV/T-GSHP系统与单一GSHP系统IEER对比及PV/T-GSHP系统的RHF

Fig.9 IEER of the PV/T-GSHP and the GSHP and RHF of the PV/T-GSHP

统运行10年内综合能效较稳定,这归因于其优越的土壤热平衡调控能力。

4 结论

本文研究了寒冷地区PV/T-GSHP系统的跨季蓄能技术,通过实测与模拟相结合的方法,分析了该系统的全年综合运行能效,得到结论如下:

1)实测到PV/T-GSHP系统在夏季典型晴朗日的热泵平均COP为2.09,IEER为1.80,RPF为0.44,平均发电功率为6.44 kW,累计发电量为154.49 kW·h。

2)PV/T-GSHP系统在制冷季与供暖季的平均IEER均高于1.5,在11月高达2.21,全年IEER为1.24。可再生能源分数在过渡季表现更优,在4月可达0.9,环境效益得以彰显。

3)夏季,即使PV/T发电量增加,且将PV/T与热泵机组并联,PV/T余热的注入仍对热泵机组性能产生抑制作用,夏季热泵平均COP比冬季低10.5%,IEER比冬季低4.97%,有必要通过埋管井群控制和增加热量去向等措施提高夏季能效。

4)运行10年内,PV/T-GSHP系统年取热量由492.05 kW·h增至511.9 kW·h,土壤温度下降0.13℃,热泵平均入口温度为13.99℃,IEER由1.24降至1.22,RHF由0.459降至0.443。与之相比,单一GSHP系统的土壤温度下降了0.7℃,热泵平均入口温度较耦合系统低1.25℃,IEER由1.195降至1.15。

总之,PV/T-GSHP跨季蓄热系统通过PV/T余热注入实现了太阳能的“夏蓄冬用”,有效抑制了土壤的热失衡,且该优势会随建筑冷热不平衡的加剧而得以凸显。PV/T-GSHP跨季蓄热系统兼顾了低碳能

源利用和综合能效提升,具有广阔的应用前景。

本文受山东省自然科学基金项目(ZR2022ME102),山东省科技型中小企业创新能力提升工程(2022TSGC1096)资助。(The project was supported by the Shandong Provincial Natural Science Foundation (No. ZR2022ME102) and Shandong Province Science and Technology SMEs Innovation Enhancement Project (No. 2022TSGC1096).)

参考文献

- [1] ZHONG Hai, WANG Jiajun, JIA Hongjie, et al. Vector field-based support vector regression for building energy consumption prediction[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 403–414.
- [2] 电力规划设计总院. 中国能源发展报告[R]. 北京: 人民日报出版社, 2023. (China Electric Power Planning & Engineering Institute. Report on China energy development [R]. Beijing: People's Daily, 2023.)
- [3] 马晓丰. 太阳能光伏光热—热泵系统动态模拟及优化研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018. (MA Xiaofeng. Dynamic simulation and optimization of solar photovoltaic photothermal heat pump system [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.)
- [4] BERTRAM E, GLEMBIN J, ROCKENDORF G. Unglazed PVT collectors as additional heat source in heat pump systems with borehole heat exchanger[J]. *Energy Procedia*, 2012, 30: 414–423.
- [5] 王海涛, 张季, 胡宁, 等. 光伏—土壤源热泵制热工况综合性能[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(8): 195–202. (WANG Haitao, ZHANG Ji, HU Ning, et al. Comprehensive performance of PV/T-GCHPS under heating conditions[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2023, 44(8): 195–202.)
- [6] 刘仙萍, 雷豫豪, 田东, 等. 夏热冬冷地区太阳能光伏/光热—地源热泵联合供热系统运行性能模拟[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(6): 1892–1900. (LIU Xianping, LEI Yuhao, TIAN Dong, et al. Numerical simulation for performance of solar photovoltaic/thermal-ground source heat pump hybrid heating system in hot summer and cold winter zone[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(6): 1892–1900.)
- [7] ABU-RUMMAN M, HAMDAN M, AYADI O. Performance enhancement of a photovoltaic thermal (PVT) and ground-source heat pump system [J]. *Geothermics*, 2020, 85: 101809.
- [8] 张俊, 刘杰, 陈安娟, 等. 基于TRNSYS的太阳能—土壤源热泵联合供暖系统特性分析[J]. *青岛理工大学学报*, 2022, 43(3): 121–127. (ZHANG Jun, LIU Jie, CHEN Anjuan, et al. Characteristic analysis of combined heating system of solar-soil source heat pump based on TRNSYS [J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2022, 43(3): 121–127.)
- [9] GURLER T, ELMER T, CUI Y, et al. Experimental investigation of a novel PVT/heat pump system for energy-efficient poultry houses [J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2018, 13(4): 404–413.
- [10] QIU Guodong, LI Kuangfu, CAI Weihua, et al. Optimization of an integrated system including a photovoltaic/thermal system and a ground source heat pump system for building energy supply in cold areas [J]. *Applied Energy*, 2023, 349: 121698.
- [11] POURIER C, BELTRÁN F, SOMMERFELDT N. Solar photovoltaic/thermal (PVT) technology collectors and free cooling in ground source heat pump systems [J]. *Solar Energy Advances*, 2024, 4: 100050.
- [12] 郭一村. 耦合地源热泵和PVT的三联供系统优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2023. (GUO Yicun. Optimization of triple supply system coupling ground source heat pump and PVT [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.)
- [13] 住近零能耗建筑技术标准: GB/T 51350—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (Technical standard for nearly zero energy buildings: GB/T 51350—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.)
- [14] SAKELLARIOU E I, AXAOPOULOS P J. Energy performance indexes for solar assisted ground source heat pump systems with photovoltaic-thermal collectors [J]. *Applied Energy*, 2020, 272: 115241.
- [15] 车雨晴, 陈怡, 于涛, 等. 相变蓄热太阳能热泵系统动态仿真研究[J]. *节能*, 2024, 43(10): 13–16. (CHE Yuqing, CHEN Yi, YU Tao, et al. Study on dynamic simulation of phase change thermal storage solar heat pump system [J]. *Energy Conservation*, 2024, 43(10): 13–16.)
- [16] 田鹏. 热带草原气候区空调系统方案优化分析[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022. (TIAN Peng. Optimization analysis of air conditioning system scheme in tropical grassland climate zone [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022.)

通信作者简介

于涛,女,副教授,山东建筑大学热能工程学院,15966320777, E-mail: hgdyutao@sina.com。研究方向:可再生能源建筑利用技术。

About the corresponding author

Yu Tao, female, associate professor, School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, 86-15966320777, E-mail: hgdyutao@sina.com. Research fields: utilization of renewable energy.