

# 配电网单相接地故障选线中小波选取问题研究

龚 静

(北京建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 利用小波变换实现配电网单相接地故障选线时, 小波的选取对奇异性检测的结果有着直接的影响, 选取不当将会导致误判。从小波自身特性出发, 研究和分析了小波的正交性、消失矩阶数、正则性和支撑长度的内在联系及其对奇异性检测的影响, 给出了配电网单相接地故障选线中小波选取应遵循的5条原则, 即应该选择消失矩阶数较高、正则性好、支撑长度长的正交小波, 根据所提出的原则, 筛选了有代表性的三种小波 Haar、Db10、Coiflet4 进行多种故障条件下的比较实验, Matlab 实验证明了所提出的小波选取原则的正确性和有效性。

**关键词:** 故障选线; 小波选取; 消失矩; 奇异性检测; 模极大值

## Study of wavelet selection for single-phase earth fault line selection in distribution network

GONG Jing

(Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** When using wavelet transformation to realize distribution network single-phase earth fault line selection, the wavelet selection has the direct influence on singularity detection result. If wavelet selection is inappropriate, it would cause the miscarriage of justice. Orthogonality, cancellations, regularity and support length of wavelet and their influences on singularity detection are studied in this paper. Five wavelet selection principles in distribution network single-phase earth fault line selection are proposed. Under the permissibility condition, the orthogonality wavelet having higher cancellations, better regularity and longer support length should be chosen. Based on these principles, three representative wavelet Haar, Db10, Coiflet4 are chosen in experiment under many different fault conditions. MATLAB simulation results show that the wavelet selection principles are correct and effective.

**Key words:** fault line selection; wavelet selection; cancellations; singularity detection; module maximum

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)18-0005-06

## 0 引言

配电网广泛采用中性点非有效接地方式, 其单相接地故障率最高, 发生单相接地后, 非故障相电压升高 $\sqrt{3}$ 倍, 危及系统绝缘, 因此为防止事故扩大, 希望尽快找出故障线路, 然而由于系统接地电流小, 仅为线路对地电容电流, 因此其故障选线一直是电力部门未能很好解决的一大难题<sup>[1]</sup>。国内外文献提出了诸多选线方法, 有基于稳态量的选线方法, 如零序电容电流补偿法、最大投影差值法, 有基于暂态量的能量法等等, 比较而言, 由于暂态量特征明显, 是稳态量的若干倍, 因此充分利用暂态量丰富的特征信息进行分析可以有效提高选线的可靠性<sup>[2]</sup>。

近年来, 小波理论的出现, 为分析暂态量提供了一个非常好的工具。小波变换可以用不同的尺度

观察信号和用不同的分辨率分解信号, 具有很好的时频局部化作用, 因而利用小波变换可以很好地获得与信号奇异性相关的信息并进行特征提取。配电网发生单相接地故障时, 暂态量的突变点也就对应信号的奇异点, 利用小波变换的模极大值特性, 可以很好地检测出信号中奇异点的位置。

在利用小波进行奇异性检测时, 由于各小波特性的不同, 其奇异性检测的效果是大不一样的, 选择什么样的小波对于故障选线的准确性至关重要, 目前对于故障选线中小波究竟应该如何选取并没有文献进行详细说明, 不同文献选择了不同的小波, 如文献[3]选择的 Coiflet3 小波, 文献[4]选择的 Db5 小波, 文献[5]选择的 Db10 小波, 文献[6]选择的 Db15 小波, 文献[7]选择的 Haar 小波, 但这些文献都没有说明具体的选取原则。针对这一问题, 本文详细研究了小波的正交性、消失矩阶数、正则性和支撑长度对奇异性检测的影响, 提出了故障选线中

小波选取的 5 条原则,应用 Matlab 仿真验证了其正确性和可靠性。

### 1 单相接地故障特征及模极大值判据

#### 1.1 单相接地故障特征

当单相接地故障发生后,在故障点便有衰减很快的暂态电容电流和衰减较慢的暂态电感电流流过。不论电网的中性点为谐振接地或不接地方式,暂态接地电流的幅值和频率均主要有暂态电容电流所确定,其幅值同时和初始相角有关<sup>[8]</sup>。关于暂态过程的分析,一般书上都有详细介绍,此处不再赘述,仅将暂态特征的几点重要结论归纳如下:

①全系统都将出现零序电压。

②当发生单相接地故障时,过渡过程中前半波的最大电流值和稳态电容电流值之比,近似等于共振频率与工频频率之比,暂态电流值较稳态值大几倍到几十倍<sup>[9]</sup>。

③暂态过程不受中性点接地方式的影响。

④故障线路零序暂态电流突变量最大,为所有非故障线路零序暂态电流之和,且突变方向与非故障线路相反。

⑤当所有线路零序暂态电流突变方向相同时,为母线故障。

#### 1.2 模极大值判据

小波变换能够同时在时域和频域突出信号的局部特性,小波变换的突变点和极值点与信号的突变点和极值点具有对应关系,根据小波的奇异性检测原理,有结论:当小波函数可看作某一平滑函数的一阶导数时,信号小波变换模的局部极值点对应信号的突变点;当小波函数可看作某一平滑函数的二阶导数时,信号小波变换模的过零点,也对应信号的突变点。这就是采用检测小波变换系数模的过零点和局部极值点检测信号突变点的奇异性原理<sup>[10]</sup>。信号的突变点对应小波变换后系数的模极大值点,再结合 1.1 的故障特征,可以得到利用模极大值实现故障选线的判据如下:

①若某条线路模极大值最大,且极性与其它线路相反,则该线路为故障线路。

②若所有线路模极大值极性相同,则为母线故障。

### 2 小波特性及选取原则

#### 2.1 正交性

设  $\Psi(t)$  满足容许条件,如果其二进伸缩和平移得到的小波基函数,即  $\Psi_{m,k}(t) = 2^{-\frac{m}{2}}\Psi(2^{-m}t - k), m, k \in Z,$

构成了  $L^2(R)$  的规范正交基,则称  $\Psi(t)$  为正交小波,称  $\Psi_{m,k}(t)$  为正交小波基函数,而相应的离散小波变换为正交小波变换<sup>[11]</sup>。

正交性描述了数据小波表示的冗余程度,在高分辨率分析下,酉变换在不同子空间上的投影是  $L^2(R)$  意义的最佳逼近,严格的规范正交特性有利于小波分解系数的精确重构。如果小波能够保证正交性,则得到的时间一尺度平面上的系数是互不相关的,从而消除了相邻时刻信号之间的相互影响,在一定程度上避免因小波变换之间的关联而造成分析变换结果困难的问题。

#### 2.2 消失矩阶数

定义<sup>[11]</sup>:若  $\Psi(x)$  为小波函数,当且仅当对于所有的正整数  $k < n, \Psi(x)$  满足  $\int_{-\infty}^{\infty} x^k \Psi(x) dx = 0,$  则称  $\Psi(x)$  具有  $n$  阶消失矩。

上述定义表明:小波的消失矩特性使函数在小波展开时能够消去其  $n$  阶以下的平滑部分,即能够使函数展开式中前  $n-1$  项的系数为零,使我们能研究高阶变化和某些高阶导数中存在的特性。

定理<sup>[11]</sup>:设  $n$  为一正整数且  $\alpha \leq n,$   $f(x) \in L^2(R)$  在点  $x_0$  上为 Lipschitz  $\alpha,$  则存在常数  $A > 0,$  使得对于  $x_0$  的一个邻域内的所有点  $x$  和任意尺度  $s > 0,$  有:  $|Wf(u, s)| \leq A(s^\alpha + |x - x_0|^\alpha),$  反之,设  $f(x)$  是有界的且对某个非整数的  $\alpha \leq n,$   $f(x)$  在  $x_0$  处为 Lipschitz  $\alpha,$  若存在  $\varepsilon > 0$  和常数  $A, B > 0,$  则对于  $x_0$  的一个邻域内的所有点  $x$  和任意尺度  $s,$  有  $|Wf(u, s)| \leq As^\varepsilon, |Wf(u, s)| \leq B \left| s^\alpha + \frac{|x - x_0|^\alpha}{|\log|x - x_0||} \right|。$

上述定理表明,如果小波恰有  $n$  阶消失矩,那么对 Lipschitz  $\alpha > n,$  小波变换的衰减性就不能给出  $f$  的 Lipschitz 正则性的任何信息,也就是说,在这种情况下,小波变换达不到检测信号奇异性的目的。

消失矩直接反映了小波变换后能量的集中程度,也即小波函数的消失距阶数越高,则对于信号突变奇异点的检测能力越强,然而由于在某一尺度,模极大值点的数目通常与小波消失矩的数目成线性增长关系,这样,随着消失距阶数的增加,相应变换方程也越复杂,计算越复杂。

#### 2.3 正则性

定义<sup>[12]</sup>:设  $0 < \alpha < 1,$  若对于任意  $t, \beta \in R,$  有  $|\Psi(t + \beta) - \Psi(t)| < c|\beta|^\alpha,$  则称  $\Psi(t)$  的正则性阶数为  $\alpha,$  其中  $c$  是一个与  $t, \beta$  无关的常数。

函数的局部正则性常用 Lipschitz 指数来度量。如果  $f(x)$  在  $v$  点的 Lipschitz 指数小于 1, 则称函数在  $v$  点是奇异的; 若  $f(x)$  的 Lipschitz 指数  $\alpha_0$  满足  $n < \alpha_0 < n+1$ , 则  $f(x)$  在  $v$  点是  $n$  次可微的, 但其  $n$  次导数  $f^{(n)}(t)$  在  $v$  点是奇异的, 它的 Lipschitz 指数为  $\alpha_0 - n$ ; 负的 Lipschitz 指数意味着函数具有比不连续 ( $\alpha = 0$ ) 更大的奇异性。

如果小波变换在细尺度下没有模极大值, 那么  $f$  一定是局部正则的。正则性描述了函数的光滑程度, 正则性与支撑集大小有关, 支撑越大, 正则性越好。

### 2.4 支撑长度

定义<sup>[12]</sup>: 对给定的  $\epsilon < 0$ , 必然存在一个最小的整数  $N$ , 当  $|n-a| \geq N$  时, 有  $g(n-a) < \epsilon$  成立, 则  $2N$  称为  $g(n)$  的有效空域支撑。

一般要求小波基是紧支撑集, 紧支小波基的重要性在于它在数字信号的离散小波分解过程中可以提供系数有限的、更实际的 FIR 滤波器; 非紧支撑小波在实际运算时必须截断。

对于信号的局部分析, 要求小波函数在时域上具有紧支撑, 即存在区间  $U$ , 使得小波函数在  $U$  之外的区间均为 0。简单地说, 越窄的小波越适合时域信号的局部分析。

### 2.5 选取原则

综上所述, 当小波用于故障选线时, 最关心的是其信号突变检测能力和时频局部化分析能力, 所以故障选线中小波选取一般应遵循如下原则:

①选择正交小波。正交性越强, 冗余性越低, 用正交小波由多尺度分解得到的各子带数据分别落在相互正交的子空间中, 使各子带数据相关性减小。

②选择具有较高消失矩阶数的小波。小波的消失矩特性在检测信号奇异性的应用中有着极其重要的作用, 消失矩特性反映了一个小波函数对信号低阶部分消去的能力, 即小波变换将仅反映信号  $n$  阶以上的奇异性, 消失矩越高, 奇异性突变检测能力越强, 但实际中还应考虑计算复杂性进而实时性的影响。

③选择正则性好的小波。为了检测信号中的奇异点, 滤波器长度不能太短, 否则灵敏度不高, 可能误判, 因此为实现一个更长的冲击响应滤波器, 所选小波正则性要高。

④选择支撑长度长的小波。支撑长度越短, 越适合时域信号的局部分析; 反之, 支撑长度越长, 越适合频域信号的局部分析。故障选线时, 为防止

频率叠混, 对时间局部性要求不高, 而对频域局部性要求很严格。

⑤对小波的对称性不作重点要求。对称性可以保证小波的滤波特性具有线性相位, 这在利用暂态量的故障选线中要求不是很高。

## 3 仿真比较实验及分析结论

在目前可以用的诸多小波中, Gaus、Dmey、RbioNr.Nd、Cgau、Cmor、Fbsp、Shan 等小波不具有紧支撑正交性, Biorthogonal、Morlet、Mexican Hat 无正交性, Meyer 无紧支撑性, 所以对于这些小波不考虑。Haar、Db、Coiflets、Symlets 是具有紧支撑的正交小波, 其中 Symlets 是对 Db 的一种改进, 其消失矩阶数、滤波器长度、支撑长度等均与 Db 相同, 基于以上分析, 限于篇幅, 这里选取有代表性的三种小波 Haar、Db10、Coiflet4 来进行比较实验。利用 Matlab 建立仿真模型, 模拟 5 条出线的 10 kV 配电网, 线路长度依次为 15, 25, 20, 25, 10 km, 消弧线圈过补偿度 8%。

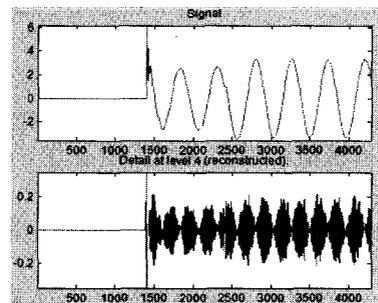


图 1  $i_{05}$  用 Haar 小波分解后的波形  
Fig.1 Waveform of  $i_{05}$  after wavelet decomposition with Haar

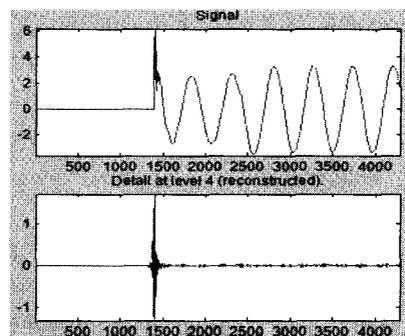


图 2  $i_{05}$  用 Db10 小波分解后的波形  
Fig.2 Waveform of  $i_{05}$  after wavelet decomposition with Db10

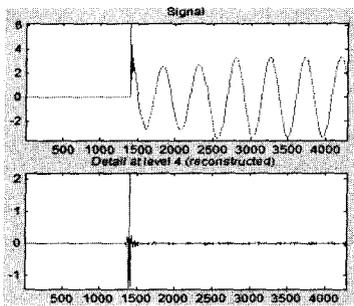


图3  $i_{05}$  用 Coiflet4 小波分解后的波形  
Fig.3 Waveform of  $i_{05}$  after wavelet decomposition with Coiflet4

①实验 1: 故障发生在 C 相电压峰值时刻, 线路 5 即 10 km 线路经过渡电阻 (2 000  $\Omega$ ) 短路接地。对故障线路 5 的零序电流  $i_{05}$  用 Haar、Db10、Coiflet4 进行 4 层小波分解, 如图 1、2、3 所示, signal 表示  $i_{05}$  的原始信号波形, 下面分别对应 d4 尺度的小波分解波形。

图 1 与图 2 的比较:

波形分析: 图 1 中模极大值为 0.28, 图 2 中模极大值为 1.5 左右, 对比图 1 和图 2 中 d4 的波形可见, 图 1 中, 用 Haar 小波分解后在采样点 1 500 点到 4 000 点之间小波变换的值是很大的, 若稍有干扰, 则这部分波形的极值很可能超过故障突变点 1400 点的模极大值, 带来误判; 图 2 中, 而用 Db10 小波分解后在采样点 1 500 点到 4 000 点之间小波变换的值几乎为 0, 故障突变点的模极大值非常明显, 易于故障判断。

原因分析: Haar 小波的消失矩阶数为 1, 而 Db10 小波的消失矩阶数为 10, 上述波形验证了选取原则 2: 消失矩阶数越高奇异性检测效果越好; Haar 小波的滤波器长度为 2, 太短不利于故障检测, 而 Db10 小波的滤波器长度为 20, 验证了选取原则 3: 为了检测信号中的奇异点, 滤波器长度不能太短; Haar 小波的支撑长度为 1, 而 Db10 小波的支撑长度为 19, 验证了选取原则 4: 应选择支撑长度长的小波利于频域分析。

图 3 与图 1、图 2 的比较:

波形分析: 故障突变点的检测上, 图 3 在采样点 1 500 点到 4 000 点之间小波变换的值几乎为 0, 所以 Coiflet4 小波比 Haar 小波的奇异性检测效果好; 对比图 3 与图 2 的模极大值, 图 3 中模极大值为 2.2, 较图 2 中模极大值 1.5 大, 也就是说, Coiflet4 小波比 Db10 小波检测效果更好。

原因分析: Coiflet4 滤波器长度为 24, 较 Db10 的滤波器长度 20 大; Coiflet4 的支撑长度为 23, 较

Db10 的支撑长度 19 大。

综上所述, 显然, 故障选线中, 奇异性检测效果 Db10 明显优于 Haar, Coiflet4 稍优于 Db10。

②实验 2: 故障发生在 C 相电压峰值时刻, 线路 5 即 10 km 线路直接接地。对故障线路 3 的零序电流  $i_{03}$  用 Db1、Db10 进行 4 层小波分解, 如图 4、图 5 所示, signal 表示  $i_{03}$  原始信号波形, 下面分别对应 d1 尺度的小波分解波形, 由图可见, 此时因接地电阻较实验 1 小很多, 因此对应的暂态过渡过程更明显, 从对应纵坐标的数值可见, 较实验 1 大很多。

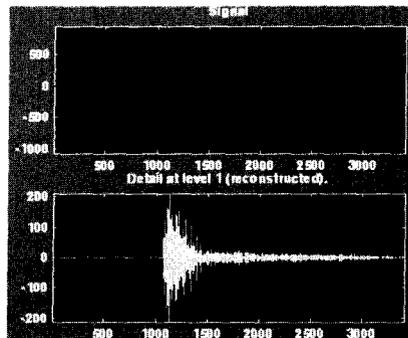


图 4  $i_{03}$  用 Db1 小波分解后的波形  
Fig.4 Waveform of  $i_{03}$  after wavelet decomposition with Db1

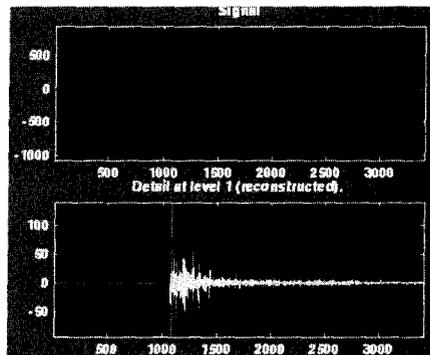


图 5  $i_{03}$  用 Db10 小波分解后的波形  
Fig.5 Waveform of  $i_{03}$  after wavelet decomposition with Db10

对  $i_{03}$  用 Db1 小波进行 4 层分解, 模极大值位置非常不明显, 见图 4, 根据模极大值会错误判断故障时刻, 从而导至极性判断错误。对  $i_{03}$  用 Db10 小波进行 4 层分解, 模极大值位置明显, 见图 5。这是因为对于 Db 系小波, 随着序号  $N$  的增加, 消失矩阶数增加, 滤波器长度变长, 正则性增加, 频域局部性变好, 支撑长度变长, 所以  $N$  越大, 检测效果越好, 这符合本文所提的小波选取原则。

③实验 3: 故障发生在 C 相电压过零时刻,

线路 5 即 10 km 线路经 500  $\Omega$  电阻接地。对故障线路 3 的零序电流  $i_{03}$  用 Haar、Db10、Coiflet4 进行 4 层小波分解, 如图 6、图 7、图 8 所示, signal 表示  $i_{03}$  原始信号波形, 下面分别对应 d1 尺度的小波分解波形。

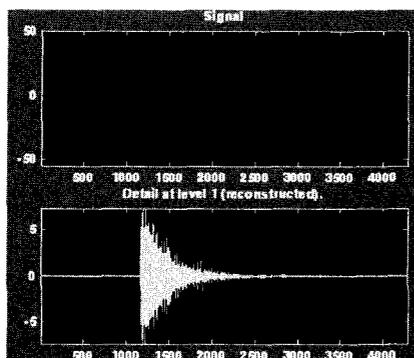


图 6  $i_{05}$  用 Haar 小波分解后的波形  
Fig.6 Waveform of  $i_{05}$  after wavelet decomposition with Haar

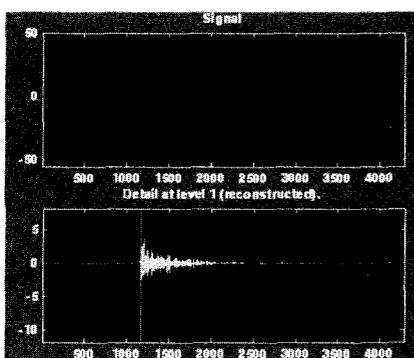


图 7  $i_{05}$  用 Db10 小波分解后的波形  
Fig.7 Waveform of  $i_{05}$  after wavelet decomposition with Db10

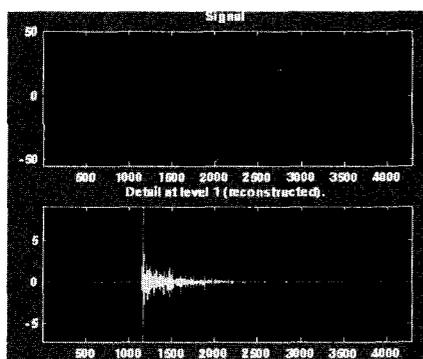


图 8  $i_{05}$  用 Coiflet4 小波分解后的波形  
Fig.8 Waveform of  $i_{05}$  after wavelet decomposition with Coiflet4

从图 6、图 7、图 8 显而易见, 经 Db10 和 Coiflet4 分解后的波形模极大值突出且位置明显, 见图 7、图 8; 而经 Haar 分解后的波形模极大值不突出, 无法清晰判别, 见图 6; 原因分析可参见实验 1; 同时, 还可以看到, 图 8 的模极大值为 9, 而图 7 的模极大值为 6, 证明 Coiflet4 较 Db10 检测效果好, 所以实验 3 进一步证明了即使改变故障条件, 实验 1 的结论 (奇异性检测效果 Db10 明显优于 Haar, Coiflet4 稍优于 Db10) 仍然是正确的, 本文所提出的选取原则仍然有效。

## 4 结论

小波变换具有很好的时频局部化特性, 本文在总结故障暂态特征的基础上, 结合小波对突变信号的奇异性检测原理, 给出了模极大值的选线判据。奇异性检测中小波选取至关重要, 本文在分析小波特性的基础上, 给出了故障选线中小波选取的 5 条原则, 即在满足容许性条件的前提下, 消失矩阶数越高、正则性越好、支撑长度越长的正交小波, 其奇异性检测效果越好, Matlab 仿真实验表明: 故障选线中, 奇异性检测效果 Db10 明显优于 Haar, Coiflet4 稍优于 Db10, 实验证明了本文所提小波选取原则的正确性和有效性。本文所提出的选取原则对单相接地故障选线的小波选取及新颖小波的构造具有重要的理论指导价值。

## 参考文献

- [1] 张帆, 潘贞存, 张慧芬, 等. 基于零序电流暂态极大值的小电流接地选线新判据[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (4): 45-48.  
ZHANG Fan, PAN Zhen-cun, ZHANG Hui-fen, et al. New Criterion of Fault Line Selection in Non-solidly Earthed Network Based on the Maximum of Zero Sequence Transient Current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (4): 45-48.
- [2] 孙雅明, 苗友忠. 谐振接地配电系统馈线单相接地故障的暂态保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 62-66.  
SUN Ya-ming, MIAO You-zhong. A New Principle of Transient Current Grounded Relay for Feeder in Resonant Grounded Distribution Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 62-66.
- [3] 陈少华, 桂存兵, 雷宇, 等. 基于小波包的永久性单相接地故障的故障选线的仿真研究[J]. 继电器, 2007, 35(1): 18-20.  
CHEN Shao-hua, GUI Cun-bing, LEI Yu, et al. Simulation and Research on Permanent Single-phase to Ground Fault Based on Wavelet Packets[J]. Relay, 2007, 35(1): 18-20.

[4] 王耀南, 霍百林, 王辉, 等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 54-58.  
WANG Yao-nan, HUO Bai-lin, WANG Hui, et al. A New Criterion for Earth Fault Line Selection Based on Wavelet Packets in Small Current Neutral Grounding System[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-58.

[5] 戴剑锋, 张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44-47.  
DAI Jian-feng, ZHANG Yan-xia. Study on Adaptively Choosing Fault line Under Single-phase to Grounded Fault Based on Analysis of Multi-frequency Bands[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 44-47.

[6] 潘露, 吕艳萍, 于芳, 等. 基于相频特性与多频带分析的小电流接地系统故障选线[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 76-79.  
PAN Lu, Lü Yan-ping, YU Fang, et al. Fault Line Selection in Non Solidly Earthed Network Based on Phase-frequency Characteristic and Multi-frequency Band Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 76-79.

[7] 庞清乐, 孙同景, 钟麦英. 基于小波包分析的配电网选线新方法[J]. 电网技术, 2006, 30 (S): 394-397.  
PANG Qing-le, SUN Tong-jing, ZHONG Mai-ying. New Criterion of Faulty Line Detection for Distribution Networks Based on Wavelet Packet Analysis[J]. Power System Technology, 2006, 30 (S): 394-397.

[8] 齐郑, 杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线

技术分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (14): 1-5.  
QI Zheng, YANG Yi-han. Analysis of Technology of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Faults in Neutral Point Non-effective Grounded System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (14): 1-5.

[9] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Power System Protected Relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

[10] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
SUN Yan-kui. Wavelet Analysis and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

[11] 徐晨, 赵瑞珍, 甘小冰. 小波分析应用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
XU Chen, ZHAO Rui-zhen, GAN Xiao-bing. Wavelet Analysis Application Algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[12] 陈仲英, 巫斌. 小波分析[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
CHEN Zhong-ying, WU Bin. Wavelet Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2007.

收稿日期: 2008-07-02; 修回日期: 2008-10-07

作者简介:

龚 静(1975-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事建筑电气、电力系统继电保护和配电网自动化等领域的教学与科研工作。  
E-mail: lujing55@yahoo.com.cn

(上接第 4 页 continued from page 4)

[5] 黄兵, 周献中. 不完备信息系统分配约简与规则提取的矩阵算法[J]. 计算机工程, 2005, 31(17): 20-22.  
HUANG Bing, ZHOU Xian-zhong. Matrix Computation for Assignment Reduction and Rule Extraction in Incomplete Information Systems[J]. Computer Engineering, 2005, 31(17): 20-22.

[6] 谭天乐, 宋执环, 李平. 信息系统数据清洗、规则提取的矩阵算法[J]. 信息与控制, 2003, 32(4): 289-294.  
TAN Tian-le, SONG Zhi-huan, LI Ping. Matrix Computation for Data Cleaning and Rule Extraction in Information System[J]. Information and Control, 2003, 32(4): 289-294.

[7] 王建元, 纪延超. Petri 网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 21-24.  
WANG Jian-yuan, JI Yan-chao. Application of Petri Nets in Transformer Fault Diagnosis[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 21-24.

[8] 王建元, 纪延超. 模糊 Petri 网络知识表示及其在变压器故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 121-125.  
WANG Jian-yuan, JI Yan-chao. Application of Fuzzy Petri

Nets Knowledge Representation in Electric Power Transformer Fault Diagnosis[J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23(1): 121-125.

[9] 莫娟, 王雪, 董明, 等. 基于粗糙集理论的电力变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 162-167.  
MO Juan, WANG Xue, DONG Ming, et al. Diagnostic Model of Insulation Faults in Power Equipment Based on Rough Set Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 162-167.

[10] 杨启平, 薛五德, 蓝之达. 变压器故障诊断技术的研究[J]. 变压器, 2002, 39(10): 38-42.  
YANG Qi-ping, XUE Wu-de, LAN Zhi-da. Research on Diagnosing Techniques of Transformer Fault[J]. Transformer, 2002, 39(10): 38-42.

收稿日期: 2008-10-14

作者简介:

荣雅君(1957-), 女, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与电力系统故障诊断;

赵 杰(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与电力系统故障诊断。