

# 基于多时窗相关函数和形态学滤波的单端行波故障测距研究

刘万超<sup>1</sup>, 陈平<sup>1</sup>, 马永明<sup>1</sup>, 孙佳佳<sup>2</sup>, 祝成<sup>3</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 山东电力工程咨询院, 山东 济南 250013;  
3. 德州电力公司继保班, 山东 德州 253024)

**摘要:** 提出了一种基于多时窗相关函数和形态学滤波的输电线路单端行波故障测距算法。由于存在“高频振荡”的原因, 多时窗相关函数法在短时窗下容易将线路故障误判为近距离故障。采用形态学滤波器, 较好地抑制了行波中的“高频振荡”, 使多时窗相关函数法在任何时窗宽度下都能给出正确的测距结果。该方案解决了固定时窗下的相关函数法容易出现极值点偏移及近距离故障难以测距的问题。通过对实测故障数据的分析验证, 证明该方案能同时保证测距可靠性和准确性, 具有较高的实用价值。

**关键词:** 相关函数; 形态学滤波; 输电线路; 行波

## Study of fault locating based on single terminal traveling waves using multi-window correlation functions and mathematical morphological filtering algorithm

LIU Wan-chao<sup>1</sup>, CHEN Ping<sup>1</sup>, MA Yong-ming<sup>1</sup>, SUN Jia-jia<sup>2</sup>, ZHU Cheng<sup>3</sup>

(1. Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. Shandong Electric Power Engineering Information Centre, Jinan 250013, China; 3. Electric Power Company Dispatching Center, Dezhou 253024, China)

**Abstract:** A fault location algorithm of multi-window correlation functions and mathematical morphological filtering is presented which is based on traveling waves of single terminal. Because of existing "high frequency oscillation", the algorithm of multi-window correlation functions is easy to judge that the fault location is closed to the bus. Using morphological filters can suppress the "high frequency oscillation" well which is in the traveling waves, so that the algorithm of multi-window correlation functions can give the correct location in any width of time window. The project solves the problems that the extreme points of correlation function under fixed time window easy moves and can't find the close fault location. Through measuring the actual data on fault transmission lines, the precept is proved that it could assure the reliability and accuracy of location at the same time, and is of high practical value.

**Key words:** correlation function; morphological filtering; traveling wave; transmission line

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0028-06

## 0 引言

高压输电线路单端故障测距原理可以分为两类, 一类是利用工频量测距原理, 线路采用集中参数模型, 该方法受过渡电阻、系统运行方式等因素的影响较大; 另一类是利用暂态行波测距原理<sup>[1,2]</sup>, 此原理应用分布参数模型, 不受过渡电阻、系统运行方式等因素的影响, 但可靠性差。单端行波故障测距的主要困难是不易克服线路对端以及其他线路端点反射波的影响, 除此之外, 影响现代行波测距原理可靠性的一个重要原因是行波在传播过程中发生的衰减和畸变现象的影响。形态学滤波作为一种新型滤波方式, 在有效抑制行波波形的畸变和滤除噪声的同时<sup>[3-5]</sup>, 能很好地保持故障行波波形的主要特

征, 为行波信号的处理提供了新的手段。

行波相关法是现代单端行波故障测距中的经典算法之一。然而它仍然存在一些问题, 如行波在传播过程中的衰减和畸变现象<sup>[6,7]</sup>, 使得相关算法所依赖的行波相似关系不再成立; 固定时窗宽度下的相关算法难以同时满足测距可靠性和准确性两方面的要求。

本文在分析形态学滤波和行波特征的基础上, 提出了处理故障行波的最佳结构元素和滤波方案, 进而提出一种具有多分辨能力的多时窗相关函数算法实现单端行波故障测距。通过对实测故障数据的仿真验证, 证明该方案能同时保证测距可靠性和准确性。

## 1 单端行波故障测距原理

### 1.1 A型现代行波测距原理

A型现代行波测距原理为单端原理, 它利用故障线路产生的暂态行波实现测距<sup>[8]</sup>。在图1(a)中给出了被监测线路MN, 测距装置装设在线路M,N两端。当线路上F点发生直接短路故障时, 根据叠加原理, 在故障点F处将产生行波电流 $i_f$ , 由故障点沿线路向两端传播。故障产生的行波传播过程如图1(b)的行波网格图所示。

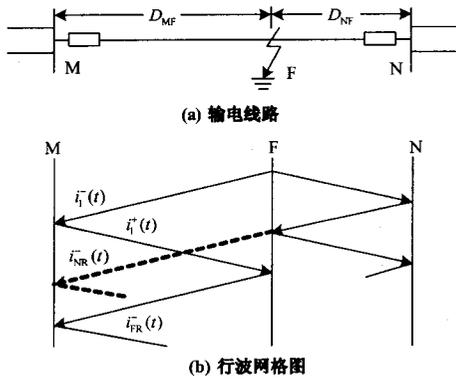


图1 单端行波故障测距原理图

Fig.1 Principle of fault location based on traveling waves of one terminal

假定M端为测量端, 且行波从本端母线到故障点的传播方向为正方向。由图1(b)可见, 设第一次到达M端的电流行波为 $i_1^-(t)$ , 该行波浪涌在M端母线的反射波形成本端第1个正向行波浪涌, 记为 $i_1^+(t)$ , 它在故障点的反射波记为 $i_{FR}^-(t)$ , 故障初始行波浪涌在N端母线的反射波到达测量点时产生的行波浪涌记为 $i_{NR}^-(t)$ 。设 $i_1^+(t)$ 和 $i_{FR}^-(t)$ 之间的时间延迟为 $\Delta t$ ,  $i_1^-(t)$ 和 $i_{NR}^-(t)$ 之间的时间延迟为 $\Delta t'$ , 则故障测距结果可以表示为:

$$D_{MF} = \frac{1}{2} v \Delta t \quad (1)$$

$$D_{NF} = \frac{1}{2} v \Delta t' \quad (2)$$

式中:  $v$  为波速度。

### 1.2 方向行波的获取

以单相线路为例。单相无损输电线路的正、反向电压行波可以分别表示为:

$$u^+(t) = (u(t) + Z_c i(t)) / 2 \quad (3)$$

$$u^-(t) = (u(t) - Z_c i(t)) / 2 \quad (4)$$

方向电流行波可以表示为:

$$i^+(t) = (u(t) / Z_c + i(t)) / 2 \quad (5)$$

$$i^-(t) = -(u(t) / Z_c - i(t)) / 2 \quad (6)$$

其中:  $Z_c$  为波阻抗,  $i^+(t)$  为正向行波,  $i^-(t)$  为反向行波。

经过模变换后, 三相线路上的方向行波可以按上述的单相来求解。

## 2 相关法测距算法

### 2.1 行波相关法

假设已知信号是 $x(t)$ , 被测信号 $y(t)$ 中混入噪声信号 $n(t)$ , 为了能利用 $x(t)$ 从接收到的信号 $y(t)$ 中检测出有效信号, 互相关函数定义为:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \int_0^N x(t) * y(t + \tau) dt \quad (7)$$

其中:  $\tau$  为时移,  $x(t)$  为参考函数,  $N$  为时窗宽度。

将 $i_1^+(t)$ 作为参考函数, 反向行波作为被测信号, 如图2所示。从测量点看, 当故障发生在线路中点以内时,  $i_{FR}^-(t)$ 先到达测量点, 此时相关函数取得极大值, 通过标定该极大值出现的相对时间即可确定 $\Delta t$ , 最后利用式(1)实现测距; 当故障发生在线路中点以外时,  $i_{NR}^-(t)$ 先到达测量点, 此时相关函数取得极小值, 利用式(2)实现测距。

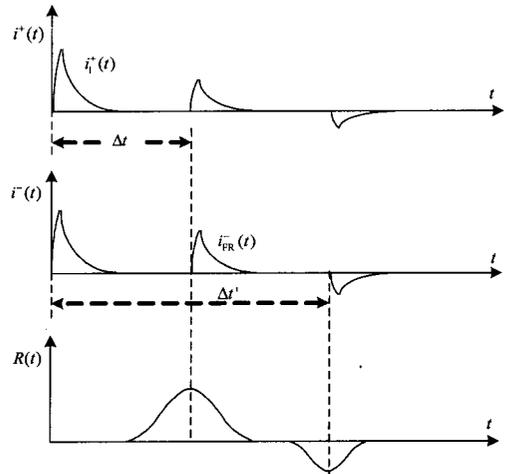


图2 行波相关法示意图

Fig.2 Correlation algorithm of traveling-wave

### 2.2 行波相关法存在的问题

在实际单端行波故障测距中, 相关函数时窗宽度的确定受故障距离的影响较大。对于近距离故障应选取较短的时窗以避免行波多次反射的影响, 对于远距离故障应选取较长的时窗以避免来自非故障点反射波的影响。因此, 固定时窗无法适应不同位

置的故障。

此外, 实际故障行波数据由于在传播过程中发生畸变, 因而含有大量的“高频振荡”, 如图3所示。

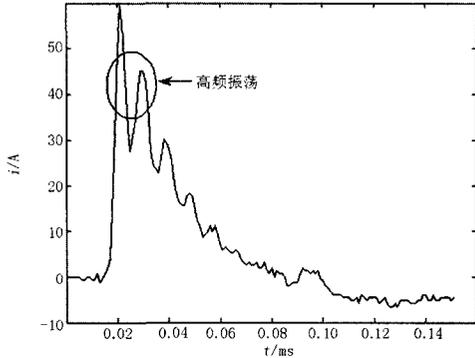


图3 含有“高频振荡”的行波浪涌

Fig.3 Waves containing high-frequency oscillation

图3是由某次实测故障数据得到的行波浪涌, 从中可以看到, 实际行波中的“高频振荡”非常严重。如果时窗宽度较短, 相关函数曲线也会出现振荡现象, 行波相关法容易将其误判为近距离故障, 如图4所示。

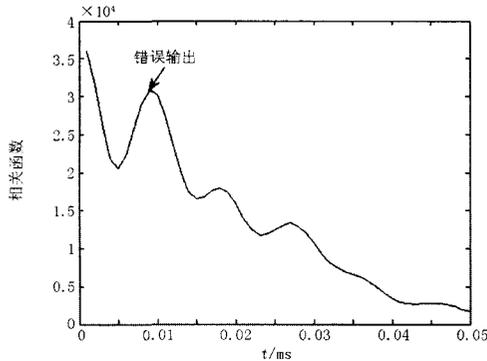


图4 时窗为 0.008 ms 时的错误输出

Fig.4 Error output when the time window is 0.008ms

在图4中, 相关函数出现第1个极值点后, 迅速出现多个极值点, 这些极值点均不是故障点反射波到达测量端形成的, 因而会给出错误输出。

### 3 基于多时窗相关函数和形态学滤波的测距算法

#### 3.1 多时窗行波相关法

针对行波相关法时窗宽度难以确定的问题, 本文定义一种多时窗相关函数, 定义如下:

$$R_{xy}^{\alpha}(\tau) = \frac{1}{2^{1-\alpha} N} \int_0^{2^{1-\alpha} N} x(t) * y(t + \tau) dt \quad (8)$$

其中:  $\alpha$  为相关函数的分析层数,  $N$  为第1层时窗宽度。

此定义采用一个可变的时间窗口, 时窗宽度采用2进递减的方式, 以第1层长时窗为参考窗口, 逐级递减。基于多时窗相关函数的单端行波故障测距法称为多时窗行波相关法, 第1层长时窗的宽度取为初始行波浪涌的宽度即可。

多时窗行波相关法虽然能够适应不同的故障位置, 但仍然难以消除行波波形中“高频振荡”对测距可靠性带来的影响, 尤其当线路发生近距离故障时, 由于需要采用短时窗, 容易给出错误的测距结果。

形态学滤波算法可以根据需要设计不同的滤波器, 且通过选择合适的结构元素以达到理想的滤波输出。因此, 我们期望利用形态学滤波技术, 达到抑制“高频振荡”的目的。

#### 3.2 形态学滤波算法与结构元素选择

灰度腐蚀和膨胀是灰度形态学的两个基本运算, 它处理的对象是信号波形的拓扑特性<sup>[9]</sup>。行波信号为一维信号, 本文主要介绍一维情况下灰度形态学运算。

设输入序列  $f(n)$ ,  $g(m)$  分别是定义在  $F = \{0, 1, \dots, N-1\}$  和  $G = \{0, 1, \dots, M-1\}$  上的离散函数, 且  $N \geq M$ 。用序列函数  $g(m)$  对信号  $f(n)$  灰度腐蚀和膨胀分别定义为:

$$(f \ominus g)(n) = \min \left\{ f(n) - g(m-n) \left| \begin{array}{l} n \in F \\ m-n \in G \end{array} \right. \right\} \quad (9)$$

$$(f \oplus g)(n) = \max \left\{ f(n) + g(m-n) \left| \begin{array}{l} n \in F \\ m-n \in G \end{array} \right. \right\} \quad (10)$$

由腐蚀和膨胀的不同组合可以构造出多种二级或多级形态学运算。以下是由腐蚀和膨胀构造出的两个基本二级运算——开、闭运算。

$$(f \circ g)(n) = ((f \oplus g) \ominus g)(n) \quad (11)$$

$$(f \bullet g)(n) = ((f \ominus g) \oplus g)(n) \quad (12)$$

开运算可以压制信号波形中的尖峰, 而闭运算可以填充信号波形中的低谷<sup>[10]</sup>。基于开、闭运算可以构造各种滤波器, 如交替滤波器(包括形态开闭和形态闭-开滤波器)、混合滤波器和交替混合滤波器。

大量仿真证明: 交替混合滤波器对抑制行波波形畸变效果极佳, 且能可靠消除各种干扰的影响。因此本文采用交替混合滤波器作为滤波算法。

交替混合滤波器:

$$[(f)ah(g)](n) = [[(f)oc(g)] + [(f)co(g)]](n)/2 \quad (13)$$

形态学滤波器的滤波效果不仅与滤波器有关, 还与结构元素的形状、宽度、高度有很大关系<sup>[11]</sup>。

研究形态学滤波器的运算方式, 不难发现, 形态学滤波器的输出有向结构元素形状“靠拢”的趋势。根据滤波期望选择合适的结构元素, 是取得理想滤波输出的关键。

为了抑制“高频振荡”, 取得平滑的滤波输出, 我们选择处处可导的半周波正弦函数作为结构元素。如图 5 所示, 是一个半周波正弦形结构元素。

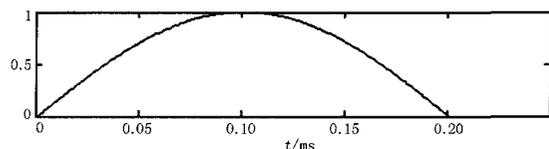


图5 半周波正弦形结构元素

Fig.5 Structure element of half-cycle sinusoidal

确定最优结构元素, 不仅包括结构元素的几何形状, 还包括结构元素宽度 ( $P$ ) 的选取。结构元素宽度选择应保证能够有效抑制行波中如图 3 所示的“高频振荡”, 以获得相对平滑的行波波形的, 从而实现可靠测距。

设初始行波浪涌的波头宽度为  $P$ , 则选择宽度为  $P/3$  左右的结构元素时, 能较完整地保留行波的主要特征, 同时完全抑制“高频振荡”。滤波结果如图 6 所示。

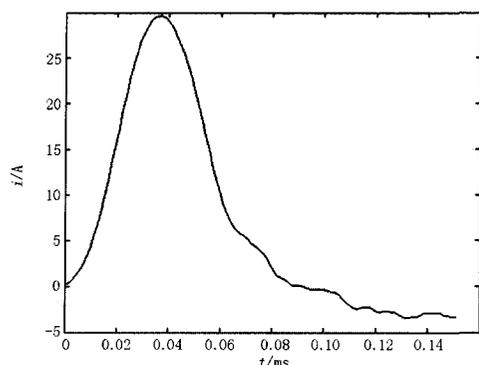


图6 形态学滤波后的行波浪涌

Fig.6 Waves filtered by morphological filter

如图 6 所示, 经过形态学滤波器的充分滤波, 行波中不再含有“高频振荡”, 波形非常平滑, 无论相关函数的时窗宽度如何, 都不会出现错误输出。如图 7 所示, 是滤波后所得相关函数和滤波前所得相关函数的对比图。

滤波前, 受行波中“高频振荡”的影响, 多时窗行波相关法在短时窗下容易给出错误的测距输出; 滤波后, 形态学滤波器以其独特的滤波方式成功抑制“高频振荡”, 获得平滑的行波波形的, 使多时窗行波相关法在任何时窗下都能给出可靠的测距结

果。因此, 基于多时窗相关函数和形态学滤波的测距算法, 能够适应不同的故障位置。

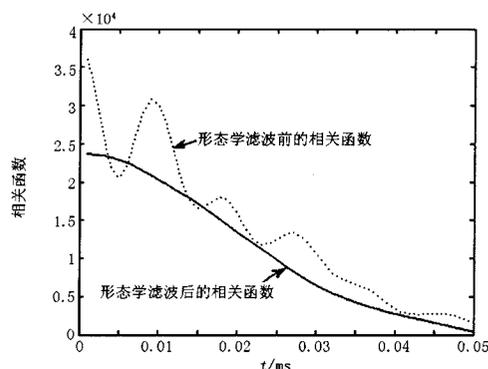


图7 形态学滤波前、后相关函数对比图

Fig.7 Correlations filtered and is not filtered

#### 4 故障数据分析实例

图 8 是某次实际线路故障时提取的方向行波波形。由图 8 可以看到, 行波浪涌宽度约为 0.06~0.07 ms, 即系统采样率为 1 MHz 时, 行波浪涌宽度约为 60~70 个采样间隔, 因此相关函数第 1 层时窗宽度选为 64 个采样间隔, 经 4 层相关分析的相关函数图像分别如图 9 (a)、9 (b)、9 (c)、9 (d) 所示。

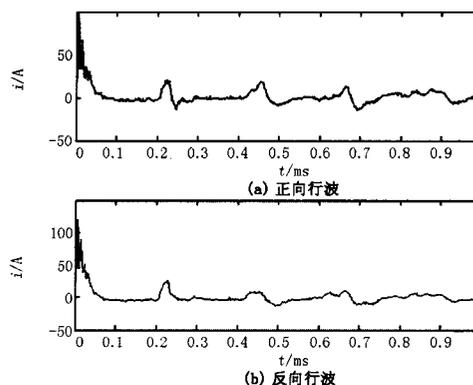


图8 实际故障线路方向行波

Fig.8 Directional traveling waves of actual fault line

如图 9 所示, 经过 4 层相关分析, 相关函数的第 2 个极值点逐渐逼近故障点反射波的到达时刻 (首个相关函数极值点对应的是初始行波浪涌的到达时刻), 但其首端的“振荡”容易给出错误的输出。

采用本文确定的滤波方案对上述实际故障线路方向行波进行滤波。其中结构元素宽度为 20 个采样间隔, 此时滤波结果如图 10 (a)、10 (b) 所示。对滤波后的方向行波进行 4 层相关分析, 结果如

图11 (a)、11 (b)、11 (c)、11 (d) 所示。

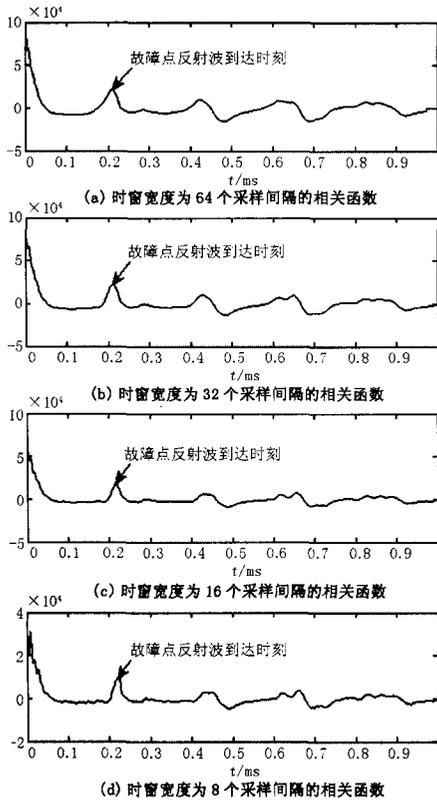


图9 4层相关分析

Fig.9 4 layers of correlation analysis

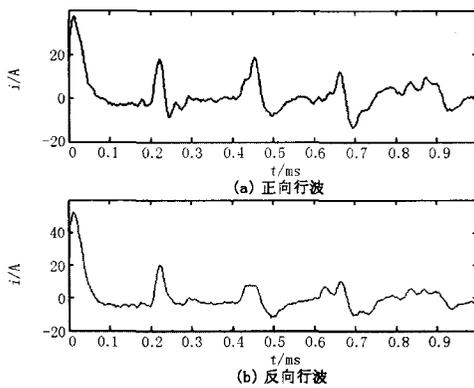


图10 形态学滤波后的方向行波

Fig.10 Directional traveling waves after morphology filtering

由于图 8 中行波波形的“高频振荡”已被可靠抑制,因此图 11 中各个时窗下的相关函数首端不再出现振荡现象,消除了误判为近距离故障的可能。同时,各个时窗下的相关函数第 2 个极值点都非常明显,这为可靠求取第 2 个极值点的位置,进而查找故障点提供了保障。

必须指出,多时窗行波相关法的前提是要有充分的滤波。增大结构元素宽度,能够增强滤波效果,但同时也会弱化行波的某些特征,更为重要的是,故障点反射波的宽度有时略小于初始行波浪涌的宽度,确定结构元素宽度时必须保证其宽度小于故障点反射波的宽度,否则将可能把故障点反射波当作噪声滤除掉,造成测距失败。

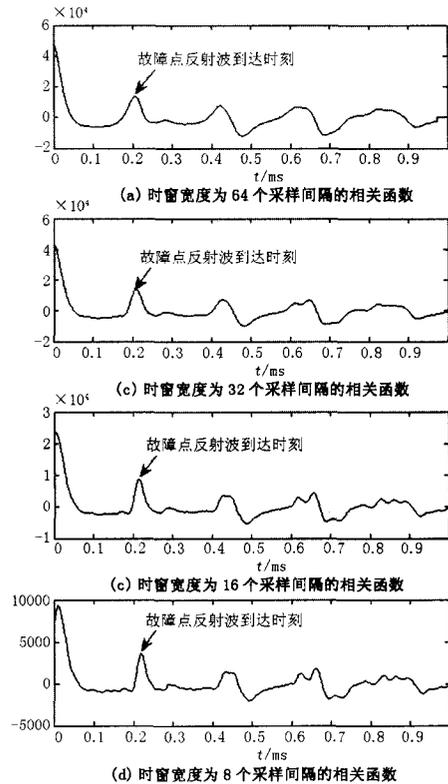


图 11 形态学滤波后的 4 层相关分析

Fig.11 4 layers of correlation filtering after morphology filtering

### 5 结论

本文介绍了灰度形态学滤波技术及其在 A 型单端行波故障测距中的应用,提出了基于多时窗相关函数和形态学滤波的输电线路单端行波故障测距新算法。通过对形态学滤波器的特性分析及行波传播特性研究,确定了最佳结构元素和滤波方案。同时,通过对行波相关法及其影响因素的分析研究,提出了多时窗行波相关法,既保证了单端行波故障测距的可靠性,又兼顾了测距准确性。输电线路实测故障数据的计算结果和分析证明,形态学滤波器作为故障行波信号的前置滤波器,和多时窗行波相关法结合,有着良好的应用潜力和实用价值。

## 参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.  
GE Yao-zhong. New Types Protective Relaying and Fault Location Theory and Techniques[M]. Xi' an: Xi' an Jiaotong University Press, 1996.
- [2] 徐丙垠. 利用暂态行波的输电线路故障测距技术 (博士学位论文)[D]. 西安: 西安交通大学, 1991.  
XU Bing-yin. Fault Location Technology of Transmission Lines Based on Traveling Waves, Doctoral Dissertation[D]. Xi' an: Xi' an Jiaotong University, 1991.
- [3] Vassilios Chatzis, Ioannis Pitas. A Generalized Fuzzy Mathematical Morphology and its Application in Robust 2-D and 3-D Object Representation[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2000, 9(10):1798-1810.
- [4] Niemeijer M, Staal J, Ginneken B V, et al. Comparative Study of Retinal Segmentation Methods on a New Publicly Available Database[Z]. Image Sciences Institute, univ. Medical center Utrecht, the Netherlands Department of Ophthalmology and Visual Sciences, Univ of Iowa, USA, 2004.
- [5] 林湘宁, 刘沛, 刘世明, 等. 电力系统超高速保护的形态学-小波综合滤波算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (9): 19-24.  
LIN Xiang-ning, LIU Pei, LIU Shi-ming, et al. A Novel Integrated Morphology-wavelet Filter Algorithm Used for Ultra-high Speed Protection of Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (9): 19-24.
- [6] Lian Bao, Salama M M A. An Overview of Digital Fault Location Algorithms for Power Transmission Lines Using Transient Waveforms[J]. Electric Power Systems Research, 1994, 29:17-25.
- [7] Ancell G B, Pahalawaththa N C. Effects of Frequency Dependence and Line Parameters on Single Ended Traveling Wave Based Fault Location Schemes[J]. IEE Proceedings-C, 1992, 139(4):332-342.
- [8] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (23):62-65.  
XU Bing-yin, LI Jing, CHEN Ping, et al. Modern Traveling Wave Based Fault Location Technology and Its Application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (23):62-65.
- [9] 林湘宁, 刘海峰, 等. 基于广义多分辨形态学梯度的自适应单相重合闸方案[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (7):101-106.  
LIN Xiang-ning, LIU Hai-feng, et al. Generalized Multi-resolution Morphological Gradient Based Self-adaptive Single-phase Reclosure Scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (7):101-106.
- [10] 吴青华, 张东江. 形态学滤波技术及其在继电保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (7): 45-49.  
WU Qing-hua, ZHANG Dong-jiang. Morphological Filtering Techniques and Applications in Protection Relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (7): 45-49.
- [11] 陈平, 李庆民. 基于数学形态学的数字滤波器设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (11): 60-65.  
CHEN Ping, LI Qing-min. Design and Analysis of Mathematical Morphology-based Digital Filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (11): 60-65.

收稿日期: 2008-11-07; 修回日期: 2009-03-03

作者简介:

刘万超 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: liuwanchao83@163.com

陈平 (1969-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制;

马永明 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制。

(上接第 27 页 continued from page 27)

- [3] Dan Yang, Venkataramana Ajarapu. A Decoupled Time-Domain Simulation Method via Invariant Subspace Partition for Power System Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 11-17.
- [4] 刘德贵, 费景高, 汤铭端. 刚性系统数字仿真算法[J]. 系统仿真学报, 1993, 5(2): 2-10, 27.  
LIU De-gui, FEI Jing-gao, TANG Ming-duan. Digital Simulation Algorithms for Stiff Systems[J]. Journal of System Simulation, 1993, 5(2): 2-10, 27.
- [5] 常永吉, 赵钢, 于继来. 电力系统动态过程的柔性自校正仿真方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10):22-27.  
CHANG Yong-ji, ZHAO Gang, YU Ji-lai. Power System Dynamic Simulation with Flexible Self-adjustment Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 22-27.
- [6] HOU Lan-juan. Power System Dynamic Simulation Using System Partitioning and Multiple Step Size Techniques[D]. Arizona State University, 1994.
- [7] Crow M L, Chen J G. The Multi-rate Simulation of Facts Devices in Power System Dynamics[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 376-382.
- [8] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [9] Anderson P M, Found A A. Power System Control and Stability[M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2002.

收稿日期: 2008-10-28; 修回日期: 2008-11-21

作者简介:

常永吉 (1972-), 男, 博士生, 研究方向为电力系统动态仿真; E-mail: cyj@hagongda.com

于继来 (1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制。