

T型线路的行波测距原理与算法

郭亮¹, 吕飞鹏²

(1. 四川省电力公司通信自动化中心, 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610064)

摘要: 针对已有的T型线路行波故障测距算法测距结果易受行波波速影响的不足, 提出一种新的T型线路行波故障测距算法。该算法根据相同条件下行波波速相等的原理, 在已知线路长度和故障电流初始行波到达线路三端的时间的情况下, 无需行波波速精确值参与判断和计算, 排除了其对故障支路判断和部分情况下测距精度的影响, 且在T节点附近不存在死区。通过大量Matlab仿真表明, 该算法计算简单, 测距精度较高, 能够满足故障定位的要求。

关键词: T型线路; 故障测距; 提升小波; 相模变换; 暂态行波

Fault location algorithm based on wavelet transform for T-connection transmission lines

GUO Liang¹, Lü Fei-peng²

(1. Communication and Automation Center of Sichuan Electric Power Corporation, Chengdu 610041, China; 2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: In respect to the defect that the location result of the present travelling wave fault location algorithm for T-connection transmission line is easily affected by travelling wave velocity, this paper proposes a new method for the fault location on T-connection transmission lines, which is based on the principle that the traveling wave velocity is equal on the same condition. Only line parameters and the arriving time of initial fault current transient traveling waves to line three-side are needed in the method, where there is not a dead zone when fault occurs nearby the T-connection node, and the influence of the wave velocity on fault branch judgement and location accuracy on part condition is also excluded. The results of simulation show that the proposed method has simple computation, higher accuracy and can meet the requirement of fault location.

Key words: T-connection transmission lines; fault location; lift wavelet; phase-mode transformation; transient traveling wave

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0064-04

0 引言

传统的T型线路故障测距算法需要同时采集三端电压、电流量, 通过计算并比较T节点电压的方法判断故障支路, 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, 出现错误判断故障支路的情况。

两端线路的行波测距算法已趋于成熟, 并已运用于实际工程中。针对T型线路的行波故障测距, 国外学者也已经取得了一些研究成果。文献[1]提出了利用小波能量判断故障支路的方法, 但是对于T型线路, 利用反射波进行故障定位在实际应用中存在困难。文献[2]提出利用任意两端数据计算出的故障距离与已知的线路长度进行比较来判断故障支路, 但需要对波速进行估计, 可能产生较大的测距误差。

本文通过对T型线路发生故障后可能存在的各

种情况进行分析, 提出一种新的T型线路行波故障测距算法。与国外已有文献的算法相比, 新算法具有以下优点: 充分利用线路已知参数和故障电流初始行波到达线路三端的时间, 计算简单, 计算量小; 无需行波波速参与计算, 且不受故障类型、分布电容、接地电阻等因素的影响; 与传统算法相比其在T节点附近不存在死区; 算法具有较高的精确度, 工程上易于实现。

1 新型T型线路故障测距原理

1.1 故障支路的判别

如图1所示三端T接线路, T为分支点, M、N、P为系统三端, 对应的线路长度分别为 L_m 、 L_n 、 L_p 。当f点发生故障时, 在全球定位系统(GPS)时标完全相同的情况下^[3], 可以测量故障电流初始行波到达三端母线测量端的绝对时间, 即有 t_m 、 t_n 、

t_p 。因为行波波速在相同条件下相等, 所以可以利用 t_m 、 t_n 、 t_p 的大小关系来判断故障支路。

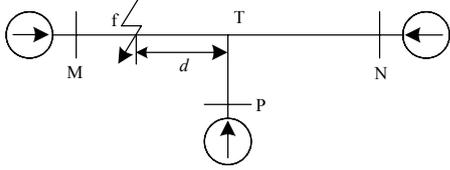


图1 T接线示意图

Fig.1 Teed line system

已知三条支路长度, 而三条支路的长度关系可以分为三类: 三条支路长度都相等, 有两条支路长度相等和三条支路长度均不相等。下面根据以上三类情况中测得的 t_m 、 t_n 、 t_p 之间的关系分别进行讨论。

(1) 三条支路长度都相等, 即 $L_m = L_n = L_p$, 则根据 t_m 、 t_n 、 t_p 之间的关系可得到以下结论:

(i) $t_m = t_n = t_p$, 则能够判断故障点为 T 节点;

(ii) $t_i = \min\{t_m, t_n, t_p\}$, 则可判断故障支路为与 t_i 对应的支路 L_i 。

(2) 有两条支路长度相等, 例如 $L_m = L_n \neq L_p$, 则根据 t_m 、 t_n 之间的关系有以下结论:

(i) $t_m = t_n$, 可判断故障点为 T 节点或者在 L_p 支路上, 需要其他判据进行进一步的判断;

设行波波速为 v , 故障点到 T 节点的距离 $d \geq 0$ 。根据行波波速相同的原理, 有下式成立:

$$\frac{L_m - L_p + 2d}{t_m - t_p} = \frac{L_n - L_p + 2d}{t_n - t_p} = v \quad (1)$$

设: $V_{mn} = (L_n - L_m)/(t_n - t_m)$,

$$V_{mp} = (L_p - L_m)/(t_p - t_m),$$

$$V_{np} = (L_p - L_n)/(t_p - t_n),$$

若 $L_m = L_n > L_p$, 而故障点在 T 节点, 则 $d=0$, 有:

$$V_{mp} = V_{np} = v \quad (2)$$

当故障点在 L_p 上, 则 $d > 0$, 有:

$$V_{mp} = V_{np} < v \quad (3)$$

若 $L_m = L_n < L_p$, 又可得到以下结论:

当 $d=0$, 结论同式 (2);

当 $d > 0$ 且 $t_m = t_n < t_p$ 时, 则有

$$V_{mp} = V_{np} > v \quad (4)$$

当 $d > 0$ 且 $t_m = t_n > t_p$ 时, 又有

$$V_{mp} = V_{np} < 0 \quad (5)$$

当 $d > 0$ 且 $t_m = t_n = t_p$ 时, V_{mp} 和 V_{np} 无法计算。

通过比较式 (2) ~ (5), 最终判据可归纳为: 如果 V_{mp} 和 V_{np} 计算结果满足式 (2), 故障点为 T 节点, 否则故障点在 L_p 支路上。

此时判据需要用到行波波速, 但实际判断中无需知晓其精确值, 利用公式 $v = 1/\sqrt{L_1 C_1}$ 估算出大概的波速, 设比值 $V \in \{V_{mn}, V_{mp}, V_{np}\}$, 取一适当小的正数 ε , 若 $|V - v| < \varepsilon$, 即可认为该比值等于波速。

(ii) $t_m \neq t_n$, 可判断故障支路为与 $t_i = \min\{t_m, t_n\}$ 对应的支路 L_i 。

(3) 三条支路长度均不相等, 假设 $L_m < L_n < L_p$, 有以下结论:

(i) t_m 不小于 t_n 时, L_n 为故障支路;

(ii) t_n 不小于 t_p 时, 可判断 L_p 为故障支路;

(iii) $t_m < t_n < t_p$, 无法直接判断。下面进行进一步的分析。

当故障发生在支路 L_m 上时, 有

$$\frac{L_n - L_m + 2d}{t_n - t_m} = \frac{L_p - L_m + 2d}{t_p - t_m} = \frac{L_p - L_n}{t_p - t_n} = v \quad (6)$$

因为 $d > 0$, 且 $L_m < L_n < L_p$, $t_m < t_n < t_p$, 所以可得

$$V_{mn} < V_{mp} < V_{np} = v \quad (7)$$

当故障发生在支路 L_n 上时, 同理有

$$V_{np} < V_{mp} = v < V_{mn} \quad (8)$$

当故障发生在支路 L_p 上时, 同理有

$$V_{mn} = v < V_{mp} < V_{np} \quad (9)$$

当故障发生在 T 节点上时, 有

$$V_{mn} = V_{mp} = V_{np} = v \quad (10)$$

通过式 (7) ~ (10) 可以看出, 通过比较 V_{mn} , V_{mp} , V_{np} 的大小关系以及它们与行波波速 v 之间的大小关系就可以判别出故障支路。其中行波波速 v 的处理同前。

综上所述, T 型线路支路参数已知后, 则行波波速 v 的概值可预先估算出来。测得 t_m 、 t_n 、 t_p 后, 部分情况直接通过比较三个时间的大小即可得出结论, 剩下部分情况只需计算几个比值并比较其大小关系也能得到结论。整个判断过程方法简单, 计算

量小，且不需要知道行波波速的精确值，排除了其对判断结果的影响。

1.2 故障点定位

当故障支路判断完毕后，可以利用行波波速相等构建方程求解故障距离。根据前一小节分析，由式(6)可以推导出下式：

$$d = \frac{(L_p - L_m)(t_n - t_m) - (L_n - L_m)(t_p - t_m)}{2(t_p - t_n)} \quad (11)$$

式(11)即为 $L_m < L_n < L_p$ ， $L_m < t_n < t_p$ ，且故障发生在支路 L_m 上时的故障距离计算公式。由公式推导过程知，该方法存在一定的使用局限，即必须满足 $t_m \neq t_n \neq t_p$ 。因此上一小节讨论的情况中，只有第二大类的情况2和第三大类的三种情况才能使用该方法。同理可推出满足该条件的其他情况故障距离的计算公式。可以看出，利用式(11)等公式进行故障定位不需要行波波速参与计算，排除了其对定位结果的影响。

其中也存在一些特例无需计算即可完成定位，例如当 $L_p < L_m = L_n$ 、 $t_m \neq t_n$ ，且 $t_i = \min\{t_m, t_n\} = t_p$ 时，故障点为支路 L_i 上距 T 节点 $(L_m - L_p)/2$ 处。

2 算例仿真及误差分析

2.1 算例仿真

为了验证本文提出的算法，用 Matlab/Simulink 建立一个如图 1 所示的 500 kV 三端系统模型。仿真中采用提升格式的小波变换，线模量的求取采用文献[4]提出的相模变换矩阵。设定仿真时间为 0.05 s，采样频率为 1 MHz，故障起始时间为 0.025 s，接地电阻为 10 Ω ，线路参数为：

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

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

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

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

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

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

首先对判断故障支路的判据进行验证。利用已知的线路长度和测得的时间可直接判断出故障支路的这部分情况的判据是必然成立的，所以无需验证，只需对另外两种情况的判据进行验证。先算出波速

$$v = 1/\sqrt{L_1 C_1} = 2.89942 \times 10^5 \text{ km/s.}$$

为了验证判据式(2)的正确性，表1列举了一些关于故障支路判断的例子。从所测数据可以看出，

只要正数 ε 取得恰当，完全可以正确地判断出故障点的所在。大量仿真数据表明在 T 节点附近 0.4 km 的范围内也能正确地判断故障支路，无判断死区。

表 1 故障支路判断的仿真结果

Tab. 1 Simulation results of fault branch discrimination

参数	故障支路	d/km	首波时间/s	$V=V_{mp}$	$ V-v $
$L_m = L_n = 180 \text{ km}$ $L_p = 120 \text{ km}$ $t_m = t_n$	T 节点	0	0.025 623	291 262	1 320
			0.025 623		
			0.025 417		
	L_p	0.3	0.025 625	285 714	4 228
			0.025 625		
			0.025 415		
L_p	50	0.025 797	108 696	—	
		0.025 797			
		0.025 245			
$L_m = L_n = 150 \text{ km}$ $L_p = 180 \text{ km}$ $t_m = t_n$	T 节点	0	0.025 519	288 462	1 480
			0.025 519		
			0.025 623		
	L_p	0.4	0.025 521	294 118	4 176
			0.025 521		
			0.025 623		
L_p	60	0.025 725	-97 403	—	
		0.025 725			
		0.025 417			

注：首波时间从上往下的顺序为 t_m 、 t_n 、 t_p

就 $L_m < L_n < L_p$ ， $t_m < t_n < t_p$ 这种情况进行仿真。

表 2 的数据表明，取 $\varepsilon=2000$ 时，前面提出的判据式(7)、(8)、(9)、(10)是可行的。

表 2 故障支路判断的仿真结果

Tab. 2 Simulation results of fault branch discrimination

参数	故障支路	d/km	首波时间/s	比值V	$ V-v $
$L_m = 120 \text{ km}$ $L_n = 180 \text{ km}$ $L_p = 250 \text{ km}$	T 节点	0	0.025 417	291 262	1 320
			0.025 623		
			0.025 863		
	L_m	0.3	0.025 415	285 714	4 228
			0.025 625		
			0.025 865		
L_m	25	0.025 331	158 730	131 212	
		0.025 709			
		0.025 949			
L_n	0.3	0.025 417	291 262	—	
		0.025 623			
		0.025 865			
	L_n	25	0.025 501	1 666 667	—
			0.025 537		
			0.025 949		
L_p	0.3	0.025 417	288 462	1 480	
		0.025 625			
		0.025 863			
	L_p	25	0.025 417	288 462	1 480
			0.025 623		
			0.025 863		

注：首波时间的顺序同表 1，比值从上往下的顺序为 V_{mn} 、 V_{mp} 、 V_{np}

为了进一步地验证该算法，表 3 列出了采用本文提出的方法计算出的部分测距结果。由仿真数据看出，测距误差大多在 300 m 以内，能够满足实际

工程的需要。

2.2 误差分析

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, 由式(11)知, 故障距离计算误差主要由两个参数决定: 一是线路长度, 另一个是故障初始行波到达的时间。对于一确定的T接线路, 支路长度 L_m 、 L_n 、 L_p 不变, 其在计算过程中不会导致误差, 但实际工程中存在的测量误差以及各种外在因素造成的线路变形等所造成的误差均会影响最终的计算结果; 因此本文仿真结果的误差仅与 t_m 、 t_n 、 t_p 有关, 在采样频率为1 MHz的情况下, 采样周期为 10^{-6} s, 若行波波速取 2.9×10^5 km/s, 其导致的误差为300 m左右。综上分析, 仿真结果的误差是由测量时间的采样精度造成, 其误差精度为300 m左右, 根据表3可以看出, 仿真结果与该结论是一致的。

表3 测距算例的仿真结果

参数	故障支路	d/km	故障测距/km	绝对误差/m
	L_m	0.3	0.333	33
		25	25.125	125
		65	65.375	375
		95	94.959	41
$L_m=120$ km		0.3	0.112	182
$L_n=180$ km	L_n	25	24.777	223
		100	99.933	67
$L_p=250$ km	L_p	160	159.999	1
		0.3	0.385	85
		25	25.192	192
		150	150.339	339
		245	244.855	145

3 结论

本文提出了利用已知线路长度和三端首波时间对T型线路进行故障识别和故障点定位的新方法, 其优点为: 无需线模量波速的精确值参与判别和计算, 排除了其对故障支路判断和测距精度的影响; T节点附近区域发生故障时均能准确判断, 且定位精度较高, 不存在死区; 测距误差能够满足实际工程中的需要。缺点是计算故障距离时该计算公式只适用于部分情况。

参考文献

[1] Evrenosoglu C Y, Abur Ali. Travelling wave based fault location for teed circuits[J]. IEEE Trans on PWRD, 2005, 20(2): 1115-1121.

[2] Murilo da Silva, Mario Oleskovicz, Denis Vinicius Coury. A fault locator for three-terminal lines based on wavelet transform applied to synchronized current and voltage

signals[C].// Transmission & Distribution Conference and Exposition TDC'06.IEEE/PES.Latin America: 2006.

[3] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 利用GPS的输电线路行波故障测距研究[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(12): 37-40.

DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al. Study of transmission line fault location based on traveling waves and GPS technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(12): 37-40.

[4] 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.

[5] 邓军波, 施围. 输电线路接地故障行波测距新方法[J]. 继电器, 2000, 28(8): 16-18.

DENG Jun-bo, SHI Wei. A new technique of earth fault location[J]. Relay, 2000, 28(8): 16-18.

[6] 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.

SHU Hong-chun, GAO Feng, CHEN Xue-yun, et al. A study on accurate fault location algorithm of EHV T-connection to three terminals[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 416-420.

[7] 高厚磊, 安艳秋, 江世芳. 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(20): 51-54.

GAO Hou-lei, AN Yan-qiu, JIANG Shi-fang. Study on accurate fault location algorithm for EHV teed lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(20): 51-54.

[8] 张帆, 潘贞存, 张慧芬, 等. 树型配电网单相接地故障行波测距新算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 46-52.

ZHANG Fan, PAN Zhen-cun, ZHANG Hui-fen, et al. New algorithm based on traveling wave for location of signal phase to ground fault in tree type distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 46-52.

[9] 施世鸿, 何奔腾, 张武军. T型高压输电线路故障测距[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 105-110.

SHI Shi-hong, HE Ben-teng, ZHANG Wu-jun. Fault location for HV three-terminal transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 105-110.

[10] 陈平, 葛耀中, 索南加乐, 等. 基于故障开断暂态行波信息的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 56-59, 64.

CHEN Ping, GE Yao-zhong, SUONAN Jia-le, et al. Study on fault location of transmission lines based upon fault switching off induced transient traveling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 56-59, 64.

(下转第74页 continued on page 74)

- Transactions on Power Delivery, 1996, 11 (2) : 1050-1058.
- [2] BAHISHAM YUNUS, LI Hai-yu. Analysis of power quality waveform for data transmission efficiency over IEC 61850 communication standard[C]. //First International Power and Energy Conference. 2006 : 161-166.
- [3] ÖMER NEZİH GEREK, DOĞAN GÖKHAN ECE. 2-D Analysis and compression of power-quality event data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (2) : 791-797.
- [4] 赵艳粉, 杨洪耕. 二维离散小波变换在电能质量检测数据压缩中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (15) : 51-55.
ZHAO Yan-fen, YANG Hong-geng. Data compression method using 2-dimensional discrete wavelet transform for power quality detection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (15) : 51-55.
- [5] ROBINSON J, KECMAN V. Combining support vector machine learning with the discrete cosine transform in image compression[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2003, 14 (4) :950-958.
- [6] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. Second edition. 北京: 电子工业出版社.
- [7] DRUCKER H, BURGESS C J C, KAUFMANN L, et al. Support vector regression machines[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1997.
- [8] 赵楠楠, 孙红星, 徐心和. 基于小波变换和svm的图象压缩仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18 (11) : 3034-3037.
ZHAO Nan-nan, SUN Hong-xing, XU Xin-he. Approach of image compression based on wavelet transform and SVM[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18 (11) : 3034-3037.
- [9] 李元诚, 焦润海, 李波. 一种基于支持向量机的小波图像压缩方法[J]. 北京航空航天大学学报. 2006, 32 (5) : 598-602.
LI Yuan-cheng, JAO Run-hai, LI Bo. Wavelet image compression based on support vector machines[J]. Journal of Beijing University Aeronautics and Astronautics, 2006, 32 (5) : 598-602.
- [10] 邓乃扬, 田英杰. 数据挖掘中的新方法:支持向量机[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [11] SALOMON DAVID, 吴乐南. 数据压缩原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [12] VLADIMIR CHERKASSKY, MA Yunqian. Practical selection of SVM parameters and noise estimation[J]. Neural Networks, 2004, 17 (1) : 113-126.
- [13] NELLO CRISTIANINI, JOHN SHAWE-TAYLOR. An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods[M]. Cambridge University Press, 2000.
-
- 收稿日期: 2009-11-07; 修回日期: 2010-03-09
作者简介:
郑伟彦 (1981-), 男, 博士研究生, 从事电能质量数据分析和挖掘研究; E-mail: zhweiyang@gmail.com
吴为麟 (1944-), 男, 教授, 博导, 研究方向为电能质量, 电力电子在电力系统中的应用。E-mail: eewuwl@zju.edu.cn
-
- (上接第 67 页 continued from page 67)
- [11] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6-10.
QIN Jian, CHEN Xiang-xun, ZHENG Jian-chao, et al. A new double terminal method of traveling wave fault location using wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 6-10.
- [12] 蒋涛, 陆于平. 不受波速影响的输电线路单端行波故障测距研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 24(12): 29-32.
JIANG Tao, LU Yu-ping. Study of fault locating based on single terminal traveling waves avoiding wave speed influence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 24(12): 29-32.
- [13] 李泽文, 曾翔君, 徐小箐, 等. 输电线路双端行波故障定位新算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 40-43.
LI Ze-wen, ZENG Xiang-jun, XU Xiao-qing, et al. New fault location algorithm based on double terminal traveling waves for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 40-43.
- [14] 熊小伏, 林金洪. 基于小波重构的电力电缆故障测距方法[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 36-38.
XIONG Xiao-fu, LIN Jin-hong. A wavelet reconstruction based fault location method for power cables[J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 36-38.
- [15] 葛哲学, 沙威. 小波分析理论与 Matlab7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
-
- 收稿日期: 2009-12-30; 修回日期: 2010-08-23
作者简介:
郭亮 (1982-), 男, 硕士研究生, 从事电网调度自动化工作; E-mail: bayernkicker@126.com
吕飞鹏 (1968-), 男, 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。