

基于不对称分布参数的同杆双回线双端故障测距算法

杨 博, 卫志农, 王华芳, 张 涛, 孙国强

(河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对同杆双回线的特点, 基于不对称的分布参数模型, 提出利用线路两端电气量的同杆双回线故障测距算法。算法不需要两端数据同步, 不需要判别故障类型, 不受系统阻抗和过渡电阻的影响。利用自适应遗传算法 (AGA) 求解故障测距方程组, 基于 Matlab 进行仿真计算, 结果证明了算法的正确性和高精度。

关键词: 同杆双回线; 分布参数; 不对称参数; 故障测距; 不同步数据

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)05-0008-04

0 引言

故障测距从所用电气量的来源可以分为单端故障测距和双端故障测距。由于单端测距只需要一端数据, 无须通讯设备和同步装置, 因此得到了极大的关注与应用。在这方面, 电力技术工作者已取得大量的研究成果^[1~3], 但是其在原理上难以克服对侧系统的系统阻抗以及过渡电阻的影响。随着通讯技术的发展, 使得双端测距得以实现。利用双端数据进行测距, 从原理上可以克服上述因素的影响。双端测距面临的主要问题是采样数据的不同步, 现在解决的方法是加设 GPS 同步装置, 但 GPS 的引入^[4]并不能保证算法的鲁棒性, 自然无法从根本上保证算法的测距精度, 因此双端不同步测距算法具有很大的应用价值。

同杆双回线的线间的耦合较为复杂, 大多采用六序对称分量法^[5,7]进行解耦分析, 这种方法只适合于对称参数输电线路。随着超高压输电线路的兴建, 为了节约线路架设费用或由于技术上的困难, 出现了不换位的长距离输电线路, 这种线路的参数不对称, 且对大地电导率以及架空地线的影响也需要给予精确考虑。因此, 这种情况下使用六序对称分量法分解得到的各序分量之间仍存在耦合。

本文采用不对称的分布参数线路模型和模量传输原理, 利用遗传算法实现同杆双回线双端不同步数据的准确测距。

1 不对称参数线路的解耦分析方法

同杆双回线的分布参数模型以电报方程为基础, 其频域表达式为:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x} [U] = [Z][I] \\ -\frac{\partial}{\partial x} [I] = [Y][U] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $[U]$ 和 $[I]$ 分别为六根导线上任一点 x 的电压、电流相量矩阵; $[Z]$ 为单位长度的线路阻抗矩阵; $[Y]$ 为单位长度的线路导纳矩阵。

解耦分析在数学上就是将 $[Z]$ 和 $[Y]$ 进行对角化。

当线路参数满足对称条件时, 即假定每回线的相间互阻抗相等; 两回线之间的相间互阻抗也相等。采用六序对称分量法可以六相线路分解成同向正、负、零序和反向正、负、零序六个相互独立的序分量。线路参数矩阵 Z 经过六序对称分量变换消除线间和相间互感形成矩阵 Z_1 形如:

$$Z_1 = \text{diag}[z_{r0}, z_{f0}, z_{r1}, z_{f1}, z_{r2}, z_{f2}]$$

矩阵 Z_1 除对角线元素非 0 外其他元素均为 0。对角线元素 z_{r1} 、 z_{f2} 、 z_{r0} 和 z_{f1} 、 z_{f2} 、 z_{f0} 分别表示同向正、负、零序和反向正、负、零序阻抗。

实际中, 由于高压输电线路结构上不换位等因素, 造成线路参数不满足对称条件。这时采用对称分量法不能使各序分量之间解耦。此时线路参数矩阵 Z 经过六序对称分量变换后得到的矩阵 Z_2 形如:

$$Z_2 = \begin{bmatrix} z_1 & & & & & \\ & z_2 & & & & \\ & & z_3 & & & \\ & & & z_4 & & \\ & & & & z_5 & \\ & & & & & z_6 \end{bmatrix}$$

在矩阵 Z_2 中 A 和 B 为非零矩阵,即说明各序分量之间不能完全解耦。同理,参数矩阵 Y 经过变换后也具有矩阵 Z 的相同特性。

用模量传输理论^[6]解决不对称参数问题,可以完全计及超高压输电线路的固有特点,不限制导线数,是一种较为精确而有效的故障稳态计算方法。模量传输法,可将一多导线线路模型转化成单一导线进行计算,正如六序分量法是把电磁能量沿输电线路的传播按所谓的同向正、负、零序和反向正、负、零序六种相对独立的“模量”进行一样,同杆双回线可化为六种独立的“模量”传播。

令 S 为电压模变换矩阵, Q 为电流模变换矩阵,式 (1) 则可变换成:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x}[U_m] = [S]^{-1}[Z][Q][I_m] \\ -\frac{\partial}{\partial x}[I_m] = [Q]^{-1}[Y][S][U_m] \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 代表模量。

电压、电流的模变换矩阵分别由矩阵积 $[Z] * [Y]$ 和 $[Y] * [Z]$ 的特征相量组成,由于 $[Z]$ 和 $[Y]$ 都是对称矩阵,所以 $[S]^{-1} = [Q]^T$, 记 $[Z_m] = [S]^{-1}[Z][Q]$ 和 $[Y_m] = [Q]^{-1}[Y][S]$ 为模量阻抗矩阵和模量导纳矩阵。式 (2) 可以改写为:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x}[U_m] = [Z_m][I_m] \\ -\frac{\partial}{\partial x}[I_m] = [Y_m][U_m] \end{cases} \quad (3)$$

对于同杆双回线,在线路参数不对称的情况下,经过模量传输原理可以转换成六根互相独立的线路。

2 双端不同步测距原理

双端测距算法在原理上消除了故障类型、过渡电阻和两端系统阻抗的影响。同杆双回线的简化系统如图 1 所示。

如图 1 所示,线路全长 l ,故障点 f 离线路始端 M 的距离为 x ,离末端 N 的距离为 $(l-x)$ 。设 U_{Mfm} 、 U_{Nfm} 分别为用线路始端电压电流表示和末端电压电流表示的故障点处电压, U_{Mm} 为线路始端电压, U_{Nm} 为线路末端电压, m 表示模量。当考虑到双端数据不同步时,设不同步角为 δ ,则由输电线路传输方程可得:

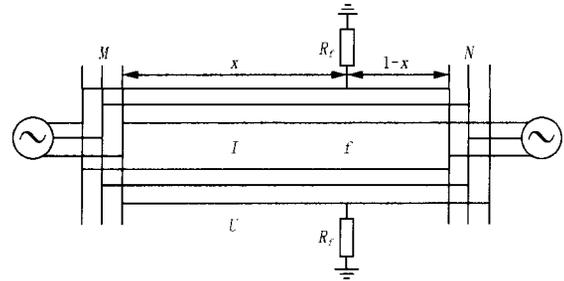


图 1 同杆双回线简化系统图

Fig 1 Simplified system of double-circuit lines on the same tower

$$\begin{cases} U_{Mfm} = (U_{Mm} \operatorname{ch}_{m} x - I_{Mm} Z_{cm} \operatorname{sh}_{m} x) e^{j\delta} \\ U_{Nfm} = U_{Nm} \operatorname{ch}_{m} (l-x) - I_{Nm} Z_{cm} \operatorname{sh}_{m} (l-x) \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 是一个非线性复数矩阵方程。对上式做如下变换:

$$\begin{cases} f_1(X) = f_1(x, \delta) = \operatorname{Re}(U_{Mf}) - \operatorname{Re}(U_{Nf}) = 0 \\ f_2(X) = f_2(x, \delta) = \operatorname{Im}(U_{Mf}) - \operatorname{Im}(U_{Nf}) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 即为双端不同步采样测距公式,是一个典型的非线性方程组,可以化为多元实值函数的极小值问题,目标函数为:

$$G(X) = \min(\|f(X)\|_2^2) = \min(f(X)^T f(X)) = \min(f_1^2(X) + f_2^2(X)) \quad (6)$$

式中: $\| \cdot \|_2$ 为向量的 2 范数。

对于式 (6) 本文构造了适应度函数为 $F = 1 / (\sqrt{f_1^2 + f_2^2} / 100 + 1)$ 的自适应遗传算法 (AGA)。自适应遗传算法能够随适应度自动改变交叉概率和变异概率,从而在保证群体多样性的同时,保证遗传算法的收敛性。

3 算例仿真

本文采用图 2 所示的仿真模型: 500 kV 电压等级双电源系统,线路全长 300 km。应用 Matlab 程序根据线路参数、模型及各种故障情况生成电压、电流数据,自定义不同步角为 30° 。仿真针对不同的故障类型、故障位置、过渡电阻等故障参数进行验证。

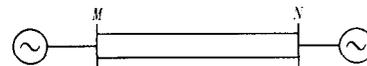


图 2 仿真系统接线

Fig 2 Connection of simulation network

500 kV 仿真线路单位阻抗矩阵、导纳矩阵为:

$$Z_0 = \begin{bmatrix} 11.475 + j47.781 & 8.809 + j22.697 & 8.392 + j19.126 & 9.488 + j20.858 & 8.757 + j19.244 & 8.368 + j17.876 \\ 8.809 + j22.697 & 10.038 + j48.956 & 7.825 + j24.256 & 8.757 + j19.244 & 8.137 + j20.088 & 7.812 + j19.974 \\ 8.392 + j19.126 & 7.825 + j24.256 & 9.406 + j49.487 & 8.368 + j17.876 & 7.812 + j19.974 & 7.524 + j21.690 \\ 9.488 + j20.858 & 8.757 + j19.244 & 8.368 + j17.876 & 11.475 + j47.781 & 8.809 + j22.697 & 8.392 + j19.126 \\ 8.757 + j19.244 & 8.137 + j20.088 & 7.812 + j19.974 & 8.809 + j22.697 & 10.038 + j48.956 & 7.825 + j24.256 \\ 8.368 + j17.876 & 7.812 + j19.974 & 7.524 + j21.690 & 8.392 + j19.126 & 7.825 + j24.256 & 9.406 + j49.487 \end{bmatrix} \times 10^{-2} \quad (\Omega/\text{km})$$

$$Y_0 = \begin{bmatrix} j0.3710 & -j0.0724 & -j0.0209 & -j0.0558 & -j0.0262 & -j0.0122 \\ -j0.0724 & j0.3776 & -j0.0762 & -j0.0262 & -j0.0270 & -j0.0213 \\ -j0.0209 & -j0.0762 & j0.3863 & -j0.0122 & j0.0213 & -j0.0343 \\ -j0.0558 & -j0.0262 & -j0.0122 & j0.3710 & -j0.0724 & -j0.0209 \\ -j0.0262 & -j0.0270 & -j0.0213 & -j0.0724 & j0.3776 & -j0.0762 \\ -j0.0122 & -j0.0213 & -j0.0343 & -j0.0209 & -j0.0762 & j0.3863 \end{bmatrix} \times 10^{-5} \quad (\text{S}/\text{km})$$

经过计算得到电压模变换矩阵 S 和电流模变换矩阵 Q 分别为：

$$S = \begin{bmatrix} 39.30 - j4.07 & 56.09 & -27.30 + j1.01 & -59.70 & 22.40 + j18.66 & -21.37 - j0.59 \\ 40.36 - j1.67 & 3.39 + j3.35 & -41.04 - j9.63 & -9.52 - j11.01 & -58.11 & 62.91 \\ 42.51 & -42.41 + j5.69 & -49.76 & 34.12 + j7.70 & 27.39 + j4.83 & -24.19 - j0.10 \\ 39.30 - j4.07 & 56.09 & -27.30 + j1.01 & -59.70 & 22.40 + j18.66 & -21.37 - j0.59 \\ 40.36 - j1.67 & 3.39 + j3.35 & -41.04 - j9.63 & -9.52 - j11.01 & -58.11 & 62.91 \\ 42.51 & -42.41 + j5.69 & -49.76 & 34.12 + j7.70 & 27.39 + j4.83 & -24.19 - j0.10 \end{bmatrix} \times 10^{-2}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 36.45 - j6.96 & 52.11 & 26.91 - j1.76 & -58.87 & -26.29 - j15.76 & -26.55 - j0.33 \\ 32.03 - j1.94 & -0.62 + j1.70 & 35.99 + j12.38 & -6.70 - j11.44 & 55.56 & 58.01 \\ 50.93 & -47.65 + j3.35i & 53.14 & 35.61 + j9.55 & -31.08 - j2.64 & -30.49 + j0.04 \\ 36.45 - j6.96 & 52.11 & 26.91 - j1.76 & -58.87 & -26.29 - j15.76 & -26.55 - j0.33 \\ 32.03 - j1.94 & -0.62 + j1.70 & 35.99 + j12.38 & -6.70 - j11.44 & 55.56 & 58.01 \\ 50.93 & -47.65 + j3.35i & 53.14 & 35.61 + j9.55 & -31.08 - j2.64 & -30.49 + j0.04 \end{bmatrix} \times 10^{-2}$$

表 1 不同故障类型不同故障点仿真结果

Tab 1 Simulation results under different fault locations and fault types

| 故障类型 | 过渡电阻 / | 实际距离 /km | 测算距离 /km | 误差 /% |
|--------|------------------|----------|-----------|---------|
| AG | 50 | 50 | 50.005 3 | 0.001 8 |
| | | 100 | 99.385 2 | 0.204 9 |
| | | 150 | 150.595 5 | 0.198 5 |
| | | 250 | 248.767 6 | 0.410 8 |
| AB | 50 | 50 | 49.874 5 | 0.375 2 |
| | | 100 | 100.208 0 | 0.069 3 |
| | | 150 | 148.824 8 | 0.391 7 |
| | | 250 | 249.764 2 | 0.078 6 |
| ABG | $R_f=10, R_g=20$ | 50 | 49.790 7 | 0.069 8 |
| | | 100 | 98.643 9 | 0.452 0 |
| | | 150 | 149.993 8 | 0.002 1 |
| | | 250 | 250.514 3 | 0.180 4 |
| ABC | 50 | 50 | 51.385 8 | 0.461 9 |
| | | 100 | 99.854 4 | 0.048 5 |
| | | 150 | 149.994 5 | 0.001 8 |
| | | 250 | 249.463 1 | 0.179 0 |
| A IAB | 50 | 50 | 51.381 2 | 0.460 4 |
| | | 100 | 98.273 4 | 0.575 5 |
| | | 150 | 150.726 8 | 0.242 3 |
| | | 250 | 249.531 1 | 0.156 3 |
| A IABG | $R_f=10, R_g=20$ | 50 | 49.890 3 | 0.036 6 |
| | | 100 | 101.102 1 | 0.367 4 |
| | | 150 | 150.090 6 | 0.030 2 |
| | | 250 | 250.525 1 | 0.175 0 |

表 1 给出了各种故障类型仿真计算结果,表 2

给出了同一故障点(故障发生在 100 km 处)不同过渡电阻的仿真计算结果。表中略去了不同步角的计算结果。由于篇幅限制本文只给出了单线故障和部分跨线故障仿真计算结果。

表 2 不同故障电阻仿真结果

Tab 2 Simulation results under different fault resistances

| 故障类型 | 过渡电阻 / | 测算距离 /km | 误差 /% |
|--------|-------------------|-----------|---------|
| AG | 20 | 99.780 9 | 0.073 0 |
| | 50 | 99.385 2 | 0.204 9 |
| | 100 | 101.587 1 | 0.529 0 |
| AB | 20 | 100.782 8 | 0.260 9 |
| | 50 | 100.208 0 | 0.069 3 |
| | 100 | 100.128 8 | 0.042 9 |
| ABG | $R_f=10, R_g=20$ | 98.643 9 | 0.452 0 |
| | $R_f=10, R_g=50$ | 98.614 1 | 0.462 0 |
| | $R_f=10, R_g=100$ | 99.865 0 | 0.045 0 |
| ABC | 20 | 101.370 2 | 0.456 7 |
| | 50 | 99.854 4 | 0.048 5 |
| | 100 | 100.240 7 | 0.080 2 |
| A IAB | 20 | 98.432 4 | 0.522 5 |
| | 50 | 98.273 4 | 0.575 5 |
| | 100 | 98.399 3 | 0.533 6 |
| A IABG | $R_f=10, R_g=20$ | 101.102 1 | 0.367 4 |
| | $R_f=10, R_g=50$ | 99.602 0 | 0.132 7 |
| | $R_f=10, R_g=100$ | 99.809 7 | 0.063 4 |

4 结论

本文提出了一种基于不同步数据的同杆双回线故障定位方法,考虑了同杆双回输电线实际结构特点,即线路参数不满足对称条件,采用了相模变换和分布参数模型。测距算法应用遗传算法求解。仿真的结果表明算法不受过渡电阻和系统阻抗的影响,具有较高的测距精度。

参考文献:

- [1] 李艳,李志民,牛春喜,等. 利用单侧信息的双回线非跨线故障的测距新算法[J]. 电站系统工程, 2000, 16(5): 301-304
LI Yan, LI Zhimin, NI Chun-xi, et al Using New Algorithm of Single Terminal for Locating the Fault Point on Double Circuit Lines[J]. Power System Engineering, 2000, 16(5): 301-304.
- [2] 哈恒旭,张保会,吕志来. 高压输电线路单端测距新原理探讨[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 42-49.
HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, LÜ Zhi-lai A Novel Principle of Single-ended Line Fault Location Technique for EHV Transmission Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 42-49.
- [3] 索南加乐,吴亚萍,宋国兵,等. 基于分布参数的同杆双回线单线故障准确测距原理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 39-43.
SUONAN Jia-le, WU Ya-ping, SONG Guo-bing, et al New Accurate Fault Location Algorithm for Parallel Lines on the Same Tower Based on Distributed Parameter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 39-43.

- [4] Lawrence D J, Cabeza L Z, Hochberg L T. Development of an Advanced Transmission Line Fault Location System, Part I: Input Transducer Analysis and Requirements[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(4): 1963-1971.
- [5] 索南加乐,葛耀中,陶惠良. 六序故障分量及其在同杆双回线中的故障特征[J]. 电力系统自动化, 1989, 13(2): 44-51.
SUONAN Jia-le, GE Yao-zhong, TAO Hui-liang Six-sequence Fault Components and Its Characteristics on Double Circuit on the Same Pole[J]. Automation of Electric Power Systems, 1989, 13(2): 44-51.
- [6] 贺家李,葛耀中. 超高压输电线故障分析与继电保护[M]. 北京:科学出版社, 1987.
HE Jia-li, GE Yao-zhong Fault Analysis and Protective Relaying for Ultra High Voltage Transmission Line[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [7] 宋国兵,索南加乐,许庆强,等. 基于双回线环流的时间域法故障定位[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 24-29.
SONG Guo-bing, SUONAN Jia-le, XU Qing-qiang, et al A Novel Time-domain Algorithm for Locating Faults on Parallel Transmission Lines by Circulating Circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 24-29.

收稿日期: 2004-07-02; 修回日期: 2004-08-27

作者简介:

杨博(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统故障分析; E-mail: obgnay@126.com

王志农(1962-),男,教授,从事电力系统运行与控制方面的教学与科研工作。

Two-terminal fault locating algorithm for double-circuit lines on the same tower based on distributed parameter model using a symmetrical parameter

YANG Bo, WEI Zhi-nong, WANG Hua-fang, ZHANG Tao, SUN Guo-qiang
(School of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to characteristics of double-circuit lines on the same tower, based on distributed parameter model using asymmetrical parameter, this paper proposes a new fault-locating algorithm for double-circuit lines on the same tower using asynchronous data of two terminals. The algorithm does not require the synchronized data of two terminals and fault type identification and eliminates the influence of fault resistance and system impedance. It can solve the fault-locating equations with AGA. The proposed algorithm is proved to be correct and accurate by simulation results of Matlab.

Key words: double-circuit lines on the same tower; distributed parameter; asymmetrical parameter; fault location; asynchronous data