

DOI: 10.7667/PSPC152028

一种基于 Hilbert-Huang 变换的电力电缆故障测距方法

廖晓辉, 赵肖健, 梁恒娜

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了提高电力电缆故障测距的灵敏性和准确性, 提出一种基于 Hilbert-Huang 变换的电力电缆故障测距方法。针对电缆故障时暂态行波信号奇异性不明显问题, HHT 能在不需要选择基函数的条件下对信号进行自适应时频分析, 应用经验模态分解(EMD)方法对信号进行唯一分解。EMD 能在保持信号良好的时域特性和频域特性的同时得到信号的时频和能量分布关系, 有利于提取信号的奇异性, 进而减小测量误差。通过不同方法对故障进行数值仿真测距, 仿真结果表明 HHT 故障测距方法具有很好的优越性。

关键词: 故障测距; Hilbert-Huang 变换; 奇异性; 经验模态分解; 时频

A power cable fault location method based on Hilbert-Huang transform

LIAO Xiaohui, ZHAO Xiaojian, LIANG Hengna

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To improve the sensitivity and accuracy of power cable fault location, a power cable fault location method based on Hilbert-Huang transform is proposed. For the problem of the singularity of the transient traveling wave signal is not clear when power fault happens, HHT can carry out adaptive time-frequency analysis to signal without choosing a basis function, and the empirical mode decomposition (EMD) method can be applied to unique decompose of the signal. EMD can maintain the good quality of the time and frequency characteristics of signal, meanwhile getting the time frequency and energy relationship of signal, which is good for extracting the singularity of signal. The fault location is simulated by different methods. The simulation results show the advantages of the HHT fault location method.

This work is supported by International Science and Technology Collaboration Program of Henan Science and Technology Department (No. 152102410009)

Key words: fault location; Hilbert-Huang transform; singularity; empirical mode decomposition; time frequency

0 引言

电力电缆相比于架空线路具有独特的优越性, 其在我国应用日益增多, 随着电网运行负荷增加、绝缘老化等因素的影响, 电力电缆故障频发问题日益突出。因此, 快速、精确地找出故障点, 迅速地解除故障, 维持电网正常运行, 提高供电可靠性具有重要意义^[1-4]。

随着技术进步, 行波在线测距^[5-6]逐渐成为电缆故障测距的主要研究方向。行波在线测距主要是通过测量行波在电缆中的速度以及行波到达检测端的时间来计算故障距离。然而电缆故障时产生的行波信号较为复杂, 奇异性不明显, 行波分量难以提取, 不能准确地检测出行波到达时刻, 进而产生测

量误差。应用 HHT 可最大限度地提高测量精度。HHT 在分析电缆故障产生的非平稳暂态行波信号时, 无需选择基函数, 避免了小波变换中小波基函数选择的难题^[7]; 同时, HHT 根据信号自身特性对信号进行自适应分解, 使信号在时域和频域内同时保持良好的性质, 解决了小波变换中无法同时表现出信号的时域和频域特性的难题; 应用 EMD 方法能在保持信号良好的时频局域性的同时将故障行波信号进行唯一分解, 并获得信号的时频与能量分布关系, 以能更好地提取行波信号奇异特征, 精确检测行波到达测量端时刻, 进而减少由行波奇异性提取带来的误差, 提高测量精度^[8-9]。

本文由 Matlab 建立电缆故障仿真模型, 对故障进行数值仿真。应用 HHT 方法的一些独特优点来提取故障产生的暂态行波信号, 对信号进行分析处理, 进而确定故障点位置。并将所得结果与目前较

成熟的小波变换故障测距^[10-11]相比较, 提出 HHT 故障测距的优越性。

1 Hilbert-Huang 变换原理

Hilbert-Huang 变换分为经验模态分解和 Hilbert 变换两步^[12]。经验模态分解是对信号进行分解处理, 使信号平稳化, 容易分析。即将故障信号分解为若干个固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)。Hilbert 变换是对 IMF 分量进行 Hilbert 谱分析^[13]。

1.1 经验模态分解

应用 EMD 方法时假设每个信号均可分解为一系列线性固有模态函数, 此外, 分解后得到的 IMF 还必须满足: 极值点个数和过零点个数在整个时间范围内相等, 或最多相差一个; 任意时刻信号的局部极大值和局部极小值的包络平均值为零^[14]。这样就可以把信号分解成有限个 IMF 的和。

对于任一信号序列 $x(t)$, 经验模态分解步骤如下。

1) 由已知条件, 确定信号序列的全部极值点。

2) 利用插值函数求出 $x(t)$ 的上、下包络线 $v_1(t)$ 和 $v_2(t)$, 之后算出包络线的平均值 $m_1(t)$, 即

$$m_1(t) = \frac{1}{2}(v_1(t) + v_2(t)) \quad (1)$$

3) 取 $x(t)$ 和 $m_1(t)$ 的差, 即

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (2)$$

分析 $h_1(t)$ 是否符合以上两个条件, 若符合条件, 则令 $h_1(t)$ 作为第一个 IMF 分量, 继续进行处理。若不符合条件, 则令 $h_1(t)$ 作为新的信号, 继续上述过程, 直至满足要求。

4) 令 $c_1 = h_1(t)$, 则 c_1 为第一个 IMF 分量, 令 $x(t)$ 与其相减, 得

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (3)$$

重复以上步骤, 得到 c_2 为第二个 IMF 分量, $r_2(t) = r_1(t) - c_2$ 。依次进行 n 次, 得到的第 n 个 IMF 分量 c_n , $r_n(t) = r_{n-1}(t) - c_n$ 。 $r_n(t)$ 为残余分量。

5) 重复以上步骤, 直至 $r_n(t)$ 是单调函数或仅有一个极值点时停止。分解后的信号可以表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (4)$$

在上述的步骤中, 可引入 S_D 值来筛选每次结果。 S_D 为

$$S_D = \sum_{i=0}^r \left| \frac{h_{i(k)}(t) - h_{i(k-1)}(t)}{h_{i(k-1)}^2(t)} \right| \quad (5)$$

S_D 的取值小于 0.2 或大于 0.3 时, 停止筛选。

1.2 Hilbert 谱分析

经 EMD 分解后的信号去除残余项 $r_n(t)$ 后为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) \quad (6)$$

式中: a_i 表示幅值; ω_i 表示瞬时频率, 则经 Hilbert 变换后得到所有 IMF 分量可表示为 $c_i(t) = \text{Re}[a_i(t)e^{j\int\omega_i(t)dt}]$, 信号表示为

$$x(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t)e^{j\int\omega_i(t)dt} \quad (7)$$

由公式可得, 以上分量的相位幅值均与时间有关, 对 $x(t)$ 进行傅里叶变换得: $x(t) = \sum_{i=1}^n a_i e^{j\omega_i t}$; 则

Hilbert 谱记为

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t)e^{j\int\omega_i(t)dt} \quad (8)$$

它反映出了瞬时频率和时间的分布关系, 由式 (8) 可以看出, 变换处理得到的瞬时频率 $\omega_i(t)$ 和 $a_i(t)$ 均是含有时间的变量, 因此可得到每个时刻的频率状况。

1.3 HHT 对信号的奇异性检测

信号奇异性检测主要是分析经 EMD 分解后的高频 IMF。一般是对特征尺度最小的(第一个)IMF 分量进行分析^[15], 检测步骤如下:

1) 用 EMD 方法将信号分解, 得到若干个 IMF 分量。

2) 分析第一个 IMF 分量, 找出它相邻的极大值和极小值。

3) 令相邻极大值和极小值点的幅值作差, 并求相邻极值点的时间差。

4) 将幅值差的绝对值最大且时间差最小处作为奇异点位置。

通常信号的奇异性是瞬间的, 故奇异点处的极值间隔一般仅有一个采样间隔, 因此将极值点间隔最小处的极大值点作为奇异点的位置^[16]。

在应用时, EMD 将信号分解为若干 IMF 分量后, 对第一个 IMF 分量进行一阶微分处理, 求出它的模值, 将模极大值点处作为信号奇异点位置。

2 电力电缆行波在线测距

电缆故障行波在线测距的理论依据为: 故障产生的暂态行波在传输过程中遇到阻抗不同的点会发生折射与反射; 行波在同一介质中传播具有相同速度^[17]。

行波在线故障测距时根据行波信号检测方式不同,可分为单端检测法和双端检测法^[18]。由于双端检测存在时间难同步,经济性差,多回路线路上原理性不足等问题,本文采用单端检测方法来进行故障定位。当电缆某处发生故障时,故障处的信号会发生突变,产生暂态行波,采用 HHT 方法对信号进行奇异性检测,找出行波波头第一次到达检测端时间与行波经故障点反射后再次到达检测端的时间间隔。由公式: $v = 1/\sqrt{CL}$ 计算出行波波速(式中 C 、 L 分别表示单位长度的电容和电感),从而找出故障点位置。

如图 1 所示,电缆线路全长为 l , 两侧母线分别为 M_1, M_2 , F_1, F_2 为故障点位置。由图可知,故障可能发生在线路前半部分 M_1M 内,也可能发生在线路后半部分 MM_2 内。把故障点距 M_1 端的距离记为 X 。

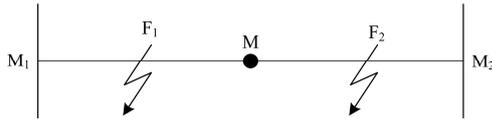


图 1 电缆故障分布图

Fig. 1 Distribution map of cable fault

当 F_1 处为故障点时,行波传输过程如图 2。此时,应测得行波信号初次到达 M_1 端的时间 t_1 以及行波经反射后再次到达 M_1 端的时间 t_2 。故障距离 X_1 计算公式为

$$X_1 = \frac{v(t_2 - t_1)}{2} \quad (9)$$

当 F_2 处为故障点时,行波传输过程如图 3。此时,应测得行波信号初次到达 M_1 端的时间 t_1 以及行波到达 M_2 端后发生反射再次到达 M_1 端的时间 t_2 ,

此时,故障距离 X_2 计算公式为

$$X_2 = l - \frac{v(t_2 - t_1)}{2} \quad (10)$$

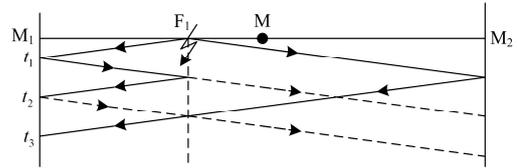


图 2 前半段电缆故障时行波分析图

Fig. 2 Traveling wave analysis chart of cable fault in the first half part

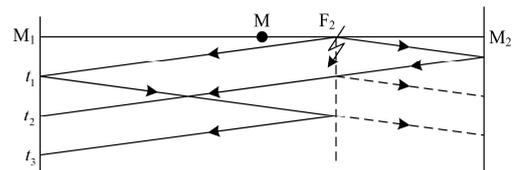


图 3 后半段电缆故障时行波分析图

Fig. 3 Traveling wave analysis chart of cable fault in the second half part

3 故障测距仿真分析

通过 Matlab/Simulink 建立故障仿真模型,如图 4 所示。为模拟三相无穷大电源,将电源设为理想电源;三相变压器 T_1, T_2 的接线方式分别为 $Y/\Delta, Y/Y_g$ 。三条电缆线路 Cb_1, Cb_2 和 Cb_3 接在母线上,其中 Cb_1 为故障线路,分两段 Cb_{1-1} 和 Cb_{1-2} ,长度分别为 1 km, 2 km。 Cb_2, Cb_3 为正常线路,其长度分别为 3 km, 5 km。故障处接有三相故障模块,可通过改变故障模块参数来改变故障模型,进而实现不同类型故障仿真。

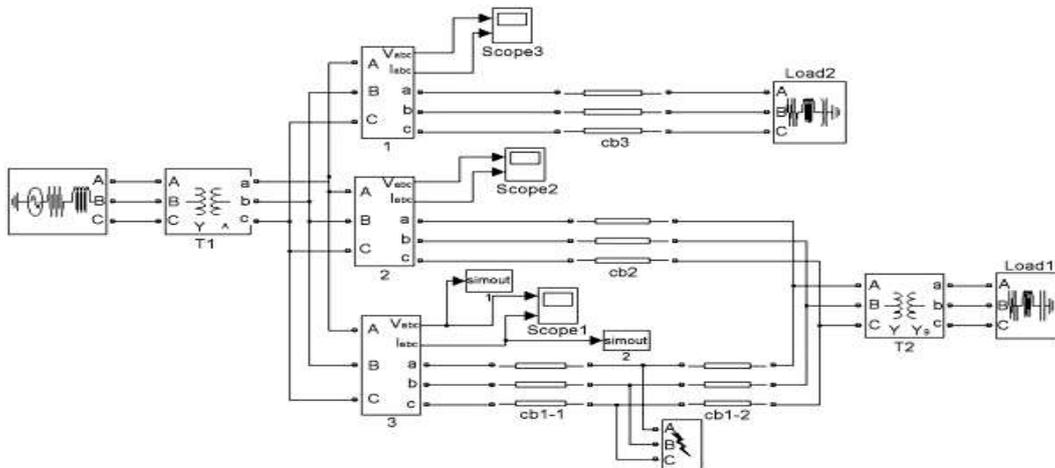


图 4 电缆故障仿真模型

Fig. 4 Cable fault simulation model

系统中模型参数如下。① 系统电源：110 kV。② 变压器参数： T_1 , 110/35 kV; T_2 , 35/10 kV。③ 电缆分布参数：正序分布参数, $R_1=0.079\ 15\ \Omega/\text{km}$, $L_1=0.4162\times 10^{-3}\ \text{H}/\text{km}$, $C_1=0.1832\times 10^{-6}\ \text{F}/\text{km}$; 零序分布参数, $R_0=0.2281\ \Omega/\text{km}$, $L_0=1.248\times 10^{-3}\ \text{H}/\text{km}$, $C_0=0.1210\ \text{F}/\text{km}$ 。

故障类型设为 A 相接地故障, 故障距离设为距首端 M_1 1 km, 故障时间为 0.082~0.092 s。故障仿真时间设为 0.2 s, 采样频率为 1 MHz, 行波波速为 $1.1485\times 10^5\ \text{km}/\text{s}$ 。

在检测端可得到故障线路 Cb_1 的三相电流和电压波形。由于电压行波在传输以及反射时会出现严重衰减, 难以有效地进行分析。而电流行波在传输和反射过程中会增强, 故在行波测距中常用电流行波分量作为分析对象。图 5 为 A 相发生短路故障时的三相电流波形图。图 6 为对故障电流行波线模分量放大后的图形。

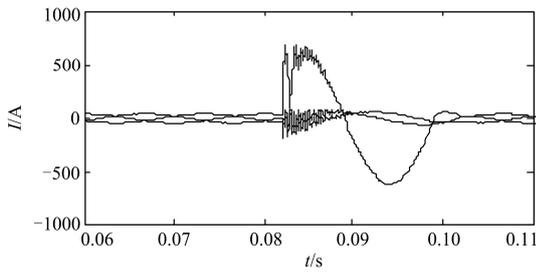


图 5 A 相短路时三相电流波形图

Fig. 5 Current waveform of single phase earth fault

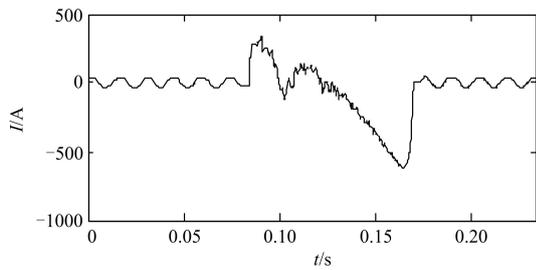


图 6 电流行波线模分量图

Fig. 6 Line mode component of fault current

用 EMD 方法处理电流线模分量可得到 8 个 IMF 分量, 如图 7 所示。应用 HHT 对信号奇异性检测原理, 提取第一个 IMF 分量, 对其进行一阶微分处理, 可得 IMF_1 的一阶微分图, 即图 8。由 EMD 信号奇异性检测可知, 第一个模极大值点即为故障行波信号初次到达检测端 M_1 的时刻; 第二个模极大值是故障行波经故障点反射后再次到达检测端 M_1 的时刻。

由 IMF_1 的一阶微分图可以得出, 行波两次到达检测端的时间间隔为 17.6 个采样点, 即行波两次到达检测端的时间间隔是 $17.6\ \mu\text{s}$, 因故障发生在线路的前半段内, 故应用式(9), 计算故障距离为 1.010 68 km。仿真结果与实际误差为 10.68 m。相对误差为 1.068%。

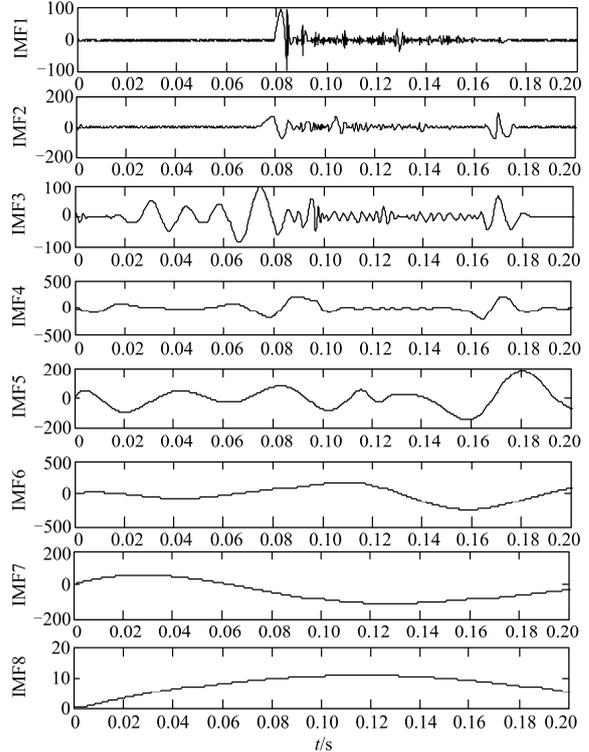


图 7 EMD 分解电流线模分量得到的 IMF 分量

Fig. 7 IMF component of EMD decomposition current line mode component

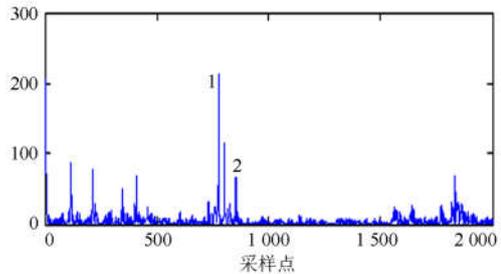


图 8 IMF_1 的一阶微分图形

Fig. 8 First order differential map of IMF_1

改变故障模块参数进而改变故障类型, 测量 AB 两相接地故障、三相接地故障两种情况下故障距离及其相对误差, 并将所得结果与目前较成熟的小波变换电缆故障测距方法的相关数据^[19]相比较; 由表 1 可知, 三种故障类型情况下, HHT 故障测距方法的故障测距相对误差均不到 1.5%, 相比于小波变

换测距, HHT 故障测距方法提高了故障测距的精确度。(L: 故障距离, u: 故障测距相对误差。)

表 1 1km 处故障时两种方法仿真测距结果

Table 1 Two simulation results in 1km of cable fault location

测距方法	A 相接地故障		AB 两相接地故障		三相接地故障	
	L/m	u%	L/m	u%	L/m	u%
HHT	1010.68	1.068	987.71	1.229	9.99	0.08
小波	1033.65	3.365	1033.65	3.365	10.11	1.07

将故障类型设置为 A 相接地故障, 改变故障模块中接地电阻的大小及故障距离, 测量出不同条件下的故障距离及其相对误差, 结果见表 2; 由表 2 可知, HHT 故障测距方法不受故障距离及接地电阻大小的影响。

表 2 电缆故障仿真测距结果

Table 2 Simulation of cable fault location

故障距离/m	过渡电阻/ Ω	测量距离(L/m)		相对误差(u%)	
		HHT	小波变换	HHT	小波变换
500	5	493.86	482.37	1.229	3.526
	100	493.86	482.37	1.229	3.526
1000	5	987.71	1033.65	1.229	3.365
	100	987.71	1033.65	1.229	3.365
1500	5	1493.05	1521.18	0.463	1.145
	100	1493.05	1521.18	0.463	1.145

4 结论

本文分析了目前电缆故障测距中存在的问题, 提出了一种基于 Hilbert-Huang 变换的电力电缆故障测距方法。针对电缆故障测距中故障行波信号奇异性不明显, 行波分量难以提取的难题, 应用 HHT 分析信号的独特优势, 对电缆故障测距进行仿真分析。通过对不同类型故障分析, 可知 HHT 方法不受故障类型、故障距离以及接地电阻大小的影响; 1 km 处故障测距仿真误差距离均小于 15 m, 表明相较于传统方法, HHT 的测量精度大大提高。

参考文献

[1] 王利平, 王晓茹, 王伟, 等. 输电线路故障测距实用算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 52-58. WANG Liping, WANG Xiaoru, WANG Wei, et al. Study of faults location utilizing algorithm on power transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 52-58.

[2] 杨忠, 周鑫, 牛海清. 电力电缆故障定位技术综述[J]. 电气应用, 2008, 27(21): 86-90. YANG Zhong, ZHOU Xin, NIU Haiqing. Survey of power cable fault location technology[J]. Electrotechnical

Application, 2008, 27(21): 86-90.

[3] 许东升, 田凤兰, 赵珩, 等. 电力电缆故障现场测距方法的研究与应用[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 136-140. XU Dongsheng, TIAN Fenglan, ZHAO Heng, et al. Research and application of power cable fault diagnostic method[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 136-140.

[4] 赵雪骞, 任志刚, 郭鑫宇, 等. 35 kV 交联电缆振荡过电压击穿故障分析及抑制措施[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 162-168. ZHAO Xueqian, REN Zhigang, GUO Xinyu, et al. Analysis of oscillating over-voltage breakdown fault of 35 kV XLPE Power cable with countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 162-168.

[5] 何军娜, 陈剑云, 艾颖梅, 等. 电力系统行波测距方法及其发展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 148-154. HE Junna, CHEN Jianyun, AI Yingmei, et al. Fault location methods based on traveling wave theory for power system and its development[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 148-154.

[6] 张广斌, 束洪春, 于继来, 等. 不依赖双侧时钟同步的输电线双端行波测距[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 199-209. ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Double-ended travelling wave fault location independent of two side time synchronization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 199-209.

[7] 李正明, 徐敏, 潘天红, 等. 基于小波变换和 HHT 的分布式并网系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 34-39. LI Zhengming, XU Min, PAN Tianhong, et al. A harmonic detection method for distributed connected grid system by using wavelet transform and HHT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 34-39.

[8] 沈毅, 沈志远. 一种非线性非平稳自适应信号处理方法-希尔伯特-黄变换综述: 发展与应用[J]. 自动化技术与应用, 2010, 29(5): 1-5. SHEN Yi, SHEN Zhiyuan. A review of the nonlinear non-stationary adaptive signal processing method-Hilbert-Huang transform: its development and applications[J]. Techniques of Automation and Application, 2010, 29(5): 1-5.

[9] 许丹, 于龙, 王玉梅. 基于最小二乘法改进的 EMD 与能量熵融合的断路器机械故障诊断方法[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 99-103. XU Dan, YU Long, WANG Yumei. Mechanical fault diagnosis method for circuit breaker based on the combination of energy entropy and improved EMD by

- using the least square method[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 99-103.
- [10] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 115-123.
YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 115-123.
- [11] 许珉, 杨艳伟, 申克运, 等. 基于小波变换的电缆短距离开路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 112-116.
XU Min, YANG Yanwei, SHEN Keyun, et al. Cable short open-circuit fault location based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 112-116.
- [12] 缪希仁, 吴晓梅, 石敦义, 等. 采用 HHT 振动分析的低压断路器合闸同期辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 154-161.
MIAO Xiren, WU Xiaomei, SHI Dunyi, et al. Switching synchronism identification of low voltage circuit breaker utilizing HHT analysis to vibration signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 154-161.
- [13] 贾春花. 希尔伯特-黄变换及其在信号处理中的应用研究[J]. 电力学报, 2013, 28(2): 148-151.
JIA Chunhua. Study of Hilbert-Huang transform and its applications in signal processing[J]. Journal of Electric Power, 2013, 28(2): 148-151.
- [14] 康忠建, 田爱娜, 冯艳艳. 基于 HHT 配电网不对称接地故障测距新方法[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(11): 1-6.
KANG Zhongjian, TIAN Aina, FENG Yanyan. A new method of asymmetric ground fault location based on the Hilbert-Huang transform in distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(11): 1-6.
- [15] 梁恒娜. 基于 Hilbert-Huang 变换的电力电缆故障测距研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
LIANG Hengna. Research on fault locating simulation for power cable base on Hilbert-Huang transform[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.
- [16] 束洪春, 赵文渊, 彭仕欣. 配电网缆-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.
SHU Hongchun, ZHAO Wenyuan, PENG Shixin. Faulty line selection based on HHT detection for hybrid distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 4-9.
- [17] 牛睿, 梁军, 张峰. 基于故障距离区间的混联线路单端行波测距[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 156-163.
NIU Rui, LIANG Jun, ZHANG Feng. A fault distance interval based single terminal traveling wave fault location method for hybrid transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 156-163.
- [18] 陈仕龙, 谢佳伟, 毕贵红, 等. 一种特高压直流输电线路神经网络双端故障测距新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 257-264.
CHEN Shilong, XIE Jiawei, BI Guihong, et al. A novel two terminal fault location method used ANN for UHVDC transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 257-264.
- [19] 廖晓辉, 梁恒娜, 丁倩. 基于小波变换的电力电缆在线故障测距研究[J]. 郑州大学学报, 2013, 34(3): 6-9.
LIAO Xiaohui, LIANG Hengna, DING Qian. Research of power cable fault location based on wavelet transform[J]. Journal of Zhengzhou University, 2013, 34(3): 6-9.

收稿日期: 2015-11-20; 修回日期: 2016-01-13

作者简介:

廖晓辉(1972-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统信号分析与处理; E-mail: liaoxiaohui0001@zzu.edu.cn

赵肖健(1992-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统信号分析与处理; E-mail: 623769182@qq.com

梁恒娜(1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析。E-mail: 605933960@qq.com

(编辑 葛艳娜)