

基于形态梯度的输电线电流行波比较式超高速保护

程临燕, 段建东, 张保会, 李鹏, 罗四倍

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 将形态学的概念引入到电流行波比较式保护原理中, 提出了基于形态学梯度变换的超高速电流行波极性比较式保护算法. 算法具有运算量小、计算速度快的优点, 并且由 Clark 变换产生 1、2 两种线模量, 取形态学梯度变换后极大值较大的模量进行极性比较, 因此对于任何一种故障类型都有较高的灵敏度, 不存在故障类型引起的动作死区. ATP 仿真测试表明, 该算法可以用来实现超高速保护, 基本上能够正确判别区内外故障, 适应不同位置、不同过渡电阻、不同初始角及不同类型的故障情形. 此外, 还提出了电流行波相似度比较式线路保护方案, 此方案不依赖于两端某一点的极性来判断区内外故障, 而是通过比较线路两端一段时间内电流的相似度来区分区内外故障, 因此可以明显提高判别故障位置的可靠性.

关键词: 超高速保护; 行波; 极性比较; 相似度; 形态梯度

中图分类号: TM732; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)04-0484-05

Ultra-High-Speed Protection by Traveling Wave Current Polarity Comparison Based on Morphological Gradient

Cheng Linyan, Duan Jiandong, Zhang Baohui, Li Peng, Luo Sibe

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Introducing the concept of morphology into the ultra-high-speed protection by traveling wave current polarity comparison, a highly efficient algorithm based on the morphological gradient (MG) is proposed. Undergoing the MG transform, the aerial mode with larger maximum is chosen to ensure the sensitivity for any fault type without dead zone. The ATP simulations show that the scheme for ultra-high-speed protection enables to correctly distinguish the internal and external faults, and is insensitive to fault locations, fault path resistances, fault inception angles and fault types. Furthermore, the protection scheme by traveling wave current similitude degree comparison, which is independent on the polarity of certain points of two ends, is presented to improve the discrimination reliability.

Keywords: ultra-high-speed protection; traveling wave; polarity comparison; similitude degree; morphological gradient

随着超高压、大容量、长距离的输电线路日益增多, 为了提高线路传输能力和增强系统的暂态稳定性, 需要更快地切除故障. 利用工频量的传统保护已不能满足要求, 因此基于暂态量的具有快速动作性能(小于 10 ms)的超高速保护就得到了人们广泛的重视^[1-3].

电流行波极性比较式保护原理, 只比较线路两端初始电流行波的极性, 当两端同极性时判定为内部故障, 异极性时则判定为外部故障^[4]. 它构成简单, 不需电压量. 为确保超高速动作性能, 必须有快速算法在极短的时间内准确判别初始电流行波的极性, 而原有的信号分析工具(如傅里叶变换)在处理

故障行波信号方面并不令人满意. 本文引入形态学梯度(MG)变换, 实现了电流行波极性比较式保护算法, ATP 仿真试验测试了新保护算法的可行性.

1 数学形态学与形态梯度

1.1 形态学基本概念和运算

数学形态学^[5-7]是一种非线性的、时域的分析方法, 不存在相移和幅度衰减等问题, 而且计算简单, 仅有加减法和取极值计算, 信号处理时速度快、时延小.

形态学的运算以腐蚀和膨胀两种基本运算为基础, 并引出一系列运算. 对于一维信号而言, 主要涉及到腐蚀、膨胀、开运算和闭运算.

设 $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别表示一维信号和结构元素(SE), F 和 G 分别表示两个函数的定义域集合. 函数膨胀和腐蚀的运算公式为

$$(f \oplus g)(x) = \max_y \{f(x-y) + g(y)\} \quad (1)$$

$$(f \ominus g)(x) = \min_y \{f(x+y) - g(y)\} \quad (2)$$

式中: $x-y, x+y \in F, y \in G$. 腐蚀是一种收缩变换, 使目标肢体收缩, 使孔洞扩张. 作为对偶, 膨胀是一个扩张的过程, 这种变换使目标肢体扩张, 孔洞收缩. 对于开运算和闭运算

$$(f \circ g)(x) = ((f \oplus g) \ominus g)(x) \quad (3)$$

$$(f \bullet g)(x) = ((f \ominus g) \oplus g)(x) \quad (4)$$

形态运算可以看作是用一个探针(即结构元素)去局部探测信号中每一区域的几何特性, 同时验证填放结构元素的方法是否有效. 选择不同的结构元素, 可提取不同的信号特征, 即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.

1.2 形态梯度

把膨胀、腐蚀运算和代数系统及其算子进行组合, 能实现从复杂背景中提取出有用的信号成分. 这使得形态学信号处理能应用于提取电力系统的故障暂态行波, 从而清楚认识行波的特性. 在形态学的信号处理中, 基本的 MG 定义为函数 $f(x)$ 被结构函数 $g(x)$ 膨胀和腐蚀的数学差分

$$\text{Grad}(f) = (f \oplus g)(x) - (f \ominus g)(x) \quad (5)$$

在信号处理中, 如果某一点处的梯度值大, 则表示在该点信号发生了突变, 即可能有边沿通过, 因此 MG 常用来进行奇异性检测. 应用这种技术处理暂态信号, 可以有效地抑制信号中的稳态分量, 同时突出波形的暂态特征. 为提取暂态波形中的上升和下降边沿, 特别设计了一种结构元素如下

$$g^+ = \{g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, \underline{g}_l\}$$

$$g^- = \{\underline{g}_1, g_2, \dots, g_{l-1}, g_l\}$$

式中: 结构元素 g^+ 、 g^- 分别用来提取暂态波形中的上升和下降边沿; l 为结构元素的长度; 采样点 $\underline{g}$ 表示它们的原点位置. 结合形态梯度的定义与结构元素的表达式, 则有上升沿

$$f_{g^+}(x) = (g \oplus g^+)(x) - (f \ominus g^+)(x)$$

下降沿

$$f_{g^-}(x) = (g \ominus g^+)(x) - (f \oplus g^-)(x)$$

最终

$$f_g(x) = f_{g^+}(x) + f_{g^-}(x) \quad (6)$$

由于 $(f \ominus g)(x) \leq (f \oplus g)(x)$, 故 $f_{g^+}(x) \geq 0$, $f_{g^-}(x) \leq 0$, 其符号正好与暂态波形中的上升和下降边沿相对应. 因此, 式(6)中的 f_g 不仅能够定位信号波形中的暂态突变, 而且还能够指示出其变化的极性, 变换效果见图 1.

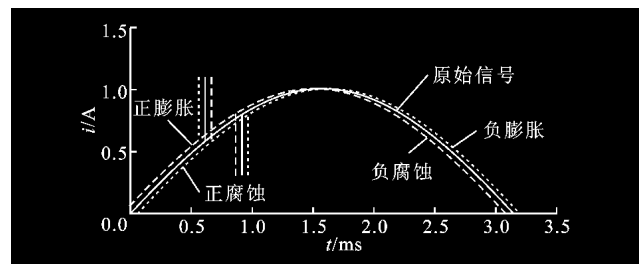


图1 对信号的正、负方向上的膨胀和腐蚀

MG 取决于在 SE 的定义域中获得的最大、最小值之差, 用 SE 进行腐蚀、膨胀操作具有最大、最小值形态滤波的作用. 显然, MG 受到 SE 原点位置和形状的影响, 基于基本形态运算可得到多种 MG. 目前, 在一维信号分析领域, 还没有针对 SE 的选择原则, SE 的选择是根据经验和要处理的信号特征来确定的, 并需要验证是否合适. 常用的 SE 有扁平结构、三角波和斜坡函数等. 本文用到的结构元素为 $g = [-1, 0, 1]$. 在进行 MG 运算时, 有时需要采用更复杂的算法, 如多分辨形态梯度、级联多分辨形态梯度等.

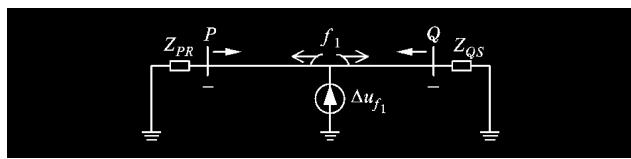
2 电流行波比较式保护原理

2.1 极性比较原理

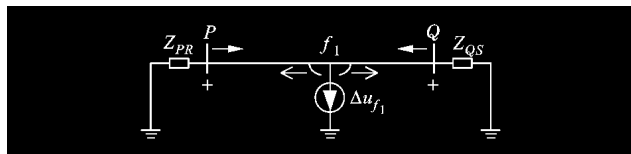
电流行波极性比较式保护原理, 简言之就是: 当输电线路内部故障时, 线路两端电流行波极性相同, 当外部故障时, 线路两端电流行波极性相反, 从而可正确判断线路内、外部故障^[7].

若规定保护安装处电流的正方向为母线流向线路, 则在内部、外部故障的附加网络中不同极性的附

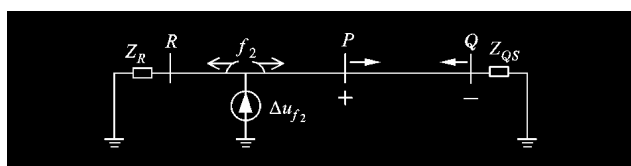
加电源 Δu 作用下,被保护线路 PQ 两端检测到的电流初始行波极性如图 2 所示。



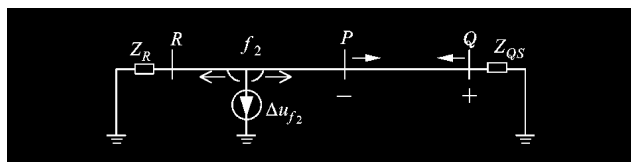
(a) 内部故障时故障附加网络 (Δu 为正)



(b) 内部故障时故障附加网络 (Δu 为负)



(c) 外部故障时故障附加网络 (Δu 为正)



(d) 外部故障时故障附加网络 (Δu 为负)

图 2 被保护线路 PQ 两端电流行波极性

2.2 相似度比较原理

由于极性比较是利用线路两端初始电流行波的极性特征进行比较的,可靠性易受反射波、故障初始角等不利因素的影响。若分析一段时间内的行波波,就能降低不利影响,此即相似度比较方法^[8]。其基本原理为:当线路内部发生故障时,线路两端电流行波波正相似,当线路外部发生故障时,线路两端电流行波波负相似。据此特征差异,对于被保护线路 PQ 两端故障检测后一段时间内的电流行波波,可以构造如下的相似度计算式

$$k = \sum |i_P| / \sum |i_Q| \quad (7)$$

$$R = \sum (i_P - ki_Q)^2 / \sum i_P^2 \quad (8)$$

式中: i_P 为 P 端电流模量; i_Q 为 Q 端电流模量。

若相似度参数 $R < \lambda$, 则判定为线路内部故障, 反之则为线路区外故障, 其中 λ 为所设阈值。

3 基于 MG 的极性比较式保护算法

为了能反映各种类型的故障,并且由于 0 模量衰减较大,算法使用 1、2 线模量,它们由三相量经

Clarke 相模变换得到^[4]。对于 Clarke 相模变换, A 相接地时, 2 模量为 0, 1 模量存在行波分量; 当 BC 两相故障时, 1 模量为 0, 2 模量存在; 其他故障情况, 两种模量都存在行波分量。所以, 为了确保任何故障情况下保护都可以动作, 本文比较 1、2 模量经形态学梯度变换后的模极大值, 择其大者为进行极性判别的模量。

极性比较的原理要求在故障时互传线路两端的电流行波的极性信号。它与行波方向保护不同, 在行波方向保护中, 线路任何一端都可独立地判定故障方向, 因此可以确定信号的性质为闭锁或允许。对于电流行波极性保护原理, 任何一端都有出现两种不同极性的可能, 任何一种极性都可以是闭锁性质或允许性质, 所以单端并不能判断出方向。发生故障时, 在本端判别出电流极性后, 就向对端发出包含极性信息的高频信号, 接收到对端信号后, 与本端极性比较, 判定是区内故障还是区外故障。如果是区内故障, 则保护动作, 出口跳闸; 反之, 保护不动作。基于 MG 的电流行波极性比较式保护算法主流程如图 3 所示, 其中 K 为设定的启动门限值。

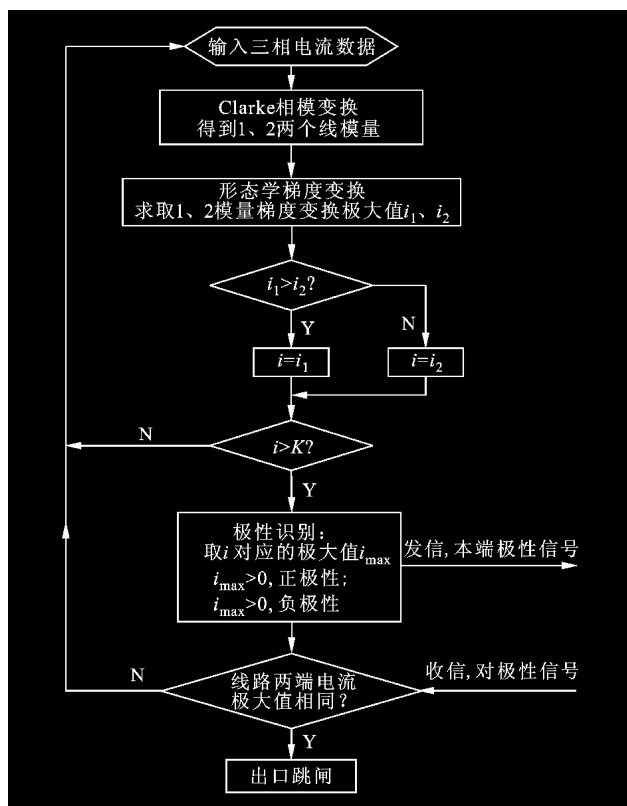


图 3 基于 MG 的电流行波极性比较式保护算法主流程

基于 MG 的电流相似度比较式保护, 就是将图 3 中的极性识别比较部分换成相似度比较, 其他部分不变。限于篇幅, 此算法的仿真部分不予列出。

4 ATP 仿真研究

4.1 仿真系统及其模型

如图 4 所示的 500 kV 超高压输电系统为东北电网的部分网络,被保护线路是董家变和辽阳变之间的线路 PQ,考察 P 端 TA 处基于 MG 的极性比较式保护算法的极性判别性能.此系统选用频率相关线路模型,各条线路长度如 4 图所示,母线对地杂散电容值均设为 0.01 μF ,采样率为 400 kHz,启动门槛值设为 10.

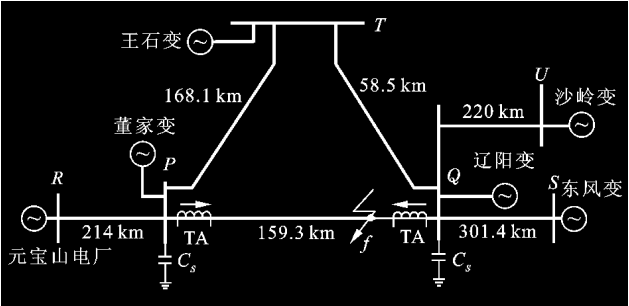


图 4 超高压输电系统

4.2 典型故障仿真

对于线路 PQ 内部故障——A 相金属性接地,故障位置距 P 端 80 km,故障初始角 30° ,线路两端检测到的电流模量行波及其形态学梯度变换波形(i_{MMP} , i_{MMQ})如图 5 所示.由该图可以清楚地看到, P、Q 两端均可正确判别极性为正,这样利用通信通道将极性信息进行互传后,就能准确判断为内部故障.

4.3 仿真结果及分析

为测试上述算法的可靠性,还进行了约 500 组故障仿真试验,分别基于不同的故障条件:10 种简单故障类型,故障过渡电阻为 0~500 Ω ,故障初始角 θ 为 5° 、 10° ~ 90° , l 为距 P 端的距离,分别为 1 km(首端)、80 km(中端)、159 km(末端)、200 km(下级线路)和 50 km(反向下级线路).限于篇幅,下面给出部分测试结果,如表 1~表 3 所示.从测试结果来看,基于形态梯度的极性比较式保护算法在各种故障条件下都能正确动作.

此外,还使用了现场实录的故障数据对本文所提算法进行了验证,如图 6 所示.图 6a、6b 显示华中电网某线路 A 相接地故障时两端的三相电流,其数据已经 5 kHz 高通滤波.图 6c、6d 为基于形态梯度的极性比较式保护算法的处理结果, i_{MM} 为电流模量形态学梯度变换后的波形,可见两端初始行波的极性同为“正”,因而可判别故障发生在线路内部,这与实际故

障情况相吻合.

表 1 不同故障初始角时保护算法的仿真结果

$\theta/^\circ$	i_{Prmx}/A	i_{Qrmx}/A	故障判别
5	12.952 0	-10.769 4	区外
10	24.582 9	-20.056 3	区外
20	47.005 0	-37.929 3	区外
30	67.618 2	-54.346 6	区外
45	95.023 0	-76.144 8	区外
50	102.514 0	-82.095 0	区外
60	115.441 3	-92.348 4	区外
70	125.069 5	-99.961 0	区外
80	130.836 6	-104.487 7	区外
90	132.564 5	-105.788 7	区外

注:AG 故障,接地电阻 $R=300 \Omega$, $l=200 \text{ km}$.

表 2 不同过渡电阻时保护算法的仿真结果

R/Ω	i_{Prmx}/A	i_{Qrmx}/A	故障判别
0	959.228 2	976.447 0	区内
50	736.483 2	749.099 0	区内
100	597.711 4	607.506 4	区内
150	502.967 1	510.856 8	区内
200	434.169 0	440.685 5	区内
250	381.943 2	387.423 1	区内
300	340.946 0	345.615 7	区内
350	307.907 8	311.926 8	区内
400	280.716 2	284.201 0	区内
450	257.945 3	260.983 9	区内
500	238.598 3	241.258 5	区内

注:AG 故障,故障初始角 $\theta=45^\circ$, $l=80 \text{ km}$.

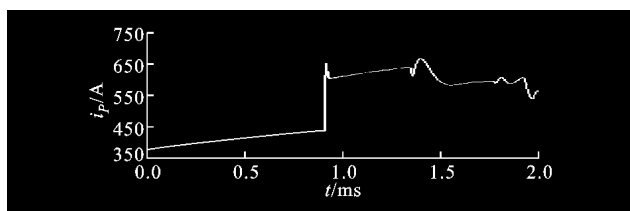
表 3 不同故障类型下保护算法的仿真结果

故障类型	i_{Prmx}/A	i_{Qrmx}/A	故障判别
A 相接地	415.958 7	266.685 4	区内
B 相接地	-488.176 8	-326.217 1	区内
C 相接地	-127.111 4	-105.279 4	区内
AB 短路	1 377.2	920.249 7	区内
BC 短路	-1 154.0	-789.912 5	区内
AC 短路	371.855 6	238.901 4	区内
AB 短路接地	4 062.2	2 290.5	区内
BC 短路接地	-3 391.6	-1 866.8	区内
AC 短路接地	1 167.6	639.230 8	区内
ABC 三相短路	684.139 4	522.250 3	区内

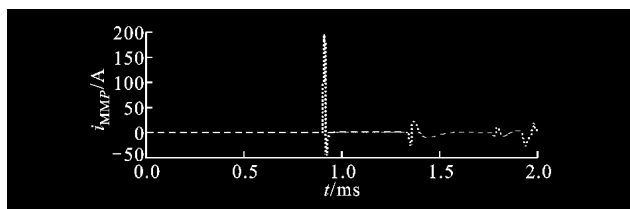
注:故障初始角 $\theta=45^\circ$,接地电阻 $R=300 \Omega$, $l=1 \text{ km}$.

5 结 论

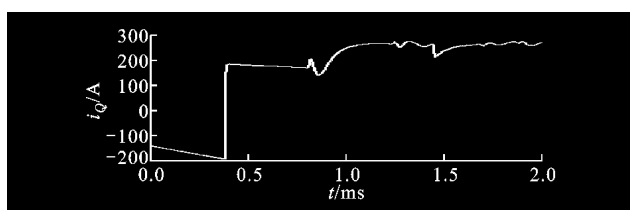
经各种故障条件下大量的 ATP 仿真测试以及



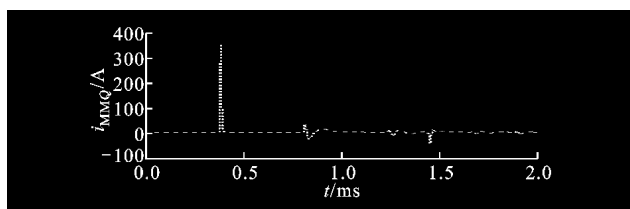
(a) P 端电流模量行波



(b) P 端电流模量行波形态学梯度变换值

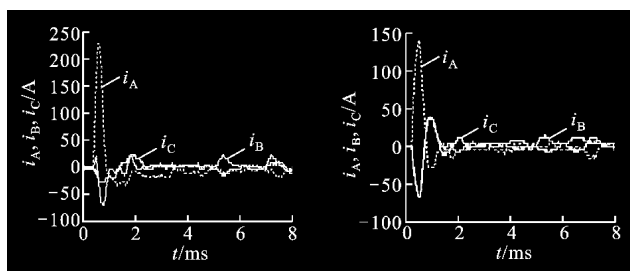


(c) Q 端电流模量行波

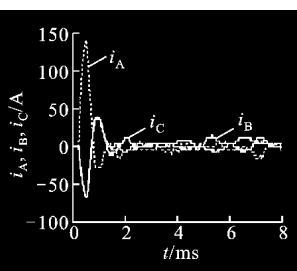


(d) Q 端电流模量行波形态学梯度变换值

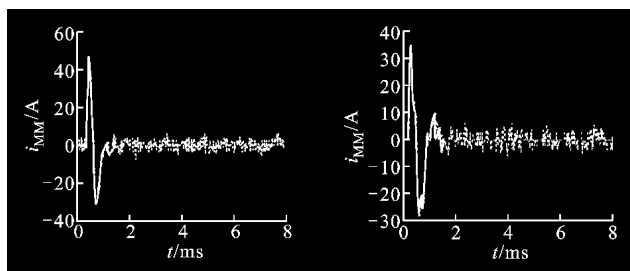
图5 线路 PQ 典型故障



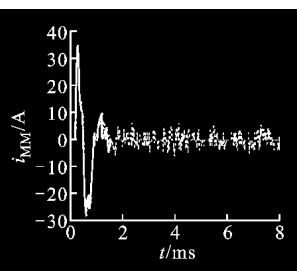
(a) 发送端三相电流



(b) 接收端三相电流



(c) 发送端变换后波形



(d) 接收端变换后波形

图6 采用现场实录数据的本文算法验证结果

现场数据验证,基于形态学梯度变换的超高速电流行波极性比较式保护算法可行。

由 Clark 变换产生 1、2 两种模量,形态学梯度变化后进行极大值识别,取极大值较大的模量进行极性比较。因此,对于任何一种故障类型都有较高的灵敏度,不存在故障类型引起的动作死区,而且提高了保护正确动作的可靠性。

此外,还提出了电流行波相似度比较的保护原理算法。此算法不依赖于两端某一点的极性来判断区内外故障,而是通过比较两端一段时间内电流的相似度来区分区内外故障,因此可以明显提高判别故障位置的可靠性。

参考文献:

- [1] 段建东,张保会,张胜祥.利用线路暂态行波功率方向的分布式母线保护[J].中国电机工程学报,2004,24(6):7-12.
Duan Jiandong, Zhang Baohui, Zhang Shengxiang. A distribute bus protection using transient traveling wave power directions of transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (6): 7-12.
- [2] 董杏丽,董新洲,张言苍,等.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,2000,24(14):11-15.
Dong Xingli, Dong Xinzhou, Zhang Yancang, et al. Directional protective relaying based on polarity comparison of travelling wave by using wavelet transform[J]. Automation of Electric Power System, 2000, 24 (14): 11-15.
- [3] Dong Xinzhou, Ge Yaozhong, He Jiali. Surge impedance Relay[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2):1247-1256.
- [4] 葛耀中.新型继电保护与故障测距原理与技术[M].西安:西安交通大学出版社,1996.
- [5] 唐常青.数学形态学方法及其应用[M].北京:科学出版社,1990.
- [6] Wu Q H, Zhang J F, Zhang D J. Ultra-high-speed directional protection of transmission lines using mathematical morphology [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(4): 1127-1133.
- [7] 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 Xiangning, Liu Pei, Liu Shiming, 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.
- [8] 周美立.相似学[M].北京:中国科学技术出版社,1993.

(编辑 杜秀杰)