

·信号与信息处理·

## 基于改进混合粒子群算法 MPPT 控制研究

石科仁, 朱长青

(军械工程学院 车辆与电气工程系, 石家庄 050003)

**摘要:** 基于光伏阵列的物理机制, 结合光伏电池的等效电路, 建立了数学模型, 在 MATLAB/Simulink 仿真环境下, 建立了可以模拟恒定条件、光强突变、温度突变条件下仿真的独立光伏系统模型, 将 PSO 算法改进为 Geese-HPSO 算法, 进行基于光伏阵列 MPPT 控制的独立光伏系统仿真, 同时将仿真结果与扰动观察法进行对比, 验证了 Geese-HPSO 算法跟踪最大功率点的快速性与准确性。

**关键词:** 光伏; MPPT 控制; Geese-HPSO 算法; MATLAB/Simulink

中图分类号: TM914.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-04-0037-05

## Research on MPPT Control of PV System Based on Improved Hybrid Particle Swarm Algorithm

SHI Ke-ren, ZHU Chang-qing

(Department of Vehicle and Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** Based on the physical mechanism of photovoltaic array, combined with the equivalent circuit of photovoltaic cells, the mathematical model is built. In MATLAB/Simulink, different simulation models are developed for the independent photovoltaic system which can be imitated in the situations of a constant condition, light intensity mutation and temperature mutation. PSO algorithm is improved to Geese-HPSO algorithm. The independent photovoltaic system based on photovoltaic array maximum power point tracking (MPPT) control is simulated and the simulation results are compared with the disturbance observation method. The quickness and accuracy of the improved Geese-HPSO algorithm to track the maximum power point are testified.

**Key words:** photovoltaic; maximum power point tracking (MPPT) control; Geese-HPSO algorithm; MATLAB/Simulink

光伏发电是最有前景的可再生能源利用方式<sup>[1]</sup>。目前, 光伏发电以离网的独立系统为主, 故文中考虑以独立光伏发电系统为研究对象。由于光伏发电系统易受光照强度、温度等环境因素的影响, 要提高系统的整体效率, 需对光伏阵列最大功率点进行跟踪(MPPT)。扰动观察法(P&O)是一种传统的 MPPT 方法, 算法简单, 且容易硬件实现, 但也存在一些缺陷, 甚至造成误判。

针对 P&O 算法的响应速度迟缓、稳态时振荡、环境突变时的误判等缺陷, 基于光伏阵列的物理机制, 建立了相应的数学模型, 在 MATLAB 仿真环境下, 利用 Simulink 工具搭建了光伏阵列以及整个发电系统的仿真模型, 并基于改进的 Geese-HPSO 算法对光伏系统在不同条件下的输出功率进行了仿真分析, 并将结果与扰动观察法跟踪结果对比, 检验了改进算法的优越性。

收稿日期: 2016-06-01

作者简介: 石科仁(1990-), 男, 山西朔州人, 主要从事光纤供电系统及光电转换方面的研究; 朱长青(1962-), 男, 山东人, 博士研究生导师, 主要从事光电转换及电磁场测试研究工作。

### 1 光伏阵列分析

光伏电池是太阳能独立发电系统的核心部件,其原理是通过半导体P-N结受到阳光照射产生光生伏打效应,将光能直接转化成电能<sup>[2]</sup>。为了在光伏发电系统中更好地分析光伏阵列的电气性能,使它与后续控制系统匹配,则有必要对光伏电池进行数学模型的建立。目前,光伏阵列的仿真模型搭建主要有基于物理原理和基于外特性两种方法<sup>[3]</sup>。考虑到基于外特性的光伏阵列模型仿真精度不高的特点,为了满足实际需要,采用基于物理机制的光伏阵列,图1为光伏电池的等效电路。

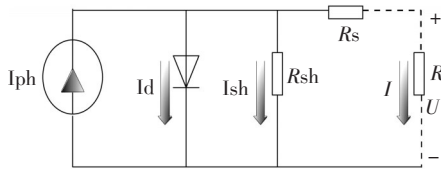


图1 光伏电池等效电路

根据等效电路图,可以得出光伏电池输出特性的数学方程为

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} = I_{ph} - I_d - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(U + IR_s)}{Akt}\right) - 1 \right] - \frac{U_d}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_{ph} = \left[ I_{sc} + Kt(T - 298) \right] \frac{G}{1000} \quad (2)$$

其中,  $I_0$  为反向饱和电流;  $K_t$  为短路电流温度系数;  $I_{ph}$  为光生电流;  $G$  为光照强度;  $U_d$  为二极管两端电压。在工程实际中分析等效电路,当串联电阻  $R_s$  增大时,只会导致短路电流  $I_{sc}$  减小,而对  $U$  并无影响;相反,当并联电阻  $R_{sh}$  增大时,只会导致  $U$  减小,而对短路电流无影响。在工程实际中由于  $R_{sh}$  一般远大于系统中的电阻量级,所以考虑忽略  $R_{sh}$ <sup>[4]</sup>,得到简化等效电路方程为

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(U + IR_s)}{Akt}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

光伏阵列是由多个光电池通过串联或并联的形式组合而成<sup>[5]</sup>,由此结合式(3)可以得到光伏阵列的输出特性方程为

$$I = n_1 I_{ph} - n_1 I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(U + IR_s)}{n_2 Akt}\right] - 1 \right\} \quad (4)$$

其中,  $n_1$ 、 $n_2$  分别为光伏阵列中光伏电池的并联、串联个数。选取 STP0950S-36 型号的光伏阵列,结合以上数学模型,在 MATLAB/Simulink 环境下搭建 PV 模型,图2为 PV 的子系统。

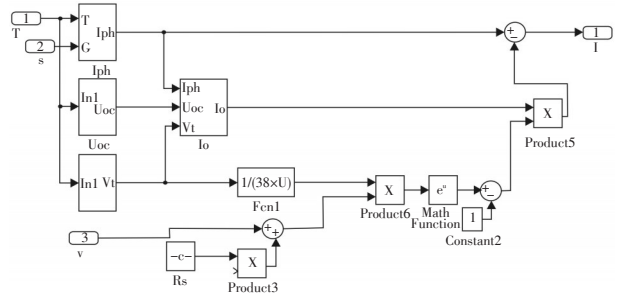


图2 PV 子系统模块

在标准情况下 ( $T=25^\circ$ ,  $S=1000 \text{ W/m}^2$ ) 测试光伏阵列的参数,得到阵列的  $I-U$ 、 $P-U$  输出特性曲线关系如图3所示。

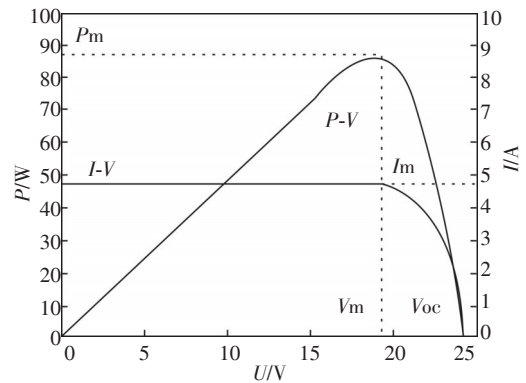


图3 光伏阵列外特性曲线

从图中可以看出,在标况下仿真时光伏阵列的最大功率约为 88 W,对应的工作电压为 19 V,电流为 4.8 A,光伏阵列的开路电压为 24 V。

### 2 粒子群优化算法(PSO)

PSO 算法<sup>[6]</sup>来源于鸟群捕食的行为研究,是一种基本迭代的优化工具。在系统中初始设定一组随机解,通过足够数量的迭代进行寻优操作。在  $N$  维空间中粒子  $i$  的位置设为一个矢量,飞行速度为另一个矢量。空间中每个粒子均有一个适应值 (fitness),该值由对应的优化函数所决定。假设  $N$  维空间的第  $i$  个粒子的位置与速度为数组  $X_i = (x_{i1} \ x_{i2} \ \dots \ x_{in})$  和  $V_i = (v_{i1} \ v_{i2} \ \dots \ v_{in})$ ,在每一次的迭代中,粒子通过跟

踪个体极值  $p_{best}$ , 即  $P_i=(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$ , 同时跟踪全局最优解  $g_{best}$ , 即  $G_i$ , 找到后, 利用以下公式更新自己的速度与位置<sup>[7]</sup>

$$v_i(k+1) = \omega v_i(k) + c_1 r_1 [p_i(k) - x_i(k)] + c_2 r_2 [g_i(k) - x_i(k)] \quad (5)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (6)$$

对  $P_i$  与  $G_i$  定义为

$$P_i = \begin{cases} P_i, f(X_i) \geq f(P_i) \\ X_i, f(X_i) < f(P_i) \end{cases} \quad (7)$$

$$G_i = \max \{f(p_0), f(p_1), \dots, f(p_n)\} \quad (8)$$

其中, 决定粒子群算法性能的控制参数有  $w$  为惯性权重, 决定前一次迭代速度对当前迭代速度的影响;  $k$  为迭代次数;  $C_1, C_2$  为学习因子; 最大速度为  $V_{max}$ 。

$$v_i = \begin{cases} V_{max}, v_i \geq V_{max} \\ -V_{max}, v_i < -V_{max} \end{cases} \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 人为设定的  $V_{max}$  太大或太小都会影响  $v_i$  的取值, 进而影响最优解的搜寻。

### 3 MPPT 控制

#### 3.1 PSO 算法改进

根据电路理论可知, 只要光伏阵列与负载完全匹配, 负载的特性曲线就会与最大功率点轨迹重合<sup>[8]</sup>。而由图3可以看出, 由于光强、温度、负载等环境因素的影响, 光伏阵列的输出特性表现为非线性特征, 要提高光伏发电系统的整体效率, 需要使光伏阵列工作在特定的输出电压值  $V_m$  上, 因此需对最大功率点 (MPP) 进行跟踪。传统的 MPPT 算法包括恒定电压法、扰动观察法和电导增量法<sup>[9]</sup>。采用基于雁群启示的混合 PSO 算法对 MPP 进行跟踪。

在该算法中, 将每只大雁看作 PSO 中的一个粒子, 视“大雁”的强壮程度为粒子的优劣。在每一次迭代过程中进行历史最优适应度值的排序, 选出最优的作为头雁, 其余的跟随头雁按次序飞行<sup>[10]</sup>。基于此, 将普通 PSO 中的每个粒子个体极值  $p_{best}(i)$  替换为按历史最优适应度值排序后的粒子  $spop(i)$ , 同时将全局极值  $g_{best}(i)$  替换为按历史最优适应度值排序后起前一位置上那个粒子的个体极值  $p_{best}(i-1)$ , 对式(5)、式(6)更新为

$$v_i(k+1) = \omega v_i(k) + c_1 r_1 [spopi(k) - x_i(k)] + c_2 r_2 [p_{best}(i-1) - x_i(k)] \quad (10)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (11)$$

#### 3.2 基于雁群启示混合 PSO 算法 (Geese-HPSO) MPPT 控制

在光伏阵列混合粒子群 MPPT 设计时, 定义适应值函数为输出功率, 粒子的位置代表输出电压, 速度代表电压的变化量。实现步骤如下:

- (1) 参数初始化: 种群个数  $popsize$  为 50, 迭代次数设为 1 000, 搜索空间维数  $partsize$  为 1, 当前粒子的初始位置为  $p_{best}(i)$ , 各粒子的个体极值为  $p_{best}(i)$ ;
- (2) 评价种群: 计算每个粒子对应目标函数的适应值  $fitness(i)$ , 目标函数为光伏阵列的输出功率,  $P=UI$ ;
- (3) 将粒子按历史最优适应值  $p_{best}(i)$  排序, 得到粒子  $spop(i)$ ;
- (4) 每个粒子  $i$  均按排序后种群中第  $(i-1)$  个粒子的个体极值位置  $p_{best}(i-1)$  作为全局极值位置;
- (5) 更新速度与位置: 根据式(10)、式(11)更新粒子的速度与位置;
- (6) 判断是否满足结束条件, 若当前迭代次数达到最大迭代次数  $maxgen$ , 此时得到阵列的最优解  $U_m$ ; 否则,  $k=k+1$ , 重新评估适应值。

Geese-HPSO 优化算法流程图如图4所示。

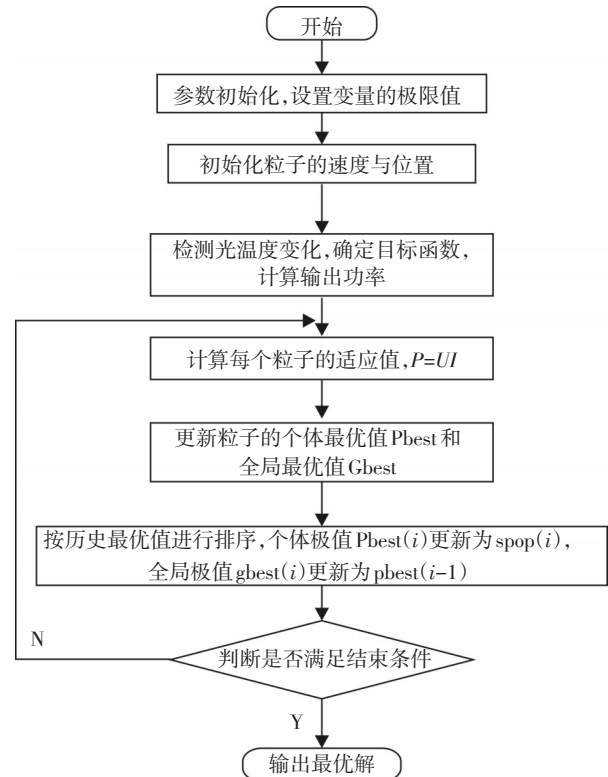


图4 基于雁群启示混合粒子群算法 MPPT 流程图

光伏阵列的MPPT控制主要是通过DC/DC变换电路实现的,根据以上算法控制后输出电压的参考值  $V_{ref}$ ,采用能量损耗最小的boost电路进行控制,当环境或负载变化时将参考值信号连接boost电路的IGBT管,通过调节开关电路占空比  $D$ ,使得boost电路等效阻抗值与光伏阵列的输出阻抗相匹配,进而改变光伏阵列的输出电压,达到跟踪最大功率点的目的。

## 4 模块搭建与仿真结果分析

### 4.1 模块搭建

使用 MATLAB/Simulink 和 S\_Function 编程对 Geese-HPSO算法 MPPT 进行仿真,Geese-HPSO算法模块如图5所示。输出电压与电流作为算法模块的输入,经过模块迭代后得出MPP工作点电压与光伏输出电压的差值  $V_{ref}$ ,PWM模块输出一个PWM信号给IGBT来调控占空比达到跟踪最大功率点电压的目的。光伏发电系统的仿真模型包括之前介绍的PV模型、Boost电路、PWM模块以及MPPT部分,如图6所示。



图5 Geese-HPSO算法模块

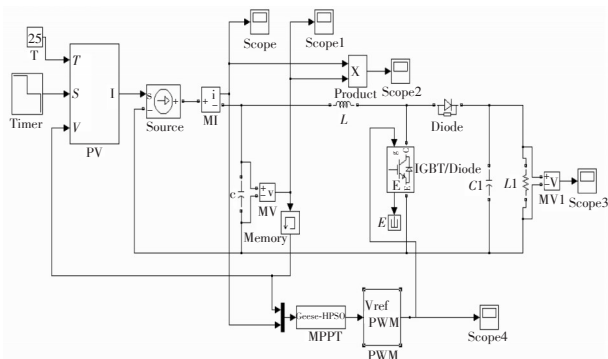


图6 光伏发电系统模块图

### 4.2 仿真与结果分析

设定  $maxgen=1\ 000$ ,光强初始值为  $S=1\ 000\ W/m^2$ ,温度初始值为  $T=25\ ^\circ C$ ,boost电路中电容  $C1$  取

$300\ \mu F$ ,负载电阻  $L1$  取  $10\ \Omega$ ,开关频率为  $20\ kHz$ 。

#### (1)在恒定条件下的仿真

根据上文固定条件,分别用传统的扰动观察法与基于 Geese-HPSO 的 MPPT 算法得出光伏阵列的输出功率值,图7为扰动观察法的功率输出值随时间的变化情况。图8为改进 Geese-HPSO 算法的输出功率的变化情况。

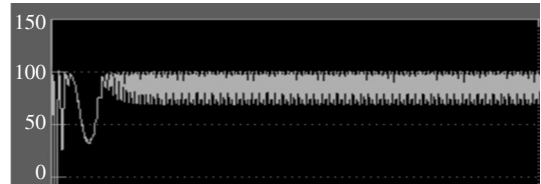


图7 恒定条件下P&O算法的输出功率

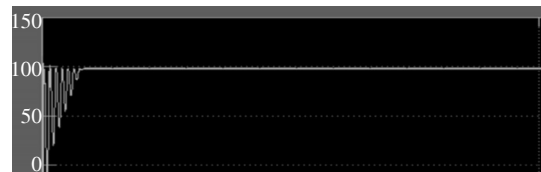


图8 恒定条件下Geese-HPSO算法的输出功率

#### (2)光照强度突变时的仿真

温度设定为  $25\ ^\circ C$  不变,光照强度在  $0.5\ s$  时发生突变,设定为  $800\ W/m^2$ ,在  $1\ s$  时设置突变为  $600\ W/m^2$ ,其他条件不变。分别运用扰动观察法与改进 Geese-HPSO 算法对光伏阵列进行MPPT跟踪,得到如图9和图10所示输出功率对比曲线。

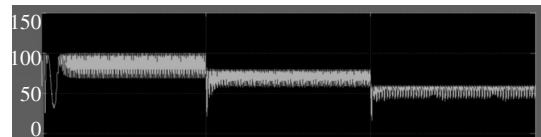


图9 光照突变条件下P&O算法的输出功率

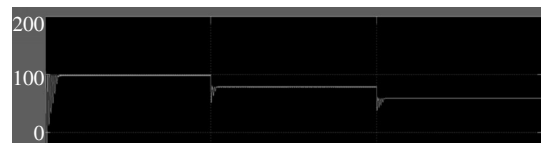


图10 光照突变条件下Geese-HPSO算法的输出功率

#### (3)温度突变时的仿真

光照强度设定为  $1\ 000\ W/m^2$  不变,温度在  $0.5\ s$  时突变为  $35\ ^\circ C$ ,在  $1\ s$  时突变为  $45\ ^\circ C$ ,其他条件不变。分别用两种算法进行仿真跟踪,得到如图11、

12 所示的输出功率对比图。

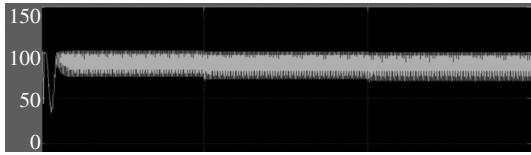


图 11 温度突变条件下 P&O 算法的输出功率

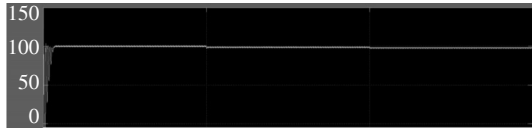


图 12 温度突变条件下 Geese-HPSO 算法的输出功率

对比图 7 与图 8, 可以得出使用改进 Geese-HPSO 算法开始时粒子进行顺次迭代, 当改进算法达到结束条件, 停止迭代, 寻优并不会经历如扰动观察法的“爬山”以及“塌陷”过程, 因此寻优过程相对较短; 同时, 光伏发电系统达到稳定以后使用改进 Geese-HPSO 算法也不会出现类似于扰动观察法的最大功率点附近的振荡, 功率曲线几乎为平滑的直线。

对比图 9 与图 10, 可以得到当光照强度发生突变时, 运用改进 Geese-HPSO 算法, 系统在 0.013 s 左右时输出功率值达到稳定, 曲线收敛速度加快且几乎是平滑的直线, 稳定运行没有出现振荡。而且, 横向对比可以发现, 光伏阵列的输出功率会随着光照强度的减小而减小, 最后达到稳定, 这也再一次验证了输出功率与光强的对应关系。

对比图 11 与图 12, 可以得到当温度发生突变时, 使用改进算法时系统的寻优过程更加迅速, 而且几乎接近“矩形阶梯”的形状, 算法的迅速与精确效果更加明显。横向对比可以得到随着温度的升高, 光伏阵列的稳定输出功率会相应的减小, 这也和输出功率与温度的对应关系相吻合。

## 5 结 论

基于光伏阵列的物理机制, 建立了数学模型, 在 MATLAB/Simulink 环境下进行了仿真模块的搭

建; 针对扰动观察法 MPPT 控制的缺陷, 在传统 PSO 算法的基础上, 进行了迭代过程的算法改进, 分别在恒定、光强突变、温度突变的条件下使用 Geese-HPSO 算法进行系统的 MPPT 仿真跟踪, 并与扰动观察法进行对比。结果显示, 运用基于雁群启示的改进混合粒子群算法, 光伏阵列的最大功率点跟踪过程不会出现如扰动观察法的“爬山”与“塌陷”的现象, 寻优过程快速; 功率随时间的变化曲线几乎为平滑的直线, 稳定后没有振荡, 跟踪结果准确; 当光强与温度突变时, 改进的算法能够在更短的时间内(大约 0.013 s)找到 MPP, 达到稳定状态运行。通过功率曲线的横向对比发现, 光强减小、温度升高时系统稳定时输出功率相应减小, 而且温度变化时改进算法的寻优过程更加迅速。

## 参考文献

- [1] 何龙, 程树英. 基于遗传算法和扰动观察法的 MPPT 算法[J]. 现代电子技术, 2009, 24: 199-202.
- [2] 连瑞娜. 独立光伏发电系统 MPPT 的模糊 PID 控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [3] Alippi C, Galperti C. An adaptive maximum power point tracker for maximizing solar cell efficiency in wireless sensor nodes[J]. Proc. ISCAS, 2006, 5: 21-24.
- [4] 孙鹏. 基于 MPPT 控制策略的光伏电池建模与仿真[J]. 国网技术学院学报, 2014, 17(1): 6-10.
- [5] 董晨晖, 许凯, 刘淑莉, 等. 独立光伏发电系统 MPPT 控制策略的研究[J]. 电源技术应用, 2014.
- [6] Reynolds C W. Flocks, Herds And Schools: A distributed behavioral model[J]. Computer Graphics, 1987, 21 (21): 25-34.
- [7] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// IEEE International Conference on Neural Networks, 1995: 129-132.
- [8] 张璇. 基于 MPPT 的 DC/DC 变换器设计及光伏模块并联研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [9] 徐鹏威, 刘飞, 刘邦银, 等. 几种光伏系统 MPPT 方法的分析比较及改进[J]. 电力电子技术, 2007(5): 3-5.
- [10] 孙晶晶. 粒子群优化算法的改进及其应用研究[D]. 陕西: 陕西师范大学, 2010.