

西藏高原离网光伏供暖系统容量配置优化研究

张睿超^{1,2}, 王登甲^{1,2}, 刘艳峰^{1,2}, 王慧琳³, 王小军³

(1. 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 拉萨市设计集团有限公司, 西藏 拉萨 850030)

摘要: 针对西藏高原丰富的太阳能资源条件和迫切的供暖需求, 提出了离网光伏条件下, 光伏+空气源热泵+蓄电、光伏+空气源热泵+蓄热、光伏+电采暖设备+蓄电三种离网光伏供暖技术形式。以西藏日喀则市某孤立地区居住建筑为研究对象, 建立三种“光伏+”供暖系统仿真模型, 重点分析了光伏面积、蓄能容量对系统太阳能保证率的影响。结果表明: 三种系统中光伏+空气源热泵具有较高的能源利用效率, 所需光伏面积较少; 当蓄能形式为蓄热时, 光伏+空气源热泵系统所需的蓄能设备容量较小, 太阳能保证率较高。

关键词: 离网光伏; 采暖; 系统形式; TRNSYS; 太阳能保证率

中图分类号: TU832.1; TK519

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0828-07

The system form and case analysis of off-grid photovoltaic heating in Tibet Plateau

ZHANG Ruichao^{1,2}, WANG Dengjia^{1,2}, LIU Yanfeng^{1,2}, WANG Huilin³, WANG Xiaojun³

(1. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China;

2. School of Services Science and Engineering Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. Lhasa Municipality Design Group Co. Ltd., Lhasa 850030, China)

Abstract: In view of the abundant solar resource conditions and urgent heating demand in the Tibet Plateau, three off-grid photovoltaic heating technology forms are proposed, which are photovoltaic + air source heat pump + electricity storage, photovoltaic + air source heat pump + heat storage and photovoltaic + electric heating equipment + electricity storage. Taking isolated area residential building in Shigatse, Tibet as the research object, three simulation models of “photovoltaic +” heating system were established, focusing on the analysis of the impact of photovoltaic area and energy storage capacity on the solar fraction of the system. The results show that the photovoltaic + air source heat pump of the three systems has higher energy efficiency and requires less photovoltaic area, which should be promoted first. When the energy storage form is heat storage tank, the capacity of energy storage equipment required by the photovoltaic + air source heat pump system is smaller and the solar fraction is higher.

Key words: off-grid solar photovoltaic; heating; system form; TRNSYS; solar fraction

西藏高原常规能源匮乏, 当地供暖需求迫切, 长期以来, 当地多采用燃烧牛粪等生物质能源采暖或无采暖。但是, 西藏高原太阳能、水电等可再生能源十分丰富, 具备利用可再生能源进行零碳化供暖的先决条件、先试先行, 在西部高原建筑供暖领域率先实现区域性“碳中和”, 为我国其他地区零碳建筑发展起到示范引领作用。

太阳能在建筑中利用主要分为光热和光电等利用形式。目前, 西藏高原太阳能供暖以光热利用居多, 已开展大量科学研究和工程落地示范。李玥等^[1]对日喀则市某办公建筑太阳能供暖系统建立了 TRNSYS 模型, 对其系统性能进行了优化。王磊等^[2]采用 f 图法对不同的太阳能与水源热泵联合供暖系统保证率进行了分析比较。白旭升等^[3]对

收稿日期: 2021-07-16

修改稿日期: 2021-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078408, U20A20311); 陕西省杰出青年基金项目(2020JC-43)

第一作者: 张睿超(1993-), 男, 博士生, 主要从事太阳能供热技术应用。E-mail: ruichao1210@126.com

通信作者: 王登甲(1984-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑节能与可再生能源利用方面研究。E-mail: wangdengjia@xauat.edu.cn

空气式太阳能供暖系统在西藏地区的应用进行了测试分析。在蓄热水箱容积与辅助热源方面,刘艳峰、王登甲团队对太阳能地面采暖系统各种蓄热温差下对应的蓄热水箱容积进行了模拟分析与优化设计^[4],对西藏高原不同地区采用不同的辅助热源的技术经济性进行了研究分析,得到不同辐射资源区最佳辅助热源类型^[5]。在工程应用方面,近些年,在西藏高原陆续建成了以浪卡子、仲巴县太阳能集中供暖工程为代表的系列太阳能供暖示范项目^[6-8]。

近些年,光伏成本逐年下降,加之长距离输电损耗小、建筑用能电气化支撑程度高等优势,光伏在建筑中的应用受到空前重视。ZENG等^[9]对冷热电联产、地源热泵、光伏光热耦合系统建立了优化模型,分析了不同负荷比下的设备容量。太阳能光伏+空气源热泵系统相比其他形式系统具有结构简单,能效比高等优势^[10-11]。张瑞丹等^[12]针对青海西宁住宅提出了多种光伏清洁供暖方式,并对其经济效益进行了分析。王良等^[13]探讨了光伏直驱空气源热泵系统冬季供暖性能及系统各部件间的匹配特性。赵学林等^[14]提出了太阳能光伏光热耦合地源热泵机组的供热系统,对系统进行了仿真动态模拟。Ozcan等^[15]对太阳能光伏驱动的空气源热泵系统建立了数值模型,并通过实验对模型进行了验证。

综上所述,西藏高原太阳能光热供暖尽管存在一些不同程度的“高原病”^[16],但针对不同类型的单户、分布式、集中式太阳能供暖技术形式已基本确定,后期运行控制、维护管理则是关键。西藏高原光伏供暖相关研究与成功案例则相对较少,基于此,本文针对西藏高原一些特殊的独立区域条件,提出了离网光伏+空气源热泵+蓄电、光伏+空气源热泵+蓄热、光伏+电采暖设备+蓄电三种综合能源供热系统形式;以日喀则市某孤立型居住建筑为研究对象,对上述光伏供暖系统光伏场面积、蓄能设备容量进行了优化匹配分析。

1 “光伏+”供暖系统原理及模型

1.1 系统原理描述

西藏高原阿里、日喀则等地区地域辽阔、住区分散,部分乡镇、军队哨所位置偏远且相对孤立,完善的市政电网无法覆盖。在上述地区发展离网型分布式光伏尤为关键。基于上述情况,本文对西藏高原某孤立地区居住建筑采用三种离网型“光伏+”供暖系统进行了性能对比分析:系统

一:光伏+空气源热泵+蓄电供热系统,系统二:光伏+空气源热泵+蓄热供热系统,系统三:光伏+电采暖设备+蓄电池供热系统。

系统一:太阳能光伏+空气源热泵+蓄电综合能源供热技术方案原理图如图1所示。系统由太阳能光伏发电系统以及热源系统构成。太阳能光伏发电系统主要由太阳能光伏发电场、逆变稳压器以及蓄电池构成。热源系统为空气源热泵。根据藏区建筑室内温度要求及供暖负荷特征确定空气源热泵的供水温度,再通过热泵将热水加热到指定温度后供给热用户。针对该离网光伏供热系统,在连续阴雨天或极端天气下光伏系统供能不足时,可考虑与当地实际相符的柴油发电等形式满足短缺电负荷。

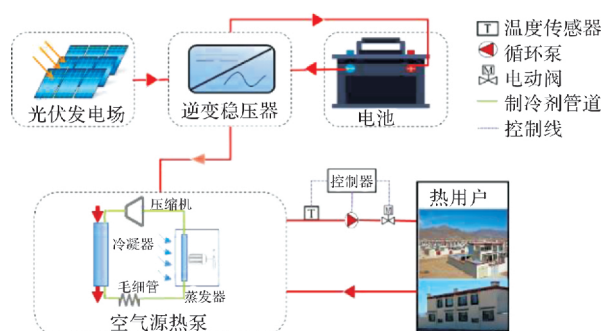


图1 光伏+空气源热泵+蓄电供暖系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of photovoltaic + air source heat pump + storage heating system

系统二:太阳能光伏+空气源热泵+储热综合能源供热技术方案原理如图2所示。该系统由太阳能光伏发电系统,空气源热泵以及蓄热水箱构成。太阳能光伏发电系统为空气源热泵提供驱动电力。空气源热泵将水加热后,储存到蓄热水箱中,根据藏区建筑室内温度要求及供暖负荷特征确定水箱供水温度,然后供给热用户采暖。

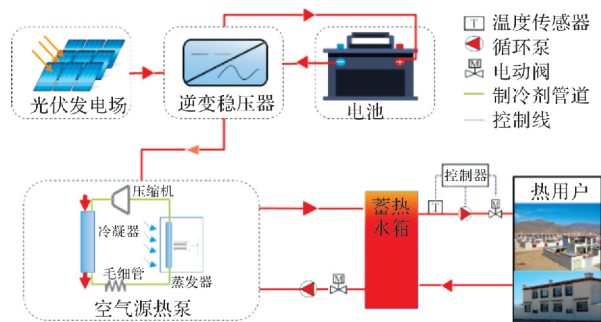


图2 光伏+空气源热泵+储热供暖系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of photovoltaic + air source heat pump + heat storage heating system

系统三:太阳能光伏+建筑电采暖设备综合

能源供热技术方案原理如图3所示。系统由太阳能光伏发电场, 逆变稳压器以及蓄电池构成。用户末端采用电热膜或电加热器采暖, 实现了从光伏系统产生的电能直接向室内散热的转化过程。

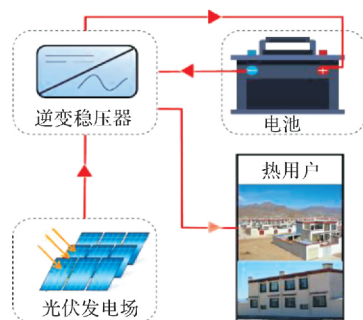


图3 太阳能光伏+建筑电采暖设备供暖系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of heating system of solar photovoltaic + building electric heating equipment

1.2 系统仿真模型建立

使用 TRNSYS 18 建立上述三种综合能源供热技术方案模型, 主要部件包括太阳能光伏组件、逆变器组件、蓄电池组件、空气源热泵/锅炉组件、蓄热水箱组件, 不同组件的数学模型如下。

1.2.1 太阳能光伏系统

对于太阳能光伏组件模型, 其电流-电压方程如公式(1)所示^[17]。

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{\gamma k T_c} (V + I R_s) \right) \right] \quad (1)$$

式中: I 为模块输出电流, A; V 为模块输出电压, V; I_L 为模块光电流, A; I_0 为二极管反向饱和电流, A; q 为电子电荷常数, 取 1.6×10^{-19} C; γ 为经验 PV 曲线拟合参数; k 为玻尔兹曼常数, $1.380\,649 \times 10^{-23}$ J/K; T_c 为模块温度, K; R_s 为模块串联电阻, Ω 。

公式(1)中, 模块光电流 I_L 与二极管反向饱和电流 I_0 分别用公式(2)与公式(3)表示^[17]。

$$I_L = I_{L, \text{ref}} \frac{G_T}{G_{T, \text{ref}}} \quad (2)$$

$$\frac{I_0}{I_{0, \text{ref}}} = \left(\frac{T_c}{T_{c, \text{ref}}} \right)^3 \quad (3)$$

其中: $I_{L, \text{ref}}$ 与 $I_{0, \text{ref}}$ 为参考条件下模块光电流与二极管反向饱和电流, 其具体计算方法可参见文献^[17]; $G_{T, \text{ref}}$ 与 $T_{c, \text{ref}}$ 为参考辐射值与参考温度值, 分别为 $1\,000$ W/m² 与 40 °C。

1.2.2 逆变器与蓄电池

对于逆变器与蓄电池模型, 在光伏系统运行时间 T 内, 逆变器与蓄电池模块的能量守恒关系用公式(4)表示。

$$\int_0^T (P_{PV} + P_{oth}) = \int_0^T (P_{load} + P_{dis}) + Q_{sto} \quad (4)$$

式中: P_{PV} 表示光伏组件的实际发电功率, kW; P_{oth} 表示其他电力资源补充电量, kW; P_{load} 表示用电设备耗电量, kW; Q_{sto} 表示蓄电池蓄电量, kW · h。

1.2.3 空气源热泵

空气源热泵加热量与其效率相关, 用公式(5)表示。

$$q_{hp} = P_{hp} \times COP \quad (5)$$

式中: q_{hp} 表示空气源热泵的加热量, kW; P_{hp} 表示空气源热泵的加热功率, kW; COP 表示空气源热泵能效系数, 用公式(6)表示^[18]。

$$COP = 2.762\,5 + 0.062\,5 \times T_{zf} \quad (6)$$

式中: T_{zf} 表示空气源热泵蒸发器中制冷剂蒸发温度, °C。蒸发温度与环境空气温度 T_a 的关系用公式(7)表示。

$$T_{zf} = 0.798\,4 \times T_a - 7.200\,6 \quad (7)$$

1.2.4 蓄热水箱

对于蓄热水箱模型, 能量平衡关系用公式(8)表示^[17]。

$$\frac{dT_{\text{tank},j}}{dt} = \frac{q_{\text{in},\text{tank},j} - q_{\text{loss},j} - q_{\text{cond},j} - q_{\text{flow},i,j} - q_{\text{mix},j}}{C_{\text{tank},j}} \quad (8)$$

式中, $T_{\text{tank},j}$ 表示水箱节点 j 的温度, °C; $q_{\text{in},\text{tank},j}$ 表示节点 j 的辅助加热量, kW; $q_{\text{loss},j}$ 表示节点 j 的热损失, kW; $q_{\text{cond},j}$ 表示节点 j 与其他节点的热传导换热热量, kW; $q_{\text{flow},i,j}$ 表示负荷端冷流股掺混导致节点间的换热量, kW; $q_{\text{mix},j}$ 表示节点间消除掺混导致的热不稳定性的热量, kW; $C_{\text{tank},j}$ 表示节点的蓄热量, 用公式(9)表示。

$$C_{\text{tank},j} = c_{p,w} \times \rho_w \times V_{\text{tank},j} \quad (9)$$

式中: $c_{p,w}$ 表示水的热容, 4.19 kJ/kg · K; ρ_w 表示水的密度, $1\,000$ kg/m³; $V_{\text{tank},j}$ 表示节点 j 的容积, m³。

1.3 评价指标

对于离网型光伏供暖系统, 系统应尽量减少对其他电力资源的依赖, 因此可靠程度是首先需要关注的问题。基于此, 本文采用太阳能保证率对系统性能进行评价。用公式(10)表示。在本文中, 太阳能保证率定义为太阳能及空气能等可再生能源供热量占建筑总供热量的比例, 该参数表征了系统对其他电力的依赖程度, 太阳能保证率越大, 系统对其他电力资源的依赖程度越小。

$$\eta_{SF} = \frac{Q_{load} - Q_{oth}}{Q_{load}} \quad (10)$$

式中, Q_{load} 表示供暖季建筑总供热量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; Q_{oth} 表示供暖季其他电力资源供电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$.

2 “光伏+”供暖案例分析

2.1 建筑对象信息

青藏高原阿里、日喀则等地区部分城镇偏远, 无完善的市政电力体系. 基于此, 选择西藏自治区日喀则市某孤立型两层居住建筑为分析对象, 总建筑面积为 468 m^2 . 该建筑平面布局及尺寸如图 4 所示, 建筑围护结构热工参数见表 1.

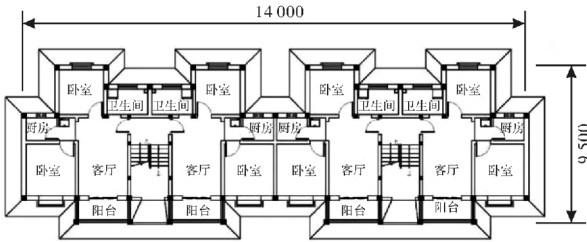


图 4 建筑平面图

Fig. 4 Building floor plan diagram

表 1 建筑围护结构热工参数

Tab. 1 Thermal parameters of building envelope

围护结构	屋面	外墙	架空或者外挑楼板
传热系数 $K/$ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{k})^{-1}$	0.25	0.35	0.35
围护结构	外窗(窗墙面积比 ≤ 0.30)	外窗(0.30<南向窗墙面积比 ≤ 0.50)	屋面天窗
传热系数 $K/$ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{k})^{-1}$	1.8	1.5	1.8

2.2 建筑供暖热负荷

日喀则市供暖日期为 10 月 22 日至 3 月 30 日. 根据西藏地区建筑室内采暖温度设定要求, 建筑采暖室内设计温度为 18°C , 建筑日总负荷如图 5 所示.

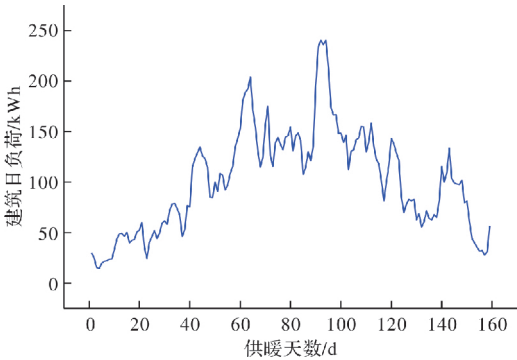


图 5 采暖期建筑日总负荷变化规律

Fig. 5 Diagram of the change rule of the total daily load of the building during the heating period

从图 5 可以看出, 在供暖期内, 建筑最大日总负荷达到 $240.3 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 最小值为 $14.3 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 平均为 $101.3 \text{ kW} \cdot \text{h}$.

3 “光伏+”供暖系统性能优化分析

针对上述建筑研究对象, 对三种离网型“光伏+”供暖系统性能进行了模拟仿真与优化分析.

3.1 系统一: 光伏+空气源热泵+蓄电池

当光伏场面积变化时, 光伏、其他电力资源向系统的供电量以及太阳能保证率的变化如图 6 所示. 此处充分考虑了蓄电池的蓄电量, 即当光伏发电量大于设备用电量时, 多余的电力资源全部储存在蓄电池中. 从图 6 可以看出, 随着光伏场面积的增大, 光伏向系统的供电量逐渐增加, 而系统对其他电力资源的需求量逐渐降低. 当光伏场面积达到 70 m^2 时, 通过光伏的发电量, 空气源热泵可完全满足建筑热负荷, 此时太阳能保证率为 100%.

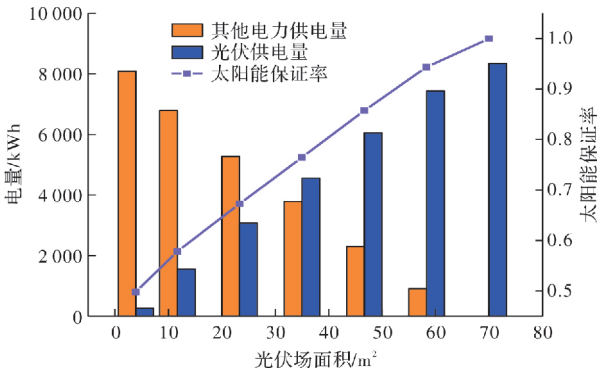


图 6 太阳能保证率随光伏场面积变化图(系统一)

Fig. 6 The solar fraction changes with the area of the photovoltaic field (System 1)

在上述分析中, 充分考虑了蓄电池蓄电量, 为了找到较合适的蓄电池容量, 对蓄电池容量进行了优化. 对于系统一, 光伏场面积设定为 70 m^2 . 随着蓄电池容量的变化, 系统 1 中光伏、其他电力资源向系统的供电量以及太阳能保证率的变化如图 7 所示. 从图 7 中可以看出, 当电池容量为 0 时, 即系统中不考虑蓄电池, 光伏向系统中的供电量为 $2153 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 而其他电力资源的需求量为 $6196 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 太阳能保证率为 61.54%. 随着电池容量的增加, 太阳能保证率逐渐升高, 当电池容量为 $100 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 时, 太阳能保证率达到 91.78%. 此后, 当电池容量再增加时, 太阳能保证率变化缓慢, 若使太阳能保证率达到 100%, 蓄电池容量需达到 $1600 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 以应对连续的极端天气, 此时经济成本增加明显. 因此, 可采用蓄电池容量为 $80 \sim 100 \text{ kW} \cdot \text{h}$.

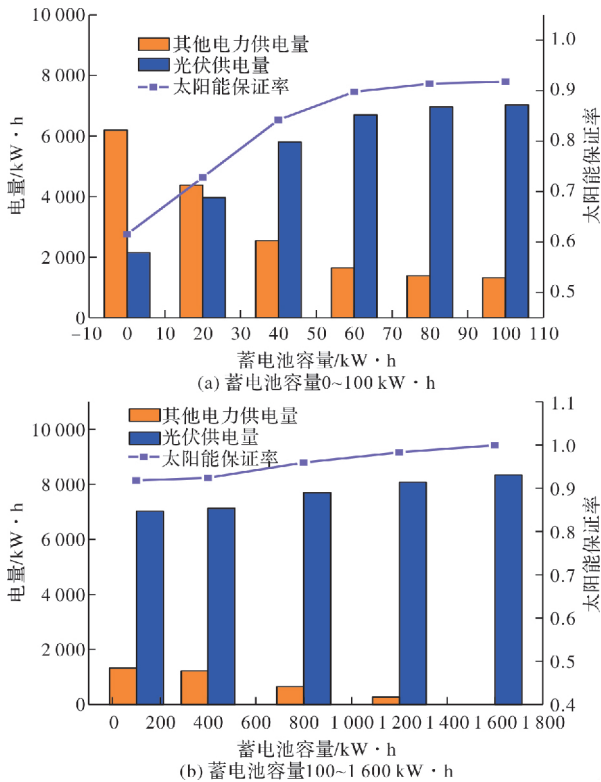


图7 太阳能保证率随电池容量变化图(系统一)

Fig. 7 The solar fraction changes with the battery capacity (System 1)

3.2 系统二：光伏+空气源热泵+蓄热

从前文模拟结果可以看出,对于光伏+空气源热泵系统,当光伏场面积达到 70 m^2 时,空气源热泵的产热量可完全满足建筑热负荷.用热水蓄热代替蓄电池蓄电后,对蓄热水箱的容量进行优化,辅助电力资源量以及太阳能保证率变化如图8所示:

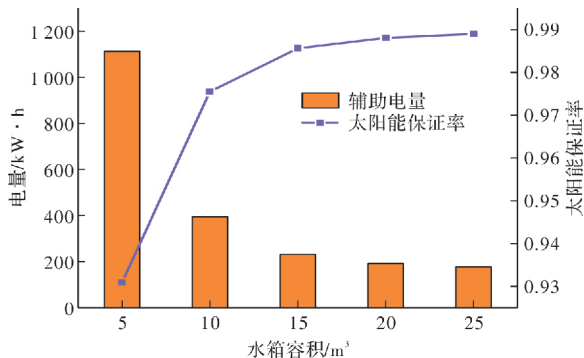


图8 供热能力与水箱容积关系(系统二)

Fig. 8 The relationship between heating capacity and water tank volume (System 2)

从图8可以看出,对于光伏+空气源热泵+蓄热综合能源供热系统,当水箱容积为 5 m^3 时,辅助热源的耗电量为 $1\,113 \text{ kW} \cdot \text{h}$,太阳能保证率为 93.1% .随着水箱容积的进一步增大,太阳能保证率逐渐增大,当水箱容积达到 15 m^3 时,太阳能保证率达到 98.6% ,再增加水箱容积,太阳能保证率变化较小.

3.3 系统三：光伏+电采暖设备+蓄电

对于系统三,假定电采暖末端的电热转化效

率为 90% ,充分考虑了蓄电池的蓄电量.图9表明了随着光伏场面积增加,光伏、其他电力资源向系统的供电量以及太阳能保证率的变化.从图9可以看出,随着光伏场面积的增大,系统的供电量逐渐增加,而系统对其他电力资源的需求量逐渐降低.当光伏场面积达到 152 m^2 时,通过光伏的发电量,建筑内电加热末端可完全满足建筑热负荷,此时太阳能保证率为 99.1% .

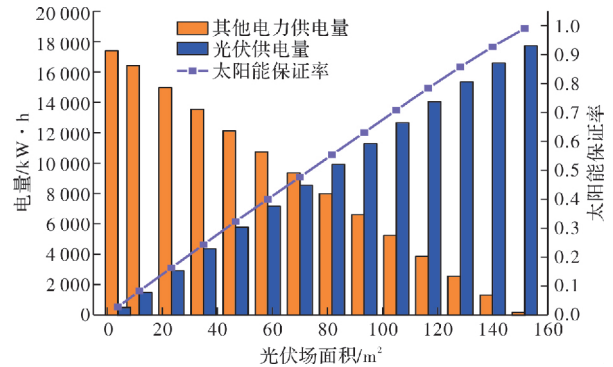


图9 太阳能保证率随光伏场面积变化图(系统三)

Fig. 9 The solar fraction changes with the area of the photovoltaic field (System 3)

为了给系统匹配合适的蓄电池容量,对蓄电池容量进行了优化.先设定光伏场面积为 152 m^2 .随着蓄电池容量的变化,系统三中光伏、其他电力资源向系统的供电量以及太阳能保证率的变化如图10所示.

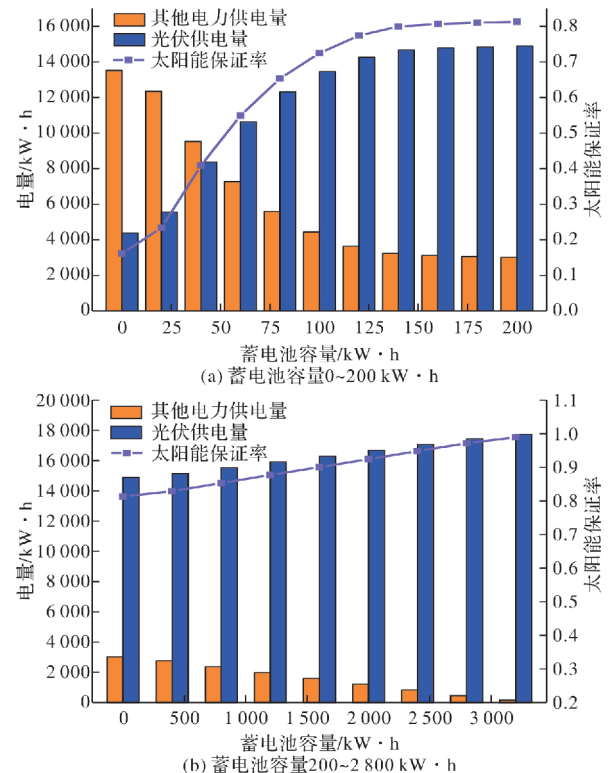


图10 太阳能保证率随电池容量变化图(系统三)

Fig. 10 The solar fraction changes with the battery capacity (System 3)

从图中可以看出,当电池容量为0时,光伏向系统中的供电量为4 384 kW·h,而其他电力资源的需求量为13 517 kW·h,太阳能保证率为16.1%。随着电池容量的增加,太阳能保证率逐渐升高,当电池容量为200 kW·h时,太阳能保证率达到81.30%。此后再增加电池容量时,太阳能保证率变化缓慢。若使太阳能保证率达到100%,蓄电池容量需达到3 200 kW·h。因此,蓄电池容量推荐值为180~200 kW·h。

3.4 方案对比

针对青藏高原地区孤立型建筑,从光伏场面积、蓄能设备容积、太阳能保证率对比了优化后的上述三种离网型“光伏+”综合能源供热技术方案,结果如表2所示:

表2 不同光伏供暖系统方案对比
Tab. 2 Comparison of different heating schemes

系统形式	蓄能形式	最小光伏 面积/m ²	蓄电 kW·h/ 蓄热 m ⁻³	太阳能保 证率/%
系统一	蓄电池	70	80~100	91.8
系统二	蓄热水箱	70	15	98.6
系统三	蓄电池	152	180~200	81.3

从表2可以看出,对于蓄电系统,光伏+空气源热泵综合能源供热系统所用光伏场面积小于光伏+建筑电气化设备系统,蓄电池容量更小,太阳能保证率更高。对于光伏+空气源热泵+蓄热综合能源供热系统,将太阳能以热水形式储存,建议蓄热水箱容积15 m³,太阳能保证率可达98.6%。从经济性上分析,蓄热设备投资远低于蓄电设备,可见对于孤立地区,在本文所述的三种离网型“光伏+”综合能源供热系统中,光伏+空气源热泵+蓄热综合能源供热系统具有更高的经济性与可靠性。

4 结论

本文对日喀则市某孤立地区居住建筑使用以离网型“光伏+”综合能源供热技术方案进行了对比。分别建立了光伏+空气源热泵+蓄电、光伏+空气源热泵+蓄热、光伏+电采暖设备+蓄电的模型进行模拟分析。以太阳能保证率作为评价指标,得到结论如下:

(1) 在本文提出的三种能源系统形式中,光伏+空气源热泵的热源系统形式具有明显的优势。由于该系统所需的光伏场面积小,能源利用效率与系统可靠程度高,更适宜在青藏高原建筑供暖领域推广应用;

(2) 在建筑供暖领域,与蓄电形式相比,将太阳能以热水的形式储存具有更大的优势。通过本文研究发现,对于光伏+空气源热泵系统形式,当光伏场面积不变时,采用蓄热水箱方式蓄能会使系统

具有更高的太阳能保证率,投资与运行费用较低;

(3) 光伏+电采暖设备系统形式简单,但是该系统太阳能保证率低,所需蓄电池容量大,导致系统能源利用效率与经济性较差,是次于上述两种系统形式的方案选择。

总体而言,对于青藏高原孤立地区居住建筑,在光伏离网条件下,光伏+空气源热泵+蓄热系统形式具有明显的经济性与可靠性。然而,在动态热负荷变化需求特性下,光伏系统控制器的稳压、逆变过程造成的电损失以及电流相位变化对设备的冲击不可忽略,因此,研究攻关光伏直流驱动型空气热泵机组是未来发展的趋势之一。

参考文献 References

- [1] 李玥,范蕊,肖洪海. 中国西藏地区太阳能供暖系统优化研究[J]. 建筑科学,2019,35(2):21-28.
LI Yue, FAN Rui, XIAO Honghai. The optimization research of solar heating system in tibet[J]. Building Science, 2019,35(2):21-28.
- [2] 王磊,程建国,许志浩,等. 西藏太阳能与水源热泵联合供暖系统优化[J]. 暖通空调,2007,37(11):90-94.
WANG Lei, CHENG Jianguo, XU Zhihao, et al. Optimization of solar energy heating system combined with water source heat pumps in tibet[J]. Journal of HV & AC, 2007,37(11):90-94.
- [3] 白旭升,李保国,苏树强. 空气式太阳能供暖系统在西藏地区的应用[J]. 暖通空调,2018,48(7):94-97.
BAI Xusheng, LI Baoguo, SU Shuqiang. Application of solar air heating system in tibet area[J]. Journal of HV & AC, 2018,48(7):94-97.
- [4] 刘艳峰,王登甲. 太阳能地面采暖系统蓄热水箱容积分析[J]. 太阳能学报,2009,30(12):1636-1639.
LIU Yanfeng, WANG Dengjia. Volume of heat storage tank for solar floor heating[J]. Acta Enerciae Solaris Sinica, 2009,30(12):1636-1639.
- [5] ZHANG R, WANG D, LIU Y, et al. Economic optimization of auxiliary heat source for centralized solar district heating system in Tibetan Plateau, China[J/OL]. Energy Conversion and Management, 2020;270: 114997.
- [6] Solar heat for cities: The sustainable solution for district heating[R/OL]. Nov. 2019. <https://task55.iea-shc.org/publications>; [2021-08-10].
- [7] TSCHOPP D, TIAN Z, BERBERICH M, et al. Large-scale solar thermal systems in leading countries: A review and comparative study of Denmark, China Germany and Austria [J]. Applied Energy, 2020, 1-19.
- [8] Saga in Tibet tests solar heating in public buildings[J/OL]. <https://www.solarthermalworld.org/news/saga-tibet-tests-solar-heating-public-buildings>; 2021 [2021-08-10].
- [9] ZENG R, ZHANG X. Optimization and performance comparison of combined cooling heating and power

- ground source heat pump/photovoltaic/solar thermal system under different load ratio for two operation strategies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 208(3):1-13.
- [10] 高国帅. 基于分布式光伏发电的农村家庭电采暖方式优化研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.
GAO Guoshuai. Research on optimization of rural household electric heating mode based on distributed photovoltaic power generation [D]. Beijing: North China Electric Power University,2019.
- [11] TONG J, QUAN Z. The study on the performance of solar photovoltaic and air source heat pump composite building energy supply system[C]//10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, Jinan China:ISHVAC,2017.
- [12] 张瑞丹,李银轮,周家城. 青海地区光伏供暖技术选型及效益分析[J]. *河南科技*,2020,39(34):139-141.
ZHANG Ruidan, LI Yinlun, ZHOU Jiancheng. Technology selection and efficiency analysis of photovoltaic heating in qinghai region[J]. *Henan science and technology*,2020,39(34):139-141.
- [13] 王良,李明,韩友华,等. 光伏直驱空气源热泵储能供暖性能分析[J]. *太阳能学报*,2020,41(10):159-166.
WANG Liang, LI Ming, HAN Youhua et al. Analysis of energy storage and heating performance of photovoltaic direct-driven air source heat pump. [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*,2020,41(10):159-166.
- [14] 赵学林. 太阳能光伏光热耦合热泵供热系统动态模拟与性能研究[D]. 北京:华北电力大学,2020.
ZHAO Xuelin. Dynamic simulation and performance study of solar photovoltaic/thermal coupled heat pump heating system [D]. Beijing: North China Electric Power University,2020.
- [15] OZCAN HG, VARGA S, GUNERHAN H, et al. Numerical and experimental work to assess dynamic advanced exergy performance of an on-grid solar photovoltaic-air source heat pump-battery system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 227(1):1-16.
- [16] 王登甲,刘艳峰. 西藏高原太阳能供暖“高原病”问题探讨[J]. *暖通空调*,2021,51(8):7-11.
WANG Dengjia, LIU Yanfeng. “Altitude Sickness” problem of solar heating in Tibetan plateau[J]. *Journal of HV & AC*,2021,51(8):7-11.
- [17] KLEIN S A, BECKMAN A, MITCHELLW, et al. (2017) TRNSYS v18: A transient system simulation program. madison, Solar Energy Laboratory. University of Wisconsin - Madison.
- [18] HUANG J, FAN J, FURBO S, et al. Economic analysis and optimization of combined solar district heating technologies and systems[J]. *Energy*, 2019,186:1-16.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 818 页)

- [12] 李恩. 太阳能富集地区居住建筑墙体节能分析与构造优化[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.
LI En. The energy savings analysis for residential building walls and optimization of solar energy reception of structures in areas of high exposure[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [13] 姚盼,袁艳平,孙亮亮,等. 基于交互正交试验的热水系统太阳能保证率影响因素研究[J]. *太阳能学报*, 2017,38(2):400-408.
YAO Pan, YUAN Yanping, SUN Liangliang, et al. Research of factors affecting solar fraction of shws based on interactive orthogonal experiment[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2017, 38(2):400-408.
- [14] 刘妍彤. 西安某住宅建筑的主、被动混合优化节能策略研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2018.
LIU Yantong, Research on the active and passive hybrid optimization and energy saving strategy of a residential building in Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2018.
- [15] 王晓亮. 高寒地区建筑主动和被动采暖技术协同优化[D]. 成都:西南交通大学,2017.
WANG Xiaoliang. Collaborative optimization between passive and active heating for buildings in cold area [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2017.
- [16] 周士筌. 基于遗传算法和数据挖掘的居住建筑能耗及舒适性研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.
ZHOU Shisheng, Study on energy consumption and comfort of residential building based on genetic algorithm and data mining[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2108.
- [17] 何立群,丁力行. 太阳能建筑的热物理计算基础[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社. 2011.
HE Liqun, DING Lixing. Thermal physics calculation basis of solar building[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press. 2011
- [18] 王登甲,杨黎黎,马超. 太阳能直接受益外窗热平衡关系优化分析[J]. *节能技术*,2016,34(1):21-24,32.
WANG Dengjia, YANG Lili, MA Chao. Optimization analysis on the heat balance relationship of direct-gain window in solar houses [J]. *Energy Conservation Technology*, 2016, 34(1):21-24,32.
- [19] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial-systems[M]. Cambridge:MITPress, 1975.

(编辑 吴海西 沈 波)