

# 基于改进 PSO 的局部阴影下光伏阵列 MPPT 控制

王豪,王宏华

(河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**光伏阵列在局部阴影情况下,其功率-电压曲线将呈现多峰值特征,针对传统粒子群算法在最大功率点跟踪时存在易陷入局部最优、收敛速度慢等问题,采用一种改进的粒子群算法,在粒子群算法中引入自适应调节的惯性权重和学习因子,使系统快速、精确地搜索到最大功率点。通过仿真验证了所采用的算法在不同阴影条件下能够提高收敛速度,快速追踪到最大功率点,避免陷入局部最优。

**关键词:**MPPT;粒子群算法;光伏阵列;局部阴影

**中图分类号:**TM615+.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)01-0198-04

## MPPT Control of Photovoltaic Array Under Partial Shade Based on Improved PSO

WANG Hao, WANG Honghua

(School of Electrical Engineering and Energy, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:**The power-voltage curve of photovoltaic arrays and the partial shade is characteristic of multiple local peak value. Traditional particle swarm optimization algorithm is prone to falling into local maximum and slowing the convergence when it tracks the maximum power point. If the improved PSO program is used, which adds to the adaptive inertia weight and learning factor, the system can quickly and accurately search the maximum power point. The simulation results show that the improved PSO algorithm can track the maximum power point quickly, thus avoiding falling into the local maximum.

**Keywords:**MPPT; PSO; PV array; partial shade

## 0 引言

光伏发电具有分布广泛、无污染、方便等优点,成为当今的研究热点。其中,光伏系统的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制,是提高其发电效率的重要措施之一。然而在局部阴影下,光伏阵列的P-V曲线呈现多峰值现象,传统的MPPT算法(如爬山法、电导增量法等)难以追踪到最大功率点。针对该问题,文献[1]利用局部阴影下光伏阵列最大功率点电流与短路电流之间近似的比例关系,提出一种三步骤全局MPPT算法,其结构简单,但动态调整过慢。文献[2]针对传统MPPT算法进行改进,提出了差分进化(DE)算法与变步长扰动观察法结合的复合控制算法,但其依赖于光伏组件参数并且控制复杂。文献[3]采用斐波那契(Fibonacci)搜索法,但是该方法不能对任意情况进行MPPT,实用性不强。

粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)作为全局寻优算法,非常适用于多峰值光伏系统的MPPT。文献[4-6]采用粒子群算法实现多峰MPPT控制,能对任意阴影情况进行最大功率点跟踪,但其收敛速度慢。文献[7-8]对传统粒子群算法进行改进,分别提出了惯性权重对数递减粒子群和变异粒子群算法,可显著提高收敛速度,但其仍易陷入局部最优。基于此,本文采用改进的粒

子群优化算法实现光伏阵列局部阴影下MPPT控制,针对传统PSO容易陷入局部最优解,即“早熟”缺陷,引入自适应调节的惯性权重和学习因子进行进一步优化,提高算法的收敛速度。通过仿真验证改进后的算法在不同阴影条件下,能够快速且准确地跟踪最大功率点,提高了光伏阵列输出效率,具有良好的实用价值。

## 1 光伏阵列的多峰值特性分析

单块光伏电池可用图1的等效电路来表示。

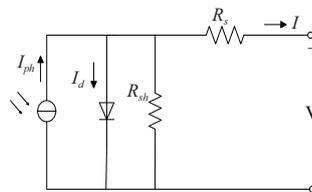


图1 等效电路图

本文采用一种适合工程应用的近似仿真模型<sup>[9-11]</sup>,根据电池厂商提供的标准环境下相关参数和对不同环境下电池性能参数的修正得到如下公式:

$$I = I_{sc} [1 - C_1 (e^{U/(C_2 U_{oc})} - 1)] \quad (1)$$

$$C_1 = (1 - I_m/I_{sc}) e^{-U_m/(C_2 U_{oc})} \quad (2)$$

$$C_2 = (U_m/U_{oc} - 1) [\ln(1 - I_m/I_{sc})] \quad (3)$$

式中: $U$ 、 $I$ 为光伏电池的输出电压和电流; $I_{sc}$ 为短路电流; $U_{oc}$ 为开路电压; $I_m$ 和 $U_m$ 分别为最大功率点所对应的电流和电压。

光伏阵列由多个单体光伏电池串并联而成,其输出特性可视为单体电池输出特性的叠加。由文献[1]可知,局部阴影下并联的光伏组件可相对独立工作,其 $P-V$ 曲线仍呈单峰特性;然而,处于局部阴影下串联的光伏组件,其 $P-V$ 曲线将呈现多峰值特性。图2为3个光伏电池串联组成的阵列,每个光伏电池并联一个旁路二极管,防止其工作在反向电压。

本文仿真采用的太阳能电池型号为MG-P50,厂家给出的性能参数为: $P_m=50\text{ W}$ , $U_{oc}=21.5\text{ V}$ , $U_m=18.4\text{ V}$ , $I_{sc}=2.95\text{ A}$ , $I_m=2.72\text{ A}$ 。参考温度是 $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,参考光照为 $1\ 000\text{ W/m}^2$ 。在局部阴影下,3块光伏电池的光照强度将不再相同。假设此时 $PV_1$ 的光照强度为 $1\ 000\text{ W/m}^2$ , $PV_2$ 为 $800\text{ W/m}^2$ , $PV_3$ 为 $600\text{ W/m}^2$ ,在该种情况下阵列输出的 $P-V$ 、 $I-V$ 曲线如图3所示。此时,阵列的开路电压 $U_{oc\_array}=64.5\text{ V}$ 。当阵列输出电流 $i < I_{sc3}$ 时(在上述条件下3块光伏电池的短路电流 $I_{sc1} > I_{sc2} > I_{sc3}$ ),3个旁路二极管

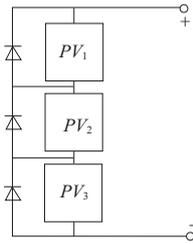


图2 3块光伏电池串联

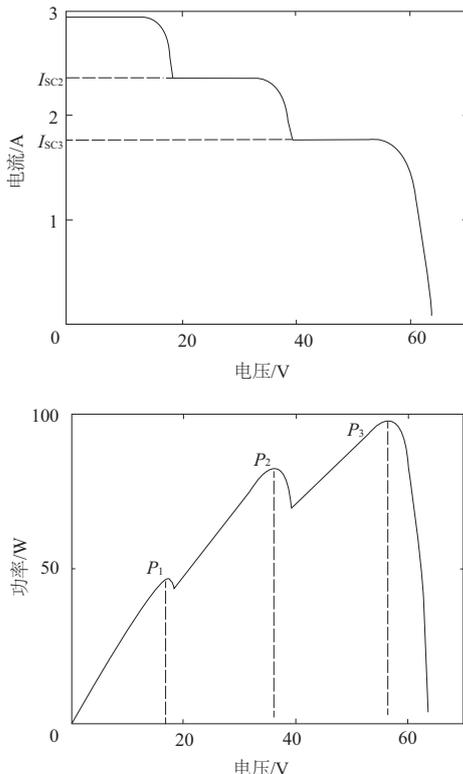


图3 局部阴影下  $I-V$ 、 $P-V$  曲线

都不导通, $PV_1$ 、 $PV_2$ 、 $PV_3$ 共同输出功率;当 $I_{sc3} < i < I_{sc2}$ 时, $PV_3$ 的旁路二极管导通, $PV_3$ 被旁路,因此只有 $PV_1$ 、 $PV_2$ 共同输出功率;同理,当 $i > I_{sc2}$ 时,只有 $PV_1$ 输出功率;因此,阵列的输出 $P-V$ 曲线呈现多峰值特性。

通过上述分析,可推广到一般情况,当串联阵列中由 $n$ 块电池组件受到局部阴影影响,光照条件不一致时,其 $I-V$ 曲线会出现 $n$ 级阶梯, $P-V$ 曲线将呈现出 $n$ 个峰值点。文献[6]指出,当粒子群优化算法的粒子数目和粒子初始位置选取不当时,容易造成 PSO 算法陷入局部最优,导致无法跟踪到最大功率点。

## 2 改进 PSO 算法在最大功率跟踪中的实现

### 2.1 改进 PSO 算法

PSO 算法作为一种全局搜索算法是多极值函数寻优的有效方法,其原理是初始化一群随机粒子(随机解),然后通过迭代找到最优解。每个粒子都具有由速度、位置和目标函数决定的适应度。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个极值来更新自己的位置和速度,一个为粒子自身到目前为止的最优解,简称为个体极值( $P_{best}$ );另一个是整个种群目前找到的最优解,即全局极值( $G_{best}$ )。种群中任意一个粒子的位置和速度更新方程如下式所示。

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(P_{best} - x_i^k) + c_2r_2(G_{best} - x_i^k) \quad (4)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (5)$$

式中: $i$ 表示第 $i$ 个粒子; $k$ 表示迭代次数; $w$ 为惯性系数; $c_1$ 和 $c_2$ 为学习因子; $r_1$ 、 $r_2$ 为 $[0,1]$ 上的随机数; $x$ 、 $v$ 为粒子的位置和速度。

在 PSO 优化算法进行最大功率点跟踪过程中,惯性权重 $w$ 和学习因子 $c_1$ 、 $c_2$ 的取值对算法的性能具有重要影响<sup>[10]</sup>;  $w$ 取值过大会难于得到精确解,反之,过小会导致陷入局部最优;同时,初期设置较大的 $c_1$ 和较小的 $c_2$ 可避免“早熟”,后期较小的 $c_1$ 和较大的 $c_2$ 可以加速收敛。因此,本文采用了一种自适应调节的方法,随着迭代次数 $k$ 的增加更新学习因子 $c_1$ 和 $c_2$ 并按指数函数递减的惯性权重,其公式为:

$$c_1 = c_{1start} + (c_{1end} - c_{1start}) \left[ \left( \frac{k}{k_{max}} \right)^2 - \frac{2k}{k_{max}} \right] \quad (6)$$

$$c_2 = c_{2start} + (c_{2end} - c_{2start}) \left[ \left( \frac{k}{k_{max}} \right)^2 - \frac{2k}{k_{max}} \right] \quad (7)$$

$$w = w_{start} e^{-k/k_{max}} \quad (8)$$

式中: $k_{max}$ 为最大迭代次数; $c_{1start}$ 、 $c_{2start}$ 和 $c_{1end}$ 、 $c_{2end}$ 为起始和终止学习因子; $w_{start}$ 为初始惯性权重。

### 2.2 改进 PSO 在 MPPT 中的应用

在光伏阵列最大功率点跟踪中,粒子群算法的适应度函数为测量阵列的输出功率。将光伏阵列的电压作为搜索变量,则粒子的位置代表光伏输出电压值,其速度即为电压增量。通过上文可知,PSO 优化算法粒子数目和初始位置选择不当会导致跟踪失败。因此,粒子个数应大于等于极值点个数;同时,粒子应均匀分布在整个电压区内,

否则会陷入局部最优而导致跟踪失败。

由于在最大功率点附近反复多次迭代会产生长时间的波动,为了避免在最大功率点附近振荡并使系统快速稳定在最大功率点上,本文对 PSO 优化算法设计了终止策略。当各粒子间的最大电压差 $<0.5\%U_{array}$ 时,即认为找到最大功率点,停止迭代;并将此时所有粒子中对应功率最大粒子的值定义为  $U_m$ ,最大功率定义为  $P_m$ 。

上述方法针对的仅仅是阴影情况固定的 MPPT,而在实际情况阴影和光照强度都会发生改变,最大功率也随之变化,所以应在算法中加入重启条件。定义功率变化量  $\Delta p$  为

$$\Delta p = \frac{|P_{real} - P_m|}{P_m} \quad (9)$$

式中  $P_{real}$  为在  $U_m$  下光伏阵列的实际输出功率。当  $\Delta p$  大于设定阈值时,重启算法,重新寻找最大功率点,其流程图如图 4 所示。

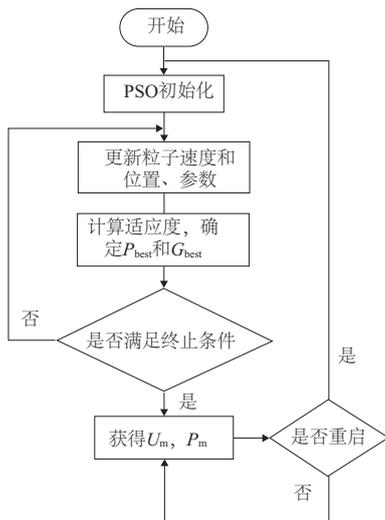


图 4 改进 PSO 流程图

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真模型

为验证改进 PSO 优化算法在 MPPT 控制中的正确性,本文在 simulink 中搭建了基于 Boost 电路的光伏最大功率跟踪系统<sup>[13]</sup>,其系统框图如图 5 所示,其中光伏阵列由 3 块 MG-P50 型光伏电池板串联组成。Boost 电路的仿真参数如下:光伏输入滤波电容  $C_1 = 200 \mu F$ ,直流母线电容  $C_2 = 1000 \mu F$ ,Boost 升压电感  $L = 5 mH$ ,负载  $R = 80 \Omega$ ,开关频率为 10kHz。

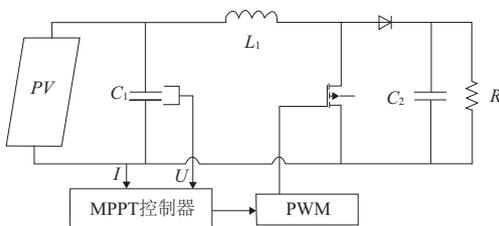


图 5 最大功率跟踪系统

MPPT 控制器模块中,控制过程为将改进 PSO 算法中粒子当前电压作为给定电压,光伏实际电压作为反馈,通过 PID 调节调制占空比  $D$ ,最终实现 MPPT。

#### 3.2 仿真分析

仿真时采用 3 块光伏电池串联组成光伏阵列,并设计了两种阴影条件。阴影 1 条件下 3 块光伏电池的光照强度分别为:  $PV_1 = 1000 W/m^2$ ,  $PV_2 = 800 W/m^2$ ,  $PV_3 = 600 W/m^2$ ;阴影 2 时  $PV_3$  的光照强度突变为  $200 W/m^2$ ;两种阴影下的  $P-V$  曲线如图 6 所示。阴影 1 的最大功率和其对应的电压分别为  $P_m = 98.31 W$ ,  $U_m = 55.92 V$ ;阴影 2 的最大功率和其对应的电压分别为  $P_m = 82.56 W$ ,  $U_m = 36.34 V$ 。

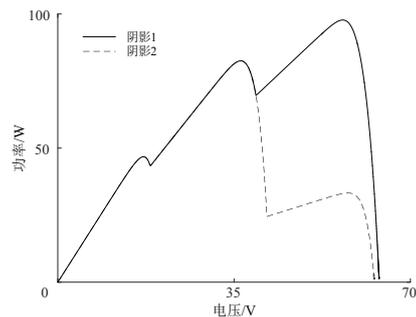


图 6 两种阴影下的 P-V 曲线

本文在仿真时,选取 5 个粒子,其初始位置均匀分布在电压区间内;初始惯性权重  $w = 0.8$ ;最大迭代次数为 100。首先,在 MATLAB 中分别编写两种算法来验证算法的正确性,得到的适应度(即功率)曲线如图 7 所示。从图中可以看出,改进 PSO 算法在 15 代找到了最大功率;而 PSO 算法陷入了局部最优,并经 40 次迭代才结束。

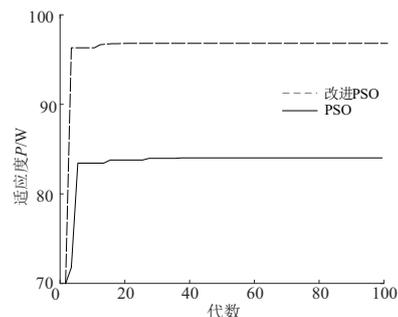


图 7 适应度曲线

将 MATLAB 中的算法改写成 S 函数与 Boost 电路一同仿真,得到的功率和电压波形如图 8 和图 9 所示。PSO 算法则经过 1 s 的搜寻找到了最大功率点,其在搜索过程中一度陷入了局部最优,最后成功跟踪到最大功率点;  $P_m = 96 W$ ,其功率波动范围为  $95.6 \sim 96.4 W$ ,电压波动范围  $54.3 \sim 54.8 V$ 。

改进 PSO 在 0.3 s 时追踪到了最大功率点  $P_m = 97 W$ ,电压稳定值为 56 V,其电压和功率跟踪误差 $<1\%$ ;其功率波动范围在  $97.65 \sim 97.85 W$  之间,电压波动范围在  $56 \sim 56.3 V$  之间。

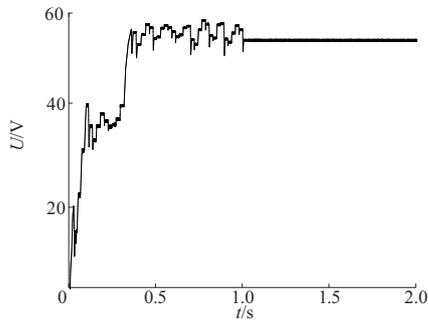


图 8 阴影 1 下 PSO 的电压、功率跟踪结果

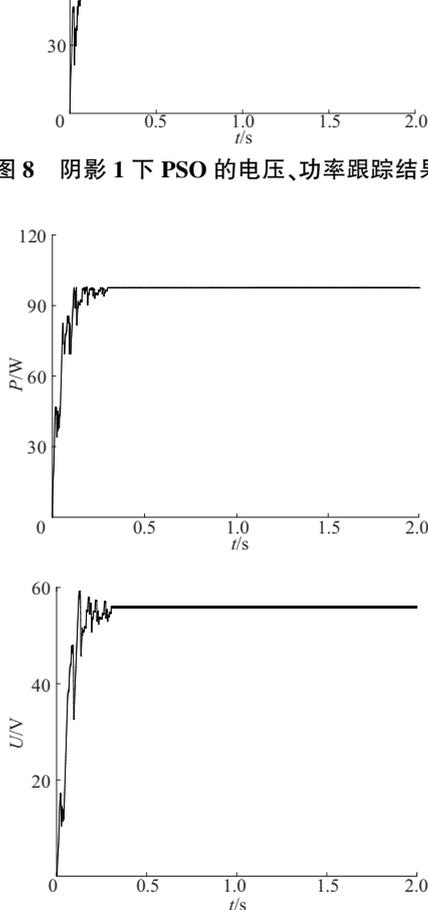


图 9 阴影 1 下改进 PSO 的功率电压、跟踪结果

上述只是考虑了静态条件,在实际中阴影会发生突变,因此需要考虑在光照强度发生突变时算法的有效性。在 1s 时由阴影 1 突变为阴影 2,采用改进 PSO 算法的 MPPT 仿真结果如图 10 所示。在由阴影 1 突变为阴影 2 的瞬间,电压并未改变但功率快速下降,此时重启了算法进行寻优,经过 0.3s 重新追踪到了新的最大功率点  $P_m = 82.6\text{ W}$ 。

## 4 结语

本文研究了一种改进的粒子群算法,并将其运用到局部阴影下光伏阵列的 MPPT 控制中。改进后的粒子群算

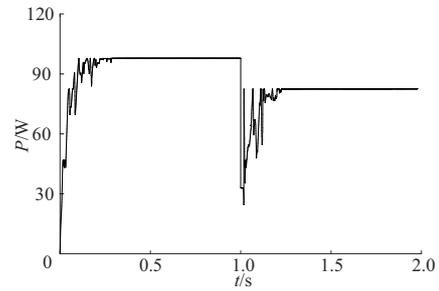


图 10 阴影突变时仿真结果

法的惯性权重和学习因子能够自适应调节,克服粒子群算法易陷入局部最优的缺点,同时加快了收敛速度。通过仿真表明,经过改进的粒子群算法,在静态和动态环境下都能够实现 MPPT,提高了光伏系统的发电效率。

### 参考文献:

- [1] 王云平,李颖,阮新波. 基于局部阴影下光伏阵列电流特性的最大功率点跟踪算法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 201-218.
- [2] 尹丽敏,吕莉莉,雷刚,等. 基于复合控制算法的局部阴影下的 MPPT[J]. 电力电子技术, 2017, 51(10): 95-97.
- [3] MIYATAKE M, INADA T, HIRATSUKA I, et al. Control characteristics of a Fibonacci-search-based maximum power point tracker when a photovoltaic array is partially shaded[C] //The 4th IPEMC. Riga, Latvia: IEEE, 2004: 816-821.
- [4] PATEL H, AGARWAL V. Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(4): 1689-1698.
- [5] MIYATAKE M, VEERACHARY M, TORIUMI F. Maximum power point tracking of multiple photovoltaic arrays: a PSO approach[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(1): 367-380.
- [6] 朱艳伟,石新春,但扬清,等. 粒子群优化算法在光伏阵列多峰值最大功率点跟踪中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 42-48.
- [7] 王书金,米根锁. 基于 LOGPSO 算法的光伏系统 MPPT 研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(11): 1621-1625.
- [8] 王立乔,鲍利斌,孙孝峰. 基于变异粒子群算法的光伏系统最大功率点跟踪研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(3): 743-751.
- [9] 焦阳,宋强,刘文华. 光伏电池实用仿真模型及光伏发电系统仿真[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 198-202.
- [10] MASOUM M A S, DEHBONEI H, FUCHS E F. Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power point tracking[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(4): 514-522.
- [11] PATEL H, AGARWAL V. Matlab-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 302-310.
- [12] 李娟,杨琳,刘金龙,等. 基于自适应混沌粒子群优化算法的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 26-31.
- [13] 张兴,曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2011: 70-81.

收稿日期:2019-06-11