

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201906023



# 阴影光照条件下光伏阵列的 最大功率点跟踪方法

潘 健, 梁佳成, 黎家成, 李坤

(湖北工业大学 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** 提出一种基于线性函数的自适应步长滞环比较法的最大功率点跟踪(MPPT)方法. 首先, 在阴影光照条件下, 构建光伏电池的双二极管等效电路, 在 Matlab/Simulink 仿真平台上对光伏阵列输出特性曲线进行仿真; 然后, 分析文中方法的工作过程, 通过仿真和实验对比文中方法与扰动观测法的控制效果. 结果表明: 文中方法可以准确地跟踪到阴影光照条件下光伏阵列的最大功率点, 提升 MPPT 的跟踪效果.

**关键词:** 最大功率点跟踪; 阴影光照; 线性函数; 自适应步长滞环比较法; 多峰值寻优

**中图分类号:** TM 615 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)04-0541-08

## Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic Arrays Under Partial Shading Conditions

PAN Jian, LIANG Jiacheng, LI Jiacheng, LI Kun

(Hubei Key Laboratory for High-Efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of  
Energy Storage System, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** A maximum power point tracking (MPPT) method based on linear function and self-adaptive step size hysteresis comparison method is proposed. Firstly, the double diode equivalent circuit of photovoltaic cell is established under partial shading conditions, and output characteristic curve of photovoltaic array is simulated on Matlab/Simulink simulation platform. Then, the working process of the proposed method is analyzed, and the control method in the paper is compared with the disturbance observation method by simulation and experiment. The results show that the proposed method can accurately track the maximum power point of photovoltaic array under partial shading conditions and improve the tracking effect of MPPT.

**Keywords:** maximum power point tracking; partial shading; linear function; self-adaptive step size hysteresis comparison method; multi-peak optimization

光伏发电技术的难点在于如何保证光电转换效率与光伏系统的稳定运行<sup>[1]</sup>, 常用的解决方法是对光伏阵列进行最大功率点跟踪(MPPT)<sup>[2]</sup>, 跟踪精度和跟踪速度是该技术跟踪效果的主要评判指标. 为了提高 MPPT 的跟踪效果, 学者们已提出诸多 MPPT 控制方法, 如恒定电压/电流法、增量电导法及其改进方法等. 若步长选取得当, 这些 MPPT 方法可以有效地对光伏阵列的最大功率点进行跟踪, 但都仅适用于均匀光照条件下的光伏阵列<sup>[3-4]</sup>. 然而, 由于实际运行过程中天气环境多变, 特别是在阴影光照条件下, 光伏阵列的输出特性曲线呈现多峰状, MPPT 会陷入局部最大功率点, 影响跟踪效果<sup>[5]</sup>. 因此, 在阴影光照条件下对光伏阵列进行最大功率点跟踪具有重要意义.

**收稿日期:** 2019-06-21

**通信作者:** 潘健(1962-), 男, 教授, 主要从事控制理论与控制工程的研究. E-mail: 86146969@qq.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51677058); 国家重点研发计划重大专项(2018AAA056)

目前,已有许多学者对阴影光照条件下光伏阵列的 MPPT 方法进行相关研究. Hassan 等<sup>[6]</sup>提出一种基于高性能模糊小波神经网络的自适应 MPPT 控制,但该方法的每个权重都需要对大量数据进行训练才能得到合适的值. 粒子群优化(PSO)算法是一种针对全局最优值搜索问题的解决方法,但粒子群优化算法在寻找最优值的过程中可能陷入局部极值. 因此,学者们在粒子群优化算法的基础上进行了诸多改进,从而更快、更精确地寻找到全局最优值<sup>[7-9]</sup>. Wu 等<sup>[10]</sup>提出一种结合开路电压法的 PSO 算法用于跟踪全局最大功率点,但开路电压法是一种近似算法,它通过经验公式计算出最大功率点,但跟踪精度在电压范围较大的情况下会有所下降. Kumar 等<sup>[11]</sup>提出一种变速跟踪的 PSO 算法,但该算法的程序复杂繁琐,在工业应用中难以实现. Sen 等<sup>[12]</sup>提出一种基于改进粒子速度的 PSO 算法,该算法可以消除 PSO 算法中的固有随机性并调整权重因子,但其引入的自适应参数降低了跟踪速度. Ghasemi 等<sup>[13]</sup>提出一种使用  $I-U$  曲线的快速跟踪方法以简化控制器,但该方法会影响控制系统的跟踪精度. 基于此,本文提出一种阴影光照条件下光伏阵列的最大功率点跟踪方法.

## 1 阴影光照条件下光伏阵列的输出特性

### 1.1 光伏电池的双二极管模型

在阴影光照条件下,光伏电池单元受旁路二极管的影响而改变原有的输出特性. 因此,分析该条件下的光伏电池单元时,需采用带双二极管的光伏电池模型<sup>[14]</sup>. 当光伏阵列受到阴影光照,且被遮光的程度达到一定界限时,会出现光伏电池的外电流大于光生电流的情况,可能造成光伏电池反向电压极化,出现电池击穿的现象. 因此,需要在双二极管模型中加入一个压控电流源,以反映雪崩效应的影响.

光伏电池的双二极管等效电路,如图 1 所示. 图 1 中: $I_{ph}$  为光生电流; $I_{VD_1}$ ,  $U_{VD_1}$  分别为二极管  $VD_1$  的电流和电压; $I_{VD_2}$ ,  $U_{VD_2}$  分别为二极管  $VD_2$  的电流和电压; $R_s$ ,  $R_{sh}$  分别为等效串联电阻和并联电阻; $I_{br}$  为反向雪崩击穿电流,它受  $R_{sh}$  的端电压  $U_D$  的控制; $I_{sh}$  为等效并联电阻电流; $U$  为电池输出电压; $I$  为电池输出电流.

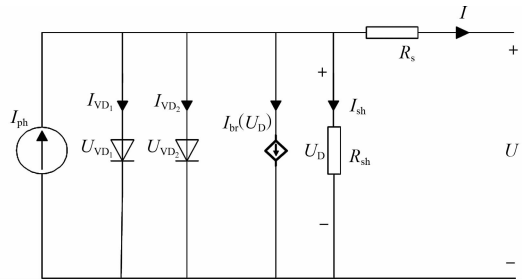


图 1 光伏电池的双二极管等效电路  
Fig. 1 Double diode equivalent circuit of photovoltaic cell

由光伏电池的双二极管等效电路可得光伏电池的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} I &= I_{ph} - I_{VD_1} - I_{VD_2} - I_{br} - I_{sh}, \\ I_{VD_1} &= I_{01} \left( \exp\left(\frac{q(U + IR_s)}{A_1 K \theta}\right) - 1 \right), \\ I_{VD_2} &= I_{02} \left( \exp\left(\frac{q(U + IR_s)}{A_2 K \theta}\right) - 1 \right), \\ I_{br} &= \alpha(U + IR_s) \left( 1 - \frac{U + IR_s}{U_{br}} \right)^{-\beta}, \\ I_{sh} &= \frac{U + IR_s}{R_{sh}}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: $I_{01}$ ,  $A_1$  分别为二极管  $VD_1$  的反向饱和电流和品质因子; $I_{02}$ ,  $A_2$  分别为二极管  $VD_2$  的反向饱和电流和品质因子; $\theta$  为温度; $q$  为单位电子电荷; $K$  为玻尔兹曼常数; $U_{br}$  为反向雪崩击穿电压; $\alpha$ ,  $\beta$  为雪崩击穿特征常数.

### 1.2 光伏阵列仿真

光伏阵列是由多块光伏模块通过串并联形式组成的,而光伏模块又是由多个光伏电池单元通过串联形式组成的. 其中,光伏模块的并联数为  $N_P$ ,串联数为  $N_m$ . 因此,根据式(1)可推导出光伏阵列的数学模型并进行仿真.

以 3 块 SunPower SPR-X20-250-BLK 型的光伏阵列( $PV_1 \sim PV_3$ )串联为例,在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建光伏阵列的仿真模型. SunPower SPR-X20-250-BLK 型光伏阵列的参数:开路电压  $U_{oc}$  为

152.7 V;短路电流  $I_{sc}$  为 6.2 A;最大功率  $P_{mpp}$  为 749.85 W;最大功率处电压  $U_{mpp}$  为 128.4 V;最大功率处电流  $I_{mpp}$  为 5.84 A. 光伏阵列的串联示意图,如图 2 所示.

为避免阴影光照条件下光伏电池单元的温度不同,在仿真中,设定阴影区域面积正好能完全覆盖整数块的光伏电池.将 3 块光伏阵列的光照强度设置为不同模式(模式 1~模式 3),以模拟不同的阴影光照条件,温度保持在 25 ℃.

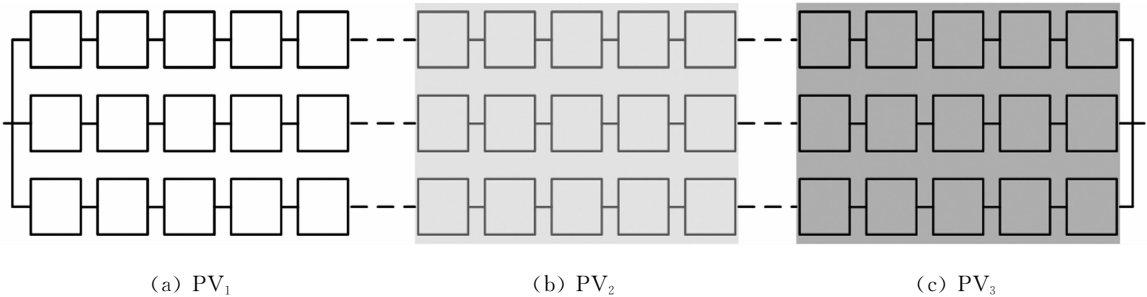


图 2 光伏阵列的串联示意图

Fig. 2 Series schematic diagram of photovoltaic arrays

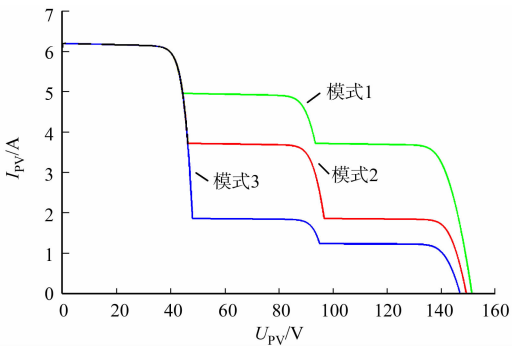
光伏阵列的光照强度设置,如表 1 所示.表 1 中: $E_{PV}$  为光伏阵列的光照强度.阴影光照条件下的光伏阵列输出特性曲线,如图 3 所示.由图 3 可知:在 3 种模式下,光伏阵列的输出特性曲线均呈三峰状.图 3 中: $I_{PV}$ ,  $U_{PV}$ ,  $P_{PV}$  分别为光伏阵列的输出电流、电压和功率.

相关研究表明,当光伏阵列受到  $n$  处不同强度的光照时,其特性曲线会呈现  $n$  个峰值<sup>[15]</sup>,但当光照强度较小时,其峰值对输出结果影响不大,故光伏阵列的输出特性曲线大多为三峰值或四峰值.

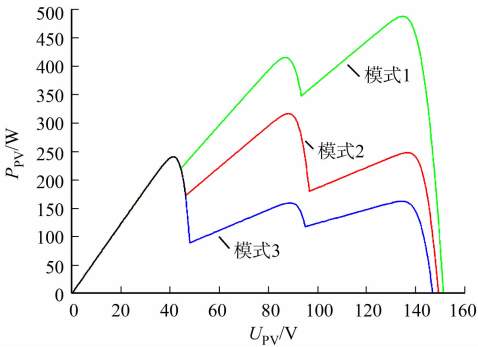
表 1 光伏阵列的光照强度设置

Tab. 1 Light intensity setting of photovoltaic array

光伏阵列	$E_{PV}$ $W \cdot m^{-2}$		
	模式 1	模式 2	模式 3
PV <sub>1</sub>	1 000	1 000	1 000
PV <sub>2</sub>	800	600	300
PV <sub>3</sub>	600	300	200



(a) 电流-电压特性曲线



(b) 功率-电压特性曲线

图 3 阴影光照条件下的光伏阵列输出特性曲线

Fig. 3 Output characteristic curve of photovoltaic array under partial shading conditions

由图 3 还可知:以电压变化点为分界,可将电压分为 3 个区域,从左至右依次为低、中、高电压区;阴影光照条件不同,光伏阵列最大功率点的位置也随之变化;最大功率点在高、中、低电压区内均可出现,其功率分别为 487,316,249 W.

在阴影光照条件下,光伏阵列的最大功率并未达到理想最大功率,这是因为阴影光照引起旁路二极管和串并联电阻的损耗,且当光伏阵列间的光照强度差较大时,功率下降非常严重.因此,在阴影光照条件下,光伏阵列最大功率点的位置很难确定.

2 基于线性函数的自适应步长滞环比较法

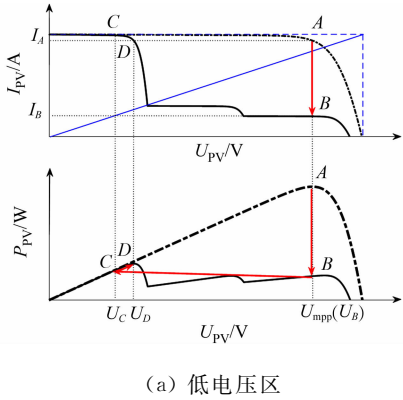
由阴影光照条件下的光伏阵列输出特性可知,光伏阵列 MPPT 控制的核心在于如何跳出局部最大功率点(MPP)并快速寻求全局的 MPP.因此,提出一种基于线性函数的自适应步长滞环比较法的最大

功率点跟踪方法(简称文中方法),以避免智能算法的大量计算与复杂设计.

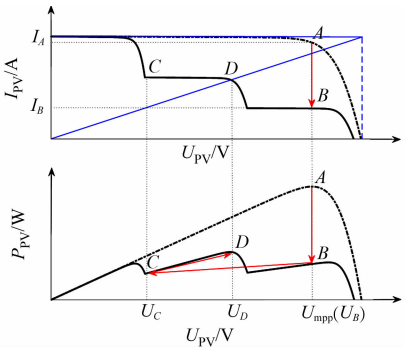
2.1 线性函数分析

阴影光照条件下线性函数处理示意图,如图 4 所示.图 4 中: $U_B \sim U_D$  分别为工作点  $B \sim D$  的电压; $I_A, I_B$  分别为工作点  $A, B$  的电流;因光照强度变化的瞬间电压不变,故均匀光照下的最大功率  $U_{mpp}$  与  $U_B$  相同.线性函数处理采用两步法的思想,首先,当光伏系统稳定运行时,若光伏阵列受到阴影光照,输出电流下降,工作点由均匀光照下的最大功率点  $A$  降落到阴影光照下输出特性曲线的点  $B$ ;然后,经线性函数处理重新定位到点  $C$ ,并以点  $C$  作为新的工作点,利用自适应步长滞环比较法重新对光伏阵列最大功率点进行跟踪,从而找到全局最大功率点  $D$ .

由图 4(a)可知:当光伏阵列的全局最大功率点  $D$  位于低电压区时,通过线性函数将工作点移动至最大功率点的附近点  $C$ ,并通过自适应步长滞环比较法快速跟踪到全局



(b) 中电压区



(c) 高电压区

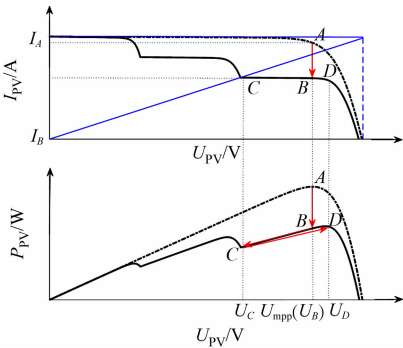


图 4 阴影光照条件下线性函数处理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of linear function proccoss under partial shading conditions

最大功率点  $D$ , 这种情况下线性函数处理非常高效.

由图 4(b)可知:当光伏阵列的全局最大功率点  $D$  位于中电压区时,通过线性函数将工作点移动至点  $C$ ,在这种情况下,虽然和全局最大功率点  $D$  有一定距离,但通过自适应步长滞环比较法也能快速跟踪到全局最大功率点  $D$ ,并减少功率损耗.

由图 4(c)可知:当光伏阵列的全局最大功率点  $D$  位于高电压区时,通过线性函数将光伏阵列的工作点移至点  $C$ ,并通过点  $B$  回到全局最大功率点  $D$ ,增加了寻找最大功率点的路径,这是最糟的情况.

因此,最大功率点越靠近低电压区,线性函数处理越高效,即光伏阵列间的光照强度差越大,线性函数处理越有效.

线性函数的理论依据是最大功率点处的电压、电流与开路电压、短路电流近似成线性比例关系,在全局最大功率点处也满足此规律.因此,应用线性函数时,首先应判断光伏阵列是否在运行过程中出现阴影光照,从而判断 MPPT 控制是否需要通过线性函数将光伏阵列的工作点移至点  $C$ . 设当前时刻为  $n$ ,则线性函数的判别式<sup>[16]</sup>为

$$\Delta U_{PV} = |U_{PV(n)} - U_{PV(n-1)}| \leq \Delta U_{set}, \tag{2}$$

$$\frac{\Delta I_{PV}}{I_{PV(n-1)}} = \left| \frac{I_{PV(n)} - I_{PV(n-1)}}{I_{PV(n-1)}} \right| \leq \Delta I_{set} \approx \frac{I_{PV(n-1)}}{N_p}. \tag{3}$$

式(3)中: $U_{PV(n)}, I_{PV(n)}$  分别为当前时刻的光伏阵列工作点的电压和电流; $U_{PV(n-1)}, I_{PV(n-1)}$  分别为上一时刻工作点的电压和电流; $\Delta U_{PV}, \Delta I_{PV}$  分别为当前时刻与上一时刻电压与电流的变化量; $\Delta U_{set}, \Delta I_{set}$  分别为设定的电压和电流的变化范围.

当工作点的电压、电流满足式(2),(3)时,代表光伏阵列运行过程中出现了阴影光照,工作点需要通过线性函数进行处理.经线性函数处理的下一时刻工作点的电压  $U_{PV(n+1)}$  为

$$U_{PV(n+1)} = \frac{U_{oc}}{I_{sc}} I_{PV(n)}.$$

(4)

2.2 自适应步长滞环比较法

根据节 2.1 分析可知,当光伏阵列受到阴影光照时,经线性函数处理后,还需使用合适的方法在对应的电压范围内进行局部极值搜索.自适应步长滞环比较法是在滞环比较法<sup>[17]</sup>的基础上,增加自适应步长控制,使 MPPT 的跟踪精度更加准确,并保证控制方法的跟踪速度,避免因光照强度的快速变化而出现误判现象<sup>[17-19]</sup>.

由滞环比较法的原理可得滞环比较法的 9 种情况,如图 5 所示.图 5 中: $E$  为当前工作点; $F,G$  为位于  $E$  点两侧一个扰动步长距离的两个点. $P_E \sim P_G$  分别为工作点  $E \sim G$  的功率,假设  $P_E > P_G$  及  $P_F \geq P_E$  记为“+”,其他情况均记为“-”.根据上述设定,可以得到滞环比较法的判别过程,如表 2 所示.

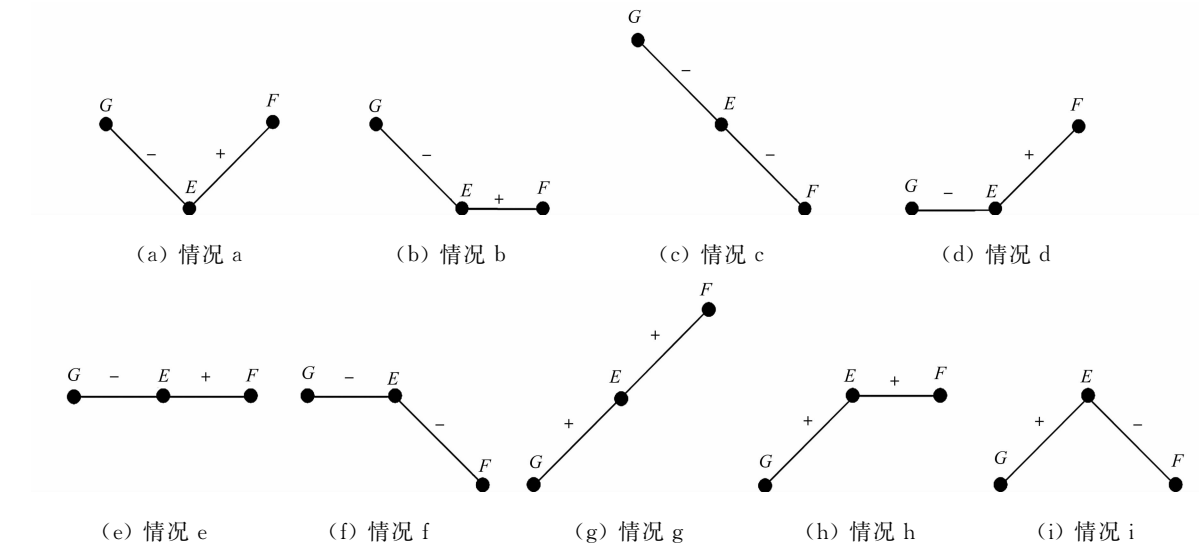


图 5 滞环比较法的 9 种情况

Fig. 5 Nine cases of hysteresis comparison method

表 2 滞环比较法的判别过程

Tab. 2 Discrimination process of hysteresis comparison method

序号	判定式	结果	情况类别	扰动规则
1	$P_E > P_G, P_F \geq P_E$	+, +	g, h	按照原方向继续扰动
2	$P_E > P_G, P_F < P_E$	+, -	a, b, d, e, i	保持电压恒定运行
3	$P_E \leq P_G, P_F < P_E$	-, -	c, f	按照反方向扰动

在此基础上,结合自适应步长控制,提升整体控制的跟踪速度.假设  $k$  时刻的电压为  $U_k$ ,功率为  $P_k$ ,为防止滞环控制陷入死循环,在传统的自适应步长法中加入一个  $m$  倍的比例因子( $m$  取 0.1),由试凑法确定其大小.

第  $k+1$  时刻的电压  $U_{k+1}$  为

$$\left. \begin{aligned} U_{k+1} &= U_k \pm \Delta x, \\ \Delta x &= N \times \left( \left| \frac{P_k - P_{k-1}}{U_k - U_{k-1}} \right| + mN \right), \\ U_{k+1} &= U_k \pm N \left( \left| \frac{P_k - P_{k-1}}{U_k - U_{k-1}} \right| + mN \right). \end{aligned} \right\}$$

(5)

式(5)中: $\Delta x$  为扰动步长; $N$  为比例因子,其取值范围为 1.1~1.3; $U_{k-1}, P_{k-1}$  分别为上一时刻的电压与功率.

由式(5)可知:随着工作点向最大功率点靠近, $\Delta x$  的值会越来越小,则系统的跟踪速度会逐渐变慢,但跟踪精度会逐渐增高.通过自适应步长控制,可有效避免因步长选取不当而出现工作点在最大功率点附近来回震荡的情况,增强了系统的稳定性,并有效地保证了跟踪速度.

由以上分析可得自适应步长滞环比较法的控制流程图,如图 6 所示.图 6 中: $U_{next}$  为下一时刻的扰动电压; $I_E \sim I_G$  分别为工作点  $E \sim G$  的电流; $U_E \sim U_G$  分别为工作点  $E \sim G$  的电压.

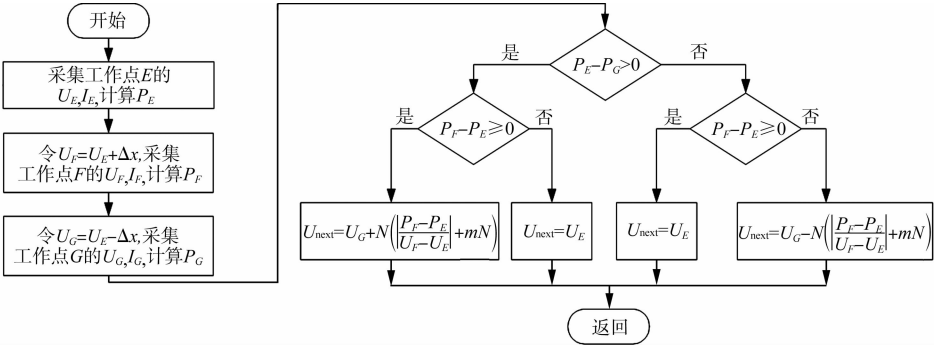


图 6 自适应步长滞环比较法的控制流程图

Fig. 6 Control flowchart of self-adaptive step size hysteresis comparison method

3 仿真及实验分析

3.1 仿真分析

在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建模型,光伏阵列的参数见节 1. 2. Boost 电路的参数:光伏侧滤波电容  $C_1$  为  $500\ \mu\text{H}$ ;升压电感  $L$  为  $60\ \mu\text{F}$ ;输出侧电容  $C_2$  为  $100\ \mu\text{H}$ .

为了验证文中方法的有效性,分别采用文中方法和扰动观测法进行光伏阵列的最大功率点跟踪.仿真采用光照强度模式 2(表 1),即光伏阵列  $\text{PV}_1 \sim \text{PV}_3$  的光照强度分别为  $1\ 000, 600, 300\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,最大输出功率稳定在  $316\ \text{W}$ (图 3(b)).在阴影光照条件下,两种 MPPT 方法的输出功率比较,如图 7 所示.

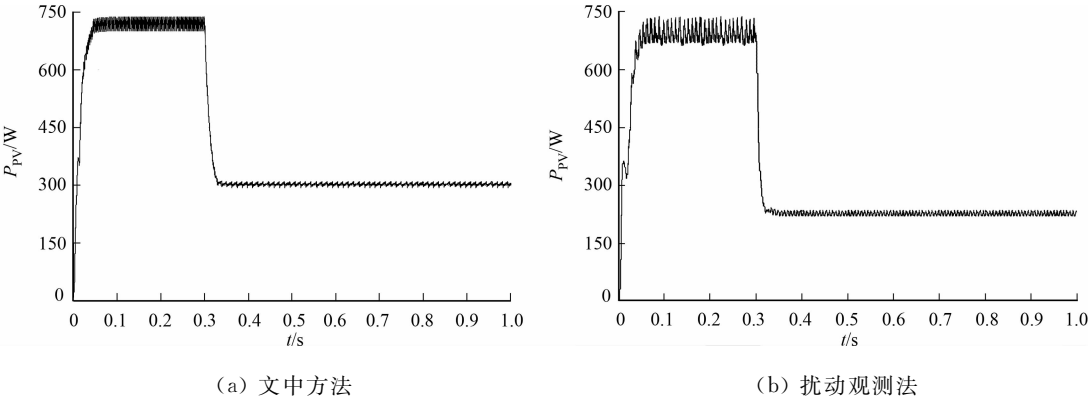


图 7 两种 MPPT 方法的输出功率比较

Fig. 7 Output power comparison of two MPPT methods

由图 7 可知:在阴影光照条件下,文中方法的输出功率由  $740\ \text{W}$ (均匀光照)降低到  $308\ \text{W}$ ,跟踪时间约为  $0.04\ \text{s}$ ,跟踪精度约为  $97\%$  ( $308/316 \approx 97\%$ );扰动观测法的输出功率最终稳定在  $240\ \text{W}$  左右,跟踪时间约为  $0.03\ \text{s}$ ,跟踪精度约为  $76\%$  ( $240/316 \approx 76\%$ ).

由此可知,在阴影光照条件下,扰动观测法的跟踪速度比文中方法略快,但它不能准确地跟踪到光伏阵列的最大功率点,且输出功率的振幅较大;而文中方法的跟踪精度远高于扰动观测法,能够准确地跟踪到光伏阵列的最大功率点,但会牺牲跟踪速度(跟踪时间仍然符合要求).

3.2 实验分析

为验证上述理论分析的有效性,搭建光伏并网系统实验平台(图 8),并在该平台上完成 MPPT 测试.采用 XLY-100M-40P 型光伏电池板(湖北省武汉市新能源公司),为保证输出电流处于安全范围,采用 10 块光伏模块串联构成光伏阵列.主电路采用两级式并网结构,即前级 Boost 电路,后级 LCL 型滤波的全桥逆变电路.系统采用 TMS320F28335 型控制芯片,光伏阵列参数:最大功率为  $100\ \text{W}$ ;开路电压为  $24.49\ \text{V}$ ;短路电流为  $5.57\ \text{A}$ ;最大功率点电压为  $19.28\ \text{V}$ ;最大功率点电流为  $5.14\ \text{A}$ .



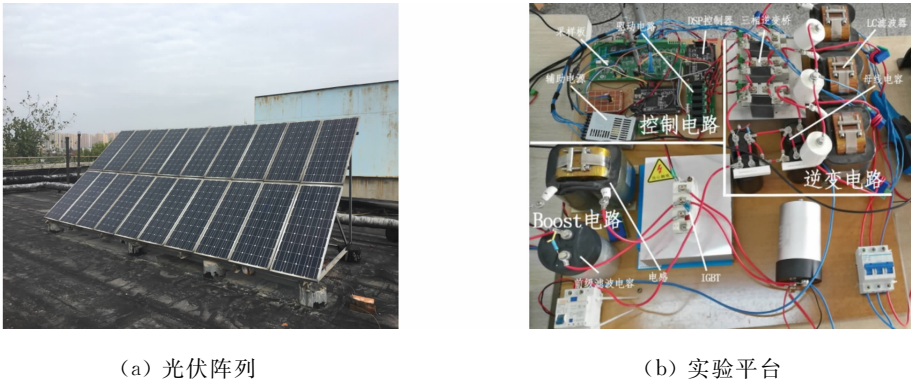


图 8 光伏并网系统实验平台

Fig. 8 Experimental platform of photovoltaic grid connected system

首先,在均匀光照条件下跟踪光伏阵列最大功率点;然后,遮盖数块光伏电池单元以模拟阴影光照环境,再次跟踪光伏阵列的最大功率点. 扰动观测法及文中方法的 MPPT 实验数据,如表 3,4 所示.

表 3 扰动观测法的 MPPT 实验数据  
Tab. 3 MPPT experimental datas of disturbance observation method

$U_{PV}/V$	$I_{PV}/A$	$P_{PV}/W$	$U_{PV}/V$	$I_{PV}/A$	$P_{PV}/W$
218	0.64	139.52	180	3.46	622.80
201	1.56	313.56	174	1.84	320.16
195	2.83	551.85	177	1.83	323.91
186	3.27	602.64	181	1.81	327.61
182	3.39	616.98	185	1.81	334.85
179	3.46	619.35	183	1.82	333.06

表 4 文中方法的 MPPT 实验数据  
Tab. 4 MPPT experimental datas of method in this paper

$U_{PV}/V$	$I_{PV}/A$	$P_{PV}/W$	$U_{PV}/V$	$I_{PV}/A$	$P_{PV}/W$
215	1.02	219.30	142	3.32	471.44
199	1.76	350.24	144	3.29	473.74
192	2.64	506.88	147	3.27	480.69
185	3.22	595.70	153	3.26	498.78
181	3.41	617.21	150	3.27	490.50
179	3.45	617.55	152	3.27	497.04

该实验的光伏阵列在标准情况下的额定功率为 1 kW,但由于实验的光照条件、环境温度不在理想情况下,因此,受到均匀光照的光伏阵列输出功率稳定在 620 W 左右. 当受到阴影光照时,扰动观测法的 MPPT 电路的输出功率最终稳定在 330 W 左右,而文中方法最终跟踪到的功率为 497.04 W.

由表 3,4 可知:文中方法能较为准确地跟踪到光伏阵列的最大功率点,而扰动观测法则陷入光伏阵列输出特性曲线的局部极值处;相比同等条件下的扰动观测法,文中方法能够准确地跟踪到光伏阵列的最大功率点,验证了文中方法的有效性.

4 结束语

在阴影光照条件下,提出一种基于线性函数的自适应步长滞环比较法的最大功率点跟踪方法. 当光伏阵列运行过程中出现阴影光照时,线性函数能将光伏阵列的工作点迅速规划至最大功率点. 滞环比较法可以有效地抑制工作点在最大功率点附近震荡,滞环比较法结合自适应步长法可使光伏阵列的输出功率极大程度地靠近最大功率. 仿真与实验结果表明,文中方法可以准确地跟踪到光伏阵列的最大功率点,提升 MPPT 的跟踪效果.

参考文献:

[1] 王浩,任俊杰. 光伏并网电站系统效率研究与应用[J]. 商品与质量,2017(23):68. DOI:10.3969/j.issn.1006-656X.2017.23.058.

[2] 吕小华. 光伏微网电能质量控制技术研究[D]. 南京:东南大学,2016.

[3] 靳肖林,文尚胜,倪浩智,等. 光伏发电系统最大功率点跟踪技术综述[J]. 电源技术,2019,43(3):178-181. DOI:10.3969/j.issn.1002-087X.2019.03.052.

[4] 刘文洲,西灯考,蔡长青,等. 太阳能光伏发电系统 MPPT 综述[J]. 长春工程学院学报(自然科学版),2016,17(3):39-41. DOI:10.3969/j.issn.1009-8984.2016.03.009.

[5] 黄嘉斌. 局部阴影下光伏阵列 MPPT 算法的研究[J]. 工业控制计算机,2017,30(3):140-141,151. DOI:10.3969/j.

issn. 1001-182X. 2017. 03. 066.

- [6] HASSAN S Z, LI Hui, KAMAL T, *et al.* Neuro-fuzzy wavelet based adaptive MPPT algorithm for photovoltaic systems[J]. *Energies*, 2017, 10(3): 394. DOI:10. 3390/en10030394.
- [7] ISHAQUE K, SALAM Z. A deterministic particle swarm optimization maximum power point tracker for photovoltaic system under partial shading condition[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 60(8): 3195-3206. DOI:10. 1109/TIE. 2012. 2200223.
- [8] ISHAQUE K, SALAM Z, AMJAD M, *et al.* An improved particle swarm optimization (PSO): Based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 27(8): 3627-3638. DOI:10. 1109/TPEL. 2012. 2185713.
- [9] LIAN K L, JHANG J H, TIAN I S. A maximum power point tracking method based on perturb-and-observe combined with particle swarm optimization[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, 4(2): 626-633. DOI:10. 1109/JPHOTOV. 2013. 2297513.
- [10] WU Zhicheng, JIANG Zhijun, YANG Xiaohui, *et al.* An improved global MPPT method based on power closed-loop control[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(1): 57-62.
- [11] KUMAR P R J, RAJASEKAR N. A new robust, mutated and fast tracking LPSO method for solar PV maximum power point tracking under partial shaded conditions[J]. *Applied Energy*, 2017, 201: 45-59. DOI:10. 1016/j. apenergy. 2017. 05. 102.
- [12] SEN T, PRAGALLAPATI N, AGARWAL V, *et al.* Global maximum power point tracking of PV arrays under partial shading conditions using a modified particle velocity-based PSO technique[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(5): 555-564. DOI:10. 1049/iet-rpg. 2016. 0838.
- [13] GHASEMI M A, RAMYAR A, IMANEINI H. MPPT method for PV systems under partially shaded conditions by approximating  $I-U$  curve[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(5): 3966-3975. DOI:10. 1109/TIE. 2017. 2764840.
- [14] 贾文婷, 魏学业, 张俊红, 等. 光伏阵列双二极管简化模型的建立与仿真[J]. *北京交通大学学报*, 2017, 41(2): 85-89. DOI:10. 11860/j. issn. 1673-0291. 2017. 02. 014.
- [15] 张明锐, 蒋利明, 欧阳丽. 局部阴影条件下光伏阵列旁路二极管和阻塞二极管的影响和作用[J]. *电气技术*, 2017(8): 1-5, 11. DOI:10. 3969/j. issn. 1673-3800. 2017. 08. 007.
- [16] 黎家成. 阴影光照下光伏发电系统最大功率点跟踪控制研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.
- [17] 李宏玉, 杨婷, 徐建军. 基于滞环比较法的光伏最大功率点跟踪控制研究[J]. *通信电源技术*, 2016, 33(4): 83-84.
- [18] 陈霞, 赵峰印, 王爱玉, 等. 基于改进扰动观测法的光伏阵列 MPPT 算法研究[J]. *电气传动*, 2017, 47(3): 66-69, 77.
- [19] 孟祥萍, 冷森, 张红, 等. 改进变步长滞环比较法的 MPPT 算法研究[J]. *自动化仪表*, 2017, 38(1): 38-41. DOI: 10686/j. cnki. issn1000-0380. 201701009.

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 吴逢铁)