

[文章编号] 1003-4684(2020)01-0043-04

# 基于 EEMD 和 TEO 的输电线路故障定位研究

艾轩源<sup>1</sup>, 刘 辉<sup>2</sup>, 谭 畅<sup>3</sup>

(1 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068;

2 国网鄂州供电公司, 湖北 鄂州 436000; 3 国网湖北检修公司, 湖北 武汉 430050)

[摘 要] 提出了一种新颖的故障定位方法即 EEMD-TEO 算法, 该算法克服了小波变换选择小波基函数和分解尺度的难题, 同时避免了 EMD 出现的模态混叠现象。先在 MATLAB/SIMULINK 上搭建供电系统的模型并设置故障, 然后提取故障信号进行分析, 最后通过实验结果的分析, 表明 EEMD-TEO 能够实现精准的故障效果。

[关键词] 故障定位; EEMD-TEO; 输电线路; MATLAB/SIMULINK

[中图分类号] TM773 [文献标识码] A

输电线路故障定位的研究方法主要可以分为两大类, 分别是故障分析法和行波法<sup>[1]</sup>。文献[2]和文献[3]都是采用故障分析法来进行故障定位, 不同之处在它们分别采用测量单端和双端的电压和电流数据来求解方程, 计算出故障距离, 但是故障分析法容易受到过渡电阻的影响。类似于故障分析法, 行波法也分为单端法和双端法<sup>[4]</sup>。双端行波法相比单端法避免了识别反射波头的困难, 同时 GPS 技术解决了测量时间的同步问题。为了避免小波变换出现的难以确定小波母函数、分解尺度的问题和经验模态分解(EMD)出现的模态混叠问题, 本文采用集合经验模态分解(EEMD)和 Teager 能量算子(TEO)相结合的双端行波法进行故障定位。

## 1 EEMD 和 TEO 的原理

### 1.1 EEMD 的原理

EEMD 是在 EMD 基础上进行的一种改进, 它对 EMD 出现的模态混叠现象的抑制效果较好<sup>[5-6]</sup>。EEMD 的具体原理可以简单地描述为借助辅助噪声来消除 EMD 分解信号出现的噪声。EMD 算法的具体过程如下:

1) 将原始信号  $f(t)$  的所有极大值和极小值都筛选出来而得到上下包络线并计算上下包络线的平均值, 记为  $\mu_1(t)$ , 原始信号中去除该均值得到新序列记为

$$h_1(t) = f(t) - \mu_1(t)$$

对  $h_1(t)$  按照文献[7]中本征模态函数(IMF)的条

件进行判断, 一般需要重复  $k$  次才能达到 IMF 的条件, 可以描述为

$$c_1(t) = h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - \mu_{1k}(t)$$

其中  $c_1$  为第一个符合 IMF 条件的分量, 记为 IMF1, 其频率最高。

2) 对原始信号去除最高频率分量得到新序列记为

$$r_1(t) = f(t) - c_1(t)$$

3) 将  $r_1(t)$  当作新的原始信号, 重复步骤 1) 和 2) 得到第二个符合 IMF 条件的分量  $c_2(t)$ 。

4) 重复步骤 1)~3)  $n$  次得到  $n$  个符合 IMF 条件的分量

$$\begin{cases} r_1(t) - c_2(t) = r_2(t) \\ \vdots \\ r_{n-1}(t) - c_n(t) = r_n(t) \end{cases}$$

当  $c_n(t)$  满足文献[7]中终止条件时, 结束上述过程, 得到

$$f(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t)$$

EEMD 算法的过程是在 EMD 算法的基础上进行的(图 1), 可以分如下几个步骤:

1) 在原始信号  $f(t)$  中加入  $n$  组不同的服从正态分布的高斯噪声;

2) 将  $n$  组不同的含高斯噪声的  $f(t)$  进行 EMD 分解得到 IMF 分量;

3) 对所有的 IMF 分量进行整体平均运算得到若干个新的 IMF 分量。

[收稿日期] 2019-06-28

[第一作者] 艾轩源(1989-), 女, 湖北鄂州人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为电气工程

[通信作者] 刘 辉(1962-), 男, 湖北武汉人, 工学博士, 湖北工业大学教授, 研究方向为电气工程

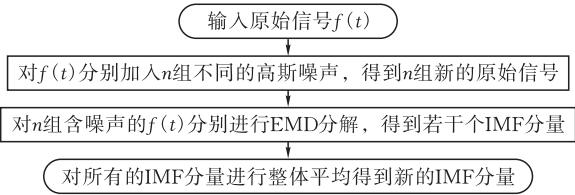


图 1 EEMD 原理图

1.2 TEO 的原理

Teager 能量算子 (TEO)<sup>[8]</sup> 最早是在分析语音信号时由 Teager 和 Kaiser 等人提出来的, 在识别信号的幅值和频率方面具有明显的优势。

对于连续信号  $x(t)$  其 Teager 能量算子可以描述为

$$\psi_c[x(t)] = [\dot{x}(t)]^2 - x(t)\ddot{x}(t) \tag{1}$$

对于单分量的幅值和频率不变的信号可以写成

$$x(t) = A\cos(\omega t + \theta) \tag{2}$$

其中  $A$ 、 $\omega$  和  $\theta$  为信号幅值、频率和相位。

将式(2)代入式(1)有

$$\begin{aligned} \psi_c[x(t)] &= \psi_c[A\cos(\omega t + \theta)] = \\ A^2\omega^2[\sin^2(\omega t + \theta) + \cos^2(\omega t + \theta)] &= \\ A^2\omega^2 \end{aligned}$$

对连续信号  $x(t)$  取导数后同理有

$$\begin{aligned} \psi_c[\dot{x}(t)] &= A^2\omega^4 \\ \omega &= \sqrt{\frac{\psi_c[\dot{x}(t)]}{\psi_c[x(t)]}} \\ |A| &= \frac{\psi_c[x(t)]}{\sqrt{\psi_c[\dot{x}(t)]}} \end{aligned}$$

Teager 能量算子能准确的跟踪信号瞬时能量的变化过程, 它对于 EEMD 分解得到的高频 IMF1 分量进行能量解析可以更加精确的得到原始故障信号行波的初始波头的位置。

1.3 基于 EEMD 和 TEO 的行波故障定位

考虑到三相线路的电磁耦合, 为了分析的方便必须先进行解耦, 即消除变量之间的耦合的影响来单独分析各个变量。文献[9]提出的 Karrenbauer 变换是一种能适用所有故障类型的相模变换方法, 以 ABC 三相的电流  $i_a$ 、 $i_b$  和  $i_c$  来说明一下, 由 Karrenbauer 变换的计算公式有

$$\begin{cases} i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \\ i_1 = \frac{1}{3}(i_a - i_b) \\ i_2 = \frac{1}{3}(i_a - i_c) \end{cases}$$

其中  $i_0$ 、 $i_1$  和  $i_2$  分别为 0 模分量、1 模分量和 2 模分量。0 模分量只有在发生接地故障时才存在, 而且受到环境因素影响较大, 1 模分量和 2 模分量受环境因素影响较小。

本文选择的是双端行波法故障测距(图 2)。在原理图中可以看出, 并不需要考虑故障行波的反射波和折射波, 只需要得到初始波头到达两端的时刻, 即可完成测距。

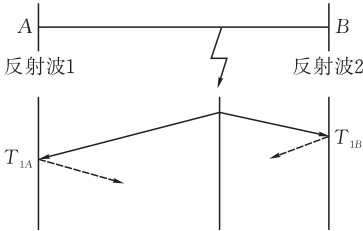


图 2 双端行波测距原理图

故障点到 A 和 B 两端的距离分别可以表示为

$$\begin{aligned} l_A &= \frac{l}{2} + \frac{1}{2}v \cdot (T_{1A} - T_{1B}) \\ l_B &= \frac{l}{2} + \frac{1}{2}v \cdot (T_{1B} - T_{1A}) \end{aligned} \tag{3}$$

其中,  $l$  表示线路的全长,  $T_{1A}$  和  $T_{1B}$  分别表示故障行波的初始波头到达 A 端和 B 端的时间,  $v$  是行波的波速,  $l_A$  和  $l_B$  分别表示故障点到 A 端和 B 端的距离。

识别波头的方法采用的是 EEMD 和 TEO, 行波故障定位的过程见图 3。

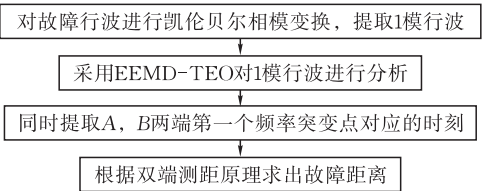


图 3 基于 EEMD-TEO 的双端行波定位

2 仿真与验证

在 MATLAB/SIMULINK 中搭建两端供电系统的模型(图 4)。参数设置情况: M 端和 N 端采用完全相同的三相交流供电系统, 线电压的有效值为 35 kV, 电源 A 相的相位角为 0, 频率为 50 Hz, 内部连接采用 Y 型中性点不接地的方式, 三相电源内阻 0.724  $\Omega$ , 三相电源电感 0.0192 H; 输电线路采用三相分布参数输电线路, 频率 50 Hz, 每 km 输电线路电阻正序分量和零序分量分别为 0.01273  $\Omega$  和 0.3864  $\Omega$ , 每 km 输电线路电感正序分量和零序分量分别为 0.9337 mH 和 4.1264 mH, 每 km 输电线路电容正序分量和零序分量分别为 0.012 74  $\mu\text{F}$  和 0.007 751  $\mu\text{F}$ , 输电线路总长 400 km。

以单相接地来说明故障定位的过程, 当系统设置在 0.03 s 时发生 A 相接地故障; 然后提取故障电流信号并进行 Karrenbauer 变换得到 1 模分量, 其中对示波器取的采样时间为 10  $\mu\text{s}$  即采样频率为

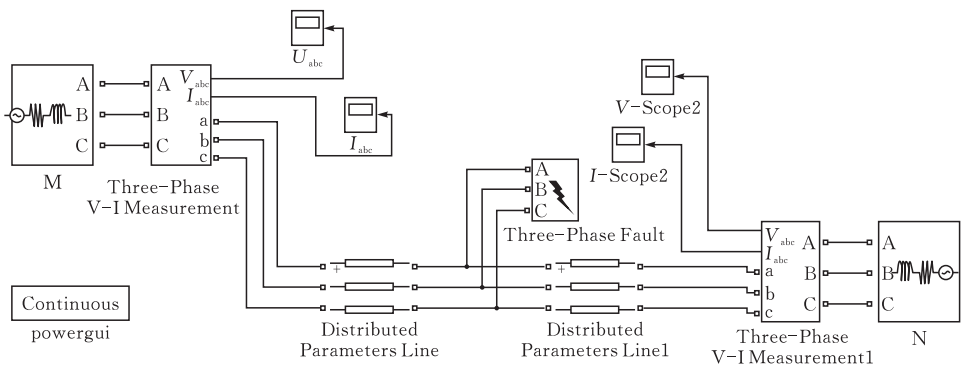


图 4 输电系统模型

0.03 MHz;最后采用 EEMD-TEO 算法来分析 1 模分量故障信号。对于 M 端首先提取故障信号并进行相模变换解耦,然后对解耦后的信号进行 EEMD 分解,得到如图 5 所示的 10 个 IMF 分量。

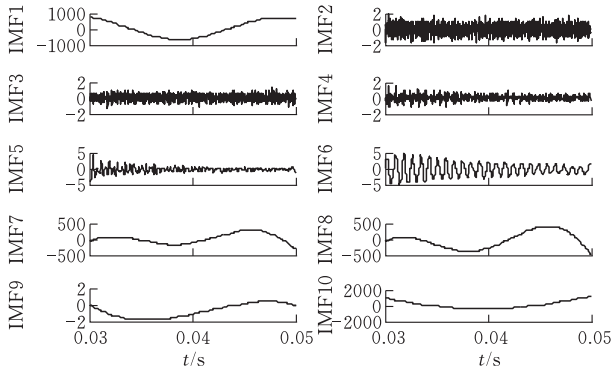


图 5 M 端故障信号的 EEMD 分解

取第一个 IMF 分量 IMF1 计算其 TEO 算子的值得到图 6 所示结果,观察第一个极值点的位置,该极值点对应的时刻即为故障行波波头首次到达 M 端的时刻,该时刻为 0.030 33 s。

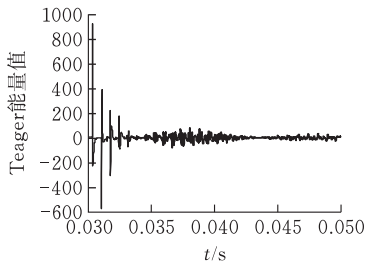


图 6 M 端故障信号的 IMF1 分量的 TEO 值

N 端亦首先提取故障信号并进行相模变换解耦,然后对解耦后的信号进行 EEMD 分解,得到图 7 所示的 10 个 IMF 分量,取第一个 IMF 分量 IMF1 计算其 TEO 算子的值得到图 8 所示结果,其第一个极值点对应的行波波头首次到达 N 端的时刻为 0.030 97 s。

经过上面分析,得到波头首次分别到达 M 端和 N 端的时间,由式(3)可以求出故障点到 M 端的距离为 99.875 km,同时该模型设置的故障点的理论位置在离 M 端 100 km 的地方。可以得出故障距离

的误差值为 0.125 km,误差 0.125 %。

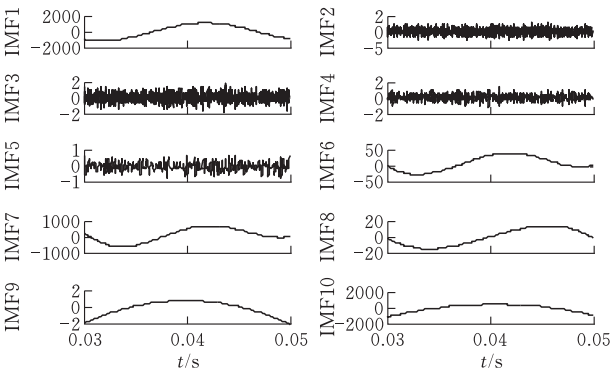


图 7 N 端故障信号的 EEMD 分解

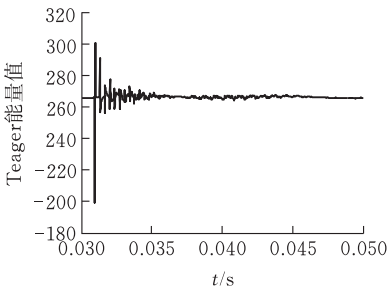


图 8 N 端故障信号的 IMF1 分量的 TEO 值

为了方便描述不同故障类型的情况,单相接地用 AG (BG、CG) 表示,两相接地用 ABG (ACG、BCG) 表示,两相短路用 AB (AC、BC) 表示,三相短路用 ABCG 表示。对于不同的故障位置设置不同的故障类型,采用 EEMD 和 TEO 算法计算故障距离,得到表 1 结果。由表 1 中数据可知:除了在故障位置为 150 km 处发生三相短路的情况和在故障位置为 300 km 处发生三相短路的情况,故障类型对故障测距的结果产生微小的影响(该影响是极小的,小到可以忽略)外,在该算法进行故障定位的结果几乎可忽略故障类型的影响,同时对于不同的故障距离该算法具有较高的测距精度,最大误差为 0.167 %,该误差可以达到实际应用中的要求。

为了更加直观地突出本文算法 EEMD-TEO 的测距的精度优势,针对完全相同的模型,其故障类型、故障位置和过渡电阻完全相同,采用小波变换

(WT)、希尔伯特-黄(HHT)和本文的算法进行对比,对比的结果见图 9。

表 1 不同故障类型的故障测距结果

故障类型	故障位置/km	故障测距/km	误差距离/km	误差比例/%
BG	150	149.76	0.24	0.16
ABG		149.76	0.24	0.16
AB		149.76	0.24	0.16
ABC		149.75	0.25	0.167
BG	200	200.26	0.26	0.13
ABG		200.26	0.26	0.13
AB		200.26	0.26	0.13
ABC		200.26	0.26	0.13
BG	250	249.72	0.28	0.112
ABG		249.72	0.28	0.112
AB		249.72	0.28	0.112
ABC		249.72	0.28	0.112
BG	300	300.32	0.32	0.107
ABG		300.32	0.32	0.107
AB		300.32	0.32	0.107
ABC		300.33	0.33	0.11

表 2 不同过渡电阻的故障测距结果

故障位置/km	过渡电阻/ $\Omega$	故障测距/km	误差距离/km	误差比例/%
150	0	149.76	0.24	0.16
	50	149.76	0.24	0.16
	150	149.76	0.24	0.16
	250	149.76	0.24	0.16
200	0	200.26	0.26	0.13
	50	200.26	0.26	0.13
	150	200.26	0.26	0.13
	250	200.26	0.26	0.13
300	0	249.72	0.28	0.112
	50	249.72	0.28	0.112
	150	249.72	0.28	0.112
	250	249.72	0.28	0.112
300	0	300.32	0.32	0.107
	50	300.32	0.32	0.107
	150	300.32	0.32	0.107
	250	300.32	0.32	0.107

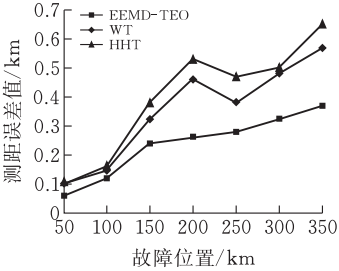


图 9 不同故障定位方法故障测距结果对比图

由图 9 可以看出,本文方法测距的精度最高,WT 和 HHT 测距的精度忽高忽低,WT 测距的精度受到

小波基函数和分解尺度的影响,而 HHT 测距的精度受到存在模态混叠和端点效应的缺陷的影响。显然,本文的方法在故障测距方面是对 WT 和 HHT 的改进,不仅测距精度更高,而且受过渡电阻和故障类型的影响较小。

3 结论

本文将 EEMD-TEO 的信号分析方法引入到故障定位,通过 SIMULINK 搭建系统仿真的模型。考虑到 GPS 技术已经很成熟,为了消除单端行波法中容易出现反射波和折射波混叠难以区分的问题,本文选择双端行波测距法。利用 EEMD-TEO 来分析故障信号的畸变点,即初始行波波头到达母线测量端的时刻。实验表明该方法受故障电阻和故障类型的影响较小,通过 EEMD-TEO、WT 和 HHT 三种信号方法进行对比,可以看出 EEMD-TEO 的故障测距的精度更高。

[参 考 文 献]

[1] 黄荣辉,李勋,张宏钊,等.线缆混合输电线路故障组合行波测距方法及影响因素研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(5):73-81.

[2] 张建文,周鹏,陈焕栩.基于改进阻抗法的单相接地故障测距仿真[J].电测与仪表,2018,55(3):84-87.

[3] 王丰华,穆卡,张君,等.基于参数修正的输电线路双端不同步测距方法[J].电力自动化设备,2018,38(8):95-101.

[4] 范春菊,姜军,郭煜华,等.输电线路行波故障测距技术的发展与应用[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(4):129-134.

[5] 王新,孟玲珍.基于 EEMD-LSSVM 的超短期负荷预测[J].电力系统保护与控制,2015,43(1):61-66.

[6] 牛盛瑜,张新燕,杨璐璐,等.基于 EEMD-RVM 风力发电机故障诊断方法研究[J].电测与仪表,2018,55(19):8-13.

[7] Wu Z, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in adaptive data analysis, 2009, 1(1):1-41.

[8] 靳行,林建辉,伍川辉,等.基于 EEMD-TEO 熵的高速列车轴承故障诊断方法[J].西南交通大学学报,2018,53(2):359-366.

[9] 张飏,和敬涵,薄志谦.基于凯伦贝尔变换的单端母线集成保护[J].电力系统保护与控制,2006,34(22):1-4.

(下转第 51 页)