

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.05.003

基于改进自适应粒子群算法的 MPPT 追踪系统

刘吉庆, 王 艳

(湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为优化最大功率点追踪 (MPPT) 技术的追踪精度和追踪时间, 提出一种改进自适应粒子群算法 (APSO)。对传统 PSO 算法进行优化, 引入自适应惯性权重和非线性学习因子, 使其在全局寻优-局部寻优-全局寻优状态下加速 MPPT 追踪, 最后搭建光伏发电系统对自适应粒子群算法进行仿真验证。试验证明: 相比于传统 PSO 算法, 改进的 APSO 算法追踪精度更高, 收敛速度更快。未遮挡环境 (STC) 恒温 and 变温下收敛速度提升了 30.6% 和 39.2%, 局部遮挡 (PSC) 恒温 and 变温下收敛速度提升了 54.0% 和 53.7%, 改进的 APSO 算法在 PSC 环境下更具优势; PSO 算法最大功率稳定后占空比存在震荡现象, 而 APSO 算法的占空比为稳定状态, 提高了系统的稳定性能。

关键词: 光伏发电; MPPT; APSO; 自适应惯性权重; 非线性学习因子

中图分类号: TM615; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2024)05-0018-08

引文格式: 刘吉庆, 王 艳. 基于改进自适应粒子群算法的 MPPT 追踪系统 [J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(5): 18-25.

MPPT Tracking System Design Based on an Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

LIU Jiqing, WANG Yan

(School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: In view of an optimization of the tracking accuracy and tracking time of Maximum Power Point Tracking (MPPT) technology, an improved Adaptive Particle Swarm Optimization (APSO) algorithm has thus been proposed. An optimization can be achieved of the traditional PSO algorithm by introducing adaptive inertia weights and nonlinear learning factors so as to accelerate MPPT tracking in the global optimization-local optimization-global optimization state. Subsequently, a photovoltaic power generation system is to be established for an simulation and verification of the adaptive particle swarm optimization algorithm. Experimental results indicate that compared to traditional PSO algorithms, the improved APSO algorithm is characterized with a higher tracking accuracy and faster convergence speed. Under constant and variable temperatures in an unobstructed environment (STC), the convergence speed has increased by 30.6% and 39.2% respectively, while the convergence speed under constant and variable temperatures in a partial occlusion (PSC) has increased by 54.0% and 53.7%, showing a performance superiority of the improved APSO algorithm in PSC environments. Furthermore, the PSO algorithm exhibits oscillations in the duty cycle after stabilizing the maximum power, while the APSO algorithm maintains a stable duty cycle, thereby improving the overall stability of the system.

Keywords: photovoltaic power generation; MPPT; APSO; adaptive inertia weight; nonlinear learning factor

收稿日期: 2023-12-19

基金项目: 纳智能材料器件教育部重点实验室开放课题基金资助项目 NJ2022002 (INMD-2022M09)

作者简介: 刘吉庆, 男, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为电子与通信工程, E-mail: 1002656902@qq.com

1 研究背景

在日益增长的能源需求和环境可持续性的双重压力下, 太阳能的持续创新和广泛应用将进一步推动全球能源结构的演进, 为建设低碳、高效能源系统奠定基础^[1-3]。随着光伏技术进步, 各国纷纷关注太阳能, 投入大量资源以提升其利用效率。光伏产业在全球范围内迅速发展, 其中西欧国家处于领先地位, 尤其是德国的光伏能源产业体系最为庞大和先进, 占据全球市场份额的 34%, 位居榜首。近年来, 日本加大了对光伏技术发展的投入, 通过增加研发资金, 光伏利用规模突飞猛进, 目前占总发电量的 30%。相较于其他国家, 我国起步较晚, 但光伏产业的发展势头迅猛。我国政府出台了一系列政策以支持光伏产业的发展, 同时积极建设实验室、培养科研人才, 以推动技术的不断进步^[4]。在实际环境下, 光伏电池的最大输出功率受多种因素的影响而变化。为了提高光伏电池的运行效率和功率输出, 采用有效的最大功率点追踪 (maximum power point tracking, MPPT) 算法尤为关键。学者们基于恒压法、扰动观察法和电导增量法等不断改进创新, 使得光伏最大功率追踪技术更加成熟。

N. N. Castellano 等^[5]提出了一种在不同太阳位置的电池板光伏组件阴影下提高 MPPT 跟踪精度的计算方法; Yuan X. L. 等^[6]则在均匀辐照度下, 提出了一种结合支持向量回归 (support vector regression, SVR) 的改进 P&O-MPPT 方法; M. Alshareef 等^[7]发现粒子群算法在非线形优化方面具有较好的效果, 在优化光伏 MPPT 过程中能够快速收敛, 且仅需少量控制参数。由于天气多变等原因, 导致光伏发电出现多峰值现象, 传统粒子群算法在寻优过程中很容易陷入局部最优解。李志军等^[8]提出基于量子粒子群和电导增量法的融合算法, 解决了多峰值追踪的问题; 雷茂杰等^[9]对于算法收敛慢、振荡大的问题, 引入了自适应参数和随机粒子; Lin Y. 等^[10]结合了粒子群优化和模拟退火技术, 通过引入自适应非对称学习因子提高局部搜索能力和收敛速度; Huang R. G.^[11]提出了一种用于最大功率点跟踪的改进量子粒子群优化算法, 直接控制占空比, 并在运行过程中动态调整参数。

综合以上研究, 本文根据传统粒子群算法和搜索策略特性, 提出了一种改进的自适应粒子群算法 (adaptive particle swarm optimization, APSO), 引入了自适应惯性权重, 可以根据问题的复杂性和搜索过程的进展自动调整; 而且该算法采用了一种非线性

学习因子, 在算法的前期主要注重局部寻优, 在中期主要注重全局寻优, 在后期又重新注重局部寻优; 最后, 在 Matlab/Simulink 中验证了改进 APSO 算法的优越性。

2 光伏系统的发电特性

2.1 光伏电池发电原理

通过光生伏特效应 (光伏效应), 光伏电池能够将光能有效地转化为电能, 其原理见图 1。在光照的作用下, 光伏电池吸收光能, 引发电子-空穴对, 并在内建电场的作用下将它

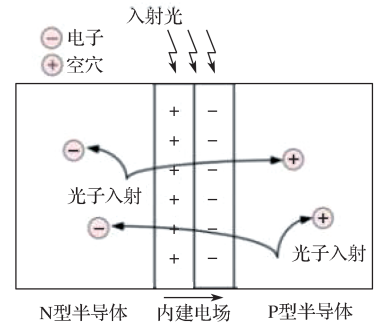


图 1 光伏效应原理图

Fig. 1 Photovoltaic effect schematic diagram

们分离。所形成的光生电场能够抵消 PN 结的势垒电场, 从而产生光生电压。当连接负载时, 光伏电池将光能转换为电能, 光照强度越强, 转化的电能越多, 从而提高输出功率^[12]。

2.2 光伏电池等效电路

光伏电池可用图 2 所示等效电路描述, 图中, I_{ph} 为光生电流, I_D 为无光照条件下流过 PN 结的暗电流, V_J 为 PN 结漏电压, R_{sh} 为光伏电池的等效

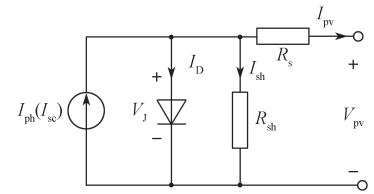


图 2 光伏电池等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of a photovoltaic cell

并联电阻, I_{sh} 为 PN 结漏电流, R_s 为等效串联电阻, I_{pv} 为光伏电池输出电流, V_{pv} 为光伏电池输出电压^[13]。

由图 2 可知:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh}, \quad (1)$$

$$I_D = I_{sat} \times \left(e^{\frac{qV_J}{AKT}} - 1 \right), \quad (2)$$

$$I_{sh} = V_J / R_{sh}, \quad (3)$$

$$V_{pv} = V_J - I_{pv} R_s, \quad (4)$$

式 (1) ~ (4) 中: I_{sat} 为光伏电池 PN 结的反向饱和电流; q 为单位电荷量; A 为二极管 PN 结品质因子; k 为玻尔兹曼常数; T 为光伏电池的绝对温度。

2.3 光伏组件

单个光伏电池输出电压仅为 0.5 V, 不能满足实

际应用,因此通过将多个光伏电池串联或并联起来,形成一个组合单元,被封装在外壳中,构成了光伏组件(光伏电池板)。由于光伏阵列处于局部阴影环境下,同一时刻受到不同程度的太阳辐射和温度, P - V 特性曲线呈现多峰值现象。图3为本文搭建的光伏组件模型,并联的二极管可降低热传导效应,局部遮挡对其造成的影响。

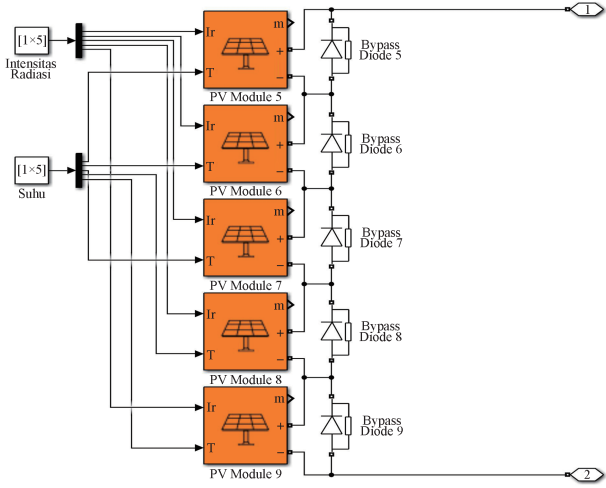


图3 光伏组件模型

Fig. 3 Photovoltaic module model

3 自适应粒子群算法优化

3.1 基本粒子群算法

传统粒子群算法表现为非线性特性,其灵感源于对鸟群觅食行为的研究^[14]。在该算法中,群体中的个体(粒子)通过迭代过程中的位置和速度的调整,模拟了鸟群协同搜索过程。每个粒子的位置表示一个潜在解,而通过群体的协同行为,算法能够在解空间中找到较优的解。这一过程中,粒子通过相互交流信息,模拟了鸟群在觅食中通过集体协作找到最优目的地的行为。

粒子群算法中,粒子的位置更新公式和速度更新公式^[15]如下:

$$x_i^d(k+1) = x_i^d(k) + v_i^d(k+1), \quad (5)$$

$$v_i^d(k+1) = \omega v_i^d(k) + c_1 r_1 (p_{besti}^d - x_i^d(k)) + c_2 r_2 (g_{best}^d - x_i^d(k)). \quad (6)$$

式(5)(6)中: $v_i^d(k)$ 、 $v_i^d(k+1)$ 分别为第 k 、 $k+1$ 次迭代粒子 i 飞行速度矢量的第 d 维分量; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 分别为个体和群体学习因子; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 的随机数; p_{besti}^d 为粒子 i 到目前为止找到的最优位置的第 d 维分量; g_{best}^d 为至今所有粒子找到的最优位置的第 d 维分量; $x_i^d(k)$ 、 $x_i^d(k+1)$ 分别为第 k 和 $k+1$ 次迭代粒子 i 位置矢量的第 d 维分量。

3.2 自适应粒子群算法

在粒子群优化算法中,粒子的数量是一个重要的参数,它决定了搜索空间的初始多样性和每次迭代中搜索空间的覆盖程度。然而,更多的粒子会增加每次迭代的计算复杂性,并可能导致搜索退化为并行随机搜索。通过多次对比试验,本文最优粒子数选择5。

惯性权重 ω 对算法寻优有显著的影响,以下为改进的惯性权重公式:

$$\omega = \omega_{\max} - (2\omega_{\max} / \omega_{\min}) [(\omega_{\max} - \omega_{\min}) / 3] \frac{4k}{3N}, \quad (7)$$

式中: $\omega_{\max}$ 与 $\omega_{\min}$ 分别为最大惯性权重和最小惯性权重,分别取0.9、0.4; k 为当前迭代次数; N 为总迭代次数,本文通过多次实验测试得知 N 为30时取得最佳效果。

ω 会随着迭代次数的增加而线性减小,可以提高全局收敛性,加快收敛速度,增强稳定性,克服局限性,实现简便高效的搜索。

学习因子调节粒子群在搜索空间的位置,决定寻优结果^[16]。因此对于学习因子的调整是非常必要的,其表达式如下:

$$c_1 = \frac{c_{1\max} + c_{1\min}}{2} + \frac{c_{1\max} - c_{1\min}}{c_{1\max} + c_{1\min}} \sin\left(\frac{2k\pi}{N} - \frac{\pi}{2}\right), \quad (8)$$

$$c_2 = \frac{c_{2\max} + c_{2\min}}{2} + \frac{c_{2\max} - c_{2\min}}{c_{2\max} + c_{2\min}} \cos\left(\frac{2k\pi}{N}\right), \quad (9)$$

式(8)(9)中: $c_{i\min}$ 、 $c_{i\max}$ ($i=1, 2$)为 i 个体学习因子最小和最大值,且 $c_{1\min}=c_{2\min}=0.6$, $c_{1\max}=c_{2\max}=1.4$ 。

在算法粒子寻优过程中,注重局部寻优和注重全局寻优的迭代次数是相同的,保证了局部与全局的权重。通过调整 c_1 和 c_2 的值,可以在前期更加注重全局寻优,以降低陷入局部最优的风险;而在中期,更加重视局部寻优,以加速算法的收敛速度,使得整个寻优过程更加高效;在算法的后期阶段,通过再次全局寻优,最大程度提高算法的全局搜索能力,从而有利于精确找到最优解。迭代次数对学习因子的影响如图4所示。

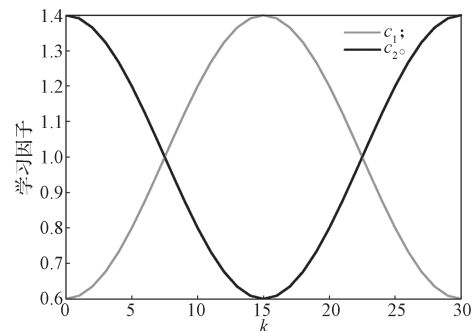


图4 迭代次数对学习因子的影响曲线

Fig. 4 Influence curves of iteration times on learning factors

$$V_{\max} = 0.5 \times ((d_{\max} - d_{\min}) / 2), \quad (10)$$

$$V_{\min} = -V_{\max}, \quad (11)$$

式(10)(11)中: $V_{\max}$ 为粒子的最大速度; $V_{\min}$ 为粒子的最小速度; $d_{\max}$ 、 $d_{\min}$ 分别为粒子的上限和下限, 分别取 1 和 0。

为防止粒子在搜索过程中飞出搜索空间, 设定了粒子群优化算法中的粒子速度上下限, $V_{\max}$ 和 $V_{\min}$ 互为相反数, 粒子可以向任何方向移动, 增加了搜索的灵活性。

设置算法的收敛条件, 可以在一定程度上保证算法的运行效率, 避免无意义的计算。

$$toleransi = (1/100) * MPP. \quad (12)$$

式中: $toleransi$ 为收敛容忍度, 当全局最佳解的改进小于这个容忍度时, 算法停止迭代; MPP 为最大功率点。

3.3 寻优过程

图 5 为改进 APSO 算法流程。

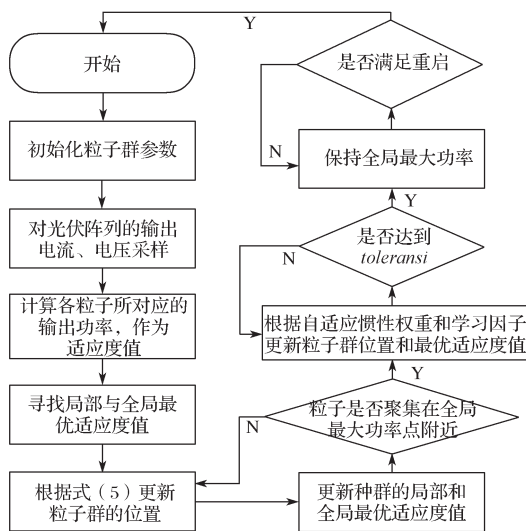


图 5 改进 APSO 算法流程图

Fig. 5 Improved APSO algorithm flowchart

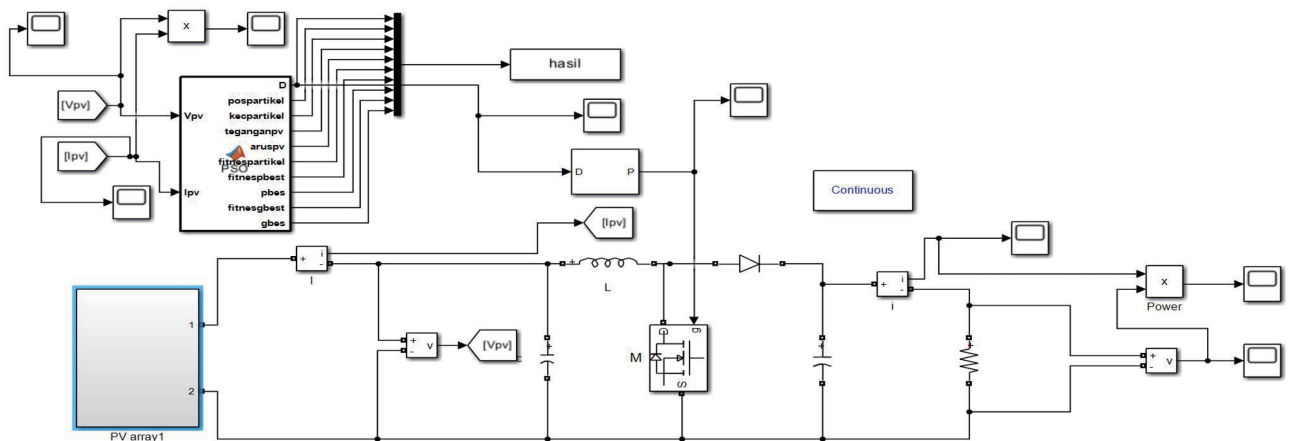


图 7 光伏发电仿真模型

Fig. 7 Simulation model of photovoltaic power generation

图 5 所示改进的 APSO 算法流程图中, 结合了参数少、收敛快以及融入全局追踪的 MPPT 算法, 粒子不仅可以在局部范围内寻找最优解, 还可以在全局范围内进行搜索, 提高了算法的全局收敛性。通过自适应地优化参数, 可以根据问题的特性和当前搜索状态来动态调整参数, 对粒子群的位置优化使得算法在不同阶段有不同的搜索能力。自适应的特性使得改进的粒子群优化算法在处理各种复杂问题时都能表现出良好的性能。

4 实验模型的搭建与仿真

4.1 实验模型搭建

为了能更好地验证 APSO 算法比传统 PSO 算法的优越性, 根据图 6 所示光伏发电结构, 在 Simulink 中搭建 Boost 升压电路光伏 MPPT 仿真模型, 其结构如图 7 所示。

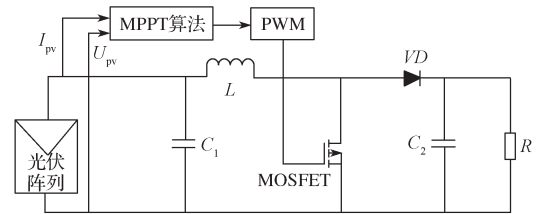


图 6 光伏发电结构示意图

Fig. 6 Photovoltaic power generation structure schematic diagram

在光伏发电系统中, 为了追踪最大功率点, 可以使用算法控制系统的占空比。光伏阵列由于光照产生一定的电流与电压, 输出至 MPPT 控制器处理。改进的 APSO 算法通过 MPPT 控制器对占空比进行相应调整, PWM (脉冲宽度调制) 调整金属-氧化物-半导体场效应晶体管, 从而实现最大功率点追踪 (MPPT), 有效地提高光伏发电系统的输出功率。仿真光伏电池参数如表 1 所示^[17]。

表 1 光伏电池参数

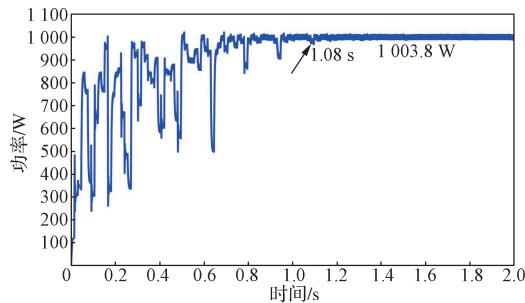
Table 1 Parameters of photovoltaic cells

I_{sc}/A	U_{oc}/V	I_m/A	U_m/V	P_m/W
7.86	32.72	7.36	27.21	200.265 6

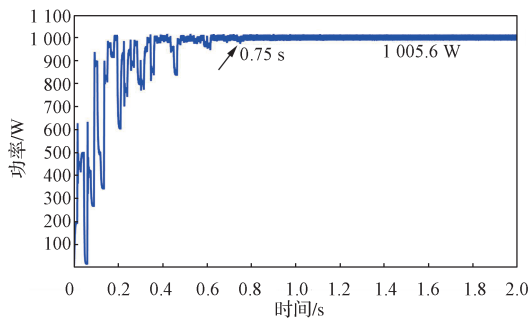
4.2 实验仿真

4.2.1 恒温 STC 下仿真实验验证

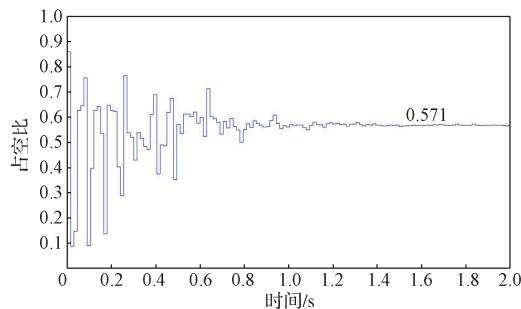
在未遮挡环境 (STC) 下, 温度恒为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 采用传统 PSO 算法与改进 APSO 算法, 在 1×5 光伏组件 $1\,000, 1\,000, 1\,000, 1\,000, 1\,000\text{ W/m}^2$ 相同辐照度下进行 MPPT 仿真, 采样时间为 2 s , 最大功率和占空比对比曲线见图 8。由图 8a 和 b 可知, 传统 PSO 算法在全局追踪到的最大功率点为 $1\,003.8\text{ W}$, 追踪稳定时间为 1.08 s ; 而改进 APSO 算法在全局追踪到的最大功率点为 $1\,005.6\text{ W}$, 追踪稳定时间为 0.75 s , 最大功率点比传统 PSO 算法高 1.8 W , 几乎持平, 表明两者均可追踪全局最大功率点, 但 APSO 算法更高效, 追踪时间缩短了 0.33 s , 追踪效率提高了约 30.6% 。由图 8c 和 d 可知, 传统算法的占空比为 0.571 , 而改进算法为 0.581 , 比传统算法高出了 0.001 , 且比传统算法更加稳定。



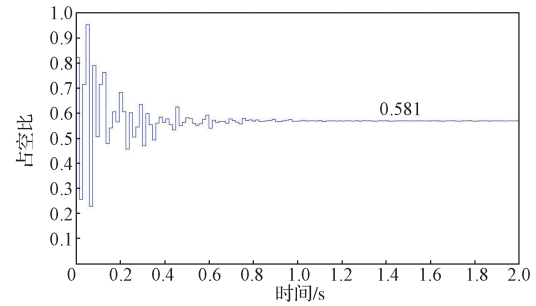
a) PSO 算法最大功率



b) APSO 算法最大功率



c) PSO 算法占空比



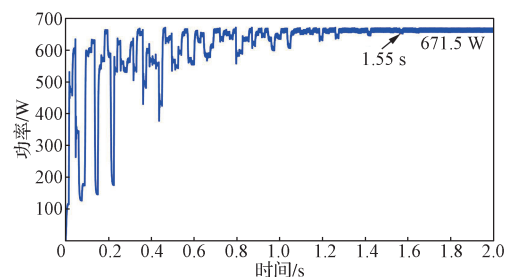
d) APSO 算法占空比

图 8 恒温 STC 下最大功率和占空比对比曲线

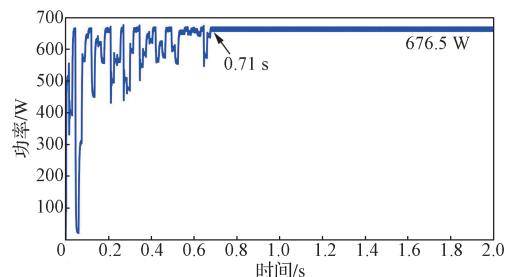
Fig. 8 Comparison curves of maximum power and duty cycle under constant temperature STC

4.2.2 恒温 PSC 下仿真实验验证

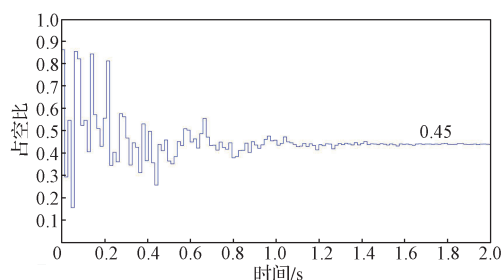
在局部遮挡 (PSC) 条件下, 温度恒为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 传统算法 PSO 与改进 APSO 算法在 1×5 光伏组件 $1\,000, 900, 800, 700, 600\text{ W/m}^2$ 不同辐照度下进行 MPPT 仿真, 采样时间为 2 s , 得到的最大功率和占空比结果见图 9。根据图 9a 和 b 可以得知, 在恒温 PSC 条件下, 传统的 PSO 算法全局追踪的最大功率点为 671.5 W , 追踪所需时间为 1.55 s ; 改进的 APSO 算法全局追踪的最大功率点为 676.5 W , 追踪所需时间仅为 0.71 s 。改进的 APSO 算法在最大功率点上比传统的 PSO 算法高出 5 W , 表明在 PSC 条件下, 改进的算法更容易追踪到全局最大功率。APSO 算法的追踪时间比 PSO 算法缩短了 0.84 s , 提高了约 54.2% 的追踪效率。观察图 9c 和 d 可以发现, 传统 PSO 算法的占空比为 0.45 , 而改进 APSO 算法的占空比为 0.47 , 提高了约 4.4% , 且传统 PSO 算法的占空比存在抖动现象, 而改进的 APSO 算法则没有这一现象。以上结果都表明, 改进 APSO 算法在性能上优于传统 PSO 算法。



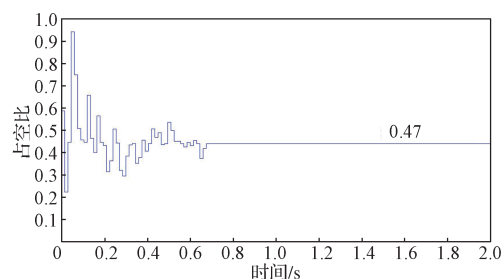
a) PSO 算法最大功率



b) APSO 算法最大功率



c) PSO 算法占空比



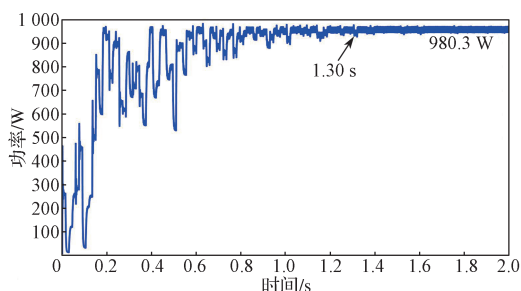
d) APSO 算法占空比

图9 恒温 PSC 下最大功率和占空比对比曲线

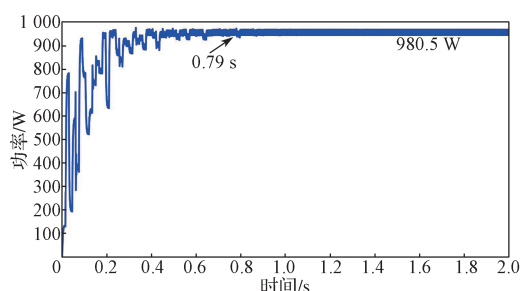
Fig. 9 Comparison curves of maximum power and duty cycle under constant temperature PSC

4.2.3 变温 STC 下仿真实验验证

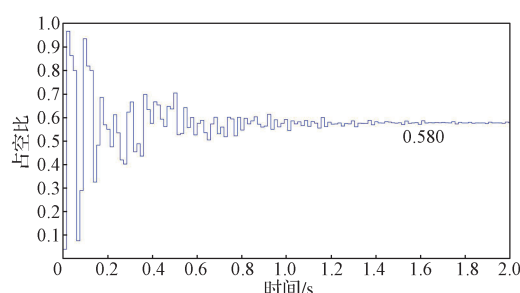
在变温 STC 条件下, 1×5 光伏组件温度分别为 25, 30, 35, 40, 45 $^{\circ}\text{C}$, 辐照度都为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 进行仿真, 采样时间为 2 s, 得到的最大功率和占空比对比曲线见图 10。从图 10a 和 b 所示结果来看, 在变温 STC 条件下, PSO 算法追踪到的全局最大功率点为 980.3 W, 而追踪所需的时间为 1.30 s。相比之下, APSO 算法追踪到的全局最大功率点为 980.5 W, 追踪所需的时间仅为 0.79 s。尽管两者在最大功率上的差距仅为 0.2 W, 但在追踪时间上, APSO 算法比 PSO 算法快 0.51 s, 提升了 39.2%, 且改进的 APSO 算法在维持最大功率点具有更大的优势。



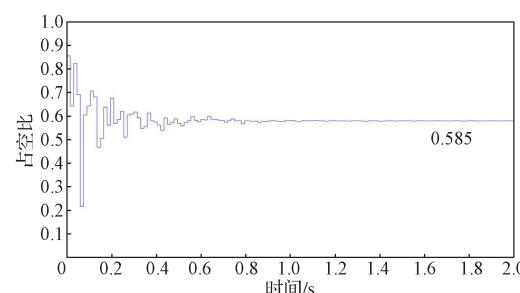
a) PSO 算法最大功率



b) APSO 算法最大功率



c) PSO 算法占空比



d) APSO 算法占空比

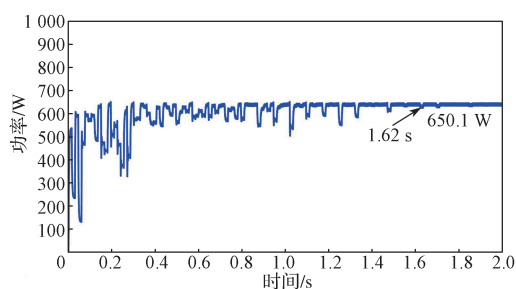
图10 变温 STC 下最大功率和占空比对比曲线

Fig. 10 Comparison curves of maximum power and duty cycle under variable temperature STC

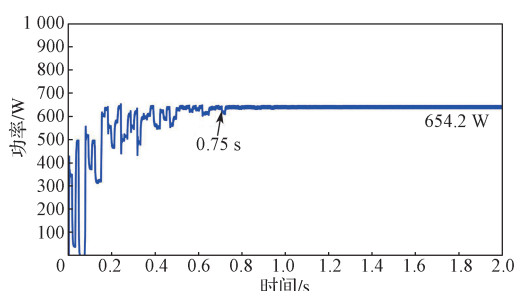
观察图 10c 和 d, 可以看到 PSO 和 APSO 算法的占空比分别为 0.580 和 0.585, 差距微小, 仅为 0.005, 但是 APSO 算法在运行过程中并未出现明显的抖动现象。

4.2.4 变温 PSC 下仿真实验验证

变温 PSC 环境条件下, 1×5 光伏组件温度分别为 25, 30, 35, 40, 45 $^{\circ}\text{C}$, 辐照度分别为 $1\,000, 900, 800, 700, 600\text{ W/m}^2$, 采样时间为 2 s, 得到的最大功率和占空比对比曲线见图 11。



a) PSO 算法最大功率



b) APSO 算法最大功率

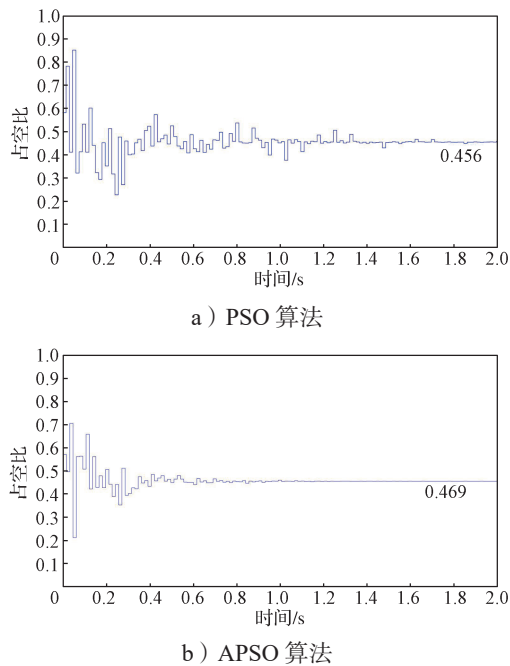


图 11 变温 PSC 下最大功率和占空比对比曲线

Fig. 11 Comparison curves of maximum power and duty cycle under variable temperature PSC

由图 11a 和 b 可知, 变温 PSC 条件下, 传统 PSO 算法的追踪最大功率为 650.1 W, 改进的 APSO 算法为 654.2 W, 相差 4.1 W, 表明在该环境下 APSO 对全局搜索有更大的优势。追踪最大功率稳定时间两者相差 0.87 s, APSO 的追踪效率提高了约 53.7%, 且追踪到最大功率点后持续稳定输出。观察图 11c 和 d 可知, 改进的 APSO 算法占空比比传统算法 PSO 高 0.013, 提高了约 2.85%。可见改进的 APSO 在该环境下性能均有所提升。

仿真结果汇总于表 2。

表 2 STC 和 PSC 下的仿真结果对比

Table 2 Comparison of simulation results under STC and PSC

光照条件	温度	算法	最大功率/W	占空比	追踪时间/s	收敛速度提升/%
STC	恒温	PSO	1 003.8	0.571	1.08	30.6
		APSO	1 005.6	0.581	0.75	
	变温	PSO	980.3	0.580	1.30	39.2
		APSO	980.5	0.585	0.79	
PSC	恒温	PSO	671.5	0.450	1.55	54.2
		APSO	676.5	0.470	0.71	
	变温	PSO	650.1	0.456	1.62	53.7
		APSO	654.2	0.469	0.75	

由表 2 可知, 在 STC 光照条件下, 无论是恒温还是变温, 相比传统的 PSO 算法, APSO 算法对全局最大功率点追踪更有优势, 占空比有 0.01 左右的差距; 在温度变化条件下, APSO 的收敛速度提升更

为显著, 高出 8.6%; 在 PSC 光照条件下, 无论是恒温还是变温, APSO 算法在最大功率上都比 PSO 算法有约 4 W 的优势, 显示出 APSO 对全局最大功率点追踪的优越性, 占空比相差约 0.013。两种算法不论在恒温 STC 与恒温 PSC, 还是在变温 STC 与变温 PSC 条件下, 最大功率都相差 330 W 左右, 占空比增加约 0.1。各种环境下, APSO 算法追踪效率都有大幅度提升, 在 PSC 条件下, 追踪效率的提升更为明显; 在 STC 或 PSC 条件下, 恒温条件下的最大功率都比变温条件下高约 20 W。以上数据表明, 在不同的光照和温度条件下, APSO 算法在最大功率追踪、占空比和追踪效率上都表现出了优于 PSO 算法的性能。

5 结论

本文提出了一种改进的 APSO 算法, 通过在传统算法的基础上引入自适应惯性权重和前期注重全局寻优、中期注重局部寻优和后期注重全局寻优的非线性学习因子, 设置匹配的收敛条件, 同时融入了全局最大功率追踪算法, 并在 Simulink 中搭建系统仿真模型进行仿真实验, 结果表明:

1) STC 条件下, PSO 与 APSO 均能对全局最大功率点进行追踪, PSC 条件下, APSO 更能搜索到全局最大功率点, 具有较小的功率波动, 并且追踪精度更高, 收敛速度更快;

2) 无论是 STC 还是 PSC 条件下, 追踪效率的提升都很显著, 且在 PSC 下提升幅度更大;

3) 无论是 STC 还是 PSC 条件下, 变温条件下, 即温度升高 (25, 30, 35, 40, 45 °C), 最大功率都比恒温条件下要低。

4) PSO 算法最大功率稳定后, 占空比存在震荡现象, APSO 算法占空比为稳定状态, 提高了系统的稳定性。

在不同的光照和温度条件下, 改进的 APSO 算法对 MPPT 都有良好的动态追踪性能, 且追踪精度更高, 收敛速度更快。

参考文献:

- [1] 董华展. 太阳能光伏发电发展趋势探析[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(4): 282-284.
DONG Huazhan. Development Trend of Solar Photovoltaic Power Generation[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(4): 282-284.

- [2] 李祖强, 黄兴华, 刘茂玲. 太阳能和空气源复合热泵的最优模式切换分析 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 30-36.
LI Zuqiang, HUANG Xinghua, LIU Maoling. Optimal Mode Switching Analysis of Solar Energy and Air Source Hybrid Heat Pump[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(2): 30-36.
- [3] SAWADOGO W, ABIODUN B J, OKOGBUE E C. Impacts of Global Warming on Photovoltaic Power Generation over West Africa[J]. Renewable Energy, 2020, 151: 263-277.
- [4] 施鹏程. 光伏发电系统的最大功率点跟踪研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
SHI Pengcheng. Research on Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Power Generation System[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [5] CASTELLANO N N, GÁZQUEZ PARRA J A, VALLS-GUIRADO J, et al. Optimal Displacement of Photovoltaic Array's Rows Using a Novel Shading Model[J]. Applied Energy, 2015, 144: 1-9.
- [6] YUAN X L, YANG D F, LIU H M. MPPT of PV System Under Partial Shading Condition Based on Adaptive Inertia Weight Particle Swarm Optimization Algorithm[C]//2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Shenyang: IEEE, 2015: 729-733.
- [7] 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): 623.
- [8] 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 Zhijun, ZHANG Yinan, WANG Lijuan, et al. Study of Photovoltaic Multimodal Maximum Power Point Tracking Based on Improved Quantum Particle Swarm Optimization[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(5): 221-229.
- [9] 雷茂杰, 许坦奇, 孟凡英. 基于自适应粒子群算法的 MPPT 控制策略 [J]. 电源技术, 2021, 45(8): 1036-1039.
LEI Maojie, XU Tanqi, MENG Fanying. MPPT Control Strategy Based on Adaptive Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(8): 1036-1039.
- [10] LIN Y, HOU Z K, ZHANG J J, et al. Design of the Particle Swarm Optimization Simulated Annealing MPPT Control Method Based on Motion Shadow[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2529(1): 012010.
- [11] HUANG R G. Application of a Modified Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization Algorithm for MPPT[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2567(1): 012003.
- [12] 刘梦禹. 太阳能光伏并网发电基本原理 [J]. 中学物理教学参考, 2022, 51(11): 64-65.
LIU Mengyu. Basic Principle of Solar Photovoltaic Grid-Connected Power Generation[J]. Teaching Reference of Middle School Physics, 2022, 51(11): 64-65.
- [13] BAIRAMI S, SALIMI M, MIRABBASI D. A Novel Method for Maximum Power Point Tracking of the Grid-Connected Three-Phase Solar Systems Based on the PV Current Prediction[J]. Chinese Journal of Electronics, 2023, 32(2): 353-364.
- [14] 迟耀丹, 陈兵, 徐红伟, 等. 改进粒子群算法在光伏 MPPT 中的应用 [J]. 电源技术, 2022, 46(4): 441-444.
CHI Yaodan, CHEN Bing, XU Hongwei, et al. Application of Improved Particle Swarm Optimization in Photovoltaic MPPT[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(4): 441-444.
- [15] 康岩松, 臧顺来. 基于多种策略的改进粒子群优化算法 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2023, 44(8): 1089-1097.
KANG Yansong, ZANG Shunlai. Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Multiple Strategies[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2023, 44(8): 1089-1097.
- [16] 朱霄, 周振雄, 李镇, 等. 基于改进 PSO 算法在局部遮阴下光伏系统 MPPT 中的应用 [J]. 北华大学学报 (自然科学版), 2023, 24(3): 394-399.
ZHU Xiao, ZHOU Zhenxiong, LI Zhen, et al. Application of Photovoltaic System MPPT Under Local Shading Based on Improved PSO Algorithm[J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2023, 24(3): 394-399.
- [17] 刘海鹏, 方奇文, 王蒙, 等. 改进 ODPSO 算法在光伏 MPPT 中的应用研究 [J]. 控制工程, 2023, 30(7): 1357-1367.
LIU Haipeng, FANG Qiwen, WANG Meng, et al. Application of Improved ODPSO Algorithm in Photovoltaic MPPT[J]. Control Engineering of China, 2023, 30(7): 1357-1367.

(责任编辑: 廖友媛)