精确双端故障测距新算法

梁　军　孟昭勇　车仁飞　李仁俊
（山东工业大学电力工程学院　250061　济南）

摘　要　提出一种利用线路双端故障数据进行精确故障定位的新算法。新算法利用了故障后线路两端的电压电流相量，考虑了双端采样数据的非同步问题，通过采用分布参数模型，精确考虑了分布电容对测距算法的影响，从而大大提高了测距算法的精确度。该算法通过 EMTP 仿真和实际故障数据的验证，证明有很高的精确度。

关键词　故障测距　双端线路　分布参数模型

0　引言

到目前为止，故障测距的大部分算法都是基于故障线路单端测量物理量的单端测距算法[1～3]，由于信息量的限制，这类算法一般都作了一些近似的假设，故存在无法消除的原理性误差。为了改进故障测距的计算方法，提高测距精度，人们开始对双端和多端测距的算法进行研究[4～6]，并取得了一定成果。但多数算法一般都是基于线路的集中参数模型，忽略了并联电容的影响，给测距造成了一定的误差。

本文提出了一种新的基于电力线路分布参数模型的精确故障测距算法，利用故障后线路两端的电压电流基波相量，无须考虑故障边界条件或过渡电阻，两端数据采集造成的非同步误差可在算法中递推算出。EMTP 仿真结果及现场实际验证均表明，其有很高的精确度。

1　建立分布参数数学模型

对于一条实际的输电线路，其参数是分布的，尤其对于长线路来说，若不考虑这种分布特性将会造成较大误差。单相输电线的分布参数模型如图 1 所示。为了考虑这种分布参数特性，采用长线路的等值电路，图 2 是等值电路的示意图。

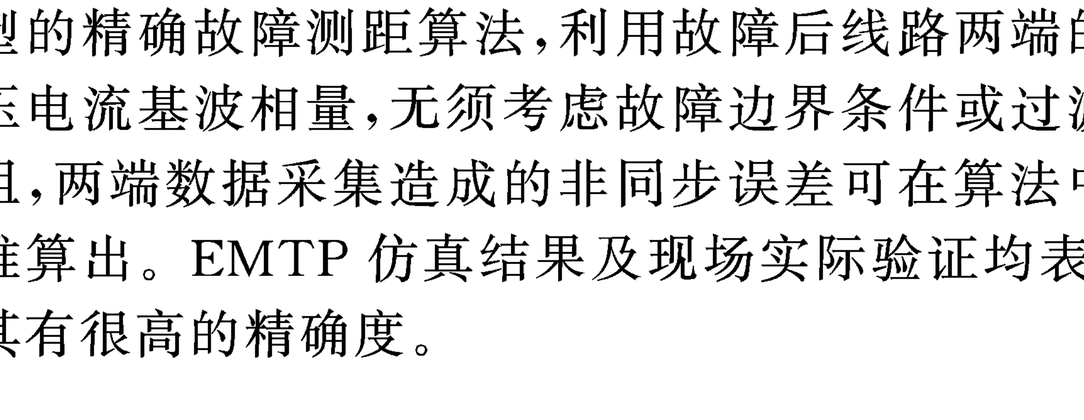

图1　电力线路的单相等值电路

Fig. 1　Single - phase equiralent circuit of transmission line

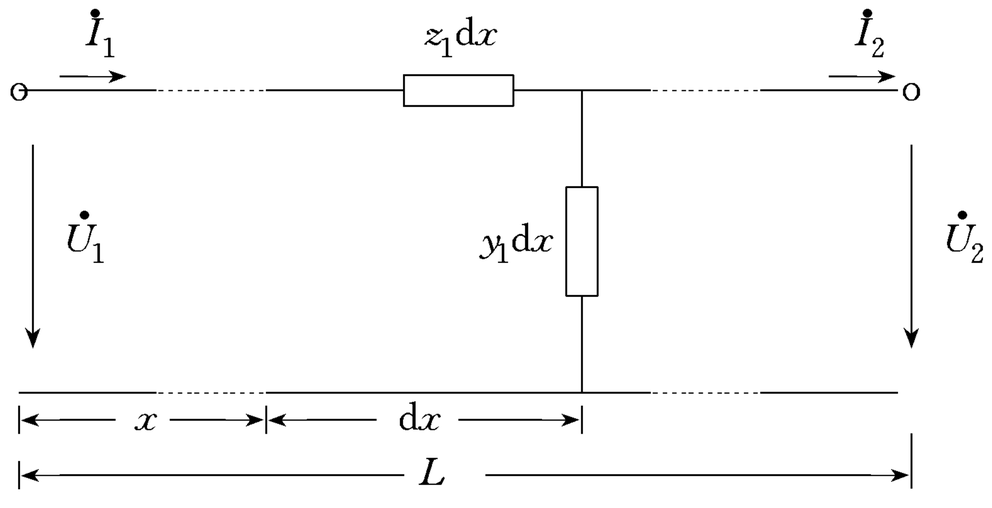

图2　均匀分布参数模型

Fig. 2　Distributed parameter model

如果知道了始端电压电流相量 $\dot{U}_1$，$\dot{I}_1$，便可以求得末端电压电流相量 $\dot{U}_2$，$\dot{I}_2$[7] 为：

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_2\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cosh\gamma L & -Z_c\sinh\gamma L\\ -\dfrac{\sinh\gamma L}{Z_c} & \cosh\gamma L\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{I}_1\end{bmatrix}\tag{1}$$

其中　$\gamma=\sqrt{z_1 y_1}$，为线路的传播常数；$Z_c=\sqrt{z_1/y_1}$，为线路的特性阻抗。

式(1)是在三相对称条件下形成的，而电力系统的故障绝大多数为不对称故障，因此首先需要将故障后两端的电压电流相量分解成序分量，然后方可以用式(1)进行计算。下面以一个两端输电线路系统来阐述测距算法的形成。

2　双端测距算法

系统如图 3 所示。假定得到母线 m 和 n 的三相电压和三相电流值，由于非同步采样造成 m 端和 n 端的采样数据有一定的时间差，设两端数据由于非同步采样而带来的相位差为 δ，将 n 端的电压和电流相量同乘 $e^{j\delta}$。

首先将两端电压电流相量变换为对称分量：

1997－01－25 收稿。

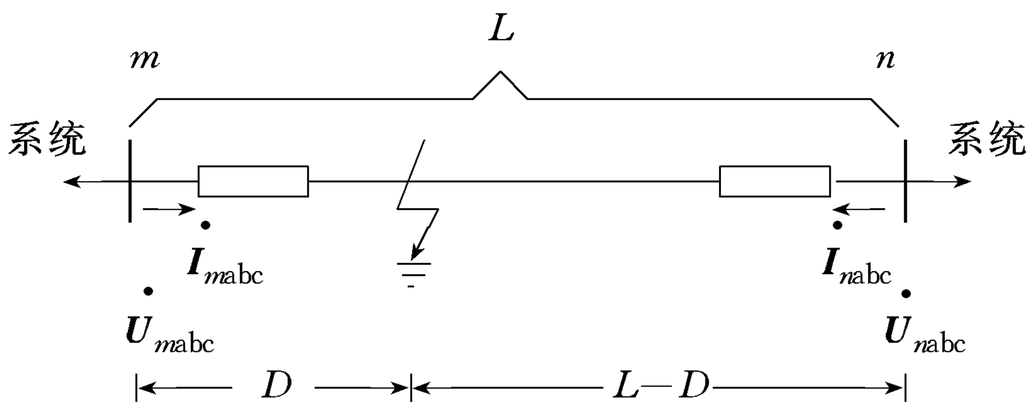

图3 两端输电系统

Fig. 3 Two terminal transmission system

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{U}}_{m1,2,0}=\boldsymbol{T}\,\dot{\boldsymbol{U}}_{mabc}\\ \dot{\boldsymbol{I}}_{m1,2,0}=\boldsymbol{T}\,\dot{\boldsymbol{I}}_{mabc}\\ \dot{\boldsymbol{U}}_{n1,2,0}=\boldsymbol{T}\,\dot{\boldsymbol{U}}_{nabc}\\ \dot{\boldsymbol{I}}_{n1,2,0}=\boldsymbol{T}\,\dot{\boldsymbol{I}}_{nabc}\end{cases}\tag{2}$$

其中
$$\boldsymbol{T}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}$$

$$a=\mathrm{e}^{\mathrm{j}120^\circ}=-\frac{1}{2}+\mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}$$

设短路点的序电压分别为 $\dot{U}_{f1},\dot{U}_{f2},\dot{U}_{f0}$，由式(1)和(2)，列出两组方程组：

$$\begin{cases}\dot{U}_{f1}=\dot{U}_{m1}\cosh\gamma_1 D-Z_{c1}\,\dot{I}_{m1}\sinh\gamma_1 D\\ \dot{U}_{f2}=\dot{U}_{m2}\cosh\gamma_2 D-Z_{c2}\,\dot{I}_{m2}\sinh\gamma_2 D\\ \dot{U}_{f0}=\dot{U}_{m0}\cosh\gamma_0 D-Z_{c0}\,\dot{I}_{m0}\sinh\gamma_0 D\end{cases}\tag{3}$$

$$\begin{cases}\dot{U}_{f1}=[\dot{U}_{n1}\cosh(\gamma_1(L-D))-Z_{c1}\,\dot{I}_{n1}\sinh(\gamma_1(L-D))]\mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta}\\ \dot{U}_{f2}=[\dot{U}_{n2}\cosh(\gamma_2(L-D))-Z_{c2}\,\dot{I}_{n2}\sinh(\gamma_2(L-D))]\mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta}\\ \dot{U}_{f0}=[\dot{U}_{n0}\cosh(\gamma_0(L-D))-Z_{c0}\,\dot{I}_{n0}\sinh(\gamma_0(L-D))]\mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta}\end{cases}\tag{4}$$

其中 $\gamma_1,\gamma_2,\gamma_0$ 分别是按线路正序、负序、零序阻抗计算而得的传播时间常数；Z_{c1},Z_{c2},Z_{c0} 分别为按线路正序、负序、零序阻抗计算而得的特性阻抗；D 为从母线 m 至短路点的距离。

由方程组(3)和(4)相减消去短路点短路电压 U_{f1},U_{f2},U_{f0} 后，得到方程组(5)：

$$\begin{cases}\dot{U}_{m1}\cosh\gamma_1 D-Z_{c1}\,\dot{I}_{m1}\sinh\gamma_1 D=[\dot{U}_{n1}\cosh(\gamma_1(L-D))-Z_{c1}\,\dot{I}_{n1}\sinh(\gamma_1(L-D))]\mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta}\\ \dot{U}_{m2}\cosh\gamma_2 D-Z_{c2}\,\dot{I}_{m2}\sinh\gamma_2 D=[\dot{U}_{n2}\cosh(\gamma_2(L-D))-Z_{c2}\,\dot{I}_{n2}\sinh(\gamma_2(L-D))]\mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta}\\ \dot{U}_{m0}\cosh\gamma_0 D-Z_{c0}\,\dot{I}_{m0}\sinh\gamma_0 D=[\dot{U}_{n0}\cosh(\gamma_0(L-D))-Z_{c0}\,\dot{I}_{n0}\sinh(\gamma_0(L-D))]\mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta}\end{cases}\tag{5}$$

为了消除零序的影响，去掉第三个方程，即

$$\begin{cases}\dot{U}_{m1}\cosh\gamma_1 D-Z_{c1}\,\dot{I}_{m1}\sinh\gamma_1 D=[\dot{U}_{n1}\cosh(\gamma_1(L-D))-Z_{c1}\,\dot{I}_{n1}\sinh(\gamma_1(L-D))]\mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta}\\ \dot{U}_{m2}\cosh\gamma_2 D-Z_{c2}\,\dot{I}_{m2}\sinh\gamma_2 D=[\dot{U}_{n2}\cosh(\gamma_2(L-D))-Z_{c2}\,\dot{I}_{n2}\sinh(\gamma_2(L-D))]\mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta}\end{cases}\tag{6}$$

方程组(6)包含两个未知数 D 和 δ，可分解为4个非线性实数方程：

$$\begin{cases}f_1(D,\delta)=0\\ f_2(D,\delta)=0\\ f_3(D,\delta)=0\\ f_4(D,\delta)=0\end{cases}\tag{7}$$

令
$$\boldsymbol{A}=(a_{ij})=\begin{bmatrix}\frac{\partial f_1}{\partial D} & \frac{\partial f_1}{\partial \delta}\\ \frac{\partial f_2}{\partial D} & \frac{\partial f_2}{\partial \delta}\\ \frac{\partial f_3}{\partial D} & \frac{\partial f_3}{\partial \delta}\\ \frac{\partial f_4}{\partial D} & \frac{\partial f_4}{\partial \delta}\end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{A}$ 为 $\boldsymbol{f}(D,\delta)=[f_1,f_2,f_3,f_4]^{\mathrm{T}}$ 的 Jacobi 矩阵，$\boldsymbol{b}=[b_1,b_2]=[D,\delta]$，$\boldsymbol{H}=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{g}=-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}(-\boldsymbol{f})$，

下面给出求解 $\boldsymbol{b}$ 的计算步骤：

(1) 给出初估值 $\boldsymbol{b}^{(0)}$ 与容许误差 $\varepsilon>0$，并置 $l=0$。

(2) 计算

$$a_{ij}^{(l)}=\frac{\partial f_i}{\partial b_j}\quad i=1,2,3,4;\ j=1,2$$

$$g_j^{(l)}=-\sum_{i=1}^{4}(-f_i^{(l)})a_{ij}^{(l)}$$

其中 $f_i^{(l)}=f_i(\boldsymbol{b}^{(l)})$

(3) 解线性方程组

$$\boldsymbol{\Delta}^{(l)}=[\boldsymbol{A}^{(l)\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{(l)}]^{-1}g_j^{(l)}\tag{8}$$

(4) 计算 $\boldsymbol{b}^{(l+1)}=\boldsymbol{b}^{(l)}+\boldsymbol{\Delta}^{(l)}$

(5) 如果 $\| \Delta^{(l)} \| < \varepsilon$,则停止;否则,置 $l = l + 1$ 并转回步骤(2)。

D 和 δ 的初值可分别取为 $L/2$ 和 0。

3 测距算法的验证

对于所提出的测距方法,采用 EMTP 暂态仿真程序产生的暂态数据进行了仿真验证。一共模拟了三相、两相、相间接地、单相接地等各种短路故障 30 多次。此外,为了验证接地电阻对算法的影响,尤其是高阻接地对算法的影响,在单相接地短路仿真中采用了十至几百欧的不同电阻来验证。因为 EMTP 产生的两端三相电压和三相电流数据是同步数据,在这里人为地将 n 端的电压电流相量同时旋转 20°。仿真线路采用实际线路的参数,线路长376.4 km,按线路长度的 10%设置短路点。

3.1 仿真模型网络(见图 4)

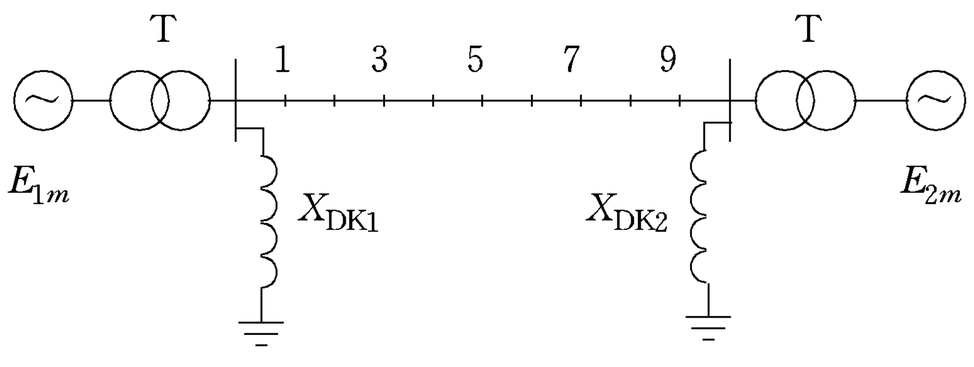

图4 仿真模型网络

Fig. 4 Simulation model network

主要参数如下:

输电线路长度 $L = 376.4$ km

正序阻抗 $Z_1 = 9.81 + j108.1\ \Omega$

零序阻抗 $Z_0 = 84.5 + j383.9\ \Omega$

线路对地正序电容 $C_1 = 0.013\ 2\ \mu F/km$

线路对地零序电容 $C_0 = 0.009\ 0\ \mu F/km$

等效系统阻抗 $Z_{s1} = j112.6\ \Omega$

$Z_{s2} = j173.2\ \Omega$

电抗器电抗 $X_{DK1} = X_{DK2} = 1\ 390\ \Omega$

短路瞬时两侧电势 $E_{1m} = 525 \sin \omega t$

$$E_{2m} = 500 \sin(\omega t + \varphi)$$

φ 为两侧电势摆开角,在仿真计算中取 $\varphi = 30°$。

3.2 EMTP 仿真结果

选择部分仿真结果列表于表 1～表 4,表 5 中列出了不同接地电阻对算法的影响。

3.3 实际数据的验证

1995 年 9 月 3 日,淄博电业局付家庄变电站至莱芜发电厂的一条线路发生单相接地故障,将双端故障录波器记录下来的实际数据输入到算法程序中,验证了算法的正确性和精确性。该线路参数为:

表 1 单相接地仿真结果(接地电阻 30 Ω)

Table 1 Simulation results of single-line-to-ground fault (fault resistance is 30 Ω)

短路点	实际故障距离/km	实际 δ 值/(°)	所测故障距离/km	所测 δ 值/(°)
1	37.64	20	37.634	20.023
2	75.28	20	75.243	20.025
3	112.92	20	112.857	20.027
4	150.56	20	150.464	20.029
5	188.2	20	188.073	20.030
6	225.84	20	225.684	20.032
7	263.48	20	263.291	20.033
8	301.12	20	300.922	20.035
9	338.76	20	338.469	20.037

表 2 两相短路仿真结果

Table 2 Simulation result of two-phase short circuit

短路点	实际故障距离/km	实际 δ 值/(°)	所测故障距离/km	所测 δ 值/(°)
1	37.64	20	37.631	20.023
2	75.28	20	75.240	20.024
3	112.92	20	112.848	20.025
4	150.56	20	150.455	20.026
5	188.2	20	188.06	20.028
6	225.84	20	225.665	20.029
7	263.48	20	263.268	20.030
8	301.12	20	300.87	20.032
9	338.76	20	338.469	20.033

表 3 两相接地短路仿真结果

Table 3 Simulation result of double-line-to-ground fault

短路点	实际故障距离/km	实际 δ 值/(°)	所测故障距离/km	所测 δ 值/(°)
1	37.64	20	37.633	20.023
2	75.28	20	75.244	20.025
3	112.92	20	112.85	20.027
4	150.56	20	150.46	20.028
5	188.2	20	188.07	20.030
6	225.84	20	225.671	20.031
7	263.48	20	263.274	20.033
8	301.12	20	300.876	20.034
9	338.76	20	338.476	20.036

表 4 三相短路仿真结果

Table 4 Simulation result of three-phase short circuit

短路点	实际故障距离/km	实际 δ 值/(°)	所测故障距离/km	所测 δ 值/(°)
1	37.64	20	38.229	20.353
2	75.28	20	76.023	20.456
3	112.92	20	113.806	20.555
4	150.56	20	151.58	20.648
5	188.2	20	189.344	20.738
6	225.84	20	227.098	20.823
7	263.48	20	264.845	20.904
8	301.12	20	302.589	20.985
9	338.76	20	340.34	21.071

表 5 验证接地电阻对测距算法的影响
(短路点设在线路中点 188.2 km 处,$\delta=20°$)
Table 5 Verification test of the influence of ground resistance on the fault location algorithm (fault point is at the middle of the line, namely 188.2 km, and $\delta=20°$)

R_f/Ω	所测故障距离 /km	所测 δ/(°)
0	187.995	20.007
20	187.980	20.003
40	187.956	20.000 4
60	187.93	19.999
80	187.905	19.999
100	187.883	19.999
120	187.863	19.999
140	187.845	19.999
160	187.829	19.999
180	187.813	19.999
200	187.798	19.999
220	187.784	20.000
240	187.77	20.000 2
260	187.757	20.000 4
280	187.744	20.000 6
300	187.731	20.000 8
350	187.7	20.001 2
400	187.669	20.001 5
450	187.64	20.001 8
500	187.61	20.002

正序阻抗 $Z_1 = 0.078 + j0.412\ 276\ \Omega/km$
零序阻抗 $Z_0 = 0.225 + j1.254\ 8\ \Omega/km$
线路对地正序电纳 $b_1 = 2.811\ \mu S/km$
线路对地零序电纳 $b_0 = 1.847\ \mu S/km$
线路长度 $L = 83.469$ km

实际的故障距离是离付家庄 61 km 处,测距结果为 60.02 km,误差为 1.17%。

4 结语

由以上算法的推导和验证可以看出,算法本身不受过渡电阻的影响,不需要判别故障类型,可适用于任何类型的故障;并且由于采用了分布参数的数学模型,使测距的精度大大提高。在实际测距中,影响算法精度的主要因素是线路参数和采样数据的准确性,如果线路参数和采样数据足够准确,那么测距结果也会足够精确。在算法推导过程中,略去了零序分量方程,使算法同样适用于双回线路的测距。

当线路两端的数据都可以得到时,采用双端测距技术的优势显而易见。它在用 EMTP 程序产生的数据对算法加以验证时,大部分情况下误差都小于 0.5%。由实际数据的验证也能得到精确的结果。

5 参考文献

1 李仁俊,梁 军,孟昭勇.一种新的电力系统短路故障测距方法.电力系统自动化,1993,17(6)

2 Girgis A A. A New Kalman Filtering Based Digital Distance Relay. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101 (9):3471~3479

3 Wisztcewski A. Accurate Fault Impedance Locating Algorithm. IEEE Proc-C, 1983, 130(6):311~315

4 Abe M, Otsuzuki N, Emura T *et al*. Development of a New Fault Location System for Multi-terminal. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995,10(1)

5 Nagasawa T, Abe M, Otsuzuki N. Development of a New Fault Location Algorithm for Multi-Terminal Two Parallel Transmission Lines. IEEE Transaction on Power Delivery, 1992,7(3)

6 Girgis A A, Hart D G. A New Fault Location Technique for Two and Three Terminal Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992,7(1)

7 陈 珩.电力系统稳态分析.南京工学院

梁 军,男,1956 年生,硕士,副教授,目前主要从事电力系统自动化领域的研究开发工作。

孟昭勇,男,1965 年生,硕士,讲师,目前主要从事配电网自动化方面的研究开发工作。

车仁飞,男,1971 年生,硕士,助教,目前主要从事配电网自动化方面的研究开发工作。

A NEW ACCURATE FAULT LOCATION ALGORITHM FOR TWO-TERMINAL LINES

Liang Jun, Meng Zhaoyong, Che Renfei, Li Renjun
(Shandong University of Technology, 250061, Ji'nan, China)

Abstract This paper presents a new technique for accurately locating faults in two-terminal high voltage lines. The technique utilizes post-fault voltage and current phasors at two ends of the line, and data sampling asynchronization at different line terminal is considered. A distributed transmission line model is used for the proposed algorithm. The technique was respectively tested through transient data generated by EMTP and actual transient data recorded by fault recorder. The test results show the high accuracy of the proposed technique.

Keywords fault location two-terminal lines distributed parameter model