

基于奇异值分解理论的双端行波故障测距的研究

向强铭, 王茜, 陈靖秋, 刘智俊

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 行波故障测距中行波信号奇异点的精确检测和行波波速的确定是影响测距精度的主要因素。根据 Hankel 矩阵方式下奇异值分解第一个分量后的各分量具有的奇异性检测能力, 对行波信号进行奇异值分解, 利用第二个 SVD 分量脉冲模极大值检测出信号的奇异点。同时, 提出一种不受行波波速影响的双端测距方法, 通过检测故障初始行波和故障点反射波分别到达两端母线的时刻, 列写方程组, 得到与速度无关的测距公式。EMTDC 仿真证明了该故障测距方法的正确性。

关键词: 奇异值分解; Hankel 矩阵; 奇异点检测; 故障测距

Study of two-terminal traveling wave fault location based on SVD theory

XIANG Qiang-ming, WANG Qian, CHEN Jing-qi, LIU Zhi-jun

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: There are two main factors influencing the accuracy of traveling wave fault location, namely the accurate detection of singular points of traveling wave signal and determination of traveling wave velocity. From the second singular value decomposition component signal, each signal has the singularity detection ability when Hankel matrix is used, by this method, the signal singularity is detected. A new two-terminal fault location method, which is not affected by traveling wave velocity, is proposed. By determining the arrival time both the fault initial traveling waves and the reflected wave from the point of failure reaching both ends of bus bar, the equations are written and the fault location formula unrated to wave speed is obtained. EMTDC simulation proves the correctness of this method.

Key words: singular value decomposition (SVD); Hankel matrix; singularity detection; fault location

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)12-0014-05

0 引言

行波故障测距中, 故障电流行波信号奇异点的精确检测是行波测距的关键, 小波变换以其良好的时频分析能力成为现有行波奇异点检测的主要工具^[1-3]。但是小波奇异性检测存在奇异点偏移缺陷, 分解尺度越大, 偏离越严重^[4]; 同时需要结合行波信号特征选择合适的小波基函数和分解尺度, 一旦选定了小波基, 其检测到的奇异性指数是不变的^[5]。为了实现故障行波信号奇异点的精确定位, 文献[6]利用图像的边缘检测方法实现故障行波的奇异性检测, 本文采用 Hankel 矩阵方式下奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 法对电流行波 1 模分量进行分解, 此方法在不同的分解层上的奇异点检测结果不会发生偏移, 并且指示奇异点位置的脉冲宽度小, 克服了小波奇异点检测的位置偏移

缺陷。文献[7]采用 SVD 分解法实现了对铣削力信号中奇异点的精确检测, 文献[8]采用多分辨奇异值分解对轴承振动信号进行处理, 实现了对轴承故障的准确诊断。

行波故障测距法是利用行波到达母线的时间和波速来计算故障发生的位置, 可分为单端法和双端法^[9-10], 它们的测距精度都会受行波波速的不确定性的影响。文献[11]利用同一条线路的三测量点法来确定行波波速; 文献[12]提出一种不受波速影响的双端行波测距算法, 利用行波波头的极性来识别故障点和相邻母线的反射波, 但未考虑母线结构变化对故障点反射波识别的影响。本文对行波信号进行奇异值分解, 通过电流行波 0 模、1 模的 SVD 分量脉冲极性的关系区分来自故障点以及相邻母线的反射波, 利用 SVD 第二分量的脉冲模极大值确定故障初始行波和故障点反射波分别到达两端母线

的时刻, 求解一组由行波波速、故障距离和行波传播时间构成的方程组, 得到与波速无关的测距公式, 精确计算出故障发生的位置。

1 SVD 分解原理与信号奇异性检测

SVD是一种正交变换, 它从矩阵的角度出发, 将包含信号信息的矩阵分解到一系列奇异值和奇异值矢量对应的子空间。对于任何一个行或列线性相关的实矩阵 $A \in R^{m \times n}$, 通过对其左、右分别相乘一个正交矩阵 $U=[u_1, u_2, \dots, u_m] \in R^{m \times m}$ 和 $V=[v_1, v_2, \dots, v_n] \in R^{n \times n}$, 得到:

$$A = USV^T \quad (1)$$

式(1)中, $S=[\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_q), 0]$ 或其转置, 这取决于 m, n 的大小, $S \in R^{m \times n}$, 奇异值 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_q$, 0 代表零矩阵, $q=\min(m, n)$ 。通过上述变换, 原矩阵 A 转化成为一个对角矩阵, 而得到的奇异值个数又反映了原矩阵中独立行(列)矢量的个数。

信号的奇异性是指信号本身 $f(t)$ 或它的某阶导数在某一时刻存在突变, 此突变点称为信号的奇异点, 常用 Lipschitz 指数来描述突变的强弱。当采用 Hankel 矩阵时, SVD 也能获得与小波变换类似的奇异点检测能力。

对于给定的离散信号 $X=[x(1), x(2), \dots, x(n)]$, 其 Hankel 矩阵形成如下:

$$A = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \dots & x(n) \\ x(2) & x(3) & \dots & x(n+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(m) & x(m+1) & \dots & x(N) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中: $m=N-n+1$, $1 < n < N$, $A \in R^{m \times n}$ 。为了观察 SVD 对信号的分解, 将式(1)写成列向量 u_i 和 v_i 表示的形式:

$$A = \sigma_1 u_1 v_1^T + \sigma_2 u_2 v_2^T + \dots + \sigma_q u_q v_q^T \quad (3)$$

式(3)中, $u_i \in R^{m \times 1}$, $v_i \in R^{n \times 1}$, $i=1, 2, \dots, q$, $q=\min(m, n)$ 。由奇异值分解理论可知 u_i 之间是两两正交的, 构成了 m 维向量空间的规范正交基; v_i 之间也是两两正交的, 构成了 n 维向量空间的规范正交基^[13]。

令 $A_i = \sigma_i u_i v_i^T$, $A_i \in R^{m \times n}$, 则

$$A_i = \begin{bmatrix} x_i(1) & x_i(2) & \dots & x_i(n) \\ x_i(2) & x_i(3) & \dots & x_i(n+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_i(m) & x_i(m+1) & \dots & x_i(N) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(3)可写为 $A = \sum_{i=1}^q A_i$, 同时, 令

$P_i = [x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n), (x_i(n+1), \dots, x_i(N))^T]$, 它是由 A_i 的第一行和最后一列组合而成的。则原离散信号

$X = \sum_{i=1}^q P_i$, 即将原始信号分解成一系列分量信号的

简单线性叠加, 这样的好处是保证了分量信号在原始信号中的相位不变, 即具有零相位偏移特性; 同时这样的分解能将原始信号分解为一系列反映信号细部特征的细节信号和反映信号主体框架的近似信号的组合, 细节信号就能实现对奇异点的精确检测^[7]。

2 不受波速影响的双端行波测距算法

输电线路发生故障时, 将会在故障点产生向两端母线传播的暂态行波, 同时行波又会在波阻抗不连续处发生折射和反射。目前的行波测距法是基于故障初始行波和故障点反射波到达母线的时差和波速进行测距, 双端法由于可以达到很高的测距精度和较高的可靠性而得到广泛的应用。

本文采用分别测量初始行波波头和故障点反射波到达两端母线的时差, 但是在远端故障时, 对端母线的反射波在故障点发生折射先于本端故障点反射波到达本端母线, 因此需要对第二个到达的行波进行判别。输电线路发生单相接地故障的概率最大, 占故障总数的80%左右, 因此, 本文只对单相接地故障进行研究。单相接地故障下, 对于第二个反向行波, 针对不同的母线结构, 若其0模与1模行波极性相同, 则为故障点反射波; 若0模与1模行波极性相反, 则为对端母线反射波^[14]。本文采用凯伦贝尔变换解耦线路各相之间存在的电磁耦合, 变换后得到独立的0模、1模和2模分量, 在不考虑频率的影响时, 采用波速相对稳定的1模分量进行测距^[15]。

图1所示, 设线路全长为 L , 故障点到测量端M、

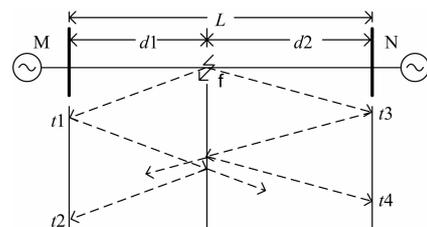


图1 行波折反射网格图

Fig. 1 Refraction and reflection of the wave

N的距离分别为 d_1 、 d_2 。 t_1 、 t_2 为故障点产生的初始行波和故障点反射行波到达M端测量点的时间； t_3 、 t_4 为故障点产生的初始行波和故障点反射行波到达N端测量点的时间。在不考虑波速变化的影响下，设行波波速为 v ，由行波的折反射图1可得以下测距方程组：

$$\begin{cases} d_1 + d_2 = L \\ (t_2 - t_1)v = 2d_1 \\ (t_4 - t_3)v = 2d_2 \end{cases} \quad (5)$$

解此方程组得

$$d_1 = \frac{t_2 - t_1}{t_2 - t_1 + t_4 - t_3} L \quad (6)$$

令 $\Delta t_1 = t_2 - t_1$ 、 $\Delta t_2 = t_4 - t_3$ ，得

$$d_1 = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 + \Delta t_2} L \quad (7)$$

由式(7)可知，所得到的测距结果是关于两测量端各自检测到的前两个行波波头时间差和线路总长的函数，消除了波速不确定性给测距带来的误差。同时，理论上 t_1 、 t_2 与 t_3 、 t_4 并不需要时间同步，这就消除了由于时间不同步而导致的测距误差，两测量端不需要GPS对时系统，仅需两端数据传输系统，所以降低了测距装置的硬件成本，具有很好的经济效益，使其应用更加广泛。

3 仿真实验及其结果

EMTDC仿真中建立双电源高压输电线路进行故障仿真。系统结构如图2所示，系统参数如下：M端电源电压220 kV、 $\angle 90^\circ$ 、50 Hz；N端电压源电压220 kV、 $\angle 60^\circ$ 、50 Hz；输电线总长度200 km，采用频率相关(相)模型，采样频率1 MHz。

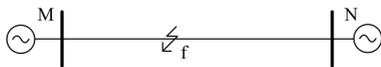


图2 双端电源输电线路故障模型

Fig. 2 Fault model of double-fed transmission system

设在距离M端母线80 km处发生A相接地故障，过渡电阻为 0.01Ω ，对两端母线处的三相故障电流进行相模变换，求得0模和1模分量，利用0模、1模分量故障发生后的2 000个采样点构造一个行数为4、列数为1 997的Hankel矩阵，分别对0模、1模分量进行奇异值分解，获取第二分量信号 P_2 ，其波形如图3~图6所示。

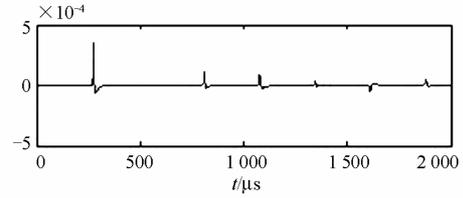


图3 M端0模分量SVD第二分量检测结果

Fig. 3 Results of 2nd SVD component signal modulus 0 on M-side

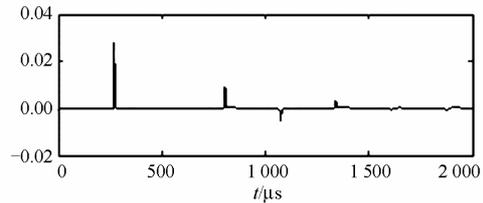


图4 M端1模分量SVD第二分量检测结果

Fig. 4 Results of 2nd SVD component signal modulus 1 on M-side

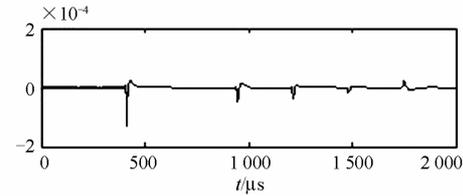


图5 N端0模分量SVD第二分量检测结果

Fig. 5 Results of 2nd SVD component signal modulus 0 on N-side

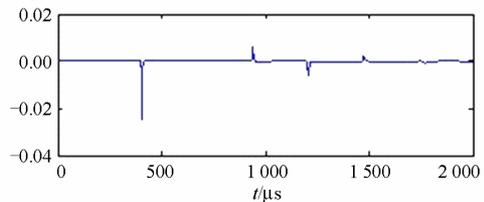


图6 N端1模分量SVD第二分量检测结果

Fig. 6 Results of 2nd SVD component signal modulus 1 on N-side

由图3~图6可以看出，利用SVD分解得到的第二个分量信号 P_2 能够有效检测到行波到达母线的时刻。对故障发生后两端母线处检测到的多个行波波头，根据0模和1模分量行波极性的关系，可以判断出M端的第1个和第2个行波是故障初始行波和其在故障点的反射波；N端的第1个和第3个分别是故障初始行波和其在故障点的反射波。

根据SVD检测结果, 提取反映突变点位置的脉冲模极大值, 得到 $t_1=270 \mu\text{s}$ 、 $t_2=805 \mu\text{s}$ 、 $t_3=304 \mu\text{s}$ 、 $t_4=906 \mu\text{s}$, 带入公式(6)得到故障距离 $d_1=79.970 \text{ km}$, 误差 0.030 km , 计算结果相当精确。表1为在不同的故障距离和过渡电阻的情况下仿真测距结果。

表1 测距仿真结果

Table 1 Simulation results

过渡电阻 / Ω	不同的故障距离/km					
	20	50	80	110	140	170
0.01	20.230	49.925	79.970	109.948	140.015	169.955
1	20.230	49.925	79.970	109.948	140.015	169.955
100	20.230	49.925	79.970	109.948	140.015	169.955

经过仿真计算, 在不同的过渡电阻情况下发生短路所得到的测距结果都有很高的精度。虽然过渡电阻的大小会影响故障点反射波的幅值, 但是Hankel矩阵下的SVD仍能准确检测到故障初始行波和故障点反射波到达母线的时刻。

同时, 本文采用具有很好的信号奇异性检测能力的db3小波对电流行波信号1模分量进行小波变换, 选取其中第1层小波变换细节信号进行分析, 表2为SVD与小波变换方法的检测结果的对比。

表2 两种方法测距结果

Table 2 Fault location results of two methods

故障距离 /km	奇异值分解法		小波变换法	
	奇异值分解法	误差/%	小波变换法	误差/%
20	20.230	0.15	19.760	1.2
50	49.925	0.15	50.224	0.448
80	79.970	0.0375	79.940	0.075
110	109.948	0.0473	110.314	0.2855
140	140.015	0.0107	139.910	0.0643
170	169.955	0.0245	170.015	0.0088

从表2可以看出, 在某些情况下, 采用奇异值分解法所得到的测距结果比小波变换法具有更好的测距效果。

同时, 为了进一步地验证本文的双端测距算法的测距效果, 在过渡电阻 100Ω 的单相短路故障下, 本文算法与传统的D型双端行波测距法^[6] (测距公式 $d_1 = [(t_1 - t_3) \cdot v + L] / 2$, $v = 2.983 \times 10^5 \text{ km/s}$)的测距结果如表3所示。

由表3可知, 行波波速的微小误差将严重影响D型算法的故障测距精度, 在相同的条件下, 本文的测距算法比D型算法具有更高的可靠性和测距精度。

表3 两种算法测距结果

Table 3 Fault location results of two algorithms

故障距离 /km	本文算法	D型算法		
		$0.999 v$	v	$1.001 v$
30	30.045	30.268	30.198	30.128
60	59.985	60.217	60.177	60.137
90	90.052	90.017	90.007	89.997
120	120.030	119.966	119.986	120.006
150	150.075	149.766	149.816	149.866
180	179.970	179.716	179.795	179.875

4 结语

(1) 利用电流行波信号1模分量构造Hankel矩阵, 通过奇异值分解获得SVD第二分量信号, 可以精确测量出行波信号的奇异点。

(2) 利用0模与1模行波的极性关系, 确定出初始行波及故障点反射波到达两端母线的准确时间, 用时间之比精确地计算出故障距离, 消除了波速的不确定性对测距带来的误差。

参考文献

- [1] 董新洲. 小波理论应用于输电线路故障测距研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1996.
DONG Xin-zhou. Application of wavelet transform to transmission line fault location[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996.
- [2] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 76-80.
DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, XU Bing-yin. Research of fault location based on current traveling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 76-80.
- [3] 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 Yan-wei, SHEN Ke-yun, et al. Cable short open-circuit fault location based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 112-116.
- [4] 赵学智, 叶邦彦. 基于二分递推SVD的信号奇异性位置精确检测[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 53-59.
ZHAO Xue-zhi, YE Bang-yan. Accurate detection of signal singularity position based on dichotomizing recursion SVD[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(1):

- 53-59.
- [5] 赵学智, 叶邦彦. SVD 和小波变换的信号处理效果相似性及其机理分析[J]. 电子学报, 2008, 36(8): 1582-1589.
ZHAO Xue-zhi, YE Bang-yan. The similarity of signal processing effect between SVD and wavelet transform and its mechanism analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(8): 1582-1589.
- [6] 束洪春, 张敏, 张广斌, 等. ± 800 kV 直流输电线路单端行波故障定位的红绿色彩模式检测[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 155-163.
SHU Hong-chun, ZHANG Min, ZHANG Guang-bin, et al. A RG color pattern detection of single-ended traveling wave fault location on ± 800 kV UHVDC transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 155-163.
- [7] 赵学智, 叶邦彦, 陈统坚. 基于 SVD 的奇异性信号检测原理及其应用[J]. 振动与冲击, 2008, 27(6): 11-15.
ZHAO Xue-zhi, YE Bang-yan, CHEN Tong-jian. Principle of singularity detection based on SVD and its application[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(6): 11-15.
- [8] 赵学智, 叶邦彦, 陈统坚. 多分辨奇异值分解理论及其在信号处理和故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 64-75.
ZHAO Xue-zhi, YE Bang-yan, CHEN Tong-jian. Theory of multi-resolution singular value decomposition and its application to signal processing and fault diagnosis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(20): 64-75.
- [9] 郑秀玉, 丁坚勇, 黄娜. 输电线路单端故障定位的阻抗行波组合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 18-21.
ZHENG Xiu-yu, DING Jian-yong, HUANG Na. Impedance-traveling wave assembled algorithm of one-terminal fault location for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 18-21.
- [10] 尹晓光, 宋琳琳, 尤志, 等. 与波速无关的输电线路双端行波故障测距研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 35-39.
YIN Xiao-guang, SONG Lin-lin, YOU Zhi, et al. Study of fault locating for transmission line double terminal traveling waves unrelated to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 35-39.
- [11] 朱永利, 范新桥, 尹金良. 基于三点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 260-268.
ZHU Yong-li, FAN Xin-qiao, YIN Jin-liang. A new fault location scheme for transmission lines based on traveling waves of three measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 260-268.
- [12] 郑州, 吕艳萍, 王杰, 等. 基于小波变换的双端行波测距新方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 203-207.
ZHENG Zhou, Lü Yan-ping, WANG Jie, et al. A new two-terminal traveling wave fault location method based on wavelet transform[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 203-207.
- [13] GOLUB G H, VAN LOAN C F. 矩阵计算[M]. 袁亚湘, 译. 北京: 科学出版社, 2001: 77-79, 276-278.
GOLUB G H, VAN LOAN C F. Matrix computation[M]. YUAN Ya-xiang, trans. Beijing: Science Press, 2001: 77-79, 276-278.
- [14] 施慎行, 董新洲, 周双喜. 单相接地故障下第 2 个反向行波识别的新方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 41-44.
SHI Shen-xing, DONG Xin-zhou, ZHOU Shuang-xi. New principle to identify the second reverse traveling wave generated by single-phase-to-ground fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 41-44.
- [15] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 零模检测波速度的迭代提取及其在配电网单相接地故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 202-211.
TANG Jin-rui, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Iterative extraction of detected zero-mode wave velocity and its application in single phase-to-ground fault location in distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 202-211.

收稿日期: 2013-09-05; 修回日期: 2013-11-29

作者简介:

向强铭(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: laifxqm1213@163.com

王茜(1963-), 女, 副教授, 研究方向为智能控制、电力系统故障诊断等;

陈靖秋(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。