

# 具有改进变异的遗传算法在无功优化中的应用

向 为<sup>1</sup>, 黄 纯<sup>1</sup>, 谢雁鹰<sup>2</sup>, 蒋晏如<sup>2</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2 娄底市电力局, 湖南 娄底 417000)

**摘要:** 遗传算法是一种基于自然规律选择的优化方法,在电力系统的无功优化中得到了广泛的研究。本文在对遗传算法随机变异研究基础上,结合电力系统无功优化的特征,提出了优化变异,即以目标函数的灵敏度系数向量来修正变异方向,加快搜索速度。并对 IEEE14节点系统进行了计算,其结果验证了算法的有效性。

**关键词:** 无功优化; 遗传算法; 灵敏度分析; 优化变异

**中图分类号:** TM714.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2005)09-0031-04

## 0 引言

电力系统的无功优化是保证电力系统安全和经济运行的有效技术措施,一直是电力系统运行领域的重要研究课题之一。无功优化就是在保障电力系统电压质量的前提下,通过改变发电机端电压,调整变压器的分接头,投入或切除电容器和电抗器,来改变电力系统的无功分布,进而调整系统电压,以使电力系统运行在最为经济的状态。

电力系统无功优化在数学意义上就是满足一定约束条件下,求解目标函数的最大或最小值。几十年来,国内外很多专家学者对此做了大量的研究工作,提出一系列应用于电力系统无功的优化算法:其中简化梯度法以极坐标形式的 Newton - Raphson潮流为基础,对等式约束用 Lagrange乘子处理,对不等式用 Kuhn - Tucker罚函数处理,沿控制变量的负梯度方向进行寻优,具有一阶收敛性。牛顿类优化算法利用拉格朗日扩展目标函数的稀疏 Hessian矩阵修正梯度方向解无功优化潮流,具有二阶收敛性。内点法结合拉格朗日函数、牛顿法和对数障碍法,从初始内点出发,沿最速下降方向,在可行域内直接走向最优解。二次规划类算法把无功优化目标函数表示为二次函数而将约束条件线性化处理,是一种特定形式的非线性规划解法。线性规划法将目标函数和约束方程在运行点一阶展开,得出灵敏度矩阵,把无功优化转换为线性优化问题求解。前叙算法根据电力系统的自身特征,以目标函数的一阶或二阶梯度为寻优信息,推导出相关求优算法,有一定的优越性和适应性,但在“鲁棒性”和全局寻优以及在处理离散变量与连续变量相混合的大规模系统能力有很大的局限性<sup>[1]</sup>。

为了处理前述情况,遗传算法(GA)被引入无功

优化问题中来,并且进行了大量研究。遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应的全局优化搜索算法,它采用编码技术,以便处理连续离散变量混合问题,从多初值点开始沿多路径实现全局最优,具有较好的“鲁棒性”<sup>[2]</sup>。就无功优化问题的特征,众多学者对遗传算法做出各种改进以提高其计算性能。通过与其它人工智能算法相结合来改进自身的固有不足:借鉴模拟退火法思想修正适应度函数以减少初始值的影响,避免过早收敛于某一局部峰值,通过准确的定性退火选择准则和逐代记录最优个体,以克服退火遗传算法收敛速度和全局优化能力不稳定的缺点,并随着规模的扩大,更表现出其优越性<sup>[3]</sup>。遗传算法与模糊数学、神经网络、专家系统相结合的改进方法亦得到大量的研究。但是此类遗传算法始终有一个主要缺点:计算量过大,运行时间过长。

本文在保持遗传算法的优点同时,提出一种改进方法,即以灵敏度系数向量来修正变异方向,使得更快找到最优值,并通过对典型电网的无功优化问题和常规遗传算法进行了比较计算,证明本算法能够在较少的遗传代数找到最优解。

## 1 无功优化的数学模型

电力系统无功优化是在系统中有功潮流分布已确定的情况下使得目标函数最小化,同时又要满足各种物理和技术上的约束条件,其数学模型包括目标函数、功率约束方程、变量约束方程三个部分。

### 1.1 目标函数

无功优化的目标函数包括经济性目标、电压水平目标、安全性目标以及综合性目标,可以是有功网损最小、电压水平最好、投资最少、综合多目标最优等。为了简化算法的推导,本文以有功网损最小为

目标函数:

$$\text{Min } P_L = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j=i}^n V_j (C_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

式中:  $P_i, Q_i, V_i$  为节点  $i$  处注入有功、无功和电压;  $G_{ij}, B_{ij}, \theta_{ij}$  为节点  $i, j$  之间的电导、电纳和相角,  $n$  为节点总数。

### 1.2 功率约束方程

电力系统任何无功电压调节措施 (升降变压器分接头、投切电容器、调整发电机端电压) 都必须满足以下功率约束方程:

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=i}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & i = 1, 2, \dots, n \\ Q_i = V_i \sum_{j=i}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) & i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

为便于后文分析,假定系统 1 号节点为平衡机节点, 2, ...,  $m$  号节点为发电机节点,  $m+1, \dots, m+r$  号节点为无功补偿节点。

### 1.3 约束条件

选取发电机端电压  $V$ 、补偿电容器注入无功  $Q$ 、分接头可调变压器变比  $T$  为控制变量, 表示为  $u = [V_1, V_2, \dots, V_m, Q_{m+1}, \dots, Q_{m+r}, T_1, \dots, T_k]^T$ , 选取平衡机的有功功率、发电机的无功出力、负荷节点的电压幅值、节点电压相角 (不含平衡节点) 为状态变量, 表示为:  $x = [P_1, Q_{G1}, Q_{G2}, \dots, Q_{Gm}, V_{m+1}, \dots, V_n, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ ,  $n$  为系统节点总数,  $r$  为无功补偿节点数目,  $k$  为可调变压器的数目。变量约束条件如下式:

$$\begin{cases} \underline{u} \leq u \leq \bar{u} \\ \underline{x} \leq x \leq \bar{x} \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $\bar{u}, \underline{u}$  分别为控制量的上下限,  $\bar{x}, \underline{x}$  分别为状态量的上下限。

## 2 应用于无功优化的改进遗传算法

遗传算法理论源于达尔文的进化论, 可对应四个步骤: 过渡繁殖, 遗传变异, 自然选择, 优胜劣汰而适者生存。然而经典进化论在变异和进化方向的问题上越来越受到现代生物学的挑战, 即现代生物学认为: 生物组织自身有一种内在的趋势使得变异很大可能地朝着适于生存的方向发展。反映到遗传算法上来, 就是目标函数的导数信息影响着遗传变异的方向。由于某些目标函数不具有可导性, 甚至无法写出数学表达式, 各种遗传算法较少利用导数信息而使其具有很好的普遍适应性。但不利用导数信

息的各种改进遗传算法仍然有一个缺点: 计算量过大导致花费时间过长。其中一个重要原因就在于计算过程中, 染色体的交叉变异操作都是随机的, 缺乏针对性, 算法必须在可能区间内较大范围才能找到最优解。本文采用有功网损对控制变量的灵敏度来指导遗传算法的操作, 加强了算法的针对性。文献 [4] 亦做了此方面研究。

### 2.1 目标函数对控制变量的灵敏度系数向量

灵敏度分析法都基于某一时刻的具体潮流, 在某一点将目标函数和功率约束方程线性展开, 再通过求逆等步骤得到控制变量分别对目标函数的影响。但是普通的灵敏度计算含有电力系统在某点上的具体参数, 则每一组参数对应的灵敏度系数向量都必须单独求逆而获得结果, 大幅增加了运算量。本文在保留电压相角等参数的同时, 对求逆矩阵近似处理, 较为简便求得各点的灵敏度系数向量, 并且具有较高的精确度 [5~7]。

将无功优化的数学模型简化为下式:

$$\text{min } C(x, u)$$

$$s \begin{cases} g(x, u) = 0 \\ \underline{u} \leq u \leq \bar{u} \\ \underline{x} \leq x \leq \bar{x} \end{cases} \quad (4)$$

$$dx = - \left[ \frac{\partial g}{\partial x} \right]^{-1} \frac{\partial g}{\partial u} du = S_{xu} du \quad (5)$$

$$dc = \left[ \frac{\partial C}{\partial u} - \frac{\partial C}{\partial x} \frac{\partial g^{-1} \partial g}{\partial u} \right] du = S_{cu} du \quad (6)$$

其中:  $S_{xu}$  为状态变量对控制变量的灵敏度矩阵;  $S_{cu}$  为目标函数对控制变量的灵敏度系数向量。在遗传算法中我们关心的只是目标函数对控制变量的灵敏度系数向量。

令  $x_1 = [P_1, Q_{G1}, Q_{G2}, \dots, Q_{Gm}]^T$ ,  $x_2 = [V_{m+1}, \dots, V_n, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ , 功率约束方程按以下方式排列:

$$g = [g_1^T, g_2^T]^T$$

其中:  $g_1 = [g_{p1}, g_{q1}, \dots, g_{qm}]^T$ ,  $g_2 = [g_{p2}, \dots, g_{pm}, g_{qm}, \dots, g_{qn}]^T$ , 则

$$\frac{\partial g}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} \\ 0 & J \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中  $J$  为潮流计算迭代雅可比矩阵:

$$J = \begin{bmatrix} U_p & \\ & U_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_p \\ J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_p & \\ & U_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \cos & -G \cos \\ G \cos & B \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_p \\ J \end{bmatrix} \quad (8)$$

推导过程详见文献 [7]。正常运行状况下  $\cos$  1, 则:

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} U_p^{-1} \\ U_q^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B & -G \\ G & B \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_p^{-1} \\ U_q^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_p^{-1} \\ U_q^{-1} \end{bmatrix} J_0^{-1} \begin{bmatrix} U_p^{-1} \\ U_q^{-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中两个 B 矩阵两个 G 矩阵只是简化写法,并不相同,把上式带入式 (8) 可得:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial x} \\ \frac{\partial g}{\partial x} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} I & -\frac{\partial g_1}{\partial x_2} J^{-1} \\ 0 & J^{-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

代入式 (6), 可求出灵敏度系数向量:

$$dc = \begin{bmatrix} \frac{\partial C}{\partial u} - \frac{\partial C}{\partial x} \begin{bmatrix} I & -\frac{\partial g_1}{\partial x_2} J^{-1} \\ 0 & J^{-1} \end{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial u} \end{bmatrix} du \quad (11)$$

计算过程中只需对矩阵  $J_0^{-1}$  求逆, 而矩阵只与电力网络结构参数有关, 与电压相角有功无功等运行参数无关, 若忽略分接头对矩阵的影响, 则只需在算法开始时一次求出逆矩阵, 分别代入各运行点便可求出灵敏度系数向量, 极大地减小了计算量。

## 2.2 应用灵敏度系数向量对遗传操作的改进

简单遗传算法中的变异操作通过随机模拟而决定一个基因是否变异, 常规变异操作发生在交叉操作之后, 是扩大染色体选择范围的一个重要手段, 使得目标解有更大的遍历性。本文在保留随机变异以获得丰富基因的同时, 利用灵敏度系数向量进行优化变异。优化变异发生在选择操作之后, 即求取灵敏度所需参量在计算潮流时便亦得出而无需另行计算。

首先选择最近一代适应度最大的一批解, 按照灵敏度系数向量对各控制变量进行操作。实际系统中, 控制变量总是在前一时刻状态的基础上调整, 在优化变异操作时, 令控制变量编码在当前取值的较小范围内按灵敏度系数向量在对应位置做出变化。如果灵敏度系数向量对应的分量较大, 则对应的控制变量进行  $\pm 2$  操作, 如果对应的分量较小, 则对控制变量进行  $\pm 1$  操作, 如果对应的分量很小, 则不对应的控制变量进行操作。若是变异后变量越限, 可探索出控制变量的相应边界值。变异后, 适应度增大的染色体则直接进入下一代, 若是变小则原染色体不进入下一代。

本文的优化变异操作类似于简化梯度法, 而简化梯度法收敛性差, 尤其在接近极值点附近时收敛

速度会变得很慢, 并且可能在计算过程中出现锯齿现象。对于优化变异可能导致收敛性变差, 遗传算法的收敛性主要取决于选择操作和变异操作, 在最优解附近, 灵敏度很小可以停止优化变异; 对于优化变异操作后适应度变小的结果, 保留优化变异前的染色体。

## 3 计算流程

- 1) 读入系统网络节点参数、控制变量、状态变量、约束条件等原始数据, 求取  $J_0^{-1}$ , 并设置遗传算法的参数。
- 2) 对控制变量编码, 随机产生一组染色体做初始解。
- 3) 以当前控制变量修改原始数据, 在此基础上进行潮流运算, 记录下各节点相角、电压、有功、无功。
- 4) 根据适应函数评价各个体并选取可能进行遗传操作的个体。
- 5) 对已选取个体的染色体利用灵敏度系数向量进行优化变异操作, 余下步骤按简单遗传算法处理。
- 6) 判断是否满足优化目标。若满足则输出结果, 否则返回步骤 3)。

## 4 实例计算及分析

本文利用改进遗传算法对 IEEE14 节点系统进行仿真计算, 分别给出了一般遗传算法和改进遗传算法的计算结果。IEEE14 节点标准测试系统含有 5 个发电机节点, 3 台可调变压器, 1 台并联电容无功补偿装置。有载调压变压器变比的范围是  $[0.9 \sim 1.1]$ , 节点电压的范围是  $[0.95 \sim 1.1]$ , 1 号节点发电机的无功调节范围是  $[-20.0 \sim 100\text{MW}]$ , 其它节点和支路参数详见参考文献 [7]。采用个体数目为 20, 设交叉概率  $p_c$  随机变异概率  $p_m$  分别为 0.6 和 0.01, 采用最大代数 (100) 为收敛判据。仿真结果如表 1。

表 1 测试结果比较

Tab 1 Comparison of test results

方法	有功损耗	平均电压	电压越限节点数	最优个体保留代数
改进遗传算法	0.132850	1.034833	0	48
退火遗传算法	0.136932	1.035784	0	23

计算结果显示本文改进算法与在寻找极值点和减少遗传代数方面有着较强的能力。一般地说, 与退火遗传算法随机因素较大相比, 改进算法在极值

点附近利用导数的极值定理可以更为快捷准确地找到极值点,并且表 1 结果表明改进算法通过交叉和变异操作使得自身拥有较好的全局范围寻优能力。

## 5 结论

本文针对电力系统无功优化问题,对遗传算法提出了改进措施,并在标准 IEEE14 节点系统进行了仿真计算。研究表明:

1) 具有变异方向的改进算法继承自简单遗传算法,便于处理离散连续变量混合的大规模电力系统无功优化问题。

2) 精确度较好。把灵敏度系数向量表示成节点电压和简化雅克比逆矩阵的函数,忽略分接头对导纳矩阵的影响,只需一次求逆得到简化雅克比逆矩阵,既减少了运算量,与文献 [4] 中算法忽略电压变化相比又保证一定的精确度。

3) 收敛速度快。以灵敏度系数向量优化变异方向,本文改进算法可以在较少的代数内找到可接受最优点,改进算法大多能够在第 60 代以前找到最优点。与退火遗传算法相比在总量上显著减少所需计算染色体的数目,加快了进化速度。

4) 相对于简化梯度法起步收敛速度较快而最终收敛性较差,改进算法相应地在极值点附近停止优化变异操作,通过自适应改变交叉概率和常规变异概率来保证收敛性。但如何判定可否停止优化变异将是值得进一步研究的问题。

## 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 Wen-chao, GUO Wei Summarize of Reactive Power Optimization Model and Algorithm in Electric Power System [J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15 (1): 100-104.
- [2] 马晋骥, Lai L L. 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): 347-352.

- MA Jin-tao, Lai L L. Application of Genetic Algorithms in Reactive Power Optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15 (5): 347-352.
- [3] 陆皓勇,王锡凡. 电力系统无功优化的退火选择遗传算法 [J]. 中国电力, 1998, 31 (2): 3-6.  
LU Hao-yong, WANG Xi-fan A Genetic Algorithm with Annealing Selection for Reactive Power Optimization [J]. Electric Power, 1998, 31 (2): 3-6.
- [4] 倪炜,单渊达. 具有优化路径的遗传算法应用于电力系统无功优化 [J]. 电力系统自动化, 2000, 17 (10): 40-44.  
NI Wei, SHAN Yuan-da A Refined Genetic Algorithm with Optimal Searching Path Used in Power System Reactive Power Optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 17 (10): 40-44.
- [5] 刘明波,陈学军. 三种无功优化线性规划建模方法的比较 [J]. 电力系统及其自动化学报, 1996, 11 (2): 31-36.  
LIU Ming-bo, CHEN Xue-jun Comparison of Three Methods for Establishing Linear Programming Model of Reactive Power Optimization [J]. Proceedings of the EPSA, 1996, 11 (2): 31-36.
- [6] Madure K R C, Chenow R D. Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and Real Power Loss Minimization [J]. IEEE Trans on PAS, 1981, 100: 3185-3194.
- [7] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 1996.  
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun Advanced Power Networks Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.

收稿日期: 2004-08-27; 修回日期: 2004-10-29

## 作者简介:

向 为 (1978 - ), 男, 硕士研究生, 从事电力系统无功优化、微机保护方面的研究工作;

黄 纯 (1966 - ), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统无功优化、微机保护等方面的教学与科研工作;

谢雁鹰 (1966 - ), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统优化运行与控制方面的研究。

## Application of genetic algorithms with improved mutation in reactive power optimization

XIANG Wei<sup>1</sup>, HUANG Chun<sup>1</sup>, XIE Yan-ying<sup>2</sup>, JIANG Yan-ru<sup>2</sup>

(1. College of Electricity & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2 Loudi Electric Power Bureau, Loudi 417000, China)

(下转第 38 页 continued on page 38)

## 5 结论

蚁群算法是基于群体协作和学习过程的一种新的启发式算法。本文把加入扰动策略的蚁群算法,应用于配网规划并在目标函数中引入了支路有效度的概念,实验结果表明该算法可以有效克服基本算法中搜索时间过长或易陷入局部最优的缺陷,使得其寻优性能有显著提高。

### 参考文献:

- [1] 王家耀. 空间信息系统原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
WANG Jia-yao. Theory of Spatial Information System [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] 原河峰, 杨丽徙, 章健. 以优化理论进行农村电网规划设计 [J]. 农村电气化, 1994, 15(6): 2-3.  
YUAN He-feng, YANG Li-xi, ZHANG Jian. Rural Distribution Network Planning Based on Optimization Method [J]. Rural Electrization, 1994, 15(6): 2-3.
- [3] Jonnavuthula S, Billinton R. Minimum Cost Analysis of Feeder Routing in Distribution System Planning [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(4): 1935-1940.
- [4] Binato S, Lizardo J. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(2): 247-253.
- [5] 王志刚, 杨丽徙, 陈根永. 基于蚁群算法的配电网架架优化规划方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 12: 73-76.

- WANG Zhi-gang, YANG Li-xi, CHEN Gen-yong. Ant Colony Algorithm for Distribution Network Planning [J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 12: 73-76.
- [6] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 1996, 26(3): 1-13.
  - [7] Dorigo M, Gambardella L M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.
  - [8] 詹士昌, 徐婕, 吴俊. 蚁群算法中有关算法参数的最优选择 [J]. 科技通报, 2003, 19(5): 380-386.  
ZHAN Shi-chang, XU Jie, WU Jun. The Optimal Selection on the Parameters of the Ant Colony Algorithm [J]. Bulletin of Science and Technology, 2003, 19(5): 380-386.
  - [9] 程浩忠, 张焰. 电力网络规划的方法与应用 [M]. 上海: 科学技术出版社, 2002.  
CHENG Hao-zhong, ZHANG Yan. The Method and Application on Power Network Planning [M]. Shanghai: Science and Technology Press, 2002.

收稿日期: 2004-08-05

### 作者简介:

杨丽徙 (1956 - ), 女, 教授, 主要从事电力系统运行与规划方面的研究及教学工作; E-mail: yanglixixi@zzu.edu.cn

张丹 (1979 - ), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网网络分析。

## Ant colony algorithm with little interference strategy in distribution networks planning

YANG Li-xi<sup>1,2</sup>, ZHANG Dan<sup>1</sup>, WANG Jia-yao<sup>2</sup>, WANG Zhi-gang<sup>1</sup>, SONG Bing<sup>3</sup>

(1. Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China; 3. Shanxi Jincheng Power Company, Jincheng 048000, China)

**Abstract:** Basic ant colony algorithm is a new general-purpose heuristic algorithm for solving combination optimization problems. The main characteristics of this method are positive feedback, distributed computation and the use of constructive greedy heuristic. But if the positive feedback is not proper, it will take longer time on searching or easily running into the local optimization solution. To overcome those shortcomings, this paper puts forward an ant colony algorithms with little interference strategy, which timely adjusts the pheromone. It could control the positive feedback process and enhance the probability of full-scale optimization. The validity is proved by a power network optimization example.

**Key words:** distribution network planning; ant colony algorithms; little interference; pheromone

(上接第 34 页 continued from page 34)

**Abstract:** An improved genetic approach to optimal reactive power is presented. It employs the sensitivities of the objective function with respect to the control variables to adjust the mutation direction. Results of algorithm to the IEEE14 bus power system reveal this technique is suitable to minimize real power loss and the time of running program.

**Key words:** reactive power optimization; genetic algorithm; sensitivity analysis; optimal mutation