

# 粒子群算法在光伏系统最大功率点跟踪中的应用

周西峰, 刘晓丹, 郭前岗

(南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210046)

**摘要:** 介绍了光伏电池的特性, 并在 Matlab/Simulink 中进行建模仿真研究。针对局部遮阴条件下光伏阵列的 P-U 特性呈现多个极值点, 导致常规的最大功率点跟踪算法失效的问题, 提出了一种基于粒子群算法(PSO)的最大功率点跟踪(MPPT)控制方法。仿真结果表明, 该方法能够快速、准确地跟踪光伏阵列的最大功率点, 具有较好的控制精度, 有效地提高了光伏阵列的输出效率。

**关键词:** 最大功率点跟踪; 粒子群优化算法; 局部遮阴

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)03-0070-03

## Application of particle swarm optimization algorithm in maximum power point tracking for PV system

Zhou Xifeng, Liu Xiaodan, Guo Qian'gang

(College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** The characteristics of photovoltaic (PV) were introduced and the simulation model of photovoltaic cells was built in Matlab/Simulink environment. A control algorithm based on particle swarm optimization (PSO) has been proposed for maximum power point tracking (MPPT) to solve the problem that the P-V curve of PV arrays has the characteristics of multi-summit under partially shaded conditions, which makes the MPPT failed. Simulation and experimental results show that the control algorithm can quickly and accurately track the maximum power point of PV arrays, with better control accuracy, and improve the efficiency of the PV array output.

**Key words:** maximum power point tracking; particle swarm optimization; partial shade

太阳能作为一种新型的绿色可再生能源, 具有储量大、分布广、无污染、使用方便等优点。随着能源危机与环境污染的加剧, 太阳能的利用越来越受到人们的重视, 而太阳能光伏发电技术的应用更是人们普遍关注的焦点。由于光伏组件均是由多个单体光伏电池串联而成, 当光伏组件中各个单体光伏电池所接收的太阳辐射均等时, 其输出的功率电压曲线呈单峰状。然而, 在很多情况下, 由于光伏组件表面存在不透明物体的遮挡, 或者由于多云天气导致组件中部分单体光伏电池接收的光照强度异于其他电池。这种情况下, 组件输出的功率电压曲线会出现多个峰值点, 导致常规的最大功率点跟踪控制算法失效<sup>[1-2]</sup>, 不能正确追踪到最大功率点, 造成太阳能发电系统功率输出的下降, 严重时会引起“热斑”效应造成安全问题。本文将粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法应用于光伏发电系统的 MPPT

中, 并进行了实验和仿真比较, 验证了该算法的有效性, 即该算法既可以提高传输效率, 又可以很好地克服热斑效应, 以及各种失配问题。

### 1 光伏电池特性

#### 1.1 光伏阵列的数学模型

光伏电池的原理是基于半导体的光伏特性效应将太阳辐射直接转换为电能<sup>[3]</sup>。根据光伏电池的内部结构及其输出特性, 可以把光伏电池单体等效为如图 1 所示的电路。

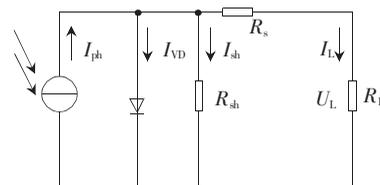


图1 光伏电池的等效模型

# 技术与方法

Technique and Method

图中  $R_L$  表示负载;  $U_L$  表示负载电压或输出电压;  $I_L$  表示负载电流或输出电流;  $R_S$  和  $R_{SH}$  表示等效的串联和并联电阻, 通常  $R_S$  约为  $1 \Omega$ ,  $R_{SH}$  约几千欧姆;  $I_{VD}$  表示暗电流或扩散电流;  $I_{PH}$  表示光生电流 (亦即光子在光伏电池上激发的电流), 其大小与光照强度和温度成正比,  $I_{PH}$  大小与外界负载无关, 可以认为是恒流源。由上面的等效电路模型及对光伏电池的伏安特性分析可推出其输出特性方程为<sup>[4-5]</sup>:

$$I_{ph} = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} [1 + C_T(T - T_{ref})] \quad (1)$$

$$I_0 = I_{00} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{nk} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

由于  $R_S$  较小,  $R_{SH}$  较大, 在一般情况下可将  $I_L$  简化为:

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{qU_L}{AKT} - 1 \right) - \frac{U_L + I_L R_S}{R_{sh}} \right] \quad (3)$$

式中,  $S$  为光照强度, 单位  $W/m^2$ ;  $S_{ref}$  为参考光照强度, 一般取  $1000 W/m^2$ ;  $C_T$  为温度系数;  $T$  为环境温度;  $T_{ref}$  为环境温度的参考值, 一般取  $298 K$ ;  $I_0$  为二极管反向饱和电流, 数量级为  $10^{-4} A$ ;  $q$  为电荷常数, 为  $1.6 \times 10^{-19} C$ ;  $A$  为 PN 结的理想因子, 当  $T=300 K$  时, 一般取  $2.8$ ;  $k$  为波尔兹曼常数, 为  $1.38 \times 10^{-23} J/K$ 。

因此可得光伏电池输出功率的表达式:

$$P = U_L I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} [1 + C_T(T - T_{ref})] - U_L I_0 \left[ \exp \left( \frac{qU_L}{AKT} - 1 \right) - \frac{U_L + I_L R_S}{R_{sh}} \right] \quad (4)$$

从式(4)可以看出, 光伏电池的输出功率与光照强度、环境温度有关, 并且呈现为非线性关系。

## 1.2 光伏阵列的特性曲线

由于单个光伏电池输出的功率较小, 实际应用中, 为了增大光伏电池的输出功率, 一般会将若干个光伏电池进行串、并联组合, 以组成光伏电池模块或光伏阵列, 满足功率的需要。根据上文介绍的光伏电池的数学模型可在 Matlab/Simulink 中建立模型, 得到图 2、图 3 分别为典型光伏电池输出特性曲线和光照不均情况下的 P-U 多峰特性曲线。

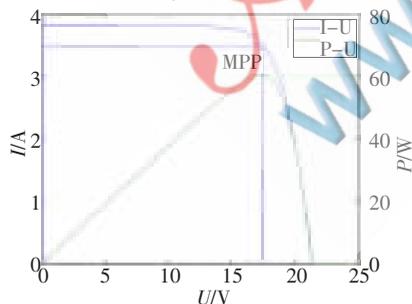


图 2 光伏电池输出特性曲线

由图 2 可见, 光伏电池即非恒压源也非恒流源, 其输出电流和输出功率随输出电压的变化而变化。从 P-U 曲线可以看出光伏电池的输出功率存在极大值点, 这一工作点称为最大功率点 (MPP)。为提高光伏电池的效率, 在光伏发电系统中需要进行最大功率点跟踪

(MPPT) 控制, 使系统能工作在最大功率点。

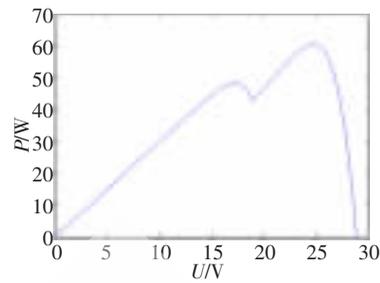


图 3 光照不均时光伏模块 P-U 的多峰特性曲线

由图 3 可以看出, 两个光伏模块光照不同的情况下, 由于串联的模块流过的电流相等, 光伏阵列 P-U 特性曲线呈现 2 个极值点, 常规的最大功率点跟踪方法将会失效, 易追踪到局部极值输出。

## 2 粒子群算法在 MPPT 中的应用

### 2.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法是模拟鸟类捕食行为的群体智能算法。它的优势在于算法的简捷性, 易于实现, 无需调整大量的参数, 且不需要梯度信息。在函数优化、约束优化、极大极小值、多目标优化等问题中得到了广泛应用。在粒子群算法中, 每个个体称为一个“粒子”, 每个“粒子”代表着一个潜在的解, 在搜索空间中以一定的速度飞行<sup>[6]</sup>。“粒子”的速度和位置可更新为:

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + c_1r_1(P_i^k - X_i^k) + c_2r_2(P_g^k - X_i^k) \quad (5)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (6)$$

其中,  $w$  为惯性权重,  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子,  $r_1$ 、 $r_2 \in (0, 1)$  为两个独立的随机数。

### 2.2 算法参数设置

在粒子群进行光伏阵列最大功率点跟踪中, 设定目标函数值为阵列的输出功率 (即所有模块的功率总和), 粒子的位置代表阵列电压。

粒子群算法的性能很大程度上取决于算法的控制参数, 例如粒子数、最大速度、学习因子、惯性权重等。本文设置粒子数为 10, 迭代次数设置为 60 次, 最大速度  $v_{max}=3$ 。学习因子使粒子具有自我总结和向群体中优秀个体学习的能力, 反映了粒子群之间的信息交流, 设定  $c_1=c_2=1.4962$ 。惯性权重决定了粒子对当前速度继承的多少, 较大的惯性权重有利于跳出局部极小点, 便于全局搜索。但是较小的惯性因子则有利于对当前的搜索区域进行精确局部搜索, 以利于算法收敛, 在此采用线性变化的权重, 表达式如下:

$$w = w_{max} - t(w_{max} - w_{min})/t_{max} \quad (7)$$

其中,  $w$  的最大值  $w_{max}=0.9$ , 最小值  $w_{min}=0.4$ ,  $t$  表示当前迭代步数,  $t_{max}$  表示最大迭代次数。

搜索范围的确定可以使粒子更快、更精确地找到最大点, 此处将搜索范围设置为  $(0, U_{oc})$ ,  $U_{oc}$  为光伏模块的开路电压。

## 技术与方法 Technique and Method

### 2.3 算法的重启与终止设置

PSO 算法的终止条件一般设置为达到最大迭代次数或者满足一定的误差准则。由于粒子的初始位置是随机分布的,当所有粒子趋近于一个位置时,可以认为已经追踪到了最大功率点。此处设定,当粒子之间的最大距离小于  $5\% U_{oc}$  时,则算法停止,当前所有粒子中对应功率最大者定为最大功率点。否则,一直迭代,直到迭代次数结束,寻得最大功率点为止。

### 2.4 算法的流程

首先,随机初始化种群中各个粒子的初始位置及速度,计算得到各个粒子的适应值即阵列的功率,将当前各粒子的位置和适应值存储到各粒子的个体最优值(pbest)中,将所有 pbest 中适应值最优个体的位置和适应值存储于全局最优值(gbest)中。然后,更新粒子的位置、速度、惯性权重以及最优值。最后,检查终止条件,若满足终止条件,搜索停止,输出最优解  $U_{max}$ ,否则,更新粒子,继续搜索。

粒子群算法追踪最大功率点的流程图如图 4 所示。



图 4 粒子群算法流程图

### 3 仿真结果与分析

依据本文介绍的光伏电池的特性,将多个光伏电池单体串并联组合构成一个光伏模块,运用 Matlab/Simulink 建立模型,本文对 3 个模块串联的结构进行了仿真以验证算法的有效性。3 个模块的光照以及温度参数设置如下:

模块 1:  $Sun=600 \text{ W/m}^2, T=21^\circ\text{C}$ ;

模块 2:  $Sun=800 \text{ W/m}^2, T=24^\circ\text{C}$ ;

模块 3:  $Sun=1000 \text{ W/m}^2, T=25^\circ\text{C}$ 。

3 个模块的多峰特性曲线如图 5 所示。

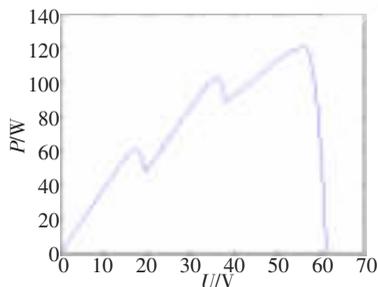


图 5 P-U 三峰特性曲线

粒子群算法追踪最大功率点的仿真结果如图 6 所示。



图 6 粒子群算法 MPPT 仿真结果

由仿真结果可以看出,三维多峰曲线的全局最大功率率为  $120 \text{ W}$ ,粒子群优化算法寻到的最大功率点的功率率为  $102.2158 \text{ W}$ ,误差很小,验证了该算法在跟踪最大功率点上有良好的准确性。算法寻优时间为  $0.1264 \text{ s}$ ,只用很少的时间就能追踪到全局最大功率点,验证了算法的快速性。所以基于粒子群优化的 MPPT 算法,在局部阴影条件下能跟踪到全局最大功率点,具有一定的精准性和有效性。

本文提出了一种基于粒子群算法的光伏发电系统最大功率点跟踪控制方法,建立了光伏阵列的模型并进行仿真研究,验证了该算法的有效性。该方法使光伏阵列在温度、光照等外界环境不统一的情况下,能够快速有效地跟踪到最大功率点,并且具有较好的追踪精度和稳定性,防止了最大功率点的振荡以及电池的温升,减少了功率损耗,从而大大提高了总功率的输出。

#### 参考文献

- [1] NOGUCHI T, TOGASHI S, NAKAMOTO R. Short-current pulse-based maximum power point tracking method for multiple photovoltaic and converter module system [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2002, 49(1): 217-222.
- [2] SERA D, TEODORESCU R, HANTSCHER J, et al. Optimized maximum power point tracker for fast-changing environmental conditions [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2629-2637.
- [3] 高虎,李俊峰,许洪华.太阳能光伏发电技术发展状况与趋势分析[J].中国科技产业,2006,12(2):72-75.
- [4] 张兴,曹仁贤,等.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.
- [5] 刘晓艳,祁新梅,郑寿森,等.局部阴影条件下光伏阵列的建模与分析[J].电网技术,2010,34(11):192-197.
- [6] 蒋程涛,邵世煌.基于适配粒子群的多目标优化方法[J].计算机工程,2007,33(21):175-178.

(收稿日期:2012-11-15)

#### 作者简介:

周西峰,男,1960年生,学士,副教授,主要研究方向:计算机智能监测控制技术,计算机控制与系统集成。

刘晓丹,女,1986年生,硕士研究生,主要研究方向:计算机智能监测控制技术。

郭前岗,男,1960年生,教授,硕士生导师,主要研究方向:新能源发电、电力电子与电力传动。

《微型机与应用》2013年第32卷第3期