

# 基于随机微粒群算法的电力系统无功优化

张登科<sup>1,2</sup>, 黄挚雄<sup>2</sup>

(1. 湖南省送变电建设公司调试所, 湖南 长沙 410007; 2. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 介绍保证以概率1全局收敛的随机微粒群算法, 针对随机微粒群算法难以在有限进化代数搜索到全局最优解的问题, 介绍一种改进的随机微粒群算法, 这种算法对随机微粒群算法停止进化的微粒采用模拟退火方法生成, 使得搜索更为有效。提出将两种算法分别应用于电力系统无功优化, 通过对 IEEE14 节点系统的仿真计算, 并与遗传算法、标准微粒群算法相比较, 结果表明这两种算法取得了更好的优化效果, 改进的随机微粒群算法更具有实用意义。

**关键词:** 电力系统; 无功优化; 随机微粒群算法; 模拟退火

## Reactive power optimization based on stochastic particle swarm optimization

ZHANG Deng-ke<sup>1,2</sup>, HUANG Zhi-xiong<sup>2</sup>

(1. Hunan Electric Power Transmission and Substation Construction Company, Changsha 410007, China; 2. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In this paper, Stochastic Particle Swarm Optimization (SPSO) algorithm is introduced, which can guarantee the convergence of the global optimization solution with probability one. In respect of the problem that SPSO can not retrieve the global optimization solution in limited iteration times, an improved SPSO (SASPSO) is pointed out, which makes the static particles in the SPSO regenerate by Simulated Annealing (SA) and which devotes to renew the search. Through the application of SPSO and SASPSO to reactive power optimization in power system, and the comparison of the simulations of SPSO, SASPSO, Genetic Algorithm (GA) and Standard Particle Swarm Optimization (BPSO) in IEEE14-bus system, it is proved that SASPSO is much more practical.

**Key words:** power system; reactive power optimization; stochastic particle swarm optimization; simulated annealing

中图分类号: TM714.3; TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)12-0035-04

## 0 引言

电力系统无功优化是提高电压质量、降低系统运行网损、保证系统安全经济运行的有效手段。从本质上讲, 无功优化问题是具有大量局部极小值的多变量、多约束、非线性复杂优化问题, 从而优化过程十分复杂, 计算规模大, 因此在实时环境中动态地进行大规模电网优化控制异常困难。微粒群 (PSO) 算法是一种基于群体智能的启发式算法。它具有简单易行、收敛速度快、优化效率高、对种群大小不十分敏感、鲁棒性好等特点, 能方便地被用于求解带离散变量的非线性、不连续、多约束、多变量的复杂优化问题中<sup>[1-3]</sup>。在电力系统研究中, PSO 已被用于解决无功和电压控制<sup>[4]</sup>、最优潮流<sup>[5]</sup>、补偿电容器组配置<sup>[6]</sup>等优化问题中, 取得了较好的效

果。

但是标准微粒群 (BPSO) 算法在收敛的情况下, 由于所有的微粒都向最优解的方向“飞行”, 所有的微粒趋向同一, 失去了微粒间解的多样性, 使得后期的收敛速度明显变慢, 同时算法收敛到一定精度时, 算法无法继续优化, 算法所能达到的精度较低<sup>[7]</sup>。在收敛性方面, 随机微粒群 (SPSO) 算法与 BPSO 算法具有几乎完全相同的性质, 即在参数的一定范围内均能保证微粒收敛于种群历史最优位置; 但是对于收敛的全局最优性, BPSO 算法无法保证, 而 SPSO 算法当进化代数  $t \rightarrow \infty$  时能保证以概率1收敛于全局最优位置<sup>[8]</sup>。但是在实际应用中, 改善 SPSO 停止进化微粒的产生方式, 达到在有限进化代数内搜索到全局最优解, 是必须解决的问题。本文将介绍随机微粒群算法及采用模拟退火方法对

其进行改进的算法(SASPSO),然后分别应用于电力系统无功优化,并用IEEE14节点系统作为实验系统进行仿真计算,并且与GA和BPSO算法优化效果进行比较,表明这两种算法具有更好的性能。

## 1 无功优化数学模型

### 1.1 目标函数

无功优化通常是采取调整发电机端电压、可调变压器变比和补偿电容器容量等控制变量,来降低网损并保证电压在规定的范围之内<sup>[9]</sup>。本文以网损最小为目标,由于发电机端电压、可调变压器变比和补偿电容器容量是控制变量,其约束可以自身得到约束。PQ节点电压和发电机无功功率是状态变量,写成罚函数的形式,因而采用扩展的目标函数为

$$\min F = P_L + \lambda_1 \sum_{i \in N_D} (V_i - V_{i,\text{lim}})^2 + \lambda_2 \sum_{i \in N_G} (Q_{Gi} - Q_{Gi,\text{lim}})^2 \quad (1)$$

$$P_L = \sum_{k \in N_E} P_{\text{kloss}} = \sum_{k \in N_E} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \delta_{ij}) \quad (2)$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2$ 分别为PQ节点电压和发电机无功功率越界惩罚系数; $N_D, N_G, N_E$ 分别为PQ节点、发电机节点和支路号的集合; $V_{i,\text{lim}}$ 和 $Q_{Gi,\text{lim}}$ 可表示为

$$V_{i,\text{lim}} = \begin{cases} V_{i,\text{max}} & V_i > V_{i,\text{max}} \\ V_{i,\text{min}} & V_i < V_{i,\text{min}} \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_{Gi,\text{lim}} = \begin{cases} Q_{Gi,\text{max}} & Q_{Gi} > Q_{Gi,\text{max}} \\ Q_{Gi,\text{min}} & Q_{Gi} < Q_{Gi,\text{min}} \end{cases} \quad (4)$$

### 1.2 功率约束方程

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Di} = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{Gi}, Q_{Gi}$ 分别为发电机 $i$ 的有功功率和无功功率; $P_{Di}, Q_{Di}$ 分别为PQ节点 $i$ 的有功功率和无功功率; $Q_{Ci}$ 为补偿电容器的无功补偿容量; $N_i, G_{ij}, B_{ij}, \delta_{ij}$ 分别为与节点 $i$ 直接相连节点的集合、节点 $i, j$ 之间的电导、电纳、电压相角差。

### 1.3 变量约束

控制变量的约束为

$$\begin{cases} V_{Gi,\text{min}} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi,\text{max}} \\ T_{i,\text{min}} \leq T_i \leq T_{i,\text{max}} \\ Q_{Ci,\text{min}} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci,\text{max}} \end{cases} \quad (6)$$

状态变量的约束为

$$\begin{cases} Q_{Gi,\text{min}} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\text{max}} \\ V_{Di,\text{min}} \leq V_{Di} \leq V_{Di,\text{max}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $V_{Gi}, T_i, Q_{Ci}$ 分别为发电机端电压、可调变压器变比、补偿电容器补偿容量; $Q_{Gi}, V_{Di}$ 分别为发电机无功功率、PQ节点电压幅值。

## 2 SPSO 算法及其改进

### 2.1 BPSO 算法

假设在 $n$ 维搜索空间中, $m$ 个微粒组成一个群,第 $i$ 个微粒在 $n$ 维搜索空间中位置和飞翔速度表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T, v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})^T, i = 1, 2, \dots, m$ ,每个微粒的位置代表了待优化问题的一个可能解,它在空间中飞翔的轨迹代表搜索的过程。选取待优化问题的目标函数,将 $x_i$ 代入目标函数进行计算,根据目标函数值的大小评价微粒的优劣。记第 $i$ 个微粒迄今为止搜索到的最优位置为 $p_i$ ,称为个体极值,整个微粒群迄今为止搜索到的最优位置为 $p_g$ ,称为全局极值。BPSO算法各微粒根据如下公式进行迭代,更新自己的速度和位置

$$v_{id}^{(t+1)} = \omega v_{id}^{(t)} + c_1 r_1^{(t)} (p_{id}^{(t)} - x_{id}^{(t)}) + c_2 r_2^{(t)} (p_{gd}^{(t)} - x_{id}^{(t)}) \quad (8)$$

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

式中: $d$ 表示微粒第 $d$ 个分量, $d = 1, 2, \dots, n$ ;  $\omega$ 为惯性权重,通常设定为随着进化而线性减少,如式(10); $c_1$ 和 $c_2$ 为加速常数; $r_1$ 和 $r_2$ 是 $[0, 1]$ 之间的随机数;迭代终止条件一般选为最大迭代次数或搜索到的最优解的目标函数值小于某一预定值。

$$\omega = \omega_{\text{max}} - \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}}{\text{iter}_{\text{max}}} \times \text{iter} \quad (10)$$

式中: $\omega_{\text{max}}, \omega_{\text{min}}, \text{iter}_{\text{max}}, \text{iter}$ 分别为 $\omega$ 起始值和终止值、最大迭代次数、当前迭代次数。

### 2.2 SPSO 算法

由式(8),(9)描述的BPSO算法中,当 $\omega = 0$ 时,微粒的速度只取决于微粒的当前位置 $x_i^{(t)}$ 、微粒个体极值位置 $p_i^{(t)}$ 、种群全局极值位置 $p_g^{(t)}$ ,速度本身无记忆性。这样,对于位于全局极值的微粒将保持静止,而其它微粒则趋向它的个体极值位置 $p_i$ 和种群全局极值位置 $p_g$ 的加权中心,微粒群将收缩到当前的全局极值位置,更像一个局部算法;当 $\omega \neq 0$ 时,微粒具有了扩展搜索空间的趋势,即具

有一定的全局搜索能力。 $\omega$  越大全局搜索能力越强。当  $\omega = 0$  时, 式(8)、(9)描述的进化方程为

$$x_{id}^{(t+1)} = x_{id}^{(t)} + c_1 r_1^{(t)} (p_{id}^{(t)} - x_{id}^{(t)}) + c_2 c_2^{(t)} (p_{gd}^{(t)} - x_{id}^{(t)}) \quad (11)$$

与 BPSO 算法相比, 式(11)描述的进化方程全局搜索能力减弱, 而局部搜索能力加强。同时, 当  $x_j^{(t)} = p_j^{(t)} = p_g^{(t)}$  时, 第  $j$  个微粒将停止进化。为了改善式(11)的全局搜索能力, 保留  $p_g^{(t)}$  作为种群的全局极值位置, 而在搜索空间重新随机产生微粒  $j$  的位置  $x_j^{(t+1)}$ , 其它微粒  $i$  以式(11)产生  $x_i^{(t+1)}$  ( $i \neq j$ ), 则

$$p_j^{(t+1)} = x_j^{(t+1)} \quad (12)$$

$$P_i^{(t+1)} = \begin{cases} p_i^{(t)} & f(p_i^{(t)}) \leq f(x_i^{(t+1)}) \\ x_i^{(t+1)} & f(p_i^{(t)}) > f(x_i^{(t+1)}) \end{cases} \quad (13)$$

$$p_g' = \arg \min \{f(p_i^{(t+1)}), i = 1, 2, \dots, m\} \quad (14)$$

$$p_g^{(t+1)} = \arg \min \{f(p_g'), f(p_g^{(t)})\} \quad (15)$$

若  $p_g^{(t+1)} = p_j^{(t+1)}$ , 则随机产生的微粒  $j$  处于种群全局极值位置, 无法按式(11)进化, 继续在搜索空间随机产生, 其它微粒在更新  $p_g, p_i$  后按式(11)进化; 若  $p_g^{(t+1)} \neq p_j^{(t+1)}$ , 且  $p_g^{(t+1)} = p_g^{(t)}$ , 则所有微粒均按式(11)进化; 若  $p_g^{(t+1)} \neq p_j^{(t+1)}$ , 且  $p_g^{(t+1)} \neq p_g^{(t)}$ , 则存在  $k \neq j$ , 使得  $x_k^{(t+1)} = p_k^{(t+1)} = p_g^{(t+1)}$ , 微粒  $k$  停止进化, 在搜索空间中重新随机产生, 其余微粒在更新  $p_g, p_i$  后按式(11)进化。这样在进化的某些代, 至少有一个微粒  $j$  满足  $x_j^{(t)} = p_j^{(t)} = p_g^{(t)}$ , 也即至少有一个微粒需要在搜索空间中重新随机产生, 这样就势必增强了全局搜索能力。为了与标准 PSO 算法相区别, 上述算法被称为随机 PSO (SPSO) 算法<sup>[10]</sup>。

### 2.3 改进的 SPSO 算法 (SASPSO)

采用模拟退火方法对 SPSO 算法停止进化的微粒重新生成, 可以使生成的微粒以较大概率位于最优点附近, 提高搜索的有效性, 由于模拟退火方法本身具有很好的全局收敛性, 因而不会对 SPSO 算法的全局收敛性有负面的影响。该方法可描述为: 以当前代历史最好位置  $p_g^{(t)}$  为初始状态, 即  $x_j^{(t)} = p_g^{(t)}$ , 并设置初始温度和终止温度  $t_0, t_f$ , 采

用下式产生新的状态

$$X_j^{(t+1)} = x_j^{(t)} + \eta \xi \quad (16)$$

其中:  $\eta$  为扰动幅值参数,  $\xi$  为随机变量, 处理越限变量后, 按下式确定下一状态, 计算

$$f_j' = f(X_j^{(t+1)}), f_j = f(x_j^{(t)}), \Delta = f_j' - f_j,$$

$$x_j^{(t+1)} = \begin{cases} X_j^{(t+1)}, & \min\{1, e^{-\Delta/t_k}\} \geq \gamma_j \\ x_j^{(t)}, & \text{其它} \end{cases} \quad (17)$$

其中:  $\gamma_j \in [0, 1]$  均匀分布的随机变量

$$t_{k+1} = \lambda t_k, \quad 0 < \lambda < 1 \quad (18)$$

## 3 算例分析

为了验证 SPSO 及 SASPSO 的优化效果, 采用 Matlab 7.0 语言编写程序, 对 IEEE14 节点系统进行了无功优化计算。该系统中有 20 条支路, 包含 5 个发电机节点, 3 台变压器, 1 台并联电容器。5 个发电机节点为 1、2、3、6、8, 节点 1 作为平衡节点和其余为 PV 节点, 其它节点为 PQ 节点。节点电压  $V_i$  的范围为  $[0.95 \sim 1.1]$ , 可连续变化; 可调变压器变比  $T_k$  的变化范围为  $[0.90 \sim 1.1]$ , 调节步长为 2.5%; 补偿电容器  $Q_c$  的上限为 0.5, 调节步长为 0.01。系统初始的有功网损为 0.1349。在 BPSO、SPSO 和 MSPSO 中, 对离散变量  $T_k$  和  $Q_c$  作归整处理<sup>[11]</sup>; 惩罚系数  $\lambda_1 = 10, \lambda_2 = 5$ ; 每迭代一次进行种群规模次牛顿法潮流计算。BPSO 和 SPSO 的参数设置为: 群体规模 20,  $\omega$  随进化线性减小,  $\omega_{\max} = 0.90, \omega_{\min} = 0.1, iter_{\max} = 100, c_1 = c_2 = 2.05$ , 根据收敛性理论, 当  $0 < c_1 + c_2 < 2$  时, SPSO 算法的进化方程线性渐进收敛<sup>[6]</sup>, 可设 SPSO 和 SASPSO 的  $c_1 = c_2 = 0.95$ , 在 SPSO 和 SASPSO 中, 对每代最优微粒随机产生和模拟退火产生 (采用式 16, 17, 18 产生新的状态), 并且对产生的微粒按正常方式更新个体最优位置。对于 SASPSO, 其模拟退火部分设置为:  $t_0 = 1000, t_f = 0.1, \lambda = 0.8, \eta = [7.5, 25, 4]$  分别表示发电机端电压, 补偿电容器和变压器变比的扰动幅值,  $\xi = [\xi_1, \xi_2, \xi_3] \in [0, 1]$  分别为发电机, 补偿电容器和变压器的数量维数均匀分布的随机行向量。微粒速度  $v_i$  受  $v_{i, \max}$  限制,  $v_{i, \max}$  固定为每维变量变化范围的 1/2, 微粒位置受控制变量边界限制, 若微粒更新后的速度或位置越出边界, 则置边

界值。以最大迭代次数为终止条件。

BPSO、SPSO 和 SASPSO 优化程序分别运行 30 次，表 1 给出 30 次优化所得到的网损统计数据与文献 [12] 给出的 SGA 和 AGA 优化的结果。

表 1 网损统计结果对照表

Tab.1 Statistic results of network loss (pu)

	最小网损	最大网损	平均网损	标准偏差	优化时间
SGA	0.132932	0.140317	0.133821	0.001445	
AGA	0.132858	0.133515	0.133132	0.000172	
BPSO	0.123655	0.137347	0.129099	0.000501	87.984000
SPSO	0.123941	0.127995	0.125529	0.000013	87.438000
SASPSO	0.123394	0.126206	0.124567	0.000009	98.312000

从表 1 可见，SASPSO 得到了更好的全局最优解，除优化时间稍长外，其它性能指标均优于 BPSO；SPSO 除最小网损外，其它性能指标均优于 BPSO。标准偏差优于 BPSO，说明 SPSO 及 SASPSO 的稳定性更好，因为标准偏差反映了各次运算结果相对于平均值的离散程度。

取 BPSO、SPSO 及 SASPSO 的一组计算结果(所有微粒初始位置和速度相同)，作各代有功网损最优值比较曲线如图 1 所示。由图 1 可见，SASPSO 能够搜索到更好的全局最优解，SPSO 和 SASPSO 的全局最优解都是不断得到改善的，跳跃性不大。

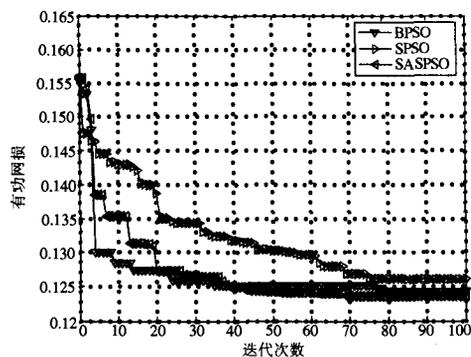


图 1 BPSO、SPSO 及 SASPSO 有功网损最优值比较曲线

Fig.1 Comparison of network loss among BPSO, SPSO and SASPSO

## 4 结论

本文提出应用 SPSO 及 SASPSO 求解无功优化问题，通过对 IEEE14 节点系统的仿真分析，两种算法得到了比 GA 和 BPSO 算法更好的优化效果，SASPSO 很好地将 SPSO 算法的并行搜索能力和 SA 方法的概率突跳特性结合在一起，使得搜索更为有效；同时 SA 方法具有很好的全局收敛性，不会对 SPSO 算法的全局收敛性产生负面影响，因而混合算法具有更好的收敛精度和全局收敛特性，对于无

功优化实用性研究有一定的启发意义。

## 参考文献

- [1] 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 Xiao-hui,WANG Cheng,ZHANG Yong-chuan, et al. A Survey on Application of Particle Swarm Optimization to Electric Power Systems[J].Power System Technology,2004,28(19):14-19.
- [2] 涂光瑜,罗毅,等.人工智能技术在电力系统无功电压控制中的应用[J].电网技术,2002,26(6):22-27.  
TU Guang-yu,LUO Yi,et al.Application of Artificial Intelligence Techniques in Reactive Power/Voltage Control of Power System[J].Power System Technology,2002,26(6):22-27.
- [3] 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 Yu-tian.Adaptive Particle Swarm Optimization and Its Application in Reactive Power Optimization[J].Power System Technology,2006,30(8):19-24.
- [4] Yoshi-da H,et al. A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment[J].IEEE Trans on Power Systems,2000,15(14):1232-1239.
- [5] Abido M A.Optimal Power Flow Using Particle Swarm Optimization [J].International Journal of Electrical Power&Energy Systems,2002,24(7):563-571.
- [6] 余欣梅,李妍,熊信良,等.基于PSO考虑谐波影响的补偿电容器优化配置[J].中国电机工程学报,2003,23(2):23-26.  
YU Xin-mei,LI Yan,XIONG Xin-yin, et al.Optimal Shunt Capacitor Placement Using Particle Swarm Optimization Algorithm with Harmonic Distortion Consideration[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(2):23-26.
- [7] 徐海,刘石,马勇,等.基于改进粒子群游优化的模糊逻辑系统自学习算法[J].计算机工程与应用,2000,(7):62-63.  
XU Hai,LIU Shi,MA Yong, et al. The Adaptive Algorithm of Fuzzy Logic System Basd on Modified Particle Swarm Optimization[J].Computer Engineering and Application,2000,(7):62-63.
- [8] 吴启迪,汪镭.智能微粒群算法研究及应用[M].南京:江苏教育出版社,2005.36-37.  
WU Qi-di,WANG Lei.Research and Application of Intelligence Particle Swarm Optimization[M]. Nanjing: Jiangsu Education Publisher,2005.36-37.

(下转第43页 continued on page 43)

- Design and Implementation of an On-Line Pre-Decision Based System Protection Scheme for the Shaoguan Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,26 (24): 45-47.
- [3] 薛禹胜. EEAC 和 FASTEST[J]. 电力系统自动化, 1998. XUE Yu-sheng. EEAC and FASTEST[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998.
- [4] 鲍颜红, 方勇杰, 薛禹胜, 等. 在线预决策紧急控制系统中的若干问题[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (24): 1-2, 16. BAO Yan-hong, FANG Yong-jie, XUE Yu-sheng, et al. Practical Considerations on the On-Line Pre-Decision Emergency Control Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (24): 1-2, 16.
- [5] 周良松, 彭波, 等. 一个实用的电力系统分层决策稳定控制系统[J]. 继电器, 2000, 28. ZHOU Liang-song, PENG Bo, et al. Study on New Transient Stability Control Pattern with On-line Hierarchical Decision-making and Control[J]. Relay, 2000, 28.

收稿日期: 2007-10-15; 修回日期: 2008-01-09

作者简介:

王珂(1979-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统运行分析、控制及策划等工作; E-mail: wangke777@126.com

吴烈鑫(1965-), 男, 副总工, 从事电力系统运行管理工作。

(上接第 34 页 continued from page 34)

- Alhabib BINKOU, YU Yi-xin, SUN Gang. Security Region Based Real and Reactive Power Optimization of Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (12): 1-10.
- [6] 胡伟, 卢强. 混成电力控制系统及其应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20 (2): 11-16. HU Wei, LU Qiang. Hybrid Power Control System and Its Application[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2005, 20 (2): 11-16.
- [7] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [8] 赵晋泉, 张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (11): 91-97. ZHAO Jin-quan, ZHANG Bo-ming. Summarization of Continuation Power Flow and Its Applications in Static Stability Analysis of Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (11): 91-97.

收稿日期: 2007-10-31; 修回日期: 2007-12-18

作者简介:

王宽(1981-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: wangkuan81@163.com

郑勇(1973-), 男, 工程师, 主要从事电力系统继电保护、变电站综合自动化以及电气设备故障诊断等领域的研究和管理工作的;

陈佑健(1976-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护、变电站综合自动化以及电气设备诊断等领域的研究和维护工作。

(上接第 38 页 continued from page 38)

- [9] 马晋弢, Lai L L, 杨以涵. 遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(5): 347-353. MA Jin-tao, Lai L L, YANG Yi-han. Application of Genetic Algorithms in Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(5): 347-353.
- [10] CUI Zhi-hua, ZENG Jian-chao, CAI Xing-juan. A New Stochastic Particle Swarm Optimizer[J]. Evolutionary Computation, 2004, (1): 316-319.
- [11] 丁玉凤, 文劲宇. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化研究[J]. 继电器, 2005, 33(6): 22. DING Yu-feng, WEN Jin-yu. Advanced PSO Algorithm of Reactive Power Optimization in Power System[J]. Relay, 2005, 33(6): 22.
- [12] 方鸽飞, 王惠祥, 黄晓烁. 改进遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(4): 17-20. FANG Ge-fei, WANG Hui-xiang, HUANG Xiao-shuo. Application of Improved Genetic Algorithm in Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(4): 17-20.

收稿日期: 2007-10-17; 修回日期: 2007-12-09

作者简介:

张登科(1979-), 男, 硕士, 从事电气试验技术的应用研究, 群体智能在电力系统中的应用研究工作; E-mail: zhangdenko@tom.com

黄肇雄(1960-), 男, 博士, 教授, 研究领域为非线性系统建模与控制, 智能和优化控制理论及应用, 电力系统控制理论及应用等。