

低倍聚光光伏电站设计及仿真研究

王宁, 谢应明, 翁盛乔, 俞钱程, 舒胜

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2024年6月23日; 录用日期: 2024年7月17日; 发布日期: 2024年7月26日

摘要

基于上海市某停车场, 设计了一套低倍聚光光伏充电系统。首先对该系统的散热模块进行了数值模拟, 发现2020年四个季节中环境温度最高和辐射强度最大时间段的电池最高温度分别为69°C、85°C、73°C、53°C, 处于光伏电池正常温度范围内(-40°C~90°C), 说明该聚光光伏电池能够可靠运行。其次用Simulink对光伏电池子系统进行了仿真, 对发电量进行了预测, 得到2020年8月日均发电量最高为536 KWh, 12月日均发电量最低为145 KWh, 年总发电量为125262 kWh; 对整个系统的充电需求和发电量进行了仿真, 结果显示: 在发电量最小的那一天发电量不能满足白天充电需求量, 其余白天中系统发电量均能满足充电需求量; 发电量的分布显示: 40%~50%的发电量直接用于充电, 其余的发电量输入电网。最后预估系统的经济性: 5年可以收回成本, 14年可以收益100万元。

关键词

低倍, 充电系统, ANSYS, 仿真

Design and Simulation of Low-Power Concentrating Photovoltaic Charging Station

Ning Wang, Yingming Xie, Shengqiao Weng, Qiancheng Yu, Sheng Shu

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 23rd, 2024; accepted: Jul. 17th, 2024; published: Jul. 26th, 2024

Abstract

Based on a parking lot in Shanghai, a low-power concentrated photovoltaic charging system was designed. Firstly, the heat dissipation module of the system was digitally simulated, and found that

the highest temperature of the battery in the period of the highest ambient temperature and the maximum radiation intensity in the four seasons in 2020 were 69°C, 85°C, 73°C and 53°C respectively, which were within the normal temperature range of the photovoltaic cell (-40°C~90°C), indicating that the concentrating photovoltaic cell can operate reliably. Secondly, Simulink was used to simulate the photovoltaic cell subsystem and predict the generating capacity. It was obtained that the highest average daily generating capacity in August 2020 was 536 KWh, the minimum average daily power generation in December was 145 KWh, and the total annual generating capacity was 125262 kWh. The charging demand of the whole system was simulated. The results showed that: on the day when the generating capacity was the smallest, the generating capacity cannot meet the charging demand, while on the other days the generating capacity can meet the charging demand. The distribution of generating capacity showed that 40%~50% of the generating capacity was used directly for charging, while the rest was fed into the grid. Finally, the economy of the system was estimated: the cost can be recovered in 5 years, and the profit can be 1 million yuan in 14 years.

Keywords

Low-Power, Charging System, ANSYA, Simulink

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

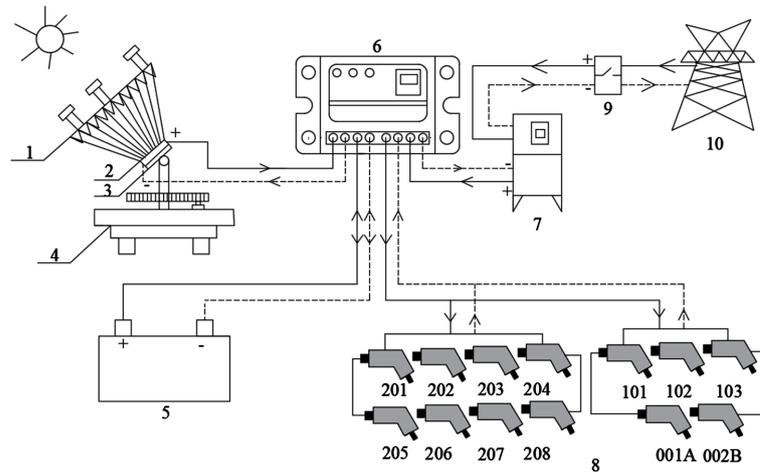
1. 引言

全球不可再生资源煤炭、石油和天然气相对匮乏，需寻找新型可再生能源替代不可再生能源迫在眉睫[1]。太阳能成为目前发展前景较为广阔的可再生能源之一。太阳能利用形式多样，主要有光伏发电和光热发电，目前光伏发电已成为太阳能发电技术的主力军[2]。新能源汽车应运而生，它具有绿色环保、节能、经济性等优点，充电工作由使用者借助充电站完成能源补充。Wang [3]等提出了一种基于分散式储能模块的电动汽车充电控制系统，结果表明该控制系统可以获得更多的光伏利用率，减少对电网的冲击。Yang [4]等研究对现有的直流充电站中加入光伏系统或储能系统的可行性和经济性分析，结果表明其可行性并在，5到10年可以收回成本。施学少[5]等研究设计了一套跟踪式聚光光伏发电系统，介绍了跟踪器结构和控制器的设计，能够主动跟踪太阳位置，提高发电效率，具有广泛应用前景。本文对新能源汽车充电站设计出一套带有散热系统、经济回收可观、对电网冲击小的低倍聚光光伏充电系统。首先通过 Fluent 模拟验证光伏板是否能在工作间对内正常运行，其次对发电量进行验证并对系统经济性做出评估，最后对整个系统仿真证明对电网冲击较小。

2. 低倍聚光光伏发电系统设计

2.1. 低倍聚光光伏系统简介

低倍聚光光伏发电系统是通过聚光器将分散的太阳光汇聚到太阳能电池上，提高电池单位面积接收的太阳辐射量，从而提高单位面积太阳能电池的发电量[6]。低倍聚光光伏发电系统主要包括聚光器、光伏电池、跟踪系统、散热系统、控制器、蓄电池、逆变器以及其它辅助设备的选择和设计，系统原理图如图1所示。



1-聚光器、2-光伏电池、3-散热板、4-跟踪系统、5-电网、6-光伏控制器、7-逆变器、8-充电站、9-并网柜、10-电网(其中 201~208 为交流充电桩, 001A~002B 为客车直流充电桩, 101~103 为普通直流充电桩)。

Figure 1. Low-power concentrated photovoltaic power generation system

图 1. 低倍聚光光伏发电系统

2.2. 系统设备及参数

本系统基于上海市某电动汽车充电站进行改造设计, 通过计算并文献查阅[7]-[14]得到系统设备参数见表 1。

Table 1. Design parameters

表 1. 设计参数

参数	数据	参数	数据
聚光光伏电池类型	单晶硅	跟踪系统类型	极轴式全跟踪系统
聚光光伏电池型号	W139-07	散热板尺寸/m	3.24 × 3.12 × 0.05
聚光光伏阵列容量/kW	113	翅片尺寸/m	3.24 × 0.5 × 0.05
聚光光伏阵列串联数	90	翅片个数	20
聚光光伏阵列并联数	4	蓄电池类型	铅酸蓄电池
聚光光伏阵列尺寸/m	2.7 × 2.6	蓄电池组容量/kWh	100
聚光光伏阵列间距/m	8	蓄电池组串联数	42
几何聚光比	15	蓄电池并联数	17
光学聚光比	12.42	逆变器型号	GW12KT-DT
聚光器类型	菲涅尔透镜	控制器型号	Smart-I-10201
聚光器材料	PMMA	并网接入方案	XGF380-Z-1
聚光器尺寸/m	10.5 × 10	并网柜型号	AZG-B-400
聚光器焦距/m	10	断路器型号	TX7-63Z/1P

3. 聚光下光伏电池工作温度模拟

光线通过聚光器到达光伏电池, 约有 25%的能量转换为电能[15], 其余大部分能量转换为光伏电池

的热能,可能使得电池温度上升超出其工作温度(-40~90℃)。因此该设计通过焊接方式为光伏电池加上带有翅片的散热系统,将这部分热散发到环境中,见图2。并利用 ANSYS 分别模拟电池在 2020 年春、夏、秋、冬四个季节环境温度和太阳辐射强度最大下的光伏电池温度。得到每个季节光伏温度最高为 68.925、85.263、73.412、53.218℃。由此可见光伏电池均能可靠运行,温度分布云图见图3。

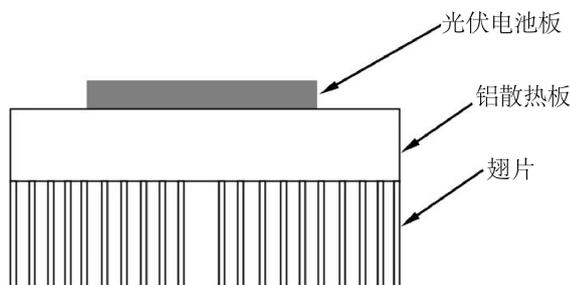


Figure 2. Thermal system
图 2. 散热系统

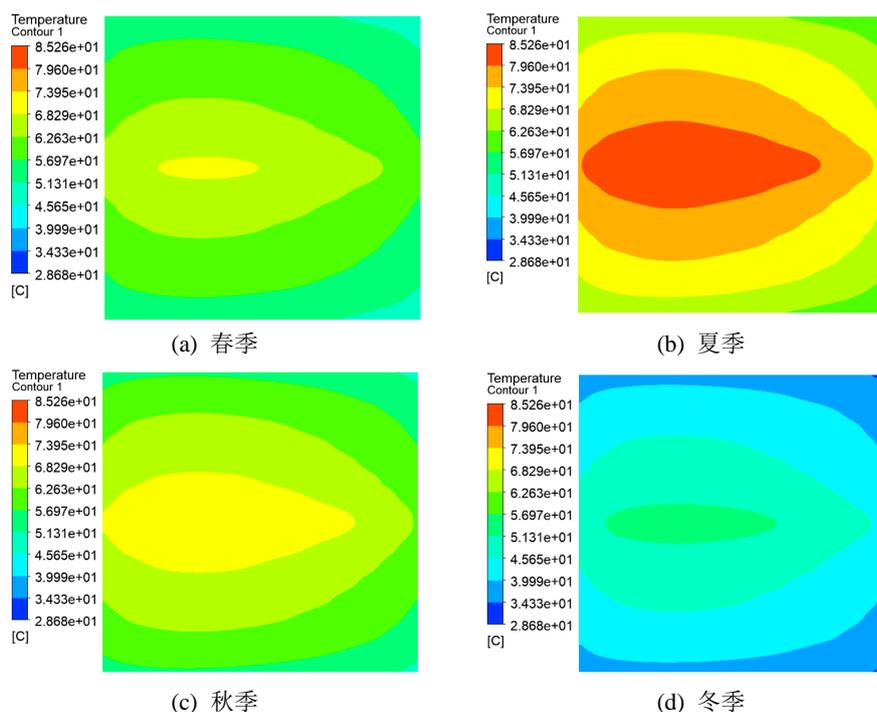


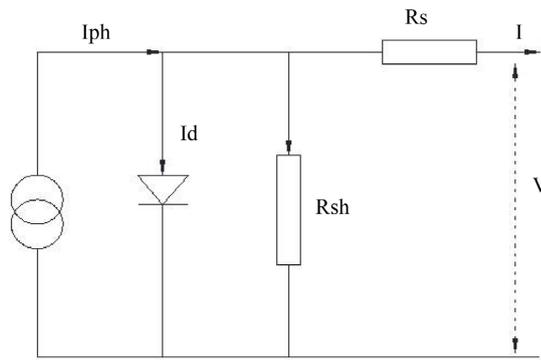
Figure 3. Temperature distribution map photovoltaic plate
图 3. 光伏板温度分度云图

4. 系统仿真研究

4.1. 子系统模型搭建

建立整个聚光光伏充电系统的仿真模型需要对光伏系统、储能系统、电网系统、控制系统以及充电桩系统搭建组合。通过输入一天中充电站实际的充电数据,模拟得到在一天中各个时间段,聚光光伏系统、电网以及储能系统的功率变化。

光伏电池模型可以等效如图4所示的电路图[16]。据此等效电路图进行建模如图5所示。



I-载上电流, I_{ph} -光生电流, I_d -二极管上电流, I_{sh} -并联电阻上电流, V -负载上电压, R_s -串联电阻。

Figure 4. Equivalent circuit diagram of photovoltaic cells
图 4. 光伏电池等效电路图

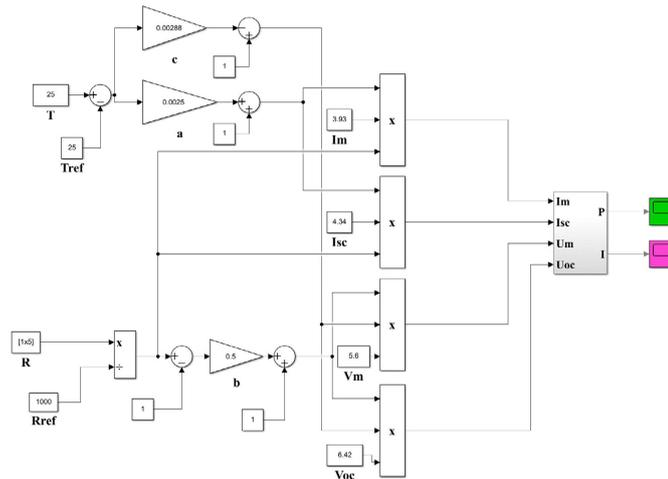


Figure 5. Models of photovoltaic cells system
图 5. 光伏电池模型

在 Simulink 仿真中, 铅酸蓄电池应用的主要模型有理想等效模型、谢菲尔德模型、Thevenin 电路模型以及三阶动态模型[17], 本文采用谢菲尔德模型来建立本文的储能系统模型可见图 6。电网模块主要就是要建立逆变器的仿真模型, 整个模块包括三相电网模块、三电平桥模块、电压电流双闭环控制模块以及 SVPWM 载波调制和驱动发生模块可见图 7。

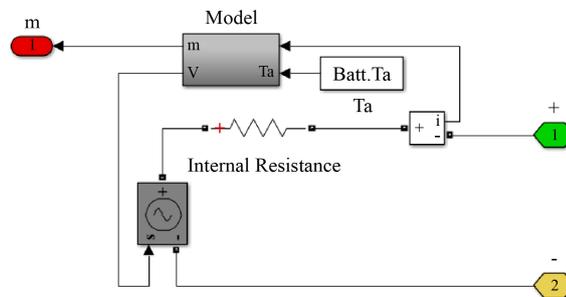


Figure 6. Model of energy storage system
图 6. 储能系统模型

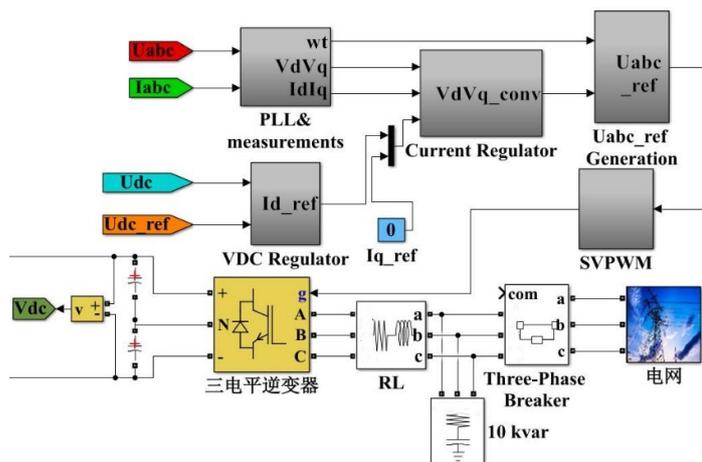


Figure 7. Model of power grid system
图 7. 电网系统模型

控制系统主要包括两大部分，其中 MPPT 控制系统采用改进的增量电导法作为控制算法，即“增量电导 + 积分调节”的控制模型可见图 8。另一个控制系统是充放电控制系统，其主要控制蓄电池、聚光光伏阵列、电网以及充电站之间的运行。通过比较直流母线输出功率、充电桩需求功率以及蓄电池荷电状态(SOC)来判断储能系统的工作模式。充放电模块包括两部分，双向 DC-DC 模块以及逻辑控制模块。图可见图 9(a)和图 9(b)。

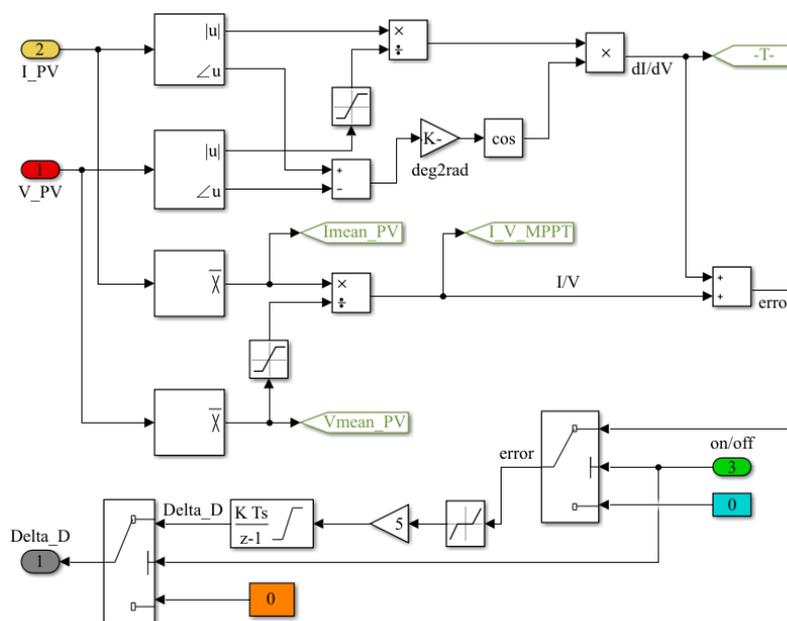


Figure 8. MPPT control model of “incremental conductivity and points adjustment”
图 8. “增量电导 + 积分调节”的 MPPT 控制模型

充电桩系统有 5 台直流充电桩及 8 台交流充电桩组成，移相全桥 DC-DC 变换器可以实现大功率变换，所以设计直流充电桩模块见图 10(a)；交流充电桩的输入电压为直流母线电压，输出功率为 7 kW，所以采用基于 SPWM 调制的单相全桥 DC-DC 变换器对交流充电桩进行设计，可见图 10(b)。

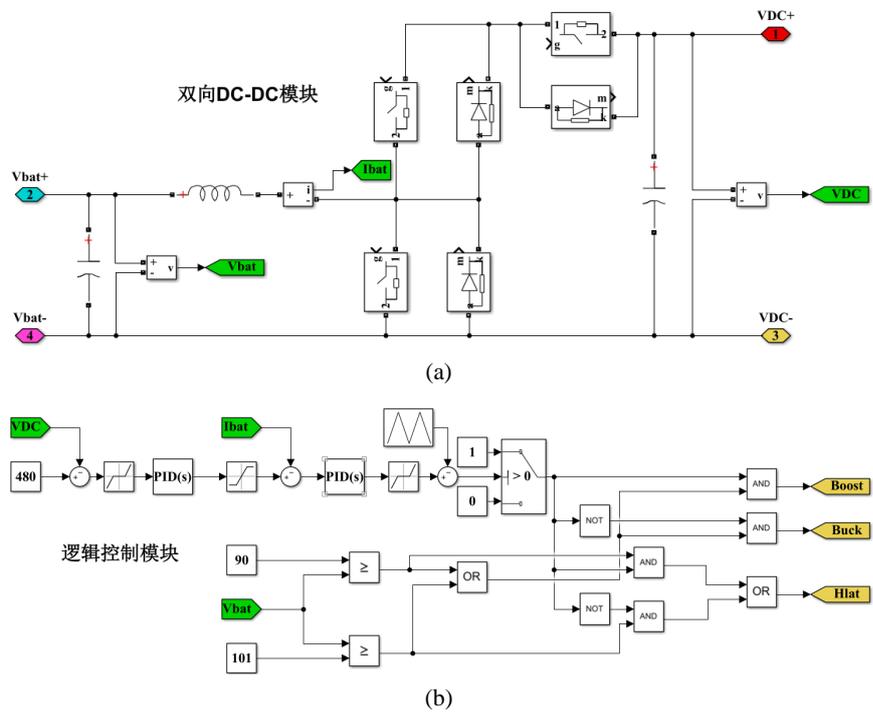


Figure 9. Model of charging and discharging controller
图 9. 充放电控制器模型

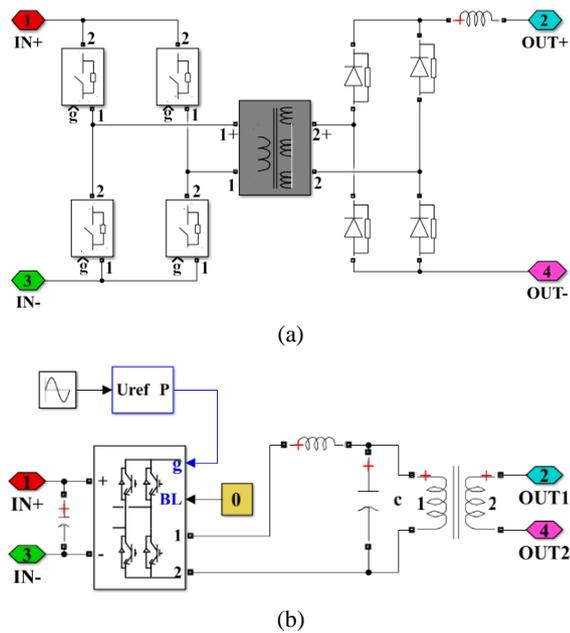


Figure 10. Model of charging pile
图 10. 充电桩模型

4.2. 总系统模型建立

子模块建立完成，并通过信号的连接，即可得到整个系统的仿真模型见图 11。通过设置充电桩模块的启动和停止时间就可对整个系统进行仿真模拟。

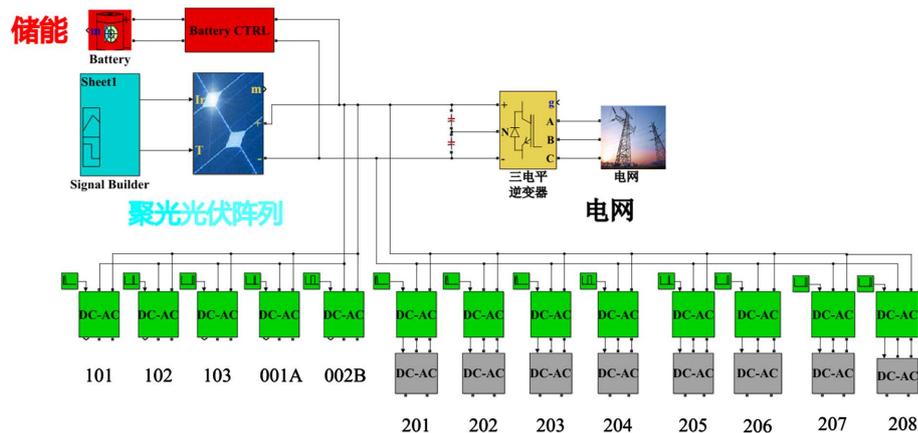


Figure 11. Model of concentrating photovoltaic charging station
图 11. 聚光光伏电站模型

5. 仿真结果分析

5.1. 系统发电量准确性验证

根据已建好的电池仿真模型，可以得到任意时刻电池温度和辐射强度下的发电功率，并计算出日发电量，该文得到 2020 年每月中日最大、最小以及平均发电量见表 2。取平均值叠加得到年发电量。

Table 2. Maximum, minimum, and average monthly generation between China and Japan in 2020

表 2. 2020 年每月中日最大最小以及平均发电量

日期	最大日发电量/kWh	最小日发电量/kWh	平均日发电量/kWh
1 月	378.45	24.45	178.98
2 月	403.85	27.54	232.65
3 月	534.78	40.12	306.12
4 月	556.32	65.23	342.73
5 月	652.92	45.37	396.84
6 月	687.98	34.18	476.14
7 月	709.17	68.32	489.43
8 月	759.70	107.89	536.69
9 月	654.74	79.87	417.15
10 月	512.48	129.12	324.47
11 月	407.37	46.34	256.78
12 月	278.64	28.76	145.89

为了验证预测的准确性，这里用马晓宇等人[18]的理论公式(1)计算得到年发电量与模型预测的发电量进行对比。根据理论公式以及预测模型分别计算 2017~2020 年的发电量，并进行比较，见图 12。

$$E_p = KH_A P_{AZ} / E_s \quad (1)$$

式中： E_p ——发电量/kWh； K ——综合效率系数，取 78.4%； H_A ——水平面太阳总辐射量/kWh/m²； P_{AZ}

——组件安装容量, kW; E_s ——标准条件下辐射度, 取 1 kW/m^2 。

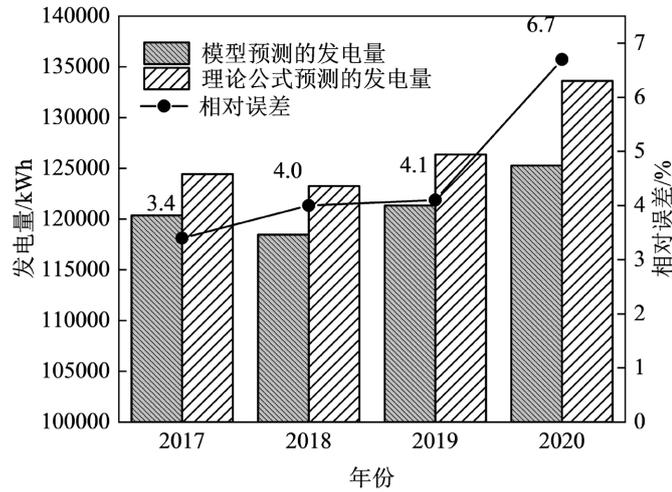


Figure 12. The power generation of theoretical formulas and models to predict

图 12. 理论公式与模型预测发电量

从图中可以看出, 模型预测和理论公式预测的发电量的最大相对误差为 6.7%, 说明模型预测的发电量基本符合实际, 同时预测模型也能较好地应用于实际工程。而且从图中看出, 模型预测的发电量普遍小于理论公式计算, 说明模型预测考虑了更多的光伏电池的损失等问题, 整体是符合实际的。

5.2. 系统模拟分析

模拟分为四组, 即 F-I, 依次为 2020 年充电需求最大、充电量最小、系统发电量最大和系统发电量最小的一天(7 月 31 日、2 月 22 日、8 月 13 日、1 月 25 日)。这四天全天逐时的发电量和充电站充电量可见表 3。

Table 3. Simulation scheme

表 3. 模拟方案

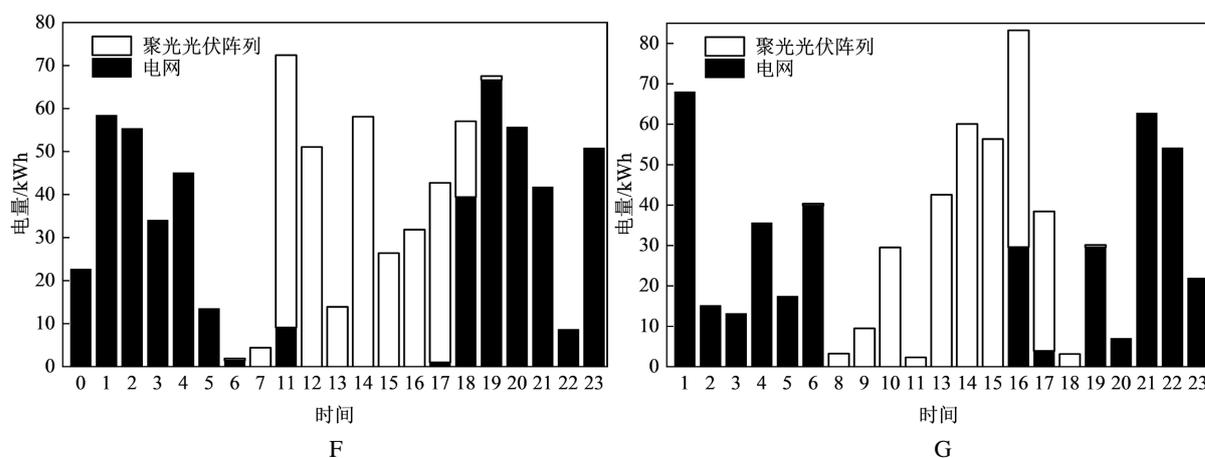
时间	F		G		H		I	
	发电量 / kWh	充电量 / kWh						
0:00	/	22.66	/	/	/	/	/	/
1:00	/	58.43	/	23.91	/	67.96	/	19.6
2:00	/	55.31	/	2.66	/	15.11	/	/
3:00	/	34.05	/	/	/	13.11	/	/
4:00	/	45.05	/	/	/	35.56	/	/
5:00	/	13.48	/	/	/	17.43	/	/
6:00	0.47	1.89	/	/	0.5	40.32	/	/
7:00	7.02	4.41	0.14	/	12.96	/	0.18	/
8:00	12.96	/	9.72	/	28.80	3.27	1.12	/

续表

9:00	20.16	/	17.28	2.26	50.40	9.50	2.06	/
10:00	42.12	/	41.76	6.77	71.28	29.52	3.37	1.33
11:00	63.36	72.42	40.32	9.83	92.52	2.33	3.02	7.00
12:00	87.84	51.08	45.00	7.56	101.16	/	2.34	10.50
13:00	99.00	13.87	58.68	/	111.60	42.53	2.41	25.39
14:00	92.88	58.12	53.28	6.08	94.68	60.04	4.22	30.38
15:00	90.00	26.41	42.48	7.45	71.20	56.32	3.27	9.80
16:00	70.20	31.83	21.24	2.28	53.60	83.22	2.01	7.00
17:00	41.76	42.72	6.05	2.69	34.50	38.40	0.45	18.76
18:00	17.64	57.02	0.22	7.00	15.90	3.15	/	11.34
19:00	0.94	67.45	/	13.00	0.60	30.10	/	7.00
20:00	/	55.65	/	14.00	/	7.00	/	28.59
21:00	/	41.76	/	13.60	/	62.71	/	13.74
22:00	/	8.61	/	2.91	/	54.13	/	4.2
23:00	/	50.78	/	/	/	21.88	/	/
合计	646.35	813.17	336.17	122	739.7	693.59	24.45	194.63

首先简化模型，每日从 0:00 时开始假定电网不断电或不出现故障，聚光光伏系统加电网是完全能满足充电的需求，蓄电池组不参与工作。模拟一天内系统各模块功率变化情况。仿真结果经过处理后可见图 13。由 F 组、H 组和 G 组模拟结果看出，白天电动汽车充电所需的电量大部分或全部由聚光光伏阵列提供，夜间由电网提供。I 组，全天大部分时间段由电网供电，聚光光伏阵列只提供一小部分电量。同时四组全天充电情况的分布情况可见表 4。从表中可以看出，电网所占的比例大。

最后，对于聚光光伏阵列所发电量的分布进行分析，具体的模拟数据可见表 5。可以看出，由于充电站充电时间的无序性，导致系统所发的电无法全部直接用于充电站，但还是接近 40%~50% 的电量会直接用于充电。



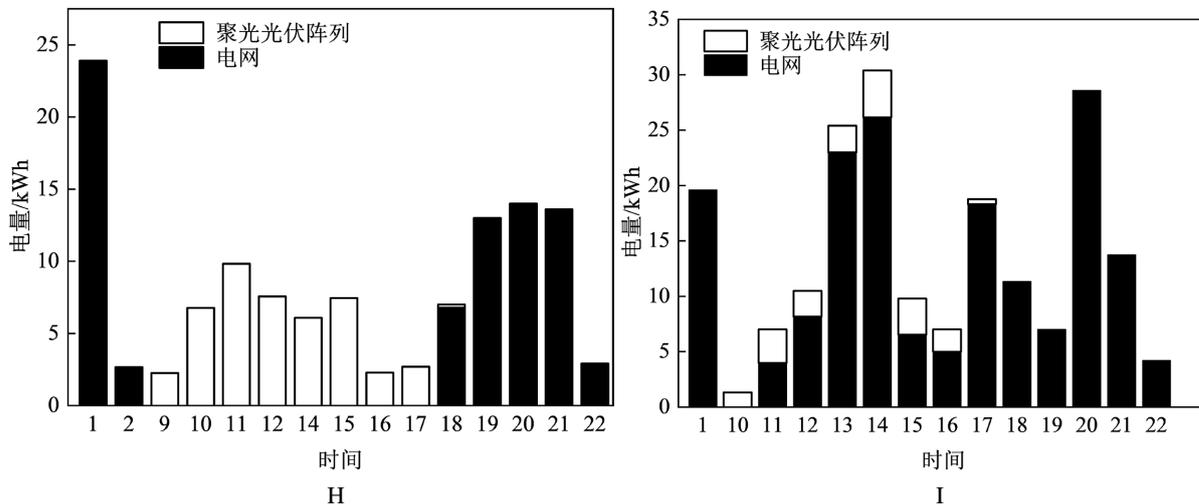


Figure 13. Simulation results
图 13. 仿真结果图

Table 4. Charging volume statistics
表 4. 充电量统计

模块	F		G		H		I	
	电量/kWh	百分比/%	电量/kWh	百分比/%	电量/kWh	百分比/%	电量/kWh	百分比/%
光伏	309.89	38.12	45.14	37	295.86	42.66	19.05	9.79
电网	503.11	61.88	76.86	63	397.73	57.34	175.58	90.21

Table 5. Distribution of concentrated photovoltaic power generation
表 5. 聚光光伏阵列发电量分布

组别	直接用于充电站/kWh	汇入电网/kWh
F	309.89	336.46
G	45.14	291.03
H	295.86	443.84
I	19.05	5.40

从总的仿真结果来看，在充电站加入聚光光伏系统之后，白天的大部分时间，聚光光伏阵列所发的电完全能满足充电站的充电需求，即使在充电需求最大的时候，也呈现这样的规律，这也表明加入聚光光伏系统降低了充电站充电对于电网的冲击。

5.3. 经济性分析

光伏系统的经济性是人们关注焦点，通过对此系统各组件成本、施工费和维护费综合考量，系统的总成本预估在 70 万左右。根据现阶段对光伏发电政策补贴，折算下来即 0~5 年光伏系统单位入网电价为 1.27 元/kWh，6~20 年为 0.87 元/kWh，20 年以后为 0.45 元/kWh。同时聚光光伏系统的功率按每年 0.75% 下降来计算，则系统的收益估算可见表 6。可以看到 5 年就可以收回成本，14 年就可以收益 100 万，所以整体上看，系统是完全可以实现收益的，经济性是满足设计需求的，且相比于常规的光伏系统，收益更大。

Table 6. System cumulative benefit estimate
表 6. 系统累计收益估算

年份	累计发电量/kWh	累计收益/万元	年份	累计发电量/kWh	累计收益/万元
2020	125,261	15.908	2027	976,169	109.606
2021	249,582	31.697	2028	1,094,108	119.867
2022	372,971	47.367	2029	1,211,162	130.051
2023	495,434	62.921	2030	1,327,339	140.224
2024	616,978	78.357	2031	1,442,644	150.256
2025	737,611	88.852	2032	1,557,085	160.213
2026	857,339	99.268	2033	1,670,667	170.095

6. 总结

该文设计了一套低倍聚光光伏电站系统。通过聚光器会在某些时间段内可能使光伏电池的温度超出其额定工作温度，因此为该系统加入了带有翅片的铝板散热系统，通过 Fluent 对光伏板散热问题进行模拟，得到光伏电池在每个季节都能够正常运行。在此基础上对系统发电量和充电量进行仿真研究，在发电量最小的那一天发电量不能满足白天充电需求量，其余白天中系统发电量均能满足充电需求量。基于实际耗能情况，通过仿真模拟得出该系统发电量基本满足设计需求，减少了对电网的冲击。最后根据国家补贴政策预估了此系统在 5 年后回收成本，14 年收益 100 万元。

基金项目

国家自然科学基金(50806050)。

参考文献

- [1] 胡振文, 芦浩, 韦胜喜. 新能源电动车光伏电站发展研究[J]. 光源与照明, 2021(6): 139-140.
- [2] 曹可, 袁达忠, 胡和敏, 姜玉雁. 高倍聚光光伏光热一体化系统的热电性能研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(12): 64-70.
- [3] 严大洲, 刘艳敏, 万焯. 晶硅太阳能在“双碳”经济中的作用与影响[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(5): 1-6.
- [4] Wang, S., Lu, L., Han, X., Ouyang, M. and Feng, X. (2020) Virtual-Battery Based Droop Control and Energy Storage System Size Optimization of a DC Microgrid for Electric Vehicle Fast Charging Station. *Applied Energy*, **259**, Article 114146. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114146>
- [5] Yang, L. and Ribberink, H. (2019) Investigation of the Potential to Improve DC Fast Charging Station Economics by Integrating Photovoltaic Power Generation and/or Local Battery Energy Storage System. *Energy*, **167**, 246-259. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.147>
- [6] 施学少, 刘磊, 李宗辉, 等. 跟踪式聚光光伏发电系统的设计[J]. 价值工程, 2018, 37(27): 143-146.
- [7] 钟实. 太阳能光伏发电系统设计施工与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012: 87.
- [8] 上海电力设计院有限公司, 中国电力企业联合会. GB 50797-2012 光伏发电站设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012.
- [9] 王海莲. 一种太阳能线形聚光器的设计与分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉工程大学, 2014.
- [10] Ma, X., Jin, R., Liang, S., Liu, S. and Zheng, H. (2020) Analysis on an Optimal Transmittance of Fresnel Lens as Solar Concentrator. *Solar Energy*, **207**, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.071>
- [11] 江景祥, 舒碧芬, 黄妍, 等. 高倍聚光光伏模组中菲涅尔透镜沿光轴方向的光照非均匀性变化及影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 11949-11955.
- [12] 王梓茗, 毛天龙, 李光烁, 等. 三相逆变器并网控制方法研究[J]. 绿色科技, 2020(4): 172-176.

- [13] 胡黎昆. 电动汽车车载光伏均衡充电控制器设计[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- [14] 蒙宁海. 大型光伏电站光伏发电系统方案设计[J]. 红水河, 2020, 39(6): 75-78.
- [15] 尹勇, 杨洪海, 苏亚欣, 徐悦. 聚光型太阳能光伏光热系统研究进展[J]. 热能动力工程, 2022, 37(1): 1-13.
- [16] 杨金孝, 朱琳. 基于 Matlab/Simulink 光伏电池模型的研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(24): 192-194.
- [17] Nazghelichi, T., Torabi, F. and Esfahanian, V. (2018) Prediction of Temperature Behavior of a Lead-Acid Battery by Means of Lewis Number. *Electrochimica Acta*, **275**, 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.04.092>
- [18] 马晓宇, 赵耀. 基于综合效率系数的光伏电站发电量估算方法[J]. 内蒙古电力技术, 2019, 37(2): 10-13.