

基于改进遗传算法的电力系统无功优化

周晓娟¹, 蒋炜华², 马丽丽³

(1. 河南机电学校电子工程系, 河南 郑州 450002; 2. 河南机电高等专科学校电气工程系, 河南 新乡 453002;
3. 安阳供电公司, 河南 安阳 455000)

摘要: 将遗传算法应用于电力系统无功优化。针对传统遗传算法中存在的易陷入局部最优解和后期收敛速度慢的问题, 在简单遗传算法(SGA)的基础上, 提出更加有效的算法即改进遗传算法(IGA)。新算法结合灵敏度分析产生原始个体替代SGA。SGA的交叉和变异被改进, 改进的交叉操作拥有快速局部调节能力, 改进的变异操作引入灵敏度分析产生新的个体。所提算法在一个算例上进行了分析验证。

关键词: 传统遗传算法; 无功优化; 灵敏度分析; 交叉; 变异

Reactive power optimization of power system based on improved genetic algorithm

ZHOU Xiao-juan¹, JIANG Wei-hua², MA Li-li³

(1. Department of Electronic Engineering, Henan Electrical Mechanical Secondary School, Zhengzhou 450002, China;
2. Dept of Electrical Engineering, Henan Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang 453002, China;
3. The Power Supply Company of Anyang, Anyang 455000, China)

Abstract: Genetic algorithm is applied to reactive power optimization in this paper. Premature convergence and weak local optimization are two key problems existing in the conventional genetic algorithm. A more effective method—the improved genetic algorithm is put forward based on simple genetic algorithm(SGA). The new algorithm combines sensitivity analysis to generate initial generation of individuals instead of SGA. The crossover and mutation operation of SGA are improved in the IGA, the improved crossover operation is in possession of the ability of fast local adjustment, the improved mutation operation combines sensitivity analysis to generate new individuals. In the end, the proposed approach is examined in one testing system.

Key words: conventional genetic algorithm; reactive power optimization; sensitivity analysis; crossover; mutation

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)07-0037-05

0 引言

随着国民经济的迅速发展, 电力负荷急剧增加。无功优化作为电网经济安全运行的重要组成部分, 日益受到人们的重视。

电力系统无功优化是指在系统有功潮流分布确定的情况下, 通过对某些控制变量的优化调节, 在满足系统各种约束条件的前提下使系统有功网损最小, 它是一个带有多约束条件的非线性组合优化问题。迄今为止, 国内外学者对电力系统无功优化进行了大量研究, 已有多种方法可用于无功优化的求解, 如非线性规划法、线性规划法、动态规划法和混合整数法等等, 但是这些方法都普遍存在对初始解的特殊要求以及不便于对离散变量进行处理等缺陷。

遗传算法^[1]是20世纪70年代初由美国密执安大学的John Holland教授提出并逐步发展起来的一

种自适应全局优化搜索算法。遗传算法在解决多变量、非线性、不连续、多约束的问题时显示出其独特的优势, 使它在无功优化领域中的应用日益为人们所重视, 其有效性也已成为许多研究所证实^[2-5]。

本文针对常规遗传算法收敛速度慢、易早熟等缺陷, 在前人研究的基础上, 结合电力系统无功优化问题的特点对遗传算法进行了改进, 将灵敏度分析引入到算法中。

1 无功优化数学模型的建立

无功优化的目的是使整个网络的损耗最小, 并提高电压质量, 节约系统运行费用, 使系统安全稳定运行, 其数学模型^[6]包括目标函数、功率约束方程和变量约束方程3个部分。

1.1 目标函数

无功优化中的目标函数可以是: 系统有功损耗最小; 无功补偿设备投入资金最少; 保证电压质量

最优；变压器分接头和电容器投切次数最少；或者以上几种目标的综合。本文采用的目标函数为系统有功网损最小，同时将状态变量（节点电压及电动机无功出力）写成罚函数形式

$$\min F = P_{\text{LOSS}} + \sum_{i \in co_v} \lambda_{V_j} (V_j - V_{j \text{lim}})^2 + \sum_{i \in co_G} \lambda_{Q_i} (Q_{G_i} - Q_{G_i \text{lim}})^2 \quad (1)$$

式中：右端第 1 项为有功网损；第 2 项为对节点电压幅值越限的惩罚项；第 3 项为对发电机无功出力越限的惩罚项； λ_{V_j} 和 λ_{Q_i} 分别为除 PT 节点以外的节点电压、发电机无功出力越限罚因子； co_v 是越界负荷节点电压下标的集合； co_G 是越界负荷发电机无功出力下标的集合。 $V_{j \text{lim}}$ 和 $Q_{G_i \text{lim}}$ 可以表示为

$$V_{j \text{lim}} = \begin{cases} V_{j \text{max}} & V_j > V_{j \text{max}} \\ V_{j \text{min}} & V_j < V_{j \text{min}} \\ V_j & V_{j \text{min}} < V_j < V_{j \text{max}} \end{cases} \quad (2)$$

$$Q_{G_i \text{lim}} = \begin{cases} Q_{G_i \text{max}} & Q_{G_i} > Q_{G_i \text{max}} \\ Q_{G_i \text{min}} & Q_{G_i} < Q_{G_i \text{min}} \\ Q_{G_i} & Q_{G_i \text{min}} < Q_{G_i} < Q_{G_i \text{max}} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 约束条件

等式约束为节点功率平衡方程式：

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (5)$$

式中： P_i 、 Q_i 为节点 i 处注入的有功、无功； V_i 、 V_j 为节点 i 、 j 的电压幅值； G_{ij} 、 B_{ij} 、 δ_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电导、电纳和电压相角差。

变量约束方程：

$$\begin{cases} T_{i \text{min}} \leq T_i \leq T_{i \text{max}} \\ Q_{C_i \text{min}} \leq Q_{C_i} \leq Q_{C_i \text{max}} \\ V_{G_i \text{min}} \leq V_{G_i} \leq V_{G_i \text{max}} \\ V_{i \text{min}} \leq V_i \leq V_{i \text{max}} \\ Q_{G_i \text{min}} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i \text{max}} \end{cases} \quad (6)$$

式中： T_i 为可调变压器分接头位置； Q_{C_i} 为容性无功补偿容量； V_{G_i} 为发电机机端电压； V_i 为节点电压； Q_{G_i} 为发电机无功出力。

2 应用于无功优化的改进的遗传算法

用遗传算法求解无功优化问题时，首先随机产生一组初始潮流解，受各种约束条件限制，通过目标函数来评价其优劣，平均值低的被抛弃，只有评价价值高的才有机会将其特征遗传到下一代最后得到趋于最优的一组原问题的解^[6]。

2.1 灵敏度计算

灵敏度关系到控制变量和扰动变量的变化对系统状态变化的灵敏程度。对于无功优化问题，从潮流分布的观点出发，任一 10 kV 母线无功注入量的变化将影响到所有的节点电压，进而影响到节点的有功注入^[7]。因此，可选节点电压作为中间变量来确定有功网损对第 i 个节点有功无功注入的灵敏度。应用灵敏度分析，会减少 GA 的搜索空间和计算时间。系统的有功网损表达如式 (7)。

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^N V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (7)$$

联立式 (4)、式 (5) 和式 (7)，反映 P_{loss} 和 P_i / Q_i 的关联程度的灵敏度可以表达为：

$$\begin{cases} S_{P_i}^{P_{\text{loss}}} = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial p_i} = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial p_i} + \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial p_i} \\ S_{Q_i}^{P_{\text{loss}}} = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_i} = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \delta} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial Q_i} + \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial Q_i} \end{cases} \quad (8)$$

则有

$$\begin{bmatrix} S_{Q_i}^{P_{\text{loss}}} \\ S_{P_i}^{P_{\text{loss}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial p_i} & \frac{\partial V}{\partial p_i} \cdot \frac{1}{V} \\ \frac{\partial \delta}{\partial Q_i} & \frac{\partial V}{\partial Q_i} \cdot \frac{1}{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V} \cdot V \end{bmatrix} = [\mathbf{J}^T]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V} \cdot V \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中： $\partial P_{\text{loss}} / \partial V$ 为有功功率损耗对节点电压的一阶导数； \mathbf{J} 即潮流计算中的雅克比矩阵。

$$\begin{cases} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \delta_i} = -2V \sum_{j=1}^N V_j G_{ij} \cos \delta_{ij} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} \cdot V_i = 2V_i \sum_{j=1}^N V_j \sum_{j=1}^N V_j G_{ij} \cos \delta_{ij} \end{cases} \quad (10)$$

当灵敏度被确定后, 那些灵敏度值大的母线将被选作为补偿母线。

2.2 引入灵敏度计算的 IGA

GA 的一般过程是随机产生个体的第一代来匹配群体, 自然选择在某种方法下被引进来, 接着个体编码在某一方式下交叉和变异产生下一代个体来竞争生存空间, 重复上面的步骤直到满足终止进化条件, 从而输出优化结果。

2.2.1 遗传编码和适应度函数

常规遗传算法采用二进制编码方式, 对于无功优化这样的多变量的复杂优化问题, 由于其控制变量维数很多, 如果采用二进制编码方式, 为了保证问题的解具有一定的精度, 则其个体的编码串将很长, 从而使遗传操作的计算量较大, 计算时间增多, 需要更多的内存空间, 同时其搜索空间也很大, 导致搜索性能很差^[8]。因而, 本文采用整数编码。控制变量包括变压器分接头, 补偿电容器组和发电机终止电压, 都用整数进行编码, 每个控制变量对应一个基因整数位置。这样能使编码和译码过程简化; 计算时间也会节省。

适应度是 GA 搜索的基础, 引导 GA 搜索方向。本文中, 直接用问题的目标函数当作适应度值。

2.2.2 产生原始群体

原始群体的质量会直接影响收敛的质量。所以, 在一开始就通过改善原始群体的形成来增强 GA 的性能。因为电力系统的一般操作不能在很大程度上偏离优化操作点, 第一代个体的产生方式如下: 第一个个体在控制变量的当前位置产生, 第一代的其他个体将通过引入的灵敏度来产生^[8]。

$$x_{ij} = \begin{cases} x_{1j} + \text{int}[(x_{j\max} - x_{1j}) \cdot \text{rand}] & S < 0 \\ x_{1j} & S = 0 \\ x_{1j} - \text{int}[(x_{1j} - x_{j\min}) \cdot \text{rand}] & S > 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个个体的基因位; x_{1j} 为第一代个体的基因位; $x_{j\max} / x_{j\min}$ 为基因位的上下限范围; $\text{int}[\cdot]$ 表示取整数; rand 为介于 0 和 1 之间的随机数; S 为网损对控制变量的灵敏度。通过式 (11) 产生的个体既不会超过限制也能保证个体的种类。

2.2.3 选择操作

选择操作是从父代中选取个体形成繁殖库的过程, 它建立在对个体的适应度进行评价的基础上, 有时直接关系到收敛速度问题。本文中种群的前 1/3 个体通过优化相邻搜索产生; 中间 1/3 个体通过随机比赛模型^[9]产生; 最后 1/3 个体通过在保证个体多样性的目的下随机产生。

2.2.4 交叉操作

交叉操作在遗传算法中起着关键作用, 是获取优良个体的最重要手段, 决定了遗传算法的全局搜索能力。Bernoulli 法用作交叉操作, 可以描述为: 在 0 和 1 之间产生一个伪随机数, 如果随机数小于给定的交叉值, 则交叉将进行, 否则停止。

交叉操作可以分成两个阶段: 搜索阶段 (T_1) 和适应阶段 (T_2), 在两个阶段中, 分别通过随即线性组合交叉和部分确定性交叉^[11]。

随机线性组合交叉 (T_1 阶段) 两个父体 X_1 和 X_2 在交叉操作中被随机选择。 $a \in (0, 1)$ 是通过随机函数产生的一个随机数。 X_3 和 X_4 是子体, 它们的基因位产生如下:

$$x_{3j} = \text{int}[ax_{1j} + (1-a)x_{2j}] \quad (12)$$

$$x_{4j} = \text{int}[(1-a)x_{1j} + ax_{2j}] \quad (13)$$

式中: $\text{int}[\cdot]$ 表示取整数; 基因位 X 为控制变量的编码值。如果某一个基因位超过交叉后的限制, 则基因位将重新被设定。

部分确定性交叉 (T_2): 假定 X_c 是目前最优个体, x_{cj} 是 X_c 的 j^{th} 基因。在群体库中的每一个个体, X_i 和 X_c 交叉来产生子体, 通过父体 x_{ij} 和 x_{cj} 的算数平均数交叉来产生子体 x_{ij} 的基因。如果 x_{ij} 不是整数, 则通过 $\text{int}[\cdot]$ 使 x_{ij} 转化为整数。如式 (14):

$$x_{ij} = \text{int}[(x_{ij} + x_{cj}) / 2] \quad (14)$$

通过方程 (12) 和 (13) GA 的搜索容量在 T_1 阶段将会增强, 方程 (14) 拥有很强的收敛能力, 这只能在 T_2 阶段应用。联立方程 (12)、(13) 和 (14) 使得 IGA 有最快的区域适应能力。

2.2.5 变异操作

变异操作^[12]是产生新个体的辅助方法, 但它决定了遗传算法的局部搜索能力, 可以维持群体的多样性, 防止出现早熟现象。目标函数对某节点有功无功注入的灵敏度系数直接提供了对调整该点有功注入量的效果评估。本文引进灵敏度系数, 具体应用如下: $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ic}]$ 是父代个体, $i = 1, 2, \dots, \text{size}$, size 是在群体库存中个体的数量; C 是染色体的长度, 也就是控制变量的数目。当计算 x_i 的适应度时, P_{loss} 到 x_{ij} (代表一个控制变量) 任意时刻的灵敏度可以表示出来。根据灵敏度值, 正或负, 挑选基因的具体变异方向就确定了。(S_1 、 S_2 为设定

的两个阈值，其中 $S_2 < S_1$)

- (1) 如果 $S > S_1$ ，基因按照 x_j 选择；
- (2) 如果 $S_2 < S < S_1$ ，基因按照 x_j 选择；
- (3) 如果 S 足够小，则不操作。

当某一个控制变量在变异之后超出最低和最高值限制时，它将被设定为限制值。经过改进的变异操作，子代个体将更快向最优结果收敛。

2.2.6 终止条件及其改进

灵敏度分析和优化在 IGA 优化下进行，因此 GA 的终止条件是迭代次数达到最大迭代次数并且获得的最优个体是问题的可行解。

在本文中，IGA 引入灵敏度能节省计算时间。IGA 的结果是否是最优的一个，可以通过灵敏度来核实。迭代以后，遗传算法的结果接近整体最优。

3 算例分析

为了验证本文 IGA 的优化效果，用 C++编程对 IEEE 6 节点系统进行优化。该节点系统包括 2 台发电机、2 台可调变压器、2 个无功补偿节点，其具体数据见文献[13]。该节点系统中所用无功调节设备情况如表 1 所示。

表 1 IEEE 6 节点系统中无功调节设备
Tab.1 Reactive power regulating facilities
in IEEE-6 bus system

类型	数量	位置	控制范围
可调变压器	2	(5,6),(4,3)	0.90~1.10(档)
电容器组	2	4,6	1~10(10组)
发电机	2	1,2	0.95~1.10

算法控制参数设置如下：算例选取的电压上下限分别为 1.05 和 0.95 (标么值)。根据文献[14]取发电机无功出力越限的罚系数 $\lambda_{gr} = 5$ ；节点电压越限的罚系数 $\lambda_{vj} = 10$ ，最大迭代值为 T ， $T = T_1 + T_2$ ， $T_1 = 15$ ， $T_2 = 15 \sim 20$ ， T 是个相对较小的值。系统优化前有功网损值为系统无功优化结果如表 2 所示。种群规模大小 $M = 100$ ；最大遗传次数： $N = 100$ ；最优个体最优保留代数 $N_p = 5$ ；初始交叉率 $p_c =$

表 2 计算结果比较

Tab.2 Comparison of calculation results

算法	SGA	IGA
迭代次数	82	50
计算时间/s	0.98	0.76
有功网损/MW	0.093 6	0.087 9
无功网损/MW	-0.286 2	-0.285 3
母线电压越上限点数	0	0
母线电压越下限点数	0	0
负荷母线最大电压值	1.031 9	1.046 7
负荷母线最小电压值	0.961 8	0.964 6

0.45；变异率 $p_m = 0.02$ ；各控制量的迭代步长分别设定为 $r_{step} = 0.025$ ； $U_{gstep} = 0.01$ ； $Q_{gstep} = 1$ 。系统优化前有功网损值为 0.115 7 MW。

分别用简单遗传算法和改进遗传算法 对该系统进行优化，优化对比结果如表 2 所示。从优化结果可以看出，改进的遗传算法比简单遗传算法的优化结果好，更易达到全局最优解，而且能大大减少在线计算时间。

4 结论

本文讨论了遗传算法的实用性，将灵敏度分析引入到遗传算法中。在负载分区的基础上运用灵敏度来决定补偿母线，目的是为了分散补偿和减少遗传算法的搜索空间。再有，为了满足大规模的电力系统无功优化的需要，通过改进交叉和变异的操作来提高遗传算法的性能。本文的算例验证了该模型的合理性。

参考文献

[1] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 长沙: 国防工业出版社, 1999.
ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Genetic Algorithms: Theory and Application[M]. Changsha: National Defence Industry Press, 1999.

[2] 程浩忠. 遗传算法在电力系统无功优化中的应用 [A]. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第十一届学术年会论文集[C]. 成都: 1995.1089-1093.
CHENG Hao-zhong. Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization in Power System [A]. in: Proceedings of 11th CUS-EPSCA[C]. Chengdu: 1995. 1089-1093.

[3] 文劲宇, 江振华, 姜霞, 等. 基于遗传算法的无功优化在鄂州电网中的实现[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 45-47, 60.
WEN Jin-yu, JIANG Zhen-hua, JIANG Xia, et al. Genetic Algorithm Based Reactive Power Optimization and Its Application in Ezhou City Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 45-47,60.

[4] 张粒子, 舒隽, 林宪枢, 等. 基于遗传算法的无功规则优化[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 5-8.
ZHANG Li-zi, SHU Jun, LIN Xian-shu, et al. Reactive Power Planning Based on Genetic Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 5-8.

[5] 毕鹏翔, 苗竹梅, 刘健. 浮点数编码的无功优化遗传算法[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(9): 42-45.
BI Peng-xiang, MIAO Zhu-mei, LIU Jian. Reactive Power Optimization Using Float Point Encoding Genetic Algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(9): 42-45.

- [6] 熊信银, 吴耀武. 遗传算法在电力系统中的应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
XIONG Xin-yin, WU Yao-wu. Genetic Algorithm & Its Application in Power Systems[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.
- [7] 王克文, 张建芬, 杨海晶, 等. 用灵敏度法确定变电站电容器组的在线投切[J]. 继电器, 2003, 31(9): 15-19.
WANG Ke-wen, ZHANG Jian-fen, YANG Hai-jing, et al. Sensitivity-based On-line Adjustment of Shunt Capacitors in Substation[J]. Relay, 2003, 31(9): 15-19.
- [8] 万盛斌, 陈明军. 基于改进遗传算法的电力系统无功优化[J]. 继电器, 2005, 33(15): 37-40, 81.
WANG Sheng-bin, CHEN Ming-jun. Reactive Power Optimization of Power System Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Relay, 2005, 33(15): 37-40, 81.
- [9] YU Jian-ming, DU Gang, YAO Li-xiao. Application of Genetic Algorithm Combining Sensitivity Analysis to Optimized Planning of Reactive Power Compensation for Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2002, 26(7).
- [10] ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Genetic Algorithms: Theory and Application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [11] LIU Xi-chun, YU Shou-yi. A Genetic Algorithm with Fast Local Adjustment[J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(1): 100-105.
- [12] CHEN Yan-qiu, ZHANG Yao, WEI Ying-hua. Application of Improved Genetic Algorithm Combining Sensitivity Analysis to Reactive Power Optimization for Power System[A]. in: IEEE Transactions on Restrictions Apply[C]. Nanjing(China): 2008.798-803.
- [13] 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. Analysis of Advanced Power Network[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [14] Kenji Iba. Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994.

收稿日期: 2009-05-13; 修回日期: 2009-11-11

作者简介:

周晓娟 (1982-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统经济运行; E-mail: zhouxiaojuan0371@163.com

蒋炜华 (1981-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统分析与控制保护;

马丽丽 (1982-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统经济运行与控制。

(上接第 31 页 continued from page 31)

1) 该方向元件实现原理及算法简单, 门槛的整定简单, 方向判别的灵敏度高。

2) 计算量仅存在于 0.3 ms 内对方向行波进行递归中值滤波后的能量计算, 因此, 计算复杂度较低, 具有超高速的动作特点。

3) 不受故障位置、类型、初始角、过渡电阻等的影响, 具有可靠稳定的方向识别性能。

4) 正方向故障时方向元件受母线接线方式的影响, 但母线反射系数值小于 1, 在极端情况下, 最低灵敏度也有 1.5, 满足动作可靠性的要求。

参考文献

- [1] 董杏丽, 董新洲, 张言苍. 基于小波变换的行波极性比较式方向保护原理研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 24(14): 11-15.
DONG Xing-li, DONG Xin-zhou, ZHANG Yan-cang. Directional Protective Relaying Based on Polarity Comparison of Travelling-wave by Using Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 24(14): 11-15.
- [2] Aggarwal R K, Johns A T, Tripp D S. The Development and Application of Directional Comparison Protection for Series Compensated Transmission System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1987, 2(4): 1037-1045.
- [3] DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi. Research on Ultra-high-speed Directional Relay of EHV/UHV Transmission Lines Using Wavelet Trans[J]. WSEAS Transaction on Circuits and System, 2004, 4(3): 896-901.
- [4] 段建东, 张保会, 周艺. 超高速暂态方向继电器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 7-12.
DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi. Study on Altra-high-speed Transient-based Directional Relay[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 7-12.
- [5] 罗四倍, 张保会, 曹瑞峰, 等. 基于中值滤波的超高速暂态量方向元件[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 64-69.
LUO Si-bei, ZHANG Bao-hui, CAO Rui-feng, et al. Altra-high-speed Transient Directional Unit Based on Median Filtering[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 64-69.

收稿日期: 2009-04-21; 修回日期: 2009-06-01

作者简介:

王寅 (1976-), 男, 工程师, 从事继电保护及变电站自动化方面的工作;

潘佩芳 (1980-), 女, 本科, 从事继电保护及变电站自动化方面的工作;

孔凡坊 (1984-), 男, 硕士, 从事继电保护及变电站自动化方面的工作。E-mail: kongfanfang2002@126.com