

基于参数估计的双端不同步故障测距算法

蒋春芳, 王克英

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 提出一种利用双端不同步采样数据并基于线路参数估计的故障测距算法, 将输电线路参数、两端数据采样不同步误差角和故障距离作为未知量, 利用故障时线路两端的非同步采样得到的电压和电流, 通过牛顿-拉夫逊法求解非线性方程得到这些未知量。并将故障测距结果采用故障距离占线路全长的比例来表示, 可以避免输电线路受温度影响产生长度变化导致的故障定位误差。利用线路杆塔在电路上所处的位置来估测故障点位置, 更方便查找故障点。该算法减小了因线路参数不准确所带来的测距误差, 仿真结果和实际数据验证表明该算法具有较高的测距精度。

关键词: 输电线路; 牛顿-拉夫逊法; 参数估计; 故障测距

Unsynchronous two-terminal fault location algorithm based on line parameter estimation

JIANG Chun-fang, WANG Ke-ying

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The paper presents a fault location algorithm that takes the transmission line parameters, the asynchronous sampling error angle between two-terminal and fault distance as unknown variables. The voltages and currents during fault at two-terminal are assumed to be available. The unknowns can be obtained by utilizing the Newton-Raphson approach to solve the nonlinear equations. The result of fault location expressed by the percentage corresponding to the ratio of fault distance to whole-length of transmission line can avoid the error produced by the transmission line length that changes with temperature. It is convenient to find the fault point by the location of the towers on the line. The proposed algorithm avoids the fault location error caused by inaccuracy of line parameters. Simulation results show that high accuracy of fault location can be obtained by use of the proposed algorithm.

Key words: transmission line; Newton-Raphson approach; parameter estimation; fault location

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)01-0001-04

0 引言

输电线路准确的故障定位, 能够减少人工巡线的强度, 缩短故障处理的时间, 从而能够大大提高电网的可靠性和经济性。因此, 长期以来输电线路的准确故障定位, 都是电力系统研究的重要课题之一。迄今为止, 提出了许多输电线路故障测距方法^[1~6], 按测距原理可分为行波法和故障分析法。行波法利用故障时产生的电压、电流行波进行测距, 其测距的可靠性和精度在理论上不受线路类型、故障电阻及两侧系统的影响, 但目前为止还没有可靠解决行波波头的准确拾取问题, 因而其应用受到了限制^[1,4]。故障分析法可分为单端法和双端法。单端法采用单端工频电气量, 简单易实现, 但测距精度受到故障过渡电阻和对端系统阻抗的影响^[1,2]。双端法利用输电线路两端的工频电气量, 其测距结果与

过渡电阻无关, 能在理论上消除故障点过渡电阻和故障类型对测距精度的影响, 不存在原理误差, 具有精确测距的能力, 因此具有更好的发展和工程应用前景^[1,3]。

传统的双端测距法将输电线路的参数作为已知量, 因此输电线路参数的准确性直接影响到故障测距的精度。一般情况下, 输电线路参数都是在一定环境下通过实测获得或经计算得到, 是一个确定的数值, 但实际运行过程中, 受当地环境温度、气候条件、大地电阻率影响, 输电线路参数会产生一些变化^[7], 这些变化将导致故障测距准确性受到影响。文献[5, 6]提出基于参数估计的测距算法, 削弱了输电线路参数变化对测距精度的影响, 但文献[5]将线路长度作为固定不变的值, 然而输电线路的长度并非固定不变的, 它随着环境温度的变化而变化, 不同季节线路长度变化范围在0.9~1.1之间^[7]。文献

[6]提出的算法建立在两端数据同步采样的基础上,这要求实际应用增加设备保证两端同步采样。

本文提出了一种基于输电线路参数估计故障测距算法,不要求两端数据采样同步和准确的输电线路参数,将线路参数、故障距离和两端非同步采样相位差作为未知量,利用故障时线路两端的电流、电压,通过牛顿-拉夫逊法求解非线性方程得出这些未知量。因此可以减小传统双端测距算法因输电线路参数不准带来的故障测距误差。同时为消除输电线路长度随环境温度变化带来的测距误差和方便巡线工人查找故障点,本算法得到的故障距离是按占线路全长的百分比来表示的,同时利用线路杆塔在电路上所处的位置来估测故障点位置,更方便查找故障点。

1 基于参数估计的双端测距算法

1.1 测距方程的形成

如图 1 所示的两侧电源系统,假设输电线路三相均匀换位,在线路 F 点发生短路故障。 V_{Ma}, V_{Mb}, V_{Mc} 分别为故障时 M 端的电压; I_{Ma}, I_{Mb}, I_{Mc} 分别为故障时 M 端的电流; V_{Na}, V_{Nb}, V_{Nc} 分别为故障时 N 端的电压; I_{Na}, I_{Nb}, I_{Nc} 分别为故障时 N 端的电流; m 为故障点 F 离 M 端距离占线路全长的百分比。由于线路两端的采样数据不是完全同步的,使得 M 和 N 端的实测电气量存在一个非同步采样相位差 δ 。

如果已知故障时刻 M、N 端的三相电压、电流,对于图 1 所示系统,有以下方程:

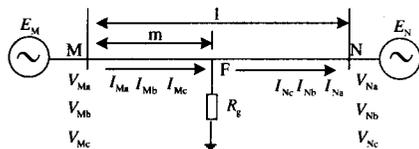


图 1 两侧电源输电线路接线图

Fig.1 Transmission line diagram with two-terminal power

$$\begin{bmatrix} V_{Ma} \\ V_{Mb} \\ V_{Mc} \end{bmatrix} - m \begin{bmatrix} R_s + jX_s & R_m + jX_m & R_m + jX_m \\ R_m + jX_m & R_s + jX_s & R_m + jX_m \\ R_m + jX_m & R_m + jX_m & R_s + jX_s \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} I_{Ma} \\ I_{Mb} \\ I_{Mc} \end{bmatrix} = e^{j\delta} \left\{ \begin{bmatrix} V_{Na} \\ V_{Nb} \\ V_{Nc} \end{bmatrix} - (1-m) \begin{bmatrix} R_s + jX_s & R_m + jX_m \\ R_m + jX_m & R_s + jX_s \\ R_m + jX_m & R_m + jX_m \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

式中: $R_s + jX_s$ 为线路总的自阻抗、 $R_m + jX_m$ 为线路总

的互阻抗。

将式(1)方程组的右边移往左边,并将实部和虚部分解后形成 6 个非线性实数方程组的测距方程组,如下:

$$\begin{cases} f_1(m, \delta, R_s, X_s, R_m, X_m) = 0 \\ f_2(m, \delta, R_s, X_s, R_m, X_m) = 0 \\ f_3(m, \delta, R_s, X_s, R_m, X_m) = 0 \\ f_4(m, \delta, R_s, X_s, R_m, X_m) = 0 \\ f_5(m, \delta, R_s, X_s, R_m, X_m) = 0 \\ f_6(m, \delta, R_s, X_s, R_m, X_m) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

1.2 测距方程组的求解

式(2)包含 6 个非线性实数方程组,6 个未知量: $m, \delta, R_s, X_s, R_m, X_m$, 可以用牛顿-拉夫逊法来求解该方程组。定义:

$$x = [m, \delta, R_s, X_s, R_m, X_m]^T \quad (3)$$

令:

$$f(x) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x), f_5(x), f_6(x)]^T \quad (4)$$

式(4)的雅可比矩阵 $J(x)$ 的第 i 行第 j 列元素 $J_{ij}(x)$ 为:

$$J_{ij}(x) = \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j}, \quad i=1, \dots, 6, \quad j=1, \dots, 6 \quad (5)$$

其迭代求解过程如下^[8]:

第 1 步: 给出初始值 $x^{(0)}$ 与容许误差 $\epsilon > 0$, 并置 $k=0$;

第 2 步: 算出 $J^{(k)}_{ij}(x) = \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j}, f_i^{(k)} = f_i(x^{(k)}),$

$i=1, \dots, 6, j=1, \dots, 6$;

第 3 步: 求解 $\Delta x^{(k)} = J^{-1}(x^{(k)})f(x^{(k)});$

第 4 步: 计算 $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)};$

第 5 步: 如果 $\|\Delta x^{(k)}\| < \epsilon$, 则停止迭代, 否则令

$k = k + 1$ 并跳到第 2 步继续迭代。

为减少迭代次数, 保证算法的可靠收敛, 本文在初值的设置和迭代过程中采取了以下技巧: 在选择初始值时, 将 δ 的初始值设为 0, m 的初始值设为 0.5, 变量 R_s, X_s, R_m, X_m 的初值设为输电线路参数的经验数据, 它与精确解相差不会太大; 在每一步的迭代过程中, 将 δ 的值通过加减 2π 限制在 $-\pi$ 和 $+\pi$ 之间; 故障距离 m 保持在 0 和 1 之间, 当 m 变为负时则将 m 置为 0, 当 m 超过 1 则将 m 置为 1。

1.3 故障点的杆塔定位

根据平时实测得到的各基杆塔所在的距离, 将

其折算为占输电线路长度的百分比来表示, 例如输电线路测量长度为 L , 线路总共有 n 基杆塔, 第 k 基杆塔离 M 端为 L_k , n_k 为第 k 基杆塔占线路全长的百分比, 则有:

$$n_k = \frac{L_k}{L} \times 100\% \quad (k=1, \dots, n) \quad (6)$$

假设杆塔之间线路长度随外界条件变化而均匀变化(通常这一假设是符合实际的), 则 n_k 值将不受季节、弧垂变化的影响。计算出故障距离 m 后, 与 n_k 比较, 得到故障所在的杆塔号, 故障点就在这基杆塔附近。

2 测距算法验证

2.1 Matlab 仿真验证

为验证本算法的正确性和可行性, 本文利用 Matlab 对图 1 所示的系统进行仿真模拟。对于不同类型的短路故障, 均以 5000 Hz 采样频率对输电线路两端的电压、电流进行采样, 利用全周傅氏滤波算法对采样值进行处理, 得到故障后的两端三相电

压、电流值。采样瞬时值中含有衰减的直流分量及各次谐波, 但全周傅氏滤波算法不能滤除衰减的直流分量, 为了解决这一问题, 通常的办法是采用故障后的第二、三周波的采样数据进行计算^[3,9], 本文采用故障后的第二周波采样数据。

仿真系统参数如下: 输电线路长度 $l=300$ km; 单位长度正序、零序电阻 $r_1=0.0208 \Omega/\text{km}$; $r_0=0.1148 \Omega/\text{km}$; 单位长度正序、零序电导 $l_1=0.8984 \text{ mH}/\text{km}$; $l_0=2.2886 \text{ mH}/\text{km}$; 单位长度正序、零序电容 $c_1=0.0129 \mu\text{F}/\text{km}$; $c_0=0.0052 \mu\text{F}/\text{km}$; 两端电压系统电压及内阻参数分别为: $E_M=525\sin\omega t$ kV; $E_N=500\sin(\omega t+30^\circ)$ kV; $R_{M1}=1.0515 \Omega$; $R_{M0}=0.6 \Omega$; $L_{M1}=0.13743 \text{ H}$; $L_{M0}=0.0926 \text{ H}$; $R_{N1}=26 \Omega$; $R_{N0}=20 \Omega$; $L_{N1}=0.14298 \text{ H}$; $L_{N0}=0.11927 \text{ H}$ 。

本文分别对单相接地、两相相间、两相接地和三相短路进行仿真计算, 计算结果分别如表 1~4 所示。同时表中给出了不带参数估计的双端测距算法测距结果, 表中 m_i 为不带参数估计的双端测距算法测距结果, m 为本文算法的测距结果。

表 1 单相接地故障仿真结果 ($R_F=100 \Omega$, $\delta=0.3489$ rad)

Tab.1 Simulation results of single-line-to-ground fault ($R_F=100 \Omega$, $\delta=0.3489$ rad)

实际故障比例	线路参数准确		线路参数变化+5%		线路参数变化-5%		线路长度变化+5%		线路长度变化-5%	
	m_l	m	m_l	m	m_l	m	m_l	m	m_l	m
0.3	0.3018	0.3052	0.2884	0.3052	0.3163	0.3052	0.2858	0.3052	0.3194	0.3052
0.5	0.4987	0.4989	0.5196	0.4989	0.4977	0.4989	0.4759	0.4989	0.5239	0.4989
0.8	0.7902	0.8099	0.8140	0.8099	0.7890	0.8099	0.7610	0.8099	0.8305	0.8099

表 2 两相接地短路故障仿真结果 ($R_F=100 \Omega$, $\delta=0.3489$ rad)

Tab.2 Simulation results of double-line-to-ground fault ($R_F=100 \Omega$, $\delta=0.3489$ rad)

实际故障比例	线路参数准确		线路参数变化+5%		线路参数变化-5%		线路长度变化+5%		线路长度变化-5%	
	m_l	m	m_l	m	m_l	m	m_l	m	m_l	m
0.3	0.3026	0.2976	0.2992	0.2966	0.3060	0.2966	0.2865	0.2966	0.3203	0.2966
0.5	0.4986	0.5012	0.4996	0.5012	0.4977	0.5012	0.4759	0.5012	0.5238	0.5012
0.8	0.7934	0.7898	0.8040	0.7898	0.7890	0.7898	0.7610	0.7898	0.8306	0.7898

表 3 三相接地短路故障仿真结果 ($R_F=100 \Omega$, $\delta=0.3489$ rad)

Tab.3 Simulation results of three-line-to-ground fault ($R_F=100 \Omega$, $\delta=0.3489$ rad)

实际故障比例	线路参数准确		线路参数变化+5%		线路参数变化-5%		线路长度变化+5%		线路长度变化-5%	
	m_l	m	m_l	m	m_l	m	m_l	m	m_l	m
0.3	0.3082	0.2916	0.2893	0.2916	0.3162	0.2916	0.2836	0.2916	0.3263	0.2916
0.5	0.5056	0.5063	0.5163	0.5063	0.4875	0.5063	0.4809	0.5063	0.5251	0.5063
0.8	0.7956	0.8029	0.8089	0.8029	0.7823	0.8029	0.7712	0.8029	0.8306	0.8029

表 4 两相短路故障仿真结果 ($\delta=0.3489$ rad)Tab.4 Simulation results of two-phase fault ($\delta=0.3489$ rad)

实际故障比例	线路参数准确		线路参数变化+5%		线路参数变化-5%		线路长度变化+5%		线路长度变化-5%	
	mI	m	mI	m	mI	m	mI	m	mI	M
0.3	0.2989	0.3012	0.2836	0.3012	0.3098	0.3012	0.2836	0.3012	0.3123	0.3012
0.5	0.5023	0.5089	0.5135	0.5089	0.4836	0.5089	0.4763	0.5089	0.5216	0.5089
0.8	0.8053	0.7919	0.8160	0.7919	0.7851	0.7919	0.7610	0.7919	0.8393	0.7919

从表 1~4 仿真结果可以看出,对于各种不同的短路故障类型,在输电线路参数及长度都准确的情况下,本文方法和传统的双端故障测距方法都具有较高的测距精度;在输电线路参数及长度不准确时,本文采取的故障测距算法都能更准确地计算出故障距离,而传统的双端故障测距方法误差明显增大。

2.2 实际数据验证

为验证算法的正确性和可行性,本文采用山东日照电厂至日照变的一条 220 kV 线路在距日照电厂 13.5 km 发生 BC 相接地故障时,两端的故障录波数据代入本算法来验证。该线路参数为:输电线路长度 $L=23.59$ km;正序阻抗 $z_1=0.051+j0.367$ Ω/km ;零序 $z_0=0.36+j1.584$ Ω/km ;从现场录波器取得的故障后的电压电流数据如表 5 所示。采用本算法得到的故障距离为 13.28 km,误差为 0.22 km。

表 5 录波器取得的故障后电压电流

Tab.5 Voltages and currents from the recorded data

	a 相	b 相	c 相
M 端电压/kV	-87.432-j86.046	10.484+j20.87	27.942-j1.973
M 端电流/kA	0.294+j0.356	2.946+j1.002	-1.077-j2.911
N 端电压/kV	-95.831-j63.872	26.027+j17.74	40.938-j7.203
N 端电流/kA	-0.363-j0.271	3.507+j1.084	-2.520-j4.838

3 结论

利用双端不同步采样数据并将输电线路参数作为未知量进行参数估计,从原理上减小了线路参数误差对故障测距结果的影响。故障定位结果采用占线路全长的百分比来表示,使得故障测距不受外界条件导致线路长度变化的影响,便于利用线路杆塔所在的位置来进行故障点定位。本文利用线路杆塔在电路上所处的位置来估测故障点位置,方便巡线工人查找故障点,具有工程实用价值。仿真结果和实际数据验证表明本文算法测距精度满足工程要求。但本算法没有考虑同杆并行双回线之间的互感和线路不完全换位的情况,因此在应用于同杆并行双回线和不完全换位线路时故障测距会有一定误差。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1996.
GE Yao-zhong. New Types of Protective Relaying and Fault Location: Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [2] 胡帆, 刘沛, 程时杰. 高压输电线路故障测距算法仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(1): 67-72.
HU Fan, LIU Pei, CHENG Shi-jie. Investigation of the High Voltage Transmission Line Fault Location by Digital Simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(1): 67-72.
- [3] 董新洲, 葛耀中. 一种使用两端电气量的高压输电线路故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(8): 47-53.
DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong. Algorithm for High Voltage Transmission Line Fault Location Using one Terminal Voltage and Two Terminal Current [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(8): 47-53.
- [4] 范春菊, 张兆宁, 郁惟镛. 小波方法在超高压输电线路波故障测距中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 50-53.
FAN Chun-ju, ZHANG Zhao-ning, YU Wei-yong. Application of Wavelet Method in Traveling Wave Fault Location for EHV Transmission Line[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 50-53.
- [5] 梁军, 麻常辉, 负志皓. 基于线路参数估计的高压架空输电线路故障测距新算法[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 60-64.
LIANG Jun, MA Chang-hui, YUN Zhi-hao. A Fault Location Algorithm for High Voltage Overhead Power Transmission Line Based on Line Parameter Estimation [J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 60-64.
- [6] 索南加乐, 张悻宁, 齐军, 等. 基于参数识别的时域法双端故障测距原理[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 65-69.
SUONAN Jia-le, ZHANG Yi-ning, QI Jun, et al. Time Domain Fault Location Method Based on Transmission Line Parameter Identification Using Two Terminals Data[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 65-69.

(下转第 8 页 continued on page 8)

机的励磁系统和运行状况没有影响。而且对于三相绕组任一点接地故障具有相同的灵敏度。

外加直流电源法的优点:

- 1) 算法简单, 可靠性高。
- 2) 由于是采用直流检测, 所以不受绕组分布电容和交流励磁电流频率的影响, 精度非常高。
- 3) 实现对转子绕组 100% 接地保护, 且任何一点接地, 保护的灵敏度一样。
- 4) 对转子绕组的绝缘情况进行监测。

外加直流电源法的主要缺点:

- 1) 保护的二次回路与转子绕组一次回路直接相连, 给安全生产带来潜在的威胁。
- 2) 正常运行时, 在励磁绕组与地之间始终有一个外加的直流电压, 给绕组绝缘性能带来额外的压力。

参考文献

- [1] 杨顺昌, 廖勇, 李辉. 异步化同步发电机[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
YANG Shun-chang, LIAO Yong, LI Hui. Asynchronized Synchronous Generator[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [2] 廖勇, 杨顺昌. 交流励磁发电机励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2): 87-90.
LIAO Yong, YANG Shun-chang. Excitation Control of Alternating Current Excitation Generators[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(2): 87-90.

(上接第 4 页 continued from page 4)

- [7] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1985.
CHEN Heng. Static Analysis of Power System [M]. Beijing: China Water Conservancy and Electric Power Press, 1985.
- [8] 刘春风. 应用数值分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
LIU Chun-feng. Numerical Value Analysis[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.
- [9] 姚李孝, 姚金雄, 安源. 基于 Matlab/Simulink 的高压输电线路故障定位的仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 53-56.

- [3] 郭光荣. 发电机转子绕组接地保护[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 73-76.
GUO Guang-rong. The Earth Fault Protection For Generator Rotor Field Coil[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 73-76.
- [4] 侯有韬, 张丽丽. 外加电源式定子接地保护影响因素的分析[J]. 继电器, 2005, 33(12): 27-31.
HOU You-tao, ZHANG Li-li. Influencing Factors of Stator Ground Fault Protection with Outside Sources[J]. Relay, 2005, 33(12): 27-31.
- [5] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
WANG Wei-jian, HOU Bing-yun. The Theoretical Foundation of Large Scale Generator-transformer Set Relay Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.

收稿日期: 2007-07-09; 修回日期: 2007-08-09

作者简介:

卢继平 (1960-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统自动化和电力系统继电保护; E-mail: lujiping@cqu.edu.cn

张向军 (1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护;

王晓健 (1964-), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事发电厂电气设备检修和管理。

YAO Li-xiao, YAO Jin-xiong, AN Yuan. Fault Location Simulation for High Voltage Power Transmission Line Based on Matlab/Simulink[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 53-56.

收稿日期: 2007-06-05; 修回日期: 2007-07-24

作者简介:

蒋春芳 (1978-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护、控制与自动化; E-mail: jiang_cf.hcg@gxep.com.cn

王克英 (1963-), 男, 博士, 教授, 从事微型计算机在电力系统测量和控制中的应用研究。