

## 基于复合式 PSO 的光伏最大功率点跟踪控制

马大中, 翟小军, 孙秋野

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 针对不均匀光照条件下光伏阵列的 MPPT 跟踪控制问题, 提出了基于粒子群的复合式 MPPT 控制算法。复合式 PSO-MPPT 控制算法包括离线寻优和在线寻优两个部分。离线寻优环节采用相邻粒子信息交换机制加强了在寻优过程中的收敛性以及对关键区域的搜索力度; 在线寻优环节采用适应度模糊判断的方法解决了粒子群算法在线工作时扰动大、耗时长的问题。复合式 PSO-MPPT 控制算法将离线和在线的优化方法结合到一起, 弥补了各自方法的不足。与传统的方法相比, 所提出的方法具有更快的响应速度和更高寻优精度。最后通过 Matlab 仿真证明了所提出的算法可以实现不均匀光照条件下的最大功率点跟踪。

**关键词:** 最大功率点跟踪; 粒子群优化; 复合控制; 不均匀光照

**中图分类号:** TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3801-06

## Maximum power point tracking and controlling based on compound PSO

Ma Dazhong, Zhai Xiaojun, Sun Qiuye

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** Compound MPPT algorithm based on particle swarm optimization was proposed for solving the problem of maximum power point tracking under non-uniform insolation condition. Compound PSO-MPPT control algorithm contained off line optimization and on line optimization. During the process of off line optimization, information exchange mechanism between adjacent particles was used which can increase convergence speed and the search capability for critical areas. Fitness fuzzy judgment method was used to decrease the influence of disturbance and shorten the time-consuming which on line particle swarm optimization was considered. Compound PSO-MPPT control algorithm combined off line optimization and on line optimization together and it made up the shortfall of each method. The compound PSO-MPPT can acquire the faster response speed and higher accuracy of maximum power point than traditional MPPT algorithm. The proposed algorithm is testified by Matlab simulations and can realize the maximum power point tracking under non-uniform insolation condition.

**Key words:** maximum power point tracking; particle swarm optimization; compound control; non-uniform insolation

收稿日期: 2015-04-10; 修订日期: 2015-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(61203086, 61473069); 教育部博士点课题新教师基金(20120042120042);  
教育部基础科研业务费资助项目(N130404009)

作者简介: 马大中(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要是从事电力系统方面的研究。Email: madzmadz4230@gmail.com

## 0 引言

随着化石燃料的减少和环境污染的加重,人们迫切需要一种新能源来解决这一问题。由于太阳能具有清洁无污染,取之不尽、用之不竭的特点,对太阳能的开发和利用越来越受到人们的重视。目前的光伏产业存在着投资成本高,转换效率低等问题,因此,提高光伏阵列的转换效率对光伏产业的发展具有重要的意义<sup>[1]</sup>。

光伏阵列接收到的光照决定了它所采集到的能量。当光伏阵列接收到的光照强度均等,即无阴影遮挡时,其输出功率电压特性曲线呈现单峰状。但是由于在光伏组件表面存在不透明物体的遮挡或者由于多云天气等导致光伏阵列中部分单体光伏电池接收的太阳辐射强度异于其他电池,因此光伏阵列输出功率电压曲线极有可能呈 2 峰或 3 峰形状<sup>[2]</sup>。

目前国内外学者已经提出了很多种方法来提高光伏电池的效率。扰动观测法和爬山法都是通过不断扰动光伏系统的工作点来寻找最大功率点的方向,但是该方法的步长是固定的,步长设置不合适就会导致输出效率低或系统震荡,并且在日照强度变化时会产生误判现象<sup>[3]</sup>。

电导增量法是通过判断工作电压与最大功率点电压的相对位置,实现对最大功率点的快速跟踪,但只能根据判别式的符号判断调节量的增加与下降方向,不能轻易确定调节强度的大小,从而影响了调整速度和控制质量<sup>[4]</sup>。

在光照不均匀时,上述方法就容易收敛到局部最大功率处,不能保证获得全局最大功率点。针对上述问题,参考文献[5]采用将人工鱼群算法与扰动观察法相结合的方法来求出遮蔽条件下的光伏阵列最大功率点。参考文献[6]提出了二步最大功率点跟踪算法,但其第一步所采用的等效电阻线和伏安特性曲线的交点不能确保一定落在全局真正最大功率点的领域内,其第二步所采用的电导增量法对硬件提出了较高的要求,导致成本增加,另外迭代步长恒定,很难同时保证跟踪速度快且精度高。参考文献[7]采用模糊控制方法来限定在最大功率点附近的搜索范围,加快搜索速度,但是由于需要在最大功率点附近施加控制,容易陷入局部最优。参考文献[8]运用

了“区域扫描法”来增强对于最大功率点的扫描精度和速度。参考文献[9]提出了以步长寻优加扰动法来寻找最大功率跟踪点。但是在参考文献[8]和参考文献[9]中区域参数和步长的确定是经验性的,如果参数选的不合适容易造成最大功率点的遗漏。

作为群智能算法的典型代表,粒子群优化算法已被证明是一种有效的全局优化算法。由于其原理简单、容易实现、参数少等优点,一经提出就受到许多研究者的关注。因此参考文献[10]研究了基于粒子群算法的 MPPT 方法,该方法的突出优点是不存在稳态功率震荡问题,稳态跟踪精度高。参考文献[11]采用功率闭环方式实现全局最大功率点的定位并采用基于粒子群算法的变步长跟踪策略消除了最大功率点跟踪的稳态功率震荡问题。但是上述方法存在着稳态不收敛以及可能陷入局部极值的问题。

针对上述算法所存在的不足,文中提出了一种基于粒子群算法的复合式 PSO-MPPT 算法来实现光伏发电的最大功率点跟踪。该算法通过在离线环节增加关键区域的搜索力度和在线环节加入模糊决策判断,来提高算法的收敛速度及准确性,是一种以在线寻优主导,离线寻优辅助的双级复合式 PSO-MPPT 算法。

## 1 复合式 PSO-MPPT 控制算法

由于光伏阵列处于部分遮蔽条件下时,光伏阵列的功率输出特性会呈现出多极值点现象,因此一种复合式 PSO-MPPT 算法被提出用来实现光伏阵列处于部分遮蔽条件下的光伏阵列最大功率点跟踪。算法的结构示意图如图 1 所示。复合式 PSO-MPPT 算法主要包含离线跟踪环节和在线跟踪环节两个部分。

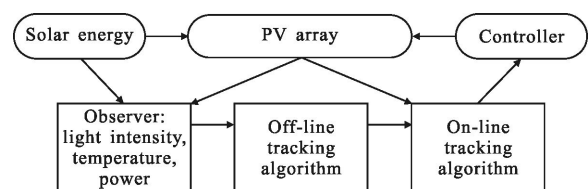


图 1 复合式 PSO-MPPT 控制算法

Fig.1 Compound PSO-MPPT control algorithm

### 1.1 复合式 PSO-MPPT 算法的离线环节

粒子群算法采用群体与进化的概念,依据个体

(粒子)的适应度进行操作。设:  $X_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$  为粒子  $i$  的当前所在位置;  $V_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$  为粒子  $i$  的当前飞行速度;  $P_i=(P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in})$  为粒子所经历的最优位置, 其中  $n$  为例子的维数。

设  $f(x)$  为目标函数, 粒子  $i$  的最优位置由公式(1)给出:

$$P_i(t+1)=\begin{cases} P_i(t), f(X_i(t+1)) \geq f(P_i(t)) \\ X_i(t+1), f(X_i(t+1)) < f(P_i(t)) \end{cases} \quad (1)$$

设在这个种群中的粒子数是  $N$ , 群体中所有的粒子所经历最优位置是  $P_g(t)$ , 如下所示:

$$\begin{cases} P_g(t) \in \{P_0(t), P_1(t), \dots, P_N(t)\} \\ f(P_g(t)) = \min \{f(P_0(t)), f(P_1(t)), \dots, f(P_N(t))\} \end{cases} \quad (2)$$

因此可以得到粒子群算法的核心迭代公式如公式(3)、(4)所示:

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 (P_i(t) - X_i(t)) + c_2 r_2 (P_g(t) - X_i(t)) \quad (3)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (4)$$

式中:  $t$  为迭代次数;  $i$  为粒子编号;  $\omega$  为惯性权值;  $c_1, c_2$  为学习因子;  $r_1, r_2$  为  $(0, 1)$  之间的随机数。公式(3)为速度更新方程, 公式(4)为位置更新方程。

由于传统的粒子群算法在寻优的过程中每个粒子的运动只与自身历史经验和全局历史经验有关, 当全局历史经验不足以使粒子跳出局部最优解时, 粒子群会面临无法收敛的情况。

因此, 复合式 PSO-MPPT 算法在粒子离线的寻优过程中引进一种全新的粒子信息交换机制——相邻粒子信息交换机制。相邻粒子信息交换机制是指在完成粒子空间的初始化后, 在寻优过程中, 设置粒子不断与邻友粒子交换位置信息, 当两个粒子之间的距离大于初始状态的两倍时, 认为其通信条件受到影响, 两个粒子会产生趋同倾向。粒子的移动原则是对比邻友粒子的当前适应值和自己的历史最佳值, 如果认为邻友位置适应度更好, 便向邻友位置靠拢。这样, 可以将“误入歧途”的粒子及时拉向全局最优位置。为了改善整个粒子群的自由搜索能力, 在寻优初期, 相邻粒子间并不进行信息交换, 同时降低对粒子寻优时的最大速度限制以提高寻优初期的粒子自由度; 当整个粒子群对搜索区域已经有了一定了解后, 才开始执行相邻粒子信息交换机制以提高搜索的精度。

文中所设计的离线环节的寻优适应度函数如公式(5)所示:

$$\text{fitness}(i) = I(i) \times [\text{sign}_1 \cdot U_1(i) + \text{sign}_2 \cdot U_2(i) + \dots + \text{sign}_n \cdot U_n(i)] \quad (5)$$

式中:  $I(i)$  对应当前粒子的位置;  $U_1-U_n$  对应  $n$  组电池元的端电压。

$$U_k = \frac{AKT}{q} \ln \left( \frac{I_g - i_{pv}}{I_{sat}} + 1 \right) \quad (6)$$

式中:  $q$  为电荷所带的电量;  $i_{pv}$  为光伏电池的输出电流;  $U_{pv}$  为光伏电池的输出电压;  $I_g$  为光生电流;  $K$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为光伏电池的表面温度;  $A$  为二极管因子;  $I_{sat}$  为饱和电流。

公式(5)中的  $\text{sign}$  参数选择如下:

$$\text{sign} = \begin{cases} 1, i_{pv} < I_g \\ 0, i_{pv} \geq I_g \end{cases} \quad (7)$$

离线环节的启动由电路功率变化和环境中光照及温度条件共同决定。功率变化量  $\Delta P$  如公式(8)所示:

$$\Delta P = \frac{|P_{\text{real}} - P_m|}{P_m} \quad (8)$$

在稳定的自然条件下, 光照强度的变化每分钟不超过  $20 \text{ W/m}^2$ 。对应的阵列输出变化量  $\Delta P$  应该小于  $0.015$ , 而当出现遮蔽等异常状况时, 功率的变化量都大于  $0.1$ , 因此当系统稳定, 离线及在线模块均不工作时, 设定离线环节的启动条件为  $\Delta P > 0.1$ 。如果检测到环境中的阳光照度突然改变, 无论在线跟踪模块工作与否, 离线 PSO-MPPT 优化算法将启动寻优, 同时发出重启在线寻优工作的复位信号。

## 1.2 复合式 PSO-MPPT 控制算法的在线环节

复合式 PSO-MPPT 控制算法的在线环节采用基于模糊适应度判断的快速跟踪算法来解决由于建模及传感器精度问题所引起的离线环节搜索到的最大功率点与实际最大功率点存在偏差的问题。在线优化环节作为对电路的直接控制模块, 通过检测电路中的实时电压和电流来控制 DC/DC 电路的占空比进而实现对电路真实最大功率点的搜索。因此, 位置参数选为占空比  $D$ , 适应度函数根据电路的实际功率确定。

基于模糊适应度判断的快速跟踪算法是以粒子当前位置下电路中最大功率和最小功率的加权平均值作为适应度函数, 功率最大值和最小值的权重系数分别为  $\alpha$  和  $\beta$ 。为了减小最小功率值对适应度函数的影响,  $\beta$  值的选择应小于  $\alpha$ 。文中所设计的在线

环节的寻优适应度函数如公式(9)所示:

$$\text{fitness}(i) = \alpha P_{\max} + \beta P_{\min} \quad (9)$$

式中: $\alpha$ 和 $\beta$ 需满足下列条件:

$$\alpha + \beta = 1 \quad (10)$$

$$\alpha > \beta \quad (11)$$

由于在每一次迭代结束后不同的粒子之间的位置及适应度函数不同,因此不同的粒子所确定的占空比是不同的,因此每一个粒子所代表的功率也不相同。

当粒子位置偏离最优值过远时,势必导致电路震荡的加剧,一旦电路中短时间内的功率振荡(下降幅度)超过设定值,即使未达到预期延时时间,电路会提前结束此粒子位置的寻优工作,并为当前位置分配一个较低的适应度。

在线工作模块在收到上级电路发出的启动信号后,读取参考占空比,并开始寻优工作。

根据适应度模糊判断的快速跟踪算法设计的在线寻优环节的工作流程如下:

(1) 当收到离线模块发出的启动信号后,对种群规模 $n$ 、进化代数 $g$ 、惯性权值 $w$ 、学习因子 $c$ 等进行初始化操作;(2) 读取离线环节搜索到的占空比 $D^*$ ,确定搜索空间和粒子的最大飞行速度;(3) 初始化离子的位置和速度;(4) 输出粒子 $i$ 当前位置下,系统的占空比;(5) 采用基于适应度模糊判断的快速跟踪算法计算粒子 $i$ 的适应度函数;(6) 对所有粒子的适应度进行更新,如果所有粒子没有完成适应度更新,需要更新粒子的速度和位置,并返回(4);(7) 更新全局最优解和个体最优解;(8) 判断是否满足误差要求或达到迭代次数,如果不满足,更新惯性权值、学习因子、粒子的速度和位置,并返回(4);(9) 输出全局最优解,发出在线寻优停止信号。

## 2 实验和仿真结果

为了验证文中所提出的复合式 PSO-MPPT 算法的控制效果,进行如下仿真。仿真中设置3块可调节光照强度的太阳能光伏板。IGBT的工作周期为1 kHz,对占空比的控制精度为1/500。离线环节和在线环节的寻优参数设置如下。

离线环节的参数设置:粒子数目为50;进化代数为200;设置粒子的最大速度为待搜索区域的10%;惯性权值 $\omega=0.8$ ;学习因子 $c_1=c_2=2$ ;

在线环节参数设置:整个搜索空间的10%;粒子数量4个;权重适应度函数中权值 $\alpha=0.9$ , $\beta=0.1$ ;系统启动寻优时的延时为0.5 s,寻优过程中的延时为0.25 s。

### 2.1 PSO-MPPT 复合控制系统性能验证

设置串联的三组电池元中有一组被遮蔽至70%,即太阳辐射强度分别为1 000 W/m<sup>2</sup>、1 000 W/m<sup>2</sup>、700 W/m<sup>2</sup>,三组电池单元的照度检测环节分别加入-30 W/m<sup>2</sup>、10 W/m<sup>2</sup>、-17 W/m<sup>2</sup>的微小测量误差。

复合式 PSO-MPPT 系统的控制效果如图2、3所示。

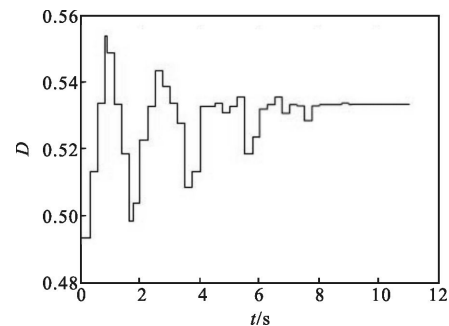


图2 在线 PSO-MPPT 模块的占空比输出曲线

Fig.2 Duty ratio output curve of online link PSO-MPPT

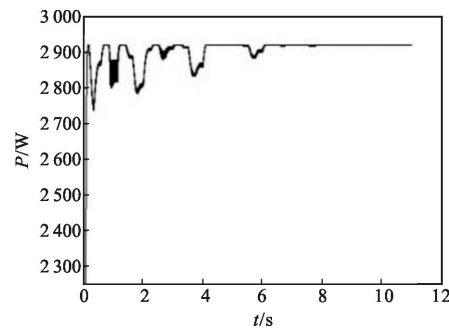


图3 光伏阵列输出功率曲线

Fig.3 Output power curve of PV array

系统运行7 s后,虽然寻优工作还在进行,但通过功率输出波形可以看出:此时的寻优工作几乎没有对电路造成影响。10~10.5 s寻优工作完成,输出占空比被设定为寻优过程中遇到的全局最优值0.533 1。考虑到实验系统的占空比实际控制精度为0.002,可以认为,虽然离线跟踪环节受到干扰,给出的参考位置偏离了电路中真正的最大功率点(0.533 5),通过在线跟踪环节的修正系统很好地找到了最佳工作位置,输出功率在2 919.3~2 919.8 W之间轻微振荡。

## 2.2 突变环境下复合式 PSO-MPPT 与电导增量法跟踪效果比较

为了验证所搭建的复合式 PSO-MPPT 系统在光照条件突变的情况下是否具有更强的规避局部最大功率点的能力,文中将复合式 PSO-MPPT 跟踪方法与电导增量法进行了比较。

光伏阵列的初始环境光照设置为  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 、 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 、 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ ,在系统运行的第 7 s,有两块光伏板被遮蔽 50%,光照强度突变为  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 、 $500\ \text{W}/\text{m}^2$ 、 $500\ \text{W}/\text{m}^2$ 。

两种方法的运行时间为 21 s,所得出的实验结果如图 4 所示。

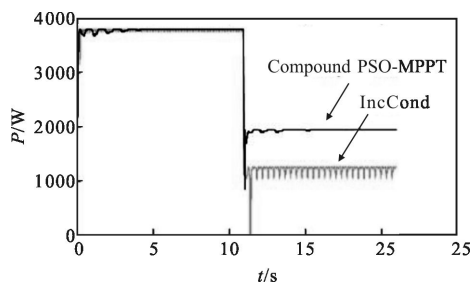


图 4 光照突变后两种方法的输出功率对比图

Fig.4 Output power curve of both methods before and after illumination changed

从图 4 可以看出:当环境改变时,复合式 PSO-MPPT 跟踪算法可以实现对光伏阵列输出特性进行快速全局寻优,使系统在极短的时间内将工作点定位在了全局最优值附近,响应速度明显高于常规 MPPT 算法,但是,在搜索到一个新的最大功率点参考位置后,迫于在线环节寻优算法的需要,将不可避免的有 5~10 s 的微小波动,这一过程中,可以将离线仿真与实际电路的偏差有效消除,实现对真正最大功率点的跟踪。而电导增量法在光伏电池出现部分遮蔽的条件下,只能实现局部最大功率点跟踪,而且在跟踪精度方面比较差和跟踪速度上比较缓慢。

## 3 结论

基于粒子群的复合式 PSO-MPPT 控制算法,先通过离线寻优给出了实际最大功率点的参考位置,以大幅度减小在线工作环节的待搜索范围。在离线寻优的基础上增加在线寻优,通过模糊适应算法实现对占空比的最优控制进而最大功率点的全局寻

优,获取最大功率点的位置。通过仿真实验证明与传统的 MPPT 方式相比;复合式 PSO-MPPT 控制系统在电路响应速度、最大功率点寻优精度、电路运行的整体稳定性方面都有更好的表现,可以实现在部分遮光条件下的最大功率点跟踪。

## 参考文献:

- [1] Lou Qihong. Recent progress of laser technology and its application in solar cell research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3187-3192. (in Chinese)  
楼祺洪. 激光技术新进展及其在光伏产业中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3187-3192.
- [2] ESRAM T, CHAPMAN P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, 22(2): 439-449.
- [3] Dzung N, Brad L. An adaptive solar photovoltaic array using model-based reconfiguration algorithm[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(7): 2644-2654.
- [4] Liu Fangrui, Duan Shanxu, Liu Fei, et al. A variable step size INC MPPT method for PV systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(7): 2622-2628.
- [5] Zhu Zhiyu, Yuan Lin, Chen Xun. Maximum power point searching and tracking of partially shaded solar photovoltaic arrays[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2013, 25(4): 63-67. (in Chinese)  
朱志宇, 原琳, 陈迅. 遮蔽条件下的光伏阵列最大功率点跟踪算法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2013, 25(4): 63-67.
- [6] Kobayashi K, Takano I, Sawada Y. A study of a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, 90(18): 2975-2988.
- [7] Xue Jiyuan, Feng Wenlin, Yang Xiaozhan. Maximum power point tracking for photovoltaic panel based on FPGA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2699-2703. (in Chinese)  
薛继元, 冯文林, 杨晓占. 基于 FPGA 的光伏电池板最大功率跟踪[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2699-2703.
- [8] Yan Liyang, Xu Di, Ge Aiming. Novel maximum power point tracking method under non-uniform insolation conditions[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2173-2180. (in Chinese)

- 严力兼, 徐迪, 葛爱明. 不均匀光照情况下太阳能最大功率追踪算法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 2173-2180.
- [9] Patel H, Agarwal V. Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(4): 1689-1698.
- [10] Liu Yihwa, Huang Shyhching, Huang Jiawei, et al. A particle swarm optimization-based maximum power point tracking algorithm for PV systems operating under partially shaded conditions [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2012, 27(4): 1027-1035.
- [11] Li Shanshou, Zhang Xing, Zhang Hongkai, et al. Global MPPT method based on power closed-loop control and PSO algorithms [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34 (8): 4809-4916. (in Chinese)
- 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(8): 4809-4916.