

# 计及负荷不确定性的无功优化模型与算法

谢开贵, 肖畅

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学电气工程学院), 重庆 400044)

**摘要:** 提出一种计及负荷不确定性等影响因素的无功优化模型与算法, 以克服单一负荷水平下无功优化模型不能全面刻画其负荷随机特性的不足。该模型目标函数为系统有功功率损耗最小, 并将节点电压越限和补偿设备的调节代价作为罚函数计及其中。以负荷正态随机分布特性为基础, 将系统总负荷分段并得到多组负荷样本及其对应的概率值, 对每一负荷样本分别进行优化, 最后结合其对应的概率, 即可得到不确定负荷下的最终解。针对无功优化多目标、多约束的特点, 采用遗传算法对其进行求解。将问题的解转化为染色体组, 通过对染色体组进行选择、交叉和变异等遗传操作, 搜索问题的最优解。通过IEEE-30节点算例对所提出的方法进行了验证, 结果验证了该模型和方法的可行性和有效性。

**关键词:** 电力系统; 无功优化; 不确定性; 遗传算法

## A reactive power optimization model and algorithm considering load uncertainty

XIE Kai-gui, XIAO Chang

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** A reactive power optimization model (ROM) and algorithm considering many factors including load uncertainty is proposed to overcome the shortage that the reactive power optimization model under the single load level can't fully describe the random nature of load. The model takes the minimum of the power loss as objective function and takes account of the penalty functions which are limits of bus voltages and the adjusting cost of compensation equipments. The system load is divided to get several load samples and their corresponding probability based on the normal random distribution, each load sample is optimized separately and the final solution of uncertain load can be obtained combined with its corresponding probability. The reactive optimization which has the features of multi-objective and multi-constraint is carried out by the genetic algorithm. After transferring the solutions to the genome, the optimal solution is searched according to the selection, crossover and mutation on the genome. The results on IEEE 30-bus system demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed model and method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50777067).

**Key words:** power system; reactive power optimization; uncertainty; GA

中图分类号: TM561 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0018-05

## 0 引言

电力系统无功优化<sup>[1]</sup>是保证电力系统安全运行、降低系统有功损耗和维持电压正常水平的一种有效手段。通过无功优化, 可在满足潮流方程、节点电压和发电机无功出力等系统约束的前提下, 合理调整发电机机端电压、可调变压器的档位和补偿设备的最佳投切等, 以达到系统有功损耗最小、电压水平最好和系统运行费用最低等目标。

通常, 无功优化问题表示为一个多目标、多约

束、非线性的最优化模型, 可用目标函数与约束条件对其进行描述。无功优化的目标函数通常选择有功损耗最小<sup>[2]</sup>、调控成本最低<sup>[3]</sup>、电压稳定性最好<sup>[4]</sup>等。无功优化约束条件可分为等式约束和不等式约束, 等式约束即潮流方程约束, 不等式约束为控制变量和状态变量必须满足的约束条件。根据研究问题的侧重点不同, 还可加入其他约束条件, 如文献[5]增加了调节次数的约束。

目前, 国内外学者已提出多种无功优化模型的求解方法。通常, 可将各控制变量看作连续变量, 采用传统的方法(通常是基于梯度的优化算法<sup>[6]</sup>)求得最优解再将各控制变量归整到离散值。这类方法的缺点

基金项目: 国家自然科学基金项目(50777067)

是容易收敛到局部最优解, 甚至是不可行解。近年来, 启发式搜索算法在全局优化问题中得到广泛的应用。如模拟退火法 (simulated annealing) [7]、禁忌算法 (Tabu) [8] 和遗传算法 (genetic algorithm) [9] 等。大量计算分析表明 [10-11], 遗传算法具有信息量要求少、建模简单、寻优能力强等优势, 可应用于电力系统无功优化分析。

为实现对未来多个时段 (如: 24 h) 的无功优化, 常需计及未来多时段的负荷变化进行无功优化, 这就需要未来多时段的负荷预测。由于负荷具有周期性和随机性, 因此, 负荷预测结果存在不可避免的不确定性 [12], 主要体现在两方面: (1) 负荷预测模型本身的不确定性; (2) 未来运行环境的不确定性, 包括天气、系统运行工况等的不确定性等。现有无功优化问题的研究主要集中在目标函数的选取、优化方法的改进等方面, 采用的负荷模型大都是单一模型, 而对负荷不确定性的研究相对较少, 这就可能出现收敛到较差解甚至是不可行解的情况。因此, 有必要在无功优化中计及负荷不确定性的影响。

不确定分析的思想已在电力系统可靠性、电力市场和静态稳定分析等方面 [13-15] 得到应用。本文将推广不确定性的应用范围, 建立计及负荷不确定性的无功优化模型, 并用 IEEE30 节点系统进行分析验证。

### 1 负荷的不确定性

根据负荷预测模型本身的不确定性和未来运行环境的随机性。假设负荷为一正态分布的随机变量, 即  $P \sim N(\mu_1, \sigma_1)$ 、 $Q \sim N(\mu_2, \sigma_2)$ , 其中  $P$  和  $Q$  分别为系统总的有功负荷和无功负荷,  $\mu_1$ 、 $\sigma_1$ 、 $\mu_2$  和  $\sigma_2$  分别为其均值和方差。本文采用文献 [16] 的负荷模型。正态分布可以用几个分段来模拟, 每一分段用它的中点代表。以 13 个分段为例, 其概念示于图 1 和表 1 中。表 1 中的分段一列中, 给出了用标准差  $\sigma$  表示的每一分段的中点位置。

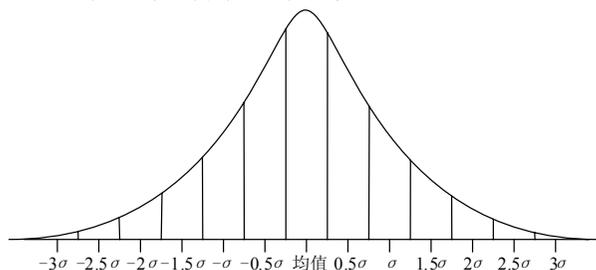


图 1 13 分段正态分布示意图

Fig.1 Sketch of subsection normal distribution

表 1 13 分段正态分布表

Tab.1 Table of subsection normal distribution

分段区间	代表值	概率
$[-\infty, -3.25\sigma]$	...	0.000 577
$[-3.25\sigma, -2.75\sigma]$	$-3\sigma$	0.002 403
⋮	⋮	⋮
$[-0.75\sigma, -0.25\sigma]$	$-0.5\sigma$	0.174 763
$[-0.25\sigma, 0.25\sigma]$	0	0.197 388
$[0.25\sigma, 0.75\sigma]$	$0.5\sigma$	0.174 763
⋮	⋮	⋮
$[2.75\sigma, 3.25\sigma]$	$3\sigma$	0.002 403
$[3.25\sigma, +\infty]$	...	0.000 577

## 2 计及负荷随机特性的无功优化模型

### 2.1 变量及其约束条件

无功优化问题是多变量多约束的非线性规划问题。其变量可分为状态变量和控制变量两种。状态变量包括各发电机出力和节点电压等; 控制变量包括连续变量和离散变量, 连续变量有发电机机端电压, 离散变量有可调变压器分接头位置、补偿电容器投切容量等。

在无功优化过程中, 控制变量和状态变量都必须满足相应约束条件, 包括:

(1) 等式约束 (潮流方程)

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $P_i$ 、 $Q_i$  和  $U_j$  分别为节点  $i$  注入有功功率、无功功率和节点电压;  $G_{ij} + jB_{ij}$  分别为导纳矩阵元素的实部与虚部;  $\delta_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  间电压的相角差,  $j \in i$  表示所有与节点  $i$  相连的节点。

(2) 不等式约束

控制变量约束:

$$\begin{aligned} T_{i \min} < T_i < T_{i \max} \\ C_{j \min} < C_j < C_{j \max} \\ U_{GK \min} < U_{GK} < U_{GK \max} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  分别为可调变压器变比上下限;  $C_{\max}$  和  $C_{\min}$  分别为补偿电容容量上下限。

状态变量约束:

$$\begin{aligned} U_{i \min} < U_i < U_{i \max} \\ Q_{Gi \min} < Q_{Gi} < Q_{Gi \max} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $U_{\max}$  和  $U_{\min}$  分别为节点电压的上下限;  $Q_{G\min}$  和  $Q_{G\max}$  分别为发电机无功出力的上下限。

### 2.2 目标函数

目标函数中包括了有功损耗, 补偿设备调节代价、节点电压越限和发电机无功出力越限以罚函数的形式进行表达:

$$f = P_L + \lambda_T \sum_{i=0}^{N_T} T_i + \lambda_C \sum_{i=0}^{N_C} Q_{C_i} + \lambda_U \sum_{i=0}^N \left( \frac{\Delta U}{U_{i\max} - U_{i\min}} \right)^2 + \lambda_G \sum_{i=0}^{N_G} \left( \frac{\Delta Q_{G_i}}{Q_{G_i\max} - Q_{G_i\min}} \right)^2 \quad (4)$$

式中:  $P_L$  为有功损耗;  $\lambda_T$  为可调变压器调节罚因子;  $N_T$  为系统可调变压器总数;  $\lambda_C$  为电容补偿器调节罚因子;  $N_C$  为系统补偿节点总数;  $\lambda_U$  为电压越限罚因子;  $\lambda_G$  为发电机无功越限罚因子。

惩罚项中的  $\Delta U$  和  $\Delta Q_{G_i}$  说明如下:

$$\Delta U_i = \begin{cases} U_{i\min} - U_i & U_i < U_{i\min} \\ 0 & U_{i\min} < U_i < U_{i\max} \\ U_i - U_{i\max} & U_i > U_{i\max} \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta Q_{G_i} = \begin{cases} Q_{G_i\min} - Q_{G_i} & Q_{G_i} < Q_{G_i\min} \\ 0 & Q_{G_i\min} < Q_{G_i} < Q_{G_i\max} \\ Q_{G_i} - Q_{G_i\max} & Q_{G_i} > Q_{G_i\max} \end{cases} \quad (6)$$

### 2.3 遗传算法

遗传算法<sup>[17]</sup>是一种基于自然选择机制与自然遗传原理的自适应搜索方法。它使用一组染色体来表示问题的解, 称之为种群。以染色体的适应度来表示解的优劣程度。适应度高的染色体将有较大的概率繁殖下一代, 体现了适者生存的原理。交叉和变异操作则通过随机交换或改变染色体一位或多位的值, 有可能获得更优秀的染色体, 并保证种群的多样性。这样, 经过多代遗传, 就能产生一批适应度很高的染色体, 最后将染色体还原就能获得问题的解。遗传算法的关键点在于确定适应度函数、编码方式和各遗传算子。

#### (1) 适应度函数

令适应度函数为:  $K = K_0 - F$ , 其中  $K_0$  为事先给定的一个大数;  $F$  为 2.2 中给出的目标函数值。

#### (2) 编码

补偿电容器组数和可调变压器分接头为离散型控制变量, 将其按一定排列方式编码成染色体, 每一个染色体代表问题的一个解, 即:

$$J = [C_1, C_2, \dots, C_n | T_1, T_2, \dots, T_m] \\ c_i = C_i \times \Delta c_i \quad (i=0, 1, \dots, n) \\ t_i = T_i \times \Delta t_i \quad (i=0, 1, \dots, m)$$

其中:  $C_i$  为第  $i$  个补偿位置投入的电容器组数 ( $C_i \leq k$ ,  $k$  为节点  $i$  补偿电容器的组数);  $T_i$  为第  $i$

个变压器分接头的位置;  $n$  为电容器补偿点的个数;  $m$  为可调变压器的个数;  $\Delta c_i$  为补偿节点  $i$  电容器组的调节步长 (即一组电容器的容量);  $\Delta t_i$  为可调变压器  $i$  的最小调节步长;  $c_i$  为第  $i$  个补偿节点投入使用补偿电容值;  $t_i$  为第  $i$  个可调变压器的变比。

#### (3) 选择

选择算子体现了自然界中“优胜劣汰, 适者生存”的准则。典型的选择算子有轮盘赌选择算子、竞赛机制等。本文采用文献[18]介绍的基于排序法的轮盘赌选择算子。

#### (4) 交叉

交叉操作是遗传算法的特色操作, 是遗传算法进行寻优的主要手段。对于随机选中的一对染色体, 对其每一位都产生一个对应的随机数, 如果随机数小于设定的交叉率, 则将这一对染色体的对应位进行交叉。比如对  $J_1$  和  $J_2$  在第 2 和第 4 位进行交叉, 则得到两个新的染色体  $J'_1$  和  $J'_2$ 。

$$J_1 = [4, 6, 2, 0, 9, 5] \\ J_2 = [0, 8, 3, 4, 2, 7] \\ J'_1 = [4, 8, 2, 4, 9, 5] \\ J'_2 = [0, 6, 3, 0, 2, 7]$$

#### (5) 变异

变异的主要目的在于产生新的个体。对染色体的每一位产生一个随机数, 如果随机数小于设定的变异率, 则对该位进行变异操作。例如对染色体  $J_1 = [4, 6, 2, 0, 9, 5]$ , 如果对第 3 位进行变异操作, 第一位的上限值为 10, 下限值为 0, 则用上限值 10 减去原来的值 3, 得到新的染色体为  $J_1 = [4, 6, 8, 0, 9, 5]$ 。经过变异, 可获得与原来染色体完全不同的个体, 避免早熟收敛, 陷入局部极小值。

### 2.4 不确定性的处理与最终解的获得

用第 1 节方法, 将负荷分为  $M$  段进行模拟, 得到  $M$  组系统总负荷  $[P_1 + jQ_1, P_2 + jQ_2, \dots, P_M + jQ_M]$  与其对应的概率  $[p_1, p_2, \dots, p_M]$ 。在每组系统总负荷水平下, 将负荷按比例分摊到各个负荷点。在每一组负荷水平下, 都可由式 (4) 得到一个目标函数  $f_i$ , 将这  $M$  组负荷对应的概率  $p_i$  与  $f_i$  结合在适应度函数函数  $K$  中, 得到计及负荷概率的适应度函数。由于在计算的过程中, 负荷的概率作用于适应度函数, 而不直接作用于控制变量, 这样经过迭代后可直接得到最优解, 无需进行归整等操作。

$$K = K_0 - \sum_{i=0}^{M-1} (f_i \times p_i) \quad i = (0, 1, \dots, M-1)$$

上式中  $f_i$  由式 (4) 计算,  $p_i$  是每组负荷对应的概率。

2.5 计及负荷不确定性的无功优化计算流程图(图 2)

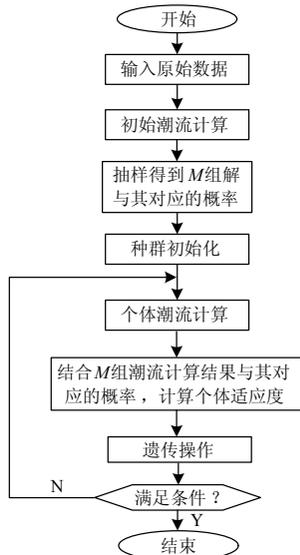


图 2 基于遗传算法的无功优化流程图

Fig.2 Flow chat of reactive power optimized program based on GA

3 IEEE30 节点算例分析

IEEE30 节点系统数据见文献[19], 该系统包括 6 台发电机 (节点 1、2、5、8、11 和 13, 其中 1 节点为平衡节点, 节点 2、5、8、11 和 13 为 PV 节点), 可调变压器与补偿电容的位置和容量与文献[8]相同, 包括 4 台可调变压器 (支路 6-9、6-10、4-12 和 27-28) 和 2 个无功补偿点 (节点 10 和 24)。系统总负荷为  $2.834+j1.390$  (标么值)。有功负荷和无功负荷的方差分别为 0.1 和 0.5。基准功率为 100 MVA。控制变量和状态变量约束条件如表 2、表 3 所示。

表 2 控制变量约束条件

Tab.2 Limited condition of controllers

变量名称	变压器变比 $T_k$	$Q_{C10}$	$Q_{C24}$
上限值	1.10	0.5	0.1
下限值	0.90	0.00	0.00
调节档数	$1.0 \pm 4 \times 2.5\%$	$10 \times 0.05$	$10 \times 0.01$

表 3 状态变量约束条件

Tab.3 Limited condition of variables

变量名称	负荷节点电压	发电机无功出力					
		$Q_{G1}$	$Q_{G2}$	$Q_{G5}$	$Q_{G8}$	$Q_{G11}$	$Q_{G13}$
上限值	1.050	1.500	0.600	0.625	0.500	0.400	0.450
下限值	0.950	-0.200	-0.200	-0.150	-0.150	-0.100	-0.150

本文算法所涉及到的参数取值如下: 负荷分段数  $M=13$ ; 遗传迭代次数 80。实验结果如表 4 和表 5 所示。从表 4 和表 5 中可以得到如下结论:

表 4 分别给出了传统模型和计及负荷不确定性模型得到的优化结果。表 5 分别给出了两种模型下的电压越界节点数、有功损耗值和有功损耗下降率。图 3 给出了传统模型和本文模型下的优化结果在不同负荷水平下的有功损耗下降率, 其中系列一为传统负荷模型的有功损耗下降率曲线, 系列二为本文模型的有功损耗下降率曲线。

从表 5 和图 3 可以看出, 使用两种模型进行优化均可使有功损耗下降。当两种模型在负荷波动不大时差别不大, 在负荷均值时, 两种模型得到的负

表 4 优化结果

Tab.4 Optimization results

参数取值	$\lambda_V=1, \lambda_C=5, \lambda_T=0.0005, \lambda_G=1$					
变量名	$Q_{C10}$	$Q_{C24}$	$T_{6-9}$	$T_{6-10}$	$T_{4-12}$	$T_{27-38}$
单一负荷优化	3	8	3	1	2	2
方法二优化	4	6	2	3	2	1

表 5 优化计算结果

Tab.5 Optimization calculation results

负荷偏离值	优化前	单一负荷模型		总分结合模型	
	目标值	目标值	下降率	目标值	下降率
$-3\sigma$	0.0564	0.0525	6.91%	0.0524	7.09%
$-2.5\sigma$	0.0592	0.0551	6.92%	0.0527	10.97%
$-2\sigma$	0.0627	0.0583	7.01%	0.0572	8.77%
$-1.5\sigma$	0.0661	0.0608	8.01%	0.0594	10.13%
$-\sigma$	0.0698	0.0634	9.16%	0.0631	9.60%
$-0.5\sigma$	0.0736	0.0662	10.05%	0.0659	9.89%
0	0.0778	0.0699	10.15%	0.0710	9.81%
$0.5\sigma$	0.0825	0.0753	8.73%	0.0752	9.77%
$\sigma$	0.0863	0.0801	7.18%	0.0791	8.34%
$1.5\sigma$	0.0901	0.0852	5.33%	0.0831	7.46%
$2\sigma$	0.0938	0.0895	4.58%	0.0868	6.50%
$2.5\sigma$	0.0979	0.0935	4.49%	0.0915	6.53%
$3\sigma$	0.1043	0.0987	5.36%	0.0962	7.76%

荷下降率分别是10.15%和9.81%，单一负荷模型要略好于本文提出的模型。当负荷逐渐增大和减小的过程中，本文计及负荷不确定性的无功优化模型得到的有功损耗下降率好于单一负荷模型。

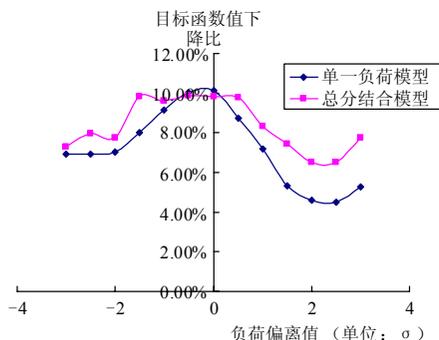


图3 有功损耗下降率随负荷变化曲线图

Fig.3 Diagram of power loss reduce rate with the change of load

## 4 结论

计及电力负荷的不确定性建立了电力系统无功优化模型，并通过遗传算法对其进行了求解。本文方法具有以下特点：

(1) 模型中引入的目标函数，其不仅包括了有功功率损耗最小，而且将电压越限和补偿设备的调节代价作为罚函数引入到目标函数中，从而能综合考虑系统网损、电压质量和调节代价等因素。决策者可根据自身的不同需求，对罚函数因子进行取值。

(2) 在无功优化中计及了负荷不确定性的影响，建立了计及负荷不确定性的无功优化模型，克服了单一负荷模型不能全面描述负荷随机特性的不足。使用遗传算法对模型进行了求解，通过对计算结果的分析比较，本文的算法可有效地计及负荷不确定性的影响。

## 参考文献

[1] 陈文彬. 电力系统无功优化与电压调整[M]. 沈阳: 辽宁科学技术, 2003.

[2] 吴文传, 张伯明. 能量损耗最小的无功补偿动态优化算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 68-73. WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. Study on the algorithm of dynamic reactive power optimization for minimal energy loss[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 68-73.

[3] 李惠玲, 高振江, 庞占星, 等. 基于全网无功优化的配电网无功优化系统的设计[J]. 继电器, 2008, 36(10): 31-35. LI Hui-ling, GAO Zhen-jiang, PANG Zhan-xing, et al.

Design of reactive power management system for distribution network based on reactive power optimization of the whole distribution network[J]. Relay, 2008, 36(10): 31-35.

[4] 刘明波, 杨勇. 计及静态电压稳定约束的无功优化规划[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(5): 21-25. LIU Ming-bo, YANG Yong. Optimal reactive power planning incorporating steady state voltage stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(5): 21-25.

[5] 赵登福, 刘昱, 夏道止. 考虑开关动作次数约束的配电网无功电压控制方法的研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(8): 783-786. ZHAO Deng-fu, LIU Yu, XIA Dao-zhi. Reactive power/voltage control of distribution system considering the constraint of the maximum allowable number of switching operations[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(8): 783-786.

[6] Hong Y Y, Sun D I, Lin S Y, et al. Multi-year multi-case optimal VAR planning[J]. IEEE Trans on PS, 1990, 5(4): 1294-1301.

[7] 顾丹珍, 徐瑞德. 一种地区电网多目标无功优化的新方法——改进模拟退火算法[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 71-74. GU Dan-zhen, XU Rui-de. A new approach for multiple objective reactive power optimization-improved simulated annealing[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 71-74.

[8] 刘玉田, 马莉. 基于 Tabu 搜索方法的电力系统无功优化[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 61-64. LIU Yu-tian, MA Li. Reactive power optimization based on Tabu search approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 61-64.

[9] 向为, 黄纯, 谢雁鹰, 等. 具有改进变异的遗传算法在无功优化中的应用[J]. 继电器, 2005, 33(9): 31-34. XIANG Wei, HUANG Chun, XIE Yan-ying, et al. Application of genetic algorithms with improved mutation in reactive power optimization[J]. Relay, 2005, 33(9): 31-34.

[10] 王煦法. 遗传算法及其应用[J]. 小型微型计算机系统, 1995, 16(2): 60-64. WANG Xu-fa. Genetic algorithm and its application[J]. Mini-Micro Systems, 1995, 16(2): 60-64.

[11] 周金荣, 黄道, 蒋慰孙. 遗传算法的改进及其应用研究[J]. 控制与决策, 1995, 10(3): 261-264. ZHOU Jin-rong, HUANG Dao, JIANG Wei-sun. The study of genetic algorithm and its application[J]. Control and Decision, 1995, 10(3): 261-264.

[12] 李欣然, 贺仁睦, 章健, 等. 负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 26-30.

(下转第 29 页 continued on page 29)

- Distributed Resources. 2006: 112-122.
- [6] Podvin H. A fuzzy-logic-based fault recognition method using phase angles between current symmetrical components in automatic DFR record analysis[C]. //Power Tech, 2005 IEEE. Russia: 2005:1-6.
- [7] Das B. Fuzzy logic-based fault-type identification in unbalanced radial power distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 278-285.
- [8] Salim R H, de Oliveira K, Filomena A D, et al. Hybrid fault diagnosis scheme implementation for power distribution systems automation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1846-1856.
- [9] Dong X Z, Shi S X. Identifying single-phase-to-ground fault feeder in neutral noneffectively grounded distribution system using wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1829-1837.
- [10] Stefanoiu D, Ionescu F. A fuzzy-statistical reasoning model for bearings fault diagnosis[C]. //2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2002, 7(6).
- [11] Kersting W H. Radial distribution test feeders[C].// Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE. 2001: 908-912.
- [12] Borghetti A, Bosetti M, Di Silvestro M, et al. Continuous-wavelet transform for fault location in distribution power networks: definition of mother wavelets inferred from fault originated transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 380-388.
- [13] Kizilcay M, Seta P. Digital simulation of fault arcs in medium-voltage distribution networks[C]. //15th Power Systems Computation Conference, PSCC. Liege, Belgium: 2005.

收稿日期: 2010-02-07; 修回日期: 2010-06-08

作者简介:

张 钧(1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为配电网故障诊断、故障选线、故障定位; E-mail: popo\_zhj@foxmail.com

何正友(1970-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事小波分析在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配网综合自动化等方向的研究工作;

谭熙静(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为轨道交通综合监控系统可靠性。

(上接第 22 页 continued from page 22)

- LI Xin-ran, HE Ren-mu, ZHANG Jian, et al. Effect of load characteristics on power system steady-state voltage stability and the practical criterion of voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19 (4) : 26-30.
- [13] 麻常辉, 薛禹胜, 王小英. 基于静态和动态安全风险的输电规划: (二) 计及注入功率的不确定性[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (14) : 10-13.
- MA Chang-hui, XUE Yu-sheng, WANG Xiao-ying. Optimal transmission planning based on both static and dynamic risks: part two with uncertain injection power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (14) : 10-13.
- [14] 王守相, 赵玮, 王成山. 计及不确定性的预想事故自动选择区间方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (20) : 27-31.
- WANG Shou-xiang, ZHAO Wei, WANG Cheng-shan. Automatic contingency selection based on interval method considering uncertainty of generation and load condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (20) : 27-31.
- [15] 王守相, 武志峰, 王成山. 计及不确定性的电力系统直流潮流的区间算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (5) : 18-23.
- WANG Shou-xiang, WU Zhi-feng, WANG Cheng-shan. Interval algorithm of DC power flow considering uncertainty in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (5) : 18-23.
- [16] 李文沅. 电力系统风险评估[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [17] 熊信良, 吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [18] Lee K Y, Yang F F. Optimal reactive power planning using evolutionary algorithms: a comparative study for evolutionary programming evolutionary strategy, genetic algorithm, and linear programming[J]. IEEE Trans on PS, 1998, 13 (1) : 101-108.
- [19] 张伯明, 陈寿松. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 309-313.

收稿日期: 2010-03-03; 修回日期: 2010-05-28

作者简介:

谢开贵(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与计算、规划与可靠性, 电力市场及人工智能等方面的研究; E-mail: kaiguixie@yahoo.com.cn

肖 畅(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统无功优化的研究。