

改进 ODPSO 算法在光伏 MPPT 中的应用研究

刘海鹏, 方奇文, 王蒙, 何艳苹, 念紫帅, 刘晓茜

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500)



摘要: 光伏发电系统的输出功率具有明显的非线性特性, 易受外界环境因素的影响, 现有的最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)技术的追踪精度和追踪时间都有待进一步提高。对此, 提出了一种结合了整体分布(overall distribution, OD)算法和粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法的 MPPT 算法(改进 ODPSO-MPPT 算法), 以解决全局最大功率点追踪问题。对传统 PSO-MPPT 算法的速度分量加以约束, 使其避免陷入局部最优并能准确地追踪最大功率, 同时优化传统 PSO 算法的惯性权重并融合 OD 算法, 使其能在更短时间内找到全局最大功率点。最后, 搭建光伏发电系统仿真模型对所提算法进行验证。仿真结果表明, 改进 ODPSO-MPPT 算法在标准测试条件和局部遮阴条件下均能更快速准确地追踪到全局最大功率。

关键词: 最大功率点追踪; 粒子群优化算法; 整体分布算法; 约束因子; 惯性权重

中图分类号: TM618

文献标识码: A

Application of Improved ODPSO Algorithm in Photovoltaic MPPT

LIU Haipeng, FANG Qiwen, WANG Meng, HE Yanping, NIAN Zishuai, LIU Xiaoqian

(School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The output power of photovoltaic power generation system has obvious nonlinear characteristics and is easily affected by external environmental factors, and the tracking accuracy and tracking time of the existing maximum power point tracking (MPPT) technology need to be further improved. Therefore, an MPPT algorithm (improved ODPSO-MPPT algorithm), which combines overall distribution (OD) algorithm and particle swarm optimization (PSO) algorithm, is proposed to solve the problem of global maximum power point tracking. The velocity component of the traditional PSO-MPPT algorithm is constrained, so that the PSO-MPPT algorithm can avoid falling into local optimal and track the maximum power accurately. Meanwhile, the inertia weight of the traditional PSO algorithm is optimized and OD algorithm is fused, so that the PSO-MPPT algorithm can find the global maximum power point in a shorter time. Finally, a simulation model of photovoltaic power generation system is built to verify the proposed algorithm. The simulation results show that the improved ODPSO-MPPT algorithm can track the global maximum power quickly and accurately under both standard test conditions and partial shading conditions.

Key words: Maximum power point tracking; particle swarm optimization algorithm; overall distribution algorithm; constraint factor; inertia weight

1 引言

目前, 常用的最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)技术可划分为传统的 MPPT 技术和基于智能优化算法的 MPPT 技术。传统的 MPPT 技术有恒压法、电导增量法和爬山法等, 能够实现标准测试条件^[1](standard test conditions, STC)

下光伏发电系统的 MPPT。当光伏发电系统工作在部分遮阴条件(partial shading conditions, PSC)下时, 光伏发电系统的输出具有明显的非线性, 输出功率与电压呈现多峰值特性, 传统的 MPPT 技术不能有效识别出输出功率的局部最优功率和全局最优功率。

收稿日期: 2022-08-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62062048)

作者简介: 刘海鹏(1982-), 男, 山西晋中人, 博士, 高级实验师, 主要从事电网优化、智能优化算法等方面的科研工作(本文通信作者, Email: 42227324@qq.com)。

粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法是一种能够有效处理全局优化问题的群智能优化算法^[2]。PSO 算法具有简单、易于实现、参数少的特点,被成功地应用于解决各工程领域中的全局优化问题。在 PSC 下,PSO 算法只有在外界环境变化非常缓慢的情况下才能够对光伏发电系统输出功率的全局最大功率点(global maximum power point, GMPP)进行追踪^[3,4]。文献[1]也提到了 PSO 算法存在不收敛、捕获不到 GMPP、精度低等问题。

针对上述问题,许多学者对 PSO 算法进行了改进,使 PSO 算法能够更好地处理 MPPT 问题。文献[5]提出了一种改进 PSO 算法并在动态气候条件下进行了测试,该算法能够捕获到 GMPP,精度得到了提高。部分学者将 PSO 算法与其他算法相融合,结合两者的优点以改善 MPPT 技术。文献[6]将 PSO 算法与整体分布(overall distribution, OD)算法相结合,提出了一种新的 MPPT 技术。该方法在寻优前期利用 OD 算法定位 GMPP 附近区域,在寻优后期采用 PSO 算法快速追踪到 GMPP。虽然 OD 算法具有参数少、实现简单的特点,且能够快速收敛到 GMPP 附近区域,但也存在陷入局部最优、将区域定位在局部峰值附近的现象。

基于以上研究,本文根据 PSO 算法和 OD 算法的寻优特性,提出了一种改进 ODPSO-MPPT 算法。首先,加入约束因子对 PSO 算法的速度向量进行约束;其次,引入了自适应递变规则动态改变 PSO 算法的惯性权重,对惯性权重进行优化;再次,对 OD 算法进行改进,并将 PSO 算法与改进后的 OD 算法相融合;最后,在 MATLAB/Simulink 中对改进 ODPSO-MPPT 算法进行仿真实验。

2 光伏发电系统的电气特性

光伏电池作为光伏发电系统的输出端,利用光伏效应产生输出电流,在整个发电系统中发挥极其重要的作用。只有清晰地了解光伏发电的工作原理,洞悉光伏电池工作过程中的影响因素,才能深入地研究光伏发电系统 MPPT 技术。一个光伏组件由多个光伏电池组成,可以表示为一个等效电路,如图 1 所示^[7]。图 1 中, S 为光照强度。

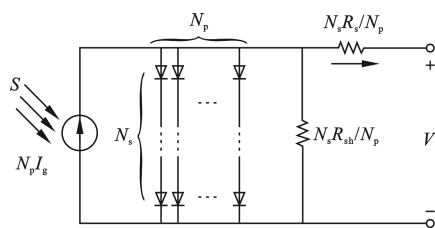


图 1 光伏组件的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of a photovoltaic module

光伏组件的输出电流与输出电压的关系如下:

$$I_{pv} = N_p I_g - N_p I_s \left(\exp \left(\frac{q}{AkT_c} \left(\frac{V_{pv}}{N_s} + \frac{R_s I_{pv}}{N_p} \right) \right) - 1 \right) - \frac{N_p V_{pv} / N_s + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中, I_{pv} 为光伏输出电流; I_g 为光伏电池产生的光生电流; I_s 为光伏电池产生的反向饱和电流; N_s 、 N_p 分别为串联、并联的光伏电池数量; q 为电子电荷, $q = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$; A 为二极管的理想因子; k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T_c 为绝对温度; V_{pv} 为光伏输出电压; R_s 和 R_{sh} 分别为光伏组件的等效串联电阻和等效并联电阻。

I_g 的计算公式为

$$I_g = (I_{sc} + k_i (T_c - T_{ref})) \frac{s}{1000} \quad (2)$$

式中, I_{sc} 为短路电流; k_i 为光伏电池短路电流温度系数; T_{ref} 为光伏电池额定运行温度; s 为光照强度。

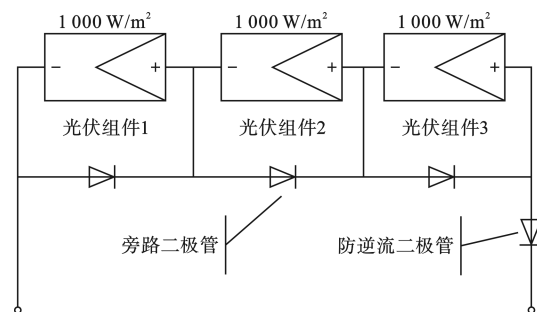
I_s 的计算公式为

$$I_s = I_{RS} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_{ref} - T_c} \right) \right) \quad (3)$$

式中, I_{RS} 为在额定光照强度和温度下的光伏电池反向饱和电流; E_g 为光伏电池半导体的带隙能。

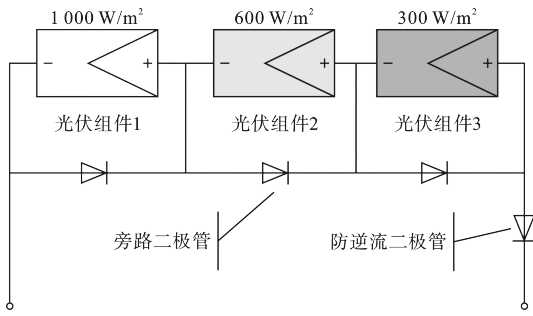
以上参数命名参考了文献[8]。由式(1)至式(3)可得,光伏组件产生的电流主要取决于光伏组件接收到的温度和光照强度。

在光伏发电系统中,每个光伏阵列由多个光伏组件串联和并联而成,且光伏发电系统中有 2 种二极管,分别是具有不同功能的旁路二极管和防逆流二极管^[9]。串联防逆流二极管可防止电流回流;并联旁路二极管可抑制热传导效应,降低遮挡造成的功耗。每块电池板可以在同一时间接收不同的太阳辐射和温度,所以当光伏阵列工作在 PSC 下时,其功率-电压特性曲线会出现多个峰值。在 STC 和 PSC 下,光伏阵列模型及其功率-电压特性曲线如图 2 所示。

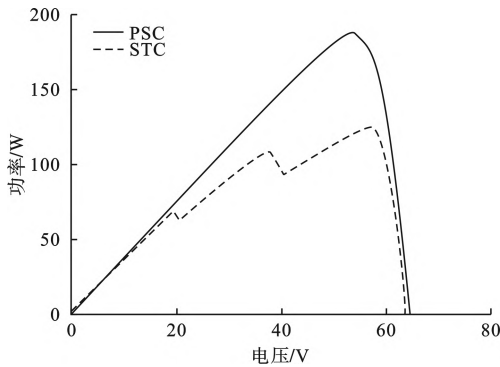


(a) STC 下光伏阵列模型

(a) Photovoltaic array model under STC



(b) PSC 下光伏阵列模型
(b) Photovoltaic array model under PSC



(c) STC 和 PSC 下功率-电压特性曲线
(c) Power-voltage characteristic curves under STC and PSC

图 2 光伏阵列模型及其功率-电压特性曲线
Fig. 2 Photovoltaic array models and their power-voltage characteristic curves

由图 2(c)可知，在 STC 下功率-电压特性曲线有且仅有 1 个峰值，即只有 1 个最大功率点；在 PSC 下功率-电压特性曲线存在 3 个峰值，其中 2 个为局部最大功率点。为避免系统工作在局部最大功率点，需利用优化算法对其加以控制。

3 基于改进 ODPSO 算法的光伏发电系统 MPPT 设计

3.1 光伏发电系统 MPPT 结构

本文采用典型的基于 Boost 电路的光伏发电系统，其结构如图 3 所示。

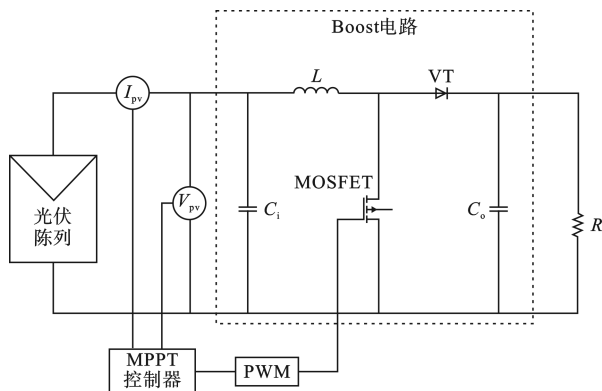


图 3 基于 Boost 电路的光伏发电系统结构
Fig. 3 Structure of photovoltaic power generation system based on Boost circuit

利用改进 ODPSO 算法改变电路中开关管的占空比，以追踪到光伏发电系统的 GMPP。光伏阵列接收到光照和温度后会输出一定的电压和电流，采集到的输出电压和电流被输送到 MPPT 控制器，MPPT 控制器利用改进 ODPSO 算法计算占空比，然后利用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)单元控制金属-氧化物-半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET)开关管以实现 MPPT。

3.2 PSO-MPPT 算法分析及参数设置

3.2.1 PSO 算法

PSO 算法是 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年基于鸟群觅食行为提出的一种群体智能算法^[10]。基本粒子群的数学模型如下：

$$v_i^{t+1} = w \cdot v_i^t + c_1 \cdot r_1 (p_i^t - x_i^t) + c_2 \cdot r_2 (p_g^t - x_i^t) \quad (4)$$

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

式中， v_i 和 x_i 分别为粒子 i 的速度和位置，且 $v_i \in [-v_{max}, v_{max}]$ ； t 为当前迭代次数； w 为惯性权重，一般取 $[0.9, 1.2]$ ； c_1 和 c_2 为学习因子； r_1 和 r_2 为均匀分布于 $[0, 1]$ 区间的随机数； p_i^t 为粒子 i 在第 t 次迭代时的个体最优位置； p_g^t 为种群在第 t 次迭代时的全局最优位置。

3.2.2 PSO-MPPT 算法的步骤

PSO-MPPT 算法的步骤如下。

步骤 1 对粒子的数量及位置、最大迭代次数和求解空间的上下限进行初始化，其中粒子的位置为占空比。

步骤 2 对光伏阵列的输出电压和输出电流进行采样，计算各粒子所对应的输出功率，将其作为适应度值，找到当前种群的个体最优适应度值和全局最优适应度值。

步骤 3 按照式(4)和式(5)更新粒子的位置和速度。

步骤 4 再次计算粒子的适应度值，并更新个体最优适应度值和全局最优适应度值。

步骤 5 判断是否满足终止条件。若满足，则输出对应结果；否则返回步骤 3，迭代次数加 1。

步骤 6 判断是否满足重启条件。若满足，则返回步骤 1，否则继续输出对应结果。

3.2.3 PSO-MPPT 算法的参数设置

① 粒子数量。

由文献[11]可知，若光伏阵列有 n 列，则其所对应的功率-电压特性曲线最多存在 n 个峰值。本文采用 3×1 的光伏阵列（见图 2），其对应的功率-电压特性曲线最多存在 3 个峰值，因此粒子数量设

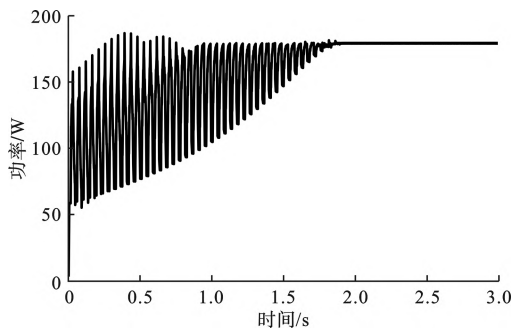
置为 3。

② 粒子的初始位置和初始速度。

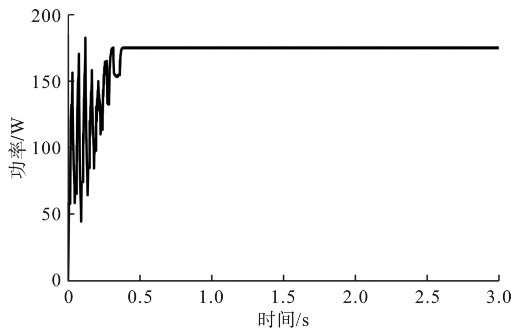
在 PSO-MPPT 算法中, 粒子个体即为占空比, 算法通过占空比控制电路中开关管, 进而控制光伏阵列的输出功率。因此, 求解空间范围设置为[0,1], 3 个粒子的初始位置分别取 0.2、0.5 和 0.8, 均匀分布在求解空间, 初始速度取[0,1]的随机数。

③ 最大速度。

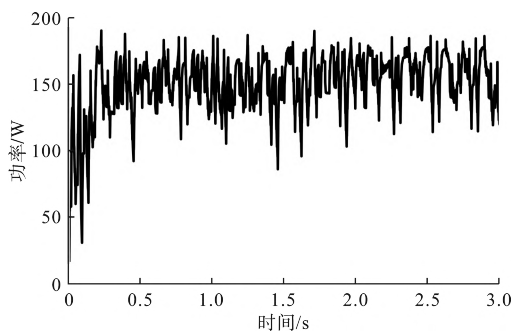
最大速度 v_{max} 对粒子在每次迭代中的最大偏移量有一定的约束作用。为了更直观地分析最大速度 v_{max} , 令 $w = c_1 = c_2 = 1$, 此时惯性权重和学习因子均可视为无关参数, PSO 算法的性能只与最大速度 v_{max} 有关。令最大速度 v_{max} 分别为 0.01、0.05、0.1, 在 PSC 下进行仿真, 结果如图 4、图 5 和表 1、表 2 所示。



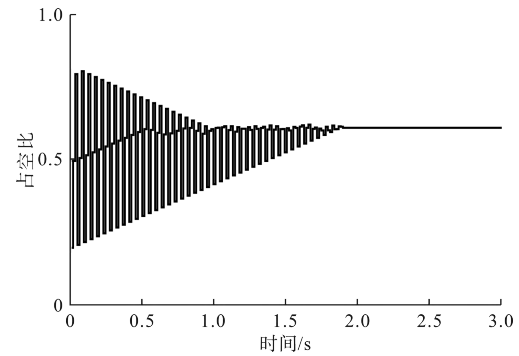
(a) v_{max} 为 0.01 时的功率曲线
(a) Power curve with v_{max} of 0.01



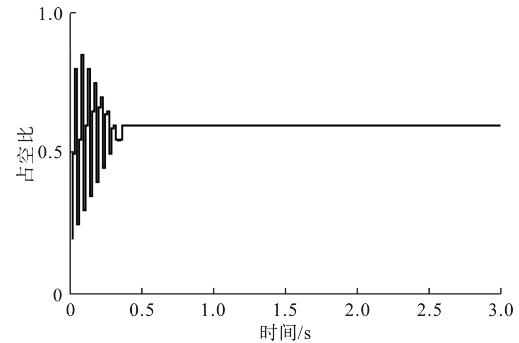
(b) v_{max} 为 0.05 时的功率曲线
(b) Power curve with v_{max} of 0.05



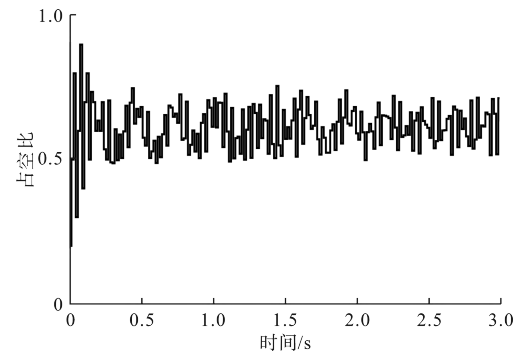
(c) v_{max} 为 0.1 时的功率曲线
(c) Power curve with v_{max} of 0.1



(d) v_{max} 为 0.01 时的占空比曲线
(d) Duty cycle curve with v_{max} of 0.01



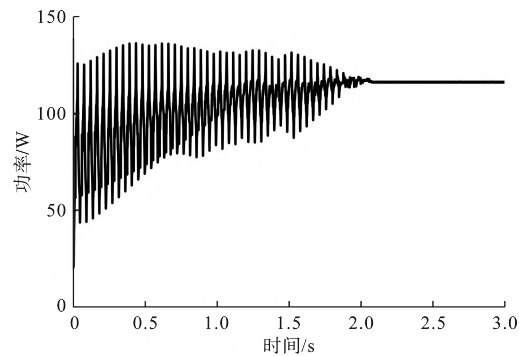
(e) v_{max} 为 0.05 时的占空比曲线
(e) Duty cycle curve with v_{max} of 0.05



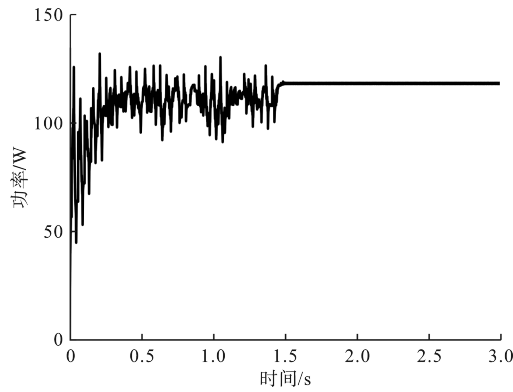
(f) v_{max} 为 0.1 时的占空比曲线
(f) Duty cycle curve with v_{max} of 0.1

图 4 不同最大速度设置及 STC 下 PSO-MPPT 算法的追踪曲线

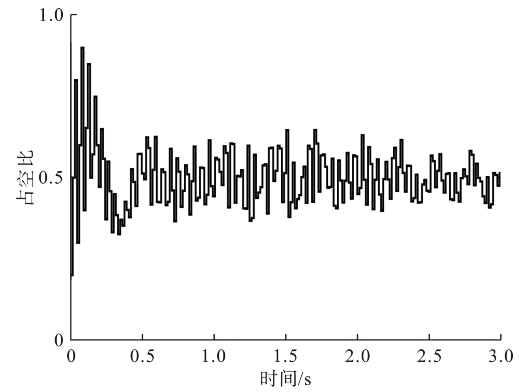
Fig. 4 Tracking curves of PSO-MPPT algorithm with different maximum speed settings and STC



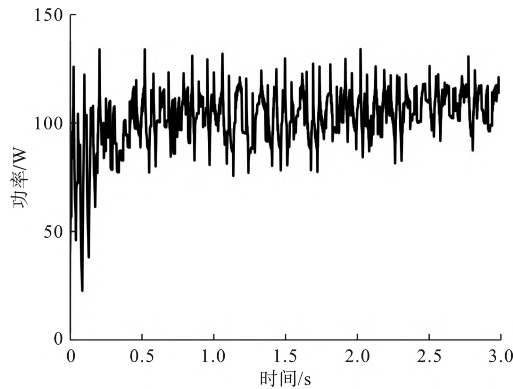
(a) v_{max} 为 0.01 时的功率曲线
(a) Power curve with v_{max} of 0.01



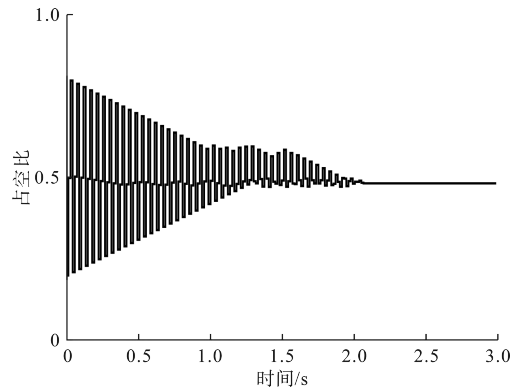
(b) v_{max} 为 0.05 时的功率曲线
(b) Power curve with v_{max} of 0.05



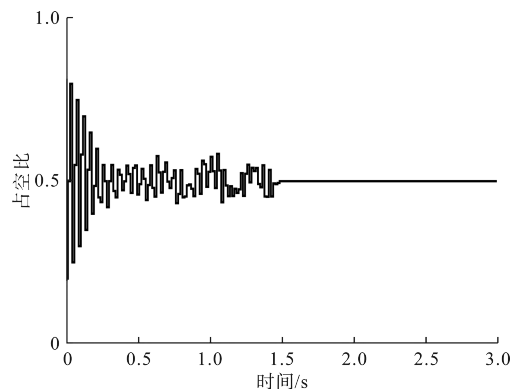
(f) v_{max} 为 0.1 时的占空比曲线
(f) Duty cycle curve with v_{max} of 0.1



(c) v_{max} 为 0.1 时的功率曲线
(c) Power curve with v_{max} of 0.1



(d) v_{max} 为 0.01 时的占空比曲线
(d) Duty cycle curve with v_{max} of 0.01



(e) v_{max} 为 0.05 时的占空比曲线
(e) Duty cycle curve with v_{max} of 0.05

图 5 不同最大速度设置及 PSC 下 PSO-MPPT 算法的追踪曲线

Fig. 5 Tracking curves of PSO-MPPT algorithm with different maximum speed settings and PSC

表 1 不同最大速度设置及 STC 下 PSO-MPPT 算法的仿真结果

Tab. 1 Simulation results of PSO-MPPT algorithm with different maximum speed settings and STC

v_{max}	功率稳定值/W	占空比	追踪时间/s
0.01	178.9	0.614 8	1.91
0.05	176.5	0.600 0	0.40
0.1	—	—	—

表 2 不同最大速度设置及 PSC 下 PSO-MPPT 算法的仿真结果

Tab. 2 Simulation results of PSO-MPPT algorithm with different maximum speed settings and PSC

v_{max}	功率稳定值/W	占空比	追踪时间/s
0.01	116.5	0.483 6	2.09
0.05	118.5	0.500 0	1.53
0.1	—	—	—

由图 4 和图 5 可知，最大速度 v_{max} 为 0.01 时，PSO-MPPT 算法能够追踪到 GMPP，但寻优前期的收敛速度较慢。最大速度 v_{max} 为 0.05 时，PSO-MPPT 算法在寻优前期具有较好的全局开发能力，但寻优后期的局部搜索能力较弱，精度较低。最大速度 v_{max} 为 0.1 时，寻优前期的全局开发能力较弱，占空比偏移量较大，PSO-MPPT 算法易错过真正的全局最优解；寻优后期的局部搜索能力也最弱，PSO-MPPT 算法无法追踪到 GMPP。

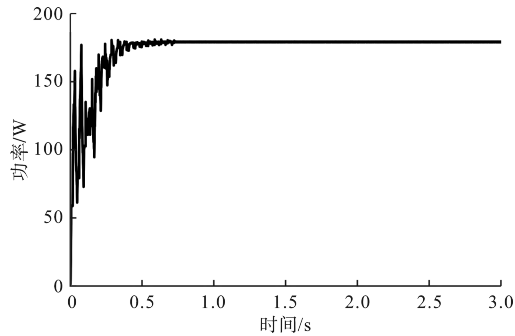
为了避免算法在求解过程中错过最优解，同时使算法具有良好的收敛性能，本文对最大速度 v_{max} 进行了一定的改进，具体如下：

$$v_{max} = \delta \times d_{max} \quad (6)$$

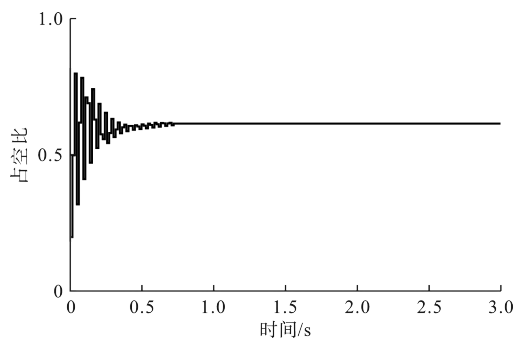
式中， δ 为约束因子， $\delta \in [0,1]$ ； d_{max} 为迭代前粒子间的最大距离。测试结果表明， δ 取 0.2 时，寻

优效果较好。

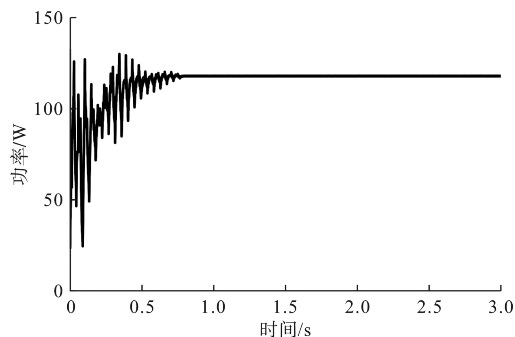
加入约束因子后,对 PSO-MPPT 算法进行仿真,结果如图 6 和表 3 所示。



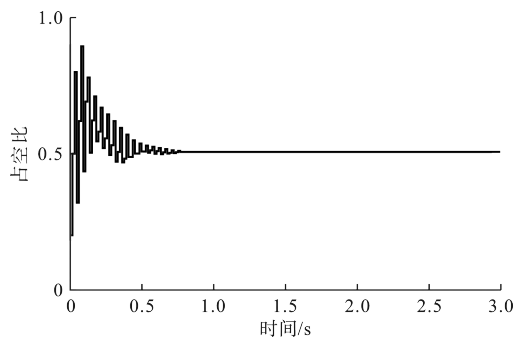
(a) STC 下功率曲线
(a) Power curve under STC



(b) STC 下占空比曲线
(b) Duty cycle curve under STC



(c) PSC 下功率曲线
(c) Power curve under PSC



(d) PSC 下占空比曲线
(b) Duty cycle curve under STC

图 6 加入约束因子后 PSO-MPPT 算法的追踪曲线
Fig. 6 Tracking curves of PSO-MPPT algorithm with constraint factor

表 3 加入约束因子后 PSO-MPPT 算法的仿真结果
Tab. 3 Simulation results of PSO-MPPT algorithm with constraint factor

光照条件	功率稳定值/W	占空比	追踪时间/s
STC	178.9	0.6184	0.75
PSC	118.1	0.5066	0.82

对比表 1、表 2 和表 3 的结果可知,对最大速度 v_{max} 进行改进后,无论是 STC 还是 PSC 下,PSO-MPPT 算法都能追踪光伏发电系统的 GMPP,并且 PSO-MPPT 算法的性能得到了提高。

④ 惯性权重和学习因子。

惯性权重 w 起到调节算法全局探测与局部搜索的作用。大的 w 侧重于提高算法的全局探测能力,小的 w 侧重于提高算法的小范围局部搜索能力。对于任何一种算法,求解初期侧重于全局探测,求解后期侧重于局部搜索。因此,使惯性权重遵循逐次递减的递变规则动态改变,更有利于提高算法的性能。本文构建了 3 种递变规则,其递变函数分别为

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

$$w = (w_{max} - w_{min}) \times \left(1 - \left(\frac{t}{t_{max}} \right)^\alpha \right)^{1/\alpha} + w_{min} \quad (8)$$

$$w = w_{max} \times \exp \left(\log \left(\frac{w_{min}}{w_{max}} \right) \times \frac{t}{t_{max}} \right) \quad (9)$$

式中, w_{max} 和 w_{min} 分别为惯性权重的最大值和最小值; t_{max} 为最大迭代次数,本文取 $t_{max} = 30$; α 为大于 1 的常数,本文取 $\alpha = 1.5$ 。

式(7)至式(9)的函数图像如图 7 所示。根据递变函数的曲线形态,式(7)、式(8)、式(9)的函数曲线依次划分为线性下降型、凸形下降型、凹形下降型。结合参考文献[12],本文取 $w_{max} = 1.2$ 、 $w_{min} = 0.4$ 。

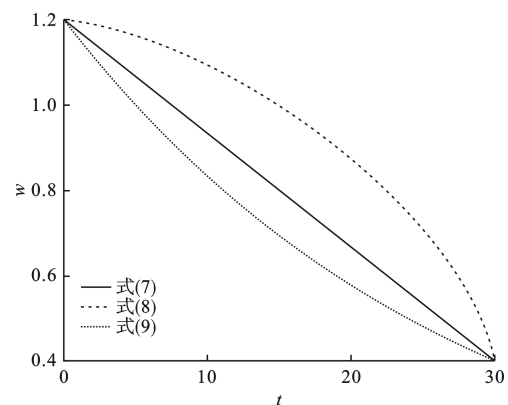
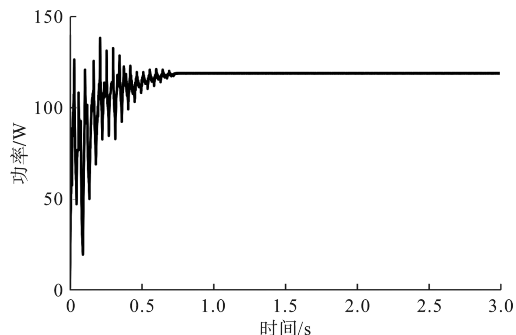


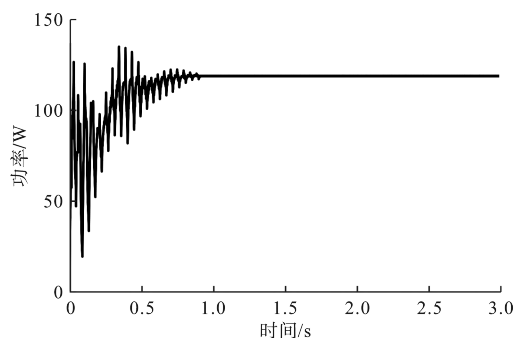
图 7 式(7)、式(8)和式(9)的函数图像
Fig. 7 Diagram of function (7), function (8) and function (9)

学习因子也能起到调节算法全局探测与局部搜索的作用, $c_1, c_2 \in (0, 4)$, 一般情况下 $c_1 = c_2$, 因此本文令 $c_1 = c_2 = 1$ 。

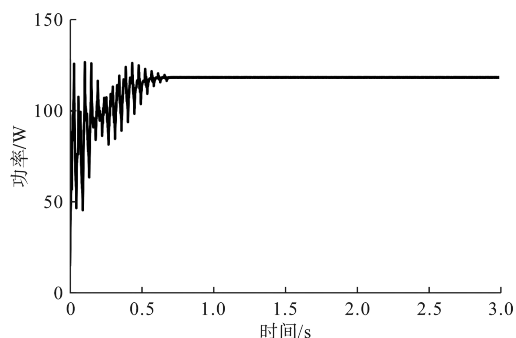
在 PSC 下, 对采用不同惯性权重递变规则的 PSO-MPPT 算法进行仿真, 结果如图 8 和表 4 所示。



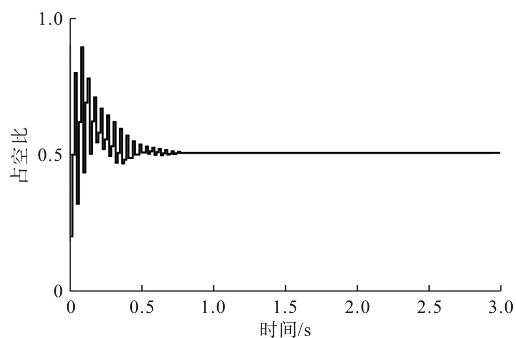
(a) 采用式(7)所示规则得到的功率曲线
(a) Power curve obtained by using the rule shown in function (7)



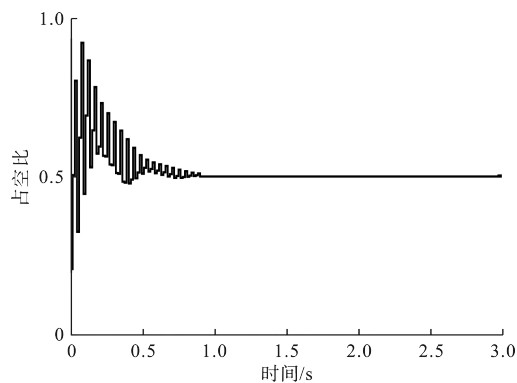
(b) 采用式(8)所示规则得到的功率曲线
(b) Power curve obtained by using the rule shown in function (8)



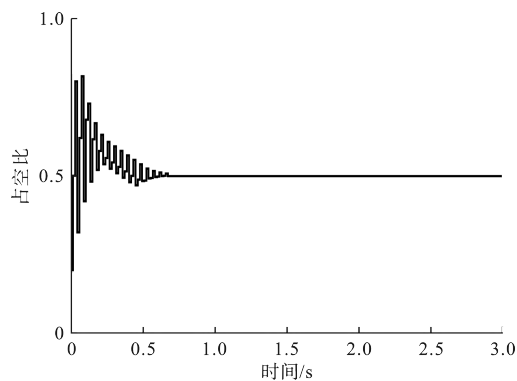
(c) 采用式(9)所示规则得到的功率曲线
(c) Power curve obtained by using the rule shown in function (9)



(d) 采用式(7)所示规则得到的占空比曲线
(d) Duty cycle curve obtained by using the rule shown in function (7)



(e) 采用式(8)所示规则得到的占空比曲线
(e) Duty cycle curve obtained by using the rule shown in function (8)



(f) 采用式(9)所示规则得到的占空比曲线
(f) Duty cycle curve obtained by using the rule shown in function (9)

图 8 不同惯性权重递变规则及 PSC 下 PSO-MPPT 算法的追踪曲线

Fig. 8 Tracking curves of PSO-MPPT algorithm with different inertia weight recurrence rules and PSC

表 4 不同惯性权重递变规则及 PSC 下 PSO-MPPT 算法的仿真结果

Tab. 4 Simulation results of PSO-MPPT algorithm with different inertia weight recurrence rules and PSC

惯性权重递变规则	功率稳定值/W	占空比	追踪时间/s
式(7)	118.5	0.503 0	0.77
式(8)	118.4	0.495 5	0.93
式(9)	118.5	0.499 0	0.73

由表 4 可知, 当惯性权重 w 遵循逐次递减的递变规则而动态改变时, PSO-MPPT 算法的收敛精度和追踪时间均得到了一定的改进, 而且当惯性权重 w 遵循式(9)所示的凹形下降型递变规则时, PSO-MPPT 算法的追踪效果最好。综合考虑后, 本文选用凹形下降型递变规则对惯性权重 w 进行动态改变。STC 下, 对选择凹形下降型递变规则的 PSO-MPPT 算法进行仿真, 结果如图 9 所示。稳定时的功率为 178.9 W, 追踪时间为 0.72 s, 相较于改进惯性权重 w 前的仿真结果提高了 4.0%。

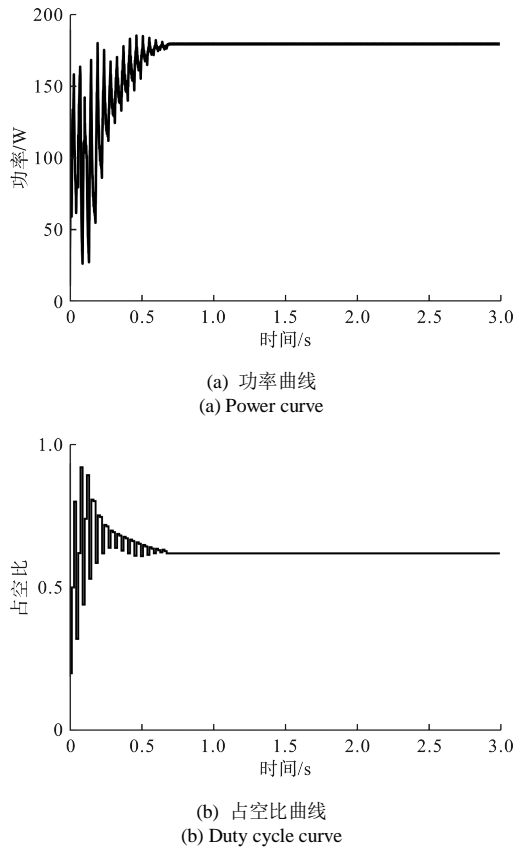


图 9 凹形下降型递变规则及 STC 下 PSO-MPPT 算法的追踪曲线

Fig. 9 Tracking curves of PSO-MPPT algorithm with recurrence rule of concave descent type and STC

从图 8 和图 9 的占空比曲线可以看出，占空比收敛到一定范围后，收敛速度变慢，存在厚尾现象。为了进一步提高 PSO-MPPT 算法的收敛速度，本文引入了 OD 算法。

3.3 OD 算法

OD 算法于 2007 年首次被提出，并已成功应用于求解水火电力系统短期优化调度问题^[13]。OD 算法的数学模型如下：

$$\begin{cases} R^{t+1} = \lambda R^t \\ \text{Cauchy}_i^{t+1} = -\gamma \tan(\pi r_3) \\ x_i^{t+1} = p_g^t + R^{t+1} \text{Cauchy}_i^{t+1} \end{cases} \quad (10)$$

式中， R^{t+1} 为第 $t+1$ 次迭代时的柯西半径； λ 为收缩系数， $\lambda \in [0,1]$ ； Cauchy_i^{t+1} 为第 i 个粒子在第 $t+1$ 次迭代时的柯西分布随机数， $\text{Cauchy}_i^{t+1} \in [-2,2]$ ； γ 为比例系数； r_3 为均匀分布于 $[0,1]$ 区间的随机数。

由式(10)可知，在 OD 算法的求解过程中，粒子位置的更新主要取决于当前的全局最优位置，但与其他粒子的位置无关联，这会导致粒子快速向 p_g^t 聚集。由此可知，OD 算法主要侧重于局部搜索，在全局开发上略有欠缺。

3.4 改进 ODPSO-MPPT 优化模型

从 3.2.3 节的仿真结果可以看出，求解前期加入约束因子和凹形下降型递变规则后，PSO-MPPT 算法能够较好地更新粒子位置，对整个求解区域进行较为全面的搜索。通过对数学模型的分析可知，OD-MPPT 算法能够较快地聚集其他粒子，使其向全局最优粒子靠近。为了进一步提高追踪效率，在求解 MPPT 问题时，首先利用 PSO 算法对求解区间进行全局开发，逐步锁定 GMPP 附近范围很小的区域，然后利用 OD 算法对其进行局部搜索。

3.4.1 改进 OD 算法

由文献[14]可知，若采用柯西分布，则更新后的粒子位置在 GMPP 附近的概率较大，但产生的柯西分布随机数可能非常大，使得更新后的粒子位置离 GMPP 较远，出现厚尾现象。正态分布的概率密度曲线为钟型曲线，若将柯西分布随机数替换为正态分布随机数，则更新后的粒子位置出现在 GMPP 附近的概率较大，距离 GMPP 越远的区域出现粒子的概率越小，使得算法能够具有较为稳定的搜索能力。改进 OD 算法的数学模型如下：

$$\begin{cases} R^{t+1} = \lambda R^t \\ x_i^{t+1} = p_g^t + R^{t+1} \text{randn}_i^{t+1} \end{cases} \quad (11)$$

式中， randn_i^{t+1} 为服从标准正态分布的随机数。

3.4.2 收敛判据

收敛判据是指判定粒子聚集在 GMPP 附近的很小区域内的条件，具体如下：

$$\max \{ |x_i^t - x_j^t| \} \leq \varepsilon \quad (12)$$

式中， x_i^t 和 x_j^t 为第 t 次迭代中粒子 i 和粒子 j 的位置； ε 在本文中的取值为 0.03。

当粒子位置满足式(12)时，粒子位置采用式(11)进行更新。

3.4.3 迭代终止策略

当所有粒子的位置非常集中时，认为粒子已到达 GMPP 附近，粒子之间的最大距离满足：

$$d_{\max} = |x_{\max} - x_{\min}| < \Delta X \quad (13)$$

当粒子之间的最大距离 d_{\max} 小于 ΔX 时，停止迭代。当前最大功率对应的粒子位置为最优位置 X_m ，其所对应的最大功率和占空比为 P_m 和 D_m 。本文中， ΔX 取值为 0.01。

3.4.4 重启条件

在光伏阵列的实际工作过程中，受到的光照强度和温度是不断变化的，导致光伏阵列的输出功率随之改变。因此，本文设置了算法重启策略。当迭

代终止后的最大功率 P_m 与实际的功率 P'_m 之差满足重启条件时，算法重新启动追踪最大功率，数学表达式如下：

$$|P_m - P'_m| < \Delta P \quad (14)$$

ΔP 的取值范围也非常重要。 ΔP 取值过大会导致追踪精度较低，系统可能运行于非最大功率点附近； ΔP 取值过小会导致算法频繁重启。本文设定 $\Delta P = 1\% P_m$ 。

改进 ODPSO-MPPT 算法的流程如图 10 所示。

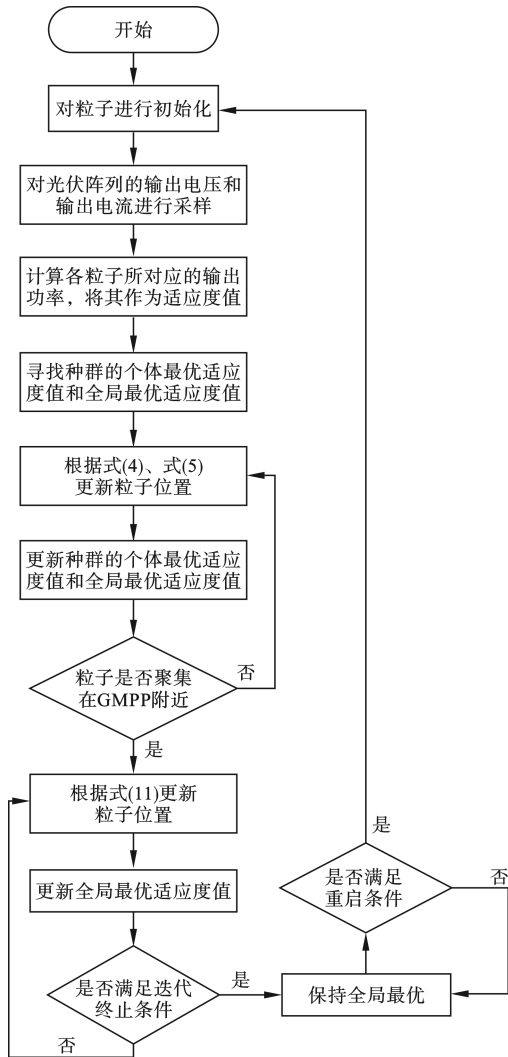


图 10 改进 ODPSO-MPPT 算法的流程图

Fig. 10 Flow chart of improved ODPSO-MPPT algorithm

4 仿真实验验证

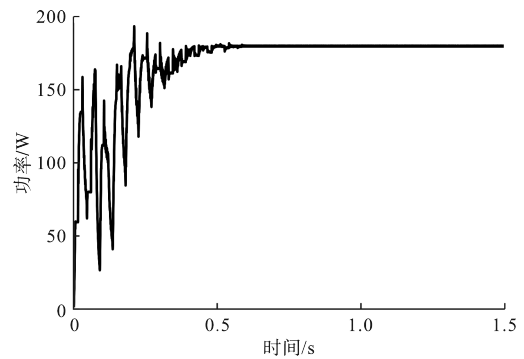
为验证本文所提改进 ODPSO-MPPT 算法的寻优性能，采用如图 3 所示的基于 Boost 电路的光伏发电系统进行实验。其中，开关频率 $f = 50 \text{ kHz}$ ， $C_1 = 100 \mu\text{F}$ ， $C_0 = 100 \mu\text{F}$ ， $L = 0.5 \text{ mH}$ ， $R = 40 \Omega$ 。在 MATLAB/Simulink 环境下建立 3×1 的光伏阵列模型进行仿真实验，光伏电池的参数配置见表 5。

表 5 光伏电池的参数配置
Tab. 5 Parameter configuration of photovoltaic cells

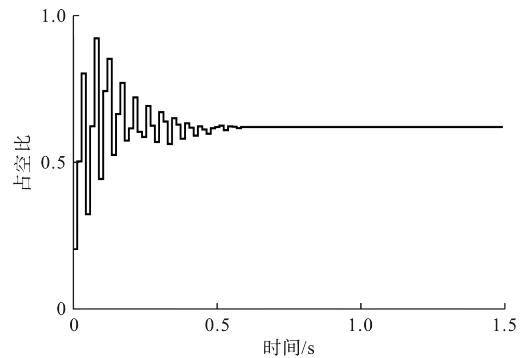
参数	值
最大功率 P_m / W	59.85
最大功率点电压 V_{mp} / V	17.1
最大功率点电流 I_{mp} / A	3.5
开路电压 V_{oc} / V	21.1
开路电流 I_{oc} / A	3.8

4.1 静态恒温环境下仿真实验验证

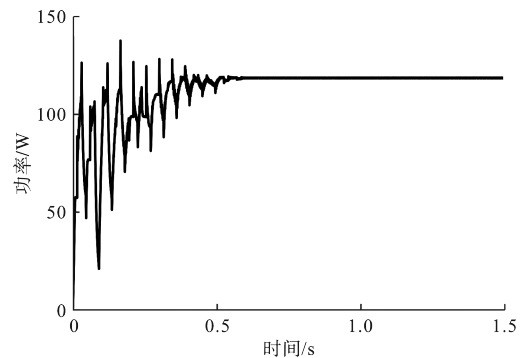
静态恒温环境指光照强度不变，温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在静态恒温环境中，分别在 STC 和 PSC 下对 3×1 的光伏阵列进行 MPPT 仿真，结果如图 11 和表 6 所示。采样时间为 15 ms ， $R' = 0.005$ ， $\lambda = 0.75$ 。



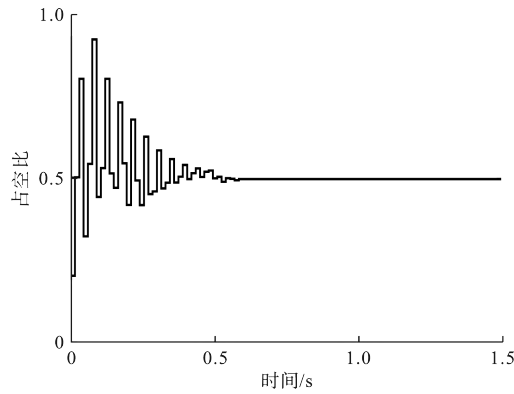
(a) STC 下功率曲线
(a) Power curve under STC



(b) STC 下占空比曲线
(b) Duty cycle curve under STC



(c) PSC 下功率曲线
(c) Power curve under PSC



(d) PSC 下占空比曲线
(d) Duty cycle curve under PSC

图 11 静态恒温环境下改进 ODPSO-MPPT 算法的追踪曲线
Fig. 11 Tracking curves of improved ODPSO-MPPT algorithm in static thermostatic environment

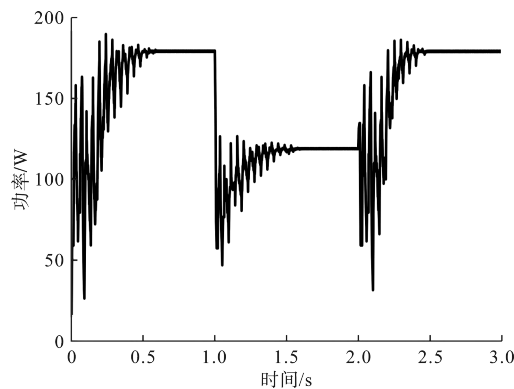
表 6 静态恒温环境下改进 ODPSO-MPPT 算法的仿真结果
Tab. 6 Simulation results of improved ODPSO-MPPT algorithm in static thermostatic environment

光照条件	功率稳定值/W	占空比	追踪时间/s
STC	178.9	0.617 3	0.61
PSC	118.5	0.499 9	0.62

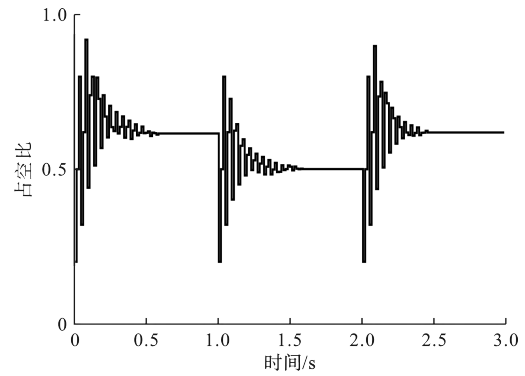
与 PSO-MPPT 算法的仿真结果相比,光照条件为 STC 时,改进 ODPSO-MPPT 算法追踪到的最大功率相同,追踪时间缩短了 15.3%;光照条件为 PSC 时,改进 ODPSO-MPPT 算法追踪到的最大功率相同,追踪时间缩短了 15.1%。

4.2 动态恒温环境下仿真实验验证

动态恒温环境指光照强度改变,温度为 25 °C。仿真实验中,光照条件在 0~0.1 s 设为 STC,在 1.0~2.0 s 设为 PSC,在 2.0~3.0 s 设为 STC,得到的结果如图 12 和表 7 所示。从图 12 可以看出,改进 ODPSO-MPPT 算法在外界环境变化时也能够有效地追踪到光伏发电系统的最大功率点,并使光伏发电系统保持最大功率输出。



(a) 功率曲线
(a) Power curve



(b) 占空比曲线
(b) Duty cycle curve

图 12 动态恒温环境下改进 ODPSO-MPPT 算法的追踪曲线
Fig. 12 Tracking curves of improved ODPSO-MPPT algorithm in dynamic thermostatic environment

表 7 动态恒温环境下改进 ODPSO-MPPT 算法的仿真结果
Tab. 7 Simulation results of improved ODPSO-MPPT algorithm in dynamic thermostat environment

时间	功率稳定值/W	占空比	达到稳定的时间/s	追踪时间/s
0~1.0 s	178.9	0.616 2	0.61	0.61
1.0~2.0 s	118.5	0.501 8	1.62	0.62
2.0~3.0 s	178.9	0.619 1	2.49	0.49

5 结 论

本文提出了一种改进 ODPSO-MPPT 算法。无论光照条件为 STC 还是 PSC,该算法都能对光伏最大功率点进行追踪,并具有良好的动态追踪性能。相较于 PSO-MPPT 算法,改进 ODPSO-MPPT 算法的各方面性能都得到了提升。改进 ODPSO-MPPT 算法在前期具有较好的全局搜索能力,能够有效避免 PSO-MPPT 算法中速度分量过大时粒子易错过 GMPP 的缺点;在后期利用 OD 算法能够较快地达到收敛,解决了 PSO-MPPT 算法后期速度分量过大时不能收敛和速度分量过小时收敛速度较慢的问题,在保证追踪精度的同时,减少了搜索时间。在环境发生突变的情况下,改进 ODPSO-MPPT 算法仍然能够对光伏发电系统的最大功率点进行追踪,并且具有良好的追踪性能。

参考文献(References)

[1] 李志军, 张奕楠, 王丽娟, 等. 基于改进量子粒子群算法的光伏多峰MPPT研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 221-229.
LI Z J, ZHANG Y N, WANG L J, et al. Study of photovoltaic multimodal maximum power point tracking based on improved quantum particle swarm optimization[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(5): 221-229.

[2] ALSHAREEF M, LIN Z Y, MA M Y, et al. Accelerated particle swarm optimization for photovoltaic maximum power point tracking under partial shading conditions[J]. Energies, 2019, 12(4): 1-18.

