

文章编号: 1671-6612 (2024) 02-196-06

# 基于 TRNSYS 的学校建筑 PV/T 跨季节蓄热供暖研究

田亮<sup>1</sup> 徐序<sup>1</sup> 尹文龙<sup>2</sup> 李小明<sup>2</sup> 章文杰<sup>2</sup>

(1. 中铁建设集团有限公司 北京 100040;

2. 南京理工大学能源与动力工程学院 南京 210094)

**【摘要】** PV/T 耦合地源热泵系统在多能互补、提高可再生能源利用率方面受到广泛的关注, 针对南京市某小学工程应用 PV/T 耦合地源热泵系统实现跨季节供暖做模拟分析。应用 TRNSYS 软件针对系统的运行温度、集热效率、设备工况、能源利用率进行模拟。发现 PV/T 电池通过地埋管放热的冷却水具有较好的集热冷却效果; 土壤蓄热体平均温度仅下降 0.23℃, 实现土壤热平衡, 且该系统的跨季节蓄热率约为 60%; 热泵机组实际 COP 平均 COP 在 5 以上, 具有良好的节能效果; 系统跨季节可以提供建筑热负荷的 73.17%, 发电量可以满足 63.2% 的热泵能耗。

**【关键词】** PV/T; 地埋管蓄热; 跨季节供暖; TRNSYS

中图分类号 TK01 文献标志码 A

## Study on Cross-Season Thermal Energy Storage Heating in School Buildings Based on TRNSYS

Tian Liang<sup>1</sup> Xu Xu<sup>1</sup> Yin Wenlong<sup>2</sup> Li Xiaoming<sup>2</sup> Zhang Wenjie<sup>2</sup>

(1. China Railway Construction Group Co., Ltd, Beijing, 100040;

2. School of Energy and power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

**【Abstract】** The PV/T coupled ground source heat pump system has received wide attention in terms of multi-energy complementarity and improving the utilization rate of renewable energy. In this paper, the application of the PV/T coupled ground source heat pump system to realize inter-seasonal heating in an elementary school project in Nanjing City is simulated and analyzed. TRNSYS software is applied to simulate the system's operating temperature, heat collection efficiency, equipment working conditions, and energy utilization. It is found that the cooling water exothermic from the PV/T cell through the buried pipe has a good heat collection and cooling effect; the average temperature of the soil heat storage body decreases only by 0.23℃, realizing the soil heat balance, and the inter-seasonal heat storage rate of the system is about 60%; the average COP of the heat pump unit is above 5, which is a good energy-saving effect; the system can provide 73.17% of the heat load of the building in the inter-seasonal period, and the power generation can meet 63.2% of the heat pump energy consumption.

**【Keywords】** PV/T; Buried pipe thermal storage; Cross-season heating; TRNSYS

## 0 引言

目前较为流行的 PV/T 技术将光伏电池与换热管道集合起来, 利用太阳能发电的同时收集背部余

热, 实现了光伏热的综合应用。但 PV/T 系统的性能受季节天气条件影响十分显著, 缺乏稳定供能的能力。而土壤源热泵系统因地下土壤温度恒定, 是

基金项目: 节点开放式双层光伏幕墙热-电性能及其对空调系统负荷影响研究 (编号: 51920887)

作者简介: 田亮 (1981.01-), 男, 本科, 高级工程师, E-mail: 605765674@qq.com

通讯作者: 章文杰 (1986.10-), 男, 博士研究生, 副教授, E-mail: zhangwenjie001@139.com

收稿日期: 2023-09-16

一种可以稳定供能的节能系统。将 PV/T 和地埋管相结合, 可以实现 PV/T 和地埋管之间多能互补, 并且更加匹配学校建筑的用能特点。在暑假期间, 一方面, 学校建筑能耗低, PV/T 的余热可以存蓄到土壤, 另一方面, 土壤可以作为冷却 PV/T 的冷源, 降低 PV/T 温度, 提高发电效率。在供暖期, 通过土壤放热实现建筑供暖用能的自给自足。

李慧星<sup>[1]</sup>等根据太阳辐射传热机理和空气传热介质的特点, 研制出 PV/T 空气源热泵集成供热系统, 其理论 COP 值高达 5.37; 严华夏<sup>[2]</sup>针对严寒地区建筑提出联合太阳能和风能和土壤源热泵的多种能源互补的供暖供冷系统 (SGCSHP) 系统; abbas<sup>[3]</sup>基于相似理论进行沙盘系统实验, 研究用于地下蓄冷的钻孔热能储存系统, 其满足空调系统的制冷需求。目前关于多系统耦合的多能互补已有广泛的研究, 但对 PV/T 耦合地源热泵系统与建筑功能特性相结合的研究相对不足, 本文建立 PV/T 耦合地埋管的 TRNSYS 模型, 对该系统应用于能耗随季度变化的学校建筑做了进一步分析, 希望对 PV/T 跨季节蓄热供暖的工程提供指导作用。

## 1 系统简介

### 1.1 建筑概况

本研究基于南京市某小学校园, 其中包括三栋教学楼、食堂和综合楼等建筑, 地上建筑总面积为 22832.87m<sup>2</sup>, 供暖总面积为 12852m<sup>2</sup>。冬季供暖热负荷经过模拟计算。结果如图所示, 其中 2 月份学校放假不供暖, 则该工程供暖最大热负荷为 751kW。

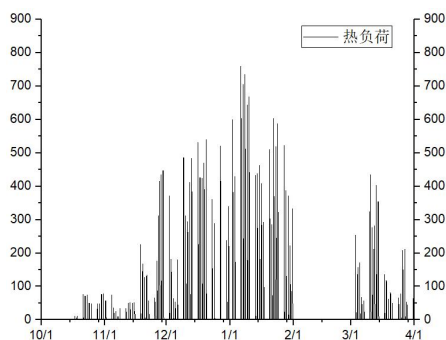


图 1 建筑热负荷曲线

Fig.1 Building heat load curve

现在学校建筑屋顶设置光伏余热回收设备, 并在建筑周围地面设置地埋管。7、8 月份学校放假

时光伏系统工作产生热量, 利用地埋管将冷却水箱中的余热储存在建筑周围的地下, 在需要供暖的时间利用。在供暖期且学校正常上课的时间段内, 此时利用热泵取出地下的蓄热供热, 节假日、夜晚不进行制热。非供暖期 9、10、11 月学校直接利用 PV/T 系统的冷却水箱余热作为生活热水。

### 1.2 跨季节供暖系统

整个系统的示意图如图 2 所示。1 为 PV/T 板, 2 是地埋管, 3 是缓冲水箱, 4 是热泵。

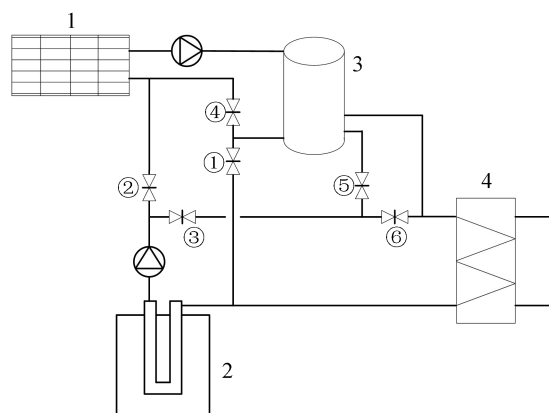


图 2 系统原理图

Fig.2 System schematic diagram

7、8 月日间, 阀门①、②开启, 其他阀门关闭, 集热管与地埋管相通, PV/T 余热被冷却水吸收进入缓冲水箱, 当建筑能源需求低时不需要利用水箱内的热量, 冷却水经过地埋管将余热释放到地下土壤, 然后再回到 PV/T 的集热板。供暖期, 开启地埋管流向热泵的阀门③, 地埋管与 PV/T 组件连接的管道阀门①、②关闭, 此时土壤蓄的热量通过循环水在地埋管取出, 缓冲水箱与 PV/T 冷却水的管路阀门④开启, PV/T 继续回收余热, 当缓冲水箱内提升到足够的供暖温度时, 开启阀门⑤, 关闭阀门⑥使流出地埋管的循环水先流进水箱, 热泵再从水箱中取水。采用低温辐射墙体供暖, 参考供水温度为 25~35℃、供回水温差 3~6℃<sup>[4]</sup>。由于地埋管出水温度较低, 故不能直接供给室内, 通过热泵提高温度, 设计进出水温度为 30℃和 35℃, 在较低的出水温度下, 热泵 COP 更高, 进一步降低能耗。

PV/T 的运行模式为“自发自用, 余电上网”<sup>[5]</sup>, 即供暖系统 (热泵和水泵) 优先使用 PV/T 发电。当发电量不足以提供系统的耗电量时, 不足部分将由电网提供, 当电量充足时, 剩余电量根据当地电

价上网，实现多能互补。

PV/T 独自运行的一大缺陷是随季节变化，热源的能源输出特性与建筑负荷特性在时间上存在矛盾关系。而该系统耦合土壤源储能系统以及辅助热源，可以最大限度地提高可再生能源的利用率，并且适用于学校建筑的负荷特性。

## 2 系统设计及模型搭建

### 2.1 跨季节供暖系统

在南京市太阳辐射量和建筑热负荷计算的基础上，设计 PV/T 耦合埋地管的供热系统，设计要求如下：

PV/T 系统设计要求：(a) 屋顶放置光伏板占地面积的可行性；(b) 循环冷却水运行温度满足光伏板降温需求；(c) 系统用电需求。

埋地管系统设计要求：(a) 夏季换热量与 PV/T 供热量匹配；(b) 冬季换热量满足热负荷要求；(c) 循环流量与 PV/T 冷却水量匹配。

热泵系统设计要求：(a) 实际供热量满足热负荷要求；(b) 蒸发端工况与埋地管供热工况相匹配；(c) 负荷侧工况与辐射墙体供暖运行工况相匹配。

在蓄热期间 PV/T 与埋地管系统之间连通，通过调整阀门的开度实现对 PV/T 系统和埋地管的流量调节。埋地管和光热集热管管道在分流前设置旁通管，管道集水时旁通管汇入主管道。控制旁通阀门调节进入集热管和埋地管蓄热的流量。当 PV/T 集热管热量较低时，PV/T 系统调整进水阀门降低流量，旁通流量增加，旁通流量达到一台水泵的设计流量时，关闭一台水泵，在埋地管侧关断一根埋地管道实现流量调节，确保每个钻井的运行和传热效率。

根据设计要求以及相关研究经验<sup>[6,7]</sup>，系统主要设备设计参数如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 PV/T 系统参数表

Table 1 PV/T system parameter table

PV/T 面积	PV/T 倾角	冷却流体流量	标况光电效率	集热板效率
500m <sup>2</sup>	27.72°	10kg/s	17%	70%

表 2 埋地管参数表

Table 2 Buried pipe parameter table

钻井数量	钻井深度	孔间距	岩土热导率	岩土热容	流速
10	120m	2.15m	1.5W/(m·K)	2779kJ/m <sup>3</sup> ·K	1kg/s

表 3 热泵系统主要参数表

Table 3 Main parameter table of the heat pump system

系统	参数
蒸发端额定工况	进水温度 5℃，流量 1L/s
冷凝端额定工况	进水温度 30℃，流量 1L/s
额定制热量	15kW
额定能耗	3kW
台数	10

### 2.2 运行控制

根据上述原理图设计系统运行模式如下：

模式一：储热，7、8 月，PV/T 发电并集热，冷却水在埋地管中向土地蓄热。当 PV/T 进出口温差大于 2℃且太阳辐射达到 50W/m<sup>2</sup>时系统启动。

模式二：蓄热，当系统在早、晚时间段不运行时，水泵停止。同时假设 9、10、11 月时 PV/T 的热、电能用于当季，因此模拟中 9、10、11 月系统控制信号与不运行时相同。

模式三：供暖，冬季处于学校的供暖时间，PV/T+埋地管供暖<sup>[8]</sup>。埋地管向热泵提供低温热水，PV/T 同时集热，当缓冲水箱内的温度大于埋地管出水温度 2℃，埋地管内的低温热水先流入水箱，再通过热泵向建筑提供高温热水；否则埋地管循环水直接进入热泵，PV/T 水循环仅进行集热。《实用供热空调设计手册》<sup>[9]</sup>中提供了南京的供暖天数为 79 天，具体供暖时间为 12、1、2 月，学校放假时间每年有几天不同，为方便计算假设 2 月初放假停止供暖。

该系统的运行流程图如图 3 所示。

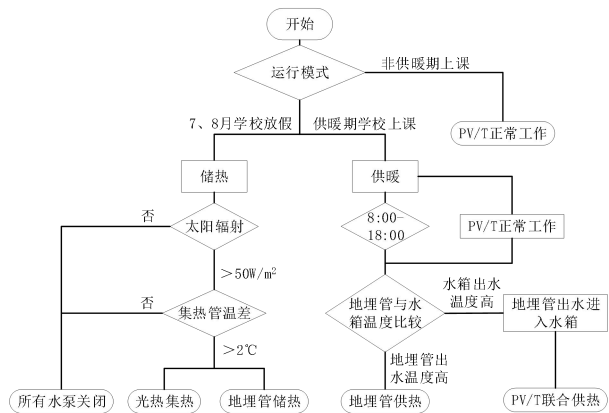


图 3 系统运行流程图

Fig.3 System operation flow diagram

为实现且模拟三种运行模式，设计包含工况、季节变化的自动控制方法如下：

(1) 温差控制, 通过设置在 PV/T 子系统的出口处、地理管出口处、储热水箱底部的传感器监测温度差值, 以控制太阳能集热泵的启停。

(2) 光电控制, 通过检测该时间的太阳辐射量是否超过设定值  $50\text{W}/\text{m}^2$  控制 PV/T 系统的启停。

(3) 时间信号控制, 设置固定的间歇供暖时间, 当时间处于设定时间内, 则系统输出开启信号, 反之则输出关闭信号。

(4) 负荷控制, 在建筑负荷为 0 时关闭热泵。

### 2.3 TRNSYS 模型搭建

利用上述的运行模式和控制策略, 在 TRNSYS 瞬态仿真平台搭建 PV/T 耦合地理管跨季节蓄热系统, 通过系统的自控, 实现 PV/T+地理管系统为建筑进行供暖供电的功能。具体的仿真模型图如所示, 模型搭建作如下假设:

(1) 忽略管道热损和阻力损失。

(2) 模型假设建筑辐射墙体供暖稳定运行, 辅助热源对该系统运行无影响。

(3) 假设 PV/T 性能不随设备运行时间发生变化。

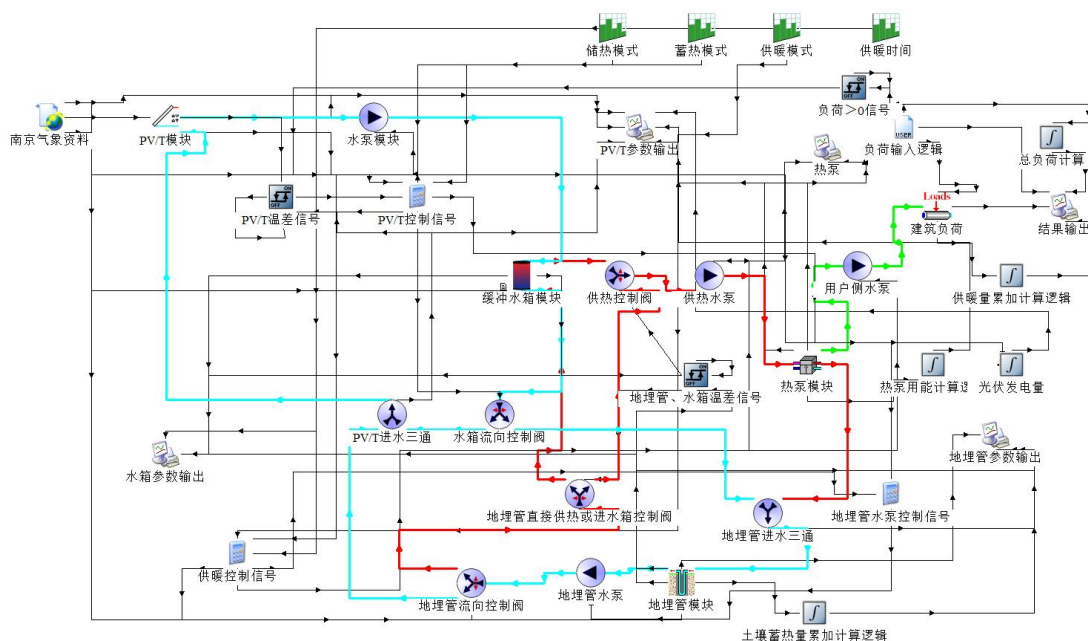


图 4 TRNSYS 模型图

Fig.4 TRNSYS model diagram

## 3 模拟结果分析

### 3.1 典型日 (8月5日) PV/T 系统分析

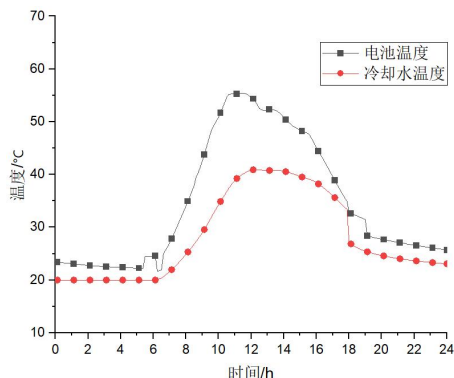


图 5 PV/T 运行温度

Fig.5 PV/T operating temperature

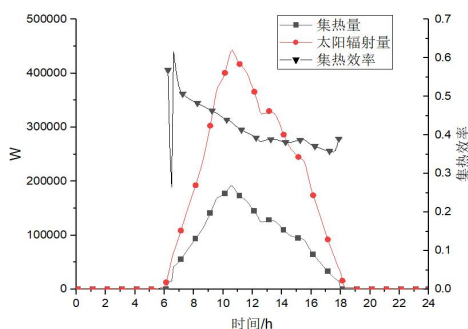


图 6 PV/T 热效率

Fig.6 PV/T thermal efficiency

对典型日模拟的 PV/T 运行温度、集热效率如图 5、图 6 所示。由图 5 可以看出, 在夏季储热季典型日 PV/T 电池温度在 8:00-18:00 维持在

30~60℃；冷却水温度在 30~40℃，冷却水温差维持在 5~15℃，说明耦合了地埋管的冷却水具有较好的集热效果，在 10:00~16:00 段内可为光伏电池降温 30%左右，利于光伏板发电。

由图 6 可以看出，典型日 PV/T 最高集热量达到 191.3kW，平均集热量在 100kW 左右。集热效率随着时间下降，最高集热效率为 60%在冷却水刚运行时出现，中午 13:00 左右集热效率达到较低水平，最低集热效率为 35%，由于正午 12:00 时的太阳辐照度较高，导致此时间段内的集热效率较低。

### 3.2 地埋管换热分析

对全时段运行的地埋管运行温度、土壤蓄热能力进行分析，结果如图 7、图 8 所示。由图 7 可以发现，夏季地埋管出水温度比进水温度低 2~5℃，地埋管进水温度在 30~50℃；冬季地埋管出水温度比进水温度高 3℃左右，出水温度随时间从 25℃下降到 15℃左右。由于冬季部分时间无热负荷，因此地埋管进水温度更高。经过夏季储热后，土壤温度上升约 8℃，全时段内土壤温度仅下降 1.2℃，经过半年平衡可以自然恢复到初始土壤温度；在 9、10、11 月份，土壤因热损失温度下降约 3℃。

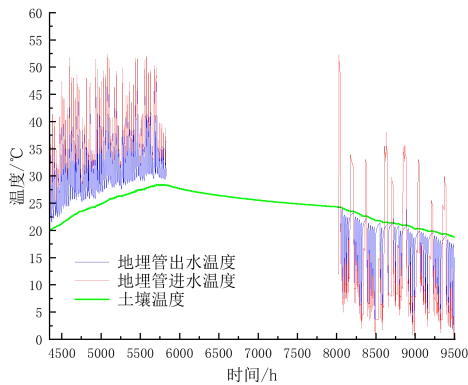


图 7 地埋管逐时温度

Fig.7 Hourly temperature of the buried pipes

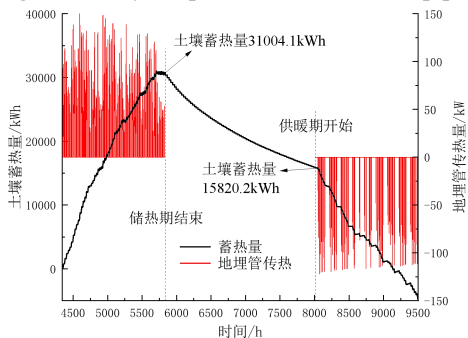


图 8 土壤蓄热量

Fig.8 Soil heat storage

由图 8 可以看出，蓄热时地埋管向土壤传热率最大达到 156.8kW，传热效率随天气变化大，整个夏季地埋管可以从 PV/T 系统中吸收并储存 31004.1kWh 的热量；供暖期开始时土壤蓄热量为 15820.2kWh，根据土壤蓄热量的时间变化计算在 8 月份结束后到 12 月开始前的非供暖期间土壤热损失失去的热量为 15183.9kWh，可知该地埋管系统的跨季节蓄热率约为 51%。供暖期地埋管从土壤吸热的换热率为 0~125kW，换热率与建筑负荷有关，少部分时间 PV/T 向地埋管散热，供暖期结束后土壤蓄热量为 -4735.3kWh，地埋管提供的热量为 20555.5kWh。表明土壤额外提供了一部分热量，在上半年需要通过自然或人工的方式蓄热，使得全年时段内土壤蓄热和放热量接近平衡。

### 3.3 热泵运行参数

热泵将地热源的水温提高到辐射墙体所需的温度。地源侧和负荷侧进出水温度变化、热泵全供暖期逐时 COP 模拟结果如图 9 所示。本文热泵负荷侧回水温度为 30℃，供水温度为 35℃，模拟结果与系统设计相一致。地源侧进出水温度随时间逐渐下降，地源侧进水温度在 20~5℃范围内，实际地埋管进出水温差为 3~5℃左右。由于 PV/T 的蓄热和低温辐射墙体的低出水温度提高了地源热泵的 COP 值。热泵机组 COP 在 4.8~6 范围内随地埋管水温变化波动，平均 COP 在 5 以上，具有良好的节能效果。

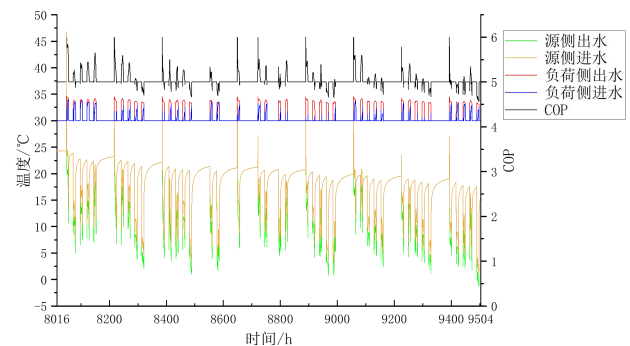


图 9 热泵运行参数

Fig.9 Operating parameters of the heat pump

### 3.4 能源自给率分析

统计供暖期系统运行能耗和制热能力，结果如图 10、11 所示。由图 10 可以看出，在供暖期地源热泵机组向建筑的辐射供暖墙体提供一部分循环热水的热量，当建筑负荷较高时需要加入辅助热

源。整个模拟时段热泵的总供热量为 38749.3kWh, 整个模拟时段供暖期所需的总负荷为 64266.1kWh, PV/T+地埋管系统跨季节提供的热量占所需供热量的 60.3%。在供暖期初期, 地源热泵提供的热量可以满足接近 100%的供暖需求, 随着土壤蓄热量的下降, 并且建筑热负荷的提高, 系统供暖能力随时间略微下降。

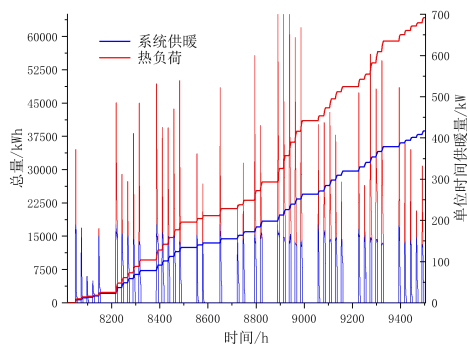


图 10 系统总供暖量

Fig.10 Total heating capacity of the system

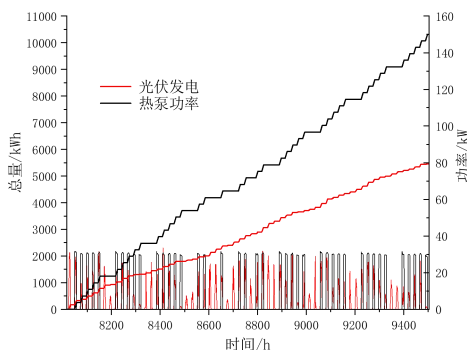


图 11 光伏发电供能情况

Fig.11 PV power generation supply

## 4 结论

本文在分析国内外 PV/T 耦合地埋管系统的基础上, 针对学校的建筑负荷特性对 PV/T+地埋管跨季节供暖做了分析。首先, 计算案例建筑负荷需求, 在此基础上系统进行设计, 并利用 TRNSYS 软件搭建系统模型, 得到该系统全时段仿真模拟结果。通过上述研究, 得到以下结论:

(1) 夏季 PV/T 电池温度维持在 30~60℃, 中

午时段集热效率达到较低水平, 典型日最低集热效率为 35%。通过地埋管放热的冷却水具有较好的集热冷却效果, 有利于光伏板发电与能源利用。

(2) 在运行时段内, 土壤蓄热体平均温度仅下降 1.2℃, 为满足土壤热平衡要求需要在上半年提供土壤蓄热。蓄热体从 PV/T 中吸收了 31004.1kWh 的热量; 供暖期释放的热量为 20555.5kWh, 该地埋管系统的跨季节蓄热率约为 51%。

(3) 热泵机组实际 COP 在 4.8~6 范围内波动, 平均 COP 在 5 以上, 具有良好的节能效果。

(4) 热泵的总供热量为 38749.3kWh, PV/T+地埋管系统跨季节可以提供所需热负荷的 60.3%。系统在供暖期总发电量为 5449.9kWh, 可以满足 52.9%的热泵能耗, 该系统稳定运行需额外电网用电。

## 参考文献:

- [1] 李慧星, 曹焜洪, 冯国会, 等. 严寒地区 PV/T-空气源热泵集成供热系统研究[J]. 建筑节能, 2015, 43(5): 52-55.
- [2] 严华夏. 严寒地区低能耗建筑多种能源互补的供暖供冷系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [3] Zulkarnain Abbas, Dongwen Chen, Y Li, et al. Experimental investigation of underground seasonal cold energy storage using borehole heat exchangers based on laboratory scale sandbox[J]. Geothermics, 2020: 87.
- [4] 陈雅蕾. 毛细管网辐射供暖及节能性分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [5] 单宝琦, 宋兴斌, 郑健. PVT 耦合水源热泵系统应用分析[J]. 洁净与空调技术, 2020, (4): 14-18.
- [6] 高文龙, 官燕玲. 基于 TRNSYS 模拟的地埋管换热效果影响因素分析[J]. 节能, 2019, 38(3): 46-48.
- [7] 李匡富. PV/T 耦合地源热泵冷热电三联供系统模拟研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- [8] 马立杰. 太阳能-土壤源热泵供热系统模拟与评价[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- [9] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.