

光伏直驱冰蓄冷空调系统性能分析

王 瑞¹, 李 明¹, 王云峰¹, 李国良¹, 徐永锋¹, 韩友华²

(1. 云南师范大学太阳能研究所, 昆明 650500; 2. 云南师范大学物理与电子信息学院, 昆明 650500)

摘 要: 为克服太阳能空调间歇性制冷, 解决长时间稳定供冷问题, 搭建一种光伏直驱冰蓄冷空调系统。针对系统在不同工况下运行稳定性以及不同工作模式下蓄冷供冷特性进行实验研究。实验表明, 系统采用 19 m² 光伏组件, 保障系统稳定运行的辐照度下限为 148 W/m²。系统采用制冰蓄冷后融冰供冷模式运行, 制冷系统额定输入电功率为 2.2 kW, 制冰量为 165 kg, COP 为 0.23。研究发现, 制冰蓄冷过程中系统 COP 随蒸发器表面冰层厚度的增加而减少, 因此优化系统运行模式为制冰蓄冷并同时融冰供冷模式, COP 达到 0.36, 较优化前提升 56%。

关键词: 光伏直驱; 冰蓄冷; 空调系统; 性能

中图分类号: TK511

文献标志码: A

0 引 言

随着国家经济的快速发展和人们生活水平的提高, 空调能耗在建筑能耗中所占比例越来越大, 尤其在夏季, 巨大的制冷需求常常造成夏季电荒。面对能源和环境的双重压力, 节能减排, 大力发展新能源是中国可持续发展的必然选择^[1-2]。与此同时, 随着光伏发电技术的快速发展以及太阳能电池转换效率的不断提高, 光伏组件成本逐年下降, 为太阳能光伏制冷研究提供了优势^[3-4]。利用太阳能发电驱动空调制冷能有效减少建筑能耗, 国内外学者开展了大量研究。Mba 等^[5]采用 Matlab 软件对光伏制冷系统运行过程进行仿真研究, 分析系统在不同光伏组件条件下的运行特性, 优化系统部件间的能量供需关系。Naser 等^[6]对光伏空调系统的投资成本提出优化方案, 采用最大功率点技术减少光伏组件数量, 进而降低投资成本。余世杰等^[7]进行独立光伏空调及其制冷技术的研究, 提出光伏空调系统各参数的优化配置方法。

上述太阳能光伏制冷技术主要采用光伏组件加蓄电池联合供能模式, 即采用蓄电池稳定直流母线电压与存储电能^[8-11]。但蓄电池使用寿命、环保、成本等问题是光伏制冷技术产业化应用瓶颈。本文提出一种光伏直驱冰蓄冷空调系统, 利用光伏组件直接驱动压缩机工作制冰蓄冷, 利用蓄冰代替蓄电池存储能

量, 针对系统运行特性进行实验研究, 分析不同工况下的系统性能, 以期对光伏直驱制冷技术深入研究提供参考。

1 系统组成及工作原理

光伏直驱冰蓄冷空调系统结构图如图 1 所示。整个系统由独立光伏供能单元、制冰蓄冷单元、供冷单元 3 部分组成。独立光伏供能单元包括光伏组件(A)、逆控机(B); 制冰蓄冷单元包括压缩机(C)、冷凝器(F)、节流阀(D)、浸入式盘管式蒸发器(H)、蓄冰桶(G); 供冷单元包括水泵(I)与风机旁管(J)。系统工作原理: 独立光伏供能单元中的光伏组件将太阳能转换为电能, 通过采用带有最大功率跟踪和变频调控技术的逆控机变频调控用电负载的频率使其自适应工作于光伏组件的最大功率点上, 实现光伏直接驱动压缩机高效运行。制冰蓄冷单元中制冷剂经压缩机压缩, 再由冷凝器冷却后经过节流阀节流为低温工质, 低温工质流入位于蓄冰桶内的蒸发器吸热制冷, 再流入压缩机完成制冷循环。供冷单元采用温差供冷模式, 水泵将蓄冰桶内的冷水泵到风机盘管处换出冷量供房间使用再回流到蓄冰桶内完成供冷循环。光伏直驱冰蓄冷空调系统将太阳能转化为蓄冰桶内水与冰的内能存储下来。用户可根据自身用冷需求开启供冷单元, 使用蓄冰桶内存储的冷量, 实现空调功能。

收稿日期: 2017-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(51666018); 中国-老挝可再生能源利用联合实验室共建项目(2015DFA60120)

通信作者: 李 明(1964—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事太阳能利用方面的研究。lmllldy@126.com

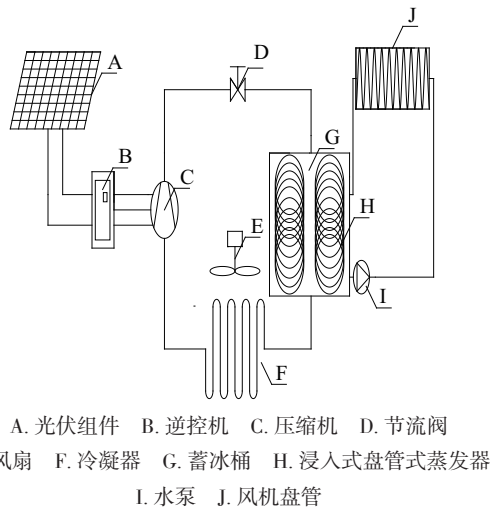


图1 光伏直驱冰蓄冷空调系统示意图

Fig. 1 Schematic illustration of photovoltaic direct drive ice storage air conditioning system

系统实物图如图2所示,各分图分别是光伏组件、逆控机、制冷机组(主要由压缩机、冷凝器、节流阀等部件组成)、蓄冰桶、浸入式盘管式蒸发器、用冷房间和风机盘管。

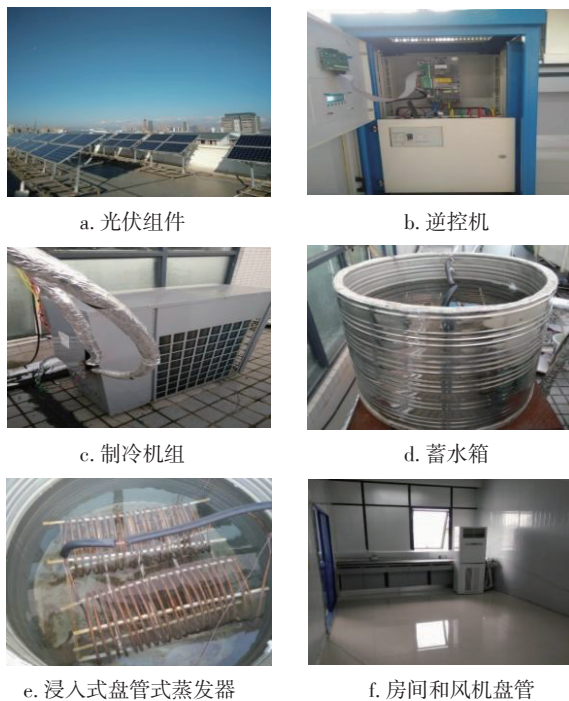


图2 光伏直驱冰蓄冷空调系统实物图

Fig. 2 Photovoltaic direct-drive ice storage air conditioning system

实验采用 TYD-ZS2 型光伏电站环境测试系统,用于测试和采集光伏阵列接收的辐照度、露点温度、风速

等参数,辐照范围 $0 \sim 2000 \text{ W/m}^2$,精度为 $\pm 5\%$ 。HTSOLAR300N 太阳能光电性能分析仪测试并采集逆控机、光伏组件、压缩机用电特性,测量精度为 $\pm 1\%$ 。Fluke2638A 数据采集器测试并采集蓄冰桶内水温以及用冷房间温度,其测量范围 $-50 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$,精度为 $\pm 0.4\%$ 。系统中光伏组件、逆控机、压缩机等主要部件参数如表1所示。

表1 系统部件参数

部件	参数名称	数值
电池板	峰值功率/W	190
	峰值电压/V	44.5
	峰值电流/A	5.52
逆控机	功率/kW	5
	输入电压/V	600
	输出电压/V	380
压缩机	频率/Hz	0~60
	功率/kW	2.2
	制冷量/kW	6.8

2 系统性能评价

1) 压缩机运转率用 L 表示,定义压缩机自启动开始,经过自动停机阶段直到下一次再启动为止所用时间为一个运转周期 T ,在这个周期内压缩机运转制冷时间称为运转时间或开机时间 T_1 ,而压缩机暂时停止时间为停机时间 T_2 ,那么压缩机运转率 L [12] 为式(1):

$$L = \frac{T_1}{T} = \frac{T_1}{T_1 + T_2} \quad (1)$$

2) 对于光伏直驱冰蓄冷空调系统,其制冷性能的优劣可用系统制冷性能系数(COP)来衡量。制冷性能系数(COP)用系统的制冷量 Q_c 与系统接收的太阳辐照能量 Q_s 之比表示:

$$COP = \frac{Q_c}{Q_s} \quad (2)$$

$$Q_c = c_1 m_1 \Delta t_1 + \gamma m_2 + c_2 m_2 \Delta t_2 \quad (3)$$

$$Q_s = \int_0^t I(t) A dt \quad (4)$$

式中, c_1 ——水的比热容, kJ/kg ; c_2 ——冰的比热容, kJ/kg ; γ ——水的固化潜热, kJ/kg ; m_1 ——水的质量, kg ; m_2 ——冰的质量, kg ; Δt_1 ——实验前后水温的变化, $^\circ\text{C}$; Δt_2 ——实验前后冰温度的变化, $^\circ\text{C}$; t ——日照时间, h ; I ——太阳辐照度, W/m^2 ; A ——光伏组件总面积, m^2 。

3) 系统供冷过程中,蓄冰桶供冷量可用式(5)表示:

$$Q_w = \int_0^t q c_i (T_{in} - T_{out}) dt \quad (5)$$

式中, q ——蓄冷桶供冷过程中管道内水的质量流量, kg/s; T_{in} ——冷过程中流回蓄冰桶的水温, $^{\circ}\text{C}$; T_{out} ——供冷过程中流出蓄冰桶的水温, $^{\circ}\text{C}$; t ——供冷时间, s。

3 实验测试与分析

3.1 不同工况下系统运行稳定性实验

因为系统与传统太阳能空调相比,未采用蓄电池稳定直流母线电压与存储电能,所以冰蓄冷空调系统在不同工况下,尤其是在辐照度不稳定的多云天气条件下,是否能够稳定运行是其实用价值高低的重要体现。将 16 块光伏组件组成的光伏组件放置在不遮挡的楼顶,倾斜角度 30° 面偏西南方向,蓄冰桶内放入 623 kg 自来水。在典型晴天 08:30 开启系统,光伏组件直接驱动压缩机运行,17:00 断开光伏供电,系统停止工作。晴天辐照度与环境温度随时间变化如图 3 所示。从图 3 可看出,当天实验时间阶段内,最低辐照度为 307 W/m^2 ,最高辐照度为 946 W/m^2 ,环境温度从 16.5°C 逐渐升至 24.5°C 。图 4 是系统进行制冰蓄冷实验当天发电功率与负载功率随时间变化曲线,其中发电功率为光伏组件输出功率数值,负载功率为压缩机运行功率数值。由图 4 可看出,光伏组件发电功率与压缩机运行功率变化趋势相同,均在早上至中午时间段内逐渐增加,中午至傍晚停机时间段内逐渐减少。通过晴天工况实验发现,光伏直驱冰蓄冷空调系统在不使用蓄电池的情况下,16 块光伏组件接收辐照度不低于 307 W/m^2 条件时,系统可始终维持不停机稳定运行。

典型多云工况下辐照度与环境温度随时间变化关系如图 5 所示。可看出实验当天,辐照度极不稳定,多次陡然降至为零,环境温度维持在 $18 \sim 24^{\circ}\text{C}$ 。多云工况下发电功率与负载功率在 1 d 中的变化情况如图 6 所示,可看出实验期间,光伏组件发电功率与压缩机运行

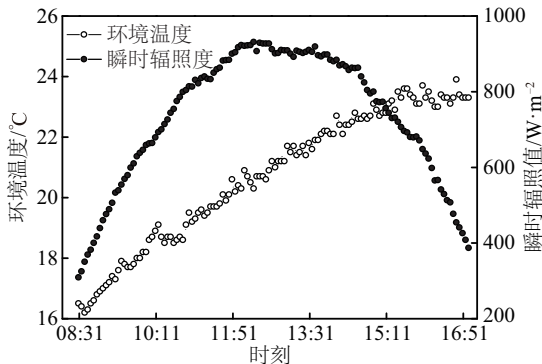


图3 辐照度与环境温度变化

Fig. 3 Variation of irradiance and ambient temperature

功率均波动较大。对比图 4 与图 6 可看出,与晴天工况下系统能够不停机稳定运行相比,系统运行在多云工况条件下光伏组件发电功率与压缩机运行功率在实验期间内有较长时间数值均为零,此时压缩机停机。多云工况下测试结果表明,16 块光伏组件接收太阳辐照度低于 148 W/m^2 时,系统停止工作。

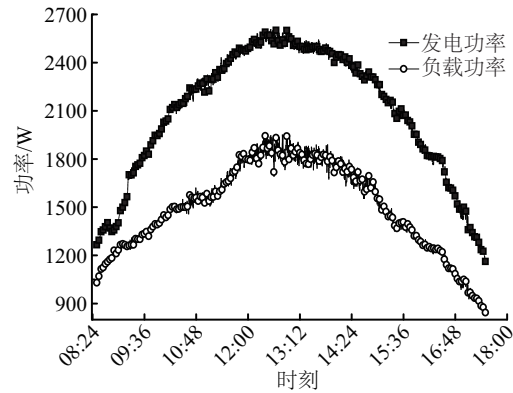


图4 发电功率和负载功率的比较

Fig. 4 Comparison between instantaneous generated power and consumed power

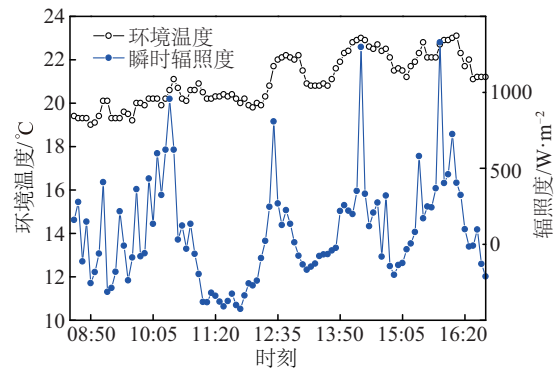


图5 辐照度与环境温度变化

Fig. 5 Variation of irradiance and ambient temperature

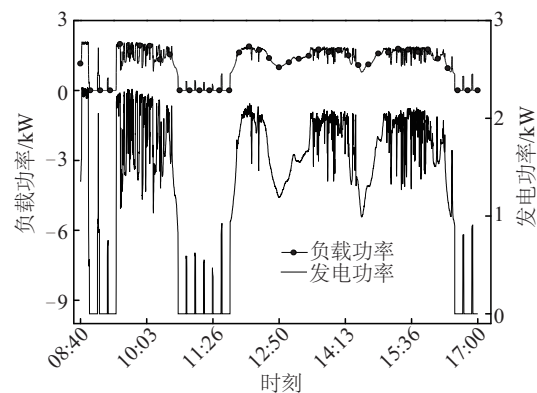


图6 发电功率与负载功率的比较

Fig. 6 Comparison between instantaneous generated power and consumed power

压缩机在不同工况下运行频率在 1 d 中的变化如图 7 所示。可看出晴天工况下压缩机频率变化平稳,多数时刻压缩机频率约为 50 Hz。多云工况下,压缩机频率波动范围较大,频率在 0~60 Hz 之间跳跃变化。这是由于多云工况下,较厚的云层遮挡,导致光伏组件接收的太阳辐照度陡然变低或减为零,此时光伏组件发电功率不足以驱动压缩机运转,因此压缩机频率亦会陡然下降或减为零。辐照度骤然波动会导致压缩机频繁启停,缩短压缩机使用寿命。可采用调节压缩机运行频率下线的办法使压缩机维持低频率运转,避免压缩机频繁启停,延长压缩机使用寿命。

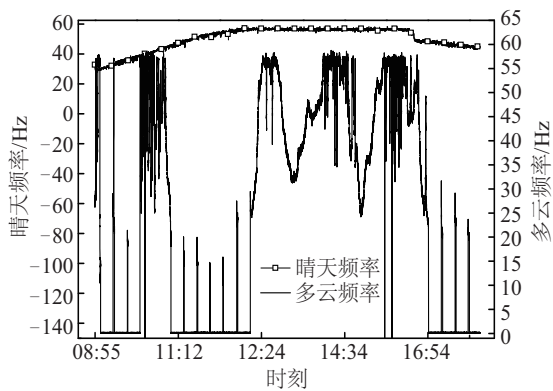


图7 压缩机运行频率

Fig. 7 Compressor operating frequency

表 2 为压缩机运转率分别在晴天、多云工况下的实验结果。晴天日 8.5 h 累计辐照量为 22.63 MJ/m^2 , 压缩机运转率 100%, 制冰量为 165 kg, COP 为 0.23; 多云日 8.5 h 累计辐照量为 14.45 MJ/m^2 , 压缩机运转率 70%, 制冰量为 79 kg, COP 为 0.15。对比晴天与多云 2 种工况下系统 COP 发现, 多云工况时系统 COP 下降明显, 造成这种现象的原因, 一方面是由于晴天太阳辐照条件较好且波动小, 光伏组件输出功率稳定, 压缩机全天多数时间运行在额定功率附近, 且压缩机全天无停机运行, 运转率为 100%, 太阳辐射能量被充分利用; 另一方面由于多云工况下, 辐照度不稳定, 压缩机运转率仅为 70%。压缩机停机时间较长, 极大地浪费了太阳资源, 造成系统 COP 下降。改进办法是通过控制策略选用多个小功率压缩机, 根据太阳辐照度变化选择性地开启压缩机的数量, 拓宽太阳辐照度利用范围, 或者根据太阳辐照度变化灵活选用光伏组件数量, 使光伏组件输出功率足够驱动压缩机不停机运转, 减少因停机造成的太阳辐照度浪费。

表2 压缩机运转率

Table 2 Compressor operation rate

工况	实验 时间/h	压缩机 停机时间/h	压缩机 运转率/%
晴天	8.5	0	100
多云	8.5	2.5	70

3.2 制冰蓄冷性能分析

光伏直驱冰蓄冷空调系统的特点是将太阳能转化为蓄冰桶内水与冰的内能存储起来。当用户需要用冷时, 可根据自身需求即开即用蓄冰桶内存储的冷量。系统实现制冰蓄冷功能主要是通过蓄冰桶内蒸发器吸收桶内水的热量, 使水降温储能, 当蒸发器表面水温降至 0°C 时, 蒸发器表面开始结冰并向四周扩散, 冷量以冰与降温水的形式存储起来。图 8 是制冰蓄冷实验阶段蓄冰桶内水温随时间变化情况。由图 8 可看出, 蓄冰桶内 623 kg 水的平均温度由 16°C 降至 0°C 用时 170 min。之后蒸发器表面逐渐结冰, 当天由实验开始至实验结束共用 8.5 h, 制冰量 165 kg, 冰块平均温度为 -5°C , 靠近蒸发器表面处, 冰的温度最低达 -11°C 。系统实验 8.5 h 累计接收辐照量为 387 MJ, 蓄冰桶内蓄冷量为 89 MJ, 系统制冷性能系数 COP 为 0.23。

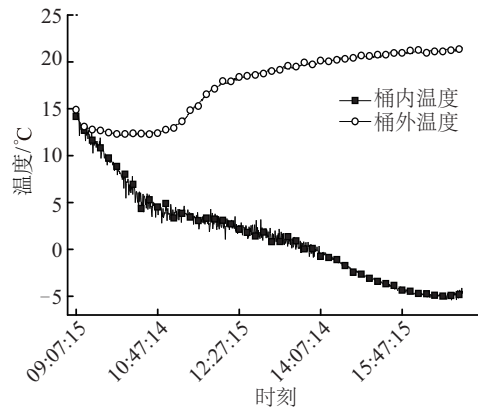


图8 蓄冰桶内外温度变化

Fig. 8 Temperature change inside and outside ice storage tank

图 9 为系统 COP 随蒸发器表面冰层厚度的变化情况。由图 9 可看出, 系统 COP 随冰层厚度的增加而下降, 冰层厚度为 0~3 cm, COP 急剧下降, 冰层厚度大于 3 cm 后 COP 下降较为缓慢。冰层厚度先快速增加, 接着逐步缓慢增加。这是由于蒸发器表面开始结冰后, 过冷冰会阻碍制冷剂与水之间的换热, 随着冰层厚度的增加, 其阻碍能力越来越大, 当过冷冰厚度达到约 3 cm

时,其阻碍能力接近饱和,之后系统 COP 下降变缓。蒸发器表面冰层厚度对系统 COP 有严重的抑制作用,避免蒸发器表面结冰,使得制冷剂与水能够充分换热,系统 COP 将会显著提高。

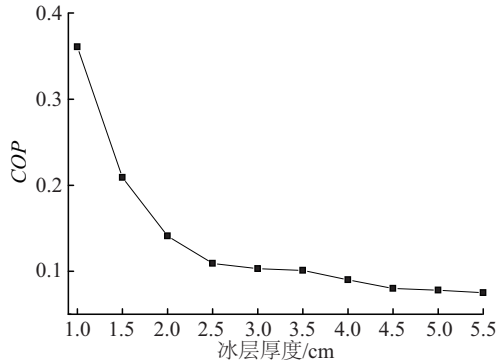


图9 COP 随冰层厚度变化

Fig. 9 Change of COP along with thickness of ice

3.3 制冰蓄冷后融冰供冷模式性能分析

08:30 开启制冰蓄冷单元制冰蓄冷,17:00 关闭制冰蓄冷单元,打开水泵与风机盘管组成的供冷单元,水泵将蓄冰桶内冷水泵到位于室内的风机盘管处换出冷量供给房间使用。为研究系统供冷效果,搭建 23 m^2 隔断房间作为系统用冷房间,其维护结构的材料分别为砼、聚氨酯板,房间留有门窗。根据国家规范中各材料及使用类别的传热系数计算用冷房间热负荷为 1669 W 。图 10 是实验搭建的 23 m^2 用冷房间以及蓄冰桶内白天制冰蓄冷时所存储的冷量实物图。



图10 蓄冰桶冷量与用冷房间

Fig. 10 Cold quantity of bucket and cooling room

图 11 是供冷实验当天蓄冰桶内水温与房间温度变化情况。白天制冰蓄冷阶段,蒸发器表面结冰质量为 165 kg 。由图 11 可看出,蓄冰桶内水的平均温度降至 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。17:00 后供冷阶段,室内温度首先快速下降到 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$,之后缓慢回升至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冰蓄冷空调采用制冰蓄冷后融冰供冷模式给房间供冷时,房间温度首先下降到设定温度,随后再逐渐上升。这是因为冰蓄冷空调采用

温差供冷方式为室内降温,蓄冰桶内存储的冷量随着室内用冷消耗而逐渐减少,蓄冰桶内水温与房间温度之间的差值随着供冷时间的增加会越来越小,当房间温度与蓄冰桶内水温接近时,温差供冷效果消失。图 11 中环境温度在 17:00 时高达 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$,这是由于温度探头放置在供冷房间墙面外壁,昆明夏季 17:00 时太阳直射温度探头所在墙面,导致温度升高到最大值 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时房间内温度与墙外壁温度相差近 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,从开始供冷到温差供冷效果消失,整个过程持续 9 h 。实验表明光伏直驱冰蓄冷空调系统白天制冰 8.5 h ,夜间可供 23 m^2 房间用冷 9 h , COP 为 0.23 。制冰蓄冷后融冰供冷模式可满足家庭户用空调模式,用户白天出门上班时开启制冷单元,晚上下班需要用冷时开启供冷单元。

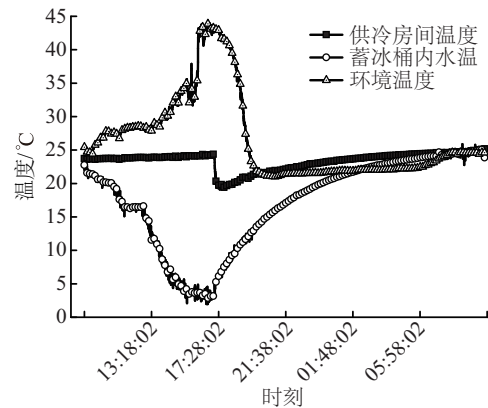


图11 室内温度和环境温度的变化

Fig. 11 Variation of indoor temperature and ambient temperature

3.4 制冰蓄冷并同时融冰供冷模式性能分析

由于蒸发器表面结冰会影响系统 COP ,为避免蒸发器表面结冰与提升系统 COP ,系统采用制冰蓄冷并同时融冰供冷模式进行实验研究。此模式下制冰蓄冷与融冰供冷同时进行,蓄冰桶内存储的冷量被及时利用,蒸发器外表面不会出现过冷冰现象。此时系统的制冷量为蓄冰桶内存储的冷量与房间消耗的冷量之和。图 12 是采用制冰蓄冷并同时融冰供冷模式时供冷房间与蓄冰桶内水温以及环境温度随时间变化情况。

图 12 中 08:30~12:00 内仅开启制冰蓄冷单元工作;12:00~17:00 内同时开启制冰蓄冷单元与供冷单元;17:00~次日 08:00 内仅开启供冷单元。由图 12 可看出,12:00~17:00 内,房间温度由 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至约 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并维持在 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 约 5 h 。17:00 后蓄冰桶内水温与供冷房间温度开始缓慢上升。实验发现,采用制冰蓄冷并同时融冰供冷模式为房间供冷时,其供冷效果与商业空调完

全相同,此模式能使房间温度维持在设定值附近约 5 h。这是因为在 12:00~17:00 内制冰蓄冷单元与供冷单元同时开启,制冰蓄冷单元制取的冷量等于或略大于用冷房间消耗的冷量,此时间段内房间温度与蓄冰桶温度基本维持在设定值。17:00 后用冷单元单独工作,用冷房间一直在消耗蓄冰桶内原先存储的冷量,随着供冷时间的增加蓄冰桶内存储的冷量越来越少,最终蓄冰桶水温与房间温度会上升至相接近。制冰蓄冷并同时融冰供冷模式适用于办公室与商场白天用冷。

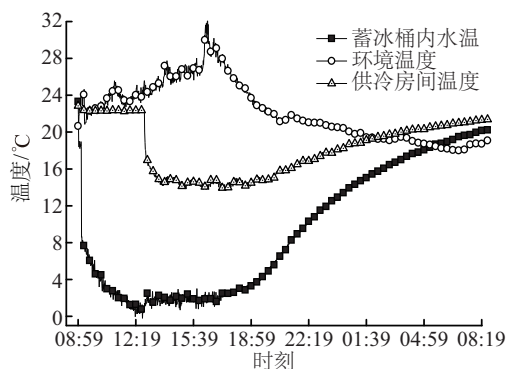


图 12 室内温度和环境温度的变化

Fig. 12 Variation of indoor temperature and ambient temperature

表 3 是光伏直驱冰蓄冷空调系统分别运行在制冰蓄冷后融冰供冷、制冰蓄冷并同时融冰供冷 2 种模式下的试验结果对比。模式 1 为制冰蓄冷后融冰供冷模式,模式 2 为制冰蓄冷并同时融冰供冷模式。由表 3 中可得到,在白天 8.5 h 累计辐照量相接近的情况下,采用制冰蓄冷后融冰供冷模式系统全天制冰量为 165 kg, COP 为 0.23。采用制冰蓄冷并同时融冰供冷模式,蒸发器表面未结冰,系统 COP 达到 0.36,提升了近 56%。这是由于开启水泵将蓄冰桶内低温水经过管道循环至室内风机盘管处将冷量换给室内,蓄冰桶内冷量被房间及时利用,此时蒸发器表面不易结冰,蒸发器管道内的制冷剂与蓄冰桶内的水充分换热, COP 显著提升。

表 3 不同模式运行结果对比

Table 3 Comparison of operation results of different modes

模式	辐照量/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$	制冰量/kg	系统 COP
1	22.63	165	0.23
2	22.46	0	0.36

4 结 论

1) 光伏直驱冰蓄冷空调系统在无蓄电池稳定与储能电能的情况下,在辐照度稳定的晴天工况下可稳定运

行,系统实现制冰蓄冷代替蓄电池存储能量。

2) 在辐照度不稳定的多云工况下,系统仍能制冰蓄冷,制冰量为 79 kg。多云天气时,由于云层遮挡,辐照的陡然波动对压缩机影响较大,当辐照度陡然降至 148 W/m^2 以下时,压缩机骤停,实验测得多云工况下,压缩机一天停机 19 次,压缩机运转率为 70%。压缩机频繁启停不仅极大浪费太阳辐照资源,而且会缩短压缩机使用寿命。在设计时尽量做到光伏组件与压缩机匹配,使其在接收较低辐照度时,光伏组件发电功率能够维持压缩机运转,避免压缩机频繁启停。

3) 光伏直驱冰蓄冷空调白天制冰蓄冷时,系统 COP 随蒸发器表面冰层厚度的增加而减少。在设计时尽量避免蒸发器表面结冰,系统 COP 将会显著提升。

4) 系统给出 2 种光伏冰蓄冷空调制冰蓄冷模式,制冰蓄冷后融冰供冷模式适用于家庭户用, COP 为 0.23。制冰蓄冷并同时融冰供冷模式适用于办公室与商场, COP 为 0.36。

[参考文献]

- [1] ADNENE C, AHMED D. Optimization and management of a solar refrigeration plant using latent storage[J]. Solar energy, 1996, 56(6): 535-541.
- [2] 苏坤烨, 李明, 罗熙, 等. 不同供电模式下光伏空调系统采暖性能研究[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2015, 35(1): 17-23.
SU K Y, LI M, LUO X, et al. Investigation on the heating performance of a photovoltaic-air-conditioning system under different power supply[J]. Journal of Yunnan Normal University (natural sciences edition), 2015, 35(1): 17-23.
- [3] 吕光昭, 李勇, 代彦军, 等. 独立光伏空调系统冬季采暖性能分析[J]. 太阳能学报, 2013, 34(7): 1167-1171.
LYU G Z, LI Y, DAI Y J, et al. Analysis on the heating performance of photovoltaic air conditioning system[J]. Acta energiae solaris sinica, 2013, 34(7): 1167-1171.
- [4] 李玉恒, 季旭, 罗熙, 等. 光伏冰箱系统的性能特性研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(2): 422-429.
LI Y H, JI X, LUO X, et al. Performance analysis of photovoltaic refrigerator system[J]. Acta energiae solaris sinica, 2015, 36(2): 422-429.
- [5] MBA E F, CHUKWUNEKE J L, ACHEBE C H. Modeling and simulation of a photovoltaic powered vapor compression refrigeration system[J]. Journal of information engineering and applications, 2012, 2

- (10): 1-15.
- [6] NASER B M, SHALTOUT A. Analysis and design of photovoltaic powered air conditions using slip-frequency control scheme[J]. Electric power components and system, 2007, 35(1): 81-95.
- [7] 茆美琴, 何若慧. 光伏空调系统的结构及优化配置[J]. 新能源, 1996, 18(12): 18-20.
- MAO M Q, HE R H. The structure and optimal configuration of photovoltaic conditioner[J]. New energy sources, 1996, 18(12): 18-20.
- [8] 刘群生. 太阳能光伏直流冰箱的能量管理和系统匹配研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- LIU Q S. Study on the energy management and system matching of a solar photovoltaic DC refrigerator[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [9] AXAPOULOS P J, THEODORIDIS M P. Design and experimental performance of a PV ice-maker without battery[J]. Solar energy, 2009, 83(1): 1360-1369.
- [10] 刘群生, 付鑫, 张鹏. 太阳能光伏直流冰箱系统性能研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(2): 184-188.
- LIU Q S, FU X, ZHANG P. Experimental study on the operation characteristics of the photovoltaic DC refrigerator[J]. Acta energiae solaris sinica, 2007, 28(2): 184-188.
- [11] 殷志强, 孟宪淦. 向太阳索取-中国太阳光-热与光-电应用现状与展望[J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 583-584.
- YIN Z Q, MENG X G. Harvesting the sun: the status and prospects of solar thermal conversion and photovoltaic applications in China[J]. Acta energiae solaris sinica, 2003, 24(5): 583-584.
- [12] 韦绍波. 电冰箱运转率测试的新方法[J]. 广西民族学院(自然科学版), 1998, 4(1): 21-22.
- WEI S B. New method for testing the operate of refrigerator[J]. Journal of Guangxi University for Nationalities (natural science edition), 1998, 4(1): 21-22.

PERFORMANCE ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC DIRECT-DRIVEN ICE COOL STORAGE AIR CONDITIONING SYSTEM

Wang Rui¹, Li Ming¹, Wang Yunfeng¹, Li Guoliang¹, Xu Yongfeng¹, Han Youhua²

(1. Research Institute of Solar Energy, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2. School of Physics and Electronic Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: To overcome the solar energy air conditioning intermittent refrigeration and solve the problem of cooling stably for a long time, a photovoltaic direct-driven ice cool storage air conditioning system has been established. Under different working conditions, the stability of system is studied experimentally. At the same time, the cold storage and cooling characteristics of the system are studied experimentally under different operating modes. Experiment results show that the system composed of 19 m² panels can stable operation, when the radiation intensity is larger than 148 W/m², when system works in mode of ice making firstly and then ice melting cooling, rated input power is 2.2 kW, ice-making capacity is 165 kg, the *COP* is 0.23. The study find that the increase of the thickness of ice at evaporator surface lead to lower *COP* in the process of the ice storage. Thus, simultaneous operation of ice making and melting cooling is an optimal operating mode, in which the *COP* reaches 0.36.

Keywords: photovoltaic direct-driven; ice cool storage; air conditioning system; performance