Advances in Energy and Power Engineering 电力与能源进展, 2021, 9(2), 55-64
Published Online April 2021 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/aepe
https://doi.org/10.12677/aepe.2021.92007

Hans汉斯

基于寻优法的光伏直流发电功率控制研究

安鑫业

天津工业大学电气工程与自动化学院，天津
Email: 654773955@qq.com

收稿日期：2021年3月10日；录用日期：2021年4月7日；发布日期：2021年4月15日

摘　要

为增强独立光伏发电系统的稳定运行和提高光伏发电系统的能源利用率，本文基于光伏电池的物理特性，采用Matlab/Simulink仿真软件搭建了光伏电池的仿真模型。根据光伏结构和要求搭建独立光伏发电系统，通过查表法对系统进行最大功率跟踪(MPPT)，并在此基础上提出了一种新型寻优控制策略，实现了光伏系统对输出功率的控制。同时设定光照模型和功率需求模型对含有寻优控制策略的30 kW光伏发电系统进行仿真研究。结果表明：光伏电池发电特性曲线符合实际光伏电池特性。功率控制策略可以有效地对光伏阵列进行功率控制从而满足系统的供需平衡，提高系统能源利用效率，避免了电池过充现象，延长了独立光伏发电系统的使用寿命。对光伏发电的推广和使用有重要的指导意义。

关键词

光伏发电，光伏电池模型，MPPT，寻优控制

Research on Power Control of Photovoltaic DC Generation Based on Optimal Method

Xinye An

School of Electrical Engineering and Automation, Tiangong University, Tianjin
Email: 654773955@qq.com

Received: Mar. 10th, 2021; accepted: Apr. 7th, 2021; published: Apr. 15th, 2021

Abstract

In order to enhance the operation stability of independent photovoltaic power generation system and improve the efficient utilization of photovoltaic power generation system, this paper first builds a simulation model of photovoltaic cells by Matlab/Simulink simulation software according to the physical characteristics of photovoltaic cells. An independent photovoltaic power generation system is built, and the maximum power tracking (MPPT) is carried out according to the look-up table method, and a new optimization control strategy is proposed according to it. The il-

文章引用: 安鑫业. 基于寻优法的光伏直流发电功率控制研究[J]. 电力与能源进展, 2021, 9(2): 55-64.
DOI: 10.12677/aepe.2021.92007

lumination model and power demand model are set up to simulate the 30 kW photovoltaic power generation system with optimal control strategy. The results show that the power generation characteristic curve of photovoltaic cells accords with the actual characteristics of photovoltaic cells. Power control strategy can effectively control the power of photovoltaic array to meet the power balance between supply and demand of the system, which improves the energy utilization efficiency of the system, avoids the phenomenon of battery overcharge and prolongs the service life of independent photovoltaic power generation system. It has important guiding significance for the popularization and application of photovoltaic power generation.

Keywords

Photovoltaic Power Generation, Photovoltaic Cell Model, MPPT, Optimal Control

Copyright © 2021 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

进入 21 世纪以后，化石能源日渐枯竭，环境污染愈发严重，以绿色、环保、低碳为方向的能源革命在全球蓬勃发展。我国倡导能源绿色发展战略，旨在突出清洁能源的利用和可再生能源的发展[1]。随着化石能源使用量不断减少，诸如太阳能，风能和潮汐能等清洁能源逐渐成为主要的能源。为减少环境污染问题，绿色清洁的发展方式和可持续的生产方式将成为人类社会持续经济繁荣和稳定发展的最佳选择[2]。

其中光伏发电系统因自身能源利用率高，前期投资少和能源分布广等优点被广泛利用。同时，光伏发电也给无电网覆盖地区的供电提供了可能[3]。由于独立光伏系统发电功率受外界条件的影响呈现出不确定性，因此需要配置储能单元来缓冲光伏系统的时变功率[4]。兼顾储能单元使用寿命的同时，提高可再生能源利用效率，设定合适的功率控制策略对光伏发电的推广及使用具有实际意义。

现阶段，光伏发电系统的大量研究主要从光伏电池侧和储能单元侧展开。文献[5]为减少弃光现象，建立光储联合电站输出功率控制目标函数并采用遗传算法对储能系统输出功率进行优化，减少光伏发电的浪费。文献[6]分析了光伏电池特性，推导出 Boost 电路阻抗变换关系，调整 Boost 变换器的占空比使负载等效阻抗与光伏电池阵列内部阻抗一致时，可使系统运行在最大功率运行点处。文献[7] [8]详细介绍了独立光伏发电系统运行特性，表明功率供需平衡是独立稳定运行的关键。文献[9]利用光伏阵列输出功率与储能单元容量的关系对系统运行状态划分，同时设定了变换器的控制策略，使系统运行稳定。上述文献所提方法均运用了复杂的算法和控制方式对系统进行功率控制。对于边远无电网覆盖地区，天气数据的不准确和繁多控制器会导致系统的能源利用率和系统稳定性下降。

本文针对边远地区的独立光伏发电系统，基于控制器简单、稳定性高的查表法[10]的控制方案对光伏发电系统进行最大功率跟踪控制，并提出寻优控制策略对光伏发电系统进行有效的功率控制。针对系统功率需求，本文控制方法可以控制不同光照下系统功率输出。最后利用 Matlab/Simulink 仿真软件对本文功率控制策略进行验证。

2. 光伏电池原理与建模

2.1. 光伏电池结构

光伏电池经过光照后，内部 p-n 结因光化学效应产生电势差，从而把光能转化为电能。光伏电池发

电能力与电池材料，光照强度，环境温度等相关。用恒电流源可以很好的模拟光伏电池的特性。单个光伏电池等效模型，见图 1。

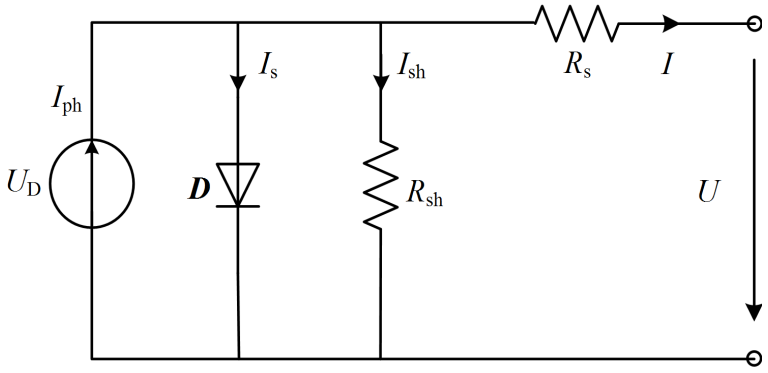


Figure 1. Equivalent circuit of PV
图 1. 光伏电池等效电路

从图 1 中可以得到光伏电池端口的电流输出方程[11]：

$$I = I_{ph} - I_s\left[\exp\frac{q(U+IR_S)}{kAT} - 1\right] - \frac{U+IR_S}{R_{sh}} \tag{1}$$

式中，I_{ph} 为光生电流(受外界环境影响)；I 为单个光伏电池的输出电流；U 为输出电压；U_D 为开路电压；R_s 为串联等效电阻，单位 mΩ；R_{sh} 为并联等效电阻，单位为 kΩ；I_s 为二极管反向饱和电流；q 为电子带电量，q = 1.6 × 10^{-19}C；T 为光伏电池运行温度，单位为 K；A 为二极管特性常数，取 1~2 之间；k 为玻尔兹曼常数取值 1.38 × 10^{-23} J/K。

式(1)为一超越方程不能直接求解输出电压 U 和电流 I 的关系。因并联电阻较大，可将忽略并联电阻的分流作用，即 I_{sh} = 0。则有

$$U_D = U + IR_s \tag{2}$$

将式(2)带入式(1)得

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{U+IR_s}{A\cdot k\cdot N_s\cdot T}\right) - 1\right] \tag{3}$$

实际应用中，光伏发电系统通常由多组单个电池的串并联构成的。同时整体呈现的电气特性与单个光伏电池相似。光伏阵列的端口电流输出方程为：

$$I = N_p\cdot I_{ph} - N_p\cdot I_s\cdot\left[\exp\left(\frac{U+IR_s}{A\cdot k\cdot N_s\cdot T}\right) - 1\right] \tag{4}$$

式中，N_s 为光伏阵列串联光伏电池数；N_p 为光伏阵列并联数光伏电池数。

2.2. 光伏电池模型搭建

光伏电池确定组成成分后，以光照强度和光伏电池温度为主的外界因素会影响光伏阵列的发电效率。考虑到外界因素以及内在因素的光伏发电特性方程有[12]：

$$I_{ph} = \left[I_0 + K_i\cdot(T-298)\right]\cdot\frac{G}{1000} \tag{5}$$

$$I_0 = I_s \cdot \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_{g0} \cdot \left(1/T_n - 1/T\right)}{A \cdot K}\right] \tag{6}$$

$$I_s = I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot U_D}{A \cdot K \cdot T}\right)} - 1\right)^{-1} \tag{7}$$

其中，I_0 为光伏电池短路电流，G 为光能强度，K_i 为短路断流随温度的变化率，T_n 为标准温度 298 K，E_{go} 为二极管的禁带宽度 1.1 Ev，U_D 为开路电压。

考虑光伏发电系统的电池温度和光照强度发生变化时，对光伏阵列的短路电流、开路电压和最大功率点的电流、电压值都将改变等因素。上述方程中设定标准光照强度 G_{ref} 为 1000 W/S^2，结合以上式(5)~(7)建立光伏电池仿真模型，见图 2。

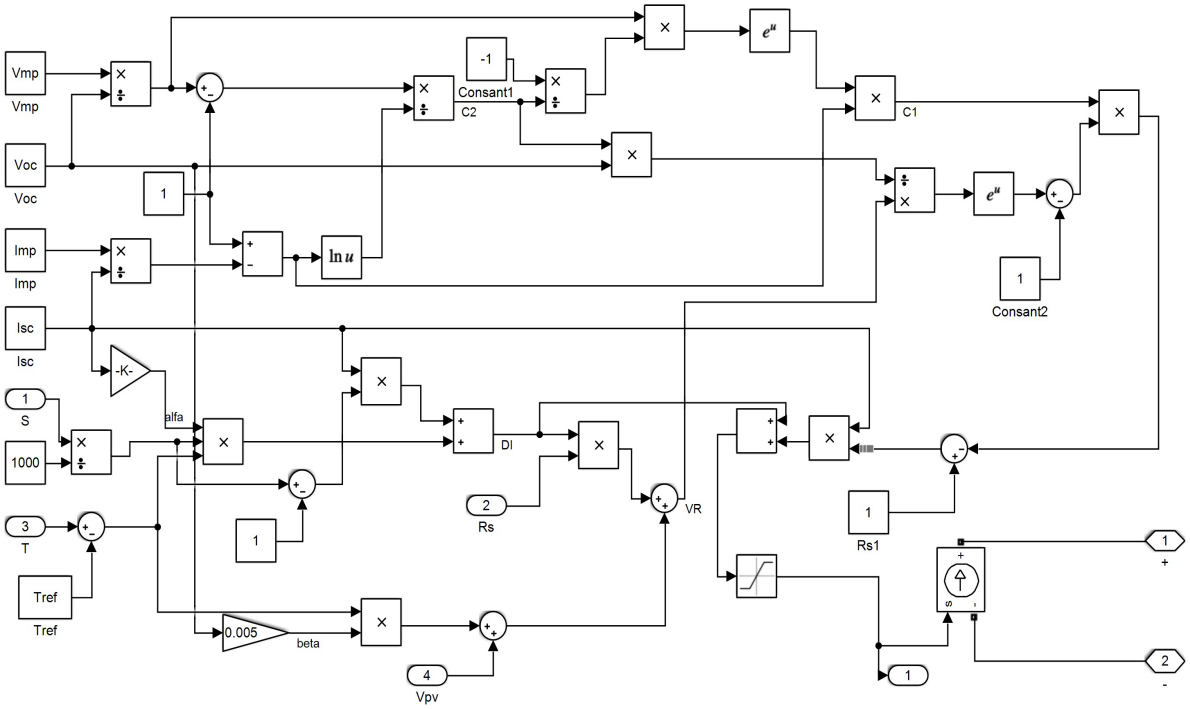


Figure 2. PV simulation model
图 2. 光伏电池仿真模型

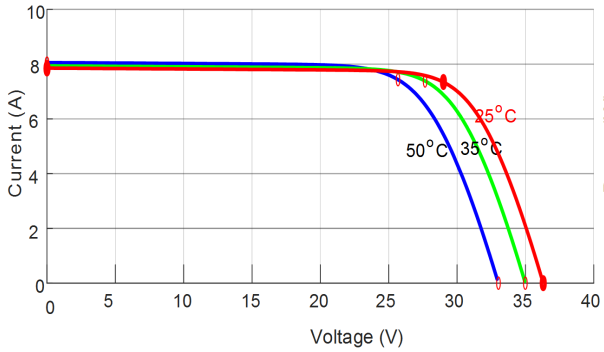
2.3. 光伏电池特性分析

本文采用实际工程的光伏电池 1Soltech 1STH-215-P 具体参数，见表 1。

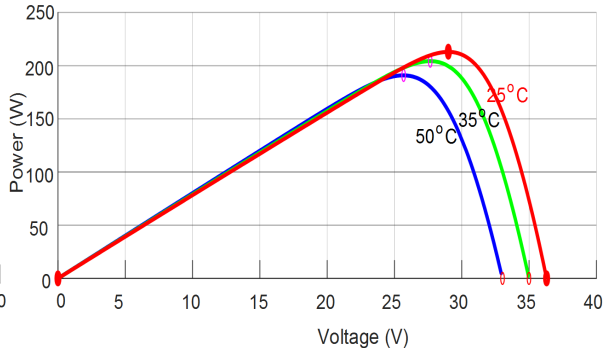
Table 1. Battery parameters
表 1. 电池参数

电池参数	对应数值	电池参数	对应数值
最大输出功率	213.1 W	最大功率点电流	7.3 A
开路电压	36.6 V	最大功率点电压	29 V
短路电流	7.5 A	温度系数	0.102 (%/deg.C)

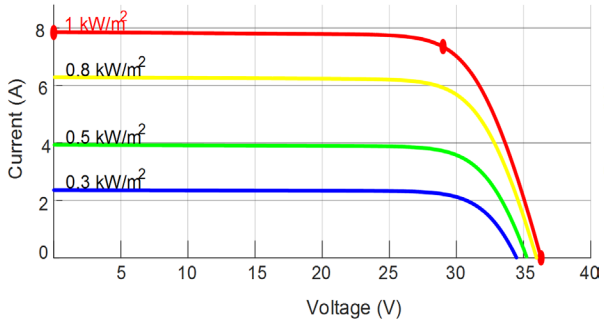
对单个光伏电池分别进行改变光照和改变温度的特性检测，当温度一定时，分别在 300 W/m^2、500 W/m^2、800 W/m^2 和 1000 W/m^2 的光照强度下进行测试分析。当光照一定时，分别在 50℃、35℃和 25℃的温度条件下进行测试分析。得到光伏电池的伏安特性和功率特性[13]，见图 3。



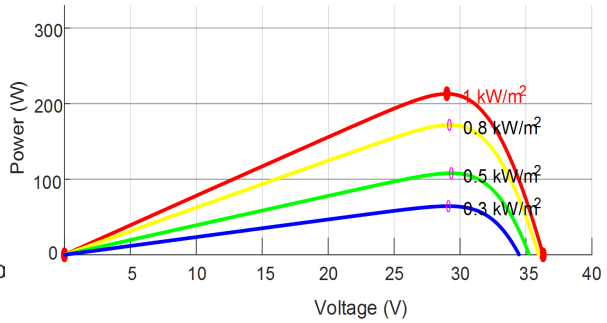
(a) 不同温度下单个光伏电池伏安特性曲线



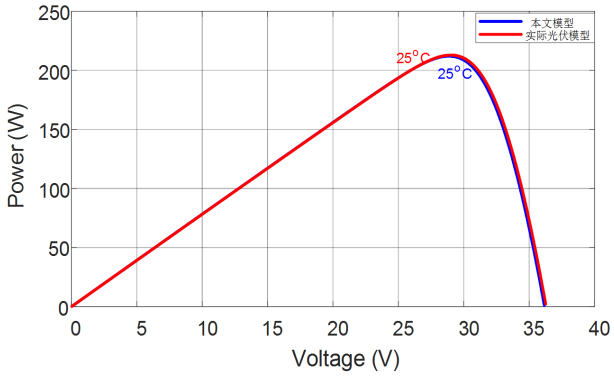
(b) 不同温度下单个光伏板的功率特性曲线



(c) 不同光照下的单个光伏板伏安特性曲线



(d) 不同光照下的单个光伏板功率特性曲线



(e) 本文光伏电池模型与实际光伏电池功率特性对比

Figure 3. PV characteristic curve under different conditions
图 3. 不同情况下光伏电池特性曲线

从图 3(e)中可以看出本文电池模型准确度较高。从图 3(a)中可以看出温度变化对光伏电池输出有一定影响，但不改变短路电流大小。从图 3(b)中可以看出在光照强度不变时，温度对电池的输出功率和最大功率点电压有一定的影响。从图 3(c)中可以看出在温度不变时，光照强度对光伏板的短路电流有影响很大，但短路电压变化不明显。从图 3(d)中可以看出，光伏电池的输出功率受光照很大影响，并且最大输出功率电压呈线性变化，为光储系统的最大功率跟踪控制提供了依据。同时，多个光伏电池串并结构的特性曲线与光伏单元的特性曲线相似。

3. 光伏发电功率控制

3.1. MPPT

从图 3(d)中可以得出，通过对光伏单元的端口电压进行限制可以改变光伏单元的输出功率。现阶段光伏发电的控制方法主要有增量电导法，扰动观测法，查表法[14]。其中查表法具有运行稳定性高，控制器设置简单，系统故障率低，不受遮挡影响等优点。

故本文采用查表法对 30 kW (N_s = 20, N_p = 7)的光伏阵列进行最大功率跟踪控制。结合图 3(d)可以绘制出该系统不同光照下的最大功率运行点的曲线轨迹，见图 4。

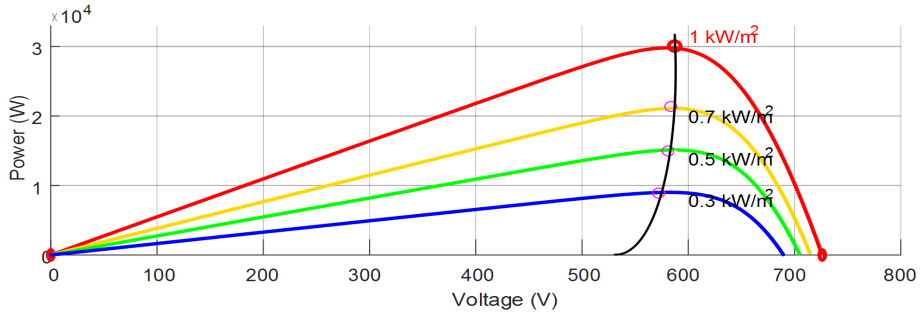


Figure 4. MPPT curve fitting
图 4. MPPT 曲线拟合

通过 Matlab 函数拟合工具对光照及所对应的最大功率输出电压进行关系拟合，得到光照与输出电压的函数关系然后进行闭环控制，见图 5。

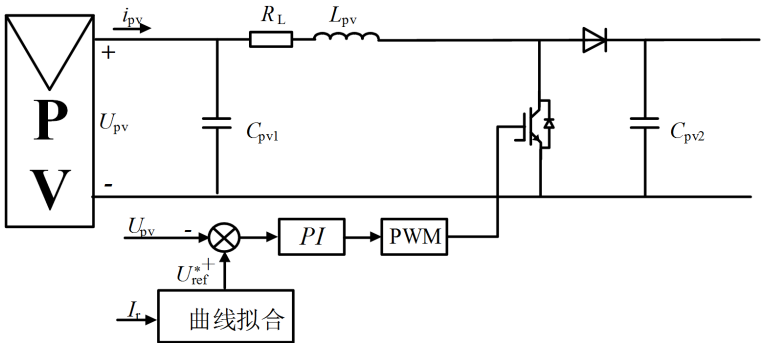


Figure 5. MPPT control block diagram
图 5. MPPT 控制框图

通过检测光照强度，给定当前光照情况下最大功率输出的端口电压 U_{ref}，通过电压外环控制改变占空比 D，再经过 PWM 模块输出开关信号作用到 Boost 电路中的开关器件实现闭环控制，进而完成对光伏阵列的输出电压进行控制并使其可以快速稳定在最大功率跟踪处。

3.2. 寻优控制策略原理

在独立光储系统中，当电池饱和且负载较小时，大多数系统会直接选择切出光伏发电而造成能源大幅度浪费。若采取功率控制，在电池接近饱和的情况下限定光伏发电功率，从而达到系统功率供需平衡，提高了系统的能源利用率，同时避免了储能单元的过充现象，延长了系统的使用寿命。

在一定温度和光照情况下，对单个光伏电池功率特性曲线进行分析，见图 6。

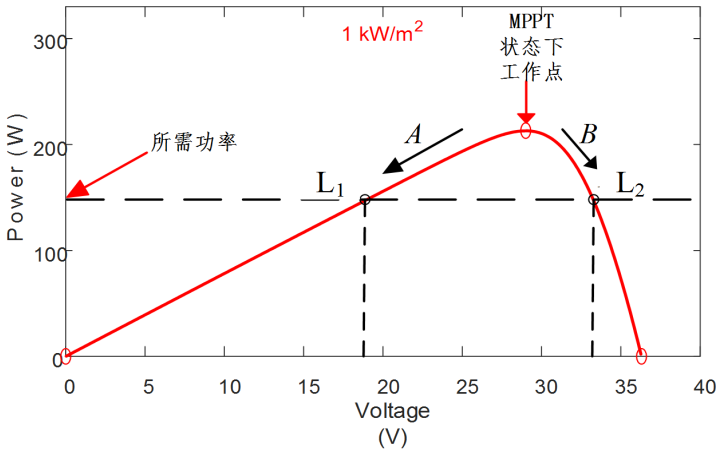


Figure 6. Analysis of the power characteristics of a single battery
图 6. 单个电池在功率特性分析

从图 6 可知，当系统所需功率低于此刻光照最大输出功率 P_{MPPT}。若要满足供需功率平衡，可以通过改变光伏电池端口电压可以将系统的最大功率运行状态转移至 L_1 或 L_2 处，由光伏电池运行特性可知 L_2 状态稳定。若运用合适的控制策略将端口电压限定在 L_2 运行点处即可有效的将光伏电池的发电功率进行控制。

在基于查表法的闭环控制上，设置控制程序。首先采集系统输出电压和输出电流计算出最大输出功率并与所需功率比较。当所需功率大于光伏单元最大输出功率时，端口电压保持最大功率跟踪处电压，不改变系统开关信号的占空比 D。当所需功率小于光伏单元最大输出功率时，在 MPPT 的运行点端口电压进行 0.01 V 的电压累加，直至系统的输出电压从 MPPT 工作点到 L_2 工作点，同时为了避免系统在所需功率处产生较大寻优扰动，设定所需功率波动范围为 ± 200 W。寻优控制策略流程见图 7。

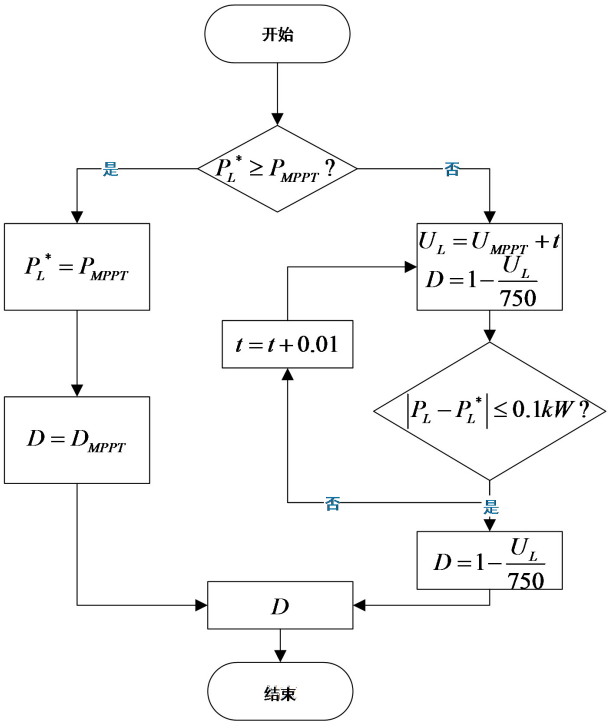


Figure 7. Flow chart of optimization control strategy
图 7. 寻优控制策略流程图

4. 仿真验证

基于以上光伏电池的仿真建模和功率控制的方案分析。本文利用 Matlab/Simulink 仿真软件进行仿真搭建 30kW 独立发电直流系统，然后用查表法结合寻优控制策略来对系统进行仿真。设置仿真步长为 $5*10^{-6}$ s，升压 DC/DC 变换器的输入电容为 1 mF，电感为 0.156 mH，输出电容为 0.16 mF，开关频率为 10 kHz。在一定温度条件下，设定满足本文控制策略的光照模型见图 8，功率需求模型见图 9。对不同情况下的功率需求进行仿真分析。

图 10 为光伏阵列 MPPT 控制下的功率输出，图 11 为系统最大功率跟踪效率。从两图中可知，系统最大功率跟踪响应速度快，输出效率大于 95%，符合最大功率跟踪控制要求。图 12 为设定功率需求的情况下光伏发电功率，图中表明在光照强度不变，光照强度上升以及光照强度下降等三种情况下均可以有效的控制光伏阵列的功率输出，且进行功率控制后，系统的功率输出波动在 0.2 kW 以内其稳定性符合系统功率输出要求，同时在功率控制下的输出功率满足图 9 中的功率需求模型使系统达到功率供需平衡。图 13 对系统进行功率控制方案和光伏切出方案的功率输出进行比较，结果表明当系统进行功率控制时可以有效提高光伏发电利用率，如图 13 中蓝色阴影部分。

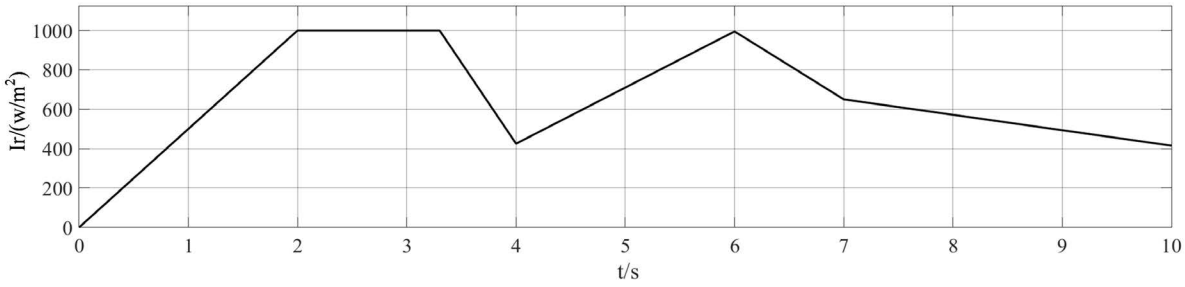


Figure 8. Lighting model
图 8. 光照模型

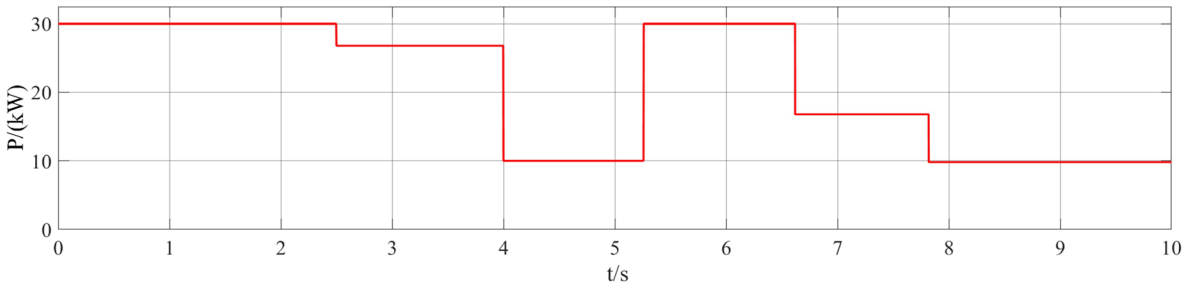


Figure 9. Power demand model
图 9. 功率需求模型

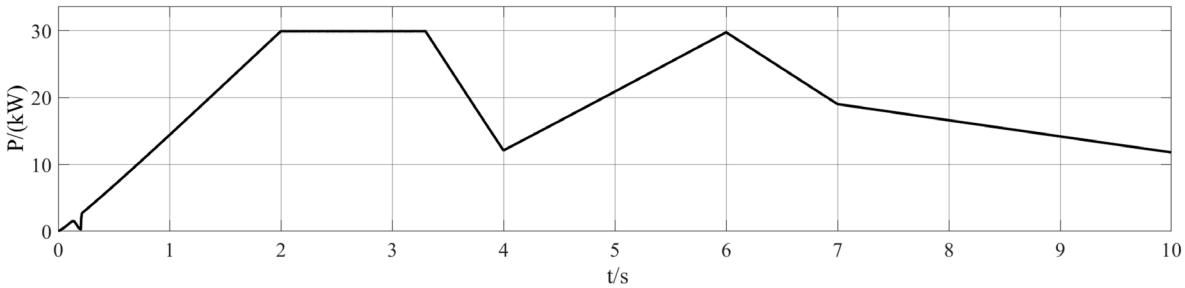


Figure 10. Power output under MPPT control
图 10. MPPT 控制下的功率输出

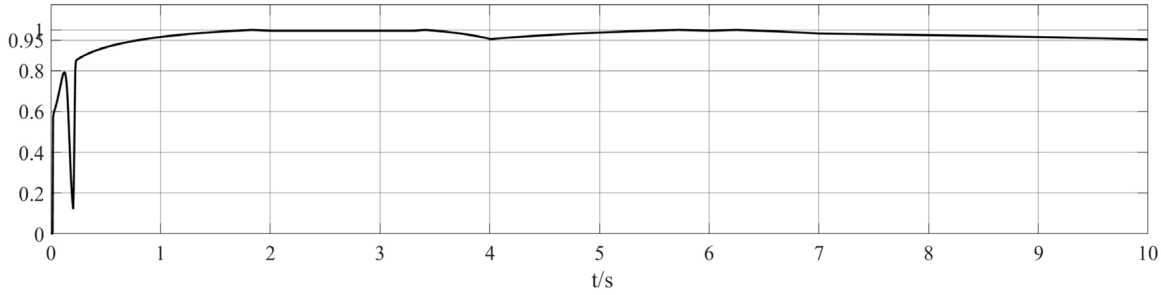


Figure 11. Power generation efficiency in MPPT mode
图 11. MPPT 模式下的发电效率

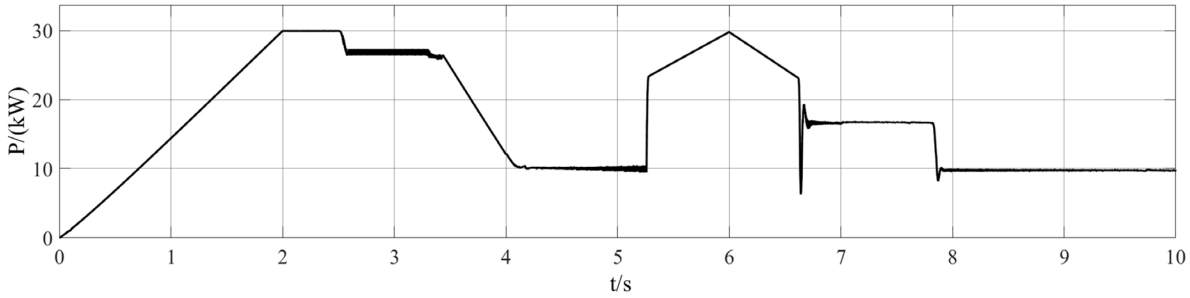


Figure 12. PV array output power with power control strategy
图 12. 含功率控制策略的光伏阵列输出功率

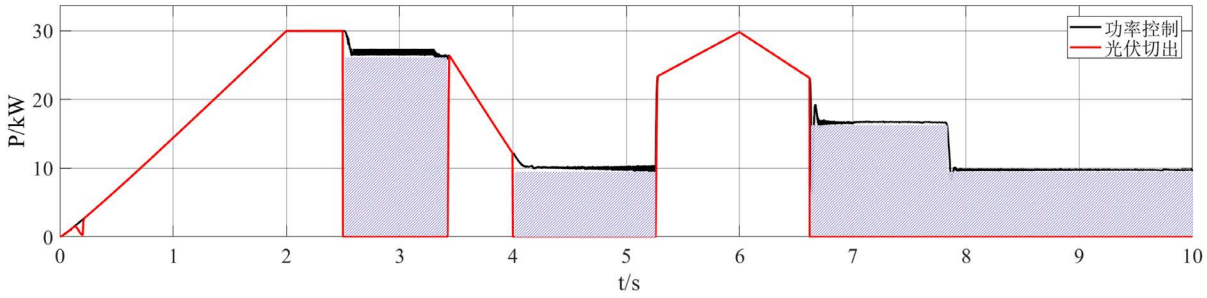


Figure 13. Energy efficiency analysis chart
图 13. 能效分析图

5. 结论

本文针对光伏电池的功率输出特性，从光伏发电系统功率需求方面设计了有效控制光伏阵列输出功率的方案并制定了相应的功率控制策略。得出以下结论：

1) 根据光伏电池发电特性，使用 Matlab/Simulink 软件对光伏电池进行模型搭建，并以 1Soltech 1STH-215-P 电池参数进行了电池特性分析以及与实际光伏电池的比较，表明了光伏电池模型的准确性。

2) 通过查表法并结合电池特性曲线完成了光伏发电的 MPPT 控制，然后基于查表法分析了光伏电池的功率输出特性，通过寻优控制策略完成了光伏阵列的输出功率控制，并建立该控制策略的流程图。

3) 建立光照模型、功率需求模型和独立光伏阵列发电仿真模型。对 30 kW 光伏发电模型进行仿真分析，结果表明基于寻优法的功率控制策略可以有效对光伏阵列进行功率控制从而满足系统的供需功率平衡，同时相较于对光伏电池的切除可以有效提高系统能源利用效率，避免了电池的过充现象，延长了独立光伏发电系统的使用寿命。

参考文献

[1] 刘振亚. 建设我国能源互联网 推进绿色低碳转型(上) [N]. 中国能源报.

[2] 李琼慧, 王彩霞. 从电力发展“十三五”规划看新能源发展[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 30-36.

[3] 廖志凌, 阮新波. 独立光伏发电系统能量管理控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 46-52.

[4] 邱培春, 葛宝明, 毕大强. 基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 29-33.

[5] 王恭, 张栋, 李相俊, 曹生现, 王城钢. 考虑弃光的光储联合电站输出功率控制策略[J]. 太阳能学报, 2019, 40(3): 817-824.

[6] 黄克亚. 独立光伏发电系统最大功率点跟踪原理分析及仿真研究[J]. 电工电气, 2011(2): 22-25.

[7] 张犁, 孙凯, 吴田进, 等. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 248-254.

[8] Shaw, P., Sahu, P.K., Maity, S., *et al*. (2016) Modeling and Control of a Battery Connected Standalone Photovoltaic System. 2016 *IEEE* 1*st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems* (*ICPEICES*), Delhi, 4-6 July 2016, 1-6. https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2016.7853123

[9] 李培强, 段克会, 董彦婷, 等. 含分布式混合储能系统的光伏直流微网能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 42-48.

[10] 孙航, 杜海江, 季迎旭, 等. 光伏分布式 MPPT 机理分析与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 48-54.

[11] Gupta, D., Kumari, N. and Samadhiya, A. (2020) Photovoltaic Modeling Using Single Diode Model in MATLAB. 2020 *IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies* (*GUCON*), Greater Noida, 2-4 October 2020, 734-739. https://doi.org/10.1109/GUCON48875.2020.9231165

[12] Kollimalla, K., Mishra, S., *et al.* (2013) Adaptive Perturb & Observe MPPT Algorithm for Photovoltaic System. *IEEE Power and Energy Conference at Illinois*, Urbana, Illinois, 22-23 February 2013, 42-47. https://doi.org/10.1109/PECI.2013.6506032

[13] Zhang, H., Li, S.Z., Zhang, X.N., *et al*. (2016) MPPT Control Strategy for Photovoltaic Cells Based on Fuzzy Control. 2016 12*th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery* (*ICNC-FSKD*), Changsha, 13-15 August 2016, 450-454. https://doi.org/10.1109/FSKD.2016.7603215

[14] Liu, F., Duan, S., Liu, F., *et al.* (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