

基于暂态分量遗传算法的小电流接地故障定位方法

齐 郑¹, 乔 丰¹, 黄哲洙², 李 砚³, 张惠汐¹, 饶 志¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司, 辽宁 沈阳 110003;
3. 北京丹华昊博电力科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 对于小电流接地系统单相接地故障定位问题, 目前用于主站的定位方法较简单, 不适用于结构复杂的配电网, 且容错率较差。提出了一种基于暂态分量遗传算法的小电流接地故障定位方法, 故障发生后, 终端利用实时测量的暂态零序电流和零序电压的相位关系进行编码, 主站收到编码后启动遗传算法搜寻故障区段并输出定位结果。该方法同样适用不接地系统和谐振接地系统, 并且定位判据的获得比较简单, 各终端之间不需要GPS对时, 另外还具有一定的容错性。通过现场实际验证, 证明了该定位方法的可行性。

关键词: 小电流接地系统; 单相接地; 暂态分量; 遗传算法

Genetic algorithm fault location based on transient component for neutral point non-effective grounding system

QI Zheng¹, QIAO Feng¹, HUANG Zhe-zhu², LI Yan³, ZHANG Hui-xi¹, RAO Zhi¹

(1. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Shenyang Electric Power Co., Ltd, Shenyang 110003, China; 3. Beijing DanHua HaoBo Power Science and Technology Co., Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: Fault location methods for the neutral point non-effective grounding system single-phase grounding fault at host station are not suitable for complex network, which have weak fault tolerance. This paper presents a fault location method based on transient component genetic algorithm. The method encodes transient components using the phase relationship between transient zero-sequence current and bus zero-sequence voltage. Host station receives the code, searches for fault section by genetic algorithm and outputs search results. The method is also applicable to neutral non-grounding system and resonance grounding system, the terminals do not need GPS to compare time, and the criterion it needs is easy to obtain. The method also has fault tolerance. The on-site experiments have been carried out to prove the feasibility of the method.

Key words: neutral point non-effective grounding system; single-phase-to-earth fault; transient component; genetic algorithm

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0034-06

0 引言

小电流接地系统是电力系统中最靠近用户的环节, 其运行可靠性直接影响用户电能质量高低, 而小电流接地系统中发生最频繁的故障为单相接地故障, 在故障后保持正常运行的时间里, 易扩大为多点接地故障, 对供电可靠性造成很大威胁, 需要快速对其进行定位。

单相接地故障稳态故障信号微弱, 难以测量, 暂态量的故障特征较稳态量明显的多, 且不受消弧线圈影响, 因此基于暂态量的定位方法^[1-5]要优于基于稳态量的定位方法。

目前的基于 FTU 测量信息的定位方法^[6-7]不适用于装有大量 FTU 的复杂配电网; 矩阵法^[8]对故障信息的准确度要求很高, 限制了它的应用; 而基于专家系统、神经网络算法、蚁群算法的定位方法^[9-11]都未能真正用于实际系统; 遗传算法是故障定位算法中比较有实用价值的一种方法, 但是目前对于配电网遗传算法定位的研究都针对短路故障^[12-15], 并没有针对单相接地故障的遗传算法定位方法。

本文提出了一种基于暂态分量的遗传算法定位方法, 具有如下优点: 首先, 将暂态量作为故障判据, 使方法同样适用于中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统, 并且不论对于金属性单相

接地故障还是非金属性单相接地故障都能准确定位;其次,充分利用现场有大量三相五柱式 PT 投运,能够实现零序电压、电流实时测量的这一情况,利用故障后各个终端处暂态零序电流和零序电压的突变方向的比较结果进行编码,与比较各终端零序电流进行定位的方法相比,各终端之间不需要 GPS 定时,降低了获得定位判据的门槛;最后,遗传算法本身的容错性使得该方法在故障信息缺失的情况下也可以输出有一定可信度的定位结果。

1 基于暂态零序电流的遗传算法设计

遗传算法通过模拟生物种群进化的过程来寻找问题最优解,在配电网故障诊断问题中,遗传算法因其具有容错性、能够全局寻优的特点而具有很好的应用前景。本文提出的用于主站的基于暂态分量遗传算法的小电流接地故障定位方法,其基本定位步骤有:编码、初代种群生成、适应度检测、选择、交叉、变异、判断收敛、译码。

1.1 编码

因为遗传算法针对的对象是由 0-1 码构成的染色体数字串,所以用遗传算法解决故障定位问题,首先要实现从故障信息到 0-1 码数字串的转变,也就是编码过程:

(1) 终端状态编码

终端的具体编码方法是用小波法寻找暂态零序电流和电压的突变方向^[16],对比两者,把突变方向相反的终端编码为 1,突变方向相同的终端编码为 0。

(2) 区段状态编码

线路按终端安装位置划分成若干个区段,假设发生故障的区段编码为 1,没有发生故障的区段编码为 0。如图 1, s3 区段发生单相接地故障,这一区段状态用 0-1 码表示为 0010。

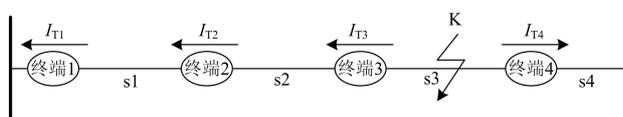


图 1 区段 s3 发生故障

Fig. 1 Fault in s3 zone

1.2 初始种群生成

初始种群是由 N 个染色体数字串组成的群体, N 为种群规模,种群中每一个染色体的长度 n 与区段的个数相同,染色体数字串的每一位代表相应区段的状态。如 $N=2$ 的染色体种群 $A=\{0010,0110\}$,每个染色体的长度 $n=4$,代表有四个区段,其中染

色体 0010 隐含的信息是区段 3 有故障,染色体 0110 隐含的信息是区段 2、3 都有故障。

初始种群中的染色体数字串都是随机生成的,遗传算法以初始种群作为第一代种群开始迭代。

1.3 适应度检测

适应度函数是遗传算法中衡量个体优劣的唯一标准,根据实际问题的不同具有不同的形式。本文采用的适应度函数如式 (1)。

$$E(s) = M - \left(\sum_{j=1}^n |I_{Tj} - I_{Tj}(s)| + \left(\sum_{i=1}^n s_i - 1 \right) \right) \quad (1)$$

式中: M 的数值取为实际安装终端个数的 2 倍; I_{Tj} 为第 j 个终端的终端状态编码; $I_{Tj}(s)$ 为第 j 个终端的终端状态函数, $I_{Tj}(s)$ 的计算公式如式 (2)。

$$I_{Tj}(s) = \prod_j s_i \quad (2)$$

式 (2) 中: s_i 是第 i 个区段的区段状态编码, \prod 是逻辑或的意思,意为若第 j 个终端下游(下游指的是从第 j 个终端到线路末端之间的线路,包括之间出现的所有分支线路)的各段状态编码至少有一个为 1 时,那么第 j 个终端的终端状态函数值为 1,否则为 0。

式(1)最右边的一项 $\sum_{i=1}^n s_i - 1$ 有两个作用:其一可避免适应度函数一值多解的问题,例如发生图 1 所示单相接地故障时,终端状态编码为 1110,假设式 (1) 中没有 $\sum_{i=1}^n s_i - 1$ 这一项,那么当区段状态编码为 0010、0110、1110 时,适应度值 $E(s)$ 都等于 M ;而加上 $\sum_{i=1}^n s_i - 1$ 一项之后,只有区段状态编码为 0010 时,适应度值 $E(s)$ 才等于 M ,其他区段状态下适应度值都小于 M 。其二是为了在母线至离母线最近终端之间区段发生故障的情况下形成收敛条件,例如图 2 中,母线与终端 1 之间发生单相接地故障,各终端零序电流流向如图所示,终端状态编码为 0000,当区段状态编码为 0000 时,由式(1)计算所得的适应度值 $E(s)$ 为最大值 $M+1$,可据此判断故障区段在母线与终端 1 之间。

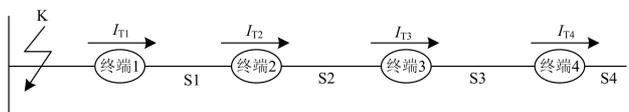


图 2 母线与终端 1 之间发生故障

Fig. 2 Fault between bus and first terminal

1.4 选择、交叉和变异

选择过程采用最优保持和轮盘赌的混合选择机制,这一机制确保种群中适应度高的个体被选中的概率高于那些适应度低的个体,同时保持每一代

种群中的最优个体不会被淘汰。

交叉过程和变异过程通过交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 来控制, 本文将交叉概率选为 0.6, 变异概率选为 0.01。

1.5 收敛条件判断

本文设计遗传算法收敛条件有 2 个: 一是种群中出现适应度值等于 M 或等于 $M+1$ 的个体; 二是算法达到最大迭代次数。两者满足其一算法就会停止迭代, 输出最优个体 (最优个体是指适应度值最大的, 且区段状态编码各位数字相加之和最小的个体), 转而进入下一步译码过程。

1.6 译码

译码是区段状态编码的逆过程, 算法结束后, 对最优个体的区段状态编码进行译码, 编码中数字 1 的位置所代表的区段即为故障区段。

1.7 遗传定位方法的容错性

实际中单相接地故障发生后, 经常会发生 FTU 上传故障信息不及时, 甚至根本不上传的情况, 影响定位的准确性。而遗传算法具有高容错性, 在故障信息缺失情况下, 定位效果优于其他方法, 这是遗传算法在配网故障诊断中的最大优势。下面将举例说明本文设计的遗传算法定位方法在故障信息缺失情况下所具有的容错性。

如图 3 所示的系统, 根据 6 台终端安装位置将线路划分为 $s_1 \sim s_6$ 六个区段, 单相接地故障设置为在 s_5 区段发生, 图中箭头表示了各终端测得暂态零序电流流向。

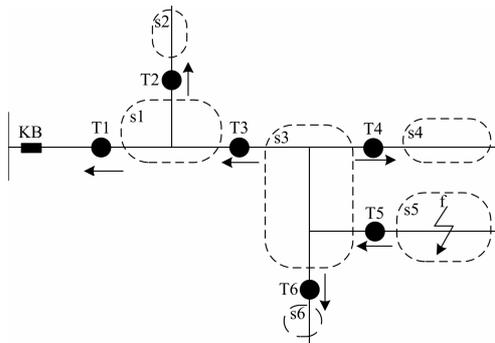


图 3 系统线路图
Fig. 3 Circuit diagram

根据 1.1 节中的编码原则可得终端状态编码如表 1 所示。

表 1 终端状态编码
Table 1 FTU status codes

T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	0	1	0	1	0

基于表 1 的终端状态编码, 按照式 (1) 计算适

应度值 (M 的值取为 12), 可得出当区段状态编码为 000010 时, 适应度值有最大值 12, 算法最终输出最优个体为 000010, 译码可知故障区段为 s_5 。

现假设故障发生时终端 T2 没有上传信息, 主站默认故障信息缺失终端 T2 的终端状态编码为 1, 主站实际的终端状态编码如表 2 所示。

表 2 终端状态编码 (故障信息缺失)

Table 2 FTU status codes (fault information missing)					
T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	1	1	0	1	0

基于表 2 的终端状态编码, 按照式 (1) 计算适应度值, 可得出当区段状态编码为 000010 和 010010 时, 均有最大适应度值 11, 而根据 1.6 节对于最优个体的定义可知, 000010 应该为最优个体, 因此算法最终输出最优个体为 000010, 译码可知故障区段为 s_5 。这说明, 在终端 T2 故障信息缺失的情况下, 算法所具有的容错性能够确保定位结果的准确性。类似的情况在 T4、T5 故障信息缺失的情况下也都有所体现。

2 基于暂态零序电流的遗传算法实现过程

根据上述方案设计而成的用于小电流接地系统单相接地故障定位的遗传算法, 其具体实现流程如图 4 所示。

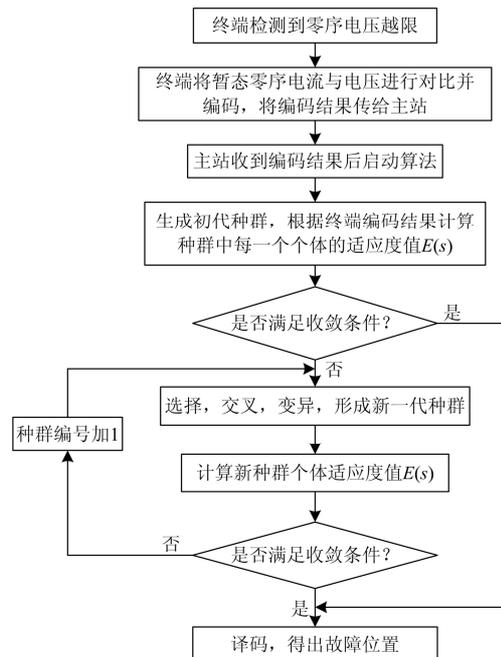


图 4 遗传算法流程图

Fig. 4 Genetic algorithm process

终端实时检测安装位置处三相五柱式 PT 和 CT

的合成零序电流、电压, 一旦有终端检测到零序电压幅值超过预设的启动值后, 所有终端立刻捕捉到零序电压超过启动值前 2 个周期和超过启动值后 2 个周期的暂态零序电流和电压信号, 然后用小波法寻找突变方向, 经对比后进行终端状态编码, 并将编码结果上传给主站; 主站收到编码结果后, 首先启动遗传算法, 生成初始种群; 然后根据各个终端传来的终端状态编码, 计算种群个体的适应度值, 判断收敛与否, 若满足收敛条件则直接进入最终的译码环节, 若不满足收敛条件则进入选择、交叉、变异过程, 生成新一代种群, 对新一代种群再次进行适应度计算, 判断收敛与否, 若满足收敛条件则直接进入最终的译码环节, 若不满足收敛条件则将种群编码加 1, 再进行新一轮的选择、交叉、变异过程, 如此往复循环, 直至满足收敛条件或者达到最大迭代次数为止。

3 现场测试情况

由上述的设计方案形成了内置遗传算法定位软件的主站和暂态量测量终端, 并在现场线路上进行了安装测试。现场的线路图如图 5 所示, 矩形表示出线断路器 (实心矩形表示出线断路器闭合, 空心矩形表示出线断路器断开), 方块表示分段断路器 (实心方块表示分段断路器闭合, 空心方块表示分段断路器断开), 实心圆圈表示终端。

终端具有“二遥”功能, 可以将编码结果通过 GPRS 上传给主站。主站为一台工业用计算机, 安装有遗传算法定位软件。

设置了两种不同运行方式下的单相接地故障, 算法诊断故障的情况如下。

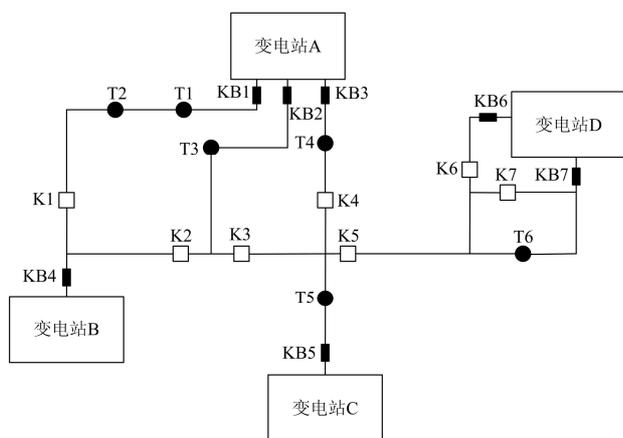


图 5 现场线路图

Fig. 5 On-site circuit diagram

3.1 第一种运行方式下模拟故障

如图 6 所示, 第一种运行方式为所有分段开关全部断开, 根据终端安装位置将线路划分为 s1~s5 五个区段。故障类型设置为在图中 s2 区段发生 A 相接地故障。

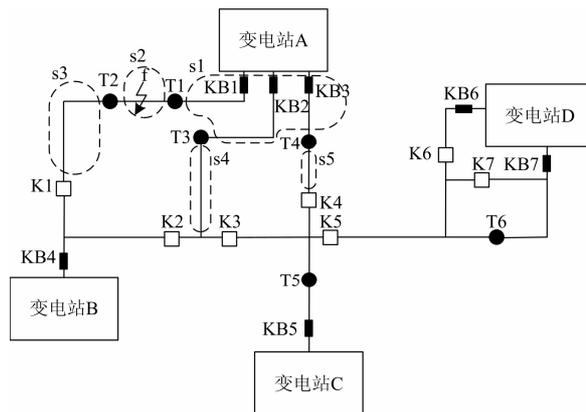


图 6 第一种运行方式

Fig. 6 The first operation mode

在这一运行方式和故障类型下, 终端 T1~T4 能够检测到零序电压超过预设的启动值, 之后这些终端立刻捕捉到零序电压超过启动值前 2 个周期和超过启动值后 2 个周期的暂态零序电流和电压信号, 然后用小波法寻找突变方向, 经对比后进行终端状态编码, 并将编码结果上传给主站, 终端状态编码如表 3 所示, 各终端暂态零序电流和零序电压波形如图 7 所示。

表 3 第一种运行方式下的终端状态编码

Table 3 FTU status codes on the first operation mode

T1	T2	T3	T4
1	0	0	0

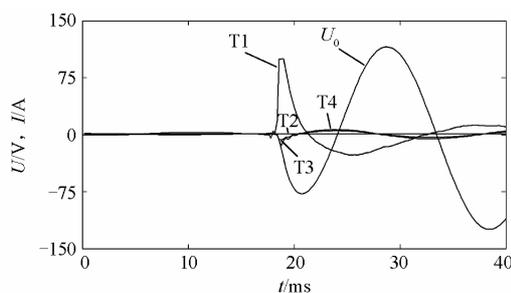


图 7 第一种运行方式下的暂态零序电流和零序电压

Fig. 7 Transient zero-sequence current and transient zero-sequence voltage on the first operation mode

3.2 第二种运行方式下模拟故障

如图 8 所示, 第二种运行方式为分段开关 K4 闭合, 变电站 C 的出线断路器 KB5 断开, 其他分段开关均断开, 根据终端安装位置将线路划分为

s1~s5 五个区段。故障类型设置为在图中 s5 区段发生 A 相接地故障。

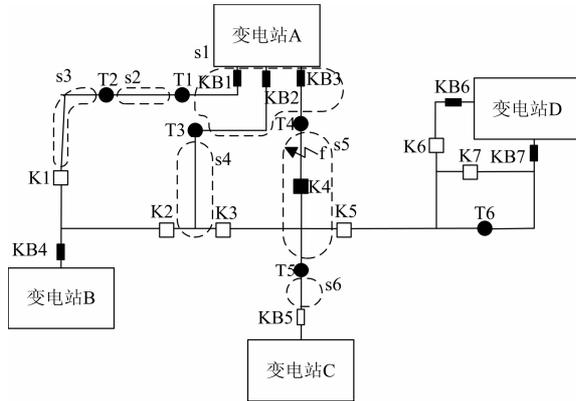


图 8 第二种运行方式

Fig. 8 The second operation mode

在这一运行方式和故障类型下，终端 T1~T5 检测到零序电压超过预设的启动值，之后终端将测得的暂态量进行编码，上传终端状态编码给主站，终端状态编码如表 4 所示，各终端暂态零序电流和零序电压波形如图 9 所示。

表 4 第二种运行方式下的终端状态编码

Table 4 FTU status codes on the second operation mode

T1	T2	T3	T4	T5
0	0	0	1	0

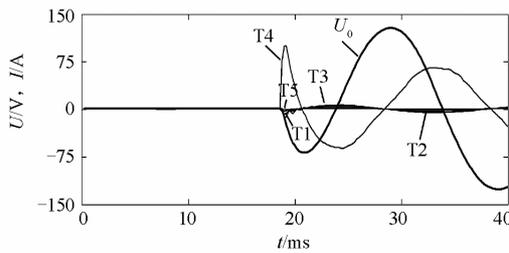


图 9 第二种运行方式下的暂态零序电流和零序电压

Fig. 9 Transient zero-sequence current and transient zero-sequence voltage on the second operation mode

主站得到终端状态编码，启动遗传算法搜寻故障区段，最终输出的结果为 s5 区段发生单相接地故障，准确定位出了故障区段。

4 结论

本文提出了基于暂态量的遗传算法单相接地定位方法，设计了基于暂态零序电流和暂态零序电压突变方向比较的编码原则以及遗传算法定位过程，举例说明了方法的容错性。另外根据该定位方法编写了用于主站的遗传算法定位软件，通过现场

测试，证明该方法在多种运行方式下都可以准确地定位出单相接地故障区段。

参考文献

- [1] 孙波, 张承慧, 孙同景, 等. 基于暂态相电流的小电流接地故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 69-74.
SUN Bo, ZHANG Cheng-hui, SUN Tong-jing, et al. Earth fault location based on transient phase current in non-solidly earthed network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 69-74.
- [2] 马士聪, 徐丙垠, 高厚磊, 等. 检测暂态零模电流相关性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 48-51.
MA Shi-cong, XU Bing-yin, GAO Hou-lei, et al. An earth fault locating method in feeder automation system by examining correlation of transient zero mode currents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 48-51.
- [3] 张林利, 徐丙垠, 薛永端, 等. 基于线电压和零模电流的小电流接地故障暂态定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 110-115.
ZHANG Lin-li, XU Bing-yin, XUE Yong-duan, et al. Transient fault locating method based on line voltage and zero-mode current in non-solidly earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 110-115.
- [4] 李斌, 束洪春. 基于瞬时实功率和瞬时虚功率的谐振接地系统单相接地选线新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 183-190.
LI Bin, SHU Hong-chun. A new integration method of fault line detection in resonant earthed system based on instantaneous real power and instantaneous virtual power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 183-190.
- [5] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 172-178.
JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 172-178.
- [6] 杜刚, 刘迅, 苏高峰. 基于 FTU 和“S”信号注入法的配电网接地故障定位技术的研究[J]. 电力系统保护与

- 控制, 2010, 38(12): 73-76.
- DU Gang, LIU Xun, SU Gao-feng. Research on technology of grounding fault location combining FTU and "S" signal injecting method in distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 73-76.
- [7] 齐郑, 郑朝, 杨以涵. 谐振接地系统单相接地故障区段定位方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 77-80.
- QI Zheng, ZHENG Zhao, YANG Yi-han. Research on method of single-phase-to-earth fault section location in neutral point resonant grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 77-80.
- [8] 齐郑, 高玉华, 杨以涵. 配电网单相接地故障区段定位矩阵算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 159-163.
- QI Zheng, GAO Yu-hua, YANG Yi-han. Research on matrix-based algorithm for single-phase-to-earth fault section location in distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 159-163.
- [9] Vazquez M E, Chacon M O L, Altuve F H J. An on-line expert system for fault section diagnosis in power system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 357-362.
- [10] Thukaram D, Khincha H P, Vijaynarasimha H P. Artificial neural network and support vector machine approach for locating faults in radial distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 710-721.
- [11] 王林川, 李庆鑫, 刘新全, 等. 基于改进蚁群算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 29-33.
- WANG Lin-chuan, LI Qing-xin, LIU Xin-quan, et al. Distribution network fault location based on the improved ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 29-33.
- [12] 郭壮志, 陈波, 刘灿萍, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 88-92.
- GUO Zhuang-zhi, CHEN Bo, LIU Can-ping, et al. Fault location of distribution network based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 88-92.
- [13] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130.
- WEI Zhi-nong, HE Hua, ZHENG Yu-ping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.
- [14] 严太山, 崔杜武, 陶永芹. 基于改进遗传算法的配电网故障定位[J]. 高压技术, 2009, 35(2): 255-259.
- YAN Tai-shan, CUI Du-wu, TAO Yong-qin. Fault location for distribution network by improved genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 255-259.
- [15] 文福拴, 邱家驹, 韩祯祥. 只利用断路器信息诊断电力系统故障的高级遗传算法[J]. 电工技术学报, 1996, 11(2): 58-64.
- WEN Fu-shuan, QIU Jia-ju, HAN Zhen-xiang. A refined genetic algorithm for fault section estimation using information from circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1996, 11(2): 58-64.
- [16] 贾清泉, 刘连光, 杨以涵, 等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 78-82.
- JIA Qing-quan, LIU Lian-guang, YANG Yi-han, et al. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 78-82.

收稿日期: 2013-04-22; 修回日期: 2013-09-11

作者简介:

齐 郑(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制、配电网自动化等;

乔 丰(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网自动化。E-mail: erving@qq.com