

# 基于自适应聚焦粒子群优化算法的 电力系统多目标无功优化

刘述奎, 陈维荣, 李奇, 戴朝华, 段涛

(西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

## Power System Multi-Objective Reactive Power Optimization Based on Adaptive Focusing Particle Swarm Optimization Algorithm

LIU Shu-kui, CHEN Wei-rong, LI Qi, DAI Chao-hua, DUAN Tao

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** Based on the improvement of balance performance of particle swarm optimization in global and local searching, an adaptive focusing particle swarm optimization (AFPSO) is proposed which is an adaptive swarm intelligence optimization algorithm possessing better global searching ability and faster searching speed. In this paper the proposed AFPSO algorithm is applied to power system reactive power optimization. Taking optimal control principle as its foundation and led in the index of static voltage stability, a multi-objective reactive power optimization model in which the minimum active network loss and maximum static voltage stability margin are considered comprehensively is built. Simulation results of IEEE 30-bus system show that AFPSO algorithm can enhance power system voltage stability, meanwhile economic operation of power system is also implemented, thus the effectiveness and superiority of AFPSO algorithm are verified.

**KEY WORDS:** power system; adaptive focusing particle swarm optimization (AFPSO) algorithm; multi-objective reactive power optimization; voltage stability; active network loss; swarm intelligence

**摘要:** 自适应聚焦粒子群算法(adaptive focusing particle swarm optimization, AFPSO)是根据粒子群算法的全局搜索与局部搜索平衡特性,并予以改进得到的一种具有较好全局搜索能力和寻优速度的自适应群体智能优化算法。作者将此算法用于电力系统无功优化。该方法以最优控制原理为基础,引入了静态电压稳定性指标,建立了综合考虑系统有功网损最小、静态电压稳定裕度最大的多目标无功优化模型。

IEEE 30 节点系统仿真结果表明,AFPSO 算法在实现系统经济运行同时也增强了电网的电压稳定性,证明了 AFPSO 算法的有效性和优越性。

**关键词:** 电力系统; 自适应聚焦粒子群优化算法; 多目标无功优化; 电压稳定; 有功网损; 群体智能

## 0 引言

电力系统无功优化<sup>[1]</sup>主要研究在满足系统负荷需求及运行约束要求的条件下,使电网的某一指标或多个指标(如有功网损最小、电压质量最优、年支出费用最少)达到最优的无功功率分布。

数学上,无功优化是典型的非线性规划问题,具有非线性、小连续、不确定因素较多等特点。传统的数学规划方法主要有非线性规划法和线性规划法等<sup>[2]</sup>。常规算法求解无功优化问题的主要困难是离散变量的归整、多峰多极值问题。近年来基于群体智能的优化方法逐渐得到重视,如遗传算法(genetic algorithm, GA)、蚁群算法、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO),这些基于群体智能的优化方法具有并行处理的特征,易于实现,但存在计算速度慢,有时陷入局部最优解等缺点。

粒子群算法是美国 Kennedy 和 Eberhart 博士受鸟群觅食行为的启发,于 1995 年提出的一种生物进化算法<sup>[3]</sup>。与遗传算法<sup>[4-10]</sup>相比,PSO 算法的优势在于简单易行、收敛速度快、优化效率高<sup>[11]</sup>。目前 PSO 算法已在电力系统各种复杂优化问题中得以应用,取得了较好的效果<sup>[12-16]</sup>。

自适应聚焦粒子群算法(adaptive focusing

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60870004)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60870004).

particle swarm optimization, AFPSO)是在 PSO 算法的全局搜索与局部搜索平衡特性的基础上,改进得到的一种具有较好全局搜索能力和寻优速度的自适应群体智能优化算法。AFPSO 算法基于分工合作的思想,对性能较好的粒子赋予较大的惯性权值,让其主要负责更优区域的探测;而对性能较差的粒子赋予较小的惯性权值,让其负责较好区域的开发。粒子的加速系数根据惯性权值自适应调整。当搜索结果好于当前粒子个体极值时,保持该个体当前的速度继续向前搜索,使个体始终保持自己搜索过程中的极值位置,并以此为起点进行后续搜索,起到聚焦作用。AFPSO 算法还将 PSO 算法中的全局最优位置与个体最优位置分别用相关个体最优位置的加权平均形式代替,这增加了种群多样性,提高了搜索效率。

## 1 无功优化数学模型

在电网有功潮流调度已知的情况下,多目标无功优化数学模型是在满足系统运行约束和发电机组运行约束的条件下,以有功网损  $P_{\text{loss}}$  最小和静态电压稳定裕度  $V_{\text{stab}}$  最大为目标,其数学模型包括目标函数的选择和约束条件的约定。根据文献[17]可以采用常规收敛潮流雅可比矩阵的最小奇异值  $\delta_{\text{min}}$  来度量静态电压稳定这一目标。为简化计算,将最大化问题转化为最小化问题,则多目标无功优化的目标函数可表示为

$$\min f_1(x_1, x_2) = P_{\text{loss}} \quad (1)$$

$$\min f_2(x_1, x_2) = 1/\delta_{\text{min}} \quad (2)$$

目标函数中包含  $f_1(x_1, x_2)$  和  $f_2(x_1, x_2)$  2 个子目标,分别为系统有功网损和静态电压稳定裕度。其中有功网损是度量系统损失有功功率多少的指标,其单位量纲为 MW;而静态电压稳定裕度是一个相对指标,当用雅可比矩阵的最小奇异值度量时,没有量纲。在多目标无功优化模型中,由于子目标函数之间量纲不同,不能直接进行加权。为使不同子目标函数具有可比性,首先需要对目标函数进行归一化处理

$$f'_1(x_1, x_2) = P_{\text{loss}} / P_0$$

$$f'_2(x_1, x_2) = \delta_0 / \delta_{\text{min}}$$

其中  $P_0$ 、 $\delta_0$  分别为初始潮流的有功网损和雅可比矩阵的最小奇异值。采用加权的方法,将式(1)(2)的双目标优化模型转化成单目标优化模型

$$\min F(x_1, x_2) = \omega_1 f'_1(x_1, x_2) + \omega_2 f'_2(x_1, x_2)$$

其中  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  为权重,反映对电网运行经济性和电压

稳定性的偏好,也称偏好因子,且  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

功率约束方程,即潮流方程

$$\begin{cases} 0 = P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \\ \quad i \in N_i, i \neq s \\ 0 = Q_{Gi} - Q_{Ci} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), \\ \quad i \in N_{PQ} \end{cases}$$

变量约束方程为

$$\begin{cases} V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max}, & i \in N_B, V_G, V_L \in V_i \\ V_{Gi,\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi,\max}, & i \in N_G \\ Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max}, & i \in N_G \\ T_{k,\min} \leq T_k \leq T_{k,\max}, & k \in N_T \\ Q_{ci,\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci,\max}, & i \in N_c \\ S_l \in S_{l,\max}, & l \in N_l \end{cases}$$

式中:  $N_{PQ}$ 、 $N_G$ 、 $N_B$ 、 $N_T$  和  $N_C$  分别为 PQ 节点号集合、发电机节点号集合、总的节点号集合、变压器支路集合和补偿电容器节点集合;  $N_i$  为与节点  $i$  关联的节点号集合,包括节点  $i$  本身;  $S$  为平衡节点;  $P_{k\text{loss}}$  为支路  $k$  的有功功率损耗;  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  为节点导纳系数;  $P_i$  和  $Q_i$  分别为节点  $i$  的有功和无功注入;  $V_i$  为节点  $i$  的电压幅值;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间的电压角度差;  $V_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$  分别为节点  $i$  的有功、无功功率;  $S_l$  为支路功率;  $x_1 = [V_G, T_k, Q_C]$  为控制变量,分别指发电机机端电压、有载调压变压器的分接头和无功补偿容量;  $x_2 = [V_L, Q_G, P_{\text{ref}}]$  为状态变量,分别为负荷节点的电压、发电机的无功出力和平衡节点的有功出力。

## 2 改进粒子群优化算法

### 2.1 AFPSO 算法的基本原理

采用自适应参数策略或者提高平衡点<sup>[18]</sup>的质量与多样性都能够提高 PSO 算法的性能。当搜索结果好于当前粒子个体极值时,保持该个体当前的速度继续向前搜索,使个体始终保持搜索过程中的极值位置,并以此为起点进行后续搜索,可以有效提高 PSO 算法的性能。

本文提出的 AFPSO 算法从以上 3 个方面改进 PSO 算法。对性能较好的粒子采用较大的惯性权,让其主要负责更优区域的探测;而对性能较差的粒子则采用较小的惯性权,让其迅速收敛到较好的区域中进行细致的搜索。这种策略的基本依据是:在 PSO 算法中,非最优粒子会逐渐移向全局最优位置

$g_i$ , 并在其附近进行搜索, 因此全局最优粒子必须积极地探测新区域, 不断更新  $g_i$ , 以此带动其它粒子的搜索。如果最优粒子过早地收敛, 其它粒子就会迅速收敛到它的周围而导致早熟收敛。该策略的具体做法是: 将粒子按其个体最优位置从优到劣进行排序, 其中排在第  $i$  位粒子的惯性权值及相应加速系数

$$\omega_i = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min})(m-i)/(m-1) \quad (3)$$

$$c_{i1} = c_{i2} = (\omega_i + 1 + 2\sqrt{\omega_i})/2 \quad (4)$$

式中:  $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$  分别为预定义的最大与最小惯性权值;  $m$  为种群规模; 加速系数根据  $\omega_i$  自适应调整。该策略可以在每一步迭代中较好地平衡全局与局部搜索能力, 而不需要预先设定最大代数。

另外 PSO 算法中的平衡点要为粒子提供较好的搜索方向或搜索区域, 这要求平衡点或其所在区域总体上应优于粒子的当前位置。在早期收敛阶段, 各粒子的平衡点应该分布在一个较大的区域内, 使粒子具有较好的全局搜索能力; 而在后期阶段, 应使粒子的平衡点分布在一个较小的区域内, 使粒子进行细致的搜索。为进一步增加平衡点的多样性, 将 PSO 算法中的  $g_i$  替换为按个体最优位置排序, 最前面的  $s$  个粒子个体最优位置的加权平均

$$p_g = \sum_{j=1}^s \delta_j p_j \quad (5)$$

$$\delta_j = \frac{1}{f_j} / \sum_{u=1}^s \frac{1}{f_u} \quad (6)$$

式中:  $\delta_j$  为加权系数;  $f_j$  为个体最优位置  $p_j$  对应的适应值(假设为最小化问题且  $f_j > 0$ )。而将  $p_i$  替换为排序后  $p_{i-1}$  与  $p_i$  的加权平均

$$p_a = (f_i p_{i-1} + f_{i-1} p_i) / (f_i + f_{i-1}), \quad i \neq 1 \quad (7)$$

由于  $p_a$  与  $p_g$  利用了更多的个体最优位置信息, 其中任何一个个体最优位置发生更新都会引起平衡点的更新, 使平衡点<sup>[18]</sup>更新更加频繁, 提高了算法的搜索效率。

综上所述, AFPSO 算法的粒子速度和位置更新表达式可表示为

$$v_i(n) = \begin{cases} \omega_i v_i(n-1) + c_{i1} r_1 [p_a(n-1) - x_i(n-1)] + \\ \quad c_{i2} r_2 [p_g(n-1) - x_i(n-1)], & f_i(n-1) \geq f_i(n-2) \\ v_i(n-1), & f_i(n-1) < f_i(n-2) \end{cases} \quad (8)$$

$$x_i(n) = \begin{cases} x_i(n-1), & f_i(n) \geq f_i(n-1) \\ v_i(n) + x_i(n-1), & f_i(n) < f_i(n-1) \end{cases} \quad (9)$$

AFPSO 算法流程如下:

- 1) 令  $t=0$ , 初始化种群中粒子的位置与速度, 设最大速度为  $v_{\max}$ , 位置边界为  $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ ;
- 2) 计算每个粒子的适应值, 并据此更新粒子的个体最优位置及它们对应的适应值;
- 3) 将粒子按个体最优位置从优到劣进行排序;
- 4) 根据式(14)(15)计算每个粒子的惯性权与相应的加速系数;
- 5) 对每个粒子, 利用式(16)(18)计算  $p_a$  与  $p_g$ ;
- 6) 根据式(19)(20)更新粒子的速度与位置;
- 7)  $t=t+1$ , 如果满足结束条件, 则输出结果; 否则, 转步骤 2)。

## 2.2 AFPSO 算法实现和优化流程

设粒子群的个数为  $n$ , 粒子群坐标变量的维数由发电机控制的变量个数(记为  $M$ )、变压器分接头控制变量个数(记为  $K$ )和无功补偿装置控制的变量个数(记为  $H$ )<sup>3</sup> 部分构成。构成了一个  $n(M+K+N)$  维的初始矩阵, 矩阵的元素分别对应上述模型中  $V_G$ 、 $T_k$ 、 $Q_C$  的值。3 个部分的控制变量表征粒子群移动寻优时的空间位置, 即粒子群在  $(M+K+N)$  维空间按照上述算法流程进行寻优。

实际电力系统中既有连续变量, 也有离散整数控制变量。在 AFPSO 算法中对节点电压进行连续处理, 对变压器分接头和无功补偿装置取一定的步长进行离散处理, 即对 IEEE 30 节点系统, 使其发电机的节点电压可连续变化, 补偿电容的调节步长为 0.01, 变压器的变比调节步长为 0.025。变压器的初始变比为 1.0, 发电机的初始电压为 1.0。

## 3 仿真分析

为验证 AFPSO 算法的优化效果, 在 P4 2.1G 的 PC 机上采用 Matlab 2007 对 IEEE 30 节点系统进行无功优化计算。IEEE 30 节点系统中有 41 条支路、6 个发电机节点和 22 个负荷节点。节点 1 为平衡节点, 其余为 PV 节点, 系统中其它节点为 PQ 节点; 包括 6 台发电机(节点 1、2、5、8、11、13)、3 台并联电容器(3、10、24)、4 台可调变压器支路(6-9, 6-10, 4-12, 27-28)。系统总负荷  $P_{\text{load}}=2.843$ ,  $Q_{\text{load}}=1.262$ , 标么值基准功率是 100 MVA, 系统参数见参考文献[19], 各变量的上下限值见参考文献[20]。

初始条件下, 设置发电机的机端电压和变压器的变比均为 1.0, 通过潮流计算, 得到  $\Sigma P_G=2.8939$ ,  $\Sigma Q_G=0.9802$ ,  $P_{\text{loss}}=0.059711$ ,  $\delta_{\min}=0.2153$ 。目标函数中偏好因子的选取参考文献[21]中仿真计算的给

定值,  $\omega_1$  取 0.7,  $\omega_2$  取 0.3。AFPSO 算法种群数取为 36, 最大迭代次数  $G_{max}=200$ , 精度为  $10^{-6}$ , 独立运行 10 次, 取最优平均值分别与全面学习的粒子群算法(CLPSO)<sup>[22]</sup>、带收敛因子的粒子群算法(PSO-cf)<sup>[23]</sup>、惯性权值粒子群算法(PSO- $\omega$ )<sup>[12]</sup>进行比较。表 1(标么值)给出了在相同基本条件下, 各优化算法得到的无功优化结果。

表 1 N=36 和 G=200 时不同方法优化结果比较  
Tab. 1 Comparison of optimal-results for different methods when N=36 and G=200

算法	目标函数		目标函数		t/s
	最小值	最大值	平均值	标准偏差	
AFPSO	0.328 4	0.378 0	0.355 6	0.016 7	284.685 9
PSO-cf	0.371 3	0.435 7	0.393 6	0.021 7	367.893 8
PSO- $\omega$	0.362 7	0.444 1	0.399 7	0.028 8	283.434 4
CLPSO	0.336 0	0.399 8	0.371 3	0.021 6	210.126 6

由表 1 可以看出, 本文提出的 AFPSO 算法相比其它 3 种优化方法在目标函数的最大值、最小值、平均值和标准偏差 4 个方面都取得了更小的目标函数值, 平均每次运行时间  $t=299.910 9$  s, 只比 CLPSO 略慢, 充分显示了本算法对无功优化问题的有效性、可行性、优越性。

图 1 为 4 种优化算法各运行 10 次后得到的无功优化最优目标函数收敛特征曲线。从图 1 可以看出, AFPSO 算法的优化曲线在 50 代以前下降速度很快, 显示了该算法寻优机制的有效性和优越性; 其在迭代 100 次左右时已经能够非常接近最优解, 所以本文提出的 AFPSO 算法最大迭代次数设置在 110 次就已经足够, 而其它 3 种算法在迭代到 200 次还没达到最优解, 且 AFPSO 的计算精度明显优于其它 3 种算法, 可见本文提出算法在算法收敛性和计算精度两方面都较其它 3 种算法更理想。

表 2 是 4 种算法求解无功优化问题得到的各控制变量最优值。从表中可以看出, AFPSO 算法优化后各节点电压相差小且没有处于其上下限值, 避免

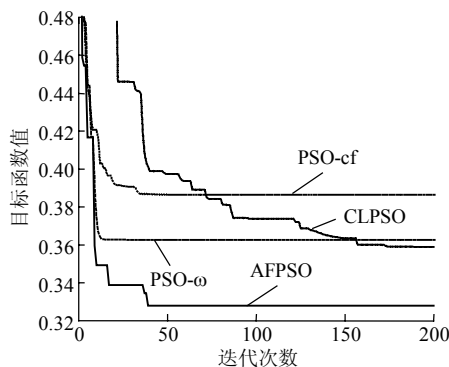


图 1 4 种算法的最优值曲线  
Fig. 1 Optimization values curve of four algorithms

表 2 不同方法控制变量优化后的值  
Tab. 2 The values of control variables after optimization under different methods

控制变量	节点号	CLPSO	PSO-cf	PSO- $\omega$	AFPSO
$Q_3$	3	0.1	-0.2	0.12	0.024 616
$Q_{10}$	10	-0.03	0	0.23	0.108 507
$Q_{24}$	24	0.12	0.11	0.17	0.065 815
$T_1$	6~9	1.025	0.9	0.95	0.901 1
$T_2$	6~10	0.9	1	1.0	1.110 3
$T_3$	4~12	0.925	0.925	1.025	0.949 0
$T_4$	27~28	0.925	0.95	0.925	0.914 7
$V_1$	1	1.058 1	1.048 7	1.1	1.073 1
$V_2$	2	1.037 7	1.033 1	1.1	1.067 0
$V_5$	5	1.020 1	0.975 7	1.041 2	1.074 3
$V_8$	8	1.032 2	1.004 3	1.048 6	1.082 2
$V_{11}$	11	0.996 0	1.062 0	0.944 5	1.070 4
$V_{13}$	13	1.058 4	1.1	1.097 4	1.067 3

了无功电源的出力接近极限, 减小了无功优化目标函数与系统电压安全之间的冲突。

表 3 为有功网损优化结果的统计值, 采用 AFPSO、PSO-cf、PSO- $\omega$ 、CLPSO 进行无功优化后有功网损分别下降了 11.939 2%、1.785 3%、2.237 4%、7.055 7%。AFPSO 算法相比其它 3 种算法能求得更小的平均有功网损和有功网损标准偏差值, 这说明 AFPSO 算法能计算得到较小较稳定的有功网损, 使系统处于更加经济的运行状态。

表 3 IEEE 30 节点系统有功网损统计结果  
Tab. 3 Statistical values of the power losses for IEEE 30 buses system

算法	$P_{loss}$ 最小值	$P_{loss}$ 最大值	$P_{loss}$ 平均值	$P_{loss}$ 标准偏差
AFPSO	0.049 795	0.055 115	0.052 582	0.158 4
PSO-cf	0.053 108	0.061 833	0.058 645	0.250 4
PSO- $\omega$	0.052 104	0.069 643	0.058 375	0.527 8
CLPSO	0.049 141	0.065 601	0.055 498	0.446 7

表 4 为最小奇异值统计值, 采用 AFPSO、PSO-cf、PSO- $\omega$ 、CLPSO 进行无功优化后电压稳定裕度分别提高了 19.507 7%、12.308 4%、10.636 3%、15.838 4%, AFPSO 算法求得了比其它 3 种算法更大的平均奇异值和更小的标准偏差, 并能够得到较大较稳定的雅可比矩阵最小奇异值, 使系统获得更大的电压稳定裕度。

图 2 为优化过程中目标函数(网损和静态电压

表 4 IEEE 30 节点系统最小奇异值统计结果  
Tab. 4 Statistical results of the minimal singular values for IEEE 30 buses system

算法	$\delta_{min}$ 最大值	$\delta_{min}$ 最小值	$\delta_{min}$ 平均值	$\delta_{min}$ 标准偏差
AFPSO	0.261 7	0.252 3	0.257 3	0.002 6
PSO-cf	0.265 6	0.217 2	0.241 8	0.014 2
PSO- $\omega$	0.264 9	0.223 2	0.238 2	0.013 4
CLPSO	0.259 9	0.237 8	0.249 4	0.008 0

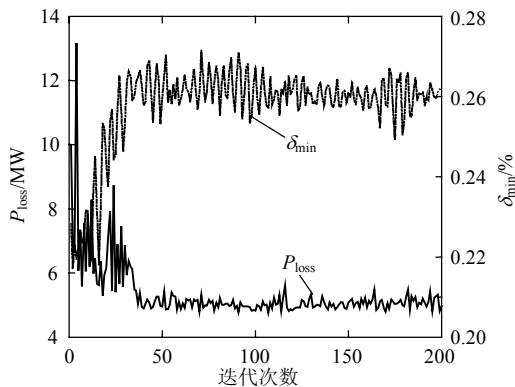


图2 IEEE 30节点系统  $P_{\text{loss}}$  和  $\delta_{\text{min}}$  迭代曲线  
Fig. 2  $P_{\text{loss}}$  and  $\delta_{\text{min}}$  alternative curve of IEEE 30 buses system

稳定裕度)的变化。由图可见,两者的变化方向相反,但趋势基本一致,随迭代进行,前者逐渐变小,后者增大;AFPSO 迭代早期两目标函数值波动幅度较大是因为目标函数间存在冲突,但总的方向是使各个目标函数值变得更优;迭代中后期,波动趋于稳定,采用自适应的参数策略和提高平衡点  $p$  的质量与多样性使搜索值跳出局部最优;70次以后目标函数值波动基本达到稳定。

#### 4 结论

与文中其它3种算法相比,AFPSO在算法计算精度、收敛稳定性、寻优时间等方面都具有普遍优势,其在实现系统经济运行的同时也增强了电网的电压稳定。AFPSO算法作为一种改进算法,对求解电力系统具有高度复杂约束条件的组合优化问题将会有重要的启发意义。

#### 参考文献

[1] 许文超,郭伟.电力系统无功优化的模型及算法综述[J].电力系统及其自动化学报,2003,15(1):100-104.  
Xu Wenchao, Guo Wei. Summarize of reactive power optimization model and algorithm in electric power system[J]. Proceedings of The CSU-EPSSA, 2003, 15(1): 100-104(in Chinese).

[2] Momoh J A, Adapa R, El-Hawary M E. A review of selected optimal power flow literature to 1993 (I) Nonlinear and quadratic programming approaches[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 96-111.

[3] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. IEEE Int Conf on Neural Networks, Perth, Australia, 1995.

[4] 周双喜,杨彬.基于遗传算法的无功优化新算法[J].中国电力,1995,9(2):8-11.  
Zhou Shuangxi, Yang Bin. A new reactive optimization method based on genetic algorithm[J]. Electric Power, 1995, 9(2): 8-11(in Chinese).

[5] 谭涛亮,张尧.基于遗传禁忌混合算法的电力系统无功优化[J].电网技术,2004,28(11):57-61.  
Tan Taoliang, Zhang Yao. Reactive power optimization based on genetic/Tabu search hybrid algorithm[J]. Power System Technology,

2004, 28(11): 57-61 (in Chinese).

[6] 向铁元,周青山,李富鹏,等.小生境遗传算法在无功优化中的应用研究[J].中国电机工程学报,2005,25(17):49-51.  
Xiang Tiejuan, Zhou Qingshan, Li Fupeng, et al. Research on niche genetic algorithm for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 49-51(in Chinese).

[7] 刘方,颜伟,David C Y,等.基于遗传算法和内点法的无功优化混合策略[J].中国电机工程学报,2005,25(15):67-72.  
Liu Fang, Yan Wei, David C Y, et al. A hybrid strategy based on GA and IPM for optimal reactive power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 67-72(in Chinese).

[8] 王淳,程浩忠.基于模拟植物生长算法的电力系统无功优化[J].电网技术,2006,30(21):38-41.  
Wang Chun, Cheng Haozhong. Reactive power optimization based on plant growth simulation algorithm[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 38-41(in Chinese).

[9] 刘红文,张葛祥.基于改进量子遗传算法的电力系统无功优化[J].电网技术,2008,12(10):35-50.  
Liu Hongwen, Zhang Gexiang. A reactive power optimization method based on improved quantum-inspired genetic algorithm [J]. Power System Technology, 2008, 12(10): 35-50 (in Chinese).

[10] 李惠玲,盛万兴,张学仁,等.改进小生境遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J].电网技术,2008,32(9):29-34.  
Li Huiling, Sheng Wanxing, Zhang Xueren, et al. Application of improved niche genetic algorithm in reactive power optimization [J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 29-34 (in Chinese).

[11] 袁晓辉,王乘,张勇传,等.粒子群优化算法在电力系统中的应用[J].电网技术,2004,28(19):14-19.  
Yuan Xiaohui, Wang Cheng, Zhang Yongchuan, et al. A survey on application of particle swarm optimization to electric power systems [J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 14-19(in Chinese).

[12] Shi Y, Eberhart R C. Empirical study of particle swarm optimization[C]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, 1999.

[13] Abido M A. Optimal power flow using particle swarm optimization [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2002, 24(7): 563-571.

[14] 李宏仲,金义雄,程浩忠,等.基于改进粒子群优化算法并计及静态电压稳定性的电力系统无功规划[J].电网技术,2005,22(14):50-55.  
Li Hongzhong, Jin Yixiong, Cheng Haozhong, et al. Reactive power planning based on improved particle swarm optimization with static voltage stability [J]. Power System Technology, 2005, 22(14): 50-55 (in Chinese).

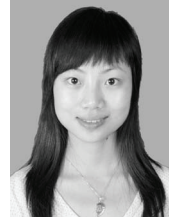
[15] 赵波,曹一家.电力系统无功优化的多智能体粒子群优化算法[J].中国电机工程学报,2005,25(5):2-7.  
Zhao Bo, Cao Yijia. A multi-agent particle swarm optimization algorithm for power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 2-7(in Chinese).

[16] 张文,刘玉田.自适应粒子群优化算法及其在无功优化中的应用[J].电网技术,2006,30(8):19-24.  
Zhang Wen, Liu Yutian. Adaptive particle swarm optimization and its application in reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 19-24(in Chinese).

[17] 冯治鸿,刘取,倪以信,等.多级电力系统电压稳定性分析—奇异值分解法[J].中国电机工程学报,1992,12(3):10-18.  
Feng Zhihong, Liu Qu, Ni Yixin, et al. Analysis steady-state voltage stability in multimachine power system by singular value decomposition method[J]. Proceedings of the CSEE, 1992, 12(3):

- 10-18(in Chinese).
- [18] 林川, 冯全源. 一种新的自适应粒子群优化算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(7): 181-183.  
Lin Chuan, Feng Quanyuan. New adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering, 2008, 34(7): 181-183(in Chinese).
- [19] Wu Q H, Cao Y J, Wen J Y. Optimal reactive power dispatch using an adaptive genetic algorithm[J]. Int J Electr Power & Energy Syst, 1998, 20(8): 563-569.
- [20] 刘述奎, 陈维荣, 李奇, 等. 基于随机聚焦粒子群算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2008, 32(S2): 8-11.  
Liu Shukui, Chen Weirong, Li Qi, et al. Reactive power optimization in power system based on stochastic focusing particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 8-11(in Chinese).
- [21] 娄素华, 吴耀武, 熊信银, 等. 考虑静态电压稳定裕度的多目标电网无功优化研究[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 41-44.  
Lou Suhua, Wu Yaowu, Xiong Xinyin, et al. Research of multiobjective reactive power optimization with static voltage stability consideration[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 41-44(in Chinese).
- [22] Liang J J, Qin A K, Suganthan P N, et al. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal

- functions[J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 67-82.
- [23] Eberhart R C, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization[C]. Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, IEEE Service Center, California, USA, 2000.



刘述奎

收稿日期: 2008-12-01。

作者简介:

刘述奎(1984—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化、进化算法等, E-mail: liushukui@163.com;

陈维荣(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信息处理、智能监测技术等;

李奇(1984—), 男, 博士研究生, 研究方向为群体智能算法、电力系统稳定控制等;

戴朝华(1973—), 男, 博士研究生, 研究方向为计算智能、多目标优化等;

段涛(1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化、进化算法等。

(责任编辑 王晔)

## (上接第41页 continued from page 41)

- Zhao Yuan, Zhou Jiaqi, Zhou Niancheng, et al. An analytical approach for bulk power systems reliability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 19-25(in Chinese).
- [4] 丁明, 张瑞华. 发输电组合系统可靠性评估的蒙特卡罗模拟[J]. 电网技术, 2000, 24(3): 9-12.  
Ding Ming, Zhang Ruihua. Monte-Carlo simulation of reliability evaluation for composite generation and transmission system [J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 9-12(in Chinese).
- [5] 王海超, 鲁宗相, 周双喜. 风电场发电容量可信度研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 103-106.  
Wang Haichao, Lu Zhongxiang, Zhou Shuangxi. Research on the capacity of wind energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 103-106(in Chinese).
- [6] 吴义纯, 丁明, 李生虎. 风电场对发输电系统可靠性影响的评估[J]. 电工技术学报, 2004, 19(11): 72-76.  
Wu Yichun, Ding Ming, Li Shenghu. Reliability assessment of wind farms in generation and transmission systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(11): 72-76(in Chinese).
- [7] 刘威, 赵渊, 周家启, 等. 计及风电场的发输电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 69-74.  
Liu Wei, Zhao Yuan, Zhou Jiaqi, et al. Reliability assessment of power generation transmission and distribution systems containing wind farms[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 69-74(in Chinese).
- [8] Wang P, Billinton R. Time-sequential simulation technique for rural distribution system reliability cost/worth evaluation including wind generation as alternative supply[J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(4): 355-360.
- [9] Bowden G J, Barker P R, Shestopal V O, et al. The Weibull distribution function and wind power statistics[J]. Wind Engineering, 1983(7): 85-98.
- [10] Justus C G, Hargraves W R, Mikhail A, et al. Methods for estimating wind speed frequency distributions[J]. Journal of Applied Meteorology, 1978, 17(3): 350-353.

- [11] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民, 等. 风电场的发电可靠性模型及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-28.  
Chen Shuyong, Dai Huizhu, Bai Xiaomin, et al. Reliability model of wind power plants and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 26-28(in Chinese).
- [12] 陈树勇. 大型并网风力发电场规划方法研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 1998.
- [13] 孙建锋. 风电场建模和仿真研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [14] David A S. Wind turbine technology-fundamental concepts of wind turbine engineering[M]. New York: ASME, 1994: 313-315.
- [15] 宋云亭, 郭永基, 程林. 大规模发输电系统充裕度评估的蒙特卡罗仿真[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 24-28.  
Song Yunting, Guo Yongji, Cheng Lin. Monte-Carlo simulation to adequacy evaluation for large-scale power generation and transmission system[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 24-28(in Chinese).
- [16] 吴培华. 风电场宏观和微观选址技术分析[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(15): 154-155.  
Wu Peihua. Analysis on the macro-and-micro-sitting technology of wind-electric field[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2006, 16(15): 154-155(in Chinese).



张彦

收稿日期: 2009-02-16。

作者简介:

张彦(1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统分析运行与控制、风力发电, E-mail: zs\_cl@163.com;

李庚银(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电能质量、新型输配电技术、电力市场等方面的研究, E-mail: ligy@ncepu.edu.cn;

周明(1967—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力市场、电能质量、电力系统规划与可靠性等, E-mail: zhouting@ncepu.edu.cn.

(责任编辑 王晔)