

# 粒子群优化模糊控制器在光伏发电系统 最大功率跟踪中的应用

吴海涛, 孙以泽, 孟焯

(东华大学机械工程学院, 上海市 松江区 201620)

## Application of Fuzzy Controller With Particle Swarm Optimization Algorithm to Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Generation System

WU Haitao, SUN Yize, MENG Chuo

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Songjiang District, Shanghai 201620, China)

**ABSTRACT:** To solve the problem of the output power of maximum power point tracking system by perturbation and observation (P&O) method small oscillating around the maximum power point, a fuzzy controller with particle swarm optimization (PSO) algorithm was applied to maximum power point tracking (MPPT) of photovoltaic generation system. The PSO algorithm was applied to optimize the membership function of fuzzy controller and to accomplish real-time adjustment and tracking of step size in order to ensure that the system has a faster dynamic response speed and higher steady-state accuracy in case the light intensity or temperature varies. In this research, simulations and experiments were performed with the perturbation and observation method, the fuzzy control method and the fuzzy controller with PSO algorithm on the same condition, and the result demonstrates the effectiveness and robustness of the proposed method.

**KEY WORDS:** photovoltaic generation system; maximum power point tracking (MPPT); particle swarm optimization (PSO) algorithm; fuzzy controller

**摘要:** 针对采用干扰观察法时最大功率跟踪系统的输出功率在最大功率点附近小幅振荡的问题,设计了一种应用粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)的模糊控制器,并将其应用于光伏发电系统的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)。该控制器采用粒子群算法优化模糊控制的隶属度函数,能够实时调整跟踪步长,保证系统在光照强度和温度变化时有较快的动态响应速度和较高的稳态精度。分别对采用干扰观察法、常规模糊控制方法和带粒子群优化的模糊控制器在相同情况进行了仿真和试验,结果证明了所提方法的有效性和鲁棒性。

**关键词:** 光伏发电系统; 最大功率跟踪; 粒子群优化算法; 模糊控制器

## 0 引言

光伏发电技术是新能源发电技术的一种,具有环保、安全、寿命长等优点。目前,光伏发电系统开发初期的投资较大,能量转换的效率也较低。为了提高光伏系统的利用率,除了要提高光伏电池的能量转换效率外,还常在系统中采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)技术<sup>[1]</sup>。近年来,研究人员对MPPT算法进行深入研究,2002年 M.A.S.Masoum 提出了基于检测光伏电池的开路电压和短路电流的控制方法,以实现光伏电池最大功率点的跟踪,该方法简便、成本低,但应用该方法需将光伏模块与负载周期性断开以检测开路电压和短路电流,这会引起系统的功率损耗<sup>[2-3]</sup>。2007年 N.Femia 和 D.Granozio 将干扰观察(perturbation and observation, P&O)法应用于光伏电池的最大功率跟踪,这种跟踪控制方法结构简单、易于实现,但该方法稳态精度差,在光强快速变化时会导致较大的能量损失<sup>[4]</sup>。2008年 F.Liu 和 S.Duan 等将变步长的增量电导法用于最大功率点跟踪,并取得了较好的效果,但这种方法的成本高,不适于大规模推广应用<sup>[5]</sup>。

模糊控制系统是一种智能控制系统,它不依赖精确的数学模型,对参数的变化不敏感,具有自学习性,适应性强、鲁棒性好。2006年 T.L.Kota 等将模糊控制器应用于光伏电池的最大功率跟踪<sup>[6]</sup>。2007年 N.Khaehintung 和 P.Sirisuk 提出了一种自组织的模糊控制器用于光伏电池的最大功率跟踪<sup>[7]</sup>。在实际应用过程中,对于光伏电池这种时变参数非

线性控制对象，常规模糊控制所依赖的控制规则缺乏在线自学能力，控制器参数缺乏自调整能力，难以满足控制需要；因此，应考虑将模糊控制与其他控制策略相结合，以克服常规模糊控制的局限性，进一步提高精度，满足更为精确的控制需要。

本文提出一种基于粒子群优化(particle swarm optimisation, PSO)算法的模糊控制器，应用该控制器对光伏电池的最大功率点进行跟踪控制。在该控制器中，用粒子群算法对模糊控制器中的隶属度函数进行了优化，使控制器能快速稳定地随环境温度和光照强度变化实时调整模糊控制器的隶属度函数，使整个最大功率跟踪控制系统的动态和稳态性能得到提高。

### 1 光伏电池的数学模型

光伏电池的  $I-U$  特性方程<sup>[8]</sup>如式(1)—(3)所示：

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

$$I_0 = I_{or} \left[\frac{T}{T_r}\right]^3 \exp\left[\frac{qE_{GO}}{Bk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (2)$$

$$I_{ph} = [I_{SCR} + K_1(T - 25)]\lambda / 100 \quad (3)$$

式中： $I$  为光伏电池输出电流； $U$  为光伏电池输出电压； $I_{ph}$  为光生电流； $I_0$  为光伏电池的暗饱和电流； $q$  为电子的电荷量； $R_s$  为光伏电池的串联电阻； $k$  为玻尔兹曼常数； $T$  为光伏电池的温度； $R_{sh}$  为光伏电池的并联电阻； $T_r$  为参考温度； $I_{or}$  为参考温度下暗饱和电流； $E_{GO}$  为半导体材料的禁带宽度； $A$ 、 $B$  为理想因子； $I_{SCR}$  为标准测试条件下光伏电池的短路电流； $K_1$  为短路电流的温度系数； $\lambda$  为日照强度。

由光伏电池的特性曲线可知，在不同的光照强度和环境温度下，光伏电池输出的电压和电流也不相同。当光照强度发生变化时，为获取最大输出功率，需要相应地调节等效负载，使得系统的等效负载与光伏电池的伏安特性相匹配。

## 2 基于粒子群优化模糊控制器的 MPPT 控制方法

### 2.1 光伏发电系统的最大功率跟踪系统原理

最大功率点跟踪控制策略通过实时检测光伏阵列的输出功率，采用一定的控制算法预测当前情况下阵列可能达到的最大输出功率，通过改变当前的阻抗情况来满足最大功率输出的要求。MPPT 控制器一般采用 DC/DC 变换器来实现，当光伏电池带不同负载时，可以通过调节 DC/DC 变换器的占

空比使光伏电池工作在最大功率输出状态。

目前常用的 DC/DC 变换器拓扑有降压型(Buck)、升压型(Boost)、升-降压型(Buck-Boost)等。升压型变换器具有效率高、控制能力强、结构简单等优点，因此本文采用升压型 DC/DC 变换器来实现光伏发电系统的最大功率跟踪，本文 MPPT 控制方案如图 1 所示。

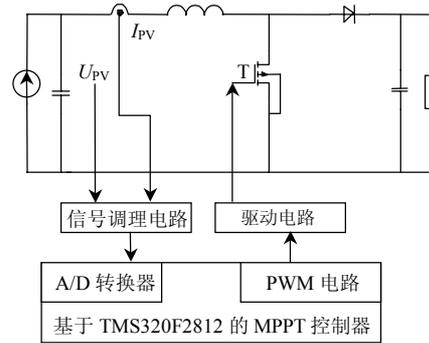


图 1 基于 DSP 控制的光伏发电最大功率跟踪系统  
Fig. 1 DSP-based photovoltaic MPPT system

### 2.2 最大功率跟踪系统的模糊控制器实现方法

对光伏电池的工作电压和输出电流采样，并进行 A/D 转换，然后计算出光伏电池的瞬时输出功率。取误差  $e(k)$  和误差变化率  $\Delta e(k)$  为模糊控制器的输入变量，占空比  $d$  为输出变量，定义模糊控制器的控制量如下：

$$e(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{U(k) - U(k-1)} \quad (4)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (5)$$

式中  $P(k)$ 、 $U(k)$  分别表示太阳能电池阵列的输出功率及输出电压。

将输入变量  $e(k)$ 、 $\Delta e(k)$  和输出变量  $d$  分别用量因子映射到模糊集合论域  $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$  区间，对应的模糊子集为  $(N_B, N_M, N_S, Z_E, P_S, P_M, P_B)$ ，选择三角形函数作为隶属度函数。

### 2.3 基于 PSO 算法的模糊控制器的隶属度函数优化设计

PSO 算法是由 R.Eberhart 和 J.Kennedy 于 1995 年提出的<sup>[9]</sup>。PSO 算法是一种基于群体的进化计算方法，算法相对简单、易于实现、搜索速度快。PSO 算法已经广泛应用于函数优化、神经网络训练、控制参数优化等领域。

PSO 算法中，用粒子在寻优空间中的位置表示优化问题的解，粒子的速度向量确定了粒子的方向和速度值，各个粒子追随当前最优粒子，并参考自身的飞行经验在解空间中进行寻优<sup>[10]</sup>。

假设每个优化问题的解都是搜索空间的一个粒子，第  $i$  个粒子在  $N$  维空间里的位置和速度可表示为

$$\mathbf{X}_i(t) = (x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{iN}(t)) \quad (6)$$

$$\mathbf{v}_i(t) = (v_{i1}(t), v_{i2}(t), \dots, v_{iN}(t)) \quad (7)$$

所有的粒子都有一个由被优化函数决定的适应度值。算法开始时将粒子群初始化为解空间的一组随机值，然后粒子群在解空间中搜索和追随当前最优粒子。在每次迭代中每个粒子通过跟踪两个最优值来更新自己：一个是到当前为止该粒子本身所经历的最优值  $p_N$ ；另一个是到目前为止粒子群找到的最优值  $p_{gN}$ 。设  $x_{iN}(t)$  是粒子  $i$  在第  $t$  次迭代中的位置； $v_{iN}(t)$  是粒子  $i$  在第  $t$  次迭代中的速度。速度和位置的更新方程为

$$v_{iN}(t+1) = v_{iN}(t) + c_1 r_1 [p_{iN}(t) - x_{iN}(t)] + c_2 r_2 [p_{gN}(t) - x_{iN}(t)] \quad (8)$$

$$x_{iN}(t+1) = x_{iN}(t) + v_{iN}(t+1) \quad (9)$$

式中： $c_1$ 、 $c_2$  为加速系数； $r_1$ 、 $r_2$  为两个独立的随机数； $p_{iN}(t)$  为粒子  $i$  的个体极值点位置； $p_{gN}(t)$  为整个群的全局极值点位置。

标准 PSO 算法的具体流程如下<sup>[9]</sup>：

- 1) 初始化粒子群，包括随机位置和速度；
- 2) 评价每个粒子的适应度；
- 3) 对每个粒子，将其适应值与其经历过的最好位置作比较，保留较好的一个；
- 4) 对每个粒子，将其适应值与全局所经历的最好位置作比较，保留较好的一个；
- 5) 利用式(8)、(9)对每一个粒子的速度和位置进行更新；
- 6) 如未达到结束条件，则返回步骤 2)。

为了应用粒子群算法对模糊控制器的隶属度函数进行优化，必须要对确定目标函数和决策变量进行编码。本文采用的粒子群算法优化隶属度函数的模糊控制系统如图 2 所示， $k_1$ 、 $k_2$  为量化因子。

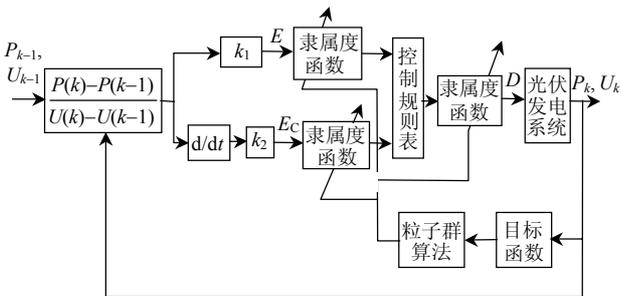


图 2 粒子群算法优化隶属度函数的模糊控制系统  
Fig. 2 Fuzzy control system with particle swarm optimization of membership function

在光伏发电最大功率跟踪系统中，若要实时计算对应采样时刻的最大功率，必须要将光伏模块与负载周期性断开以检测开路电压和短路电流，这样会导致系统输出功率振荡变大。为了避免实时计算采样时刻光伏模块输出的最大功率，本文采用计算采样时刻与前一采样时刻的功率变化率  $J$  作为粒子群算法的目标函数，当  $J < 0.05$  时，粒子群算法停止迭代。定义目标函数如下：

$$J = \frac{P_i - P_{i-1}}{P_{i-1}} \quad (10)$$

式中  $P_i$  为某采样时刻光伏系统输出的功率。

设计的模糊控制器有两个输入  $e(k)$  和  $\Delta e(k)$ ，一个输出  $d$ 。每个变量由 7 个隶属度函数描述。PSO 算法中每个粒子的维数为 18，隶属度函数的编码方案如图 3 所示，每个粒子由模糊控制器的输入和输出隶属度函数经过编码后得到，每个粒子的编码结构如图 4 所示<sup>[11-12]</sup>，图中， $E$  和  $E_C$  是由输入  $e(k)$  和  $\Delta e(k)$  经量化后得到的， $D$  是经量化后的输出， $U_E(k)$  和  $U_{CE}(k)$  为模糊化后的模糊控制器的输入， $U_D(k)$  为模糊化后的模糊控制器的输出。

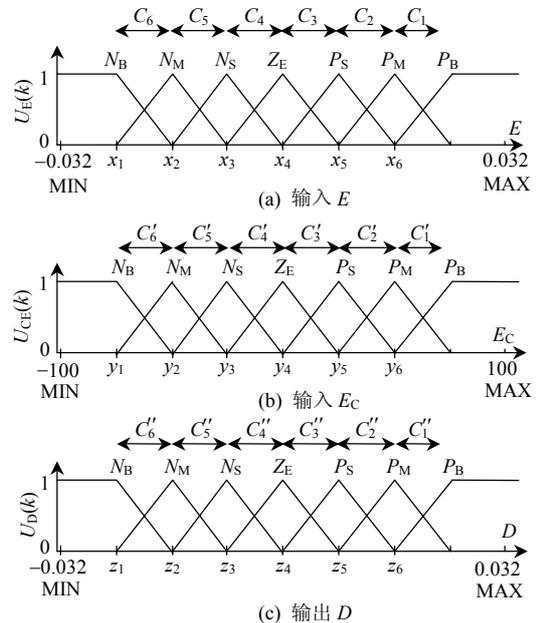


图 3 隶属度函数的编码方案

Fig. 3 Coding scheme for membership function

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C'_1$	$C'_2$	$C'_3$	$C'_4$	$C'_5$	$C'_6$	$C''_1$	$C''_2$	$C''_3$	$C''_4$	$C''_5$	$C''_6$
-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

图 4 粒子群优化算法中粒子的编码结构

Fig. 4 Coding structure of particles in particle swarm optimization algorithm

图 4 中  $C_i$ 、 $C'_i$ 、 $C''_i$  与  $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$  的关系<sup>[13-16]</sup>可分别表示为

$$\begin{cases} x_1 = -0.032(C_6 + C_5 + C_4) \\ x_2 = -0.032(C_5 + C_4) \\ x_3 = -0.032C_4 \\ x_4 = 0.032C_3 \\ x_5 = 0.032(C_2 + C_3) \\ x_6 = 0.032(C_1 + C_2 + C_3) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} y_1 = -100(C'_6 + C'_5 + C'_4) \\ y_2 = -100(C'_5 + C'_4) \\ y_3 = -100C'_4 \\ y_4 = 100C'_3 \\ y_5 = 100(C'_2 + C'_3) \\ y_6 = 100(C'_1 + C'_2 + C'_3) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} z_1 = -0.032(C''_6 + C''_5 + C''_4) \\ z_2 = -0.032(C''_5 + C''_4) \\ z_3 = -0.032C''_4 \\ z_4 = 0.032C''_3 \\ z_5 = 0.032(C''_2 + C''_3) \\ z_6 = 0.032(C''_1 + C''_2 + C''_3) \end{cases} \quad (13)$$

### 3 仿真和试验

为了验证本文提出的控制策略的有效性和可行性，构建了一套数字控制的 MPPT 控制系统(参见图 1)。首先进行了仿真，然后在实验室的光伏发电试验平台上进行了试验，试验平台如图 5 所示。



图 5 试验平台

Fig. 5 Flat of experiment experimental plat form

系统中的光伏电池输出的电流与电压分别由电流传感器和电压传感采样得到，本系统的数字控制器是基于高速 32 位 DSP(TMS320F2812)实现的。

本试验采用的光伏电池最大功率点的电压为 18 V，最大功率点的电流为 2.25 A，开路电压为 22 V，短路电流为 2.65 A；最大输出功率为 40 W。根据文献[17]的方法，计算得到 Boost 变换器中光伏电池上并联的电容为 1 000  $\mu$ F，滤波电感为 200  $\mu$ H，滤波电容为 100  $\mu$ F。

在 PSO 算法中，粒子数一般取 20~40，粒子的维数是由优化问题决定。粒子的最大速度  $v_{max}$  决定在当前位置与最好位置之间的区域的分辨率。若

$v_{max}$  太大，粒子可能会飞过好解；若  $v_{max}$  太小，粒子不能进行足够的搜索，导致陷入局部优值。学习因子  $c_1$  和  $c_2$  取较低的值时，允许粒子在目标区域外徘徊；取较高的值时会导致粒子突然越过目标区域。本文在参照已有文献的基础上经过反复试验，设置 PSO 算法的参数如下：种群总数为 30，每个粒子的维数为 18，最大迭代次数为 50，学习因子  $c_1=2, c_2=2$ ，粒子的速度范围为  $[-10, 10]$ ； $r_1, r_2$  为在  $[0, 1]$  区间均匀分布的随机数。 $C_i, C'_i, C''_i (i=1, 2, 3, 4)$  分别初始化为  $[0.01, 0.99]$  内的 50 组随机值。

为了比较干扰观察法<sup>[4]</sup>、常规模糊控制和带粒子群优化的模糊控制 3 种最大功率点跟踪方法的性能，将 3 种方法在同样的条件下进行仿真，采样周期均为 0.01 s。仿真时，为了测试算法的动态响应能力，使外界光照强度在 0.25 s 时从 400 W/m<sup>2</sup> 阶跃跳变至 1 000 W/m<sup>2</sup>(温度为 25℃)，系统的响应情况如图 6 所示。由图 6 可见，与干扰观察法和常规模糊控制方法相比，带粒子群优化的模糊控制算法的动态响应速度和稳态精度更好。为了进一步验证本文所提控制方法的鲁棒性，使外界光照强度在 0.25 s 时从 1 000 W/m<sup>2</sup> 阶跃跳变至 400 W/m<sup>2</sup>(温度为 30℃)，系统的响应情况如图 7 所示。

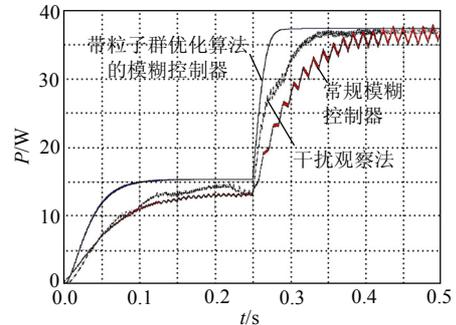


图 6 当光照强度从 400 W/m<sup>2</sup> 到 1 000 W/m<sup>2</sup> 发生阶跃变化时的系统动态响应

Fig. 6 Simulated dynamic response of PV output power when solar insolation step change from 400 to 1 000 W/m<sup>2</sup>

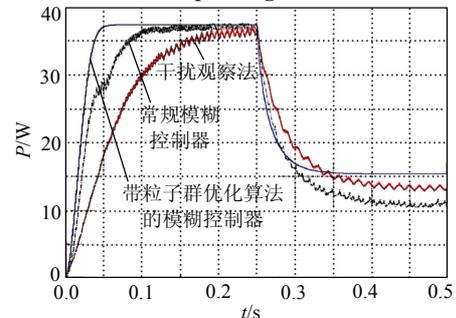


图 7 当光照强度从 1 000 W/m<sup>2</sup> 到 400 W/m<sup>2</sup> 产生阶跃变化时的系统动态响应

Fig. 7 Simulated dynamic response of PV output power when solar insolation step change from 1 000 to 400 W/m<sup>2</sup>

由图7可见,在光照强度发生剧烈变化的情况下,采用本文所提的控制方法后系统的动态响应速度良好,稳态精度较高。

为了进一步研究本文方法的可行性,在试验室的试验平台上进行了试验。采用直流电源来模拟当光照强度变化时光伏电池的最大功率点的变化,保持直流电压的输出电压为15V,将输出电流由2A降至1A,然后再将输出电流恢复至2A,分别采用3种不同的控制方法的系统响应情况如图8—10所示。

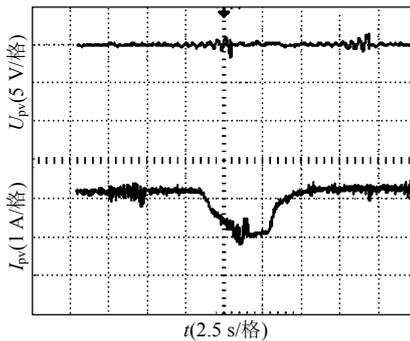


图8 采用P&O控制方法的试验波形  
(输入最大功率  $P_{mpp}$ : 30W→15W→30W)

Fig. 8 Test waveforms by using P & O control method

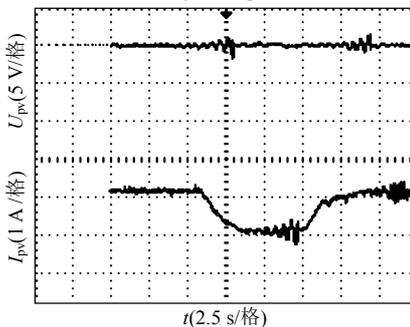


图9 采用常规模糊控制方法的试验波形  
(输入最大功率  $P_{mpp}$ : 30W→15W→30W)

Fig. 9 Test waveforms by using fuzzy control method

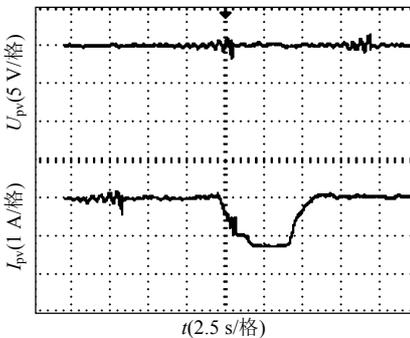


图10 采用带PSO的模糊控制方法的试验波形  
(输入最大功率  $P_{mpp}$ : 30W→15W→30W)

Fig. 10 Test waveforms by using fuzzy control method with PSO

由图8—10可以看出,与干扰观察法<sup>[4]</sup>和常规

模糊控制方法相比,采用带PSO的模糊控制方法后系统动态响应速度更快,稳态精度更好,系统具有很好的跟踪性能。

## 4 结论

本文提出了一种带粒子群优化的模糊控制器,用于光伏系统的最大功率点跟踪控制。建立了光伏发电系统的MPPT模型,进行仿真研究,并在试验平台上测试了3种不同控制方法的动态响应,进行比较,得到如下结论:

1) 与定步长的干扰观察法和变步长的常规模糊控制器相比,带粒子群优化的模糊控制器具有较好的动态和稳态性能,具有较强的鲁棒性;

2) 从仿真和试验结果中可以看出,本文所提方法能有效减小采用干扰观察法时最大功率跟踪系统的输出功率围绕最大功率点的振荡幅度。

## 参考文献

- [1] Desai H P, Patel H K. Maximum power point algorithm in PV generation: an overview[C]//7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Bangkok: IEEE, 2007: 624-630.
- [2] 张超, 何湘宁. 短路电流结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 98-102. Zhang Chao, He Xiangning. Short-current combined with perturbation and observation maximum-power-point tracking method for photovoltaic power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 98-102(in Chinese).
- [3] Masoum M A S, Dehbonei H, Fuchs E F. Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage-and current-based maximum power-point tracking[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(4): 514-522.
- [4] Femia N, Granozio D, Petrone G, et al. Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 934-950.
- [5] 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.
- [6] Kottas T L, Boutalis Y S, Karlis A D. New maximum power point tracker for PV arrays using fuzzy controller in close cooperation with fuzzy cognitive networks[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 793-803.
- [7] Khaehintung N, Sirisuk P. Application of maximum power point tracker with self-organizing fuzzy logic controller for solar-powered traffic lights[C]//7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Bangkok: IEEE, 2007: 642-646.
- [8] 惠晶, 方光辉. 新能源转换与控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 135-149. Hui jing, Fang guanghui. The new energy conversion and control technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2008: 135-149(in Chinese).
- [9] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings

- of IEEE Conference on Neural Networks. Perth: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [10] 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学, 2004, 6(5): 87-94.  
Yang Wei, Li Qiqiang. Survey on particle swarm optimization algorithm[J]. Engineering Science, 2004, 6(5): 87-94(in Chinese).
- [11] 郝万军, 强文义, 柴庆宣, 等. 基于粒子群优化的一类模糊控制器设计[J]. 控制与决策, 2007, 22(5): 586-588.  
Hao Wanjun, Qiang Wenyi, Chai Qingxuan, et al. Design of fuzzy controller based on particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2007, 22(5): 586-588(in Chinese).
- [12] 韩璞, 王学厚, 李剑波, 等. 粒子群优化的模糊控制器设计[J]. 动力工程, 2005, 25(5): 665-666.  
Han Pu, Wang Xuehou, Li Jianbo, et al. Design of a fuzzy controller based on particle swarm optimization[J]. Power Engineering, 2005, 25(5): 665-666(in Chinese).
- [13] 曹承志, 李海平. 用遗传算法优化模糊控制器的实现方法[J]. 计算机仿真, 2003(20): 56-58.  
Cao Chengzhi, Li Haiping. A genetic algorithm for membership functions optimization in fuzzy logic controller: a MATLAB implementation[J]. Computer Simulation, 2003(20): 56-58(in Chinese).
- [14] Chen C, Wong C. Self-generating rule-mapping fuzzy controller design using a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(3): 971-978.
- [15] Lee M, Takagi H. Integrating design stages of fuzzy systems using genetic algorithm[C]//Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems. San Francisco: IEEE, 1993: 612-617.
- [16] Belarbi K, Titel F. Genetic algorithm for the design of a class of fuzzy controller: an alternative approach[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2000, 8(4): 398-405.
- [17] 沈玉梁, 苏建徽, 赵为, 等. 不可调度式单相光伏并网装置的平波电容容量的选择[J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 655-658.  
Shen Yuliang, Su Jianhui, Zhao Wei, et al. The calculation of filter capacitor prapedled sollar-array in undispachable single-phase photovoltaic grid-connected system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2003, 24(5): 655-658(in Chinese).



吴海涛

收稿日期: 2010-07-13。

作者简介:

吴海涛(1974), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为光伏系统和机电系统智能检测与控制, wht29@163.com;

孙以泽(1959), 通讯作者, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为机电系统智能检测与控制, sunyz@dhu.edu.cn;

孟焯(1964), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为机电系统智能检测与控制。

(编辑 李婧妍)