http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0478

复杂遮蔽条件下光伏多峰出力特征及 GMPPT 控制

陈明轩, 武建文*, 马速良, 黄炼

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对光伏发电系统中最大功率点跟踪(MPPT)算法在遮蔽情况下失效问题,提出了一种基于δ势阱的量子粒子群全局 MPPT(GMPPT)算法。结合光照强度变化时的光伏多峰值出力特征,从光伏最大功率点变迁角度出发,分析常规 MPPT 算法存在搜索盲区的原因,说明 GMPPT 寻优必要性。提出一种提高粒子多样性、搜索速度及收敛精度的量子行为粒子群优化(QPSO)算法。在 MATLAB/SIMSCAPE 平台下,结合算例分析,对比标准粒子群优化(PSO)算法,验证所提优化算法在有效 GMPPT 的情况下,具有参数少、搜索快的特点,同时全局搜索能力强,防早熟效果明显,适用于 GMPPT 的实现。

关 键 词: 光伏发电; 光伏阵列; 局部阴影; 全局最大功率点跟踪(GMPPT); 量子行为粒子群优化(QPSO)算法

中图分类号: TM613

文献标识码: A **文章编号**: 1001-5965(2017)06-1141-08

近年来,光伏发电作为一种无污染且不受地域限制的太阳能发电方式而备受关注[1-4]。云层遮挡、光伏电池表面灰尘覆盖、树木或者建筑物遮挡等情况会使光照不均匀,造成光伏电池板输出电压功率曲线出现多个功率极值点,增加了跟踪系统最大功率的难度。为了提高光伏阵列的输出功率,提高光伏发电的整体效率,适用于局部阴影条件的全局最大功率点跟踪(GMPPT)技术已经成为光伏发电系统发展的重点技术环节[5-6]。

国内外专家学者对光伏发电系统在局部阴影条件下光伏阵列的建模及 GMPPT 方法进行了大量研究。文献[7]建立单二极管参数的太阳电池功率方程,提出恒压跟踪方法进行最大功率点跟踪(MPPT),并且分析模型中串联电阻、并联电阻及二极管参数对恒压跟踪方法的影响;文献[8]建立光伏阵列的高维数学模型,提出了易于分布式实现的、适合于任意阴影条件的光伏阵列输出特性快速计算机仿真算法;文献[9]构建遮蔽条件下传统算法、智能算法以及群优化算法等多种 MPPT 算法,分析各种方法的优势和使用局限;文献[10]提出采用傅里叶函数并使用曲线拟合的方法对阴影条件下光伏阵列进行非机理建模,能对不同功率等级、不同精度要求的光伏阵列进行建模;文献[11]在光照在局部阴影条件下,利用人工神经网络,达到 MPPT 的目的,实验效果良好;文献[12]提出新型的分布式 MPPT 光伏系统结构,保证在不同光照条件下每块光伏板都可以工作在各自的最大功率点;文献[13-15]均是基于粒子群算法,通过在结构和参数调整改进粒子群优化(PSO)算法,简化算法结构,保证收敛速度,实现动态和静态环境下 GMPPT,提高多峰值 MPPT 的速度和精度;文献[16]从概率论角度出

收稿日期: 2016-06-03; **录用日期**: 2016-09-21; **网络出版时间**: 2016-11-02 12:04
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20161102.1204.001.html
基金项目: 国家自然科学基金(51377007); 高等学校博士学科点专项科研基金(20131102130006)
* **通讯作者**: E-mail: wujianwen@vip.sina.com

引用格式: 陈明轩, 武建文, 马速良, 等. 复杂遮蔽条件下光伏多峰出力特征及 GMPPT 控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(6): 1141-1148. CHEN M X, WU J W, MA S L, et al. Photovoltaic multi-peak output characteristics and GMPPT control under complex shaded condition [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(6): 1141-1148 (in Chinese).

发,提出基于蒙特卡罗的光伏多峰 MPPT 控制算法,其收敛速度与准确性不受光伏曲线形状的影响;文献[17]根据局部阴影条件下的光伏阵列分段函数输出特性曲线,建立 S 函数模型,提出免疫细菌觅食算法,实现大容量光伏阵列 GMPPT。

分析以上研究过程局限性,并结合其研究成果,本文从研究局部阴影条件下光伏发电系统出力特征演化角度出发:首先,建立局部阴影条件下光伏组件的数学模型,确定为其多峰值优化问题,深入剖析常规寻优算法失效的原因;然后,根据优化策略及多峰现象,提出引入量子行为的粒子群优化(QPSO)算法,以增加粒子多样性,提高跳出局部最优能力,加快搜索速度,有效地完成 GMPPT 功能;最后,利用算例分析,并与标准 PSO 算法对比,说明量子行为的粒子群优先算法更适于解决局部遮挡条件下的光伏 MPPT 问题,有效地提高光伏利用率及发电效率。

1 局部阴影条件下的光伏阵列模型与 GMPPT 实现电路

1.1 局部阴影条件下的光伏阵列模型

图 1 为典型的光伏(PV)阵列结构图,尺寸为 $n \times m$,即每一串有 n 块光伏组件,再并联 m 串。串联单元需配置旁路二极管 D_s,以消除在局部阴影条件下,个别光伏组件的“热区效应”,提高阴影时的电流畅通;同时,为了防止并联支路之间形成环流而引起的电能到送,一般串联防逆二极管 D_p 后再并联。

在局部阴影条件下,光伏阵列的电压-电流(U-I)、电压-功率(U-P)曲线受旁路二极管和阻塞二极管的影响较大,出现多阶多峰的现象[18]。下面将以带旁路二极管的光伏组件模型为基础,得到局部阴影条件下的含旁路二极管的光伏组件

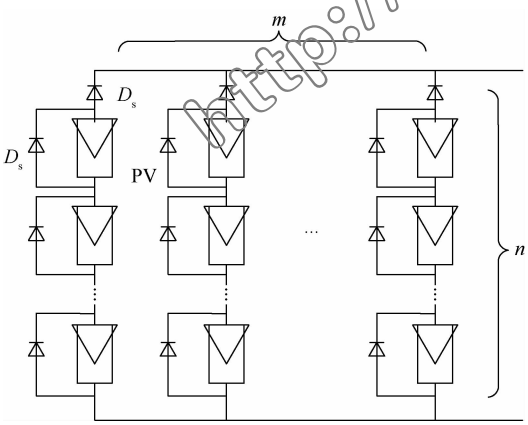


图 1 光伏阵列结构

Fig. 1 Structure of photovoltaic array

工程数学模型表达式:

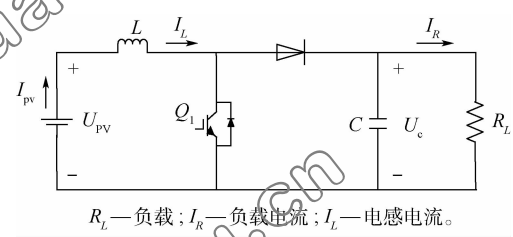
$$I_{pv}=\begin{cases}I_{sc}\left[1-C_1\left(e^{U_{pv}/(C_2U_{oc})}-1\right)\right] & I_{pv}\leqslant I_{sc}\\ I_{sc}-(U_{pv}+U_{th})/R_d & I_{pv}>I_{sc}\end{cases}\quad(1)$$

式中:$C_1=(1-I_m/I_{sc})\,e^{-U_m/(C_2U_{oc})}$,$I_m$ 为最大功率点电流值,I_{sc} 为短路电流,$C_2=(U_m/U_{oc}-1)\cdot[\ln(1-I_m/I_{sc})]^{-1}$,$U_m$ 为最大功率点电压值,U_{oc} 为开路电压;I_{pv} 与 U_{pv} 分别为带旁路二极管光伏组件的电流与电压;U_{th} 为旁路二极管的阈值电压;R_d 为旁路二极管导通等效电阻。

1.2 光伏阵列 GMPPT 的电路实现

目前常用于光伏发电系统中进行 MPPT 的电路是 Boost 电路,Boost 电路具有直流升压的能力,在进行 MPPT 的同时能够减少光伏阵列组串个数,有效地提高其利用率,降低发电成本[19]。

Boost 电路的原理图如图 2 所示。Boost 电路由开关管 Q_1、电感 L、电容 C 组成。Boost 电路的作用是将电压 U_{PV} 升压到 U_c,U_{PV} 为光伏阵列的输出电压,U_c 为 Boost 电路的输出电压。



R_L—负载;I_R—负载电流;I_L—电感电流。

图 2 Boost 电路原理

Fig. 2 Principle of Boost circuit

在连续导电模式下,电路工作模式根据开关管状态分为 2 个阶段。在开关管 Q_1 导通期间,电感电流 I_L 线性上升,电感处于储能状态,负载所需能量来源于电容;在开关管 Q_1 关断期间,由于电感电流不能突变,电感电流通过二极管向电容和负载释放能量。根据电感伏秒平衡特性和电容安秒平衡特性,可以推出:

$$\begin{cases}U_R=U_{pv}/(1-D)\\ I_L=I_R/(1-D)\end{cases}\quad(2)$$

式中:U_R 为负载电压;I_R 为负载电流;D 为 Boost 电路的占空比。。

从 Boost 的输入端看,即光伏电池输出端,利用戴维南等效原理,解得 Boost 电路等效阻抗为

$$R_{eq}=\frac{U_{pv}}{I_L}=(1-D)^2R_L\quad(3)$$

结合电路理论及式(3)形式可看出,光照、温度一定的前提下,光伏电池的输出电压、电流以及功率可以由 Boost 的占空比 D 决定。换而言之,MPPT 算法即对变量 D 的寻优过程。

http://bhxb.buaa.edu.cn

2　局部阴影条件下的 GMPPT 算法实现

2.1　局部阴影条件下常规方法失效分析

以本文模拟的 3 种光照条件的 *U-I* 和 *U-P* 曲线为例,如图 3 所示,说明局部阴影条件下常规方法 GMPPT 失效原因。

选择 3 块光伏电池板串联,模拟 3 种光伏电池工况,即标准光照、遮蔽情况 1 和遮蔽情况 2(以下简称为“遮蔽 1”和“遮蔽 2”),并采用相同结构和光照条件并联两路,构成 3×3 光伏阵列,具体光照条件如表 1 所示。为模拟复杂遮蔽工况,设置每一块板采用均分的 2 路光照模式,设置为 G_{11}、G_{12}、G_{21}、G_{22}、G_{31}、G_{32}。光照变化顺序为标准光照条件,在 0.5 s 发生遮蔽 1,在 1.1 s 发生遮蔽 2。

图 3 中曲线 1 表示在标准光照条件下,MPPT 点所对应的等效电阻负载特性 *U-I* 和 *U-P* 曲线图。*A* 为标准光照条件下的最大功率点,*B* 为遮蔽 1 下的最大功率点,*C* 为遮蔽 2 的最大功率点。

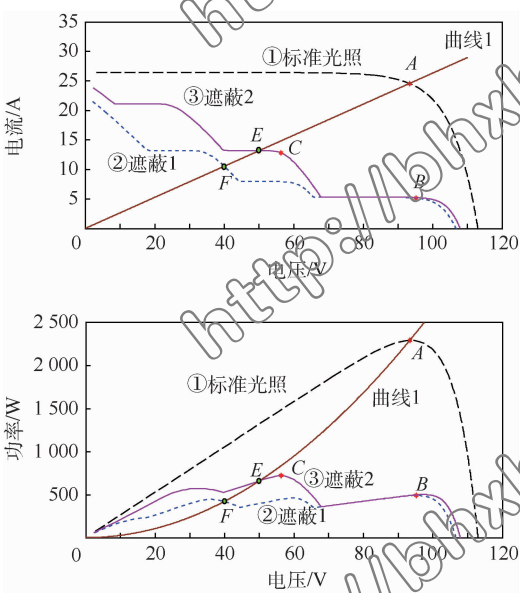


图 3　不同光照条件下,光伏输出 *U-I* 和 *U-P* 曲线

Fig. 3　Photovoltaic output *U-I* and *U-P* curves under different illumination conditions

表 1　不同工况下光照强度

Table 1　Illumination intensity under different conditions

光照模式	光照强度/(W·m^{-2})		
	标准光照	遮蔽 1	遮蔽 2
G_{11}	1 000	1 000	1 000
G_{12}	1 000	1 000	1 000
G_{21}	1 000	500	800
G_{22}	1 000	300	500
G_{31}	1 000	200	200
G_{32}	1 000	200	200

1)当光照条件由标准光照条件变为遮蔽 2 时,对应功率点将从 *A* 变换到 *E*,此时若采用传统优化算法,如观察扰动法、爬山法等,可以寻优找到此光照条件下的最大功率点 *C*。

2)当光照条件由标准光照条件变为遮蔽 1 时,对应的功率点将从 *A* 变化到 *F*,若此时采用传统的寻优算法,难以跟踪到最大功率点 *B*。

故采用经典寻优算法难以解决局部阴影下的 GMPPT 问题,即多峰问题。传统的寻优算法很容易失效,利用全局搜索能力强的优化算法,是解决该问题的主要手段。

2.2　基于 δ 势阱的量子粒子群算法

根据 2.1 节的分析结论可知,遮蔽条件下光伏 GMPPT 问题,传统经典的优化算法无法满足复杂遮蔽的工况要求,故需要建立简单易实现、全局搜索能力强、防止搜索早熟的优化算法完成。GMPPT 问题描述如式(4)所示。

$$\begin{cases} \max \quad P_{\text{out}}(D) \\ \text{s.t.} \quad D \in [a,b] \end{cases} \tag{4}$$

式中:$P_{\text{out}}(D)$表示占空比为 D 时,光伏电池系统的输出功率;a 为 D 的下限;b 为 D 的上限。

基于 δ 势阱的量子粒子群优化(QPSO)算法[20],是一种引入量子行为改进粒子群算法,算法参数少易于实现,量子粒子进化过程具有强不确定性,粒子以某种概率出现在可行空间的任意位置,并通过量子粒子平均位置进行演化过程,大大提高算法的全局搜索能力,有效地抑制早熟现象,符合遮蔽条件下光伏 GMPPT 问题需求,算法流程如图 4 所示,具体实现如下:

Step 1　令迭代次数 $g=0$,初始化参数及粒子群中每一个粒子所代表的当前占空比 $D_i(0)$,并记录粒子的最优位置 $P_i(0)=D_i(0)$和全局最优占空比 $G_i(0)$。

Step 2　根据式(5)计算粒子群中平均最优占空比为

$$m_{\text{best}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}P_i \tag{5}$$

式中:N 为粒子数。

Step 3　根据式(6),更新每一个粒子所代表的占空比 $D_i(g)$。

$$D_i(g+1)=\theta_i P_i(g)+(1-\theta_i)G(g)\pm \beta\left|m_{\text{best}}-D_i(g)\right|\ln(1/u_i)。 \tag{6}$$

式中:u_i 和 θ_i 为第 i 个粒子更新产生的 2 个随机数;β 为收缩-扩张系数。随机数 θ_i 决定第 i 个粒子向自身历史最优值和全局最优值运动的权重。随机数u_i决定了粒子向平均最优位置运动的

http://bhxb.buaa.edu.cn

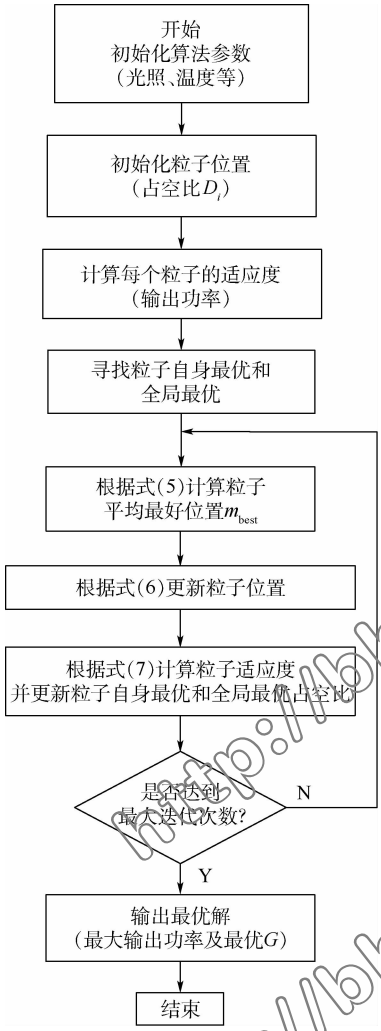


图 4 基于 δ 势阱的 QPSO 算法流程图

Fig. 4 Flowchart of QPSO algorithm based on δ-potential well

幅度,正负号表示运动方向,同样亦为随机产生。2 个随机数以及随机正负号大大增加了粒子在空间中运动的多样性。β 是 QPSO 算法中唯一控制参数,决定了每一个粒子收敛于统一最优解的快慢。

Step 4 计算更新后的粒子适应度(即光伏电池输出功率值),利用式(5)更新每一个粒子自身历史最优占空比 $P_i(g)$ 以及当前全局最优占空比 $G(g)$。

$$P_i(g)=\begin{cases}D_i(g) & f(D_i(g))>f(P_i(g-1))\\ P_i(g-1) & f(D_i(g))\leqslant f(P_i(g-1))\end{cases} \tag{7}$$

Step 5 分析搜索结果是否满足截止条件,若满足转入 Step 6,否则令 $g=g+1$ 再转入 Step 2(本文设置最大迭代次数为截止条件)。

Step 6 输出最优占空比 G,终止寻优过程。

3 算例分析

为验证上述算法,本文基于 MATLAB/SIMSCAPE 平台中的 Solar Cell 单元搭建光伏电池板,每一块光伏电池板采用 72 个 Solar Cell 串联,每 8 个并联一个旁路二极管,即 36 个 Solar Cell 接受 1 种光照条件,每块光伏板参数如表 2 所示,P_m 为最大功率。

表 2 单块光伏电池板参数

Table 2 Parameters of single photovoltaic cell panel

参数	数值
U_{oc}/V	37.67
I_{sc}/A	8.81
P_m/W	254.9
U_m/V	31.8
I_m/A	8.18

3.1 仿真工况及参数说明

Boost 电路参数及算法参数如表 3 所示。

表 3 Boost 电路及算法参数

Table 3 Boost circuit and algorithm parameters

参数	数值
负载电阻 R/Ω	200
粒子数 N	5
迭代次数 G_{max}	20
收缩-扩张系数 β	1.2
自变量范围$[D_{min},D_{max}]$	[0,1]

3.2 算例结果及分析

分别利用 QPSO 算法和标准 PSO 算法进行 GMPPT 实验 20 次,在遮蔽 1 下,2 种算法的 5 个粒子运动轨迹如图 5 所示,搜索结果如图 6、图 7 及表 4 所示,GMPPT 效果如图 8 所示。

为定量比较 2 种算法,本文定义指标收敛百分比 σ,用以衡量 GMPPT 寻优算法优劣情况。

定义 1 本文定义优化算法最优值与真实最优值的百分比,称之为收敛精度 ξ。

定义 2 N_0 次实验中,若收敛精度 ξ 大于给定阈值 η(本文设置 $\eta=99\%$)次数为 n,称 n 与 N_0 的比值用百分比表示为收敛准确率 σ。

图 5 所示为标准 PSO 与 QPSO 算法搜索轨迹对比,随机选取 5 个粒子进行运动轨迹分析,从图 5 中可以看出,基于 δ 势阱的 QPSO 算法中 5 个粒子在保证在自变量范围内大范围变化同时,最终均收敛至全局最大点,保证粒子的一致性。在保证粒子收敛的前提下,QPSO 算法保证了算法的多样性,有效防止早熟现象发生。

从图 6 和表 4 中可以看出,基于 δ 势阱的 QPSO 算法的收敛准确率高于标准 PSO 算法。根据图 6 的收敛曲线可以看出,基于 δ 势阱的 QPSO 算法的收敛速度更快。故从搜索快速性和准确性方面均体现出 QPSO 算法的优越性。

http://bhxb.buaa.edu.cn

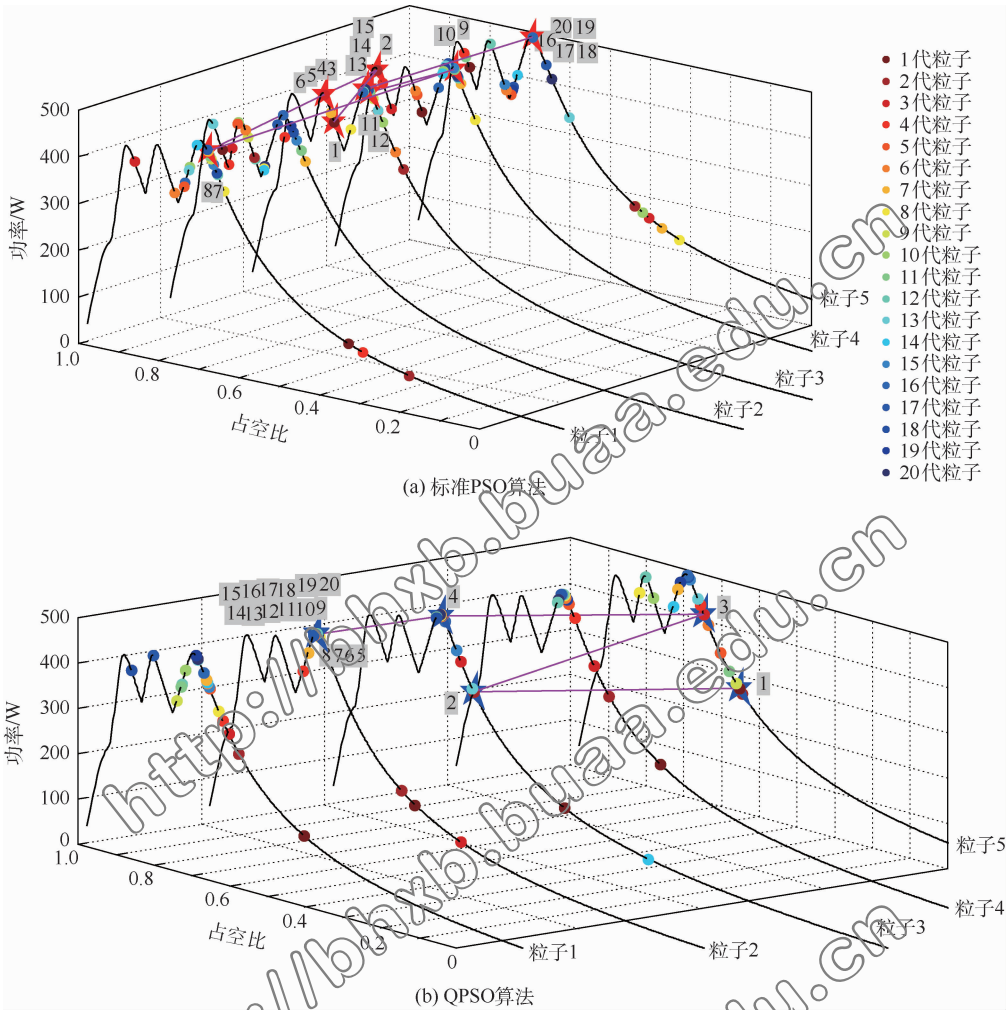


图 5　标准 PSO 和 QPSO 算法在遮蔽 1 下的搜索轨迹对比

Fig. 5　Comparison of search trajectories between standard PSO and QPSO algorithms under shaded 1

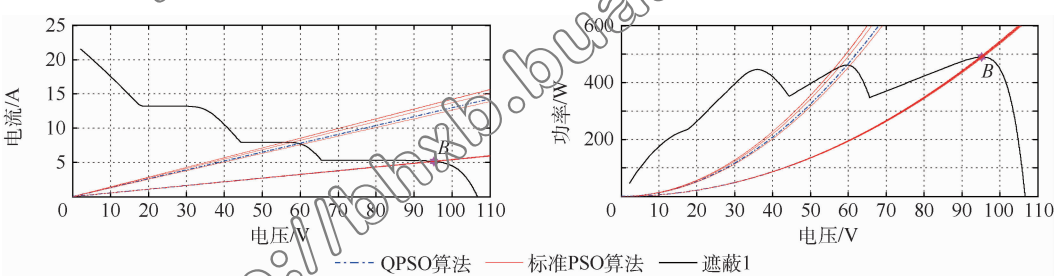


图 6　QPSO 和标准 PSO 算法在遮蔽 1 下的搜索结果对比

Fig. 6　Comparison of search results between QPSO and standard PSO algorithms under shaded 1

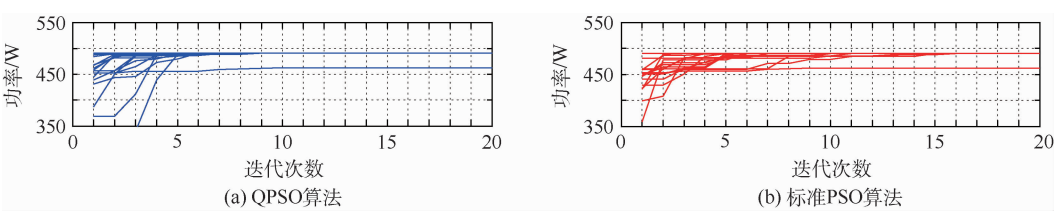


图 7　QPSO 和标准 PSO 算法在遮蔽 1 下的全局最优值曲线对比

Fig. 7　Comparison of global optimum curves between QPSO and standard PSO algorithms under shaded 1

http://bhxb.buaa.edu.cn

表 4 收敛准确率 σ 对照

Table 4 Comparison of convergence accuracy rate σ

算法	σ/%		
	标准光照	遮蔽 1	遮蔽 2
QPSO	100	95	100
标准 PSO	100	80	90

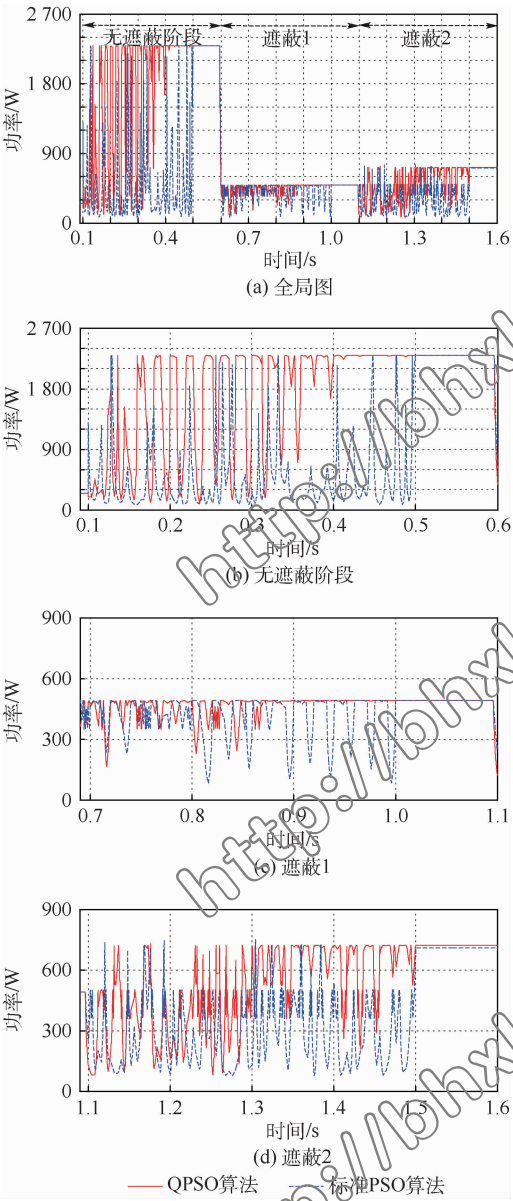


图 8 QPSO 和标准 PSO 算法 GMPPT 效果图

Fig. 8 Effect pictures of GMPPT by QPSO and standard PSO algorithms

从图 8 中可以看出,不论单峰问题(标准光照条件)还是多峰问题(遮蔽 1 和 2),相较于标准 PSO 算法,QPSO 均可以更快地收敛至全局最优解,实现 MPPT 的要求;根据图 8(d)的稳态值可以看出其精度亦在标准 PSO 算法以上。QPSO 算法在进行 GMPPT 时,快速的动态过程与高跟踪精度的稳态过程,有效地提高光伏利用率,避免能源浪费。

4 结 论

本文针对局部阴影条件下,光伏电池 GMPPT 问题展开研究,首先,通过分析局部阴影对目前常用的 GMPPT 算法的影响,分析其失效原因;然后,构建全局搜索能力强的 QPSO 算法,实现 GMPPT,得到结论如下:

1)光伏局部阴影条件下的 GMPPT 问题,是典型的多峰值寻优问题。需采用全局搜索能力强的优化算法,如群智能优化算法。

2)引入量子行为的改进粒子群算法,可以很好地解决上述多峰问题,寻优准确程性、快速性以及多样性均优于标准粒子群算法,适用于解决局部阴影下的 GMPPT 问题。

3)本文提出的 QPSO 算法,参数少,搜索快,全局搜索能力强,防早熟效果明显,适用于 GMPPT 实现。

参考文献(References)

[1] 王成山,王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2008,32(20):1-4.
WANG C S,WANG S X. Study on some key problem related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(20):1-4(in Chinese).

[2] 雷金勇,谢俊,甘德强. 分布式发电供能系统能量优化及节能减排效益分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(23):29-36.
LEI J Y,XIE J,GAN D Q. Optimization of distributed energy system and benefit analysis of energy saving and emission reduction[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(23):29-36(in Chinese).

[3] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.
QIAN K J,YUAN Y,SHI X D,et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(29):11-15(in Chinese).

[4] 王丰,吴新科,LEE F C. 嵌入式智能光伏模块的最大功率输出统一控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(21):81-89.
WANG F,WU X K,LEE F C. Application of unified output MPPT control in DMPPT PV systems[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(21):81-89(in Chinese).

[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.
LIU X Y,QI X M,ZHENG S S,et al. Model and analysis of photovoltaic array under partial shading[J]. Power System Technology,2010,34(11):192-197(in Chinese).

[6] 吴春华,周笛青,李智华,等. 光伏组件热斑诊断及模糊优化控制方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(36):50-61.
WU C H,ZHOU D Q,LI Z H,et al. Hot spot detection and fuzzy optimization control method of PV module[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(36):50-61(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

[7] 张忠政,程晓舫. 太阳电池最大功率恒压跟踪研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(26):4521-4527.
ZHANG Z Z,CHENG X F. Constant voltage tracking research adopted in solar cell maximum power[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(26):4521-4527(in Chinese).

[8] 戚军,张晓峰,张有兵,等. 考虑阴影影响的光伏阵列仿真算法研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(32):131-138.
QI J,ZHANG X F,ZHANG Y B,et al. Study on simulation algorithm of PV array considering shade effect[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(32):131-138(in Chinese).

[9] AHMED J,SALAMN Z. A critical evaluation on maximum power point tracking methods for partial shading in PV systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2015,47:933-953.

[10] 孙黎霞,李云峰,郑丹丹,等. 局部阴影下光伏阵列非机理建模[J]. 电网技术,2015,39(5):1186-1191.
SUN L X,LI Y F,ZHENG D D,et al. Non-mechanism modeling of photovoltaic array under partial shade[J]. Power System Technology,2015,39(5):1186-1191(in Chinese).

[11] RIZZO S A,SCELLBA G. ANN based MPPT method for rapidly variable shading conditions[J]. Applied Energy,2015,145:124-132.

[12] 王丰,孔鹏举,LEE F C,等. 基于分布式最大功率跟踪的光伏系统输出特性分析[J]. 电工技术学报,2015,30(24):127-134.
WANG F,KONG P J,LEE F C,et al. Output characteristic analysis of distributed maximum power point tracking PV system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(24):127-134(in Chinese).

[13] 李善寿,张兴,张鸿恺,等. 基于功率闭环控制与 PSO 算法的全局 MPPT 方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(28):4809-4816.
LI S S,ZHANG X,ZHANG H K,et al. Global MPPT method based on power closed-loop control and PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(28):4809-4816(in Chinese).

[14] 张永革,石季英,张文,等. 复杂遮阴条件下光伏系统 MPPT 控制改进 PSO 算法仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(S1):39-46.
ZHANG Y G,SHI J Y,ZHANG W,et al. Research of improved PSO in MPPT control of PV systems under complex shading condition[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(S1):39-46(in Chinese).

[15] 祝青,张兴,李善寿,等. 一种基于功率闭环的动态多峰值最大功率点跟踪算法研究与测试[J]. 中国电机工程学报,2016,36(5):1218-1227.
ZHU Q,ZHANG X,LI S S,et al. Researches and tests of a dynamic multi-peak maximum power point tracking algorithm based on power loop[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(5):1218-1227(in Chinese).

[16] 唐磊,曾成碧,苗虹,等. 基于蒙特卡洛的光伏多峰最大功率跟踪控制[J]. 电工技术学报,2015,30(1):170-176.
TANG L,ZENG C B,MIAO H,et al. A novel maximum power point tracking scheme for PV systems under partially shaded conditions based on Monte Carlo algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(1):170-176(in Chinese).

[17] 张明锐,蒋利明,孙华,等. 基于免疫细菌觅食算法的大容量光伏阵列 GMPPT 算法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):104-111.
ZHANG M R,JIANG L M,SUN H,et al. Large-capacity photovoltaic array's GMPPT technology based on the immune bacterial foraging optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(1):104-111(in Chinese).

[18] 田琦,赵争鸣,邓英,等. 光伏电池反向模型仿真分析及实验研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(23):121-128.
TIAN Q,ZHAO Z M,DENG Y,et al. Simulation and experimental study about reverse model of photovoltaic cells[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(23):121-128(in Chinese).

[19] BALATO M,VITELLI M. A hybrid MPPT technique based on the fast estimate of the maximum power voltages in PV applications[C]// 2013 8th International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). Piscataway,NJ:IEEE Press,2013:1-7.

[20] SUN J,FENG B,XU W B. Particle swam optimization with particles having quantum behavior[C]// Congress on Evolutionary Computation. 2004. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004: 325-331.

作者简介:

陈明轩　男,博士研究生。主要研究方向:电力电子技术在新能源领域应用、分布式能源系统与控制。

武建文　男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:电力电子技术、智能电器。

马速良　男,博士研究生。主要研究方向:微电网群控制、电力电子变换器建模及非线性控制、储能技术及控制。

黄炼　男,硕士研究生。主要研究方向:新能源接入、分布式能源系统与控制、电力电子技术。

http://bhxb.buaa.edu.cn

Photovoltaic multi-peak output characteristics and GMPPT control under complex shaded condition

CHEN Mingxuan, WU Jianwen*, MA Suliang, HUANG Lian

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Aimed at solving the failure problem of the maximum power point tracking (MPPT) algorithm caused by partially shaded condition in the photovoltaic power generation system, a global maximum power point tracking (GMPPT) algorithm based on δ-potential well is proposed. Based on the photovoltaic multi-peak output characteristics when the illumination intensity is changing, the reason of searching blind spot in conventional MPPT algorithm is analyzed in terms of maximum power point transition, and the necessity of GMPPT optimization is explained. A quantum-behaved particle swarm optimization (QPSO) algorithm is proposed to improve the particle diversity and increase the search speed and convergence accuracy. The algorithm was verified by MATLAB/SIMSCAPE and compared with the standard particle swarm optimization (PSO) algorithm. The results show that the proposed algorithm can track the global maximum power point effectively with fast searching speed, reducing the dependency on parameters and avoiding premature convergence of the algorithm.

Keywords: photovoltaic power generation; photovoltaic array; partially shaded; global maximum power point tracking (GMPPT); quantum-behaved particle swarm optimization (QPSO) algorithm

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2016-06-03; **Accepted**: 2016-09-21; **Published online**: 2016-11-02 12:04

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20161102.1204.001.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51377007); Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20131102130006)

* **Corresponding author**. E-mail: wujianwen@vip.sina.com