

引用格式:曹新春,王发强.光伏发电系统 MPPT 算法的比较研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):25-35.

Citation: CAO Xinchun, WANG Faqiang. A comparative study on MPPT algorithms for photovoltaic power generation systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 25-35.

光伏发电系统 MPPT 算法的比较研究

曹新春,王发强

(西安交通大学电气工程学院(电工材料电气绝缘全国重点实验室),陕西 西安 710049)

摘要:针对光伏电池的非线性输出特性,为提高光伏电池的利用效率,需对其输出的最大功率进行实时跟踪。从光伏电池的输出特性分析出发,在阐述 MPPT 控制原理的基础上,综述光伏发电系统中最大功率点跟踪技术的算法,对跟踪速度、控制精度及将来研究和应用中需要解决的问题作了探讨。通过实验对比分析不同算法以及同一算法不同参数之间的差异,比较分析电压控制与直接占空比控制的不同。根据实验结果,对各种 MPPT 算法进行总结,包括跟踪时间、跟踪效率、电压波动等。建议工程应用中的合适场合,从而为光伏并网控制器中重要环节的设计与实现提供参考。最后,展望未来发展趋势。

关键词:光伏发电;最大功率点跟踪;算法分析;比较研究

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.003 中图分类号: TM615 文章编号: 1673-9140(2024)05-0025-11

A comparative study on MPPT algorithms for photovoltaic power generation systems

CAO Xinchun, WANG Faqiang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the nonlinear output characteristics of photovoltaic (PV) cells and enhance their utilization efficiency, it is crucial to track their maximum power output in real-time. Starting from an analysis of PV cell output characteristics and based on an explanation of the maximum power point tracking (MPPT) control principle, this paper reviews the algorithms for MPPT in photovoltaic power generation systems. It discusses tracking speed, control accuracy, and issues that need to be addressed in future research and applications. Through experimental comparisons, the paper analyzes differences between various algorithms and between different parameters within the same algorithm, as well as the distinctions between voltage control and direct duty cycle control. Based on the experimental results, the paper summarizes various MPPT algorithms, including their tracking time, tracking efficiency, and voltage fluctuations. Recommendations are provided for suitable applications in engineering, offering a reference for the design and implementation of key components in PV grid-connected controllers. Finally, the paper outlines future development trends.

Key words: photovoltaic power generation; maximum power point tracking; algorithm analysis; comparative study

随着对环境问题的日益关注和对低成本能源的强烈需求,清洁能源的地位越来越重要。太阳能因其分布广泛、可持续、无污染的特点成为国内外研究的热点问题^[1-2]。光伏发电是目前有效利用太

阳能的方式之一^[3-4]。然而,光伏电池的发电一直存在效率偏低的问题,其效率一般为 20%^[5],故需采用先进的控制技术,在算法层面上提高发电效率^[6]。目前,提高发电效率最主要的技术是最大功

收稿日期:2024-06-30;修回日期:2024-07-30

基金项目:国家自然科学基金(51377124);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2024JC-YBMS-372)陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBMS-372)

通信作者:王发强(1980—),男,博士,副教授,主要从事电力电子方面的研究;E-mail:faqwang@mail.xjtu.edu.cn

率点跟踪控制技术(maximum power point tracking, MPPT)。

近年来,国内外学者在MPPT算法研究方面做了大量工作并取得了显著成果。然而,在MPPT算法比较研究中,大多着重于理论陈述,鲜有涉及相关实验探讨。例如,文献[7]对光伏阵列最大功率点跟踪算法研究现状进行了综述,分析了各类算法的控制原理和特点,指出了未来发展方向;文献[8]按照MPPT算法的发展过程,对包括传统算法、改进算法以及阴影情况下的算法几种常用的算法进行分类总结;文献[9]将跟踪步长分为定步长、变步长和半步长3类,基于同一实验平台对MPPT算法进行比较分析,但只研究了电导增量法;文献[10-12]详细阐述了多种MPPT算法实现原理及实现流程,指出复合算法与传统算法相比,其跟踪效率更高,但缺乏实验验证;文献[13]详细分析了在部分遮阴条件下的20种MPPT算法实现原理,并且提出了一种新的统计性能评估指标;文献[14]重点介绍了基于人工智能的MPPT算法,例如神经网络、模糊控制,特别关注了成本、效率等指标,但缺乏实验结果支撑。

为此,基于目前国内外学者对MPPT算法的研究成果,从实验的角度,针对同一光伏发电系统,对各种MPPT算法进行实验验证,并对其进行特性分析和综合比较,从而更直观、更深刻地揭示各种算法的特点及差异。

1 光伏电池的数学模型及输出特性

光伏电池是光伏发电系统的最基本组成单元,是系统进行能量转换的起始端。

1.1 光伏电池的数学模型

在利用光生伏特效应而制成的光伏电池中,其P-N结是完成光电转换的关键。其外特性模型可看作是由恒流源与二极管的并联回路构成的^[15],光伏电池的等效电路如图1所示, I_{PH} 为光生电流, I_D 为暗电流, R_S 为串联电阻,代表由于光伏电池板表面的电极和接触电阻引起的损耗, R_{SH} 为并联电阻,主要反映光伏电池的漏电水平, R_L 为负载电阻。

考虑到光照强度、温度等因素影响,光伏电池的输出电流 I 与输出电压 U 的关系为

$$I = I_{PH} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U + R_S I)}{nKT} \right] - 1 \right\} - \frac{U + R_S I}{R_{SH}} \quad (1)$$

式中, I_0 为二极管反向饱和电流; q 为电子电荷; n 为

介电常数,一般取1.3; K 为玻尔兹曼常数; T 为光伏电池工作绝对温度。

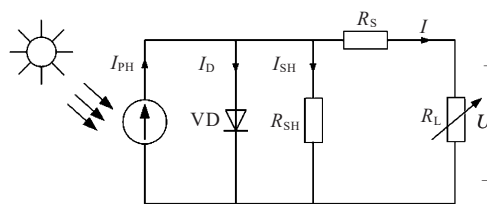


图1 光伏电池等效电路

Figure 1 Equivalent circuit of photovoltaic cell

1.2 光伏电池的输出特性

光伏电池的输出特性一般通过 $I-U$ 和 $P-U$ 2种特性曲线描述^[16-17]。图2为不同温度情况下光伏电池的3组输出特性曲线,可以明显看出,在相同光照强度下,光伏电池的开路电压受温度变化的影响比较大。温度越低,开路电压和输出的最大功率越大;温度越高,开路电压和输出的最大功率越小。

图3为不同光照情况下光伏电池的3组输出特性曲线,可以明显看出,在相同温度下,光伏电池的

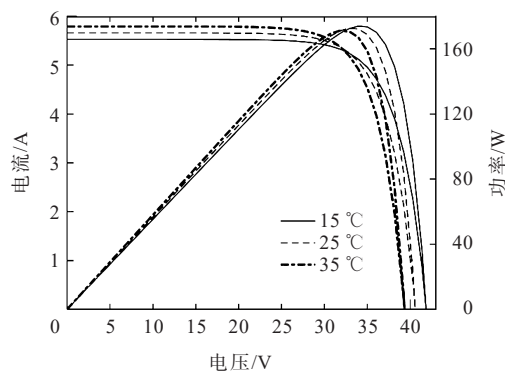


图2 不同温度下 $I-U$ 、 $P-U$ 曲线

Figure 2 $I-U$ and $P-U$ curves under different temperatures

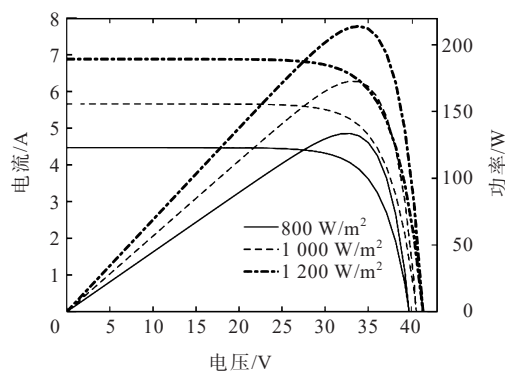


图3 不同光照下 $I-U$ 、 $P-U$ 曲线

Figure 3 $I-U$ and $P-U$ curves under different illuminations

短路电流受光照强度变化的影响比较大。光照强度越强,短路电流和输出的最大功率越大;光照强度越弱,短路电流和输出的最大功率越小。

在实际光伏发电系统中,光伏电池的输出功率往往同时受到温度及光照强度变化的影响,最大值常出现在电压源区域与电流源区域的交点处^[18]。

2 MPPT 控制的基本原理

由于光伏电池输出电流与输出电压之间的非线性,很难确定光伏阵列实时工作点与最大功率点之间的关系。如图 4 所示,A 点和 C 点分别为不同特性曲线下的最大功率输出点^[19]。假定某一时刻,系统运行在 A 点,当光照强度增强,光伏电池的输出特性由曲线 1 变为曲线 2 时,若保持负载 1 不变,系统将运行在 B 点,偏离了最大功率点 C;若将负载 1 变为负载 2,可以保证系统运行在新的最大功率点 C。若此时光照强度减弱,应由负载 2 变为负载 1,以避免系统运行在 D 点,造成功率损失。

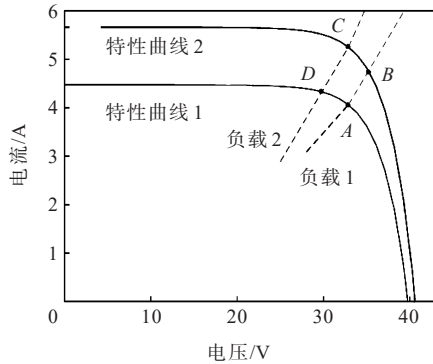


图 4 MPPT 控制原理示意

Figure 4 Schematic diagram of MPPT control principle

MPPT 控制策略就是实时检测光伏阵列的输出功率,通过某种控制算法预测当前工况下光伏阵列可能的最大功率输出^[20],从而改变当前的负载情况,以满足最大功率输出的要求。如图 5 所示,将光伏阵列等效成一个理想的电压源 U 和一个电阻 r 串联的模型。

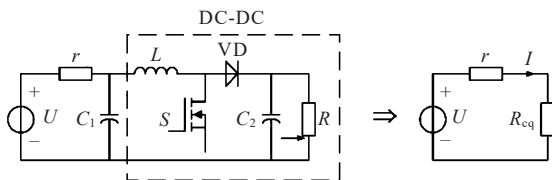


图 5 电阻匹配原理示意

Figure 5 Schematic diagram of impedance matching principle

假设 DC-DC 变换器等效负载为 R_{eq} ,其消耗的功率为

$$P = I^2 R_{eq} = \frac{U^2}{\frac{(R_{eq} - r)^2}{R_{eq}} + 4r} \quad (2)$$

针对 Boost 变换器,其等效负载为^[21]

$$R_{eq} = (1 - D)^2 R \quad (3)$$

当 Boost 变换器的实际负载 R 一定时,改变占空比 D 即可改变 Boost 变换器的等效负载 R_{eq} ,从而改变光伏阵列的工作点。当等效负载 R_{eq} 与光伏阵列内阻 r 保持一致时,满足最大功率传输定理^[22],可使光伏阵列实现最大功率输出。

3 MPPT 算法分类及工作原理

如图 6 所示,根据 MPPT 算法工作原理和实现方式的不同,可分为传统算法和智能算法两类。传统算法依赖于光伏发电系统精确的数学模型,智能算法可以实现自我学习并不断优化控制策略。

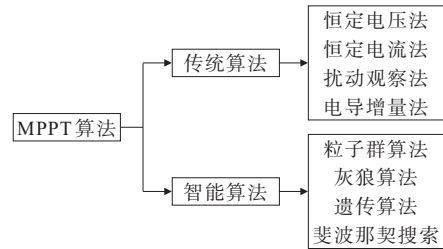


图 6 MPPT 算法分类

Figure 6 Classification of MPPT algorithms

3.1 传统算法

传统算法的工作原理和关键公式如表 1 所示,主要应用于均匀光照下的最大功率点跟踪。开路电压比例系数法^[23-24]和短路电流比例系数法^[23,25-26]是两种典型的基于光伏电池输出特性曲线的开环 MPPT 方法,系统仅需要对光伏阵列输出的端口电压或端口电流进行采样,控制策略简单,但忽略了温度对输出特性的影响。为了准确实现最大功率点跟踪,通常采用基于闭环控制的自寻优类 MPPT 算法,主要有扰动观察法^[27-29]和电导增量法^[30-32]。控制信号可以是电压、电流或占空比,通过周期性的采样、比较,改变光伏阵列的工作点。此外,国内外学者也提出了变步长改进算法^[33-36],使扰动步长随光伏阵列的工作状态而发生改变。

表 1 4种传统MPPT算法

Table 1 4 kinds of traditional MPPT algorithms

算法	原理	关键公式
恒定电压 ^[23-24]	即开路电压比例系数法,利用DC-DC变换器将最大功率点跟踪控制简化为恒压控制,使得调整后光伏阵列端口电压与设定值保持一致。	$U_{\text{mpp}} = K_v U_{\text{oc}}$ $0.7 \leq K_v \leq 0.8$
恒定电流 ^[23, 25-26]	即短路电流比例系数法,利用DC-DC变换器将最大功率点跟踪控制简化为恒流控制,使得调整后光伏阵列端口电流与设定值保持一致。	$I_{\text{mpp}} = K_i I_{\text{sc}}$ $0.75 \leq K_i \leq 0.9$
扰动观察 ^[27-29]	每周初始计算光伏阵列的输出功率,通过周期性扰动改变光伏阵列的工作点,根据功率变化的情况,判断后续控制信号的扰动方向,使输出功率继续增大。	$\begin{cases} dP = P(K) - P(K-1) \\ dU = U(K) - U(K-1) \end{cases}$
电导增量 ^[30-32]	当系统工作在最大功率点时,功率对电压的导数为零。通过比较电导增量和瞬时电导判断实时工作点与最大功率点之间的关系,得到控制信号的扰动方向。	$\frac{dP}{dU} = I + U \frac{dI}{dU}$

3.2 智能算法

智能算法的工作原理和关键公式如表2所示。由于光伏电池输出特性的高度非线性以及最大功率点影响因素的复杂性,元启发式算法在最大功率点跟踪控制中得到了有效应用^[37]。例如:基于鸟类觅食时群体协作和随机搜索行为而产生的粒子群

算法^[38-41];基于狼群严格的等级制度和捕猎方式而提出的灰狼算法^[42-45];基于生物基因遗传学而衍生出来的遗传算法^[46-49];基于数学模型逐步优化的斐波那契搜索^[50-52]。智能算法的本质是以过往的经验为基础构建决策模型,模型建立相对简单,无须精确研究光伏发电系统的数学模型和具体参数。

表 2 4种智能MPPT算法

Table 2 4 kinds of intelligent MPPT algorithms

算法	原理	关键公式
粒子群法 ^[38-41]	将光伏阵列的输出电压或占空比作为粒子的位置,输出功率作为粒子的适应度,通过群体中粒子间的合作与竞争指导优化搜索。根据全局最优和个体最优对粒子的位置和速度进行迭代更新,使每个粒子尽可能地接近最大功率点。	$v_{ij}^{t+1} = wv_{ij}(t) + C_1r_1(t)(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + C_2r_2(t)(p_{g^t}(t) - x_{ij}(t))$
灰狼法 ^[42-45]	将光伏阵列的输出电压或占空比作为狼群的位置,按照输出功率评判灰狼的优劣性,根据地位不同,将狼群严格划分为4种等级。 ω 狼在 α 狼、 β 狼、 δ 狼的带领下,逐步靠近最大功率点,其中 α 狼的位置被视为最佳解决方案。	$\vec{A} = 2a\vec{r}_1 - \vec{a}, \vec{C} = 2\vec{r}_2$ $\vec{D} = \vec{C}\vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) $ $\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A}\vec{D}$
遗传法 ^[46-49]	将光伏阵列的输出电压或占空比采用二进制编码作为个体基因型,通过选择、交叉和变异操作,在保证有效性的基础上,提高种群内基因的多样性。经过不断迭代进化,更新种群内染色体信息,最终选择最符合优化结果的个体基因型。	$P_c = \begin{cases} k_1(f_{\text{max}} - f) \\ f_{\text{max}} - f_{\text{avg}} \\ k_2, f < f_{\text{avg}} \end{cases}, P_m = \begin{cases} k_3(f_{\text{max}} - f') \\ f_{\text{max}} - f_{\text{avg}} \\ k_4, f' < f_{\text{avg}} \end{cases}$
斐波那契搜索 ^[50-52]	以斐波那契搜索数列 $\{F_n\}$ 为参照,迭代变化限制搜索范围,每次搜索范围变为上一次的 F_{n-1}/F_n 。每次只需重新计算一个试探点处的输出功率,经过多次迭代,搜索区间将无限趋近于最大功率点。	$b = x_2, x_2 = x_1$ $x_1 = b + \frac{f_1 b(n-1)}{f_1 b(n)}(a-b)$

除单一MPPT算法外,还存在为了追求更优的跟踪速度和收敛稳定性而提出的复合MPPT算法。其一般是将智能算法和传统算法相结合,以实现不同算法的优势互补。例如:文献[53-54]提出将灰狼算法和扰动观察法相结合;文献[55-57]提出将粒子

群算法和电导增量法相结合。图7为复合MPPT算法的实现流程。在迭代初始阶段,利用智能算法的全局搜索能力快速定位到最大功率点附近,在智能算法满足终止条件,迭代结束后,改用小步长扰动观察法或小步长电导增量法进行局部寻优。

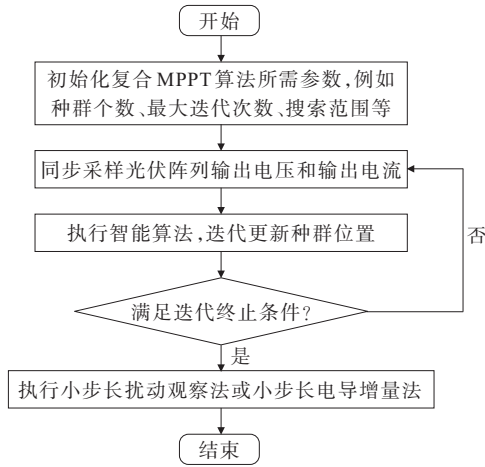


图 7 复合 MPPT 算法实现流程

Figure 7 Implementation process of hybrid MPPT algorithm

4 实验

4.1 实验平台

光伏发电系统实验平台如图 8 所示,主要包括基于 TMS320 F28335 的 MPPT 控制器、Boost 变换器、采样电路、电源转换电路以及可调负载。为了更精确地模拟光伏阵列的实际运行环境,保证实验条件的统一,参考文献[58-60],以可调直流稳压电源代替太阳能光伏板。

选用 TC4420 作为栅极驱动;电压采样选用低失真的 LM324N 运算放大器;为了减少电磁干扰,选用基于 ACS712ELCTR 的独立电流采样模块。Boost 变换器电路结构如图 5 所示,开关管 S 选用 IRF740 PBF;二极管 VD 选用 MUR 860;滤波电容 C_1 设为 100 μF ;滤波电容 C_2 设为 1 000 μF ;功率电感 L 设为 1 mH;负载电阻 R 设为 100 Ω 。主电源电压 U 设为 60 V,光伏阵列模拟电阻 r 设为 37 Ω 。

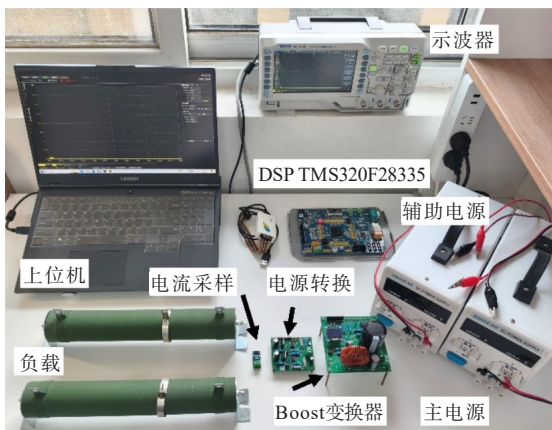


图 8 光伏发电系统实验平台

Figure 8 Experimental platform of photovoltaic power generation system

MPPT 算法的设定参数如表 3 所示。直接占空比控制时,占空比变化范围为[0.1,0.7];电压控制时,电压变化范围为[10 V,40 V]。将种群个数设为 5,迭代次数设为 15。实验过程中只改变 MPPT 算法代码,其余电路结构及器件参数均保持一致。

表 3 MPPT 算法设定参数

Table 3 The setting parameters of MPPT algorithm

算法	变量	数值	单位
恒定电压	设定电压	27/30/33	V
恒定电流	设定电流	0.7/0.9/1.1	A
扰动观察	扰动步长	0.02/0.05/变步长	—
电导增量	扰动步长	0.02/0.05/变步长	—
	惯性权重	变化范围[0.2,0.8]	—
粒子群	自我认知学习因子	变化范围[0.2,0.6]	—
	社会认知学习因子	变化范围[0.2,0.6]	—
灰狼	更新公式系数	变化范围[0,1]	—
遗传	交叉率	0.8	—
	变异率	0.1	—
斐波那契搜索	搜索精度	0.01	—
灰狼算法+扰动观察	扰动步长	0.01	—
粒子群算法+电导增量	扰动步长	0.01	—

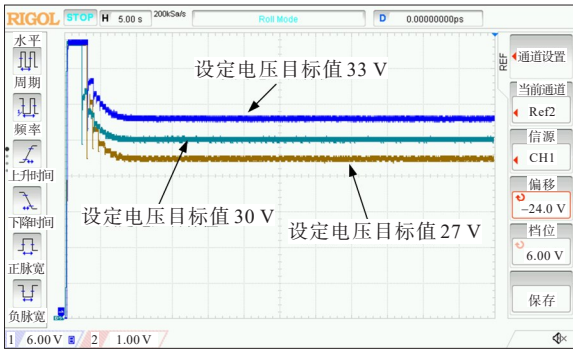
4.2 实验结果与分析

单一 MPPT 算法在最大功率点跟踪过程中的电压变化轨迹如图 9 所示。分析图 9(a)、9(b)可知,恒定电压法和恒定电流法依赖于开路电压比例系数和短路电流比例系数的选择,当电压或电流的设定值不恰当时跟踪效果较差,需要人工干预。

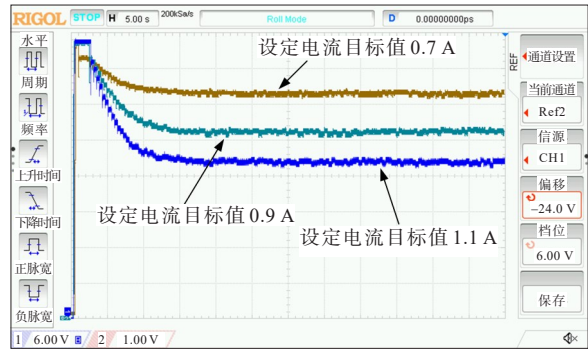
分析图 9(c)、9(d)可知,定步长扰动观察法和定步长电导增量法难以同时优化跟踪速度与稳态电压波动:扰动步长越大,跟踪速度越快,但稳态电压也波动越大;扰动步长越小,稳态电压波动越小,但跟踪速度也越慢,较难找到平衡点。变步长扰动观察法和变步长电导增量法可以实现扰动步长的动态调整,跟踪速度和稳态控制精度更优。

分析图 9(e)可知,粒子群算法搜索范围宽,跟踪精度高,稳态电压波动小。分析图 9(f)可知,灰狼算法跟踪速度慢,最大功率点跟踪过程中电压波动大,当参数选择不恰当时,可能难以收敛。分析图 9(g)可知,电压模式控制的遗传算法与直接占空比控制相比,跟踪精度更高,但跟踪速度较慢。分析图 9(h)可知,斐波那契搜索在两种控制模式下的整体跟踪速度均优于其他智能算法的整体跟踪速度。

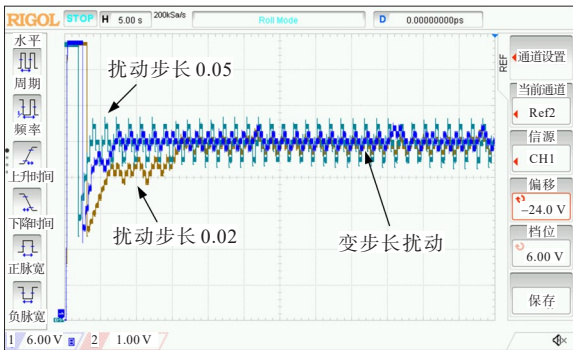
复合 MPPT 算法在最大功率点跟踪过程中的电压变化轨迹如图 10 所示。将图 10(a)与图 9(c)、



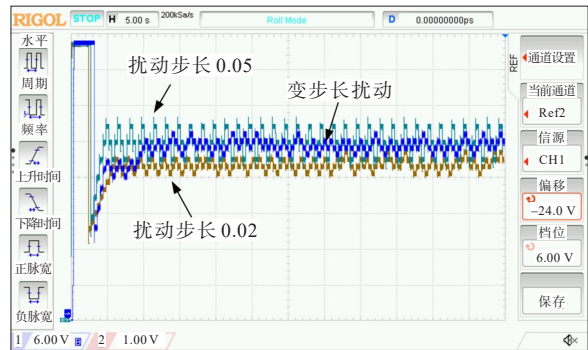
(a) 恒定电压法



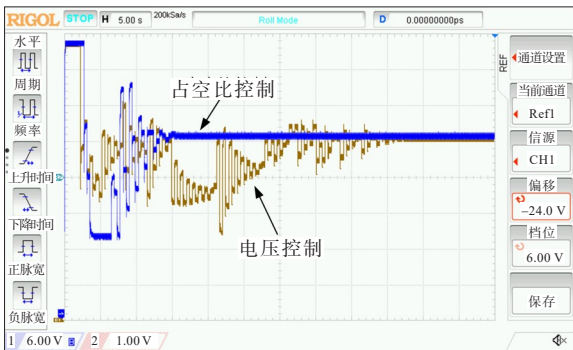
(b) 恒定电流法



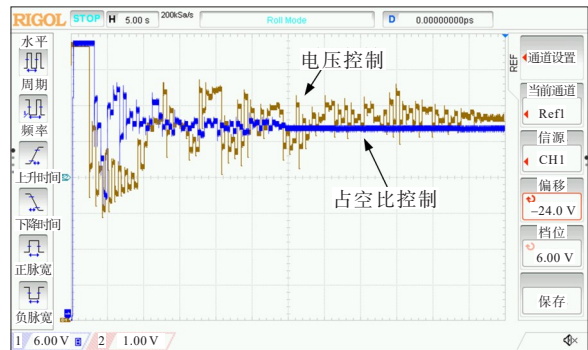
(c) 扰动观察法



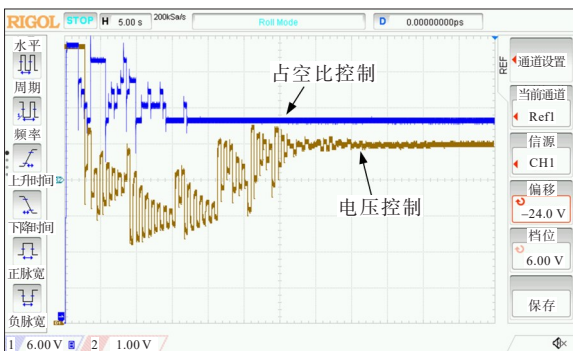
(d) 电导增量法



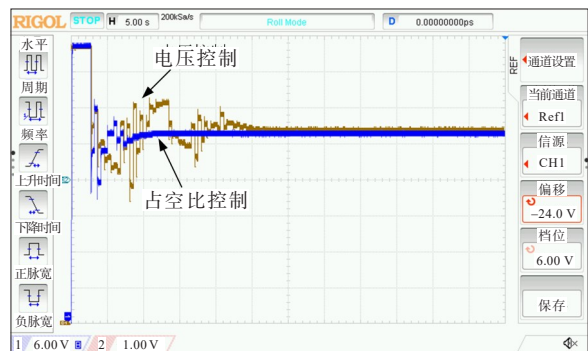
(e) 粒子群算法



(f) 灰狼算法



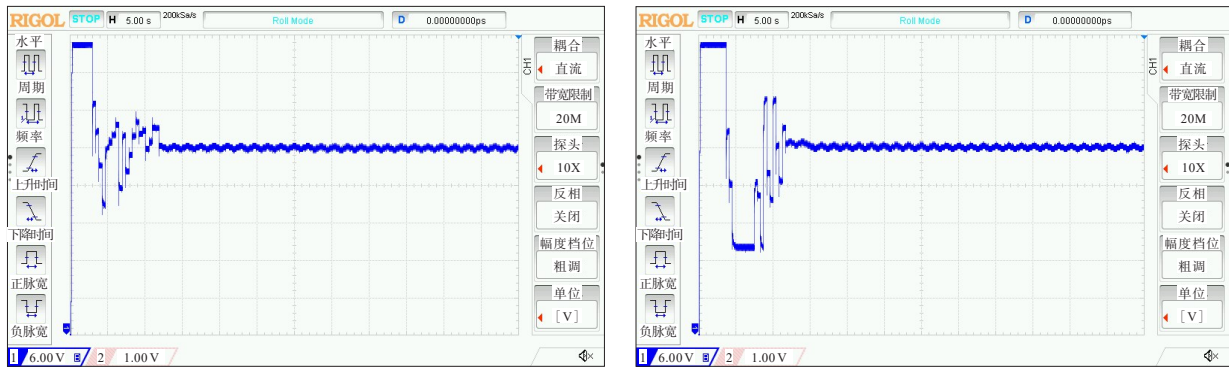
(g) 遗传算法



(h) 斐波那契搜索

图9 单一MPPT算法电压变化轨迹

Figure 9 Voltage variation trajectory of single MPPT algorithm



(a) 灰狼算法+扰动观察法

(b) 粒子群算法+电导增量法

图 10 复合 MPPT 算法电压变化轨迹

Figure 10 Voltage variation trajectory of hybrid MPPT algorithm

图 9(f)对比可知,灰狼算法结合扰动观察法的收敛速度更快,稳态电压波动更小。将图 10(b)与图 9(d)、图 9(e)对比可知,粒子群算法结合电导增量法的跟踪精度更高,降低了误判和跟踪失效的可能性。

为更好地分析 MPPT 算法的跟踪性能,表 4 给出了跟踪时间、跟踪效率、电压波动等实验数据。

实验结果表明,这 10 种算法都可以成功跟踪到最大功率点附近,但不同算法的跟踪效果差异较大。例如跟踪时间最短为 1.20 s,最长为 53.25 s;跟踪效率最低为 92.59%,最高为 99.18%;稳态电压波动最小为 0.35 V,最大为 3.60 V。针对不同算法之间的差异,表 4 给出了比较分析结果。

表 4 MPPT 算法性能分析

Table 4 Performance analysis of MPPT algorithm

算法	跟踪时间/s	实际功率/W	跟踪效率/%	稳态电压/V	电压波动/V	比较分析
恒定电压	设定电压 27 V	4.15	23.88	98.18	27.00	跟踪速度快;跟踪效率依赖于设定电压值,需要人工等外界干预;电压波动小,稳定性好。
	设定电压 30 V	2.95	24.12	99.18	30.15	
	设定电压 33 V	4.50	23.80	97.86	33.45	
恒定电流	设定电流 0.7 A	10.05	22.52	92.59	37.70	跟踪速度较快;跟踪效率依赖于设定电流值,不同设定值时差异较大,需人工干预;稳定性好。
	设定电流 0.9 A	10.65	24.07	98.94	31.45	
	设定电流 1.1 A	13.05	23.70	97.44	26.05	
扰动观察	扰动步长 0.02	12.30	24.12	99.16	29.65	稳态电压波动大;定步长扰动无法兼顾跟踪速度与跟踪精度的固有矛盾;变步长跟踪效果更好。
	扰动步长 0.05	1.25	24.09	99.06	28.95	
	变步长扰动	4.10	24.12	99.17	29.75	
电导增量	扰动步长 0.02	2.90	23.77	97.74	26.40	稳态电压波动大;小步长扰动时存在跟踪失效的可能性,跟踪效率低;变步长跟踪效果更好。
	扰动步长 0.05	1.20	24.11	99.12	29.30	
	变步长扰动	6.20	24.11	99.14	29.40	
粒子群	电压控制	43.65	24.12	99.15	30.50	电压控制耗时较长;整体跟踪精度更高;稳态电压波动较小。
	直接占空比控制	8.85	24.11	99.12	30.70	
灰狼	电压控制	53.25	23.67	97.31	34.10	整体跟踪速度较慢,难以收敛;直接占空比控制跟踪效果更好。
	直接占空比控制	26.05	24.03	98.78	31.90	
遗传	电压控制	34.25	24.12	99.18	29.90	电压控制时跟踪精度更高,但跟踪速度慢,稳态电压波动较大。
	直接占空比控制	15.15	23.74	97.62	33.75	
斐波那契搜索	电压控制	17.80	23.99	98.62	32.25	直接占空比控制时跟踪速度更快,但稳态电压波动较大。
	直接占空比控制	5.75	24.01	98.71	32.05	
灰狼+扰动观察		8.95	24.12	99.17	29.75	跟踪速度较快,跟踪精度高。
粒子群+电导增量		11.65	24.12	99.18	29.90	跟踪速度较快,跟踪精度高。

为了更直观、深刻地认识不同MPPT算法之间的差异,对表4的跟踪时间、跟踪效率和电压波动进行归一化处理。同一算法的不同参数以及不同控制方式的跟踪效果对比如图11所示。

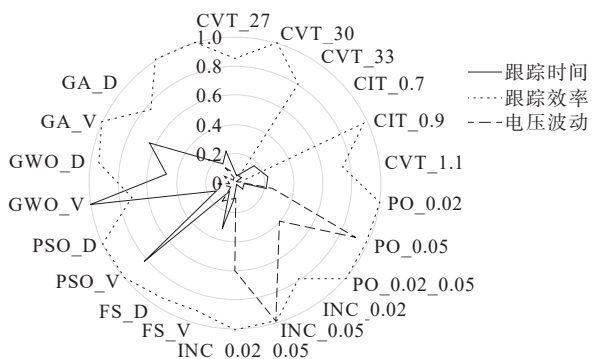


图11 MPPT算法性能对比

Figure 11 Performance comparison of MPPT algorithms

在实际工程中应具体情况具体分析,综合考虑光伏发电系统的发电容量、追踪效率等多方面因素,选择合适的单一MPPT算法或复合MPPT算法。恒定电压法和恒定电流法适用于预算较低且对跟踪精度要求不高的小功率系统,例如LED照明系统。针对控制精度要求较高的中、大功率发电系统,可以选择控制策略相对简单的变步长扰动观察法或变步长电导增量法。对于控制精度要求更高的大型独立运行系统或并网系统,可以选择具有全局搜索能力的粒子群优化、斐波那契搜索等智能算法。对于存在诸多不确定因素的超大型光伏电站,可以选择灰狼算法结合扰动观察法、粒子群算法结合电导增量法等复合MPPT算法作为替代方案。

5 结语

光伏发电系统中的MPPT控制是高效利用太阳能、实现最优输出的一项关键技术,本文对光伏电池的输出特性以及最大功率点跟踪原理进行了详细的阐述,通过实验比较分析了传统算法、智能算法和复合算法的跟踪性能。实验结果表明,不同算法以及不同的控制方式之间存在较大的差异,同一算法不同参数的选取也将对跟踪效果产生较大的影响。最后总结了各类算法的适用场合,对于实际工程具有一定的指导意义。

在实际应用中,针对MPPT算法的收敛振荡、局部失效等不足,提出以下改进措施:

1) 针对恒定电压法、恒定电流法忽视温度变化对输出特性影响的问题,考虑在MPPT控制器中预

设随温度变化的电压、电流参考值,通过查询数据表,灵活调节比例系数,以适应不同环境。

2) 针对扰动观察法、电导增量法的跟踪速度与跟踪精度间的矛盾,考虑采用多步长、变步长或自适应步长追踪策略;为降低稳态时输出波动,将电压、电流或电导变化量改为与预设阈值比较。

3) 智能算法如粒子群优化、灰狼算法,宜采用直接占空比控制以提升跟踪速度;考虑引入非线性动态权重系数,增强全局搜索和局部优化能力。

理想的MPPT算法应当具备较快的收敛速度和较高的跟踪效率,多种算法的进一步融合将是今后研究的重点。

参考文献:

- [1] 刘迪,吴林林,巩宇,等.基于滚动采样马尔可夫链模型的光伏时序功率模拟研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):207-216.
LIU Di,WU Linlin,GONG Yu,et al.Study on time series power simulation of photovoltaic output based on rolling sampling Markov chain model[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(3):207-216.
- [2] 张新民,郭铭海,林亚培,等.考虑灵活性的含分布式光伏配电网双层优化调度方法[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):56-66.
ZHANG Xinmin,GUO Minghai,LIN Yapei,et al.A bi-layer optimal dispatch approach for distribution networks with distributed photovoltaic considering the flexibility[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(3):56-66.
- [3] 艾松波,唐欣,王红亚.光伏电站附加阻尼控制器及控制参数优化设计[J].电力科学与技术学报,2020,35(6):21-27.
AI Songbo,TANG Xin,WANG Hongya.Optimal design of additional damping controller and control parameters for photovoltaic power station[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(6):21-27.
- [4] 肖安南,张蔚翔,张超,等.含光伏发电与储能的配电网基于源-网-荷互动模式下电压安全最优控制策略[J].电力科学与技术学报,2020,35(2):120-127.
XIAO Annan,ZHANG Weixiang,ZHANG Chao,et al.Voltage security optimal control strategy of distribution network with PVs and ESs under "Source-Grid-Load" interaction[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(2):120-127.
- [5] 王平,倪磊,王林泓,等.透明隔热膜对改善光伏组件温度和发电效率的研究[J].太阳能学报,2021,42(2):396-402.
WANG Ping,NI Lei,WANG Linhong,et al.Study on transparent insulating film improving temperature and generating efficiency of photovoltaic modules[J].Acta Energetica Solaris Sinica,2021,42(2):396-402.
- [6] 王永光,戈庆长.分布式光伏发电系统多峰值MPPT优

- 化研究[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(2):3-11.
- WANG Yongguang, GE Qingchang. Research on multi-peak MPPT optimization of photovoltaic power generation system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(2):3-11.
- [7] 李民,杨暑森,李科锋,等. 覆雪状态下光伏发电功率预测方法研究[J]. 高压电器,2023,59(9):250-257.
- LI Min, YANG Shusen, LI Kefeng, et al. Research on power prediction method of photovoltaic power generation under snow coating conditions[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(9):250-257.
- [8] 罗茜,陈卓,郝正航,等. 基于新型趋近律的光伏MPPT控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(5):139-153.
- LUO Qian, CHEN Zhuo, HAO Zhenghang, et al. MPPT control strategy based on a new reaching law for a photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control,2023,51(5):139-153.
- [9] 李星硕,文辉清,罗恒阳. 基于电导增量MPPT算法在光伏系统的比较研究[J]. 电力电子技术,2016,50(12):91-94+98.
- LI Xingshuo, WEN Huiqing, LUO Hengyang. A comparative study of the main incremental conductance-based MPPT techniques for photovoltaic applications[J]. Power Electronics,2016,50(12):91-94+98.
- [10] KATCHE M L, MAKOKHA A B, ZACHARY S O, et al. A comprehensive review of maximum power point tracking (MPPT) techniques used in solar PV systems[J]. Energies,2023,16(5):2206.
- [11] BOLLIPO R B, MIKKILI S, BONTHAGORLA P K. Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2021,7(1):9-33.
- [12] KUMAR M, PANDA K P, ROSAS-CARO J C, et al. Comprehensive review of conventional and emerging maximum power point tracking algorithms for uniformly and partially shaded solar photovoltaic systems[J]. IEEE Access,2023,11:31778-31812.
- [13] REZK H, AL-ORAN M, GOMAA M R, et al. A novel statistical performance evaluation of most modern optimization-based global MPPT techniques for partially shaded PV system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2019,115:109372.
- [14] MELLIT A, KALOGIROU S A. MPPT-based artificial intelligence techniques for photovoltaic systems and its implementation into field programmable gate array chips: review of current status and future perspectives[J]. Energy,2014,70:1-21.
- [15] 吴艳娟,刘振朝,王云亮. 基于IPOA的太阳能电池模型参数辨识[J]. 太阳能学报,2024,45(1):1-10.
- WU Yanjuan, LIU Zhenchao, WANG Yunliang. Parameter identification of solar cell model based on ipoa[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2024,45(1):1-10.
- [16] 赵泰祥,廖华,马逊,等. 局部阴影下光伏组件的Matlab/Simulink仿真模拟与特性分析[J]. 太阳能学报,2019,40(11):3110-3118.
- ZHAO Taixiang, LIAO Hua, MA Xun, et al. Matlab/Simulink simulation model and characteristic analysis of pv module under partial shadow[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2019,40(11):3110-3118.
- [17] 朱显辉,简有为,师楠,等. 本征薄层异质结光伏电池特性拟合曲线与填充因子的线性关系[J]. 电机与控制学报,2021,25(12):96-103.
- ZHU Xianhui, JIAN Youwei, SHI Nan, et al. Linear relationship between the characteristic fitting curves and filling factors of HIT PV cells[J]. Electric Machines and Control,2021,25(12):96-103.
- [18] 张东宁. 基于改进电导增量法的光伏最大功率点跟踪策略研究[J]. 太阳能学报,2022,43(8):82-90.
- ZHANG Dongning. Research on photovoltaic maximum power point tracking strategy based on improved conductance increment method[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2022,43(8):82-90.
- [19] 杨贵恒,张海呈,张颖超,等. 太阳能光伏发电系统及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2015:2-10.
- YANG Guiheng, ZHANG Haicheng, ZHANG Yingchao, et al. Solar photovoltaic power generation system and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2015:2-10.
- [20] 邵瑞凝,杨博,束洪春,等. 基于改进蜂群算法的光伏阵列最优重构方法[J]. 电力系统自动化,2022,46(11):142-150.
- SHAO Ruining, YANG Bo, SHU Hongchun, et al. Optimal reconfiguration method for photovoltaic arrays based on improved mayfly algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(11):142-150.
- [21] 李昂,刘文锋,李音柯,等. 基于IP&O-ICS算法的光伏系统MPPT控制研究[J]. 太阳能学报,2023,44(5):203-209.
- LI Ang, LIU Wenfeng, LI Yinke, et al. Research on mppt control of photovoltaic system based on ip & o-ics algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(5): 203-209.
- [22] 张忠政. 太阳能电池应用理论研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2014.
- ZHANG Zhongzheng. Research on application theory of solar cells[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2014.
- [23] BOLLIPO R B, MIKKILI S, BONTHAGORLA P K. Critical review on PV MPPT techniques: classical, intelligent and optimisation[J]. IET Renewable Power Generation,2020,14(9):1433-1452.
- [24] YANG Q H. MPPT control strategy based on CVT and pendant combined with MPC[J]. International Core Journal of Engineering,2024,10(3):74-81.
- [25] SHER H A, MURTAZA A F, NOMAN A, et al. A new sensorless hybrid MPPT algorithm based on fractional short-circuit current measurement and P&O MPPT[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1426-1434.
- [26] 高金辉,李国成. 一种开路电压和短路电流相结合的

- MPPT算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 96-100.
- GAO Jinhui, LI Guocheng. Research on MPPT algorithm in combination with open circuit voltage and short circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 96-100.
- [27] 郭昆丽, 闫东, 付建哲. 基于改进扰动观察法的光伏系统 MPPT 研究[J]. 电源技术, 2021, 45(1): 56-59.
- GUO Kunli, YAN Dong, FU Jianzhe. MPPT research of photovoltaic system based on improved perturbation and observation method[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(1): 56-59.
- [28] 荣德生, 刘凤. 改进型扰动观察法在光伏 MPPT 中的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(3): 104-109.
- RONG Desheng, LIU Feng. Application of improved perturbation and observation method to photovoltaic MPPT[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(3): 104-109.
- [29] 艾永乐, 刘群峰, 韩朝阳, 等. 基于改进扰动观察法的光伏 MPPT 策略[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(4): 339-344.
- AI Yongle, LIU Qunfeng, HAN Zhaoyang, et al. Photovoltaic MPPT strategy based on improved perturbation and observation method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(4): 339-344.
- [30] 陈景文, 张文倩, 李晓飞. 基于改进电导增量法的光伏 MPPT 控制[J]. 智慧电力, 2021, 49(9): 47-55.
- CHEN Jingwen, ZHANG Wenqian, LI Xiaofei. Photovoltaic MPPT control based on improved conductance increment method[J]. Smart Power, 2021, 49(9): 47-55.
- [31] 魏立明, 吴扬昀. 基于改进电导增量法的光伏 MPPT 策略研究[J]. 电源技术, 2021, 45(6): 791-796.
- WEI Liming, WU Yangyun. Research on maximum power point tracking of photo-voltaic power system based on improved conductance increment method[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(6): 791-796.
- [32] 王仁明, 张癸滨, 王凌云. 基于改进型电导增量法的光伏系统最大功率点跟踪策略[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(2): 78-83.
- WANG Renming, ZHANG Guibin, WANG Lingyun. A maximum power point tracking strategy of photovoltaic system based on improved incremental conductance method[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2019, 41(2): 78-83.
- [33] 党选举, 杨阳, 姜辉, 等. 基于不完全微分的自适应步长扰动观察法 MPPT 控制[J]. 太阳能学报, 2016, 37(12): 3022-3029.
- DANG Xuanju, YANG Yang, JIANG Hui, et al. Mppt control of adaptive step size perturb & observe method based on incomplete differential[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2016, 37(12): 3022-3029.
- [34] 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.
- WEI Dong, WANG Yangkang, CHANG Yawen. A variable step-size mppt algorithm based on incremental conductance method[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2018, 39(5): 1277-1283.
- [35] MANOHARAN P, SUBRAMANIAM U, BABU T S, et al. Improved perturb and observation maximum power point tracking technique for solar photovoltaic power generation systems[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(2): 3024-3035.
- [36] FERROZ MIRZA A, MANSOOR M, LING Q, et al. Advanced variable step size incremental conductance MPPT for a standalone PV system utilizing a GA-tuned PID controller[J]. Energies, 2020, 13(16): 4153.
- [37] 李晶晶. 光伏系统最大功率点跟踪算法的研究与实现[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2014.
- LI Jingjing. Research and implementation of maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2014.
- [38] 韩思鹏, 蒋晓艳, 罗意, 等. 遮阴条件下光伏 MPPT 自适应粒子群算法优化[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 99-105.
- HAN Sipeng, JIANG Xiaoyan, LUO Yi, et al. Photovoltaic mppt adaptive particle swarm optimization optimization under shading conditions[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2022, 43(6): 99-105.
- [39] 陈维荣, 王伟颖, 郑义斌, 等. 局部阴影光伏发电系统中基于改进 PSO 的 MPPT 控制[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(6): 1095-1101+1129.
- CHEN Weirong, WANG Weiyang, ZHENG Yibin, et al. MPPT control of partial shadow photovoltaic generation system based on improved PSO algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(6): 1095-1101+1129.
- [40] BAATIAH A O, ELTAMALY A M, ALOTAIBI M A. Improving photovoltaic MPPT performance through PSO dynamic swarm size reduction[J]. Energies, 2023, 16(18): 6433.
- [41] SANGRODY R, TAHERI S, CRETU A M, et al. An improved PSO-based MPPT technique using stability and steady state analyses under partial shading conditions [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(1): 136-145.
- [42] 张增辉, 邓宇豪, 李春卫, 等. 基于改进灰狼优化算法的光伏 MPPT 方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7): 100-105.
- ZHANG Zenghui, DENG Yuhao, LI Chunwei, et al. Photovoltaic MPPT method based on improved grey wolf optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7): 100-105.
- [43] BABYPRIYA B, RENOALD A J, SHYAMALAGOWRI M, et al. An experimental simulation testing of single-diode PV integrated mppt grid-tied optimized control using grey wolf algorithm[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2022, 43(5): 5877-5896.
- [44] 张巧杰, 王凯丽, 房雪晴. 基于 GWO 算法光伏阵列多峰值的 MPPT[J]. 吉林大学学报(理学版), 2018, 56(6):

- 1526-1532.
- ZHANG Qiaojie, WANG Kaili, FANG Xueqing. Multi-peak MPPT of photovoltaic array based on GWO algorithm[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2018, 56(6): 1526-1532.
- [45] 石季英,张登雨,薛飞,等.基于改进灰狼优化—黄金分割混合算法的光伏阵列MPPT方法[J].电力系统及其自动化学报, 2019, 31(5): 21-26.
- SHI Jiying, ZHANG Dengyu, XUE Fei, et al. Maximum power point tracking method for photovoltaic array based on modified hybrid method of grey wolf optimization and golden-section optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(5): 21-26.
- [46] 吴子牛,孟润泉,韩肖清.基于改进多种群遗传算法的光伏阵列多峰值MPPT研究[J].电网与清洁能源, 2022, 38(8): 102-109+120.
- WU Ziniu, MENG Runquan, HAN Xiaoqing. Research on multi-peak MPPT of photovoltaic array based on improved multi-population genetic algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(8): 102-109+120.
- [47] 钟黎萍,张水平,顾启民.基于基因排序遗传算法的串联光伏组件MPPT研究[J].可再生能源, 2017, 35(3): 384-388.
- ZHONG Liping, ZHANG Shuiping, GU Qimin. Study on the MPPT of series photovoltaic modules based on gene sequencing GA[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(3): 384-388.
- [48] MOHAMED A A S, BERZOY A, MOHAMMED O A. Design and hardware implementation of FL-MPPT control of PV systems based on GA and small-signal analysis[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 279-290.
- [49] 王晨阳,段倩倩,周凯,等.基于遗传算法优化卷积长短记忆混合神经网络模型的光伏发电功率预测[J].物理学报, 2020, 69(10): 149-155.
- WANG Chenyang, DUAN Qianqian, ZHOU Kai, et al. A hybrid model for photovoltaic power prediction of both convolutional and long short-term memory neural networks optimized by genetic algorithm[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(10): 149-155.
- [50] JALIL M F, KHATOON S, NASIRUDDIN I, et al. Review of PV array modelling, configuration and MPPT techniques[J]. International Journal of Modelling and Simulation, 2022, 42(4): 533-550.
- [51] PATI A K, SAHOO N C. A new approach in maximum power point tracking for a photovoltaic array with power management system using Fibonacci search algorithm under partial shading conditions[J]. Energy Systems, 2016, 7(1): 145-172.
- [52] 张俊红,魏学业,胡良,等.光伏发电电池最大功率点跟踪控制仿真[J].计算机仿真, 2018, 35(12): 92-95+165.
- ZHANG Junhong, WEI Xueye, HU Liang, et al. Simulation of maximum power point tracking control for photovoltaic cell[J]. Computer Simulation, 2018, 35(12): 92-95+165.
- [53] 张铁晟,张凤武,张明毅.基于LGWO和扰动观察复合算法的MPPT研究[J].吉林大学学报(信息科学版), 2022, 40(3): 379-386.
- ZHANG Tiesheng, ZHANG Fengwu, ZHANG Mingyi. MPPT research based on LGWO and perturbation observation compound algorithm[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2022, 40(3): 379-386.
- [54] 沈磊,徐岸非,黄晴宇,等.基于GWO-P&O算法的局部阴影光伏MPPT研究[J].湖北工业大学学报, 2022, 37(2): 25-29+43.
- SHEN Lei, XU Anfei, HUANG Qingyu, et al. Research on MPPT of photovoltaic under partial shading condition based on GWO-P & O algorithm[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2022, 37(2): 25-29+43.
- [55] 梅润杰,张经纬.基于Z源逆变器的粒子群和模糊变步长电导增量MPPT算法[J].太阳能学报, 2020, 41(1): 137-145.
- MEI Runjie, ZHANG Jingwei. Mppt algorithm of particle swarm optimization and fuzzy variable step incremental conductance method based on z-source inverter[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2020, 41(1): 137-145.
- [56] SINGH CHAWDA G, PRAKASH MAHELA O, GUPTA N, et al. Incremental conductance based particle swarm optimization algorithm for global maximum power tracking of solar-PV under nonuniform operating conditions[J]. Applied Sciences, 2020, 10(13): 4575.
- [57] 徐建国,王海新,沈建新.基于电导增量法与改进粒子群算法混合控制的最大功率点跟踪策略[J].可再生能源, 2019, 37(6): 824-831.
- XU Jianguo, WANG Haixin, SHEN Jianxin. The hybrid control Maximum Power Point Tracking(MPPT) strategy based on incremental conductance method and improved particle swarm optimization algorithm[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(6): 824-831.
- [58] 毛明轩,许钊,崔立闯,等.基于改进灰狼优化算法的光伏阵列多峰MPPT研究[J].太阳能学报, 2023, 44(3): 450-456.
- MAO Mingxuan, XU Zhao, CUI Lichuang, et al. Research on multi-peak mppt of photovoltaic array based on modified gray wolf optimization algorithm[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2023, 44(3): 450-456.
- [59] 刘宜罡,邹应全,张晓强,等.基于差分进化的光伏MPPT算法改进[J].太阳能学报, 2020, 41(6): 264-271.
- LIU Yigang, ZOU Yingquan, ZHANG Xiaoqiang, et al. An improved photovoltaic mppt algorithm based on differential evolution algorithm[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2020, 41(6): 264-271.
- [60] SWAMINATHAN N, LAKSHMINARASAMMA N, CAO Y. A fixed zone perturb and observe MPPT technique for a standalone distributed PV system[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 361-374.