

Fault Line Selection for Resonance Grounding Based on the Combination Algorithm of HHT and TEO

Ming Yang, Peng Yang

Changchun Electric Power Company, Changchun
Email: yuanyuanbs@126.com

Received: Nov. 12th, 2012; revised: Nov. 22nd, 2012; accepted: Nov. 30th, 2012

Abstract: The combination method of Hilbert-Huang Transform (HHT) and Teager Energy Operator (TEO) for fault line selection with resonance grounding is proposed in this paper. The zero sequence current signals are decomposed using Empirical Mode Decomposition (EMD). The TEO is reasonable introduced into algorithm of fault line selection. The TEO is combined with the method of HHT polarity estimate. The complementary advantage for combination method of HHT and TEO is implemented. The feasibility and effectiveness of the proposed method is verified by simulation results.

Keywords: Hilbert-Huang Transform (HHT); Teager Energy Operator (TEO); Resonance; Fault Line Selection

基于 HHT 与 TEO 融合的谐振接地故障选线

杨 明, 杨 鹏

长春市供电公司, 长春
Email: yuanyuanbs@126.com

收稿日期: 2012 年 11 月 12 日; 修回日期: 2012 年 11 月 22 日; 录用日期: 2012 年 11 月 30 日

摘 要: 本文提出了基于希尔伯特 - 黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)与 Teager 能量算子(Teager Energy Operator, TEO)相融合的谐振接地选线新方法。首先对零序电流信号进行经验模态分解法(Empirical Mode Decomposition, EMD)分解, 然后将 TEO 合理的引入选线算法中, 并与 HHT 极性判别法相融合, 实现了 HHT 与 TEO 两者融合的优势互补。通过仿真分析, 验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: HHT; TEO; 谐振; 接地选线

1. 引言

近年来, 随着我国经济快速发展, 配电网中缆 - 线混合线路随之增加, 致使线路结构变得更为复杂, 而不是单一均匀传输线路; 另外电缆的大量接入, 使得线路对地电容大幅增加, 当发生单相接地故障时会引起较大的对地电容电流^[1,2]。为此, 我国大多数配电网使用中性点谐振接地的方式以减小故障点电流。但同时消弧线圈的补偿作用使故障线路零序电流幅值减小, 加上电缆对地电容的分流作用明显, 使得故障线路和非故障线路的稳态特征量差值减小, 给基于稳

态信息的选线方法带来了困难。

目前, 虽然已有众多学者提出了大量选线方法, 但实际应用效果并不理想。零序电流幅值法对谐振接地系统并不适用, 而且容易受线路长度、过渡电阻大小、CT 不平衡等因素的影响, 具有一定局限性^[3]。零序电流相位比较法由于零序电压及零序电流很小的情况下判断各线路相位非常困难, 同样不适用于谐振接地系统。零序电流比幅比相法不能排除线路长度、过渡电阻及 CT 不平衡的影响, 同样不适合于谐振接地系统。五次谐波法适用于谐振接地系统, 但是负荷

设备中的五次谐波源, CT 的不平衡电流会影响选线结果。负序电流比较法获取负序电流非常困难。有功分量法受过渡电阻、故障合闸角、线路长度等因素影响, 零序电流有功分量检测较为困难。暂态零序电流极大值法极易受到现场噪声的影响, 可能发生“错选”现象^[2,4]。首半波法极性关系成立时间很短, 受线路参数、故障合闸角等因素影响较大, 实际应用效果不佳^[5]。能量函数法由于接地电流中有功分量较小, 积分函数误差容易累积, 易造成最后的选线判据失效^[6]。基于小波与小波包分析的选线算法存在的难点是小波基函数的适当选取及小波分解尺度的准确选择^[7-9]。关联理论及相关分析方法易受噪声影响, 选线准确度不是很高^[10,11]。模糊理论、形态学、遗传算法、神经网络、证据理论等智能算法信息融合还处在研究阶段, 离现场实际应用还有一段距离, 一般都是利用专家经验来构造计算线路故障可疑程度的经验函数, 很显然这些经验函数的确定主观性比较大, 如何选择和构造尚有待进一步的研究, 同时选线效果也有待验证^[12,13]。文献[14]所提的 HHT 方法是一种全新的自适应性信号处理方法, 对于处理非线性、非平稳信号有清晰的物理意义, 但在故障选线中, 对暂态零序电流采样速度、准确性要求较高。

本文将 HHT 与 TEO 相结合的方法应用到谐振接地选线中。通过 EMD 分解, 得到最高频的固有模式函数(Intrinsic Mode Function, IMF1)分量信号, 并求出其 TEO 值, 从而标定取得暂态极大值时刻为特征时刻, 经过比较特征时刻各线路对应的 TEO 值选出故障线路。基于 MATLAB/Simulink 仿真分析, 验证其可行性和有效性。

2. 算法原理

2.1. HHT 基本原理

HHT 方法的核心是 EMD 分解, 基于信号的局部特征进行 EMD 分解, 同时引入了 IMF。EMD 将一个复杂的信号分解为若干个 IMF 之和, 所得 IMF 分量的频率由高到低依次排列, 最后一项为单调的趋势项或均值。IMF 必须具备下面的条件:

1) 对全体数据, 其极值点个数与过零点个数相同或最多相差 1。

2) 在每一个点, 由局部极大值构成的上包络线和

极小值构成的下包络线均值必须为零。

首先找出信号 $x(t)$ 的全部局部极值点, 用三次样条曲线将极大值点拟合成上包络线, 将极小值点拟合成下包络线, 取上下包络线均值为 m_1 , 得

$$h_k = x(t) - m_k \quad k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

判断 h_1 是否具备 IMF 条件, 若不满足, 则把 h_1 作为新的原始信号 $x(t)$ 重复上述步骤, 直到 h_k 满足条件为止, 并记 $c_1 = h_k$ 为第一个 IMF 分量。

将 c_1 从 $x(t)$ 中分离出来得到第一阶剩余信号

$$r_1 = s(t) - c_1 \quad (2)$$

式中, $s(t)$ 为实信号, 其值为 $s(t) = a(t)\cos\varphi(t)$ ^[15]。

当 r_1 为原始信号时返回式(1), 得到第二个 IMF 分量 c_2 , 如此循环 n 次得到 n 个 IMF 分量, 则趋势项为:

$$r = \sum_{i=1}^n x(t) - \sum_{i=1}^n c_i \quad (3)$$

若 r 满足: 1) 分解信号上下包络线足够小; 2) r 为单调函数, 则循环终止。由此可知原始数据序列为 n 个 IMF 分量和一个趋势项 r 之和。

对连续时间信号 $x(t)$, 经过 Hilbert 变换可得^[16]

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (4)$$

其反变换得

$$X(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Y(\tau)}{\tau - t} d\tau \quad (5)$$

$x(t)$ 与 $y(t)$ 构成解析信号。

瞬时幅值为

$$A(t) = \sqrt{X(t)^2 + Y(t)^2} \quad (6)$$

瞬时相位为

$$\theta(t) = \arctan \frac{Y(t)}{X(t)} \quad (7)$$

瞬时频率为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (8)$$

为了避免文献[14]中提到的倒相现象, 倒相现象发生在故障 1/4 周期之后, 影响选线准确性。另一方

面, 如果截取的时间段过短, 采样数据较少, 不能全面反映故障时暂态特征量的变化情况, 故本文截取故障前后 1/4 周期零序电流信号进行 EMD 分解。

EMD 分解后得到的是不同时间尺度下的有限个 IMF 分量, 第一个分解出的 IMF 分量时间尺度最小, 频率最大。所以第一个 IMF 分量即 IMF1 中含有的高频成分最多。由于故障瞬间零序电流的震荡频率很高, IMF1 中含有更多的故障信息, 故选用 IMF1 分量作极性比较。

标定 IMF1 分量在故障后首次达到极大值的时刻为特征时刻, 比较各线路最高频 IMF1 分量在此特征时刻的极性, 若有一条线路的极性与其他线路相反, 则判定为故障线路。

2.2. TEO 基本原理

以采样频率 f_s 对连续振荡信号进行采样, 得到其离散形式

$$x_n = A \cos(\Omega n + \varphi) \quad (9)$$

式中, $\Omega = 2\pi f_0/f_s$, 其中 f_0 是基波频率, f_s 是采样频率, φ 为初相角。

为求得 A 、 Ω 、 φ , 相邻三个采样点 x_n 、 x_{n+1} 、 x_{n-1} 构成方程组为

$$\begin{cases} x_n = A \cos(\Omega n + \varphi) \\ x_{n+1} = A \cos[(n+1)\Omega + \varphi] \\ x_{n-1} = A \cos[(n-1)\Omega + \varphi] \end{cases} \quad (10)$$

用三角变换

$\cos(\alpha + \beta)\cos(\alpha - \beta) = [\cos(2\alpha) + \cos(2\beta)]/2$ 解方程组(9)得

$$x_{n+1}x_{n-1} = \frac{A^2}{2} [\cos(2\Omega + 2\varphi) + \cos(2\Omega)] \quad (11)$$

对式(11)应用三角恒等变换

$\cos(2\alpha) = 2\cos^2\alpha - 1 = 1 - 2\sin^2\alpha$ 得

$$x_{n+1}x_{n-1} = A^2 \cos(\Omega + \varphi) - A^2 \sin^2 \Omega \quad (12)$$

所以有

$$A^2 \sin^2 \Omega = x_n^2 - x_{n+1}x_{n-1} \quad (13)$$

式中, 由于故障录波器采样频率 f_s 通常都很大, 故 Ω 较小。根据文献[17], 把 Ω 限制为 $\Omega < (\pi/4) = 0.7845$,

即 $f_0/f_s = 1/8$ 时, $\sin \Omega$ 和 Ω 的相对误差小于 11%, 这时可近似认为 $\sin \Omega \approx \Omega$ 。于是, 式(13)转化为

$$A^2 \Omega^2 \approx x_n^2 - x_{n+1}x_{n-1} \quad (14)$$

信号的一个简单的能量测度方法, 即 TEO 的计算方法为

$$E_n = x_n^2 - x_{n+1}x_{n-1} \approx A^2 \Omega^2 \quad (15)$$

定义 TEO 为

$$\psi(x_n) = x_n^2 - x_{n+1}x_{n-1} \quad (16)$$

3. 基于 HHT 和 TEO 结合的选线方法

谐振接地系统发生单相接地故障时, 零序电流发生瞬时突变, 频率和幅值均非常大, 可以用瞬时能量来刻画这种突变。但是 TEO 只适用于单分量信号, 零序电流突变信号属于非线性非平稳的多分量信号, 需要经过处理才能应用。

小波去噪处理可以将零序电流信号中含有的噪声消除, 提取信号的有效成分。EMD 分解是一种自适应的信号处理分析方法, 它从信号的局部特征出发, 将信号分解成有限个 IMF, 是对非平稳信号比较直观、有效的处理方法。经 EMD 分解后得到的各 IMF 分量是单分量信号, 又由于最高频的 IMF1 分量含有故障高频成分, 可以反映零序电流的突变情况, 故本文提出对 EMD 分解后的最高频的 IMF1 分量求其 TEO 值, 并通过比较其特征时刻的 TEO 的大小来选出故障线路。

HHT 极性判别法和上述 TEO 值比较法两种方法相结合, 实现了极性和幅值融合的选线判据, 两者优势互补, 保证了谐振接地选线的准确度。

基于上述对选线方法理论的相关分析, 基于 TEO 值比较的选线方法, 与 HHT 极性判别方法相结合, 形成综合选线判据。选线步骤如下:

- 1) 对各线路零序电流信号进行数据采集并进行小波去噪处理;
- 2) 截取故障前后 1/4 周期零序电流并进行 EMD 分解;
- 3) 提取最高频的 IMF1 分量;
- 4) 求出 IMF1 分量的 TEO 值, 并标定 TEO 取得暂态极大值的时刻为特征时刻;
- 5) 比较特征时刻各线路的 TEO 值的大小, 最大

的为故障线路。

自步骤 3)起同时利用 HHT 极性判别方法进行选线, 形成综合判据。其选线流程图如图 1 所示。

4. 算例分析

根据实际电网各个参数数据, 在 MATLAB/Simulink 环境下建立如图 2 所示的谐振接地系统仿真模型。

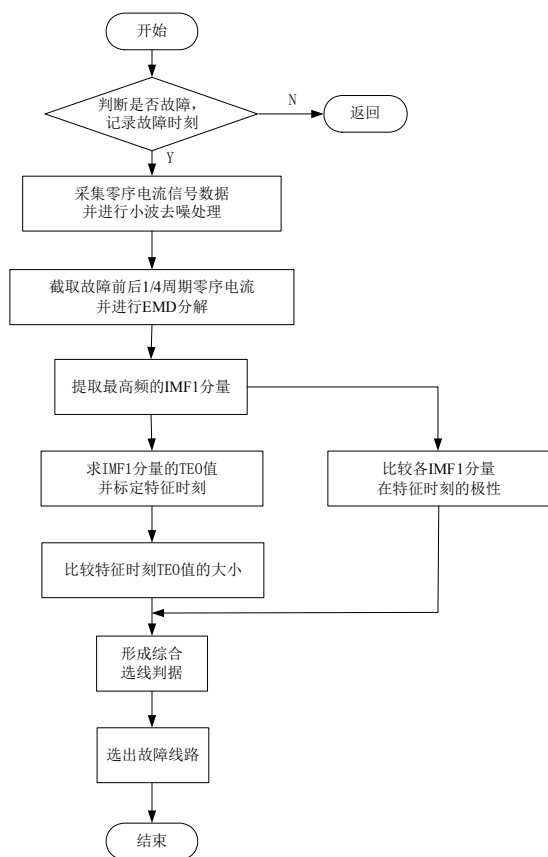


Figure 1. The flow chart of routing method
图 1. 选线方法流程图

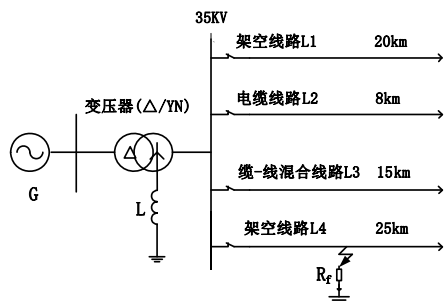


Figure 2. Diagram of simulation model for 35 kV resonant grounded system
图 2. 35 kV 谐振接地系统仿真模型图

系统电压等级为 35 kV, 中性点经消弧线圈接地, 过补偿度为 8%。系统包含 4 条出线: L1 为架空线路, 长度为 20 km; L2 为电缆线路, 线路长度为 8 km; L3 为缆-线混合线路, 其中架空线路 10 km, 电缆线路 5 km; L4 为架空线路, 长度为 25 km。为了更加接近实际系统, 架空线路和电缆线路选用分布参数线路模型。各线路零序电压及零序电流是将测得的三相电压电流经矢量叠加后得到的。接地故障部分选用开关串联接地电阻, 可以灵活控制接地故障发生时刻。系统仿真时间为 0.1 秒。

设线路 L4 末端处发生 A 相接地故障, 故障时刻为 $t = 0.0075$ s(相电压最大), 过渡电阻为 200Ω 。以线路 L2 和 L4 为例进行分析, 图 3 为线路 L2 和 L4 去噪前后零序电流波形对比图。

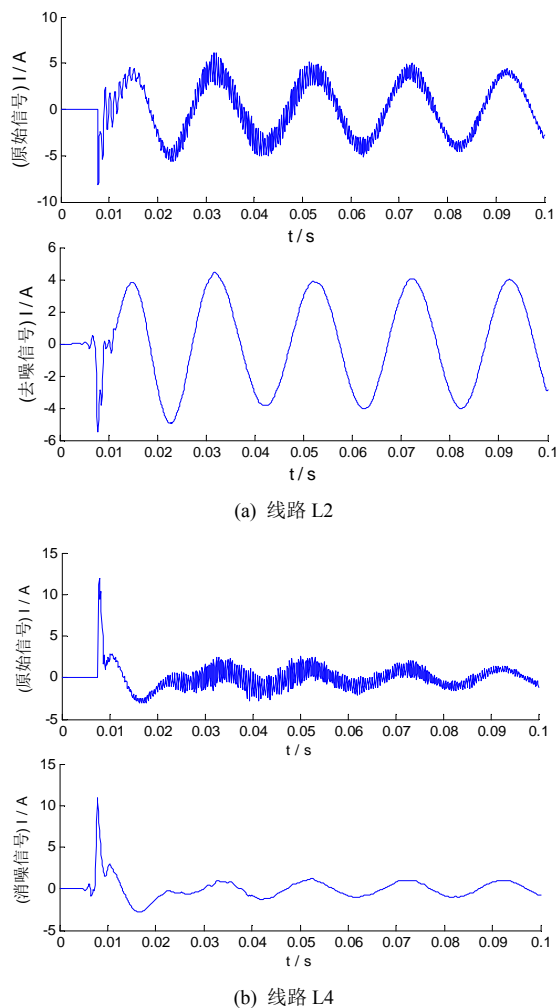


Figure 3. The zero sequence current of denoising before and after for line L2 and L4
图 3. 线路 L2、L4 去噪前后零序电流

分析可知，小波去噪效果明显，消除了零序电流波形中由噪声产生的“毛刺”，有效的提取了原始信号信息。

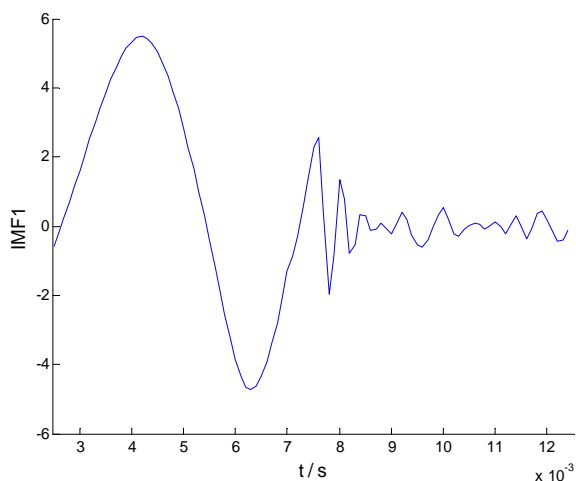
截取图 3 中去噪后零序电流的故障前后 1/4 周期信号进行 EMD 分解。线路 L2 和 L4 最高频的 IMF1 分量如图 4 所示。

各线路的 IMF1 分量的 TEO 如图 5 所示。

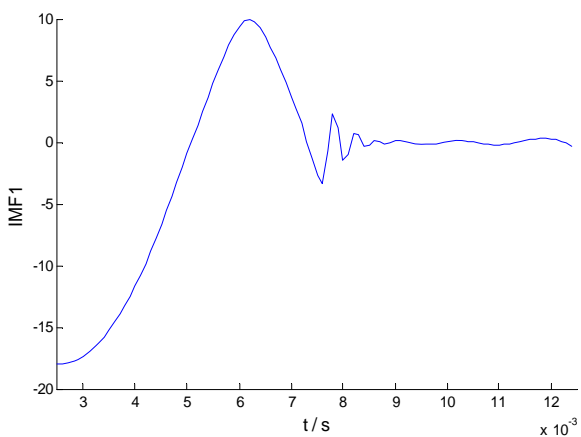
标定 TEO 取得暂态极大值的时刻为特征时刻，即 $t = 0.0078\text{ s}$ 。此时刻各线路 IMF1 的 TEO 值如表 1 所示。

根据 HHT 极性判别法，各线路 IMF1 分量如图 6 所示。

特征时刻为 $t = 0.0078\text{ s}$ 时，各线路 IMF1 的值如表 2 所示。



(a) 线路 L2



(b) 线路 L4

Figure 4. The IMF1 of the highest frequency for line L2 and L4
图 4. 线路 L2、L4 最高频的 IMF1 分量

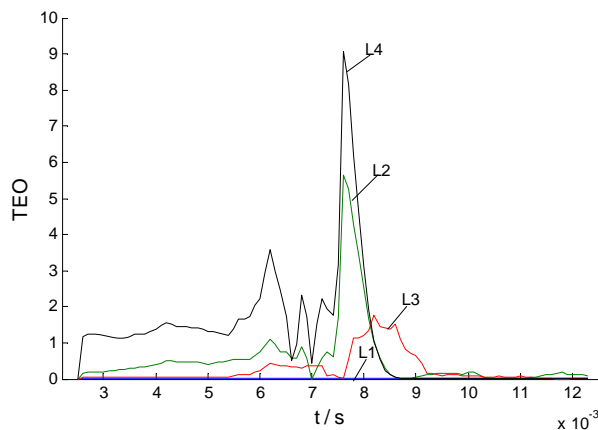


Figure 5. The TEO of each line IMF1 component
图 5. 各线路 IMF1 分量的 TEO

Table 1. The TEO of each line IMF1 characteristic time
表 1. 各线路 IMF1 特征时刻 TEO 值

线路	L1	L2	L3	L4
TEO 值	0.0021	5.6360	0.5404	9.0670

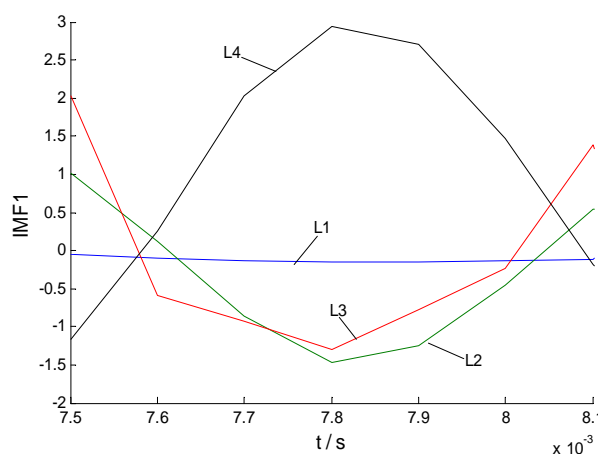


Figure 6. IMF1 component of the highest frequency for each line
图 6. 各线路最高频 IMF1 分量

Table 2. The value of each line IMF1 characteristic time
表 2. 各线路 IMF1 特征时刻的值

线路	L1	L2	L3	L4
IMF1 分量	-0.1568	-1.4710	-1.2960	2.9390

由表 1 可知，线路 L4 的 TEO 值大于其他三条线路，故判断线路 L4 为故障线路；同时由表 2 可知，线路 L4 的 IMF1 值为正，而其他三条线路为负，即线路 L4 的 IMF1 分量极性与其他三条线路相反，故可判断线路 L4 为故障线路。综上两种判据，可判定故障线路为线路 L4，选线正确。

5. 结论

谐振接地系统发生单相接地故障时, 过渡过程比较复杂, 采用单一的故障选线方法有可能出现“错选”、“误选”等情况。本章对零序电流信号进行 EMD 分解后, 将 TEO 合理的引入选线算法中, 并且提出了与 HHT 极性判别法融合的选线算法, 为谐振接地选线提供双重保障。

参考文献 (References)

- [1] 程路, 陈乔夫. 小电流接地系统单相接地选线技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 219-223.
- [2] 张帆, 潘贞存, 张慧芬等. 基于零序电流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.
- [3] 李冬辉, 史临潼. 非直接接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 继电器, 2004, 32(18): 74-76.
- [4] Y. Y. Zhang, Q. W. Gong and D. J. Chen. Fault line selection in non-solidly earthed network based on modulus maximum polarity. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2009: 661-664.
- [5] 胡佐, 李欣然, 石吉银. 基于残流与首半波综合的接地选线方法研究[J]. 继电器, 2006, 34(7): 6-9.
- [6] 何奔腾, 胡为进. 能量法小电流接地选线原理[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1998, 32(4): 451-456.
- [7] A. Borghetti, S. Corsi and C. A. Nucci. On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems. Electrical Power and Energy Systems, 2006, 13(28): 608-617.
- [8] 张大波, 刘志刚, 张亚军. 基于相差统计的小电流单相接地选线新判据[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 77-80.
- [9] 潘露, 吕艳萍, 于芳. 基于相频特性和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.
- [10] 梁睿, 王崇林, 刘建华等. 基于灰色关联的小电流接地选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 17-21.
- [11] 束洪春, 彭仕欣, 李斌. 利用测后模拟的谐振接地系统故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 59-64.
- [12] 庞清乐, 孙同景, 钟麦英等. 基于粗集理论的小电流接地系统故障选线[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 60-63.
- [13] Y. L. Qu, W. P. Tan and S. Cong. Study on fault line selection based on transient and mathematical morphology in resonant grounded system. International Conference on Power System Technology, 2006, 12(14): 523-531.
- [14] 王志群, 朱守真, 周双喜. Hilbert 变换求取电压闪变有关参数[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 34-37.
- [15] 束洪春, 赵文渊, 彭仕欣. 配电网——线混合线路故障选线的 HHT 检测方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 4-9.
- [16] 钟佑明, 秦树人. HHT 的理论依据探讨——Hilbert 变换的局部乘积定理[J]. 振动与冲击, 2006, 25(2): 12-15.
- [17] J. F. Kaiser. On a simple algorithm to calculate the energy of a signal. IEEE International Conference on Acoustics, 1990, 1: 381-384.