

# 基于柔性高压直流输电线路故障测距和故障极性识别新方法

近年来高压直流输电系统得到了广泛的应用，高压直流输电技术快速发展，特别是以VSC-HVDC为代表的轻型直流输电系统发展迅猛，电缆的使用越来越普遍。然而由于电缆的依频特性突出，行波波头衰减和畸变严重，导致行波测距方法的使用受到很大的限制。分别采用小波分析的方法和数学形态学算法提取波头到达时刻，着重介绍了数学形态学算法。通过两种算法的对比可以看出，数学形态学算法相比于小波分析法有明显的优势，它不仅测距准确度高，而且可以通过图像直接区分故障类型。此外，数学形态学算法对噪声不敏感，算法简单，易于实现，不受过渡电阻的影响；并且能够准确测距，同时能够明显地区分出故障极性，无须单独再对故障的极性作判断。

殷自力 陈宇星/国网福建省电力有限公司



殷自力/高级工程师

## 关键词/Keywords

VSC-HVDC ·  
电缆 ·  
小波分析 ·  
数学形态学算法 ·  
极性判断 ·

近年来，因高压直流输电系统的经济优势和技术优势，高压直流输电系统得到了快速发展。然而基于IGBT的VSC-HVDC系统在直流侧比较容易出现故障，因此如何快速、准确地对直流输电线路进行故障定位是一个十分重要的问题<sup>[1-3]</sup>。行波法是使用广泛的测距方法，而行波中最为常用的提取波头算法是小波分析法<sup>[4]</sup>。但是由于小波是一种积分变换工具，在进行信号处理时需要将时域信号转换到频域，这样就不可避免地使信号发生位移和幅值的衰减；而且小波测距的准确度会受到采样数据窗口宽度的影响<sup>[5]</sup>。因此本文采用数学形态学算法提取行波的故障信息。

数学形态学对噪声不敏感，算法简单，只要选择合适的形态运算和结构元素，突变信号很容易就可以检测出来。此法所需的设备少，并且不受过渡电阻的影响。

## 行波测距

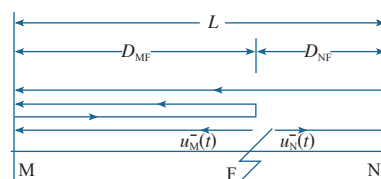
现代行波测距主要有单端行波测距和双端行波测距两种。单端测距利用系统线路发生故障时，在测量端测量到的第一个正向行波浪涌信号与其在同一测量端测量到的故障点反射波之间的时间差来计算故障距离。计算公式为

$$D_{MF} = \frac{1}{2}(T_{M2} - T_{M1})v \quad (1)$$

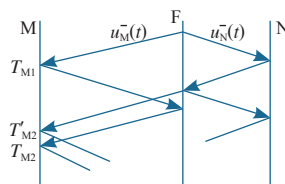
$$\text{或 } D_{MF} = L - \frac{1}{2}(T'_{M2} - T_{M1})v \quad (2)$$

式中， $L$ 为线路总长度； $v$ 为波速， $v = S/\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ ，其中， $S$ 为光速， $\epsilon_r$ 为相对介电常数，一般在4~5之间，在此取4.4， $\mu_r$ 为相对磁导率，一般取1。因此，波速度为 $v = 1.43 \times 10^8$  m/s。

故障线路如图1a所示。M、N分别为输电线路的两端，F为故障点，假设M为测量点，故障行波的反射如图1b所示。到达M端的时间为 $T_{M1}$ ，第二次到达



(a) 故障线路



(b) 行波网络

图1 故障线路单端测距原理

M端的时刻为 $T_{M2}$ ，经N端反射后到达M端的时刻为 $T'_{M2}$ 。

## 数学形态学

数学形态学最基本的两种运算是膨胀和腐蚀，基本的两个二级运算是开运算和闭运算。灰度膨胀和灰度腐蚀可以组合成很多种运算形式，两种基本运算的定义为：设定义域为一维原始信号，是定义域为 $F = \{0, 1, \dots, N-1\}$ 和 $G = \{0, 1, \dots, M-1\}$ 上的一维离散函数，并有 $N \geq M$ ，输入信号序列 $f(n)$ 和结构元素 $g(n)$ ，并定义其原点在0处，用函数对信号分别进行腐蚀和膨胀运算，则

$$(f \oplus g)(n) = \max \{f(n-m) + g(n) | (n-m) \in F, n \in G\} \quad (3)$$

$$(f \ominus g)(n) = \min \{f(n+m) - g(n) | (n+m) \in F, n \in G\} \quad (4)$$

式中， $\oplus$ 为膨胀运算； $\ominus$ 为腐蚀运算； $g(x)$ 为结构元素，其作用相当于一个“探针”，结构元素在信号中通过不断地移动来探测信号各部分之间的关系，提取信号中的有效信息。

### 1. 形态学滤波

由膨胀运算和腐蚀运算可以组成很多的运算形式，开运算和闭运算也是由膨胀运算和腐蚀运算组成的，具体如下

$$(f \circ g)(n) = [(f \ominus g) \oplus g](n) \quad (5)$$

$$(f \bullet g)(n) = [(f \oplus g) \ominus g](n) \quad (6)$$

式中， $\circ$ 为开运算； $\bullet$ 为闭运算。

从式(5)、式(6)可以看出，开运算是先进行腐蚀运算然后进行膨胀运算；而闭运算是先进行膨胀运算而后进行腐蚀运算，所以开运算和闭运算形成了一对对偶运算。开闭运算都具有低通特性，开运算能去掉信号上峰的极大值点，也就是去掉了信号中的孤立点和毛刺，锐化了角，使信号的轮廓光滑，因而通过开运算可以将信号中的峰值（正脉冲）噪声进行抑制；而闭运算能去掉信号的下方极小值点，将信号的低谷填平，弥合信号的裂缝和孔洞，通过闭运算可以将信号中的底谷（负脉冲）噪声滤掉。本文采用Maragos提出的形态开-闭滤波

器和闭-开滤波器，定义如下。

开-闭滤波器

$$[(f)oc(g)](n) = (f \circ g \bullet g)(n) \quad (7)$$

闭-开滤波器

$$[(f)co(g)](n) = (f \bullet g \circ g)(n) \quad (8)$$

### 2. 形态学梯度变换

膨胀运算和腐蚀运算作为最基本的运算方式，还组成了另一种算法，即形态学梯度变换，其定义为

$$G_{\text{grad}}(f) = (f \oplus g)(n) - (f \ominus g)(n) \quad (9)$$

本文采用文献中提出的多分辨形态学梯度变换，运用此变换方法可以使用两种不同的结构元素对同一个函数进行连续的形态学变换。两种扁平结构的定义为

$$g^+ = \{g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, \underline{g_l}\} \quad (10)$$

$$g^- = \{\underline{g_1}, g_2, \dots, g_{l-1}, g_l\} \quad (11)$$

式中， $l$ 为结构元素的宽度， $l = 2^{l-a} l_a$ ， $a$ 为多分辨形态梯度的分析级数；在 $g^+$ 和 $g^-$ 中的下划线点分别表示它们的原点位置，结构元素 $g^+$ 和 $g^-$ 分别用来对波形中“上”、“下”边沿进行提取。

结合式(9)~式(11)，定义多分辨形态梯度(MMG)为

$$\rho_{g^+}^a(n) = (\rho^{a-1} \oplus g^+)(n) - (\rho^{a-1} \ominus g^+)(n) \quad (12)$$

$$\rho_{g^-}^a(n) = (\rho^{a-1} \ominus g^-)(n) - (\rho^{a-1} \oplus g^-)(n) \quad (13)$$

$$\rho_g^a = \rho_{g^+}^a + \rho_{g^-}^a \quad (14)$$

## 仿真实证

### 1. VSC-HVDC系统模型的搭建

本文采用双极性对称运行的VSC-HVDC系统结构，如图2所示。此系统两侧换流站均采用电压源换流器型结构，它由换流阀、换流变压器、交流滤波器、直流侧电容器和直流线路等部分组成。

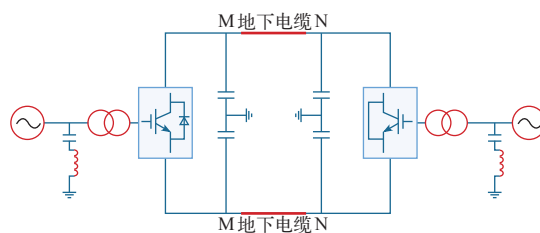


图2 VSC-HVDC的系统结构

本文采用VSC-HVDC模型,用Pscad进行仿真,并用Matlab进行数据处理。交流输电线路为110 kV,直流输电线路为10 kV的地下电缆铺设线路,正负两级线路铺设距离相差1.5 m。电缆模型采用频变参数进行模拟,电缆型号与文献[6]相同,线路全长为200 km,采样频率为1 MHz。正极和负极的并联电容均为1 000 F。

## 2. 仿真结果分析

### (1) 小波分析结果

图3为当故障发生在25 km处,且过渡电阻为500  $\Omega$ 时,小波提取的行波到达时刻。表1为在不同的过渡电阻和故障距离下小波测距的结果。

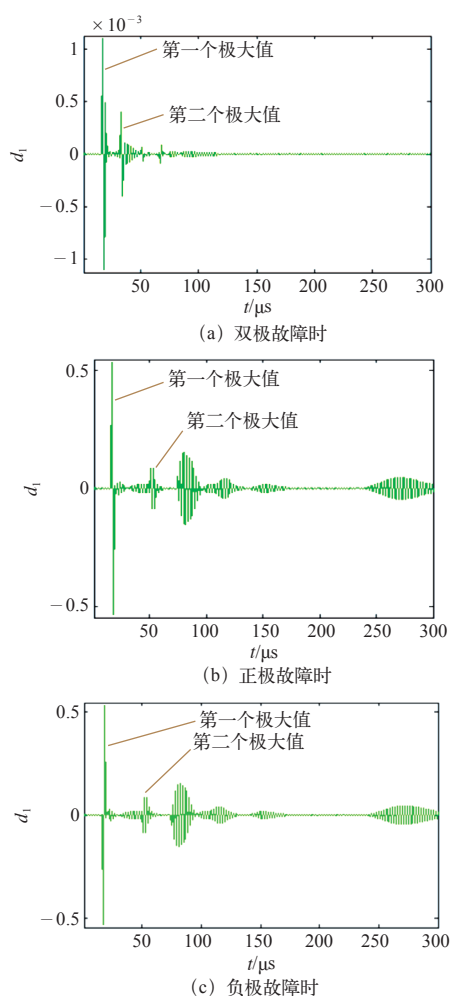


图3 小波分析的处理结果

### (2) 数学形态学结果

当故障发生在25 km处,且过渡电阻为500  $\Omega$ 时,数学形态学提取的行波到达时刻如图4所示。

表1 小波分析的计算结果

|        | 过渡电阻 | 正极故障  | 负极故障   | 双极故障  |
|--------|------|-------|--------|-------|
| 20 km  | 0    | 24.04 | 24.31  | 22.28 |
|        | 250  | 24.34 | 23.36  | 22.86 |
|        | 500  | 24.04 | 24.49  | 22.38 |
| 40 km  | 0    | 49.15 | 49.15  | 37.76 |
|        | 250  | 48.66 | 48.66  | 41.99 |
|        | 500  | 49.35 | 48.53  | 42.29 |
| 60 km  | 0    | 74.73 | 73.95  | 71.52 |
|        | 250  | 74.53 | 77.98  | 74.04 |
|        | 500  | 74.70 | 74.72  | 73.12 |
| 80 km  | 0    | 98.28 | 101.3  | 90.37 |
|        | 250  | 98.83 | 101.87 | 96.16 |
|        | 500  | 98.84 | 98.56  | 89.82 |
| 100 km | 0    |       |        |       |
|        | 250  |       |        |       |
|        | 500  |       |        |       |

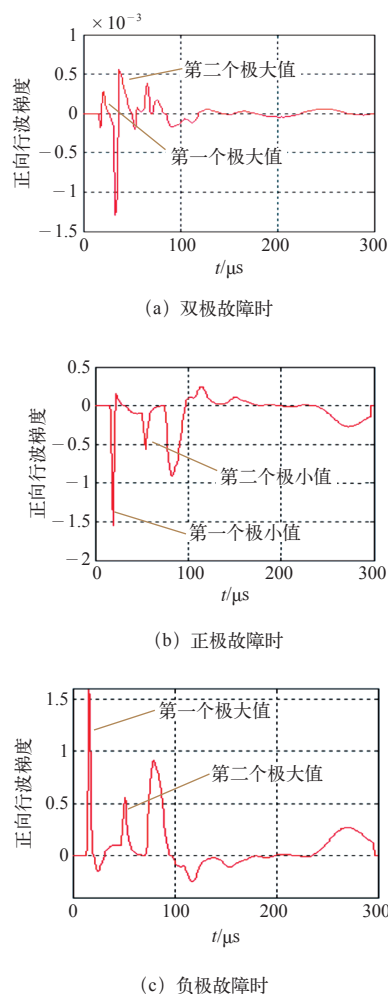


图4 数学形态学处理结果

由图4可以看出,当发生正极故障时,行波波头极值出现在负半轴;当发生负极故障时,行波波头极值出现在正半轴;当双极故障时,行波波头极值正负半轴都可以明显看到。根据极值出现在哪个半轴可以简单地分辨出故障发生极。

当过渡电阻为 $0.01\ \Omega$ 时,数学形态学提取的行波到达时刻如图5所示。数学形态学算法计算结果如表2所示。

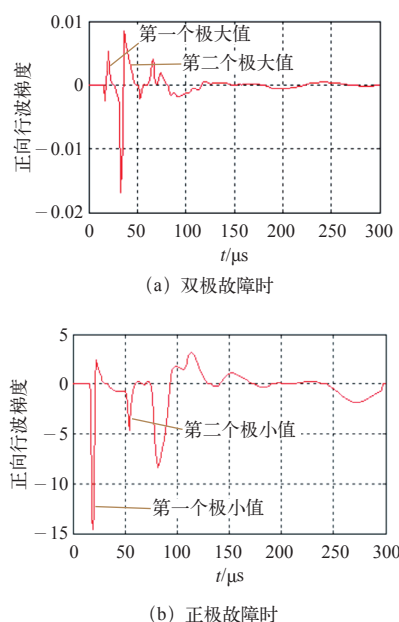


图5 过渡电阻变化后图形

表2 数学形态学算法计算结果

|        | 过渡电阻 | 正极故障   | 负极故障   | 双极故障   |
|--------|------|--------|--------|--------|
| 25 km  | 0    | 24.68  | 24.68  | 25.38  |
|        | 250  | 24.68  | 24.68  | 26.79  |
|        | 500  | 24.68  | 24.68  | 24.68  |
| 50 km  | 0    | 50.06  | 49.35  | 49.35  |
|        | 250  | 49.35  | 49.35  | 50.76  |
|        | 500  | 49.35  | 49.67  | 50.76  |
| 75 km  | 0    | 75.03  | 74.73  | 76.14  |
|        | 250  | 74.73  | 74.73  | 74.73  |
|        | 500  | 74.73  | 74.73  | 73.32  |
| 100 km | 0    | 100.82 | 100.11 | 101.52 |
|        | 250  | 99.41  | 99.41  | 100.11 |
|        | 500  | 99.41  | 99.41  | 102.93 |
| 125 km | 0    | 126.9  | 125.49 | 126.9  |
|        | 250  | 125.49 | 126.18 | 124.08 |
|        | 500  | 126.12 | 125.49 | 124.08 |

## 结束语

通过数学形态法与小波分析法的对比,可以得到如下结论:

1) 数学形态学算法所提取的行波波头明显,不会出现两个或多个的情况;而小波分析法提取出的波头不明显,且有多极值出现,不易分辨。

2) 当发生不同故障时,数学形态学可以直接判断出故障形式;而小波分析法不能判断。

在有过渡电阻条件下,将数学形态法与小波分析的仿真进行对比可以看出,数学形态学算法不受过渡电阻的影响。

通过数学形态学算法与小波分析法的计算结果对比可以看出,数学形态学算法的准确度要比小波分析法高,而且随着故障距离的增加,行波波头衰减严重,小波分析法无法计算出故障距离。

根据本文的分析结果可知,在柔性直流输电系统故障测距中,数学形态学算法优于小波分析法。

## 参考文献

- [1] 汤广福,温家良,贺之渊,等.大功率电力电子装置等效试验方法及其在电力系统中的应用[J].中国电机工程学报,2008(36):1-9.
- [2] 范建斌.气体绝缘金属封闭输电线路及其应用[J].中国电力,2008,41(8):38-43.
- [3] 李德坤,宋国兵,高淑萍,等.VSC-HVDC输电线路单端行波自动化故障定位方法研究[J].电网技术,2013(4).
- [4] 宋国兵,蔡新雷,高淑萍,等.高压直流输电线路故障定位研究综述[J].电力系统保护与控制,2012,40(5):133-137.
- [5] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等.基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J].中国电机工程学报,2010(13):75-80.
- [6] 刘可真,束洪春,于继来,等. $\pm 800\text{ kV}$ 特高压直流输电线路故障定位小波能量谱神经网络识别法[J].电力自动化设备,2014,34(4):141-147.

(收稿日期:2015-02-10) EA