



基于分段控制的光伏全工况 MPPT 研究

摘要

光伏(PV)阵列输出特性随运行环境及自身工况的变化而变化.为满足不同工况下最大功率点跟踪(MPPT)控制需求,在对光伏阵列各工况下输出特性进行分析的基础上,提出了一种改进量子粒子群算法(QPSO)与扰动观察法相结合的 MPPT 分段控制方法.在跟踪控制初期,采用非一致性自适应变异 DCWQPSO 算法进行最大功率点全局搜索,使功率点快速收敛至最大功率点附近,提高跟踪速度;在跟踪控制后期,采用闭环模糊控制扰动观察法进行最大功率点局部搜索,提高跟踪精度. Matlab 仿真结果表明,该分段控制方法在光伏阵列各工况下仅需 0.32 s 即可完成 MPPT,并保持稳定,比其他控制方法具有更快的跟踪速度及更高的跟踪精度,可有效提高光伏发电效率.

关键词

最大功率点跟踪(MPPT);全工况;改进量子粒子群算法;闭环模糊控制;光伏发电

中图分类号 TM912

文献标志码 A

收稿日期 2022-04-27

资助项目 湖北省教育厅科学技术研究中青年人才基金(Q20171802);2022 年度十堰市市级引导性科研项目(22Y04)

作者简介

方胜利,男,讲师,电力系统智能化监控. qyfs1@126.com

1 湖北汽车工业学院 电气与信息工程学院, 十堰,442002

2 十堰巨能电力设计有限公司,十堰,442000

0 引言

光伏发电作为一种清洁环保、取能丰富、补能便捷的发电方式,在当下环境污染、能源短缺背景下得到了越加广泛的应用.但由于光伏阵列的输出功率受光照强度、温度等环境因素影响,且具有典型的非线性特征^[1],故对其进行最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)是实现光伏发电效率最大化的重要手段.同时光伏阵列在实际运行过程中存在多种工况,如灰尘附着、阴影遮挡、散热不均等,导致其内部各光伏组件的温度、光照的一致性存在差异,使其电气输出呈现单峰或多峰特性^[2],故需采取合适的控制算法以满足各种工况下的 MPPT 需求.传统 MPPT 算法包括恒定电压法、扰动观察法(P&O)、电导增量法(INC)等,仅能满足光伏阵列均匀光照工况下的 MPPT 控制需求,而在非均匀光照工况下易陷入局部最优,无法跟踪到全局最大功率点(MPP)^[3-6].粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[7]、混沌搜索算法^[8]、遗传算法(GA)^[9]等进行 MPPT 控制,能基本实现多峰输出特性时的 MPPT 需求,但跟踪时间长、跟踪精度低.文献[10]从量子力学角度出发,采用可调参数更少、收敛速度更快、寻优范围更广的量子粒子群算法(Quantum Particle Swarm Optimization, QPSO)进行 MPPT,虽然能准确跟踪到 MPP,但仍存在早熟收敛、跟踪速度慢的缺陷.文献[11]在 QPSO 的基础上引入莱维飞行策略增加算法收敛后期粒子种群的多样性,虽然可在一定程度上避免早熟收敛,但跟踪过程中存在输出功率波动较大的问题.文献[12-14]提出先进行 MPPT 全局跟踪、后采用扰动观察法进行 MPPT 局部跟踪的混合算法,其中文献[12]采用负载电压闭环控制算法进行 MPP 全局跟踪,文献[13]采用 PSO 算法进行 MPP 全局跟踪,文献[14]则采用 GA 算法进行 MPP 全局跟踪,三者虽然能基本满足 MPPT 控制需求,但全局跟踪算法中可调参数较多、收敛性较差、易早熟,且局部跟踪算法中采用定步长或开环式模糊变步长控制,导致输出功率波动仍较大,影响其跟踪速度及精度.文献[15]则提出利用 QPSO 进行 MPP 全局跟踪,并在满足一定收敛条件时利用恒定电压法进行 MPP 局部跟踪,提高了跟踪速度,但在跟踪前期存在早熟风险.文献[16]提出一种改进 QPSO 与 INC 相结合的控制算法,在惯性权重自适应调整量子粒子群优化算法(Dynamically Changing Weights Quantum-behaved Particle Swarm Optimization, DC-WQPSO)中引入惯性权重及粒子位置周期性变异以提高 MPP 全局跟

踪能力,但变异过程具有随机性,缺乏理论指导,且MPP局部跟踪时采用定步长INC,不仅对采集电压、电流的硬件要求高,而且一定程度上影响了跟踪速度和精度。

基于此,为提高光伏阵列在不同工况下MPPT速度和精度,本文提出一种改进QPSO与扰动观察法相结合的MPPT分段控制方法。跟踪初期,该算法在DCWQPSO的基础上引入非一致性自适应变异进行MPP的全局搜索,当满足一定条件后转入后期定向跟踪,利用闭环模糊控制扰动观察法进行MPP的局部搜索,最终实现高效、精确的MPPT。为验证该控制方法的实用性及优越性,搭建Matlab仿真模型,对其仿真结果进行分析与比较,并给出结论。

1 光伏组件数学模型

光伏电池利用光生伏特效应将光能转换成电能,但由于单个光伏电池电压较低、容量不足,无法投入实际使用,故通常将多个光伏电池经串并联且封装后得到光伏组件。在实际工程应用中,光伏组件数学模型^[17]为

$$I_p = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{V_p}{C_2 V_{oc}}\right) - 1 \right] \right\}, \quad (1)$$

$$P_p = I_p V_p, \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} C_1 = \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \exp\left(-\frac{V_{mp}}{C_2 V_{oc}} \right), \\ C_2 = \left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} - 1 \right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \right]^{-1}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_{sc} = I_{scref}(1 + aT_D)G_{SPS}, \\ I_{mp} = I_{mpref}(1 + aT_D)G_{SPS}, \\ V_{oc} = V_{ocref}(1 - cT_D)\ln(e + bG_D), \\ V_{mp} = V_{mpref}(1 - cT_D)\ln(e + bG_D), \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} T_D = T - T_R, \\ G_D = G - G_R, \\ G_{SPS} = G/G_R, \end{cases} \quad (5)$$

式中: I_p, V_p, P_p 分别表示光伏组件的输出电流、电压、功率; $I_{sc}, V_{oc}, I_{mp}, V_{mp}$ 分别表示光伏组件在实际条件下(光强 G 、温度 T)的短路电流、开路电压、最大功率点电流、最大功率点电压; $I_{scref}, V_{ocref}, I_{mpref}, V_{mpref}$ 分别表示参考条件下(光强 G_R 、温度 T_R)的短路电流、开路电压、最大功率点电流、最大功率点电压; T_D, G_D, G_{SPS} 分别表示实际条件下与参考条件下的温度差值、光强差值、光强比值; $a = 0.0025\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $b = 0.0005\text{ m}^2/\text{W}$, $c = 0.00288\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 均为补偿系数, $e \approx 2.71828$, 为自然常数。

由式(1)~(5)可知,光伏组件输出具有典型非线性特征,且受光强及温度等环境因素影响。

2 光伏阵列不同工况下的输出特性

在实际光伏发电工程中,将多个相同参数的光伏组件经串、并联组成光伏阵列,由光伏阵列向负载供电。本文以3个相同光伏组件串联组成的光伏阵列作为研究对象,各光伏组件的特征参数为: $G_R = 1000\text{ W/m}^2$, $T_R = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $V_{ocref} = 45\text{ V}$, $I_{scref} = 5.1\text{ A}$, $V_{mpref} = 35\text{ V}$, $I_{mpref} = 4.5\text{ A}$ 。

根据式(1)~(5)进行Matlab建模,而后按照光伏阵列自身工况改变其内部各光伏组件的温度、光照强度。其中按照光伏阵列内部各组件温度、光照强度的一致性进行划分,存在均匀受热-非均匀光照、非均匀受热-非均匀光照、非均匀受热-均匀光照及均匀受热-均匀光照等4种典型工况。本文设定4种运行工况参数如表1所示,通过Matlab仿真可得到光伏阵列的 P - U 输出特性如图1中所示。对仿真数据进行统计,可得到各工况下的最大功率点。

3 光伏阵列MPPT实现原理

由图1可知,光伏阵列的输出电压不同时,输出功率也不同,且在某工况下仅存在唯一的最大功率点,同时该最大功率点会随着自身工况的变化而变化,因此要实现最大功率追踪,就需要调节其电压输出,使其追踪当前工况下最大功率点处的电压,通常

表1 光伏阵列工况

Table 1 PV array working conditions

工况类别	工况条件	温度/ $^\circ\text{C}$	光强/ (W/m^2)	最大功率点电压/V	最大功率点功率/W
工况1	均匀受热、均匀光照	$T_1 = T_2 = T_3 = 25$	$G_1 = G_2 = G_3 = 1000$	105.00	472.50
工况2	非均匀受热、均匀光照	$T_1 = 25, T_2 = 40, T_3 = 65$	$G_1 = G_2 = G_3 = 1000$	99.97	464.09
工况3	均匀受热、非均匀光照	$T_1 = T_2 = T_3 = 25$	$G_1 = 1000, G_2 = 800, G_3 = 600$	106.87	312.32
工况4	非均匀受热、非均匀光照	$T_1 = 25, T_2 = 40, T_3 = 65$	$G_1 = 1000, G_2 = 800, G_3 = 600$	100.63	323.34

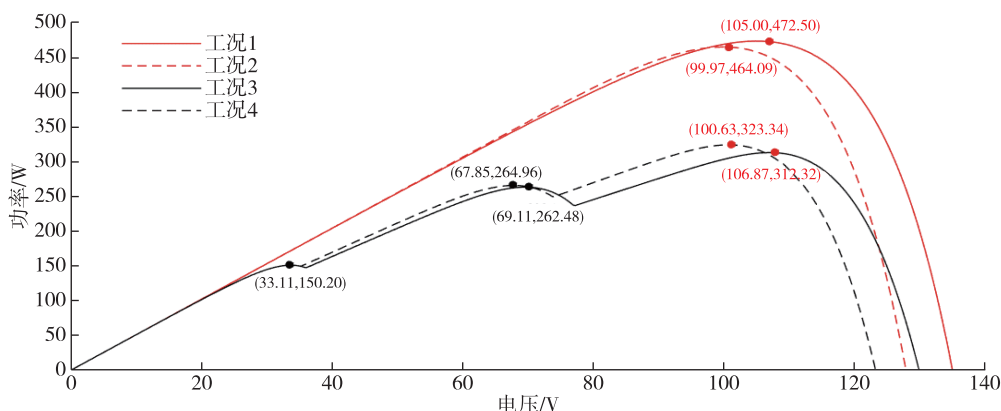


图1 4种典型工况下光伏阵列输出特性

Fig. 1 Output characteristics of PV array under four typical working conditions

采用 Boost 电路通过调节其电子开关管 S 的开合占空比 D 来实现,如图 2 所示^[12].故光伏阵列 MPPT 实际上是一个是以输出功率最大化为控制目标、以搜寻最大功率点电压为控制过程、以调节电子开关管占空比为控制手段的不断搜索及寻优过程.

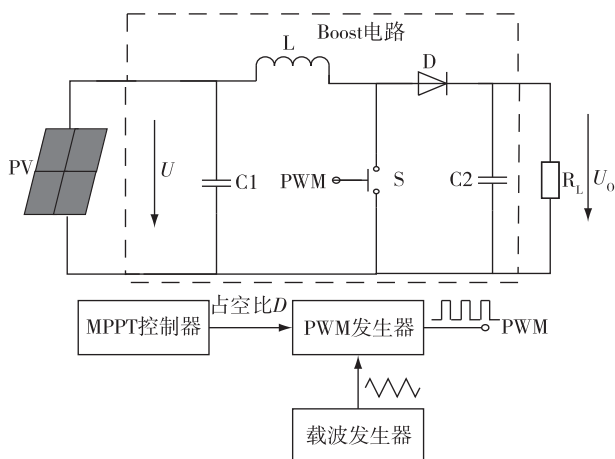


图2 MPPT 实现原理

Fig. 2 Schematic diagram of MPPT implementation

进一步对图 1 分析可知,按照光伏输出特性曲线的形状进行区分,存在两种不同的输出特性,为获得良好的 MPPT 性能,需采取不同的 MPPT 控制方法:

1) 均匀光照时的单峰特性.此时各光伏组件光照强度相同,无论是否均匀受热(即各组件温度是否相同),其 $P-U$ 曲线均存在唯一的极值点,该极值点即为最大功率点.因此在最大功率点跟踪全程均可采用规则性扰动,即通过扰动前后输出功率大小的比较结果进行下一轮的定向扰动,直到其达到最大功率点.

2) 非均匀光照时的多峰特性.此时各光伏组件光照强度不同,无论是否均匀受热,其 $P-U$ 曲线均存在多个极值点,但仅有一个极值点为其最大功率点,故不宜全程采用规则性电压扰动,尤其在跟踪初期,容易陷入局部极值点.为取得较好的 MPPT 效果,首先采用非规则性扰动将功率点扰动至最大功率点附近的单峰区间,而后采用规则性扰动将功率点快速扰动至最大功率点,防止功率上下波动.

综上所述,为兼顾光伏阵列在各种工况下 MPPT 需要,在 MPPT 初期采用非规则性扰动进行全局搜索,探寻最大功率点所在的区域,防止陷入局部极值点,后期采用规则性扰动进行快速局部搜索,以实现功率点的精准定位,最终完成 MPP 的高效跟踪.

4 MPP 全局搜索算法

根据第 3 部分分析可知,MPP 全局搜索需能跳出局部最优,避免陷入局部极值点.当前常见的全局搜索方法包括 PSO、SFO、GA、ACO、QPSO 等集群式仿生智能算法,其中 QPSO 是针对 PSO 易陷入局部最优、收敛速度慢等问题引入量子力学特性进行改进的寻优算法,因其可调参数少、收敛性好而被广泛应用.

QPSO 基于量子力学理论在粒子种群中引入 δ 势阱模型,通过求解薛定谔方程得出波函数,进而计算出粒子在解空间内某一处的概率密度函数,最后通过蒙特卡洛随机模拟算法求得粒子基本方程^[16].粒子 i 经过 t 次迭代后的位置 $X_i(t+1)$ 可表示为

$$X_i(t+1) = P_i(t) \pm \frac{L_i(t)}{2} \ln\left(\frac{1}{u}\right), \quad (6)$$

式中, u 为 $[0, 1]$ 范围内服从均匀分布的随机数, $P_i(t)$, $L_i(t)$ 分别为势阱中心、势阱特征长度, 其表达式分别为

$$\begin{cases} P_i(t) = \varphi p_{\text{best-}i}(t) + (1 - \varphi) p_{\text{gbest}}(t), \\ L_i(t) = 2\beta |m_{\text{best}}(t) - X_i(t)|, \end{cases} \quad (7)$$

式中, φ 为 $[0, 1]$ 范围内服从均匀分布的随机数, $p_{\text{best-}i}(t)$ 为粒子 i 经 t 次迭代局部最优位置, $p_{\text{gbest}}(t)$ 为粒子种群经 t 次迭代的全局最优位置, $X_i(t)$ 为粒子 i 迭代前的位置, $m_{\text{best}}(t)$ 为粒子种群局部最优位置的平均值, 即 $m_{\text{best}}(t) = \sum_{i=1}^M p_{\text{best-}i}(t)/M$, M 为粒子种群规模. 惯性权重 β 是该算法除种群规模及最大迭代次数外唯一的可调参数. 为了提高算法搜索效率, β 通常随迭代次数 t 从 1.0 线性减小至 0.5.

为防止例子种群早熟收敛或收敛过慢, 文献[18]提出了惯性权自适应调整的量子粒子群优化算法(DCWQPSO), 将量子粒子群进化速度因子 s_d 和聚集度因子 j_d 引入惯性权重 β 的动态调整中, 即:

$$\beta = f(s_d, j_d) = \beta_0 - s_d \beta_1 + j_d \beta_2, \quad (8)$$

式中, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 为待定系数, 通常取 $\beta_0 = 1, \beta_1 = 0.5, \beta_2 = 0.2, s_d, j_d$ 可分别表示为

$$\begin{cases} s_d = F[p_{\text{gbest}}(t-1)]/F[p_{\text{gbest}}(t)], \\ j_d = M(t)/F[p_{\text{gbest}}(t)], \end{cases} \quad (9)$$

式中, $F[x]$ 表示 x 位置处的粒子适应度, $M(t)$ 为 t 次迭代时粒子种群局部最优适应度的均值, 可表示为

$$M(t) = \sum_{i=1}^M F[p_{\text{best-}i}]/M.$$

为克服 DCWQPSO 算法中粒子种群多样性不高、易陷入局部最优的缺陷, 本文在 DCWQPSO 的基础上对粒子种群进行非一致性自适应变异, 以进一步提高粒子的搜索范围及种群多样性, 从而提高全局搜索能力.

首先对迭代后种群中每个粒子的适应度大小进行升序排序, 得到粒子 i 的排列序号 k , 则 k 值越大, 适应度越大. 即:

$$\begin{aligned} F[X_a(t)]_1 &\leq F[X_b(t)]_2 \leq \dots \leq F[X_i(t)]_k \leq \\ &\dots \leq F[X_n(t)]_M, \end{aligned} \quad (10)$$

则粒子 i 在 t 次迭代时的变异概率可表示为

$$P_{m-i}(t) = 0.1 j_d \exp\left(-2.0 \frac{\log(k)}{\log(M)}\right), \quad (11)$$

式中 j_d 为粒子种群聚集度因子, 反映了种群的成熟度, 计算如式(9)所示.

由式(11)可知, 粒子变异概率的变化范围约为 $[0.014j_d, 0.1j_d]$, 且随着 j_d 的增大, 其变化幅度亦增

大, 以便于在粒子种群逐渐成熟的同时提高粒子变异概率, 避免陷入局部最优. 此外, 粒子变异概率随着适应度排列序号 k 的增大而减小, 即粒子适应度值越大, 其变异概率越小, 以防止变异时破坏最优粒子.

确定各粒子变异概率后, 采用轮盘赌策略对粒子进行选择变异, 而变异量采用非一致性自适应变异策略^[19]来确定, 即若粒子 i 被选中变异, 则其位置 $X_i(t)$ 将变异为 $X_i(t)'$, 其表达式为

$$X_i(t)' = \begin{cases} X_i(t) + \Delta(t, X_{\max} - X_i(t)), & r < 0.5, \\ X_i(t) - \Delta(t, X_i(t) - X_{\min}), & r \geq 0.5, \end{cases} \quad (12)$$

式中, r 为 $[0, 1]$ 范围内服从均匀分布的随机数, X_{\max}, X_{\min} 分别为 $X_i(t)$ 的最大值、最小值, $\Delta(t, y)$ 为变异量, 可表示为

$$\Delta(t, y) = y(1 - r^{(1-t/t_{\max})^\lambda}), \quad (13)$$

式中, t_{\max} 为种群最大迭代次数, λ 为非一致性程度参数, 取值范围在 $[2, 5]$ 区间上, 可表示为

$$\lambda = 2 + 3 \left(1 - \frac{\exp(1) - \exp\left(1 - \frac{F[X_i(t)]}{F[p_{\text{gbest}}(t)]}\right)}{\exp(1) - 1}\right). \quad (14)$$

由式(13)可知, 随着迭代次数 t 的增大, 变异量 $\Delta(t, y)$ 取值接近于 0 的概率增大, 使算法在迭代初期能在较大范围内进行全局搜索, 而在迭代后期主要进行局部搜索, 从而将粒子变异量与搜索进程关联. 由式(13)~(14)可知, 随着种群粒子适应度值的提高, 非一致性程度参数 λ 不断减小, 变异量 $\Delta(t, y)$ 减小, 从而使较“优秀”的粒子在较小的范围内搜索, 提高该粒子的变异免疫力, 防止因变异而遭到破坏.

为验证改进算法在光伏 MPPT 控制中的优越性, 在 Matlab 中建立仿真模型如图 3 所示. 主电路元件参数为: $C_1 = 10 \mu\text{F}$, $L = 10 \text{ mH}$, $C_2 = 300 \mu\text{F}$, $R = 100 \Omega$, PV 模块为光伏阵列模型封装, GT1、GT2、GT3 分别为光伏阵列内部 3 个光伏组件的光照及温度设定模块, 控制器模块内部包括 MPPT 控制器及 PWM 发生器两个功能块, 其中 PWM 发生器中载波频率设置为 20 kHz.

将 MPPT 控制器输出的占空比视为粒子位置 $X_i(t)$, 将光伏阵列输出功率 $P_p = V_p I_p$ 视为粒子的适应度, 粒子种群规模 $M = 5$, 最大迭代次数 $t_{\max} = 25$, 各粒子单次作用时间为 0.008 s ^[20]. 由第 4 部分光伏阵列输出特性分析, 按照输出特性曲线形状可将其工况分为均匀光照和非均匀光照两大类, 调节 GT1、

GT2、GT3 使光伏阵列 PV 分别处于如表 1 所示的工况 1、工况 4,并分别采用文献[10]提出的基本 QPSO、文献[11]提出的莱维飞行式 HQPSO、文献 [16]提出的周期性变异 DCWQPSO 及本文提出的非一致性自适应变异 DCWQPSO 算法进行仿真,仿真结果分别如图 4、5 所示。

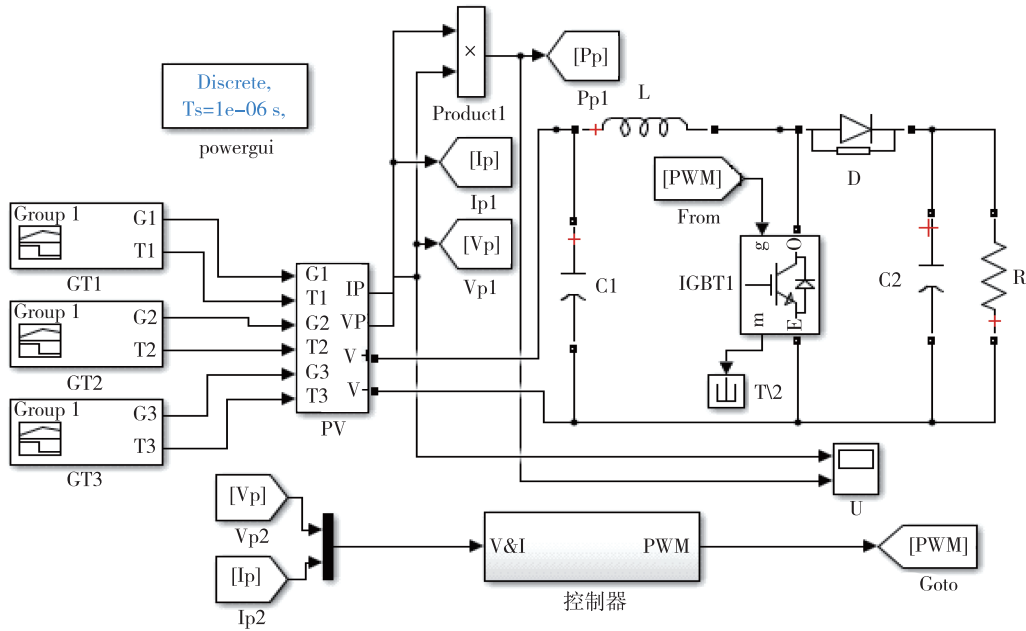


图 3 系统仿真模型

Fig. 3 System simulation model

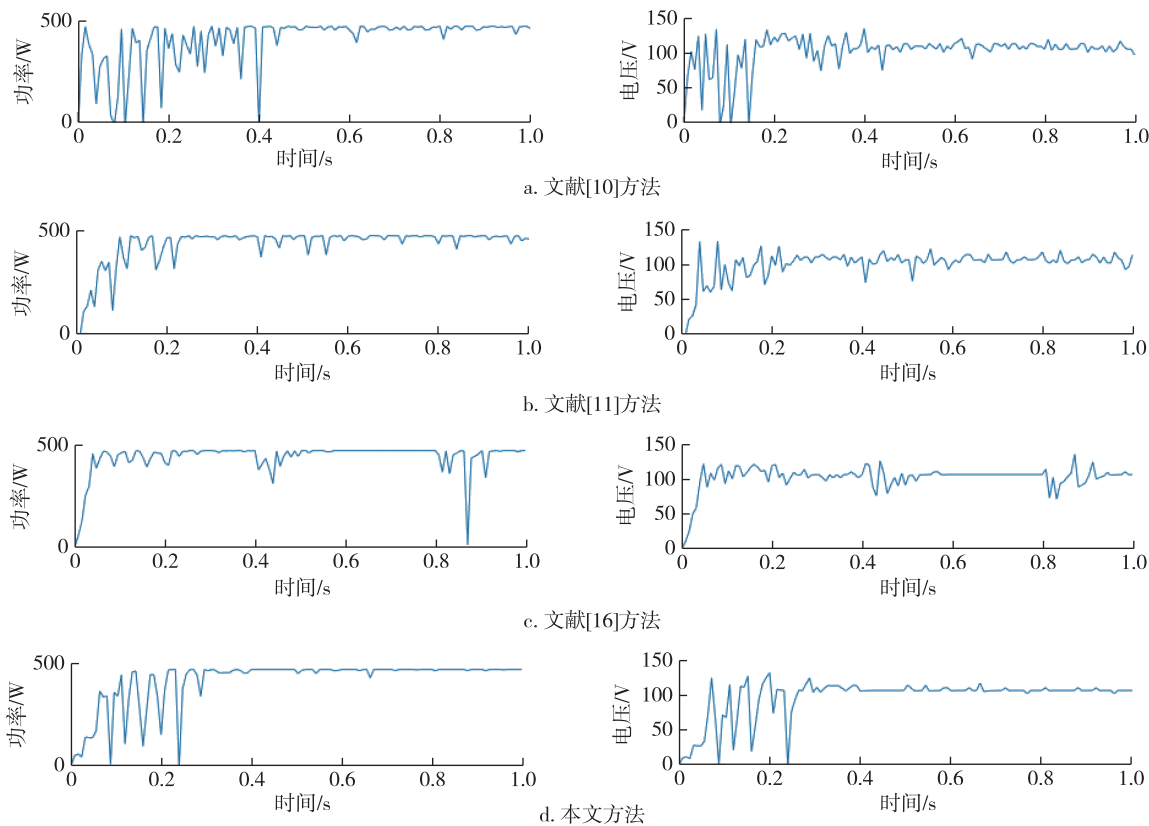


图 4 均匀光照工况(工况 1)光伏阵列输出变化曲线

Fig. 4 Variation curves of PV array output under uniform light intensity condition (No.1 condition)

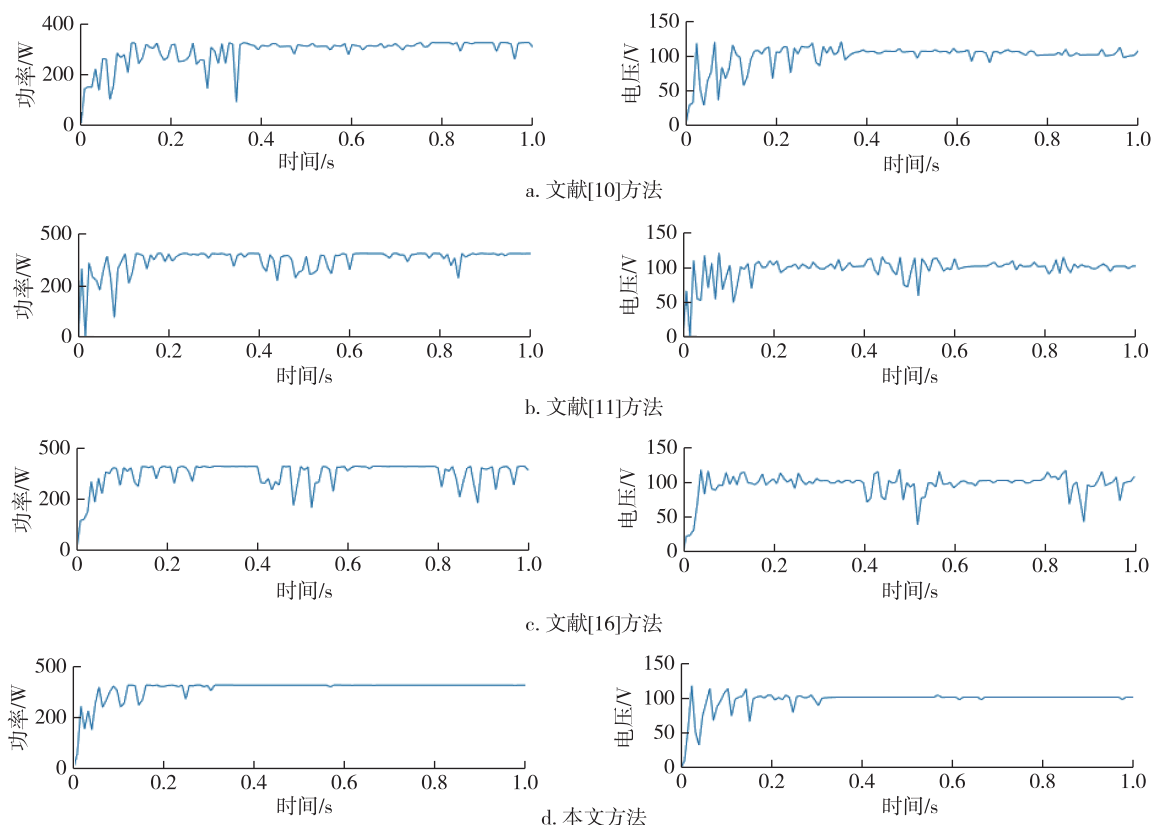


图5 非均匀光照工况(工况4)光伏阵列输出变化曲线

Fig. 5 Output variation curves of PV array under non-uniform light intensity condition (No.4 condition)

对图4、5分析可知:处于两种工况下的光伏阵列MPPT过程中,文献[10]提出的基本QPSO算法及文献[11]提出的莱维飞行式HQPSO算法均使得输出功率波动较大,收敛性较差;文献[16]提出的周期性变异DCWQPSO算法分别在0.55s、0.32s左右首次收敛至对应工况下最大功率点,但由于无规则的变异使得收敛后输出功率仍在较大范围内波动,稳定性不高,导致搜索精度不够;而本文提出的非一致性自适应变异DCWQPSO均在0.32s左右收敛至对应工况下最大功率点,功率波动范围分别为468.3~472.5W、321.7~323.3W,相比较而言,本文算法最大功率点搜索速度及搜索精度最大。

5 MPP局部搜索算法

由图4、5可知,在光伏阵列不同工况下,非一致性自适应变异DCWQPSO均能高效搜索到MPP,但由于QPSO在本质上属于概率寻优,故在MPP附近仍存在震荡现象。基于此,在MPP全局搜索完成后对其功率点实施定向规则性扰动,以进行功率点的局部搜索。为尽快将功率点稳定在MPP处,本文采

取闭环模糊控制扰动观察法。

由图1所示的光伏阵列输出特性曲线可知,若当前功率点处于MPP所在的单峰区间内时,其 $P-U$ 曲线斜率 dP/dU 具有唯一性。若当前功率点处于MPP左侧时, $dP/dU > 0$,若当前功率点处于MPP右侧时, $dP/dU < 0$,且当前功率点距离MPP越近, dP/dU 的绝对值越小,故可根据 dP/dU 判断当前工作点与MPP的位置关系。此外,还可根据电压变化量 dU 的正负判断当前工作点的运动轨迹,即当 $dU > 0$ 时,输出电压增大,当前功率点正向右移动;反之,当前功率点向左移动。基于此,本文选择 dP/dU 和 dU 作为模糊控制器的输入感应量,通过对其进行模糊化、模糊推理得到扰动步长 U_s 的模糊值,即将 U_s 作为模糊控制器的输出控制量,最后经反模糊得到精确的输出电压扰动步长,从而动态调整扰动步长,提高调节速度。

为获得较高的模糊控制精度,同时简化模糊规则、降低模糊控制调节频率,输入感应量 dP/dU 及输出控制量 U_s 的论域均定义为 $[-5, 5]$,并取相同的模糊变量语言值集合(负大、负中、负小、零、正小、

正中、正大),对应的模糊子集记为: dP/dU , $U_s = \{NB, NM, NS, ZO, PB, PM, PS\}$,输入感应量 dU 论域定义为 $[-1, 1]$,模糊变量语言值取负、零、正,对应的模糊子集 $dU = \{N, ZO, P\}$,三者的隶属度函数曲线如图 6 所示,根据其输出特性设计模糊控制规则如表 2 所示.

表 2 模糊控制规则
Table 2 Fuzzy control rule

dU	U_s						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
N	NM	NS	ZO	PS	PS	PB	PB
ZO	NS	NS	NS	ZO	PS	PS	PS
P	NB	NB	NS	NS	ZO	PS	PM

本文按照表 2 的控制规则采用 Mamdani 法进行模糊推理,而后采用通用的重心法(COA)进行反模糊输出 U_s 的单一精确值.该输出也即光伏阵列参考输出电压 U_{ref} 与当前输出电压 U 之间的误差量.为进一步减小系统波动、消除稳态误差,提高控制精度,将该误差量作为 PID 控制器输入量,经 PI 运算后输出占空比 D ,最后通过 PWM 发生器输出 Boost 电路中电子开关管的驱动信号,进行高精度的闭环控制,最终完成光伏阵列 MPP 的局部高效搜索,使工作点稳定在 MPP 处.

6 全局搜索到局部搜索的切换控制

为实现光伏阵列高效的 MPPT 控制,需在非一致性自适应变异 DCWQPSO 算法中加入收敛判据,

使算法收敛后停止更新粒子位置,并切换为闭环模糊控制扰动观察法进行 MPP 的局部跟踪.而在全局搜索过程中,粒子位置(即 PWM 波占空比 $D_i, i = 1, 2, \dots, N$)的标准差 σ 反映了粒子种群的分散程度,体现了全局搜索进程,是对当前粒子种群收敛程度的量化,即标准差 σ 越大,则粒子群收敛程度越低,反之,则粒子群收敛程度越高.基于此,故本文以 MPP 全局搜索过程中粒子位置标准差的大小作为收敛依据,如式(15)所示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(D_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i \right)^2} \leq \varepsilon. \quad (15)$$

本文取 $\varepsilon = 0.02$,即 MPPT 过程中先采用非一致性自适应 DCWQPSO 算法进行 MPP 全局搜索,直到 $\sigma \leq 0.02$ 时,切换为闭环模糊控制扰动观察法进行 MPP 的局部跟踪.

7 工况改变时重启条件

当光伏阵列工况发生改变时,需要重启最大功率点跟踪过程,即先全局搜索后局部搜索,本文设置寻优重启条件,如式(16)所示:

$$\left| \frac{P_t - P_{t-1}}{P_{t-1}} \right| \geq 0.1, \quad (16)$$

其中, P_t, P_{t-1} 分别为光伏阵列转入局部搜索条件下前后两次采样时刻的输出功率值.

8 仿真验证

根据以上分析,非一致性自适应 DCWQPSO 算

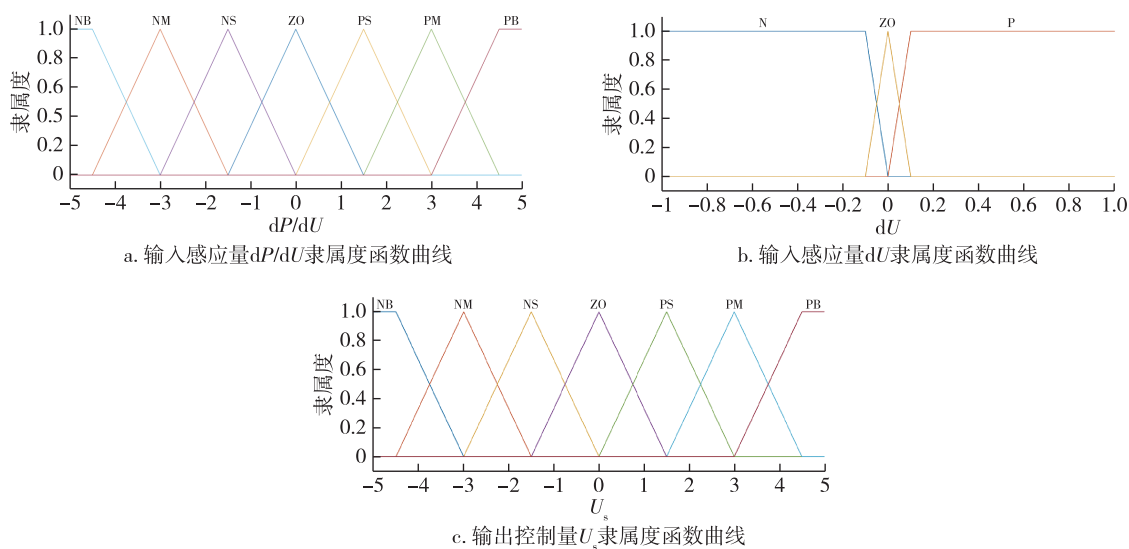


图 6 输入输出变量隶属度函数曲线

Fig. 6 Membership function curves of input and output variables

法与闭环模糊控制扰动观察算法相结合的 MPPT 分段控制流程如图 7 所示。

为验证本文提出的非一致性自适应变异 DCWQPSO 算法与闭环模糊控制扰动观察法相结合的 MPPT 分段控制方法在不同静态工况及突变工况下的有效性及优越性,本文设置光伏阵列在 0~1 s 内处于单峰输出特性的工况 2,在 1~2 s 内处于多峰输出特性的工况 3,各工况参数如表 1 所示,并与文献[16]提出的周期变异 DCWQPSO 与 INC 相结合的控制算法进行对比。仿真结果如图 8 所示。

由图 8 可知,本文提出的 MPPT 分段控制方法在两种不同工况下的搜索时间均为 0.32 s 左右,收敛后的光伏阵列输出功率分别稳定在 472.3~472.5 W、322.1~323.3 W,相比于文献[16]提出控制算法,不仅跟踪时间更短,并且跟踪精度更高,功率输出波动更小,从而验证了该控制方法在不同工况下的实用性和优越性。

9 结论

本文针对全工况下光伏阵列 MPPT 问题,在分析光伏各工况下不同输出特性的基础上,阐述了硬

件实现电路及其控制原理,并提出了最大功率点全局搜索及局部搜索相结合的分段控制方法。首先采用非一致性自适应变异 DCWQPSO 算法进行最大功率点全局搜索,并对粒子种群的分散程度进行实时评估,当其满足收敛条件后,再采用闭环模糊扰动观察法对最大功率点进行局部搜索。最后进行了 Matlab 仿真及分析,对该算法在各种工况下的实用性及相对其他算法的优越性进行验证。由仿真结果可得到以下主要结论:

1)非一致性自适应变异 DCWQPSO 提高了粒子种群全局寻优性能,不仅缩短了种群寻优时间,而且提高了种群收敛后的稳定性。

2)非一致性自适应变异 DCWQPSO 与闭环模糊控制扰动观察法结合的分段控制方法解决了 QPSO 寻优过程中因粒子不停波动导致输出长时间振荡问题。

3)本文提出的分段控制算法可满足光伏阵列全工况下 MPPT 控制需求,在不同静态或动态工况下均能快速、稳定地收敛至最大功率点,相对其他控制算法具有突出的优越性。

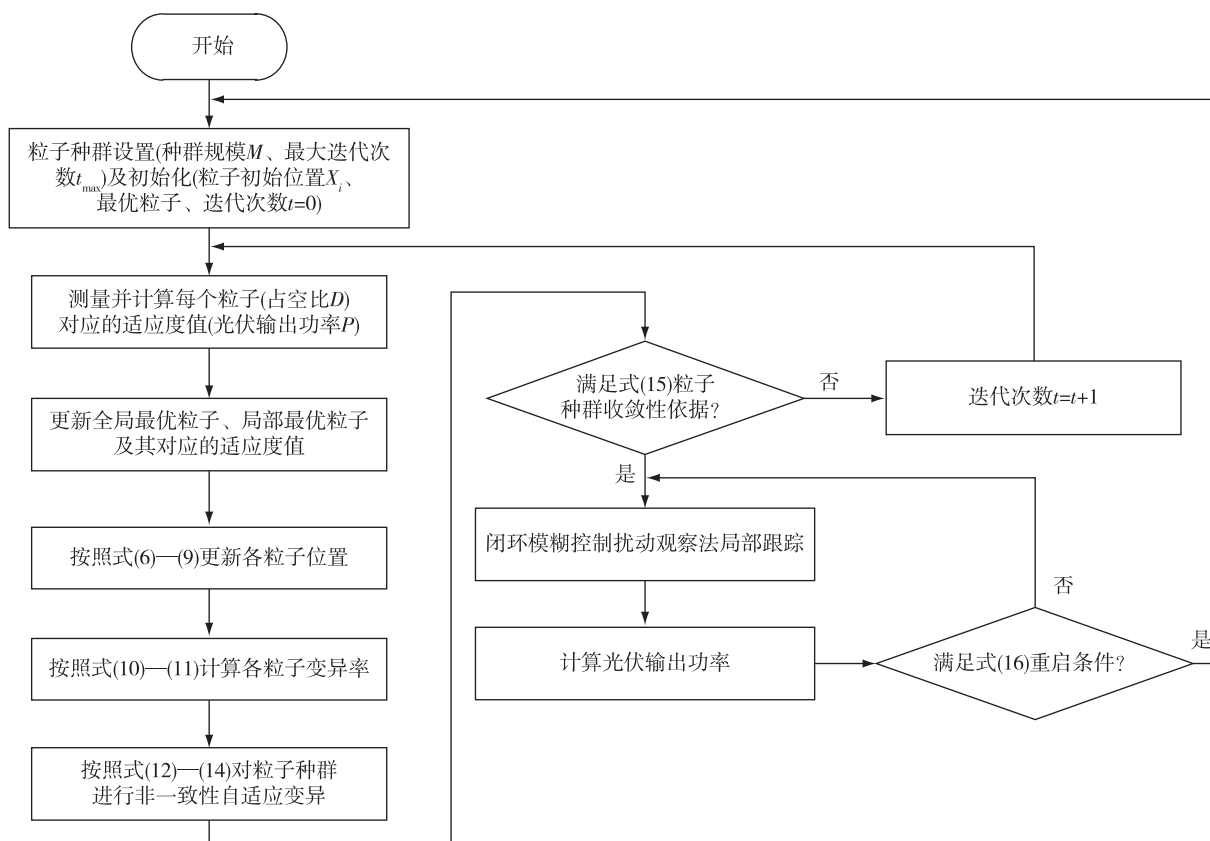


图 7 MPPT 分段控制流程

Fig. 7 Flow chart of MPPT subsection control

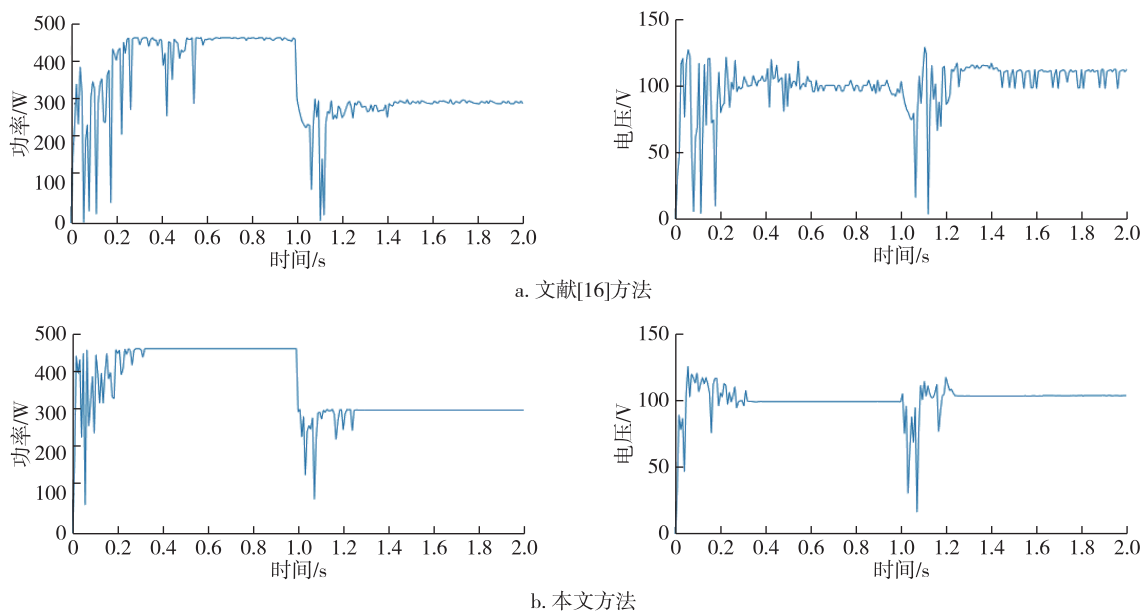


图8 动态工况下光伏阵列输出变化曲线

Fig. 8 Variation curves of PV array output under dynamic operations

参考文献

References

- [1] 刘晓博,郭中华. 光伏最大功率点跟踪变步长电导增量法的算法优化[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(13): 61-67
LIU Xiaobo, GUO Zhonghua. Algorithm optimization of variable step-size incremental conductance method for photovoltaic maximum power point tracking[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(13): 61-67
- [2] Mirza A F, Ling Q, Javed M Y, et al. Novel MPPT techniques for photovoltaic systems under uniform irradiance and partial shading[J]. Solar Energy, 2019, 184: 628-648
- [3] Ahmed J, Salam Z. An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency[J]. Applied Energy, 2015, 150: 97-108
- [4] 周宏飞,杨旭海,赵咪,等. 基于改进模糊控制算法的光伏系统中 MPPT 控制策略[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2020, 38(5): 554-559
ZHOU Hongfei, YANG Xuhai, ZHAO Mi, et al. MPPT control strategy in photovoltaic system based on improved fuzzy control algorithm[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2020, 38(5): 554-559
- [5] 陈景文,张文倩,李晓飞. 基于改进电导增量法的光伏 MPPT 控制[J]. 智慧电力, 2021, 49(9): 47-55
CHEN Jingwen, ZHANG Wenqian, LI Xiaofei. Photovoltaic MPPT control based on improved conductance increment method[J]. Smart Power, 2021, 49(9): 47-55
- [6] 花赞昊,朱武,郭启明. 光伏发电系统 MPPT 算法研究综述[J]. 电源技术, 2020, 44(12): 1855-1858
HUA Yunhao, ZHU Wu, GUO Qiming. Review of MPPT algorithm of photovoltaic power generation system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(12): 1855-1858
- [7] Dehghani M, Taghipour M, Gharehpetian G B, et al. Optimized fuzzy controller for MPPT of grid-connected PV systems in rapidly changing atmospheric conditions[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(2): 376-383
- [8] Zhou L, Chen Y, Liu Q, et al. Maximum power point tracking (MPPT) control of a photovoltaic system based on dual carrier chaotic search[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2012, 10(2): 244-250
- [9] Al-Dhaifallah M, Nassef A M, Rezk H, et al. Optimal parameter design of fractional order control based INC-MPPT for PV system[J]. Solar Energy, 2018, 159: 650-664
- [10] 孔德川,牛立元,王建平,等. 基于量子粒子群算法的光伏阵列 MPPT 控制方法研究[J]. 制造业自动化, 2014, 36(5): 86-89
KONG Dechuan, NIU Liyuan, WANG Jianping, et al. Study on photovoltaic array MPPT controlling method based on quantum particle swarm optimization[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(5): 86-89
- [11] 张治,周媛媛,王林. 混合量子粒子群算法在光伏阵列 MPPT 中的应用[J]. 现代电子技术, 2021, 44(21): 171-174
ZHANG Zhi, ZHOU Yuanyuan, WANG Lin. Application of hybrid quantum particle swarm optimization algorithm in MPPT for photovoltaic array[J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(21): 171-174
- [12] 刘建成. 局部阴影条件下光伏阵列 MPPT 模糊控制最优算法[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(4): 473-479
LIU Jiancheng. Optimal fuzzy control for MPPT of photovoltaic array under partial shadow conditions[J]. Journal

- of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 10(4): 473-479
- [13] 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(13): 8680-8688
- [14] 郭昆丽,刘璐雨,蔡维正.基于混合算法的光伏多峰值 MPPT 研究[J].电源技术,2021,45(8):1040-1043
GUO Kunli, LIU Luyu, CAI Weizheng. Research on photovoltaic multi peak MPPT based on hybrid algorithm [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(8): 1040-1043
- [15] 韩鹏,李银红,何璇,等.结合量子粒子群算法的光伏多峰最大功率点跟踪改进方法[J].电力系统自动化,2016,40(23):101-108
HAN Peng, LI Yinhong, HE Xuan, et al. Improved maximum power point tracking method for photovoltaic multi-peak based on quantum-behaved particle swarm optimization algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 101-108
- [16] 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 Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(5): 221-229
- [17] 苏建徽,余世杰,赵为,等.硅太阳能电池工程用数学模型[J].太阳能学报,2001,22(4):409-412
SU Jianhui, YU Shijie, ZHAO Wei, et al. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2001, 22(4): 409-412
- [18] 黄泽霞,俞攸红,黄德才.惯性权自适应调整的量子粒子群优化算法[J].上海交通大学学报,2012,46(2):228-232
HUANG Zexia, YU Youhong, HUANG Decai. Quantum-behaved particle swarm algorithm with self-adapting adjustment of inertia weight [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, 46(2): 228-232
- [19] 孙有发,陈世权,吴今培.一种非一致性的自适应遗传算法与应用[J].系统工程,2002,20(6):82-86
SUN Youfa, CHEN Shiquan, WU Jinpei. Inconsistent self-adaptive genetic algorithm and its application [J]. Systems Engineering, 2002, 20(6): 82-86
- [20] 石季英,刘紫玉,张文.基于 Boost 电路光伏发电系统 MPPT 采样周期分析[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(10):55-60
SHI Jiying, LIU Ziyu, ZHANG Wen. Analysis of MPPT sampling period of the boost-based photovoltaic power generation system [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2016, 28(10): 55-60

MPPT of photovoltaic at all operation conditions based on segmented control

FANG Shengli¹ MA Chunyan¹ HOU Maojun¹ ZHU Xiaoliang²

1 College of Electrical and Information Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002

2 Shiyan Juneng Power Design Co., Ltd., Shiyan 442000

Abstract The output characteristics of photovoltaic (PV) array change with the environmental conditions and running state. In order to meet the control requirements of Maximum Power Point Tracking (MPPT) under different operation conditions, a segmented control method combining improved Quantum Particle Swarm Optimization (QPSO) and perturb and observe algorithm is proposed after analyzing the output characteristics of photovoltaic array under various working conditions. The inconsistent adaptive mutation DCWQPSO is used to search the maximum power point globally in the initial stage of tracking control to make the power point converge to the maximum power point quickly in order to improve the tracking speed, then the perturb and observe algorithm based on closed-loop fuzzy control is used to search the maximum power point locally to improve the tracking accuracy. The Matlab simulation results show that the segmented control method can complete MPPT in only 0.32 s under various working conditions of photovoltaic array and remains stable, which has faster tracking speed and higher tracking accuracy than others, indicating its capacity to improve the efficiency of PV generation effectively.

Key words maximum power point tracking (MPPT); all operation conditions; improved QPSO; closed-loop fuzzy control; PV power generation