

光伏发电特性与加热电阻的关系研究

陈 骏, 于国清, 陈天康

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年9月16日; 录用日期: 2025年9月24日; 发布日期: 2025年10月29日

摘 要

随着光伏发电的快速发展, 其间歇性与波动性导致的“弃光”现象日益突出。为提高光伏电力消纳效率, 本研究通过实验探究光伏发电特性与负载电阻的关系, 分析不同电阻对光伏电压、电流及功率的影响, 明确最大功率点对应的电阻特性。结果表明: 光伏电压随电阻增大而升高, 电流随电阻呈现三段式变化规律, 功率存在临界值且随太阳辐照度减弱向高阻方向偏移。研究为动态调整电阻以优化光伏系统效率提供了实验依据。

关键词

光伏发电, 功率特性, 最大功率点

Research on the Relationship between the Characteristics of Photovoltaic Power Generation and Heating Resistance

Jun Chen, Guoqing Yu, Jiankang Chen

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: September 16, 2025; accepted: September 24, 2025; published: October 29, 2025

Abstract

With the rapid development of photovoltaic power generation, the phenomenon of “abandoned light” caused by its intermittency and volatility has become increasingly prominent. In order to improve the consumption efficiency of photovoltaic power, this study explores the relationship between the characteristics of photovoltaic power generation and the load resistance through experiments, analyzes the impacts of different resistances on the photovoltaic voltage, current, and power, and clarifies the resistance characteristics corresponding to the maximum power point. The results show that

the photovoltaic voltage increases with the increase of the resistance, the current shows a three-stage change law with the resistance, and the power has a critical value and shifts towards the high-resistance direction as the solar irradiance weakens. This study provides an experimental basis for dynamically adjusting the resistance to optimize the efficiency of the photovoltaic system.

Keywords

Photovoltaic Power Generation, Power Characteristics, Maximum Power Point

Copyright © 2025 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. 背景

以光伏作为电力供暖的方式不仅可破解新能源消纳难题，还能为建筑领域低碳转型提供关键技术路径，是新型电力系统与低碳城市建设的战略性技术选项。

近年来，最大功率点跟踪(MPPT)技术已成为光伏发电系统中的常用技术，其核心作用是让光伏阵列的输出功率达到最大。不过，这项技术会随着太阳辐射、温度等环境条件的变化而调整。具体来说，输出电压主要受温度影响，输出电流则主要由太阳辐射决定。在不同的太阳辐射和温度条件下，IPV-VPV和PPV-VPV的特征曲线呈现出非线性且各不相同的特点，光伏模型可分为三类：基于电路的模型、基于分析的模型和基于经验的模型[1]。而且，每种环境条件下都有一个特定的最大功率点，这个点会随着太阳辐射和温度的改变而变动。MPPT的工作原理，就是让光伏电池板在最大输出功率点运行，从而将全部光伏电能传输到负载端。

为了跟踪这个最大功率点，文献中提出了不少MPPT方法，包括电压法[2]、功率反馈法[3]、扰动与观测(P&O)法[4]和增量电导(INC)法[5]。其中，扰动和观测法(P&O)以及增量电导法(INC)因为操作简单、易于实现，在MPPT控制器中得到了广泛应用。这些MPPT方法运用了不同的技术和算法，在收敛速度、实现的复杂程度、准确性以及产品整体的投资成本等性能方面，存在明显的差异。

P&O算法是目前应用最广泛的MPPT算法之一，它的优势在于结构简单，需要的参数也很少。但它也存在一些不足之处，比如响应速度较慢，在稳态时会围绕最大功率点(MPP)产生振荡，甚至在大气条件快速变化时，还可能出现跟踪错误[6]。增量电导法步长不易选取，过小则跟踪速度过慢，过大则最大功率点处功率损失较大[7]。

除了上述方法，开发MPPT控制器还有一种思路，就是建立光伏阵列的戴维南等效模型。黑晨阳等分别对分布式光伏发电系统、含有旋转电机和恒阻抗负荷的综合负荷以及非线性负荷的控制方案、电磁暂态特性和旋转电机的机械特性进行分析和建模，并化简为统一形式的戴维南-诺顿等效模型[8]。Nguyen等介绍了一种基于戴维南等效电路的建模光伏源，以及一种与MPPT升压变流器控制器PWM占空比与太阳能电池阵列输出功率关系相关的控制算法[9]。Callegari使用戴维南等效电路(TEC)实现太阳能电池阵列模拟器。该方法基于抽头来改变不同太阳辐照度条件下的电压和电阻值，同时将功率和电压的总误差保持在可接受的范围内[10]。

相较于依赖功率转换电路的MPPT技术，光伏直驱系统通过负载与光伏组件的直接匹配实现电能利用，省去了逆变器等中间环节，在降低系统成本、减少功耗方面具有显著优势，尤其适用于直流加热、冷库等负载场景[11]。光伏直驱系统的核心是负载侧阻抗匹配技术，即通过调控负载电阻使系统工作于最

大功率点附近。Li 等提出一种 3 HP 的太阳能直驱光伏空调系统，该系统无需蓄电池，采用冰蓄热技术存储太阳能。系统最高性能系数(COP)达到 0.289 [12]。此外，负载匹配理论表明，当负载电阻等于光伏组件的等效输出电阻时，系统传输功率最大，这一规律为直驱系统的电阻调控提供了理论依据。然而，现有研究对不同光照条件下负载电阻与光伏输出特性的动态耦合关系缺乏系统的实验验证，尤其针对加热类负载的电阻适配特性研究较为薄弱。

MPPT 自身的成本较高且 MPPT 控制器中的功率转换电路和控制电路会产生一定功耗。同时，现在有很多用电器不需要逆变过程，如直流驱动的家电及工具、新能源相关设备等。那么是否可以避免通过改变输出电压和电流来改变输出电阻从而找到最大功率点。特别是对于一些对外发热的电器来说，本身就可以通过改变电阻来改变发热量。本文主要探究和明确光伏发电特性与发热电阻之间的关系，为优化光伏系统效率、提高光伏电力消纳能力提供了实验依据，对光伏供暖等实际应用提供一种新的思路。

2. 实验系统和方法

2.1. 实验系统描述

如图 1 所示为实验的基本原理图。

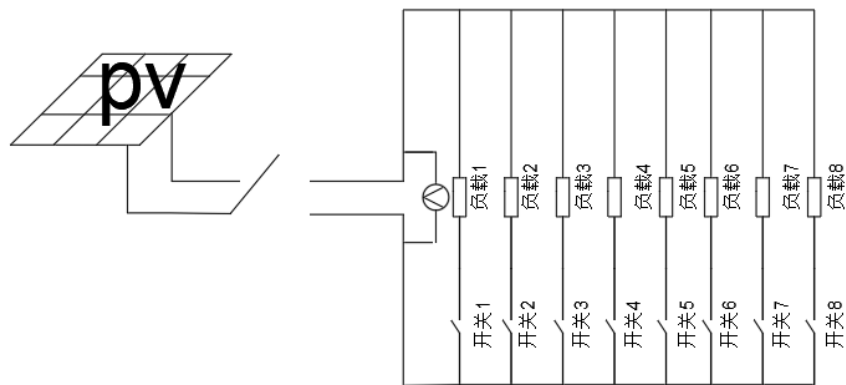


Figure 1. Experimental schematic diagram
图 1. 实验原理图

实验通过光伏组件负载端开关控制实现对电阻值的调控。实验在晴朗无云的自然光照下开展，使用光谱辐照仪实时监测光照强度，待电压稳定后记录数据，考虑到温度对光伏板发电性能的影响，实验选择温度变化差别不大的一天，将环境温度维持在 20℃~30℃。实验全程使用高精度温度计，通过 5 min/次测量环境温度，以便后续分析温度因素对实验结果的影响。采用的实验组如下：

1) 光伏电池组件：选取的型号为 S-190 C 单晶硅太阳能光伏板，确保在标准光照条件下进行测试。光伏板规格如表 1 所示。光伏板的数量为 6 块，采用三串两并的方式进行链接，光伏板的链接实物图如图 2 所示。

Table 1. S-190 C monocrystalline silicon solar photovoltaic panel specifications
表 1. S-190 C 单晶硅太阳能光伏板参数表

类别	参数
规格	S-190 C
额定功率	190 W

续表

额定电压	36.5 V
额定电流	5.21 A
开路电压	45.5 V
短路电流	5.70 A
光伏板面积	1.2 m ²



Figure 2. Physical diagram of the photovoltaic panel connections
图 2. 光伏板的链接实物图

2) 负载电阻：使用八个相同阻值的电阻器，通过调节开关的闭合使范围从低到高，当闭合八个开关时，电阻为 $18.5\ \Omega$ ，当闭合七个开关时，电阻为 $21\ \Omega$ ，同样的道理，最后得到电阻分别为 $18.5\ \Omega$ 、 $70\ \Omega$ 、 $47.2\ \Omega$ 、 $36\ \Omega$ 、 $28.9\ \Omega$ 、 $24.4\ \Omega$ 、 $21\ \Omega$ 、 $18.5\ \Omega$ 以观察其对电压和功率的影响。表 2 为闭合开关数对应的阻值大小。

3) 电压传感器：用于实时记录光伏组件在不同负载下的电压值。

Table 2. Switches and corresponding resistance values
表 2. 开关及对应阻值大小

闭合开关数量	1	2	3	4	5	6	7	8
对应电阻大小(Ω)	138.1	70	47.2	36	28.9	24.4	21	18.5

2.2. 天气参数

如图 3 所示为实验测试时的室外天气参数。

从整体来看，太阳辐射强度在午后经历了显著的变化，呈现出先短暂波动上升，随后持续下降，临近傍晚时波动明显，最终趋近于零的态势。在 11:00 至 13:00 时段，太阳辐射强度大致在 $1000\ \text{W/m}^2$ 下波动，显示出相对稳定的状态。至 13:00 时，辐射强度达到一个局部峰值，这与正午前后太阳高度角较大、阳光更直射地面密切相关，此时大气对太阳辐射的削弱作用相对较弱，使得辐射强度较高。进入 13:00 至 15:00 阶段，太阳辐射强度开始持续下滑。这是由于随着时间推移，太阳逐渐西斜，光线穿过大气的路径变长，大气对太阳辐射的吸收、散射和反射等削弱作用增强，导致到达地面的辐射强度不断降低。15:00 至 16:00 期间，辐射强度下降速率进一步加快，在 16:00 左右出现了一次短时激增后又迅速骤降的情况。这种异常波动很可能是云层变化所致——短暂的云层散开使太阳辐射得以增强，但随后云层重新遮蔽，

又导致辐射强度急剧回落。最后,从 16:00 至 18:00,太阳辐射强度继续衰减至 0。

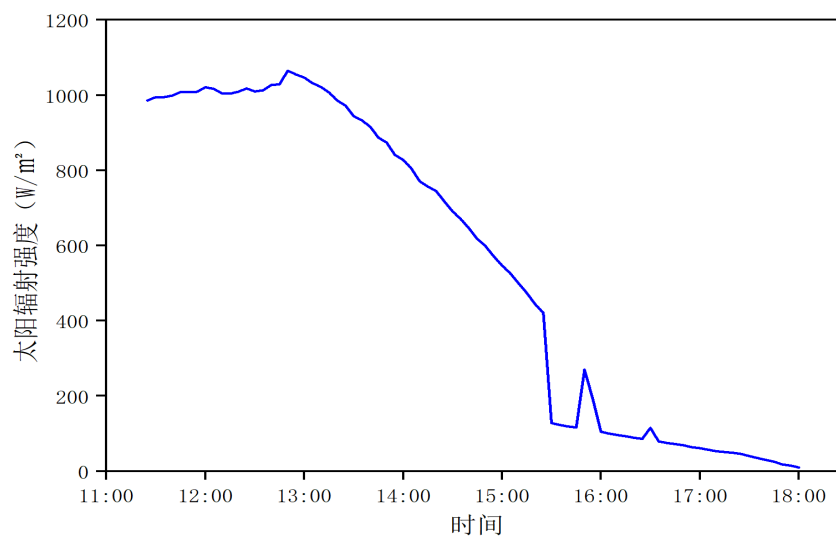


Figure 3. Outdoor solar irradiance
图 3. 室外太阳辐照度

本研究的实验地点选择在上海市某一栋 18 层高建筑的楼顶上进行,四周空旷,没有大型建筑物遮挡,为了减小温度的影响,实验选择在春季进行。

3. 结果和分析

3.1. 电压随时间的变化

如图 4 所示为电压随时间的变化图。

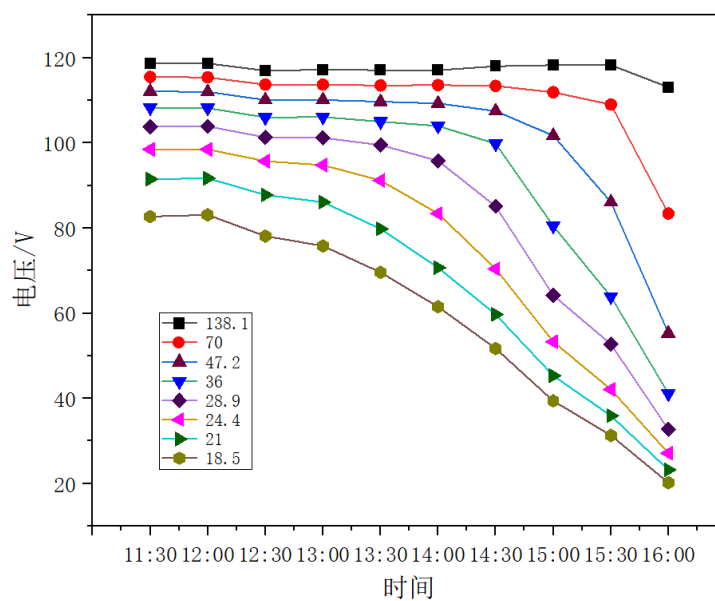


Figure 4. Voltage variation over time
图 4. 电压随时间的变化

图 4 中不同线条和标记分别表示各阻值对应的电压变化情况。总体来看,多数阻值的电压随时间增长(太阳辐照度变小)呈下降趋势,电阻越小,下降的幅度越大。在阻值为 $138.1\ \Omega$ 时,表现出较强的稳定性,其起始电压约为 $120\ \text{V}$,仅在接近 $16:00$ 时,此时太阳辐照度为 $105\ \text{W}/\text{m}^2$,开始略有下滑;在阻值为 $70\ \Omega$ 时,规律与 $138.1\ \Omega$ 相同,电压从 $16:00$ 开始逐渐下降,下降幅度在后期更加明显;在阻值为 $47.2\ \Omega$ 时,电压在 $14:30$ 太阳辐照度为 $691\ \text{W}/\text{m}^2$ 时,开始从 $110\ \text{V}$ 下滑至 $55\ \text{V}$;在阻值为 $36\ \Omega$ 时,电压在 $14:00$,太阳辐照度为 $828\ \text{W}/\text{m}^2$ 时开始从 $105\ \text{V}$ 下降至 $40\ \text{V}$;在阻值为 $28.91\ \Omega$ 时,电压在 $13:30$ 太阳辐照度为 $944\ \text{W}/\text{m}^2$ 时,开始从 $100\ \text{V}$ 下降至 $37.5\ \text{V}$;在阻值为 $24.4\ \Omega$ 、 $21\ \Omega$ 时,电压都从 $12:30$ 太阳辐照度为 $1010\ \text{W}/\text{m}^2$ 开始下降;在阻值为 $18.5\ \Omega$ 时,电压从 $12:00$ 太阳辐照度为 $1021\ \text{W}/\text{m}^2$ 时,有明显的下降趋势。整体图示清晰反映了各阻值电压在该时间段内的变化特点,既展示了 $138.1\ \Omega$ 阻值电压的稳定性,也突出了其他阻值电压的下降趋势及其间的差异,若需要维持电压稳定,在电阻越小时,需要的太阳辐照度越大。

3.2. 发电功率随时间的变化

如图 5 所示为实验测试时的发电功率。

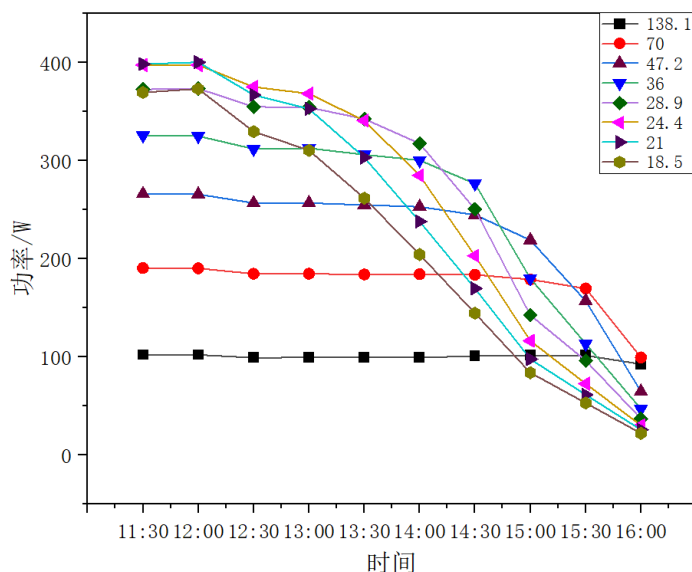


Figure 5. Variation of power generation over time
图 5. 发电功率随时间的变化

整体来看,与电压的规律类似,大多数阻值的功率随时间推移太阳辐照度减少时逐渐下降。在阻值为 $70\ \Omega$ 、 $138.1\ \Omega$ 时功率分别稳定在 $200\ \text{W}$ 、 $100\ \text{W}$ 附近,在 $15:30$ 后太阳辐照度为 $128\ \text{W}/\text{m}^2$ 开始下降;在阻值为 $47.2\ \Omega$ 时,初始功率约 $270\ \text{W}$,在 $14:30$ 后太阳辐照度为 $691\ \text{W}/\text{m}^2$ 开始最终缓降至 $70\ \text{W}$;在阻值分别为 $36\ \Omega$ 和 $28.9\ \Omega$ 时,起始功率分别为 $325\ \text{W}$ 和 $375\ \text{W}$,两个阻值对应功率下降的时间点和太阳辐照度分别为 $14:00$ 、 $828\ \text{W}/\text{m}^2$ 和 $13:30$ 、 $944\ \text{W}/\text{m}^2$,随后显著下降;在阻值为 $24.4\ \Omega$ 和 $21\ \Omega$ 时,功率都在 $400\ \text{W}$ 逐步下降,对应的时间也相同,在 $12:30$ 即太阳辐照度为 $1010\ \text{W}/\text{m}^2$ 时下降;在阻值为 $18.5\ \Omega$ 时,光伏发电功率从 $12:00$ 、太阳辐照度为 $1021\ \text{W}/\text{m}^2$ 时下降。可以看到, $138.1\ \Omega$ 的稳定性与其他参数的递减趋势形成鲜明对比。在太阳辐照度大于 $1010\ \text{W}/\text{m}^2$ 时,阻值 $21\ \Omega \sim 138.1\ \Omega$ 范围内,电阻越小,光伏发电功率越高,在太阳辐照度小于 $105\ \text{W}/\text{m}^2$ 时反而电阻大的发电功率大。

3.3. 电压随电阻的变化

如图 6 所示为实验测试的电压随电阻变化图。

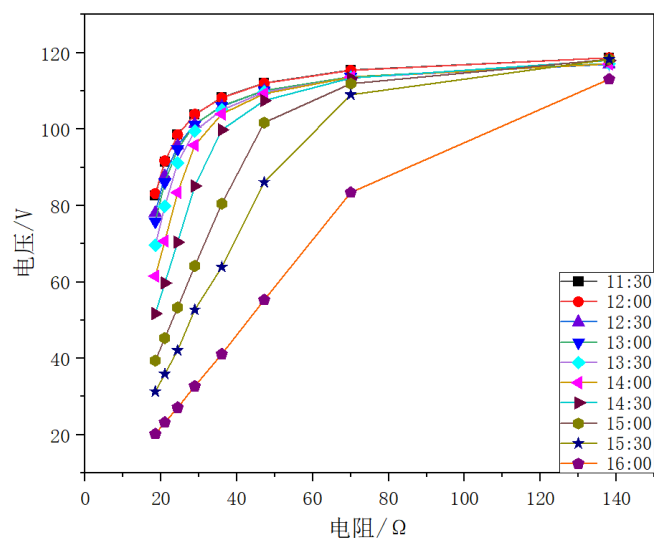


Figure 6. Voltage variation with resistance

图 6. 电压随电阻的变化

从图 6 中可以看出,所有时间曲线显示电压随电阻增大而升高,在电阻阻值为 $138.1\ \Omega$ 时,各时间点的电压值趋于接近。但部分时间点存在特殊变化:在低电阻区间($20\ \Omega$ 到 $70\ \Omega$),电压随电阻增加快速上升,随后上升趋势变缓;在 $20\ \Omega$ 到 $60\ \Omega$ 区间,电压上升幅度先慢后快;部分时间点在高电阻区呈现独特波动。多数情况下电压随电阻增大而升高,但在低、中电阻区间各时间点的变化趋势存在差异,电阻越小,随着时间的变化波动越大。在高电阻区间,电阻随时间变化的波动较小。

3.4. 电流随电阻的变化

如图 7 所示为实验测试时的电流随电阻变化图。

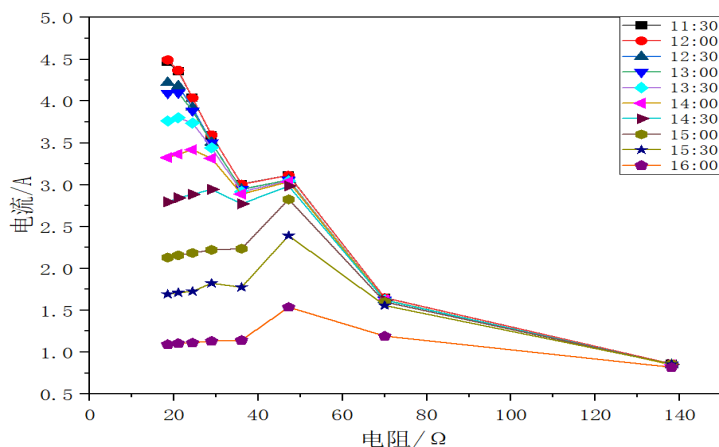


Figure 7. Variation of current with resistance

图 7. 电流随电阻的变化

由图 7 可知,从电流的角度来看,整体的电流是随着太阳辐照度的降低而减小的,在太阳辐照度较大的时间段(11:00~13:00),所有电阻所对应的电流值较大,且随着时间的改变,太阳辐照度降低,所有电阻所对应的电流值也随之下降,在 $20\ \Omega$ 时,13:30 的电流值达到 3.8 A,而 16:00 仅剩 1.2 A。从电阻来看,在太阳辐照度充足时,电阻越小,所对应的电流值越大。所有时间序列的曲线均保持相似形态,但下午 13:30 后的曲线明显低于上午时段,这表明太阳位置变化可能影响了系统输出特性。

3.5. 功率随电阻的变化

如图 8 所示为实验测试时发电功率随加热电阻的变化。

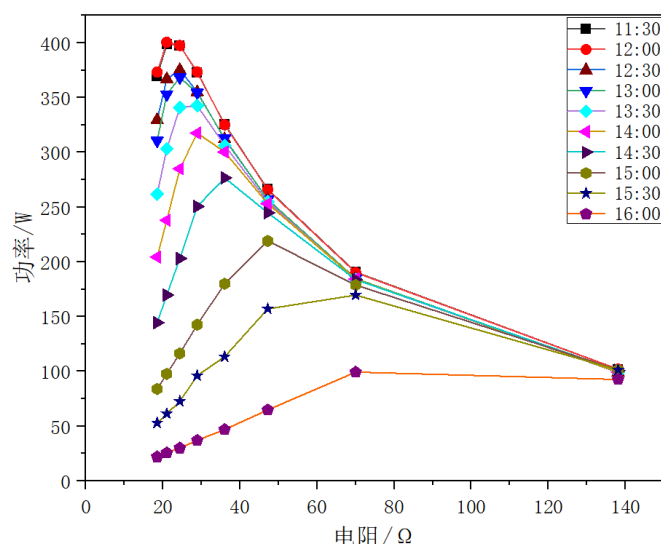


Figure 8. Power variation with resistance
图 8. 功率随电阻的变化

由图 8 可知,在 11:30~16:00 时段,功率随电阻增加呈现先快速攀升至峰值后下降的趋势,这表明该时段光伏板存在一个使功率最大化的最佳电阻值,若电阻偏离此值,功率便会降低;15:00~16:00 的曲线虽也呈先升后降态势,但最佳电阻值及功率对电阻变化的敏感度与 11:30~14:00 时段略有差异;而 16:00 呈现特殊规律,功率随电阻增加几乎保持不变,这是由于此时光照减弱,光伏板输出特性发生改变,在低光照条件下,功率与电阻的关系显著变化,未出现峰值下降现象。总体而言,光照强度对光伏板输出特性影响显著,不同时刻因光照条件不同,功率随电阻的变化规律也有所差异。在太阳辐照度大于 $944\ \text{W/m}^2$ 时,最佳功率点出现在 $20\ \Omega \sim 30\ \Omega$ 中,随着太阳辐照度的下降($105\ \text{W/m}^2 \sim 944\ \text{W/m}^2$ 之间),最佳功率点向右偏移,即最佳功率点所对应的阻值开始增大。

3.6. 不同电阻的发电效率

如表 3 所示为实验测试不同时刻不同电阻的发电效率。

根据实验数据表格可以看出,在太阳辐照度保持一样的条件下,不同电阻会影响发电效率。在中午 12 点到 1 点之间太阳辐照度较强的区间内,对应的太阳辐照度为 $1010\ \text{W/m}^2 \sim 1047\ \text{W/m}^2$,电阻阻值在 $24.4\ \Omega$ 附近时,发电效率达到最高值。随着时间推移(太阳辐照强度变弱)到下午,最佳发电效率对应的电阻值会逐渐增大,这些结果表明,在实际运行过程中要根据具体的太阳辐照强度动态调整电阻,才能让光伏系统保持高效工作。

Table 3. Power generation efficiency of different resistors at different times
表 3. 不同时刻不同电阻的发电效率

太阳辐照度 (W/m ²)	阻值 时间	138.1 Ω	70 Ω	47.2 Ω	36 Ω	28.9 Ω	24.4 Ω	21 Ω	18.5 Ω
995	11:30	1.42%	2.66%	3.72%	4.55%	5.20%	5.55%	5.57%	5.16%
1021	12:00	1.39%	2.59%	3.62%	4.42%	5.08%	5.41%	5.45%	5.08%
1010	12:30	1.36%	2.54%	3.53%	4.29%	4.88%	5.16%	5.05%	4.53%
1047	13:00	1.32%	2.45%	3.41%	4.15%	4.70%	4.89%	4.68%	4.12%
944	13:30	1.46%	2.71%	3.75%	4.51%	5.04%	5.02%	4.46%	3.85%
828	14:00	1.67%	3.09%	4.25%	5.04%	5.33%	4.78%	3.99%	3.43%
691	14:30	2.03%	3.69%	4.92%	5.56%	5.04%	4.08%	3.41%	2.90%
547	15:00	2.57%	4.54%	5.56%	4.57%	3.62%	2.96%	2.48%	2.13%
128	15:30					10.43%	7.88%	6.66%	5.75%
105	16:00			8.57%	6.21%	4.89%	3.98%	3.39%	2.92%

本篇论文尚未考虑到光伏电池的经典数学模型，没有将实验数据与理论仿真结果进行对比分析，后续将会把实验数据与理论仿真结果进行对比，验证实验的准确性，更加深入地揭示各种因素对系统性能的影响。

4. 结论

本文针对光伏发电特性与加热电阻的关系研究，通过实验对相同太阳辐照度不同阻值下的负载的电压、电流及功率进行研究，主要得到以下结论：

- 1) 光伏电压、发电功率随时间的变化研究：在实验测试的大部分阻值中，光伏电压、发电功率随时呈正比关系，从中午至下午，太阳辐照度变小时都呈下降趋势，且电阻越小下降的幅度越大。
- 2) 光伏电压、电流、发电功率随电阻的变化研究：光伏组件的电压随电阻的增大而增加，在太阳辐照度大于 828 W/m² 时，其电压变化基本相同。电流与电阻呈下降(20 Ω~40 Ω)、上升(40 Ω~50 Ω)、再下降(大于 50 Ω)的三段式关系。发电功率随着电阻的变化存在一个临界值。在小于临界值时，电阻越大功率越大，大于临界值时，电阻越大功率越小。且随着太阳辐照度减弱，最大发电功率所对应的阻值越大，在太阳辐照度较好时(大于 828 W/m²)，其最大功率点对应的阻值范围在 20 Ω~30 Ω 之间。因此在实际运行过程中要根据具体的太阳辐照强度动态调整电阻，才能让光伏系统保持高效工作。

参考文献

[1] Olayiwola, T.N., Hyun, S. and Choi, S. (2024) Photovoltaic Modeling: A Comprehensive Analysis of the I-V Characteristic Curve. *Sustainability*, **16**, Article 432. <https://doi.org/10.3390/su16010432>

[2] Masoum, M.A.S., Dehbonei, H. and Fuchs, E.F. (2004) Closure on “Theoretical and Experimental Analyses of Photovoltaic Systems with Voltage and Current-Based Maximum Power Point Tracking”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **19**, 652-653. <https://doi.org/10.1109/tec.2004.832449>

[3] Esmar, T. and Chapman, P.L. (2007) Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **22**, 439-449. <https://doi.org/10.1109/tec.2006.874230>

[4] Femia, N., Granozio, D., Petrone, G., Spagnuolo, G. and Vitelli, M. (2007) Predictive & Adaptive MPPT Perturb and Observe Method. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **43**, 934-950. <https://doi.org/10.1109/taes.2007.4383584>

-
- [5] Liu, F., Duan, S., Liu, B. and Kang, Y. (2008) A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **55**, 2622-2628. <https://doi.org/10.1109/tie.2008.920550>
 - [6] Bau, T.T.T. and Chao, K. (2023) A Maximum Power Tracker for Photovoltaic Module Arrays Based on the Improved Perturbation and Observation Method. *Sensors and Materials*, **35**, Article 2637. <https://doi.org/10.18494/sam4353>
 - [7] 卫东, 王央康, 常亚文. 一种基于增量电导法的变步长 MPPT 算法[J]. 太阳能学报, 2018, 39(5): 1277-1283.
 - [8] 黑晨阳, 关远鹏, 谢运祥, 等. 基于戴维南-诺顿等效的含分布式光伏发电系统的配电网仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 71-78.
 - [9] Nguyen, B.N., Nguyen, V.T., Duong, M.Q., Le, K.H., Nguyen, H.H. and Doan, A.T. (2020) Propose a MPPT Algorithm Based on Thevenin Equivalent Circuit for Improving Photovoltaic System Operation. *Frontiers in Energy Research*, **8**, Article ID: 14. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00014>
 - [10] Callegari, J.M.S., Gusman, L.S., Pereira, H.A. and Cupertino, A.F. (2022) Reconsideration of Solar Array Simulator Based on Thévenin Equivalent Circuit for Low-Power Applications. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **140**, Article 108016. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108016>
 - [11] Du, W., Li, M., Wang, Y., Ma, X., Hu, C., Zhang, Y., et al. (2021) Dynamic Energy Efficiency Characteristics Analysis of a Distributed Solar Photovoltaic Direct-Drive Solar Cold Storage. *Building and Environment*, **206**, Article 108324. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108324>
 - [12] Li, G., Han, Y., Li, M., Luo, X., Xu, Y., Wang, Y., et al. (2021) Study on Matching Characteristics of Photovoltaic Disturbance and Refrigeration Compressor in Solar Photovoltaic Direct-Drive Air Conditioning System. *Renewable Energy*, **172**, 1145-1153. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.110>