

DOI: 10.19666/j.rlfed.202312183

低倍聚光光伏/光热与地源热泵集成系统 综合分析及优化

石天庆¹, 商永强¹, 刘媛媛¹, 仲焕文², 王瑞林², 李文甲³, 卢勇宽¹

(1.华电郑州机械设计研究院有限公司, 河南 郑州 450046;

2.南京师范大学能源与机械工程学院, 南京 210023; 3.天津大学机械工程学院, 天津 300350)

[摘要] 将光伏/光热利用与地源热泵相互耦合, 有望利用光伏余热避免热泵性能衰减, 还可利用光伏电力部分满足热泵电能需求, 前景广阔。构建了低倍聚光光伏/光热与地源热泵的集成系统运行仿真模型, 对系统开展了运行性能分析; 并进一步研究了系统全生命周期成本的关键影响规律。结果表明: 集成系统光伏年均发电效率达 17.73%, 较单一运行系统提升 9.58%, 光伏/光热装置的光伏余热可有效减少土壤温度衰减, 热泵长时运行性能较参比系统提升 16.58%; 系统运维成本随光伏/光热装置和地源热泵规模增加而减少, 投资成本随之增加, 总的全生命周期成本随规模增加先减后增; 以全生命周期成本为目标函数, 基于粒子群算法开展系统经济性优化, 全生命周期成本较最大规模容量设计降低 31.52%。相关结论可为光伏/光热与地源热泵集成系统优化设计提供理论参考。

[关键词] 光伏/光热; 地源热泵; 联合供暖系统; 全生命周期; 成本分析

[引用本文格式] 石天庆, 商永强, 刘媛媛, 等. 低倍聚光光伏/光热与地源热泵集成系统综合分析及优化[J]. 热力发电, 2024, 53(7): 45-52. SHI Tianqing, SHANG Yongqiang, LIU Yuanyuan, et al. Comprehensive analysis and operation optimization of a system integrated with ground-source heat pump and solar photovoltaic/thermal component[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(7): 45-52.

Comprehensive analysis and operation optimization of a system integrated with ground-source heat pump and solar photovoltaic/thermal component

SHI Tianqing¹, SHANG Yongqiang¹, LIU Yuanyuan¹, ZHONG Huanwen², WANG Ruilin²,
LI Wenjia³, LU Yongkuan¹

(1. Huadian Zhengzhou Mechanical Design Institute Company Limited, Zhengzhou 450046, China;
2. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;
3. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The coupling of photovoltaic-thermal utilization and ground source heat pump is expected to use photovoltaic waste heat to avoid performance degradation of the heat pump, and also to use photovoltaic electricity to partially meet the energy demand of the heat pump, which has a broad prospect. A simulation model of the integrated system of low-concentration photovoltaic-thermal and ground source heat pump is constructed, and the operational performance of the system is analyzed. Moreover, the key influence laws of the life cycle cost of the system are also analyzed. The research results show that, the annual solar-to-electrical efficiency of the integrated system reaches 17.73%, which is 9.58% higher than that of the single operation system. The photovoltaic waste heat of the photovoltaic-thermal device can effectively reduce the soil temperature decay, and the long-term operation performance of the heat pump is 16.58% higher than that of the reference system. The operation and maintenance cost of the system decreases with the increase of the scale of the photovoltaic-thermal device and the ground source heat pump, while the investment cost increases accordingly. The total life cycle cost

收稿日期: 2023-12-25

基金项目: 中国华电集团重点科技项目 (CHDKJ22-01-23)

Supported by: Key Science and Technology Program of China Huadian Corporation (CHDKJ22-01-23)

第一作者简介: 石天庆 (1971), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为地热能利用及清洁供暖技术, shitq@chec.com.cn.

通信作者简介: 王瑞林 (1993), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为多能源系统互补集成、光伏光热综合利用, wangruilin@njnu.edu.cn.

of the system decreases at first and then increases with the increase of the scale. Taking the life cycle cost as the objective function, economic optimization of the system based on the particle swarm algorithm is carried out, and the life cycle cost reduces by 31.52% compared with the design of the maximum scale capacity. The relevant results can provide theoretical reference for optimal design of the photovoltaic-thermal-ground source heat pump integrated system.

Key words: photovoltaic/photothermal; ground source heat pump; hybrid heating system; whole life cycle; cost analysis

据国际能源署 (IEA) 2022 年发布的数据, 建筑运行所需能耗已占全球总能耗的 30%, 相应的碳排放则占全球总排放量的 27%^[1]。据 IEA 预测, 建筑运行所需能耗的绝对数值仍会快速增加, 2050 年将会增长至 160×10^9 GJ^[2]。地源热泵能效高、污染少, 节能潜力大, 被认为是满足建筑冷热需求的一种重要途径^[3], 在世界范围内得到了广泛应用。实际运行中, 地源热泵供暖时从土壤中抽取热量; 而在供冷季时, 则向土壤中释放热能。对于大多数区域, 热泵从土壤中抽取和向土壤中释放的热能并不平衡。尤其是供暖需求较为旺盛的地区, 长时间运行土壤温度逐渐降低, 地源热泵性能也因此下降^[4]。这种“热不平衡”引发的长时运行性能衰减, 阻碍了土壤源热泵技术的广泛应用^[5]。

近年来, 太阳能辅助地源热泵受到越来越多关注, 相较于传统单一运行地源热泵系统, 太阳能的引入可以避免“热不平衡”, 提高热泵长期运行性能, 减少化石能源消耗。Kjellsson 等人^[6]对比了平板太阳能集热器耦合土壤源热泵系统的不同运行方式。Rad 等人^[7]以加拿大多伦多某典型建筑为供能对象, 研究发现引入太阳能可减少地热换热器用量, 减少投资成本。Calise 等人^[8]研究发现, 太阳能辅助地源热泵耦合系统的热效率和电效率可分别高达 40% 和 10%。需说明的是, 引入太阳能可以有效提升地源热泵系统性能。但是在该系统中, 太阳能仅以低温热能形式被利用, 从品位角度分析, 存在较大的可用能损失; 另一方面, 太阳能平板集热仅能提供部分热能, 地源热泵所需电能全由外界供给, 会产生额外的碳排放和化石能源消耗。

在太阳能光伏/光热 (PV/T) 利用形式中, 光伏将太阳辐照的短波波段能量转化为电能, 剩余的辐照能量则被转化为热能并被光伏背板的流体吸收^[9]。这部分热能可用于提供生活热水^[10], 并带动发电循环^[11], 可有效提升装置对于太阳能的综合利用率和经济性^[12]。将 PV/T 技术与地源热泵相耦合, PV/T 面板产生的电能可部分满足热泵用电需求, 其余热也可用于缓解“热不平衡”引起的热泵性能衰退。

相较于太阳能与地源热泵直接耦合, PV/T 技术与地源热泵在能量的互补性上优势明显。金满等^[13]研究表明, PV/T 耦合地源热泵系统的热泵性能系数较单一热泵可提升 10.3%, 长时运行土壤温度降幅仅为 8.0%。刘仙萍等^[14]研究表明, 相较于平板集热器-地源热泵联合系统, PV/T 耦合地源热泵系统的全年运行能耗可降低约 50%, 而不同 PV/T 组件面积下, 热泵机组季节能效比均随埋管长度增加而小幅度上升, 但增幅并不显著^[15]。

现有研究已较好地揭示了光伏/光热-地源热泵集成系统的性能优势, 但是在其容量配置和经济性优化方面涉及较少。本文构建了光伏/光热-地源热泵集成系统土壤源热泵的集成系统运行仿真模型, 分析了集成系统中光伏/光热和地源热泵的全年运行性能, 对比参比系统揭示了系统性能优势; 进一步构建系统全生命周期成本分析模型, 分析了系统关键变量对成本的影响规律, 并基于粒子群智能算法, 完成了系统容量配置的经济性优化。本研究结论可为光伏/光热-地源热泵集成系统优化设计提供一定参考。

1 系统设计与建模

1.1 系统设计

图 1 为低倍聚光光伏/光热 (LCPV/T)-地源热泵集成系统示意。LCPV/T 装置中的聚光器聚焦太阳辐射于光伏电池板之上, 光伏电池板吸收太阳能转化为电力, 用于满足热泵或者住宅的用电需求。源自埋管的换热工质吸收光伏电池板余热并将之蓄存于土壤之中。受益于工质冷却, 光伏电池板温度降低, 其发电效率也因之提升。地源热泵在供热季和制冷季的运行模式不同: 供热季时, 图 1 中换热器 HEX1 和 HEX2 分别作为蒸发器和冷凝器运行, 吸收土壤中的热量并供给建筑物; 制冷季时, 土壤源热泵以制冷模式运行, 热泵吸收建筑中的热量并蓄存于土壤中, HEX1 和 HEX2 则分别发挥冷凝器和蒸发器的功能。需说明的是, 本文暂不考虑流体运输、聚光跟踪等其他伴生耗能影响。

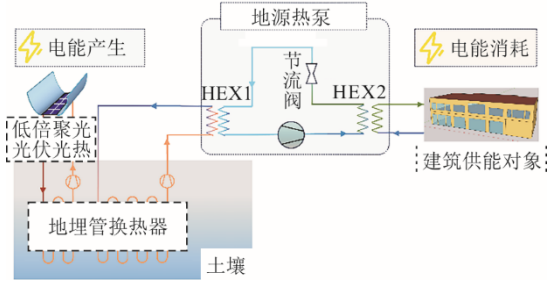


图1 LCPV/T-地源热泵集成系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the LCPV/T- ground-source heat pump integrated system

1.2 LCPV/T 模型

LCPV/T 的能量平衡式为：

$$I_{\text{DNI}} \cdot \cos \theta \cdot K_{\text{end}} \cdot A_{\text{a}} = Q_{\text{opt,loss}} + E_{\text{PV}} + Q_{\text{dis,heat}} \quad (1)$$

式中： I_{DNI} 和 A_{a} 分别为直射辐射强度和 LCPV/T 装置的有效开口面积； θ 为太阳辐射的入射角； K_{end} 为端部损失影响系数； $Q_{\text{opt,loss}}$ 、 E_{PV} 和 $Q_{\text{dis,heat}}$ 分别为 LCPV/T 的光学损失、发电量和热量损失。入射角 θ 可根据 LCPV/T 装置朝向、具体地理位置和当地时间等关键参数获得，计算方法参考文献[16]。 K_{end} 具体数值随辐照入射角变动而变动，具体计算方法参考文献[17]。

聚光过程中的光学损失计算公式为：

$$Q_{\text{opt,loss}} = I_{\text{DNI}} \cdot \cos \theta \cdot A_{\text{a}} \cdot (1 - \eta_{\text{opt}}) \quad (2)$$

式中： η_{opt} 为光学效率，考虑洁净度、镜面反射损失等因素，取值 90%^[11]。

发电量 E_{PV} 和散热损失 $Q_{\text{dis,heat}}$ 计算公式为：

$$E_{\text{PV}} = I_{\text{DNI}} \cdot \cos \theta \cdot A_{\text{a}} \cdot \eta_{\text{opt}} \cdot \eta_{\text{PV}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{dis,heat}} = I_{\text{DNI}} \cdot \cos \theta \cdot A_{\text{a}} \cdot \eta_{\text{opt}} (1 - \eta_{\text{PV}}) \quad (4)$$

$$\eta_{\text{PV}} = J_{\text{sc}} V_{\text{oc}} F_{\text{FF}} / Q_{\text{PV}} \quad (5)$$

式中： η_{PV} 为光伏电池的发电效率； J_{sc} 为短路电流； V_{oc} 为开路电压； F_{FF} 为填充因子。

短路电流 J_{sc} 的计算公式为：

$$J_{\text{sc}} = A_{\text{PV}} C_{\text{PV}} \eta_{\text{opt}} \int_{\lambda_{\text{L}}}^{\lambda_{\text{H}}} \frac{q \cdot \lambda \cdot I(\lambda) \cdot E_{\text{EQE}}}{hc} d\lambda \quad (6)$$

式中： A_{PV} 和 C_{PV} 分别为光伏电池的面积和聚光比； $q=1.63 \times 10^{-19} \text{ C}$ 为电子电荷； $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 和 $c=3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 分别为普朗克常数和光速； E_{EQE} 为光伏电池的量子效率。单晶硅光伏电池的量子效率和波长之间的关系参考文献[18]。

开路电压 V_{oc} 的计算公式为^[19]：

$$V_{\text{oc}} = \frac{nk_{\text{B}}T_{\text{PV}}}{q} \ln\left(\frac{J_{\text{sc}}}{J_0} + 1\right) \quad (7)$$

式中： $k_{\text{B}}=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 为玻尔兹曼常数； T_{PV} 为光伏

电池工作温度； J_0 为光伏电池的饱和电流； n 为理想系数。

饱和电流 J_0 的计算公式为^[19]：

$$J_0 = 1.5 \times 10^5 A_{\text{PV}} \exp\left(-\frac{E_{\text{g}}}{nk_{\text{B}}T_{\text{PV}}}\right) \quad (8)$$

式中： E_{g} 为光伏电池的带隙能，计算公式为^[20]：

$$E_{\text{g}} = E_{\text{g}}^0 - \alpha T_{\text{PV}}^2 / (T_{\text{PV}} + \beta) \quad (9)$$

式中： E_{g}^0 为 0 K 下的带隙能； α 和 β 为温度系数。对于单晶硅光伏电池， $E_{\text{g}}^0=1.1557 \text{ eV}$ ， α 和 β 的值分别为 7.021×10^{-4} 和 1108 ^[20]。

填充因子 F_{FF} 的计算方法为^[21]：

$$F_{\text{FF}} = \left[\zeta_{\text{oc}} - \ln(\zeta_{\text{oc}} + 0.72) \right] / (\zeta_{\text{oc}} + 1) \quad (10)$$

$$\zeta_{\text{oc}} = V_{\text{oc}} \cdot q / (n \cdot k_{\text{B}}T_{\text{PV}}) \quad (11)$$

根据式(8)一式(11)发现，光伏电池板的温度 T_{PV} 对 η_{PV} 值至关重要。稳定状态下的 T_{PV} 值可从光伏电池板的散热量 $Q_{\text{dis,heat}}$ 与光伏电池板向环境或工作流体的热量损失 $Q_{\text{PV,heatloss}}$ 之间的能量平衡中获得。当光伏电池板有流体工质冷却时， T_{PV} 值可视为光伏板中工作流体的平均温度。当光伏电池板在没有冷却流体的情况下运行时，其数值可通过计算为^[22]：

$$Q_{\text{PV,heatloss}} = \left[\alpha_1 (T_{\text{PV}} - T_{\text{amb}}) + \alpha_2 (T_{\text{PV}} - T_{\text{amb}})^4 \right] A_{\text{a}} \quad (12)$$

1.3 地源热泵模型

地源热泵在制热和制冷模式下的能量平衡式分别为：

$$Q_{\text{buildingcool}} = Q_{\text{groundcool}} - E_{\text{heatpump}} = (C_{\text{COP}_{\text{cool}}} - 1) E_{\text{heatpump}} \quad (13)$$

$$Q_{\text{buildingheat}} = Q_{\text{groundheat}} + E_{\text{heatpump}} = (C_{\text{COP}_{\text{heat}}} + 1) E_{\text{heatpump}} \quad (14)$$

式中：下标“heat”和“cool”分别表示供暖和制冷模式； Q_{building} 为建筑物的制冷或供暖负荷； W_{heatpump} 为热泵的耗电量； Q_{ground} 为从地面提取（供暖模式）或注入（制冷模式）的热能； C_{COP} 为热泵在不同模式下的性能系数。

本研究将制冷和制热模式下的额定 C_{COP} ($C_{\text{COP}_{\text{cool},0}}$ 和 $C_{\text{COP}_{\text{heat},0}}$) 分别设定为 3.92 和 4.96。根据 Gorden 等人^[23]及刘媛媛^[24]相关研究，变工况条件下，地源热泵的 C_{COP} 计算公式为：

$$C_{\text{COP}}^{-1} = (L + 0.667) \frac{T_{\text{in,cond}}}{T_{\text{out,eva}}} - 1.001 \cdot L - 0.651 \quad (15)$$

式中： L 为热泵的负载率，即实际负荷和核定负荷的比值； $T_{\text{in,cond}}$ 和 $T_{\text{out,eva}}$ 则分别为冷凝器入口流体和蒸发器出口流体的温度，单位为绝对温标。

1.4 埋管换热器模型

铺设在地下的埋管换热器用于实现流体质与土壤之间的热量交换。工作流体与土壤之间交换的热量 Q_{ground} 可按下式计算:

$$Q_{\text{ground}} = L_{\text{HEX}} (T_{\text{ground}} - T_{\text{mean,fluid}}) / R_{\text{HEX}} \quad (16)$$

式中: L_{HEX} 为地热交换器的管子总长度; T_{ground} 和 $T_{\text{mean,fluid}}$ 分别为地表温度和地热交换器内工作流体的平均温度; R_{HEX} 为埋管换热器单位长度的等效热阻, 取值 $0.6469 \text{ K}/(\text{W}\cdot\text{m})^{[25]}$ 。

L_{HEX} 值可根据 Q_{ground} 值和 T_{ground} 与额定条件下的 $T_{\text{mean,fluid}}$ 温差确定。土壤温度 T_{ground} 可通过下式计算:

$$T_{\text{ground}} = T_{0,\text{ground}} + \int Q_{\text{ground}} dt / (\rho_{\text{ground}} V_{\text{ground}} c_{p,\text{ground}}) \quad (17)$$

式中: $T_{0,\text{ground}}$ 为初始土壤温度; $\rho_{\text{ground}} = 2200 \text{ kg}/\text{m}^3$ ^[26] 和 $c_{p,\text{ground}} = 2.0 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ^[25] 分别为土壤的平均密度和热容量; V_{ground} 为计算过程中选定的土壤体积。选定土壤体积即假定存在热量传递的远端边界, 边界外土壤温度不受影响^[27]。土壤远端边界随时间推移变动, 具体计算方法参考文献[4]。

2 结果和讨论

2.1 系统设计

本研究选择位于中国北部(北纬: 40.1°N ; 西经: 117.4°W)的一栋酒店建筑作为能源供应对象。酒店为南北朝向双层建筑, 总建筑面积为 1300 m^2 , 实际供暖/供冷计算面积为 1208 m^2 ; 建筑南北向窗墙比分别为 0.32 和 0.24 , 东西向窗墙比分别为 0.10 和 0.08 ; 外墙、窗户及屋顶的传热系数分别取为 0.27 、 2.50 、 $0.80 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

基于该酒店各项参数, 于 Energy Plus 软件内构建其用能模型, 并进行全年逐时冷热负荷需求计算(图2)。结果显示, 该酒店全年最大的供冷负荷和供热负荷功率需求分布为 123.98 、 128.77 kW 。为满足建筑物用能最大负荷, 地源热泵采暖和制冷额定功率均设为 130 kW , LCPV/T 装置有效开口面积设为 100 m^2 。根据所选的额定负荷、埋管换热器换热系数以及供暖、供冷季节的额定性能系数 C_{COP} , 设定埋管换热器总长度为 3455.06 m , 埋管换热器深度为 100 m , 确定埋管换热器钻孔数量为 35 个。

2.2 系统运行性能对比

在 LCPV/T-地源热泵集成系统(简称集成系统)中, LCPV/T 装置与地源热泵紧密结合, 协同运行。

为展示该系统优势, 选取平板光伏和地源热泵各自独立运行系统作为参比系统。参比系统各装置选型参数与集成系统一致, 平板光伏装置的光伏余热不输送至土壤。

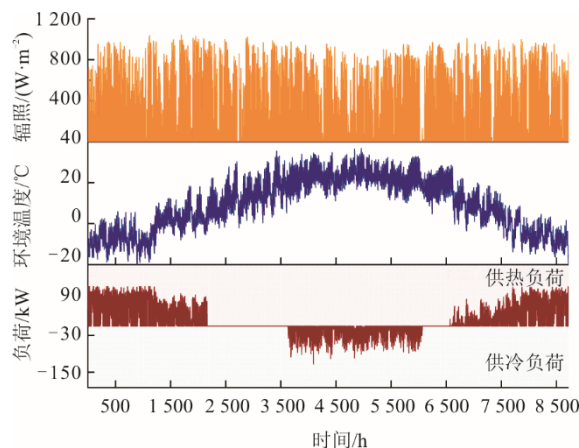


图2 能源需求变化和目标建筑环境条件
Fig.2 The variation of energy demand and the environmental conditions of the object building

2.2.1 光伏光热组件性能对比

基于所编制模型, 开展系统全年运行模拟, 结果表明: 考虑光伏直流转交流电过程中的能量损耗(逆变器效率取值 92.3% ^[28]), 集成系统 LCPV/T 装置年发电量为 $31.36 \text{ MW}\cdot\text{h}$, 可满足热泵运行电力需求的 61.27% , 此外, 年太阳能发电效率达到 17.73% ; 而参比系统的光伏年发电量和相应发电效率分别为 $28.32 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 和 16.11% , 较集成系统低 9.58% 。造成这一差异的主要原因有 2 个: 1) 低倍聚光光伏电池聚光比较高, 光伏发电效率更高; 2) 低倍聚光光伏电池得到了较好的冷却, 电池板工作温度较低, 所以光伏余热的负面效应得以避免。

集成系统与参比系统逐日的光伏光热装置发电量差异 $E_{\text{PV}} - E_{\text{PV}}^{\text{ref}}$ 的日发电量差异及光伏的工作温度如图 3 所示。由图 3 可见: 每日发电量差异在 $-3.89 \sim 44.91 \text{ kW}\cdot\text{h}$; 大多数时间内, 集成系统的 LCPV/T 发电量高于参比系统, 尤其是第 144 天到第 258 天电量优势更明显。这主要是因为这段时间集成系统 LCPV/T 面板由地面热交换器的工作流体冷却, 其温度低于工作在高环境温度的平板光伏, 再叠加聚光光伏高聚光比的效率优势, 发电量明显较高。相反, 当环境温度很低时, 参比系统平板光伏的工作温度可能会很低, 因此其发电效率会相对较高如图 3 中 50 天前。

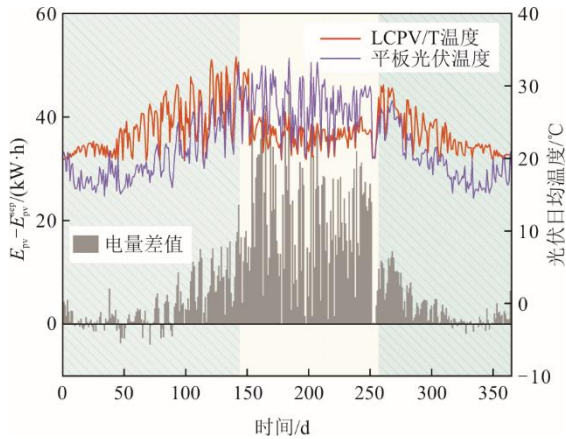


图 3 2 个系统日发电量差值变化

Fig.3 The variation of daily electricity generation difference between the proposed system and the reference system

2.2.2 地源热泵运行性能对比

集成系统和参比系统的地源热泵均可满足大楼的供暖和制冷负荷，2 个系统的年耗电量分别为 56.11、56.28 MW·h，相应平均 C_{COP} 也非常接近，热泵供冷平均 C_{COP} 均为 3.08，集成系统和参比系统供热平均 C_{COP} 分别为 4.28、4.26。性能接近的原因是 2 个系统的热泵工作条件非常接近，供暖季节 C_{COP} 的微小差异是由于地面温度差异造成的。2 个系统地温年变化如图 4 所示。由图 4 可见：集成系统年末的地温与年初的地温非常接近；然而，运行 1 年后，参比系统的地面温度降低了 0.21 K。

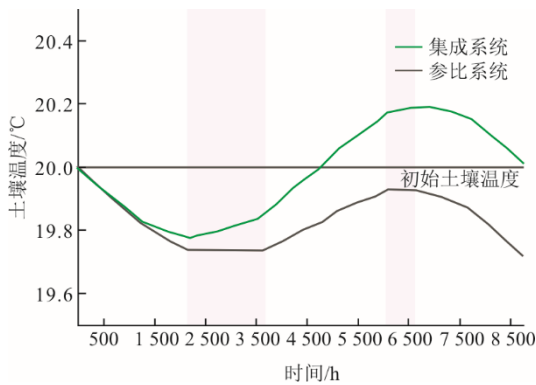


图 4 2 个系统全年每小时地面温度变化

Fig.4 The hourly variation of ground temperature of the two systems across the year

全年 2 个系统热泵净热能流量变化如图 5 所示。由图 5 可见：供暖季集成系统的热能净流出量低于参考系统；制冷季节集成系统的热能净流入量明显高于参考系统。这是由于集成系统光伏光热装置的光伏余热通过工质流体输送至土壤。

2.2.3 热泵长期运行性能对比

由上文可见，集成系统光伏/光热装置性能优势明显，但集成系统和参比系统地源热泵性能接近。故进行长时模拟，对比连续运行 20 年后 2 个系统地源热泵的性能差异。集成系统和参比系统地源热泵在第 20 年的逐日耗电量如图 6 所示。由图 6 可以发现：供冷季节 2 个系统耗电量非常接近；而在采暖季，参比系统的耗电量比集成系统高 8.09 MW·h。参比系统在供暖季平均 C_{COP} 仅为 3.57，即由于长期运行导致的土壤温度变化，参比系统热泵性能衰减了 16.58%。

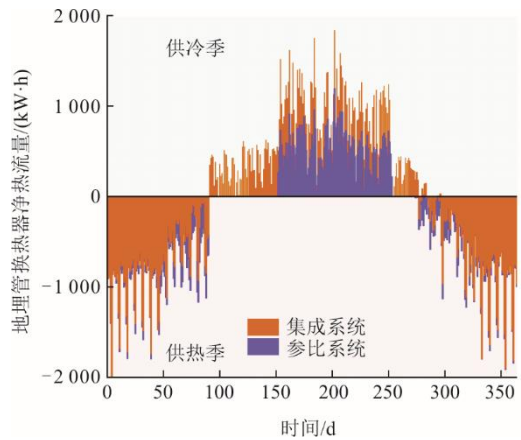


图 5 2 个系统热泵净热能流量变化

Fig.5 The daily variation of net thermal energy flow of heat pump of the two systems

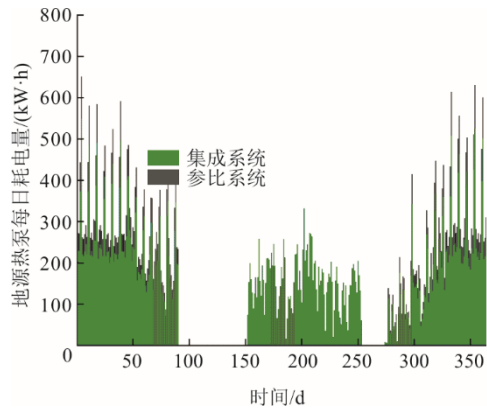


图 6 2 个系统第 20 年热泵耗电量日变化

Fig.6 Daily variation of heat pump power consumption for the two systems in the 20th year

2 个系统在连续运行 20 年后地源热泵性能出现差异的原因在于土壤温度变化。20 年间 2 个系统的土壤温度的变化情况如图 7 所示。由图 7 可以看出，在这段时间中，参比系统土壤温度降低 5.48 K，而光伏/光热—地源热泵系统土壤温度基本保持不变（偏差小于 0.20 K）。

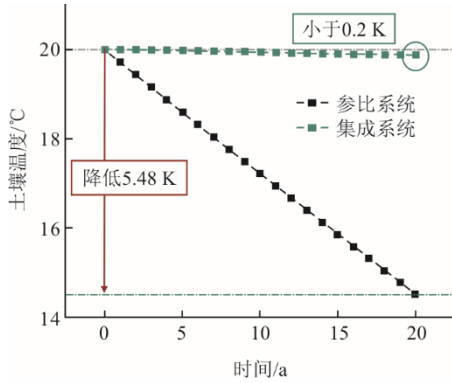


图7 光伏/光热—地源热泵系统和参比系统地面温度20年变化

Fig.7 The 20-year variation of ground temperature in photovoltaic/photothermal ground source heat pump system and reference system

2.3 系统经济性分析及优化

2.3.1 经济性评价指标及方法

全生命周期成本 C_{Lc} 是热泵系统常用经济性评价指标^[29], 本研究亦基于此开展经济性分析。 C_{Lc} 主要包含投资、运维以及回收3部分内容, 具体计算公式为:

$$C_{Lc} = k_{CRF} N_{year} C_{invest} + C_{O\&M} - C_{Re} \quad (18)$$

式中: C_{invest} 为系统投资成本; N_{year} 为系统运行年限, 取值 20; k_{CRF} 为考虑资金利率的投资年折合系数, 取值 0.102^[30]; $C_{O\&M}$ 为系统运行费用; C_{Re} 为系统设备回收对应的剩余价值。

C_{invest} 主要考虑热泵、地理管换热器以及光伏光热装置, 具体计算公式为:

$$C_{invest} = P_{PV/T} A_a + P_{pump} Q_{pump,rate} + P_{HEX} L_{HEX} \quad (19)$$

式中: $P_{PV/T}$ 为单位开口面积光伏/光热组件投资成本, 取值 600 元/ m^2 ^[31]; P_{pump} 为地源热泵单位功率投资成本, 取值 600 元/ kW ^[32]; P_{HEX} 为地理管换热器单位深度投资成本, 取值 70 元/ m 。

运维成本 $C_{O\&M}$ 主要考虑设备维护费用, 供能过程可能消耗的电费以及需补充热泵供冷、供热缺口所需费用。 $C_{O\&M}$ 计算公式为:

$$C_{O\&M} = \sum_1^{N_{year}} (P_{Ele} E_{net} + P_{cool} Q_{cool,net} + P_{heat} Q_{heat,net}) + C_{invest} \cdot \varphi \quad (20)$$

式中: E_{net} 、 $Q_{cool,net}$ 及 $Q_{heat,net}$ 分别是系统供能过程中, 热泵用电缺口 (扣除光伏发电量) 以及可能的供冷、供热的能量缺口; 电价 P_{Ele} 取工商业平时电价 0.75 元/($kW \cdot h$); P_{heat} 、 P_{cool} 分别为补充供热和供冷缺口的热、冷电价, 其具体数值参考集中供热和集中供冷电价, 分别取值 0.33、0.50 元/($kW \cdot h$)。

2.3.2 关键因素影响规律

由上文可知, 光伏/光热装置布置量以及地源热泵容量大小既会影响热泵、地理管换热器等关键设备的投资成本, 同时又会同时对电费、供冷及供热费用等运维成本造成影响。以 2.1 节设定的光伏光热装置和地源热泵功率为基础, 分析变动光伏光热和地源热泵装置容量对集成系统全生命周期成本的影响规律。

图 8 为集成系统全生命周期成本随光伏/光热装置和地源热泵相对规模的变动规律。从图 8 可见, 系统全生命周期成本随着两者相对规模先减后增, 存在相应最低点, 两者变动原因皆是由于运维成本和投资成本的共同作用。

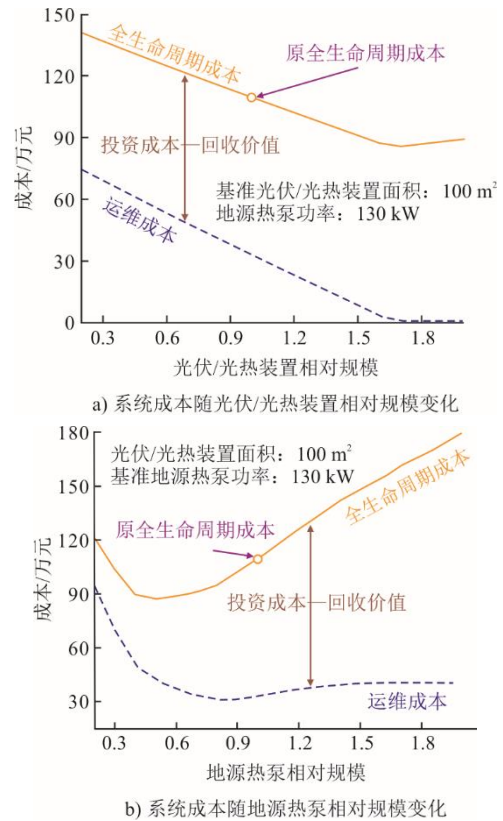


图8 系统全生命周期成本随关键因素变化规律
Fig.8 Variations of whole life cycle cost of the system with key factors

从图 8a)可见: 在给定的地源热泵功率下, 随着光伏/光热装置规模增加, 系统电能缺口越来越少, 电价投入减少导致系统的运维成本迅速降低; 同时投资成本相对变动较小; 成本最低点基本处于光伏/光热装置规模较大处。由图 8b)可见: 地源热泵相对规模增长初期, 由于向外界购热和购冷需求降低, 系统的运维成本急剧下降, 同时由于地源热泵单体成本较高, 所以投资成本也在较快增加; 在相对规模超过 0.7 以后, 运维成本基本不变但是投

资成本仍稳定增加；两者共同作用，全生命周期成本最低点落于地源热泵相对规模 0.4~0.6。

2.3.3 经济性优化

由上节可知，系统全生命周期成本皆会随光伏/光热装置及地源热泵容量先减后增，存在最优值。本节采用收敛速度较快、可实现全局搜索、避免局部最优的粒子群算法，对光伏/光热装置及地源热泵容量进行优化，以寻找系统全生命周期成本最低的配置方案。

基于粒子群的优化，选定种群数量为 50，迭代次数设定为 20 次，具体优化过程如图 9 所示，系统优化前后各项成本对比如图 10 所示。从图 9 可见，在第 10 次迭代后已得到最优值（全生命周期成本 74.96 万元），对应的地源热泵容量为 92.62 kW，光伏光热装置的总开口面积为 147.20 m²。相较于初始选定容量，系统全生命周期成本降低 31.52%。

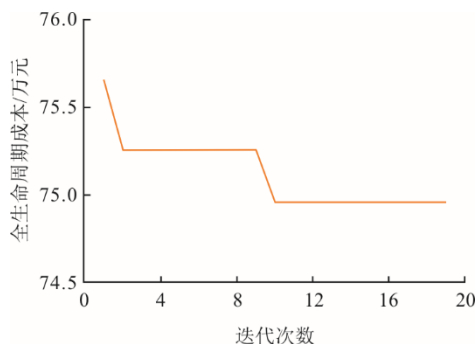


图 9 粒子群算法经济性优化历次迭代最优值

Fig.9 Variation of optimal value of economic optimization based on particle swarm optimization

系统优化前后运维及投资成本如图 10 所示。

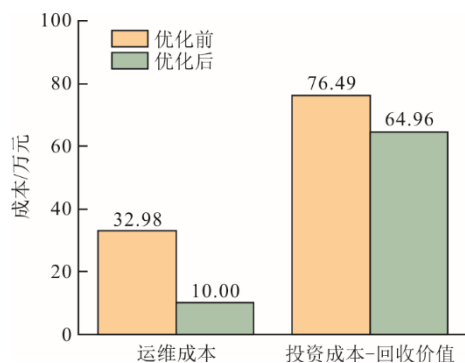


图 10 系统优化前后各项成本对比

Fig.10 Comparison of each cost before and after the system optimization

由图 10 可知，地源热泵容量减少带来的投资成本降低抵消了增加光伏/光热装置铺设量导致的投资增加，因而优化后的投资成本较原先降低了 11.53 万。地源热泵容量减少会导致额外的购热、购冷成本，但是此前设计中是以最大热/冷需求值设置的热泵容量，

实际过程中大多数时刻难以达到，因此热泵容量减少（优化后）并未增加太多运维费用。同时，光伏/光热装置的增加大幅减少了热泵运行所需的电费，所以优化后的运维成本减少了 22.98 万元，降幅明显。

3 结 论

本文针对光伏/光热与地源热泵的集成系统展开研究，构建集成系统的仿真运行模型，分析了集成后系统的性能；对集成系统全生命周期成本进行了分析，获得了关键因素影响规律，并利用粒子群算法进行了经济性优化。得到以下结论，可为光伏光热-地源热泵系统优化设计提供理论依据。

1) 集成系统光伏年均发电效率达 17.73%，较单一运行系统提升 9.58%；集成系统光伏余热可有效减少土壤温度下降，热泵长时运行性能较参比系统提升 16.58%。

2) 光伏光热装置和地源热泵规模增加都会降低系统运维费用，同时抬升投资成本。

3) 相较于最大功率进行设计的初始方法，适当提升光伏光热装置规模，减少地源热泵容量可以实现运维成本和投资成本协同优化，全生命周期成本可降低 31.52%。

[参考文献]

- [1] International Energy Agency. (2019). 2019 global status report for buildings and construction[R].
- [2] International Energy Agency. World energy outlook 2023[R].
- [3] DESIDERI U, SORBI N, ARCIONI L, et al. Feasibility study and numerical simulation of a ground source heat pump plant, applied to a residential building[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(16): 3500-3511.
- [4] 崔楚阳. 太阳能耦合地源热泵在寒冷地区的应用及经济性分析[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2021: 1. CUI Chuyang. Application and economic analysis of solar coupled ground source heat pump in cold region[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2021: 1.
- [5] KANEKO C, YOSHINAGA M. Long-term operation analysis of a ground source heat pump with an air source heat pump as an auxiliary heat source in a warm region[J]. Energy Buildings, 2023, 289: 113050.
- [6] KJELLSSON E, HELLSTRÖM G, PERERS B. Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings[J]. Energy, 2010, 35(6): 2667-2673.
- [7] RAD F M, FUNG A S, LEONG W H. Feasibility of combined solar thermal and ground source heat pump systems in cold climate, Canada[J]. Energy Buildings, 2013, 61: 224-232.
- [8] CALISE F, DENTICE D M, FIGAJ R D, et al. Thermoeconomic optimization of a solar-assisted heat pump based on transient simulations and computer design of experiments[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 125: 166-184.

- [9] ALNIMR M A, BUKHARI M, MANSOUR M. A combined CPV/T and ORC solar power generation system integrated with geothermal cooling and electrolyser/fuel cell storage unit[J]. *Energy*, 2017, 133: 513-524.
- [10] 纪明达, 勾昱君, 钟晓晖. 白银地区光伏光热一体化系统性能仿真与分析[J]. *综合智慧能源*, 2023, 45(12): 43-52.
JI Mingda, GOU Yujun, ZHONG Xiaohui. Performance simulation and analysis on photovoltaic and photothermal integration system in Baiyin area[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2023, 45(12): 43-52.
- [11] WANG R L, HONG H, SUN J, et al. A solar hybrid system integrating concentrating photovoltaic direct steam generation by chemical heat pump[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 196: 856-865.
- [12] LI W, HAO Y. Efficient Solar power generation combining photovoltaics and mid-/low-temperature methanol thermochemistry[J]. *Applied Energy*, 2017, 202: 377-385.
- [13] 金满, 徐洪涛, 张剑飞, 等. 太阳能辅助地源热泵联合供暖系统模拟研究[J]. *上海理工大学学报*, 2021, 43(2): 111-117.
JIN Man, XU Hongtao, ZHANG Jianfei, et al. Numerical study on the combined heating system of a ground-source heat pump assisted by the solar energy[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2021, 43(2): 111-117.
- [14] 刘仙萍, 田东, 雷豫豪, 等. 光伏/光热-地源热泵联合供热系统运行性能研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(9): 88-97.
LIU Xianping, TIAN Dong, LEI Yuhao, et al. Performance analysis for solar photovoltaic/thermal-ground source heat pump hybrid heating system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(9): 88-97.
- [15] 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.
- [16] SUN J, WANG R, HONG H, et al. An optimized tracking strategy for small-scale double-axis parabolic trough collector[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 1408-1420.
- [17] PENG S, HONG H, JIN H, et al. A new rotatable-axis tracking solar parabolic-trough collector for solar-hybrid coal-fired power plants[J]. *Solar Energy*, 2013, 98: 492-502.
- [18] MINNAERT B, VEELAERT P. A proposal for typical artificial light sources for the characterization of indoor photovoltaic applications[J]. *Energies*, 2014, 7(3): 1500-1516.
- [19] GREEN M A. Third generation photovoltaics: advanced solar energy conversion[J]. *Physics Today*, 2004, 57(12): 71-72.
- [20] SINGH P, RAVINDRA N M. Temperature dependence of solar cell performance-an analysis[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 101: 36-45.
- [21] QU W, HONG H, JIN H. A spectral splitting solar concentrator for cascading solar energy utilization by integrating photovoltaics and solar thermal fuel[J]. *Applied Energy*, 2019, 248: 162-173.
- [22] WANG R, SUN J, HONG H, et al. An on-site test method for thermal and optical performances of parabolic-trough loop for utility-scale concentrating solar power plant[J]. *Solar Energy*, 2017, 153: 142-152.
- [23] GORDON J M, NG K C, CHUA H T. Centrifugal chillers: thermodynamic modelling and a diagnostic case study[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1995, 18(4): 253-257.
- [24] 刘媛媛, 耿直, 张元峰, 等. 单井U型地埋管换热器传热特性与热渗耦合特性分析[J]. *综合智慧能源*, 2023, 45(4): 81-88.
LIU Yuanyuan, GENG Zhi, ZHANG Yuanfeng, et al. Analysis of heat transfer characteristics and thermal-permeability coupling characteristics of single U-tube borehole heat exchangers[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2023, 45(4): 81-88.
- [25] GIRARD A, JADRAQUE G E, MUNEER T, et al. Higher ground source heat pump COP in a residential building through the use of solar thermal collectors[J]. *Renewable Energy*, 2015, 80: 26-39.
- [26] PIECHOWSKI M. Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: theoretical development[J]. *International Journal of Energy Research*, 1999, 23(7): 571-588.
- [27] 刘媛媛, 刘芳芳, 贾天翔, 等. 商住园区综合能源供暖(冷)系统的方案设计及运行经济性研究[J]. *综合智慧能源*, 2023, 45(12): 20-28.
LIU Yuanyuan, LIU Fangfang, JIA Tianxiang, et al. Design of the integrated energy heating(cooling)system for a commercial and residential park and its economy analysis[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2023, 45(12): 20-28.
- [28] LIU Y, ZHOU W, LUO X, et al. Design and operation optimization of multi-source complementary heating system based on air source heat pump in Tibetan area of western Sichuan, China[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 242: 110979.
- [29] 王汉伟, 朱兵, 吴冬梅. 太阳能辅助空气源热泵系统多地区适用性研究[J]. *热力发电*, 2022, 51(5): 18-26.
WANG Hanwei, ZHU Bing, WU Dongmei. Research on multi-regional applicability of solar energy-assisted air source heat pump system[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(5): 18-26.
- [30] 尹梓壮, 王强, 王玉博, 等. 光伏光热联合热泵热水系统仿真优化及经济性[J]. *煤气与热力*, 2023, 43(2): 16-20.
YIN Zizhuang, WANG Qiang, WANG Yubo, et al. Simulation optimization and economy of photovoltaic/thermal combined heat pump hot water system[J]. *Gas & Heat*, 2023, 43(2): 16-20.
- [31] 杨雄, 姜静华, 王洋浩, 等. 中深层地埋管地热供热系统长期取热性能评价与经济性分析[J]. *暖通空调*, 2023, 53(7): 160-165.
YANG Xiong, JIANG Jinghua, WANG Fenghao, et al. Evaluation and economic analysis of long-term heat extraction performance of medium and deep buried pipe geothermal heating systems[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2023, 53(7): 160-165.
- [32] 闻继飞. 丹阳城市浅层地热禀赋特征与开发适宜性研究[D]. 南京: 南京大学, 2021: 1.
WEN Jifei. Study on characteristics and development suitability of shallow geothermal energy in Danyang[D]. Nanjing: Nanjing University, 2021: 1.

(责任编辑 杨嘉蕾)