

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190471

基于 CSA-IP&O 的局部遮阴下光伏最大功率点追踪

赵帅旗¹, 肖辉¹, 刘忠兵², 朱梓嘉¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 局部阴影遮挡(Partial Shading Condition, PSC)使得最大功率点追踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)的追踪速度和精度难以得到保证。对布谷鸟搜索算法(Cuckoo Search Algorithm, CSA)和自适应变步长的改进扰动观察法(Improved Perturbation and Observation, IP&O)进行了研究并应用到光伏的MPPT控制中。利用CSA出色的全局搜索能力快速收敛到全局最大功率点(Maximum Power Point, MPP)附近,然后利用IP&O出色的局部搜索能力快速、准确地收敛到MPP。最后设置了几种光照情况进行仿真,并用扰动观察法和粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)方法进行对比。通过仿真验证了所提出的方法具有更快的追踪速度和更高的精确度。

关键词: 局部阴影遮挡; 布谷鸟搜索算法; 最大功率点追踪; 粒子群算法; 扰动观察法

Photovoltaic maximum power point tracking under partial shading based on CSA-IP&O

ZHAO Shuaiqi¹, XIAO Hui¹, LIU Zhongbing², ZHU Zijia¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Partial shading condition makes the tracking speed and accuracy of maximum power point tracking difficult to guarantee. The Cuckoo Search Algorithm (CSA) and the Improved Perturbation and Observation (IP&O) method of adaptive variable step are studied and applied to the MPPT control of the PV system. The excellent global search capability of the CSA is used to converge near the global Maximum Power Point (MPP) quickly, then the excellent local search capability of adaptive variable step Perturbation and Observation (P&O) is used to converge to the MPP quickly and accurately. Finally, several lighting conditions are set up for simulation and P&O and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithms are compared. Simulation results indicate that the proposed method has faster tracking speed and higher accuracy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51708194 and No. 51507014) and Key Project of Scientific Research for Hunan Education Department (No. 18A120).

Key words: partial shading condition; cuckoo search algorithm; maximum power point tracking; particle swarm optimization; perturbation and observation

0 引言

太阳能由于安全环保、持续可用等特性,成为可再生能源的重要选择,仅2017年全世界的装机量就增加了近102 GW,相比于2016年同比增长近40%。太阳能发电现已是各种新能源发电中发展最迅速规模最大的产业^[1-2]。光伏系统的输出功率受温度、太阳辐射和阴影等因素影响,其中云的移动、建筑物遮挡等导致的局部阴影情况(Partial Shading Condition,

PSC)会造成光照不均,发生功率失配,造成光伏阵列的对外功率大幅度减少^[3-5]。最大功率点追踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)技术是提高光电系统电能利用效率的关键技术之一^[6],为减小PSC下的功率失配损失,许多学者对MPPT技术作研究以提高追踪速度和精确度。

许多传统方法如恒定电压法、电导增量法^[7]、扰动观察法^[8]等被证明在光照均匀 $P-V$ 曲线为单峰曲线时表现良好。然而实际中,PSC会导致 $P-V$ 特性曲线变成多峰曲线,即存在多个极值点,传统MPPT方法往往不能准确追踪全局最大功率点而错误追踪到局部最大功率点从而导致功率损耗。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51708194, 51507014); 湖南省教育厅科学研究重点项目资助(18A120)

为解决 PSC 下传统方法易失效的问题, 许多学者对基于群体智能优化算法和进化算法的 MPPT 技术进行了研究。文献[9-16]把粒子群等智能群优化算法和各种改进优化算法应用到光伏发电 MPPT 控制来提高 MPPT 的追踪速度与准确度, 有效解决了传统 MPPT 方法容易错误追踪到局部最大功率点的问题从而减少功率损失。这些技术的准确性、跟踪速度、成本、硬件要求、所需传感器的数量和类型、复杂性等各不相同, 也存在功率波动和速度较慢等问题。文献[17]利用灰狼优化(Gray Wolf Optimization, GWO)算法跟踪局部阴影下静态变化的 PV 系统的 MPP 并将获得的结果与 PSO 和 P&O 方法进行比较, 结果表明这些技术(GWO, PSO 和 P&O)的效率分别为 99.8%、99.7%和 31.35%, 但没有考虑到动态或时变 PSC 情况下的响应以及动态追踪。

布谷鸟搜索算法(Cuckoo Search Algorithm, CSA)是由剑桥大学 Yang 与 S.Deb 提出的一种新兴启发算法, 其模拟了布谷鸟的寄生育雏行为, 具备简易、高效、随机搜索路径优越、全局优化能力突出等特点, 能有效地求解最优化问题^[18-19]。把 CSA 应用到光伏系统的 MPPT 控制中, 并用变步长 P&O 来对其进行改进, 利用 IP&O 在局部搜索中的快速收敛性来解决 CSA 在优化后期收敛速度变慢等问题, 以提高追踪速度与准确度。然后设置了几种局部遮阴和时变 PSC 情况对所提方法进行仿真验证, 并与 PSO 和 P&O 方法进行比较。仿真结果表明, 本文所提的基于 CSA-IP&O 的局部遮阴下光伏发电 MPPT 方法具有更快的追踪速度和精确度, 有效提高了光伏系统的发电效率。

1 光伏元件的数学模型

PV 阵列的 I - V 、 P - V 特性和最大功率点参数与辐射强度和工作温度等有关, 单个电池的等效模型如图 1 所示, I - V 参数方程表达式如式(1)所示^[20]。

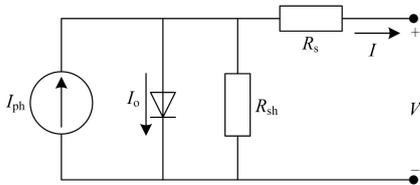


图 1 光伏电池的等效模型图

Fig. 1 Equivalent model diagram of PV cell

$$I = I_{ph} - I_o - I_{sh} = I_{ph} - I_o \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: I_{ph} 、 I 和 I_o 分别为光伏电池的光生电流、输出电流和二极管反向饱和电流(A); R_s 和 R_{sh} 分别为等效串联和等效并联电阻(Ω); k 为玻尔兹曼常数, 为 1.38×10^{-23} J/K; q 为电子电荷常数为 $1.60217646 \times 10^{-19}$ C; n 为光伏电池特性常数, T 为工作温度。 I_{ph} 与光电池所受光照的面积和强度有关, 如式(2)所示。

$$I_{ph} = \left[I_{sc} + K_i (T - T_r) \right] \frac{G}{G_r} \quad (2)$$

式中: I_{sc} 为标准温度和光强下的短路电流; K_i 为短路电流的温度系数; T_r 为标准工作环境温度 (25°C); G_r 为标准光照强度 (1000W/m^2); G 是光电池所受的光照强度 (W/m^2)。饱和电流表达式为

$$I_o = I_{o,r} \left(\frac{T_r}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{nk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

式中: $I_{o,r}$ 为标准条件下的饱和电流; E_g 为半导体能带宽度 ($1.1 \sim 1.2$ eV)。

单个电池的输出电流、电压和功率很小, 不能满足需求, 所以制造的每一个模块往往是通过把单体电池进行各种连接而成的。把 N_s 个单体电池串联成模块后其 I - V 特性方程为

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{N_s nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + N_s IR_s}{N_s R_{sh}} \quad (4)$$

2 基于 CSA-IP&O 的 MPPT 方法

2.1 布谷鸟搜索算法

CSA 算法思想基于部分杜鹃属鸟类的寄生繁衍和鸟类的 Lévy 飞行机制, CSA 摒弃一般的各向同性随机游走, 依靠 Lévy 飞行使得效果得到加强, 比 GA、PSO 等其他方法效果更好, 因此备受关注, 相关研究成果也日益增多。

在生物界中, 部分杜鹃属鸟类有着独特的育雏方式—寄生育雏, 它们将蛋放到别的鸟的巢中, 通过破坏掉其他鸟的蛋提高它们的蛋被孵化的可能性。如果寄主鸟察觉到不是自己的蛋就会消灭这些蛋, 或者干脆放弃旧巢然后在其他地方另建新巢。为直白明了地描绘布谷鸟这种寻巢行为, 先假定有下面 3 条理想化的规则:

- (1) 一只布谷鸟一次只会产出一个蛋, 在选取哪个鸟巢来孵化时也是随机性的;
- (2) 放置优质蛋的最佳鸟巢将保留给下一代;
- (3) 可用的寄主巢的数量是固定的, 且寄主以概率 $p_a \in (0,1)$ (一般 $p_a=0.25$) 发现外来蛋。此时寄主鸟会除掉这个蛋或干脆抛弃旧巢然后在其他地方建立一个新巢。

在寻巢过程中, 布谷鸟通过不断更新鸟巢位置和比较适应值大小来选择最佳鸟巢。CSA 改进鸟巢位置的方式有两种, 其一是通过 Lévy 飞行的方式来改善巢的位置, 公式定义为

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \oplus L \quad (5)$$

式中: t 为当前迭代次数; \oplus 表示点对点乘法; α 为飞行步长的限定系数, 且符合标准正态分布; L 为 Lévy 搜索路径, 即为飞行时的步长。

$$L = \gamma \times \frac{u}{|v|^{1/\beta}} (g_{\text{best}} - x_i^t) \quad (6)$$

式中: γ 为 Lévy 飞行的飞行尺度; $\beta=3/2$; g_{best} 表示目前最佳巢; u 和 v 均服从均匀分布, 即 $u \sim N(0, \sigma_u^2)$ 和 $v \sim N(0, \sigma_v^2)$ 。

$$\sigma_u = \left[\frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma((1+\beta)/2) \times \beta \times 2^{(\beta-1)/2}} \right]^{1/\beta} \quad (7)$$

$$\sigma_v = 1 \quad (8)$$

式中, Γ 为标准伽玛函数。

Lévy 飞行是一种长步长与短步长相间的走位, 这也是其主要特点, 学者们也证实了自然界中很多鸟类的飞行也遵从 Lévy 飞行, 这也是最有效寻找目标的方法之一。

另一种改进鸟巢位置的方法是依照发现概率 p_a 进行改进, 对每个鸟巢随机取 $r_i \in (0,1)$, 当 $r_i > p_a$ 被寄主发现时通过式(9)进行位置改进。

$$x_i^{t+1} = x_i^t + r_i (x_j^t - x_i^t) \quad (9)$$

CSA 的基本流程如下:

- (1) 初始化相关参数并随机生成 N 个鸟窝位置;
- (2) 计算鸟窝质量即对应适应值, 记录下最佳巢的质量值 g_{best} 和位置;
- (3) 利用 Lévy 飞行改善鸟巢位置并更新;
- (4) 根据概率 p_a 改善鸟巢位置并更新;
- (5) 更新并记录最佳巢的位置和质量;
- (6) 输出最佳巢质量值, 判定是否满足终止条件, 若为否就返回到步骤(3)。

把 CSA 应用到 PV 系统的 MPPT 控制中, 鸟巢位置对应占空比, 鸟巢质量即适应值对应功率。由于 CSA 摒弃一般的各向同性随机游走, 依靠 Lévy 飞行使得搜索效果得到加强, 因此, 理论上 CSA 方法比基于粒子随机游走的 PSO 等方法的搜索路径更优, 优化速度更快, 在光伏 MPPT 应用中能够更快更准确地追踪到全局最大功率点, 另外由于搜索效率更高, 基于 CSA 方法的 MPPT 过程更稳定、功率波动更小; 此外依照发现概率 p_a 改进鸟巢位置的方式也使得 CSA 优化能够更有效地跳出局部最

大值, 防止陷入局部 MPP 从而减小功率失配损失。

2.2 自适应步长的 IP&O 方法

P&O 方法有简单、易实现等优点, 是当前最常用的 MPPT 方法^[21]。首先对 PV 系统输出采样, 然后把扰动前后的输出功率按式(10)作计算和比较。

$$\begin{cases} P = U_{\text{pv}} I_{\text{pv}} \\ \Delta P = P(k) - P(k-1) \end{cases} \quad (10)$$

式中: U_{pv} 、 I_{pv} 为 PV 系统的输出电压和电流; $P(k-1)$ 和 $P(k)$ 分别为第 k 次扰动前后的功率值; ΔP 为扰动前后的功率增量。若扰动后 ΔP 为正, 下次仍然往相同的方向对电压作扰动; 若扰动后 ΔP 为负, 下次往反方向作扰动^[22]。

但对于传统定步长 P&O, 步长设定较小时, 搜索和收敛速度很慢, 步长设定较大时又容易导致在 MPP 附近产生较大的功率波动^[23], 追踪速度和精度难以兼顾。采用自适应步长的 IP&O 法来解决这一问题。首先设置合理的扰动步长, 然后逐渐减小步长, 使得算法能精确地追踪到 MPP, 减少功率波动造成的功率损失。步长变化量控制为

$$\lambda_{\text{step}} = \varepsilon |\Delta P| \quad (11)$$

式中: λ 为步长; ε 为步长缩放系数。

2.3 基于 CSA-IP&O 的 MPPT 方法

CSA 的收敛速度在一定程度上对所选择的参数不敏感, 它具有简单、高效、搜索路径优越、全局搜索能力强等特点, 但 CSA 也存在优化后期收敛速度减慢的问题。为克服这一缺点, 本文把 CSA 与 IP&O 方法结合使用, 首先利用 CSA 的全局搜索能力快速收敛到 MPP 附近, 然后引入 IP&O 方法, 利用 IP&O 良好的局部搜索与快速收敛性能改进优化后期的速度和精度。

2.3.1 终止判定策略

为了能够在 CSA 寻优后期及时引入 IP&O 方法以加快收敛速度, 需给 CSA 设置终止条件。设置当鸟巢间最大位置差小于一个很小的阈值 θ 时, 终止 CSA 优化的执行, 转为执行 IP&O 方法, 此处设为 0.03。在 IP&O 方法寻优阶段, 设置阈值 ξ , 有如下判定式:

$$\frac{|\Delta P|}{\max[P(k), P(k-1)]} < \xi \quad (12)$$

当式(12)成立即功率增量绝对值与当前最大功率的比值小于 ξ 时, 认为已经追踪到全局 MPP, 此时停止扰动, 避免输出功率的波动, 输出最大功率 P_{mpp} 。

2.3.2 算法重启条件

当云层、树木、建筑物、飞行物遮挡等导致局

部阴影或光照情况发生改变时, PV 系统输出功率也相应发生变化, 为降低功率损失需重启 MPPT。将阵列输出功率变化量 ΔP_v 表示为

$$\Delta P_v = \frac{|P_b - P_{mpp}|}{P_{mpp}} \quad (13)$$

式中, P_b 为光伏系统的实时功率。设定当 $\Delta P_v > 0.1$ 时重启 MPPT 算法。

理论上, 相较于 PSO 等方法, 基于 CSA-IP&O 的 MPPT 方法会有更快的追踪速度和准确度, 且追踪过程更稳定功率波动更小; 相较于 P&O 等传统 MPPT 方法, 基于 CSA-IP&O 的 MPPT 方法能防止陷入局部最大功率点从而减小功率损失。基于 CSA-IP&O 的 MPPT 流程图如图 2 所示。

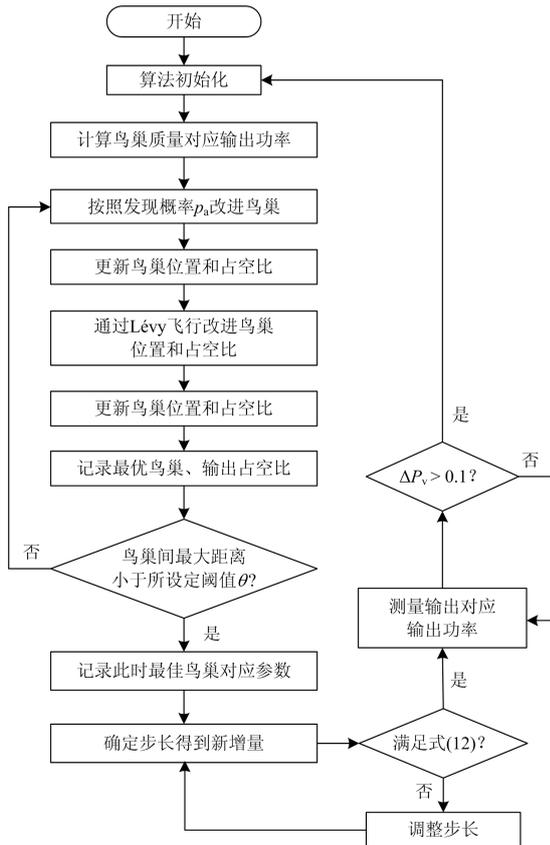


图 2 基于 CSA-IP&O 的 MPPT 方法的流程图

Fig. 2 Flow chart of MPPT method based on CSA-IP&O

3 仿真分析

为验证基于 CSA-IP&O 方法 MPPT 的有效性, 采用 4×1 阵列的 PV 系统进行仿真, 其中单个光伏组件最大功率 249 W, 开路电压 $U_{oc}=36.8$ V, 短路电流 $I_{sc}=8.83$ A, MPP 电压和电流分别为 30 V 和 8.3 A。MPPT 光伏系统框图如图 3 所示。

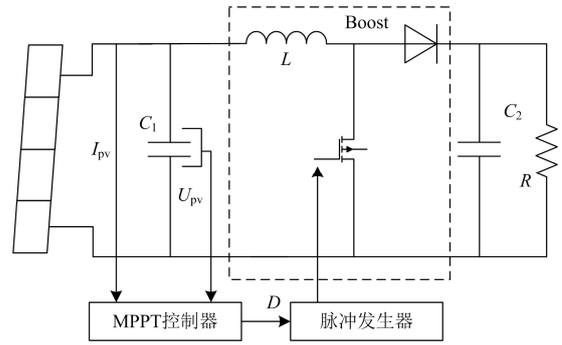
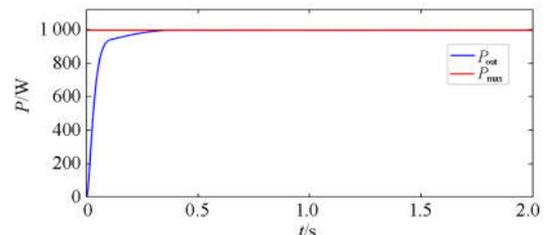


图 3 基于 Boost 的 MPPT 系统

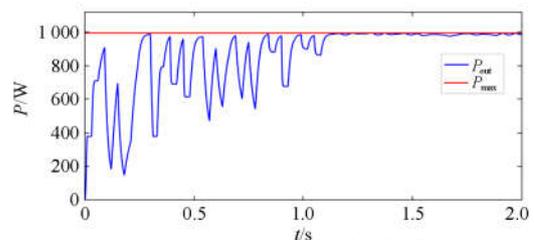
Fig. 3 Boost-based MPPT system

3.1 无阴影遮挡情况下的功率追踪

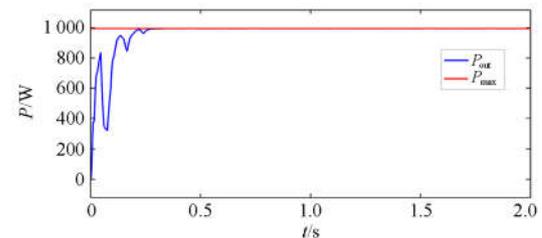
光伏阵列无局部遮阴辐照强度均匀时, 其 P-V 曲线呈现为仅有一个极值点的单峰曲线。设置光照强度为标准辐照度 (1000 W/m^2), 此时 PV 系统的最大功率 $P_{max}=995.94$ W。对基于 CSA-IP&O 的 MPPT 方法进行仿真, 同时用 P&O 和 PSO 作为对比, 仿真时间设置为 2 s。无阴影时 3 种方法的输出功率曲线如图 4 所示, 其中图 4(a)为 P&O 方法的输出功率曲线, 图 4(b)为 PSO 方法的输出功率曲线, 图 4(c)为基于 CSA-IP&O 方法的输出功率曲线。



(a) 基于 P&O 方法的输出功率曲线



(b) 基于 PSO 方法的输出功率曲线



(c) 基于 CSA-IP&O 方法的输出功率曲线

图 4 无阴影时 3 种方法的输出功率曲线

Fig. 4 Output power curve of 3 methods without shadow

可知在无局部遮阴情况下，基于 CSA-IP&O 方法和扰动观察法的 MPPT 系统分别在 0.36 s 和 0.34 s 后追踪到 MPP，所追踪到最大功率分别为 995.88 W 和 995.23 W，与实际最大功率分别相差 0.06 W 和 0.71 W，误差为 0.006% 和 0.0713%，收敛速度快精度高。而基于 PSO 方法的 MPPT 系统在 1.25 s 左右收敛到 MPP 附近，之后没有精确追踪到最大功率点，在 MPP 附近持续功率波动。

3.2 局部遮阴情况下的功率追踪

在发生 PSC 时，PV 模块受到的辐照强度不均，此时 P - V 特性曲线为有多个极值点的多峰曲线^[24]，一些传统的 MPPT 方法容易错误地追踪到局部 MPP 而造成功率损失。

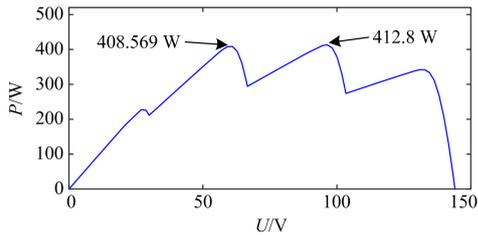
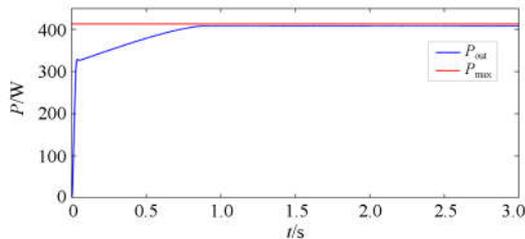


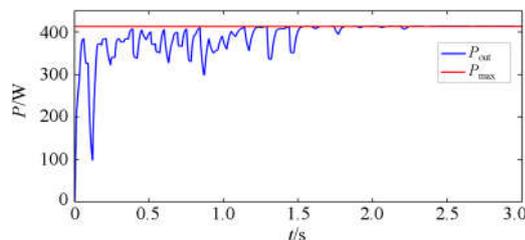
图 5 光伏阵列的 P - V 特性曲线

Fig. 5 P - V characteristic curve of PV array

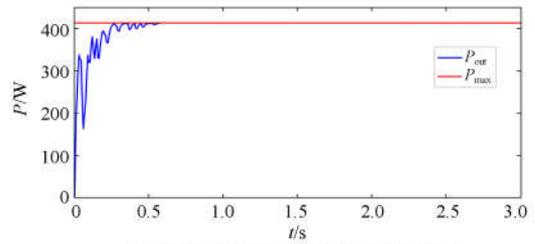
设定光伏组件所受辐照度依次为 300 W/m^2 、 500 W/m^2 、 800 W/m^2 和 1000 W/m^2 ，此时 PV 阵列的 P - V 特性曲线如图 5 所示，其最大功率为 412.8 W。同样用 P&O 和 PSO 方法作为对比，仿真时间设置为 3 s。局部遮阴下 3 种方法的输出功率仿真如图 6 所示，其中图 6(a)为 P&O 方法的输出功率曲线，图 6(b)为 PSO 方法的输出功率曲线，图 6(c)为基于 CSA-IP&O 方法的输出功率曲线。



(a) 基于 P&O 方法的输出功率曲线



(b) 基于 PSO 方法的输出功率曲线



(c) 基于 CSA-IP&O 方法的输出功率曲线

图 6 PSC 下 3 种方法的输出功率曲线

Fig. 6 Output power curve of 3 methods under PSC

可知基于 CSA-IP&O 法的 MPPT 系统在 0.57 s 后追踪到全局 MPP，为 412.75 W，与实际最大功率相差 0.04 W，误差为 0.000969%；P&O 法在 0.841 s 后错误地陷入到一个局部 MPP(功率为 408.569 W)附近，输出功率为 407.5 W，与实际最大功率相差 5.3 W，误差为 1.29%，造成了功率损失；基于 PSO 法的 MPPT 系统在 2.3 s 收敛到全局 MPP 附近，伴有功率波动。与 P&O 和 PSO 法相比，本文所提基于 CSA-IP&O 法的 MPPT 追踪速度更快精度更高。

3.3 变化的局部遮阴模式下的功率追踪

对变化的光照模式下 CSA-IP&O 方法的追踪能力进行仿真，设定在时间 $t=0 \text{ s}$ 时，光伏组件所受光照情况 1 为：光照强度均为 1000 W/m^2 ，最大功率为 995.94 W；在 $t=1 \text{ s}$ 时所受光照情况 2 为： $[500, 1000, 800, 1000] \text{ W/m}^2$ ，最大功率为 637.7 W；在 $t=2 \text{ s}$ 时光照情况 3 为： $[1000, 200, 600, 1000] \text{ W/m}^2$ ，最大功率为 493.71 W。变化的光照模式下基于 CSA-IP&O 方法的最大功率点追踪输出功率曲线如图 7 所示。

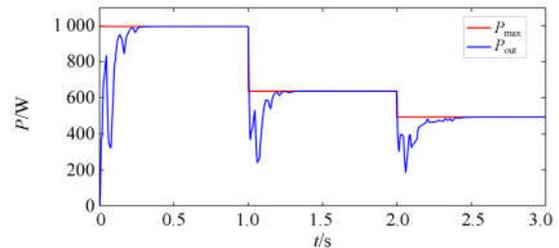


图 7 变化光照下基于 CSA-IP&O 的 MPPT 输出功率曲线

Fig. 7 Output power curve of MPPT based on CSA-IP&O under changing lighting

光照情况 1 时，基于 CSA-IP&O 的 MPPT 系统在 0.35 s 后准确追踪到 MPP，输出功率为 995.88 W，误差为 0.006%；在 $t=1 \text{ s}$ 时，光照情况变化算法重启，在 $t=1.45 \text{ s}$ 时刻又追踪到全局 MPP，输出功率为 637.65 W，误差为 0.0078%；在 $t=2 \text{ s}$ 时，光照

情况变化算法重启, 在 $t=2.57$ s 时准确追踪到新的全局 MPP, 输出功率为 493.68 W, 误差为 0.0061%。可知基于 CSA-IP&O 方法的 MPPT 系统在变化的光照模式下依然有较快的追踪速度和很高的精确度。

4 结论

局部遮阴会导致光伏系统的 P-V 曲线为多峰曲线, 使得 MPPT 系统的追踪速度和精度难以得到保证。提出基于 CSA-IP&O 的光伏系统 MPPT 方法, 利用 CSA 优良的全局搜索能力和 IP&O 良好的局部搜索能力来快速、准确地收敛到最大功率点。避免了在 CSA 优化后期收敛、搜索速度变慢和传统 MPPT 方法容易陷入局部 MPP 从而造成功率损失等问题。仿真分析结果表明:

(1) 无局部阴影时, 本文所提的 CSA-IP&O 方法追踪速度略低于 P&O 但精度更高, PSO 方法速度最慢精度最低;

(2) 在 PSC 情况下, 相较于 P&O 和 PSO 方法, 本文所提的方法有着明显更快的追踪速度和更高的精确度;

(3) 在变化的阴影模式下, 本文所提方法也能快速响应准确地追踪到全局 MPP 避免了功率损失。

参考文献

- [1] MOHAMMADREZA A, KAZEM P. A novel reconfiguration procedure to extract maximum power from partially-shaded photovoltaic arrays[J]. *Solar Energy*, 2018, 173: 110-119.
- [2] 奚霖仲, 李飞, 张兴, 等. 基于集中损耗的光伏发电单元年发电量 RT-LAB 仿真分析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(8): 156-162.
XI Jizhong, LI Fei, ZHANG Xing, et al. Concentrated loss based RT-LAB simulation analysis of annual power generating capacity for photovoltaic unit[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(8): 156-162.
- [3] JOHN BOSCO M, CAROLIN MABEL M. A novel cross diagonal view configuration of a PV system under partial shading conditions[J]. *Solar Energy*, 2017, 158: 760-773.
- [4] BANA S, SAINI R P. Experimental investigation on power output of different photovoltaic array configurations under uniform and partial shading scenarios[J]. *Energy*, 2017, 127: 438-453.
- [5] DALIENTO S, DINAPOLI F, GUERRIERO P, et al. A modified bypass circuit for improved hot spot reliability of solar panels subject to partial shading[J]. *Solar Energy*, 2016, 134: 211-218.
- [6] 聂晓华, 赖家俊. 局部阴影下光伏阵列全局最大功率点跟踪控制方法综述[J]. *电网技术*, 2014, 38(12): 3279-3285.
NIE Xiaohua, LAI Jiajun. A survey on tracking and control approaches for global maximum power point of photovoltaic arrays in partially shaded environment[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(12): 3279-3285.
- [7] MOTAHHIR S, CHALH A, GHZIZAL A E, et al. Development of a low-cost PV system using an improved INC algorithm and a PV panel Proteus model[J]. *J Clean Prod*, 2018, 204: 355-365.
- [8] MOHANTY S, SUBUDHI B, RAY P K. A grey wolf-assisted Perturb & Observe MPPT algorithm for a PV system[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(1): 340-347.
- [9] DILEEP G, SINGH S N. An improved particle swarm optimization based maximum power point tracking algorithm for PV system operating under partial shading conditions[J]. *Solar Energy*, 2017, 158: 1006-1015.
- [10] 盛四清, 陈玉良, 张晶晶. 基于差分进化人工蜂群算法的光伏最大功率跟踪策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(11): 23-29.
SHENG Siqing, CHEN Yuliang, ZHANG Jingjing. Research on maximum power point tracking strategy based on differential evolution artificial bee colony algorithm of photovoltaic system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(11): 23-29.
- [11] GAVHANE P S, KRISHNAMURTHY S, DIXIT R, et al. EL-PSO based MPPT for solar PV under partial shaded condition[J]. *Energy Procedia*, 2017, 117: 1047-1053.
- [12] ELDAHABA Y E A, SAAD N H, ZEKRY A. Enhancing the tracking techniques for the global maximum power point under partial shading conditions[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 73: 1173-1183.
- [13] ELTAMALY A M, FARH H M H. Dynamic global maximum power point tracking of the PV systems under variant partial shading using hybrid GWO-FLC[J]. *Solar Energy*, 2019, 177: 306-316.
- [14] SOUFI Y, BECHOUAT M, KAHLA S. Fuzzy-PSO controller design for maximum power point tracking in photovoltaic system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42: 8680-8688.
- [15] LI Guiqiang, JIN Yi, AKRAM M W, et al. Application of bio-inspired algorithms in maximum power point tracking for PV systems under partial shading conditions—a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 840-873.

- [16] 高志强, 李松, 周雪松, 等. 线性自抗扰在光伏发电系统 MPPT 中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 52-59.
GAO Zhiqiang, LI Song, ZHOU Xuesong, et al. Design of MPPT controller for photovoltaic generation system based on LADRC[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 52-59.
- [17] RAJKUMAR M V, MAHAKUMAR M, MANOJKUMAR M, et al. A new DC-DC converter topology with grey wolf MPPT algorithm for photovoltaic system[J]. Int J Emerg Technol Eng Res (IJETER), 2017, 5(4): 54-59.
- [18] 张永韡, 汪镭, 吴启迪. 动态适应布谷鸟搜索算法[J]. 控制与决策, 2014, 29(4): 617-622.
ZHANG Yongwei, WANG Lei, WU Qidi. Dynamic adaptation cuckoo search algorithm[J]. Control and Decision, 2014, 29(4): 617-622.
- [19] 孙敏, 房明磊, 韦慧. 基于自适应步长的改进布谷鸟算法[J]. 赤峰学院学报: 自然科学版, 2018, 34(7): 45-49.
SUN Min, FANG Minglei, WEI Hui. Improved cuckoo algorithm based on adaptive step size[J]. Journal of Chifeng University: Natural Science Edition, 2018, 34(7): 45-49.
- [20] SABRINA T, CHERIF L, TOUMI K Y, et al. A new MPPT controller based on the ant colony optimization algorithm for photovoltaic systems under partial shading conditions[J]. Applied Soft Computing, 2017, 58: 465-479.
- [21] 付青, 耿炫, 单英浩, 等. 一种光伏发电系统的双扰动 MPPT 方法研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(8): 2341-2347.
FU Qing, GENG Xuan, SHAN Yinghao, et al. Research on double disturbances MPPT strategy for PV power generation system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(8): 2341-2347.
- [22] 王书征, 李先允. 一种新型自适应扰动观察法在光伏发电 MPPT 策略中的应用[J]. 太阳能学报, 2016, 37(9): 2393-2400.
WANG Shuzheng, LI Xianyun. Application of a novel adaptive perturbation and observation method in MPPT strategy for photovoltaic power system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(9): 2393-2400.
- [23] 于子捷, 魏晨曦, 田芳芳, 等. 一种改进型扰动观察法在最大功率点跟踪中的应用[J]. 电测与仪表, 2017, 54(15): 113-119.
YU Zijie, WEI Chenxi, TIAN Fangfang, et al. An improved perturbation and observation method used in maximum power point tracking control of PV generation system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(15): 113-119.
- [24] AHMAD R, MURTAZA A F, HADEED A S, et al. An analytical approach to study partial shading effects on PV array supported by literature[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 721-732.

收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-07-16

作者简介:

赵帅旗(1994—), 男, 硕士, 研究方向为电能质量分析与控制、光伏发电与并网技术研究; E-mail: zsqkyy@163.com

肖辉(1975—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量分析与控制、光伏发电与并网技术研究; E-mail: xiaohui@csust.edu.cn

刘忠兵(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为城市可再生能源评估与优化应用研究、太阳能光伏光热建筑一体化研究。E-mail: zhongbingliu@hnu.edu.cn

(编辑 周金梅)