

基于分布参数线路模型的精确故障测距算法

安艳秋, 高厚磊

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 为消除负荷电流和线路模型不准确给双端量故障测距带来的影响, 提出一种基于分布参数线路模型的精确测距算法, 算法以均匀传输线的波动方程(长线方程)为基础, 利用线路两端电压、电流的正序故障分量以及线路正序参数直接计算故障距离。算法无需故障类型判别, 不受系统阻抗、故障电阻、负荷电流以及分布电容的影响。基于 EMTP 的数字仿真结果验证了该算法的正确性和高精度。

关键词: 故障测距; 输电线路; 分布参数; 故障分量

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)06-0042-04

1 引言

基于工频量的故障测距分为两类, 即单端量故障测距和双端量故障测距。由于已知信息的局限性, 单端测距目前在理论上还无法克服故障点过渡电阻、远方系统阻抗等因素对测距精度的影响。在实际应用中难以满足要求。双端量故障测距利用线路两端的电流、电压信息, 能在理论上消除故障点过渡电阻、系统阻抗和故障类型对测距精度的影响, 具有精确测距的能力。因此, 随着电力通信技术的不断发展, 双端量故障测距已成为人们研究的重点, 并已提出许多有价值的算法。

双端量故障测距算法可分为两种: 一是基于两端非同步数据的算法, 它不要求两端的同步采样, 但算法复杂, 计算量大; 二是基于两端同步数据的算法, 它需要两端的同步采样, 但算法简单, 测距精度高。同时值得注意的是, 迄今所提出的双端量测距算法还不能完全消除下列因素对测距精度的影响: 线路模型、线路参数不平衡、线路参数不准确、负荷电流、同步测量精度和基波分量的提取精度。如, A. T. Johns 等在文献[1]中提出了利用两端故障后三相电流和电压并基于分布参数线路模型的测距算法, 但仿真结果是在假定负荷电流为零的条件下得出的。A. A. Girgis 等在文献[2]中提出了利用各端电压电流(同步或不同步)进行两端和三端线路故障定位的算法, 但建模时使用集中参数, 未考虑分布电容。

本文在过去工作的基础上, 以解决线路模型和负荷电流对双端量故障测距影响问题为目的, 提出一种基于分布参数线路模型的正序故障分量测距算法。理论分析和数字仿真表明, 该算法不受故障电

阻、故障类型、负荷电流、系统阻抗、分布电容等因素的影响, 具有很高的测距精度。

2 测距算法

本节算法推导建立在两端同步相量测量的基础之上, 即两端电压、电流具有统一参考基准。

2.1 单相线路

图1为一单根(单相)均匀传输线路, 电压、电流参考向如图所示。

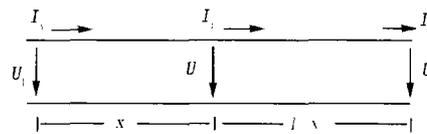


图1 单根均匀传输线

Fig.1 Single even transmission line

根据电路理论, 若均匀传输线上的电压和电流是时间的正弦函数, 则一定存在正弦稳态解。

当已知始端电流、电压时, 距始端 x 处的电压和电流为:

$$U_x = U_1 \cosh(\gamma x) - Z_c I_1 \sinh(\gamma x) \quad (1)$$

$$I_x = I_1 \cosh(\gamma x) - U_1 / Z_c \cdot \sinh(\gamma x) \quad (2)$$

当已知终端电压和电流时, 距始端 x 处的电压和电流为:

$$U_x = U_2 \cosh[(l-x)\gamma] + Z_c I_2 \sinh[(l-x)\gamma] \quad (3)$$

$$I_x = I_2 \cosh[(l-x)\gamma] + U_2 / Z_c \cdot \sinh[(l-x)\gamma] \quad (4)$$

两端电压电流的关系为:

$$U_1 = U_2 \cosh(\gamma l) + Z_c I_2 \sinh(\gamma l) \quad (5)$$

$$I_1 = I_2 \cosh(\gamma l) + U_2 / Z_c \cdot \sinh(\gamma l) \quad (6)$$

式(1)~(6)中: $\gamma = \sqrt{(r+j\omega L) \cdot (g+j\omega c)}$ 为传播常数; $Z_c = \sqrt{(r+j\omega L)/(g+j\omega c)}$ 为波阻抗; r 为线路

单位长度电阻; g 为线路单位长度电导; L 为线路单位长度电感; c 为线路单位长度电容。

假定双电源单相输电线路内部 F 点发生接地故障,有关各量如图 2 所示。

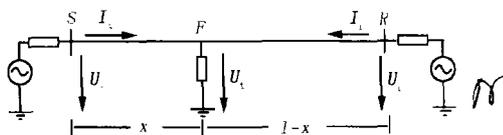


图 2 双侧电源单相输电故障线路

Fig. 2 Faulted single phase transmission lin with double source

根据式(1)、(3)有:

$$U_f = U_s \cosh(\gamma x) - Z_c I_s \sinh(\gamma x) \quad (7)$$

$$U_f = U_r \cosh[\gamma(l-x)] - Z_c I_r \sinh[\gamma(l-x)] \quad (8)$$

从式(7)和(8)中消去 U_f , 并解出 x :

$$x = \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{A-B}{A+B} \right) \right] / \gamma \quad (9)$$

这里,

$$A = Z_c I_r \cosh(\gamma l) - U_r \sinh(\gamma l) + Z_c I_s$$

$$B = -Z_c I_s \sinh(\gamma l) + U_s \cosh(\gamma l) - U_r$$

Z_c 和 γ 意义同前。

以上结果表明,当单相输电线路的 F 点发生故障时,只要知道线路参数及故障后线路两端的工频电压和电流,就能利用式(9)准确地计算出故障距离。

2.2 三相线路

在实际电力系统中,输电线路为三相线路,相互间存在互感,因而不能直接应用上述算法。对于相互间有耦合关系的三相系统,可采用模变换方法(如 Clark 变换、Wedepohl 变换等)将其解耦为三个独立的模分量系统^[3]。对任一模分量系统(类似于图 2)均可直接套用方程(7)-(9)所给出的测距算法。特别是,对于三相平衡系统(完全换位),则可采用正、负、零序对称分量系统。考虑到对称分量应用的普遍性以及正序分量的特点(任何故障类型下均存在),同时电力系统中大多数超高压输电线路都是平衡系统或接近平衡系统,因此本文采用正序分量系统(序网)进行故障测距研究。

2.2.1 正序分量测距算法

当采用正序分量系统时,算法分析用图如图 3 所示。

此时测距方程为:

$$x = \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{A_1 - B_1}{A_1 + B_1} \right) \right] / \gamma_1 \quad (10)$$

其中:

$$A_1 = Z_{c1} I_{r1} \cosh(\gamma_1 l) - U_{r1} \sinh(\gamma_1 l) + Z_{c1} I_{s1}$$

$$B_1 = -Z_{c1} I_{s1} \sinh(\gamma_1 l) + U_{s1} \cosh(\gamma_1 l) - U_{r1}$$

U_{r1}, I_{r1} 分别为 R 端正序电压和电流; U_{s1}, I_{s1} 分别为 S 端正序电压和电流; $Z_{c1} = \sqrt{Z_1/Y_1}$ 为线路正序波阻抗; $\gamma_1 = \sqrt{Z_1 \cdot Y_1}$ 为线路正序传播常数; Z_1 为线路单位长度正序阻抗; Y_1 为线路单位长度正序导纳。

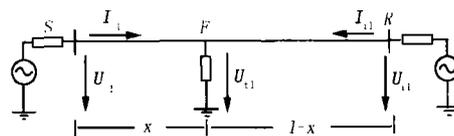


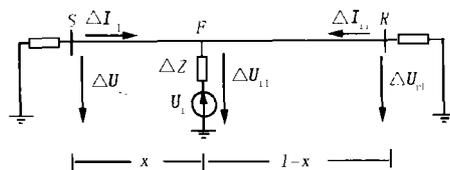
图 3 分布参数正序序网

Fig. 3 Positive-sequence network with distributed parameters

方程(10)给出的测距算法建立在精确线路模型之上,故障类型、故障电阻、系统阻抗、分布电容等对其没有影响。由于负荷电流存在于正序序网,因此该算法的测距精度将主要受负荷电流的影响(数字仿真结果也验证了这一点)。为消除负荷电流对测距精度的影响,可引入故障分量的概念。

2.2.2 正序故障分量测距算法

根据文献[4]有关正序故障分量的理论,基于分布参数线路模型的正序故障分量序网如图 4 所示。它是在正序复合序网的基础上,应用叠加原理得到的。



注: $-U_f$ —故障电动势,其大小等于故障点在故障前的相电压,相位相反; ΔZ —故障附加阻抗,其值与故障类型有关; $\Delta U_{r1}, \Delta I_{r1}$ —R 端正序故障分量电压、电流; $\Delta U_{s1}, \Delta I_{s1}$ —S 端正序故障分量电压、电流

图 4 分布参数正序故障分量序网

Fig. 4 Positive sequence fault component network with distributed parameters

由于线路仍采用分布参数模型,因此根据图 4 导出的测距方程具有与方程(10)相同的形式,结果为:

$$x = \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{A'_1 - B'_1}{A'_1 + B'_1} \right) \right] / \gamma_1 \quad (11)$$

其中:

$$A'_1 = Z_{cl} \Delta I_{r1} \cosh(\gamma_1 l) - \Delta U_{r1} \sinh(\gamma_1 l) + Z_{cl} \cdot \Delta I_{s1}$$

$$B'_1 = -Z_{cl} \Delta I_{r1} \sinh(\gamma_1 l) + \Delta U_{r1} \cosh(\gamma_1 l) - \Delta U_{s1}$$

上述算法表明,利用正序故障分量进行故障测距,只需知道线路两端正序故障分量电压、电流以及线路单位长度正序参数,而故障支路的附加阻抗和故障电动势均不涉及。方程(11)给出的算法除具有算法(10)所拥有的全部优点外,还能彻底消除负荷电流的影响,测距将因此具有很高的精度。

3 数字仿真

为验证所提测距算法的正确性,在一典型 500 kV 系统上,运用 EMTP 对基于正序分量的测距算法(简称算法 1)和基于正序故障分量的测距算法(简称算法 2)进行了大量的仿真计算。仿真模型如图 5 所示。仿真计算步骤如下:

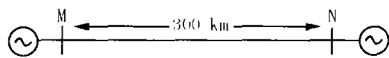
(1)根据选定的故障条件,利用 EMTP 计算出故障前、后线路两端电压电流瞬时值;

(2)以每周 12 点的抽样率对故障前一周波数据和故障后第二周波数据进行抽样;

(3)利用全周傅氏算法对抽样数据进行基波分量估计并计算故障后线路两端正序电压和电流;

(4)计算电压和电流的正序故障分量;

(5)根据测距方程求故障距离。



系统参数:

$$Z_{m1} = 1.05 + j43.18 \Omega \quad Z_{n1} = 1.06 + 44.92 \Omega$$

$$Z_{m0} = j29.09 \Omega \quad Z_{n0} = j37.47 \Omega$$

线路参数:

$$r_1 = 0.0208 \Omega/\text{km} \quad r_0 = 0.1148 \Omega/\text{km}$$

$$l_1 = 0.8984 \text{ mH}/\text{km} \quad l_0 = 2.2886 \text{ mH}/\text{km}$$

$$c_1 = 0.0129 \mu\text{F}/\text{km} \quad c_0 = 0.0052 \mu\text{F}/\text{km}$$

图 5 EMTP 仿真模型

Fig.5 EMTP simulation model

3.1 仿真结果

不同故障情况下的典型仿真结果如表 1~3 所示。表中 D 代表实际故障距离,为故障点到 M 端的线路长度; R_g 为接地电阻, R_f 为相间过渡电阻。

表 1 不同负荷情况下仿真结果

Tab.1 Simulation results under different loads
($R_g = 20 \Omega$, $R_f = 10 \Omega$, $D = 100 \text{ km}$) km

故障类型	$E_n \dot{E}_m = 0^\circ$		$E_n \dot{E}_m = 20^\circ$	
	算法 1 测距结果	算法 2 测距结果	算法 1 测距结果	算法 2 测距结果
A-G	100.66	100.45	94.55	100.47
B-G	100.30	100.43	94.79	100.49
C-G	99.75	99.56	93.98	99.37
AB-G	100.27	100.17	103.11	100.17
BC-G	100.46	100.32	102.30	100.33
CA-G	100.31	100.25	102.70	100.16
AB	100.25	100.19	103.50	100.13
BC	100.06	99.91	102.65	99.93
CA	100.09	100.08	103.32	100.02
ABC	100.07	100.02	98.53	100.02

表 2 不同故障电阻情况下仿真结果

Tab.2 Simulation results under different fault resistances
($E_n \dot{E}_m = 20^\circ$, $D = 200 \text{ km}$)

故障类型	故障电阻/ Ω	算法 1 测距 结果/km	算法 2 测距 结果/km
A-G	20	196.86	200.56
A-G	50	195.83	200.17
A-G	100	196.54	200.19
A-G	300	198.24	200.47
BC-G	5, 10	197.56	200.60
BC-G	10, 50	196.84	200.08
BC-G	50, 100	197.50	200.60
BC	10	196.38	200.01
BC	50	196.56	200.10
BC	100	196.82	200.60

表 3 不同故障点情况下仿真结果

Tab.3 Simulation results under different fault locations
($E_n \dot{E}_m = 20^\circ$, $R_g = 20 \Omega$, $R_f = 10 \Omega$) km

故障类型	实际故障 距离	算法 1 测距 结果	算法 2 测距 结果
B-G	30	24.58	29.80
B-G	150	144.96	149.73
B-G	270	265.41	270.17
AB-G	30	27.53	30.29
AB-G	150	144.10	148.44
ABC	270	267.02	269.45
AB	30	26.62	29.85
AB	150	144.92	147.94
AB	270	267.10	270.17
ABC	30	28.27	29.96
ABC	150	145.88	149.10
ABC	270	268.61	270.23

3.2 仿真结果分析

表1~3给出的仿真结果表明以下几点:

(1)在线路空载情况下发生不同类型的故障,算法1具有很高的测距精度;但在两端电势摆角为 20° 的情况下发生不同类型短路其测距精度有明显下降。这表明负荷电流对算法1的测距精度有很大影响。

(2)无论是空载还是负载情况下发生短路,算法2都具有很高的测距精度和稳定性;对于300 km的输电线路,除个别故障情况外,其绝对测距误差不超过0.6 km(对应的相对误差不超过0.2%)。这表明,算法2能完全消除负荷电流对测距精度的影响。

(3)故障类型和故障电阻对两种算法基本无影响;故障位置对两种算法略有影响,表现为在线路中点附近发生两相短路或两相短路接地故障时测距精度有所下降。

4 结论

本文以单根导线的长线方程为基础,结合故障分量的概念,提出一种基于分布参数线路模型的正序故障分量测距算法。算法利用线路两端的正序故障分量电压和电流(同步基波相量)以及线路正序参

数直接计算故障距离。算法不需故障类型判别、不受故障电阻、系统阻抗的影响,解决了负荷电流和线路模型不准确对测距精度的影响问题。EMTP仿真结果验证了该算法的高精度和稳定性。

参考文献:

- [1] Johns A T, Jamali S, Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines[J]. IEEE Proc, Vol. 137, Pt. C, No.6, Nov. 1990.
- [2] Girgis A A, Hart D G, et al. A New Fault Location Technique for Two and Three-Terminal Lines[J]. IEEE Trans on PWRD, Vol.7, No.1 Jan. 1992.
- [3] 卢继平,叶一麟.适应于任何具体结构的输电线路精确故障定位[J].电力系统自动化,1998,(11).
- [4] 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.

收稿日期: 2002-09-15

作者简介:

安艳秋(1963-),女,硕士,讲师,主要从事电路理论和数字仿真方面的研究;

高厚磊(1963-),男,博士,教授,主要从事电力系统继电保护、故障测距、同步测量等方面的研究。

An accurate fault location algorithm based on distributed parameter line model

AN Yan-qiu, GAO Hou-lei

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To remove the effect on two-terminal fault location by load current and imperfect line model, an accurate fault location algorithm based on distributed parameter line model is proposed in this paper. Basing on the wave equation of homogeneous transmission line, the fault location is directly calculated by using positive sequence fault components of voltages and currents derived at both line ends, as well as line positive sequence parameters. The algorithm does not need fault type identification, and its accuracy is not affected by fault resistance, system impedance, pre-fault load current and shunt capacitance. The EMTP based digital simulation has shown its correctness and high accuracy.

Key words: fault location; transmission lines; distributed parameter; fault component

(上接第41页)

Abstract: In this paper, from two different aspects of wavelet transformations in wavelet analysis, two wavelet networks are induced, and the constructions, models and function approximation abilities of the two wavelet networks are presented. The simulations of a ladder function approximation with the two wavelet networks are done, and the result is that the function approximation ability of the second wavelet network is better than the first. The two wavelet networks used as signal classification are discussed, and the learning models and simulation results are given in the end.

Key words: wavelet transformation; wavelet network; function approximation; signal classification