

基于小波变换的 T 型线路故障测距新算法

周鑫¹, 吕飞鹏¹, 吴飞², 张默霓²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 成都电业局, 四川 成都 610100)

摘要: 针对当前多分支线路故障测距中方法较复杂, 精确度不够高的不足, 提出一种基于小波变换的 T 型输电线路精确故障定位算法。该算法利用电流行波到达 T 接线三端时间差与故障点距离 T 接线三端长度差的关系, 只需初始行波电流信息即可确定故障支路, 并对故障定位。在 T 节点附近不存在故障测距死区, 且不受故障类型、分布电容、行波速度等因素的影响。大量 Matlab 仿真结果表明, 该算法简单精确, 能够满足故障定位的要求。

关键词: T 接线; 故障测距; 时间差; 距离差; 初始电流暂态行波; 小波分析

A new fault location method for T-connection transmission lines based on wavelet transform

ZHOU Xin¹, Lü Fei-peng¹, WU Fei², ZHANG Mo-ni²

(1.School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2.Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610100, China)

Abstract: Considering the deficiency of location faults on T-connection transmission lines, a new method based on wavelet transform is presented. In this paper, using the relationship between time difference and distance difference, the fault circuit is firstly identified by the information of the initial current transient traveling waves, and then the fault location is solved. This method does not have a dead area when fault occurs near the T-connection point, and is not affected by the speed of current transient and distributed capacitance. A large amount of MATLAB simulations show that this proposed method has high accuracy and it can meet the fault location requirement.

Key words: T-connection; fault location; time difference; distance difference; initial current transient traveling waves; wavelet analysis

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)02-0008-04

0 引言

随着电力系统的快速发展, T 接线已经越来越多地出现在电力系统当中。T 接线路的故障测距已经成为迫切需要解决的问题, 对 T 接线路的故障测距算法的研究也越来越受关注。

文献[1]基于分布参数模型, 采集三端电气量计算得到 T 节点电压并进行比较, 从而判断故障支路, 然后构造故障测距方程和辅助定位函数, 通过迭代法求得故障点。文献[2]提出基于 π 型等值线路模型的测距算法, 利用同文献[1]的方法判别故障支路, 然后利用线路正序电压、电流建立一个关于故障距离的一元二次方程并求解。文献[3]提出的算法基于线路的时域微分方程, 利用同上的方法判断出故障支路后, 离散化时域方程求得故障距离的最小二乘解。上述方法都需要同时采集三端电压、电流量, 然后计算并比较 T 节点电压来判断故障支路, 方法

比较复杂, 而且对信号采集提出了很高要求。在 T 节点附近发生故障时, 比较结果不明显, 容易出现错误判断故障支路的情况。

国外学者对 T 接线路行波故障测距进行了一些研究。文献[4]提出的基于小波变换的行波测距法需要对波速进行估计, 测距可能产生较大误差。

针对以上问题, 本文提出一种基于小波变换的 T 型线路故障测距新算法, 该算法主要利用电流行波在线路中传输时间与传输距离的关系解决故障定位问题, 主要优点为: (1) 仅需要对三端电流信号采样, 不需对电压信号采样, 故在技术与设备上更易于实现; (2) 解决了传统的阻抗法在 T 节点附近存在测距死区的问题; (3) 测距结果不受波速影响, 无需对波速进行估计, 且不受故障类型、分布电容、接地电阻等因素的影响; (4) 算法简单且具有很高的精确度, 工程上易于实现, 有良好的实用效应。

1 测距算法

1.1 T 接线路行波电流分析

如图 1 所示三端 T 接线路, T 为分支点, M、N、P 为系统三端, 长度分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 。以 f_1 点发生短路为例, I_m 、 I_c 为 f_1 点两侧电流行波, I_c 在 T 点分流为 I_n 与 I_p , 且 $I_c = I_n + I_p$ 。为更好地分析, 将 T 接线系统拆分为 MTN、MTP 两个双端系统。

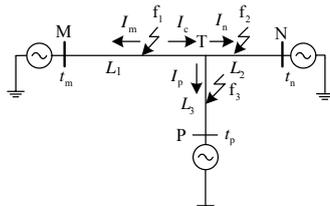


图 1 T 接线模型
Fig. 1 T-connection model

如图 2 所示, 对 M 端检测到的电流行波进行分析:

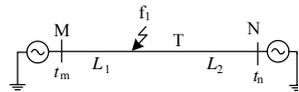


图 2 MTN 接线模型
Fig.2 MTN model

当 f_1 点发生短路时, M 端测到的第一个行波为故障点产生的电流行波 I_m 。考虑 M 端接收到的第二个电流行波: 以 $0.5(L_1+L_2)$ 为界, 当 $X_{mf} < 0.5(L_1+L_2)$ 时, M 端测到的第二个电流行波为 I_m 在短路点 f 的反射波; 否则 M 端测到的第二个电流行波为 I_n 在 N 端的反射波^[5]。对于拆分后的双端系统 MTP 同理。于是, M 端测到的第二个电流行波存在四种情况:

(1) I_m 在故障点的反射波; (2) I_n 在 N 端的反射波; (3) I_p 在 P 端的反射波; (4) I_n 在 T 节点的反射波。当短路发生在其他线路时, 情况类似。用 Matlab 对如图 1 所示 T 接线路仿真, 当 f_1 发生短路时, M 端 1 模量小波系数及其 1 模量波形如图 3。

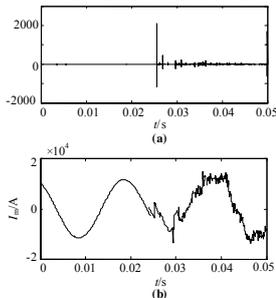


图 3 M 端小波变换及其模量波形
Fig. 3 Wavelet transform and modal current at M terminal

观察图 3 知: M 端在测到初始波后, 将测到复杂的电流行波, 难以单纯通过图形确定其来源。

根据以上分析知, 由于 T 接线线路的特殊性, 行波将在其内部发生复杂的折射及反射。所以 T 接线线路发生故障时, 通过反射波确定故障支路较为困难。在双端系统中广泛使用的利用反射波进行故障定位方法在 T 接线线路上应用起来将不再简单。

1.2 T 接线线路故障支路的判定

T 接线路虽然难以准确判定第二个电流行波, 但三端检测到的故障初始电流行波能被可靠识别, 故可利用其对故障支路进行判定。如图 1 所示 T 接线系统, t_m 、 t_n 、 t_p 分别为三端接测到的首个电流行波时间。当故障发生在 f_1 , 且仅有故障发生在 f_1 时, 有:

$$\begin{cases} (t_n - t_p)v = L_2 - L_3 \\ (t_m - t_n)v = (L_1 - X_1) - (L_2 + X_1) \\ (t_m - t_p)v = (L_1 - X_1) - (L_3 + X_1) \end{cases} \quad (1)$$

其中: X_1 为故障点到节点 T 的距离, $X_1 > 0$ 。

同理, 当 f_2 处发生故障, 且仅有 f_2 发生故障时, 有:

$$\begin{cases} (t_m - t_p)v = L_1 - L_3 \\ (t_n - t_m)v = (L_2 - X_2) - (L_1 + X_2) \\ (t_n - t_p)v = (L_2 - X_2) - (L_3 + X_2) \end{cases} \quad (2)$$

其中: X_2 为故障节点到节点 T 的距离, $X_2 > 0$ 。

同理, 当 f_3 处发生故障, 且仅有 f_3 发生故障时, 有:

$$\begin{cases} (t_m - t_n)v = L_1 - L_2 \\ (t_p - t_m)v = (L_3 - X_3) - (L_1 + X_3) \\ (t_n - t_p)v = (L_3 - X_3) - (L_2 + X_3) \end{cases} \quad (3)$$

其中: X_3 为故障节点到节点 T 的距离, $X_3 > 0$ 。

显然, 当式(1)成立时, 故障必定在线路 L_1 上, 且 X_1 有唯一确定的值, 此时式(2)、式(3)必定不成立。同理, 当式(2)成立时, 式(1)、式(3)必不成立; 当式(3)成立时, 式(1)、式(2)不成立。故可以利用式(1)、式(2)、式(3)对 T 接线路进行故障支路判定。有唯一特殊情况: 当故障发生在 T 接线处时, 有 $X_1 = X_2 = X_3 = 0$, 式(1)、式(2)、式(3)同时成立。

1.3 T 接线线路故障测距

在故障支路被判定出以后, 即可利用 t_m 、 t_n 、 t_p 进行故障定位。以图 1 中 f_1 点发生短路为例, 对式(1)进行分析可得: 方程有两个未知数, 其中: v 为电流行波传输速度; X_1 为 L_1 上故障与 T 节点的距离; 可求得 X 的准确值。为了减少采样及计算带

来的误差, 采用分别求解线路 MTN, MTP 短路点与 T 接线的距离 X_{1a} 、 X_{1b} , 然后求平均值的方法对故障进行定位。

对于线路 MTN, 易得

$$X_{1a} = \frac{1}{2}[L_1 - L_2 - v(t_m - t_n)] \quad (4)$$

对于线路 MTP, 易得

$$X_{1b} = \frac{1}{2}[L_1 - L_3 - v(t_m - t_p)] \quad (5)$$

$$v = \frac{L_2 - L_3}{t_n - t_p} \quad (6)$$

由式 (4)、(5)、(6) 得: $X_1' = \frac{X_{1a} + X_{1b}}{2}$, 所

以 L_1 上故障点距离 M 点距离 $X_m = L_1 - X_1'$ 。当故障发生在 f_2 , f_3 时类似。

2 相模变换矩阵的分析

为了实现单一模量反映所有故障类型, 本文利用文献[6]提出的相模变换矩阵, 其原始阵为:

$$S = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ 5 & -1 & -4 \\ 5 & -4 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & -3 \\ 1 & -3 & 2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由文献[5]的分析可知, 对故障暂态相电流进行相模变换, 可以提取线模分量, 其 1 模量和 2 模量均能单独反映所有类型故障, 因此可以任意选取其中之一作为仿真分析对象。

3 算例仿真及影响因素分析

3.1 算例仿真

为验证本文提出的算法, 用 Matlab 建立一个如图 1 所示 500 kV 三端电源系统模型。对三端电流信号采样进行小波变换, 并采用本文提出算法进行计算。设定仿真时间为 0.05 s, 采样频率为 1 MHz, 线路 L_1 , L_2 , L_3 长度分别为 200 km、150 km、100 km。故障起始时间为 0.025 s, 线路参数为:

$$R_1 = 0.01273 \Omega/\text{km}$$

$$R_0 = 0.3864 \Omega/\text{km}$$

$$L_1 = 0.9337 \times 10^{-3} \text{ H/km}$$

$$L_0 = 4.1264 \times 10^{-3} \text{ H/km}$$

$$C_1 = 12.74 \times 10^{-3} \mu\text{H/km}$$

$$C_0 = 7.751 \times 10^{-3} \mu\text{H/km}$$

当 L_3 上 60 km 处发生故障时三端模量小波系数如图 4 所示。

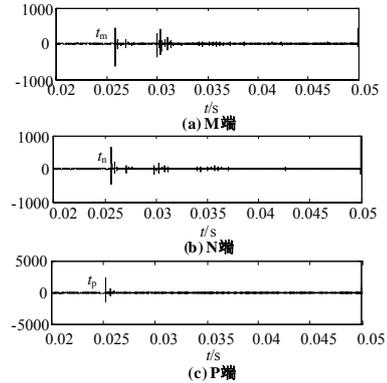


图 4 三端小波变换

Fig. 4 Wavelet transform at three terminals

由图测得 t_m 、 t_n 、 t_p 值, 利用本文提出的判据即可判断出故障支路为 L_3 , 然后利用式 (3) 计算得故障距离为 59.887 3 km, 误差为 0.1%。

各种类型故障的仿真结果如表 1~表 4 所示。

表 1 各种故障类型下的仿真结果

Tab. 1 Simulation result for different faults

故障类型	故障支路	故障距离/km	t_m/s	t_n/s	t_p/s	支路判断	故障测距/km	误差/%
单相接地短路	L_1	30	0.025 105	0.026 105	0.025 933	L_1	29.651 2	0.1
	L_2	50	0.026 037	0.025 173	0.025 691	L_2	50.144 5	0.1
	L_3	30	0.025 933	0.025 761	0.025 105	L_3	29.941 8	0.1
两相相间短路	L_1	70	0.025 243	0.025 967	0.025 795	L_1	69.760 0	0.1
	L_2	70	0.025 934	0.025 277	0.025 587	L_2	70.202 3	0.1
	L_3	60	0.025 829	0.025 657	0.025 209	L_3	59.883 7	0.1
两相接地短路	L_1	100	0.025 347	0.025 863	0.025 691	L_1	100.000 0	0
	L_2	110	0.025 829	0.025 381	0.025 485	L_2	109.883 9	0.1
	L_3	80	0.025 761	0.025 587	0.025 277	L_3	80.459 8	0.4
三相接地短路	L_1	150	0.025 519	0.025 693	0.025 519	L_1	150.000 0	0
	L_2	135	0.025 744	0.025 469	0.025 399	L_2	135.144 8	0.1
	L_3	90	0.025 727	0.025 553	0.025 311	L_3	90.230 0	0.2

表 2 L_3 线路上 60 km 处不同故障电阻时的仿真结果

Tab. 2 Simulation result for different fault resistances in line L_3 at the point of 60km

接地电阻	故障支路	故障距离/km	t_m/s	t_n/s	t_p/s	支路判断	故障测距/km	误差/%
10	L_3	60	0.025 829	0.025 657	0.025 209	L_3	59.883 7	0.1
50	L_3	60	0.025 829	0.025 657	0.025 209	L_3	59.883 7	0.1
200	L_3	60	0.025 829	0.025 657	0.025 209	L_3	59.883 7	0.1

表 3 L₁ 线路上 120 km 处不同故障时的仿真结果Tab. 3 Simulation result for different faults in line L₁ at the point of 120km

故障类型	故障支路	故障距离/km	t_m/s	t_n/s	t_p/s	支路判断	故障测距/km	误差/%
A-G	L ₁	120	0.025 415	0.025 795	0.025 623	L ₁	119.767 4	0.1
AB	L ₁	120	0.025 415	0.025 415	0.025 623	L ₁	119.767 4	0.1
AB-G	L ₁	120	0.025 415	0.025 415	0.025 623	L ₁	119.767 4	0.1
ABC	L ₁	120	0.025 415	0.025 415	0.025 623	L ₁	119.767 4	0.1

表 4 T 节点附近故障时的仿真结果

Tab.4 Simulation result for faults occurs near the teed node

接地电阻	故障支路	故障距离/km	t_m/s	t_n/s	t_p/s	支路判断	故障测距/km	误差/%
200	L ₁	198.5	0.025 687	0.025 523	0.025 351	L ₁	198.837	0.2
200	L ₂	149	0.025 695	0.025 515	0.025 351	L ₂	148.372	0.1
200	L ₃	98	0.025 699	0.025 525	0.025 339	L ₃	98.275	0.3

表 1~表 4 充分表明, 运用本文提出的故障支路判定算法能正确选出故障支路, 其判据具有很高分辨率, 且不受故障类型、故障电阻及故障位置的影响。表 4 说明本算法在 T 节点附近不存在测距死区, 而传统算法在 T 节点附近存在 7 km 左右测距死区^[7]。此算法保持较高的稳定度, 定位误差多控制在 0.1%之内, 最大不超过 0.4%。

3.2 影响因素分析

基于小波变换的故障测距方法不受分布电容电流、故障类型和过渡电阻影响^[8], 故主要考虑计算式中的影响因素。观察式 (4)、(5)、(6) 知, 对于一确定 T 接线路, L₁, L₂, L₃ 长度固定, 测距结果仅与 t_m 、 t_n 、 t_p 值有关, 在采样频率为 1 MHz 的情况下, 时间精度高, 对测距结果的影响很小。考虑计算误差, 以利用式 (5)、(6) 计算 X_{1b} 为例, 虽然分母中 $t_n - t_p$ 值可能较小, 但由于其分子中含同一数量级的 $t_m - t_p$, 所以在计算过程中不会因分母过小产生较大误差。由表 1~表 4 可知, 计算结果完全满足故障测距要求。

4 结论

本文提出了一种基于小波变换的为超高压 T 型输电线路进行精确故障定位的算法, 通过全面的理论分析与 Matlab 仿真证明: 该算法简单精确, 满足故障测距的要求, 适合在电力系统中使用。

参考文献

- [1] 束洪春, 高峰, 陈学允, 等. T 型输电系统故障测距算法研究[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 416-420.
SU Hong-chun, GAO Feng, CHEN Xue-yun, et al. A Study on Accurate Fault Location Algorithm of EHV T-Connection to Three Terminal Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 416-420 (in Chinese).
- [2] 高厚磊, 安艳秋, 江世芳, 等. 超高压 T 接线路高精度故障测距算法研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25:51-54.
GAO Hou-lei, AN Yan-qiu, JIANG Shi-fang, et al. Study on Accurate Fault Location Algorithm for EHV Teed Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25:51-54 (in Chinese).
- [3] 束洪春, 司大军, 葛耀中, 等. T 型输电线路电弧故障测距时域方法研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 99-103,57
SHU Hong-chun, SI Da-jun, GE Yao-zhong, et al. A New Time-Domain Method for Locating Faults on T Connection to Three Terminal Transmission Line[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2002, 17(4): 99-103,57 (in Chinese).
- [4] M da Silva, Coury. A Fault Locator for Three-Terminal Lines Based on Wavelet Transform Applied to Synchronized Current and Voltage Signals[J]. IEEE, 2006:1-6.
- [5] 徐青山, 陈锦根, 唐国庆, 等. 考虑母线分布电容影响的单端行波测距法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 70-73.
XU Qing-shan, CHEN Jin-gen, TANG Guo-qing, et al. Single Ended Fault Location Approach Considering Distributed Capacitance Effect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2) : 70-73 (in Chinese).
- [6] 宋国兵, 李森, 康小宁, 等. 一种新相模变换矩阵[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 57-60.
SONG Guo-bing, LI Sen, KANG Xiao-ning, et al. A Novel Phase-mode Transformation Matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 57-60(in Chinese).
- [7] 施世鸿, 何奔腾, 等. 一种 T 型高压输电线路故障测距新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 49-52.
SHI Shi-hong, HE Ben-teng, et al. A New Fault Location Method for HV T-connection Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 49-52(in Chinese).
- [8] 苏斌, 董新洲, 孙元章. 基于小波变换的行波差动保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 25-29.
SU Bin, DONG Xin-zhou, SUN Yuan-zhang. Traveling Wave Differential Protection Based on Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 25-29 (in Chinese)

(下转第 33 页 continued on page 33)

表1 不同噪声背景下信噪比比较

原始信号	SVD滤波	FFT滤波	小波变换
16.45	23.88	23.65	22.72
16.83	24.65	24.55	23.18
17.57	24.96	24.78	22.30

4 结论

本文根据电能质量扰动信号的特点提出了基于奇异值分解的电能质量信号去噪方法, 通过奇异值加权能量贡献率选择降噪阶次。仿真实验证明该方法能够有效地保留原始扰动特征, 同时滤除有害噪声的干扰。

参考文献

- [1] Yang Hong-Tzer, Liao Chiung-Chou. A De-noising Scheme for Enhancing Wavelet-Based Power Quality Monitoring System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16 (3): 353-360.
- [2] 王继东, 王成山. 基于改进软阈值法的电能质量扰动信号去噪[J]. 电工电能新技术, 2006, 25 (2): 34-38. WANG Ji-dong, WANG Cheng-shan. Power Quality Disturbance Signals De-noising Based on Improved Soft-threshold Method [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25 (2): 34-38.
- [3] 王红燕, 邵玉槐, 张海, 等. 基于小波阈值方法的电

能质量扰动去噪分析[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37 (2): 184-187.

WANG Hong-yan, SHAO Yu-huai, ZHANG Hai, et al. De-noising Analysis of Power Quality Disturbance Based on Wavelet Threshold [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37 (2): 184-187.

- [4] 吕志民, 张武军, 徐金梧, 等. 基于奇异谱的降噪方法及其在故障诊断技术中的应用[J]. 机械工程学报, 1999, 35 (3): 85-88.

Lü Zhi-min, ZHANG Wu-jun, XU Jin-wu, et al. A Noise Reduction Method Based on Singular Spectrum and its Application in Machine Fault Diagnosis [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35 (3): 85-88.

- [5] 王太勇, 王正英, 胥永刚, 等. 基于SVD降噪的经验模式分解及其工程应用[J]. 振动与冲击, 2005, 24(4): 96-98.

WANG Tai-yong, WANG Zheng-ying, XU Yong-gang, et al. Empirical Mode Decomposition and its Engineering Applications Based on SVD Denoising [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24 (4): 96-98.

收稿日期: 2009-05-19; 修回日期: 2009-08-30

作者简介:

胡卫红(1971-), 男, 工学硕士, 工程师, 从事电力系统自动生产技术工作。E-mail: hu2816@sina.com

(上接第 11 页 continued from page 11)

- [9] Everenosoglu C Y, Abur A. Traveling Wave Based Fault Location for Teed Circuits[J]. IEEE Trans on PWRD, 2005, 20(2): 1115-1121.
- [10] Mognago F H, Abur A. Fault Location Using Wavelets[J]. IEEE Trans on PWRD, 1998, 13(4): 1475-1480.
- [11] Aggarwal R K, Courgy D V, Johns A T, et al. A Practical Approach to Accurate Fault Location on Extra High Voltage Teed Feeders[J]. IEEE Trans PWRD, 1993, 8(3): 874- 833.
- [12] Girgis A A, Hart D G, Peterson W L. A New Fault Location Technique for Two-and Three-Terminal Lines[J]. IEEE Trans PW RD, 1992, 7(1): 98-107.

- [13] Jiang F, et al. A New Directional Comparison Scheme for Power Line Protection Using Wavelet Transformation[A]. in: IPEC[C]. 1999.

- [14] Thomas D W P, de Lima F R F, Christodoulous C. A Traveling-Wave Relay for the Protection of EHV Transmission-Lines with Teed Feeds[J]. IEEE: 232-235.

收稿日期: 2009-06-30; 修回日期: 2009-09-28

作者简介:

周鑫(1984-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护研究; E-mail: johnmann@163.com

吕飞鹏(1968-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统继电保护和故障信息处理智能系统研究。