

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20150003

# 光伏系统多目标粒子群优化模糊 MPPT 控制

游国栋,李继生,侯 勇,赵春东,王 磊 (天津科技大学电子信息与自动化学院,天津 300222)

摘 要:针对光伏发电系统遭受部分阴影时呈现多峰值、非线性和时变不确定等特性,提出了基于多目标粒子群优化(multi-objective particle swarm optimization, MO-PSO)模糊算法,对最大功率点(maximum power point, MPP)进行追踪控制.该算法对模糊控制的模糊集、模糊规则分别进行多目标粒子群算法优化,同时最小化两个目标函数,以提高光照强度变化时系统对最大功率点跟踪(maximum powerpoint tracking, MPPT)的暂态响应速度和稳态精度.通过对干扰观察法、常规模糊控制方法和多目标粒子群优化模糊控制的仿真波形比较,验证了所提控制策略的有效性.
 关键词:光伏系统;多目标粒子群优化;模糊逻辑;最大功率点跟踪
 中图分类号:TM914 文献标志码:A 文章编号: 1672-6510(2016)01-0073-06

# Fuzzy Logic Controller for MPPT of the Photovoltaic Generation System Using Multi-objective Particle Swarm Optimization

YOU Guodong, LI Jisheng, HOU Yong, ZHAO Chundong, WANG Lei (College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract**: Aimed at the problems of multi-peak, nonlinearity and uncertainty of the photovoltaic generation system shaded at the time in actual operation, a fuzzy controller using multi-objective particle swarm optimization was proposed, with which the actual maximum power point of the photovoltaic generation system can be tracked. Multi-objective particle swarm optimization algorithm was applied to optimize the fuzzy sets and the fuzzy rules of the fuzzy controller and the two objective functions were minimized in order to ensure that the control system has a faster dynamic response speed and higher steady-state accuracy in case the light intensity varies. In this research, simulations were performed and studied with the perturbation and observation method, the fuzzy control method and the fuzzy controller with multi-objective particle swarm optimization algorithm under the same condition, and the results demonstrated the effectiveness of the proposed method. **Key words**: photovoltaic generation system; multi-objective particle swarm optimization; fuzzy logic; maximum power point tracking

太阳能作为一种绿色生态的可再生能源,在诸多 方面得到了广泛的应用<sup>[1-4]</sup>.粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)在单目标优化问题中已被 证实应用效果良好<sup>[5-7]</sup>,在多目标问题中也获得了越 来越多的关注,近年来已有许多用于求解多目标问题 的粒子群算法被提出<sup>[8-10]</sup>.吴海涛等<sup>[11]</sup>提出一种光伏 发电系统粒子群优化算法的模糊最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT)控制策略,该 控制策略对模糊控制的隶属度函数实行粒子群算法 优化,能够对步长实现实时调整跟踪,提高了系统对 最大功率点(maximum power point, MPP)跟踪的动 态响应速度和稳态精度;刘刚等<sup>[12]</sup>提出一种 Pareto 占优策略和拥挤距离排序方法的改进型粒子群算法, 并将其应用在电力系统多目标经济调度问题研究中, 验证了其对全局和局部搜索的能力;Tan 等<sup>[13]</sup>提出基 于混沌局部搜索的多目标粒子群优化算法,用于解决 无约束的多目标连续函数优化问题,通过实验验证了 该控制策略的有效性.模糊逻辑控制不需要精确的

收稿日期: 2015-01-05; 修回日期: 2015-05-29

**基金项目**: 天津市自然科学基金重点资助项目(13JCZDJC29100);天津市科技特派员项目(15JCTPJC64100,15JCTPJC63700) 作者简介: 游国栋(1973—),男,山西人,副教授, yougdong1973@sohu.com.

数学模型、具有优越的自学习性、适应性和鲁棒性等 特点,在许多控制领域得到广泛应用.然而,光伏阵 列具有时变参数非线性特点,常规的模糊控制器又缺 乏控制规则在线自学习能力和控制器参数自调整能 力,因此很难达到控制要求.刘立群等<sup>[14]</sup>将模糊控制 技术与免疫理论相结合,提出部分遮蔽光伏发电系统 MPPT 模糊免控制策略;Subiyanto等<sup>[15]</sup>采用 Hopfield 神经网络优化模糊逻辑控制器,并在光伏发 电系统的最大功率点跟踪控制中进行了仿真实验研 究,结果表明光伏发电系统的输出功率得到了提高.

针对光伏发电系统遭受部分阴影时呈现多峰值、 非线性和时变不确定等特性,本文将多目标粒子群优 化算法和模糊逻辑控制技术相结合,设计一个基于多 目标粒子群优化算法(multi-objective particle swarm optimization, MO-PSO)的模糊控制器,并利用该控制 器对光伏系统的最大功率点进行跟踪控制.在该控 制策略中,针对模糊集和模糊规则分别进行多目标粒 子群优化,同时将输出电压和参考电压之间偏差的积 分设定为两个目标函数,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,达到提高整个最大功率跟踪控制系统的动态 和稳态性能的目的,可为光伏发电系统最大功率点的 多目标问题研究提供参考.

# 1 光伏发电系统模型

光伏系统是由一系列太阳能电池阵列串联或并 联构成的,图 1 为光伏电池串联单二极管等效电路.图中 *R*<sub>p</sub>为并联电阻;*R*<sub>s</sub>为串联电阻;*I*<sub>ph</sub>为光生电流;*I*<sub>o</sub>、*I*<sub>pv</sub>、*U*<sub>pv</sub>分别为光伏电池暗饱和电流、输出电流、输出电压.





光伏系统输出电流在一般情况下和局部阴影条 件下的数学模型<sup>[2-4,11]</sup>分别为

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{o1} [exp(\frac{q(U_{pv} + I_{pv}R_{s})}{AK_{b}T_{k}}) - 1] - \frac{U_{pv} + I_{pv}R_{s}}{R_{p}}$$

$$\Phi(I_{pv}, U_{pv}, T_k, G) = I_{ph} - I_{pv} - I_{ol} \cdot [\exp(\frac{q(U_{pv} + I_{pv}R_s)}{N_sAK_bT_k}) - 1] - \frac{U_{pv} + N_sI_{pv}R_s}{N_sR_p} = 0$$
(2)

式中: $I_{o1}$ 、A 分别为二极管的饱和电流和理想系数; q 为电荷常量 ( $q = 1.602 \times 10^{-19}$  C);  $K_b$  为波尔兹曼常 数;  $T_k$ 、G 分别为光伏电池接受的光照温度和光照 度;  $N_s$  为串并联的光伏电池数目.通常情况下,光伏 阵列均遭受部分阴影,由于光照度分布不均,其 P-U特性曲线呈现多峰值特性,因此,式(2)更具有一般 代表性.

# 2 模糊 MPPT 策略

采用模糊控制不需要知道精确的数学模型,可以 对非线性系统进行控制,并具有良好的鲁棒性和动态 性能<sup>[14-17]</sup>.本文研究的控制对象为有局部阴影的光 伏发电系统,其 *P-U*输出特性具有明显的非线性特 征,随太阳光照度、温度和阴影面积的变化而变化, MPPT并不能采用精确的数学模型表示其内部特性. 鉴于此,本文采用模糊控制来实现光伏发电系统的 MPPT 控制.

图 2 为光伏阵列在部分遮蔽情况下采用多目标 粒子群优化模糊 MPPT 系统示意图.图中 *I*<sub>pv</sub>、*U*<sub>pv</sub>分 别为光伏系统输出电流、输出电压;*I*<sub>out</sub>、*U*<sub>out</sub>分别为 负荷侧输出电流、电压;*Z*<sub>out</sub>为负载阻抗;*I*<sub>ref</sub>、*U*<sub>ref</sub>分 别为参考电流、电压;*e*、Δ*e*分别为电流误差及其变化 率;*o*为模糊控制器的输出.





Fig. 2 Fuzzy logic controller of MPPT of the photovoltaic generation system using multi-objective particle swarm optimization

通过传感器检测可得到输出电压  $U_{out}(k)$ 和电流  $I_{out}(k)$ ,经估算公式计算得到负载阻抗,即  $Z_{out}(k) = U_{out}(k)/I_{out}(k)$ .并将参考电压  $U_{ref}$ 和该负载阻抗的比 值设定为参考电流,即  $I_{ref}(k) = U_{ref}/Z_{out}(k)$ .可知,在 电流控制环中,由参考电压  $U_{ref}$ 和负载阻抗  $Z_{out}(k)$ 计 算得到电流参考值  $I_{ref}(k)$ 的同时,产生了一个电流误 差信号 e(k).系统将该误差信号 e(k)及其变化率  $\Delta e(k)$ 作为模糊控制器的输入,控制器的输出 o(k)作 为场效应管的驱动信号.可见,该控制器为一个双输 入单输出多目标粒子群优化模糊控制器,其中输入量 为电流误差信号 e(k)及其变化率  $\Delta e(k)$ ,输出量 o(k)为占空比 D. 控制器的两个输入量分别定义为

$$e(k) = I_{ref}(k) - I_{out}(k)$$
 (3)  
 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) = I_{ref}(k) -$ 

$$I_{\rm ref}(k-1) + I_{\rm out}(k-1) - I_{\rm out}(k)$$
(4)

同时,输入、输出量的隶属度函数均采用三角形函数,见图 3. 模糊规则采用语句"If x is  $A(l)_i$  and y is  $B(l)_j$ , then o is  $O(l)_k$ "实现,其中 $A(l)_i$ 、 $B(l)_j$ 分别为条件语言变量 x、y的数值,x、y分别代表模糊控制器的两个输入变量,其论域分别定义为 X、Y; $O(l)_k$ 为一个独立的语言变量o的数值,代表模糊控制器的输出变量,其论域定义为 O; $l=1,2,\dots,n$ 为双输入单输出模糊控制器的规则数.



### 3 多目标粒子群优化模糊 MPPT 策略

#### 3.1 PSO基本原理

粒子群优化算法通过群体中粒子间的合作与竞争自动搜索优化<sup>[2-4,11,18-19]</sup>.在每次迭代过程中,粒子的位置和速度根据 2 个最优值不断更新,2 个最优值 分别为当前时刻粒子自身和整个群体搜索到的最优 解,分别用 Pbest和 Gbest表示.粒子群中第 i 个粒子的 位置 x<sub>i</sub>和速度 v<sub>i</sub>可以分别表示为

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1)$$
(5)

$$v_{i}(k+1) = wv_{i}(k) + c_{1}r_{1}[P_{\text{best},i} \ x_{i}(k)] + c_{2}r_{2}[G_{\text{best}}x_{i}(k)]$$
(6)

式中:w 为惯性权重; $c_1$ 和  $c_2$ 为加速度的 2 个系数; 均匀分布的随机数  $r_1$ 、 $r_2$ 的变化区间为[0,1]; $P_{\text{best},i}$ 为 第 i 个粒子位置的最优解; $G_{\text{best}}$ 为整个粒子群的最 优解.

假定第 *i* 个粒子的速度分量 *v<sub>i</sub>*发生变化,则代表 实际占空比的位置 *x<sub>i</sub>*可以写为

$$D_i^{k+1} = D_i^k + v_i^{k+1} \tag{7}$$

由式(6)可知,  $P_{\text{best},i}$ 和  $G_{\text{best}}$ 决定着速度分量  $v_i$ 的变 化,结合式(7)可知,实际占空比远离  $P_{\text{best},i}$ 和  $G_{\text{best}}$ , 将增大速度分量  $v_i$ 的波动,反之亦然. 综上,速度分 量  $v_i$ 的变化是由粒子群的位置决定的.

#### 3.2 MO-PSO设定

多目标粒子群优化算法的基本规则是依照所求 问题的最大值及最小值情况,将多目标优化问题拆解 为最大化和最小化问题,并建立各自的数学模型,分 别实行优化<sup>[20-22]</sup>.为找寻最佳的模糊规则和模糊集 合参数,本文提出一种多目标粒子群优化模糊算 法.在一组适宜解中,该算法对多目标进行优化,同 时最小化几个目标函数,公式可以表示为

 $\min y = f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]$  (8) 式中:*m* 为目标函数的子目标个数; *x* 为决策变量,由 一组最优变量构成, *x* = (*x*<sub>1</sub>, *x*<sub>2</sub>, ..., *x<sub>n</sub>*)  $\in X, X$  代表决策 空间; *y* 为目标函数变量, *y* = (*y*<sub>1</sub>, *y*<sub>2</sub>, ..., *y<sub>n</sub>*)  $\in Y$ , *Y* 代表目标空间.

在多目标粒子群优化算法中遵循同时优化多个 子目标的规律,但是子目标之间存在着相互竞争和冲 突,这就会导致在一个子目标性能改善的同时会造成 其他子目标性能恶化现象的发生.据此,可以对根据 式(8)得到的多目标函数的解及其解集进行设置:令 任意 2 个解向量分别为  $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n), \beta =$  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n), 且 \beta 受 \gamma 支配,记为 \gamma \prec \beta, 当且仅当$  $<math>\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 时, $\gamma_i \leq \beta_i$ ,并有  $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ 使  $\gamma_j < \beta_j$ 成立;如果对  $\gamma_{\backslash} \beta \in X, \beta \prec \gamma$ 不成立,则  $\gamma$  定义为 Pareto 的最优解(或者非劣解);在决策空间 X中,全 部 Pareto 最优解集所对应的目标变量集合称作 Pareto 前端.

#### 3.3 多目标粒子群优化模糊 MPPT

3.3.1 多目标粒子群优化

根据上述模糊逻辑控制,结合多目标粒子群优化 算法,系统需要分 2 部分进行粒子群优化,第一部分 是针对模糊集,第二部分是针对模糊规则.系统设计 输入、输出量的隶属度函数均采用三角形函数(图 3),所以对第一部分模糊集进行粒子群优化时,需要 对 7 个模糊子集的最大值进行设定,设定方法见图 3. 每个隶属函数都可以通过变量  $a_{1i}$ ,  $a_{2i}$ 和  $a_{3i}$ 确定, 同时令调整系数  $\sigma_i$ 和  $\lambda_i$ 为第一部分粒子群优化的变 量,其中  $i = (1, 2, \dots, 7)$ ,则每个隶属函数可以通过式 (9)确定.

$$\begin{cases} a_{1i} = (a_{1i} + \sigma_i) - \lambda_i \\ a_{2i} = (a_{2i} + \sigma_i) + \lambda_i \\ a_{3i} = a_{3i} + \sigma_i \end{cases}$$
(9)

因此, 粒子群优化搜索的空间总共为 42 个参量(即 7 个模糊子集 × 2 个调整系数 × 3 个变量 = 42). 对第 二部分模糊规则进行粒子群优化时, 每个模糊规则可 以由在 1—7 之间变化的 3 个变量表示(见图 4). 前 两个变量分别与 x, y 有关, 论域分别为 X 和 Y, 第三 个变量与 o 有关, 论域为 O. 例如模糊规则 "If x is NB and y is Z, then o is NS"中 1 代表 NB, 4 代表 Z, 3 代表 NS. 因此, 模糊规则共有 21 条(即 3 个变量 × 7 个在 1—7 之间变化的数 = 21), 这 21 条规则可以 通过 63(即 21 条规则 × 3 个变量 = 63)个在 1—7 之 间变化的变量表示. 综上, 多目标粒子群优化搜索的 空间总共为 105 个参量(即 42 + 63 = 105).



图 4 多目标粒子优化模糊规则编号示意图 Fig. 4 View of number for fuzzy rules using multiobjective particle swarm optimization

3.3.2 目标函数定义

将输出电压和参考电压之间偏差平方的积分设 定为两个目标函数,并进行最小化,计算公式为

$$\begin{cases} I_{\text{out,S}} = \int_{0}^{T} [U_{\text{out,S}}(t) - U_{\text{ref}}]^{2} dt \\ I_{\text{out,L}} = \int_{0}^{T} [U_{\text{out,L}}(t) - U_{\text{ref}}]^{2} dt \end{cases}$$
(10)

式中: *I*<sub>out,S</sub>、*U*<sub>out,S</sub>(*t*)分别为输出电流和电压初始值; *I*<sub>out,L</sub>、*U*<sub>out,L</sub>(*t*)分别为负载暂态响应期间的输出电流 和电压; *U*<sub>ref</sub>代表参考电压; *T*为仿真周期.

3.3.3 算法步骤

在多目标粒子群优化算法中,同时优化的多个子 目标之间存在相互冲突,造成了某个子目标性能改善 和其他子目标性能恶化并存的现象.因此,在多目标 粒子群优化模糊算法中引入基于相邻个体间距离之 和最小删除法<sup>[23]</sup>对存储器的解进行裁剪选择,并引 入种群距离法<sup>[24]</sup>对粒子位置进行小范围的扰动,以 提高算法的全局搜索能力,具体方法为设定粒子在原位置的±30%之间进行小概率的随机扰动.

基于多目标粒子群优化模糊算法的步骤如下:

(1)初始化粒子群优化算法的参数及决策变量.

(2) 随机初始化每个粒子的位置和速度. 设定第 *i* 个粒子的当前位置为 *x<sub>i</sub>*, 初始速度为 *v<sub>i</sub>*, 均匀分布随 机数范围为[0, 1].

(3) 设置群体粒子 *N*. 设定当前最优解 *P*<sub>best,i</sub> = *x*<sub>i</sub>, 并根据式(10) 计算子目标函数值, 找出 *N* 个粒子的 Pareto 最优解并区别非支配解, 存储在外部存档 集合中. 同时设定迭代次数初始值 *t*<sub>0</sub> = 0, 最大迭代 次数为 *T*<sub>max</sub>.

(4)更新粒子位置和速度.在外部存储器中,对 整个群体进行搜索,随机选择第 *i* 个粒子的全局最优 值 *G*<sub>best,*i*</sub>,并根据式(9)计算更新位置和速度.

(5)评估种群中的支配解,与当前最优解进行比较,并更新 Pbest.i-

(6) 将外部存储器设置为暂态存储器,并清零. 检测当前粒子中的 Pareto 最优解,并列入外部存档 集合.

(7)采用基于相邻个体间距离之和最小删除法, 在暂态存储器中搜索非支配解,确定当前外部存档集 合中的 Pareto 最优解,如大于外部存储器选择的解, 将其存储在外部存储器中,并清空暂态存储器.

(8)采用种群距离法搜索外部存储器,并在一定 粒子数范围内执行最佳变异算子.

(9)更新迭代次数,检测终止条件 *t* = *T*<sub>max</sub> 是否成 立,满足则输出非支配解,程序结束. 否则,转至(3) 继续执行程序.

## 4 仿真分析

为验证本文算法的有效性,构建了基于 Matlab 的仿真模型,见图 2. 系统输出电流与电压分别通过 各自传感器检测. 依据太阳光照度"低一高一低" 的更替规律,低光照度设置为 600 lx,高光照度设置 为 1 000 lx",在 t = 15 s 和 t = 35 s 时相继发生 2 次 跳变,温度维持 25 ℃恒定. 粒子群优化算法参数设 定为  $N_P = 300, c_1 = c_2 = 1.2, w_{max} = 0.8, w_{min} = 0.4, 粒$  $子速度变化区间[-10,10],均匀分布随机数 <math>r_1$  和  $r_2$ 变化区间[0,1]. 对干扰观察法 (perturbation and observation, P&O)<sup>[25]</sup>、常规模糊控制法<sup>[26]</sup>和基于多目 标粒子群优化模糊的 MPPT 方法的性能进行比较,将 3种方法在同样的条件下进行仿真,步长设为0.02.

图 5 为 3 种方法追踪 MPP 的仿真曲线. 由图 5 可以看出:光伏系统的初始输出功率峰值相等 (370 W),在光照度发生第一次跳变后,干扰观察法 (图 5(a))<sup>[25]</sup>和常规模糊控制法(图 5(b))<sup>[26]</sup>均经历 了较长过程才达到稳态,消耗时间分别为 4.5 s 和 4 s;经过一定阶段的稳态,在光照度发生第二次跳变 后,2 种方法分别在 38.6 s 和 38 s 时重新回到稳定状态,但输出功率均出现了负的变化,变化幅度分别为 210 W 和 205 W. 在 2 次跳变中,前 2 种方法达到稳 定状态所经历的时间虽然大致相等,但干扰观察法在 跳变过程中和稳态阶段均出现频繁的振荡,说明其追踪 MPP 的准确度和稳定度不理想,而且在第二次追踪 MPP 中出现了较大幅度的跳变,与常规模糊控制 法相比差值为 5 W.





而采用本文方法跟踪 MPP 时,以上现象出现了 明显改善. 从图 5(c)中可以看出:2 次跳变经历的过 程较短,均为 2.5 s 左右;在第二次跳变过程虽也出现 输出功率负的变化,但变化幅度不大,为 125 W 左 右;同时,在 2 次稳态中均没有出现振荡现象,避免 了在最佳 MPP 附近的频繁振荡,说明本文方法在暂 态过程和稳态过程中均能对 MPP 达到理想的控制效 果. 即基于多目标粒子群优化模糊控制算法对 MPP 的追踪速度快,具有较好的暂态和稳态性能.

# 5 结 语

本文提出了基于多目标粒子群优化的模糊控制 算法,并利用其对光伏发电系统的最大功率点进行跟 踪控制,建立了跟踪控制模型,通过 3 种不同控制方 法的仿真,对其动态响应和稳定性能进行比较.结果 表明:本文算法与干扰观察法和常规模糊控制方法相 比,对光伏发电系统的最大功率点具有更快捷的跟踪 速度,系统的动态响应得到较大改善,具有较强的鲁 棒性;在最大功率点附近的振荡幅度得到明显降低, 提高了系统的稳态性能;在太阳光照射度变化发生 时,系统总能搜索到最佳的 MPP,增强了系统的跟踪 性能.

**致谢:**本文研究受到蓟县科技型中小企业发展专项资金 (13ZXZJBS0009)和天津和谐云泽成套电气设备有限公司的 资助,在此一并致谢!

#### 参考文献:

- Qi J, Zhang Y B, Chen Y. Modeling and maximum power point tracking (MPPT) method for PV array under partial shade conditions[J]. Renewable Energy, 2014, 66:337–345.
- [2] 游国栋,李继生,侯勇,等. 部分遮蔽光伏发电系统的 建模及 MPPT 控制[J]. 电网技术,2013,37(11): 3037-3045.
- [3] Ishaque K, Salam Z, Shamsudin A, et al. A direct control based maximum power point tracking method for photo-voltaic system under partial shading conditions using particle swarm optimization algorithm[J]. Applied Energy, 2012, 99: 414–422.
- [4] Ishaque K, Salam Z, Amjad M, et al. An improved particle swarm optimization (PSO)-based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 27 (8) : 3627–3638.

- [5] 张园园,龚庆武,陈道君,等.应用改进粒子群优化的 模糊均值聚类算法的暂态稳定机组分群方法[J].电网 技术,2011,35(9):92–98.
- [6] 朱艳伟,石新春,但扬清,等. 粒子群优化算法在光伏 阵列多峰最大功率点跟踪中的应用[J]. 中国电机工程 学报,2012,32(4):42-49.
- [7] Chekired F, Mellit A, Kalogirou S A, et al. Intelligent maximum power point trackers for photovoltaic applications using FPGA chip: A comparative study[J]. Solar Energy, 2014, 101:83–99.
- [8] Mirhassani S M, Golroodbari S Z M, Golroodbari S M M, et al. An improved particle swarm optimization based maximum power point tracking strategy with variable sampling time[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 64: 761–770.
- [9] Chao K H. An extension theory-based maximum power tracker using a particle swarm optimization algorithm
   [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86: 435–442.
- [10] Sa-ngawong N, Ngamroo I. Intelligent photovoltaic farms for robust frequency stabilization in multi-area interconnected power system based on PSO-based optimal Sugeno fuzzy logic control[J]. Renewable Energy, 2015, 74: 555–567.
- [11] 吴海涛,孙以泽,孟婥. 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[J]. 中国电机工程学 报,2011,31(6):52-57.
- [12] 刘刚,彭春华,相龙阳.采用改进型多目标粒子群算法的电力系统环境经济调度[J].电网技术,2011, 35(7):139-144.
- [13] Tan Y, Tan G Z, Deng S G. Hybrid particle swarm optimization with chaotic search for solving integer and mixed integer programming problems[J]. Journal of Central South University, 2014, 21 (7): 2731–2742.
- [14] 刘立群,王志新,张华强. 部分遮蔽光伏发电系统模糊
   免疫 MPPT 控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):
   96–99,116.
- [15] Subiyanto S, Mohamed A, Hannan M A. Intelligent maximum power point tracking for PV system using Hopfield neural network optimized fuzzy logic controller
   [J]. Energy and Buildings, 2012, 51: 29–38.
- [16] Punitha K, Devaraj D, Sakthivel S. Development and analysis of adaptive fuzzy controllers for photovoltaic

system under varying atmospheric and partial shading condition[J]. Applied Soft Computing Journal, 2013, 13(11):4320–4332.

- [17] Altin N, Ozdemir S. Three-phase three-level grid interactive inverter with fuzzy logic based maximum power point tracking controller[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 69: 17–26
- [18] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization [M]. Perth: IEEE Press, 1995: 1942–1948.
- [19] Nguyen T L, Low K S. A global maximum power point tracking scheme employing DIRECT search algorithm for photovoltaic systems[J]. IEEE Transations on Industrial Electronics, 2010, 57 (10) : 56–67.
- [20] Tan Y, Tan G Z, Deng S G. Hybrid particle swarm optimization with differential evolution and chaotic local search to solve reliability-redundancy allocation problems[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(6):1572–1581.
- [21] Pierluigi S, Costantino C. Designing fuzzy logic controllers for DC-DC converters using multi-objective particle swarm optimization[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 112: 74–83.
- [22] Tan Y, Tan G Z, Yang B, et al. Chaotic particle swarm optimization with diversity maintenance strategy[J]. Journal of Computational Information Systems, 2012, 8(17):7231–7240.
- [23] Kaveh A, Laknejadi K. A novel hybrid charge system search and particle swarm optimization method for multiobjective optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38 (12): 15475–15488.
- [24] Wang L, Li L P. A coevolutionary differential evolution with harmony search for reliability-redundancy optimization [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(5): 5271–5278.
- [25] Petrone G, Spagnuolo G, Vitelli M. A multivariable perturb-and-observe maximum power point tracking technique applied to a single-stage photovoltaic inverter [J].
  IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1):76–84.
- [26] Altin N, Ozdemir S. Three-phase three-level grid interactive inverter with fuzzy logic based maximum power point tracking controller[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 69: 17–26.

责任编辑:常涛