

基于分布参数模型的同杆双回输电线路故障测距

商立群^{1,2}, 施 围¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西安科技大学电气与控制工程学院, 710054, 西安)

摘要: 基于线路的分布参数模型, 并且利用线路两端工频电气量和相模变换, 提出了在模域中进行故障测距的算法. 该算法不受系统阻抗和过渡电阻的影响, 并且消除了双回线间耦合的影响, 可用于单回线故障和跨线故障的测距. 该算法原理简单, 求解方便, 仿真结果表明, 算法具有较高的精度, 最大测距误差小于 0.5%, 能够满足工程要求.

关键词: 同杆双回输电线路; 故障测距; 分布参数; 相模变换

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)12-1380-04

Fault Location Algorithm for Double-Circuit Transmission Lines Based on Distributed Parameter Model

Shang Liqun^{1,2}, Shi Wei¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming at the effects of distributed capacitance on accurate fault location, a new method based on the distributed parameter model, where the two-terminal data of the transmission lines are utilized, is proposed. With the aid of phase-mode transformation, one line fault and cross line fault positions are determined in mode-domain accurately. This algorithm can be executed independently of the source impedance and fault resistance with an error less than 0.5 percent.

Keywords: double-circuit transmission line; fault location; distributed parameter; phase-mode transformation

当输电线路发生故障时, 快速准确地确定故障地点和排除故障, 对于提高供电可靠性, 减少停电时间具有重要意义. 目前, 故障测距算法可分为行波法和故障分析法^[1], 故障分析法又可分为单端法^[2-4]和双端法^[5-9]. 单端法只利用线路一侧的电压和电流值进行测距, 算法受对端系统阻抗变化和过渡电阻的影响, 对此虽然也提出了一些假设和改进算法, 但较为复杂, 无法从根本上消除原理上的误差. 随着技术的发展, 获取线路两端的信息变得容易, 运用双端电气量的双端测距算法, 原理上精度高, 不受故障类型和故障电阻的影响.

随着电力系统的发展, 同杆架设的双回输电线路越来越多地被采用. 对于同杆双回输电线路, 回路间耦合作用的存在, 以及参数沿线的分布性不能忽略, 需要采用分布参数线路模型. 现有的基于分布参数模型的故障测距算法, 仅能对单回线故障进行测距, 并且这些算法实现较为复杂. 本文基于线路的分布参数模型, 利用相模变换将耦合双回线解耦, 采用双端法在模域中利用模量对同杆双回线进行故障测距, 算法即可用于单回线故障, 也可用于跨线故障测距. 仿真结果表明, 算法具有较高的精度, 并且原理简单, 易于实现.

1 单相线路故障定位算法

采用输电线路的分布参数模型,忽略线路的电导,设 r_0 、 L_0 、 C_0 分别为导线单位长度的电阻、电感和电容,输电线路的传播系数 $\gamma = ((r_0 + j\omega L_0)j\omega C_0)^{1/2} = \beta + j\alpha$, β 为衰减常数, α 为相位常数,线路的特征阻抗 $Z_c = ((r_0 + j\omega L_0)/j\omega C_0)^{1/2}$. 图 1 为单相故障线路示意图,线路全长为 l ,距离 S 端 x 处 F 点发生故障. 线路两端的电压和电流分别为 U_S 、 U_R 、 I_S 、 I_R ,由输电线路的传输方程可得故障点 F 处的电压

$$U_F = U_S \operatorname{ch}\gamma x - I_S Z_c \operatorname{sh}\gamma x \quad (1)$$

$$U_F = U_R \operatorname{ch}\gamma(l-x) - I_R Z_c \operatorname{sh}\gamma(l-x) \quad (2)$$

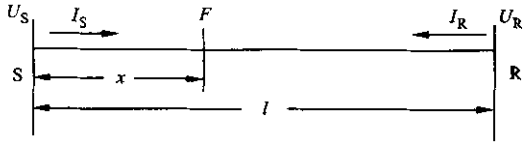


图 1 单相线路故障示意图

由式(1)和式(2)可得

$$U_S \operatorname{ch}\gamma x - I_S Z_c \operatorname{sh}\gamma x = U_R \operatorname{ch}\gamma(l-x) - I_R Z_c \operatorname{sh}\gamma(l-x) \quad (3)$$

由于 $\operatorname{ch}\gamma x = \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2}$, $\operatorname{sh}\gamma x = \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}$,代入式(3)得

$$e^{2\gamma x} [U_S - I_S Z_c - e^{-\gamma} (U_R + I_R Z_c)] = e^{\gamma} (U_R - I_R Z_c) - U_S - I_S Z_c \quad (4)$$

又因为 $\gamma = \beta + j\alpha$,由式(4)可得

$$e^{2(\beta+j\alpha)x} = \frac{e^{\gamma} (U_R - I_R Z_c) - U_S - I_S Z_c}{U_S - I_S Z_c - e^{-\gamma} (U_R + I_R Z_c)} \quad (5)$$

令

$$e^{2(\beta+j\alpha)x} = \frac{e^{\gamma} (U_R - I_R Z_c) - U_S - I_S Z_c}{U_S - I_S Z_c - e^{-\gamma} (U_R + I_R Z_c)} = A + jB$$

则有

$$e^{2\beta x} = (A^2 + B^2)^{1/2} \quad (6)$$

$$\text{和} \quad 2\alpha x = \arctg |B/A| \quad (7)$$

由式(6)和式(7),可得故障距离为

$$x = \ln(A^2 + B^2)/4\beta \quad (8)$$

或者

$$x = \frac{1}{2\alpha} \arctg |B/A| \quad (9)$$

2 同杆双回线的测距算法

对于同杆双回线路,存在回路间和相间的耦合.为了消除耦合的影响,可采用换位的方法,主要有 3

换位和 9 换位等方式^[10],不同的换位方式对双回线间的耦合有不同的影响.本文假设换位后线路为平衡线路,线路的阻抗和电容矩阵分别为

$$Z = \begin{bmatrix} z_s & z_m & z_m & z_c & z_c & z_c \\ z_m & z_s & z_m & z_c & z_c & z_c \\ z_m & z_m & z_s & z_c & z_c & z_c \\ z_c & z_c & z_c & z_s & z_m & z_m \\ z_c & z_c & z_c & z_m & z_s & z_m \\ z_c & z_c & z_c & z_m & z_m & z_s \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_s & c_m & c_m & c_c & c_c & c_c \\ c_m & c_s & c_m & c_c & c_c & c_c \\ c_m & c_m & c_s & c_c & c_c & c_c \\ c_c & c_c & c_c & c_s & c_m & c_m \\ c_c & c_c & c_c & c_m & c_s & c_m \\ c_c & c_c & c_c & c_m & c_m & c_s \end{bmatrix}$$

式中: z_s 、 z_m 和 z_c 分别为第 I、II 回路单位长度的自阻抗、互阻抗和回路间互阻抗; c_s 、 c_m 和 c_c 分别为第 I、II 回路单位长度的自电容、互电容和回路间互电容.

采用变换矩阵 P 将同杆双回线电压电流量分解为同向量和反向量^[11],I、II 回线之间实现了解耦;再分别对同向量和反向量进行卡伦鲍厄变换^[10],可将同向量和反向量解耦,化为地模和线模量.将同反量变换和卡伦鲍厄变换结合起来,可得变换矩阵

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 & -2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -2 & -2 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -2 & 2 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -2 & 2 \end{bmatrix}$$

采用变换矩阵 T ,经过相模变换后,线路阻抗和电容矩阵分别为

$$Z_n = T^{-1} Z T = \operatorname{diag}[z_s + 2z_m + 3z_c, z_s + 2z_m - 3z_c, z_s - z_m, z_s - z_m, z_s - z_m, z_s - z_m]$$

$$C_n = T^{-1} Z T = \operatorname{diag}[c_s + 2c_m + 3c_c, c_s + 2c_m - 3c_c, c_s - c_m, c_s - c_m, c_s - c_m, c_s - c_m]$$

线路两端电压、电流为

$$U_{nS} = T_u^{-1} U_S, I_{nS} = T_i^{-1} I_S$$

$$U_{nR} = T_u^{-1} U_R, I_{nR} = T_i^{-1} I_R$$

式中: U_{nS} 、 I_{nS} 、 U_{nR} 、 I_{nR} 分别为线路首末端电压、电流模量, $n=1,2,\dots,6$.对于平衡的同杆双回线,有 $T_u =$

$T_i = T$. 若三相线路为非平衡系统, 则 $T_u \neq T_i$, 需分别求出 T_u 和 T_i , 再进行相模变换^[10], 本文假设系统为平衡系统.

经过相模变换后, 双回线实现解耦, 任一模分量只与同一模量有关, 使得计算简化. 由相模变换后可见, 模量 1、3、5 和 2、4、6 分别为同向量和反向量的一个地模和两个线模量^[11, 12]. 同上节的分析, 可以得出模域中的故障测距公式为

$$x = \frac{\ln(A_n^2 + B_n^2)}{4\beta_n} \quad (10)$$

或者

$$x = \frac{1}{2\alpha_n} \arctg \left| \frac{B_n}{A_n} \right| \quad (11)$$

式中: γ_n 和 Z_{cn} 分别为模域中的传播常数和特征阻抗, $\gamma_n = \beta_n + j\alpha_n$;

$$A_n + jB_n = e^{2(\beta_n + j\alpha_n)x} =$$

$$\frac{e^{\gamma_n l} (U_{Rn} - I_{Rn} Z_{cn}) - U_{Sn} - I_{Sn} Z_{cn}}{U_{Sn} - I_{Sn} Z_{cn} - e^{-\gamma_n l} (U_{Rn} + I_{Rn} Z_{cn})}$$

故障测距也可以利用线路两端电压和电流故障分量进行测量. 设 U'_{Sn} 、 U'_{Rn} 、 I'_{Sn} 和 I'_{Rn} 分别为故障前线路两端的电压和电流模量, 则电压电流故障分量为

$$\Delta U_{Sn} = U'_{Sn} - U_{Sn}, \Delta U_{Rn} = U'_{Rn} - U_{Rn}$$

$$\Delta I_{Sn} = I'_{Sn} - I_{Sn}, \Delta I_{Rn} = I'_{Rn} - I_{Rn}$$

则有

$$A_n + jB_n = e^{2(\beta_n + j\alpha_n)x} =$$

$$\frac{e^{\gamma_n l} (\Delta U_{Rn} - \Delta I_{Rn} Z_{cn}) - \Delta U_{Sn} - \Delta I_{Sn} Z_{cn}}{\Delta U_{Sn} - \Delta I_{Sn} Z_{cn} - e^{-\gamma_n l} (\Delta U_{Rn} + \Delta I_{Rn} Z_{cn})}$$

同样可得如式(10)和式(11)的测距公式. 如果使用电压电流工频量测距, 测距精度受负荷电流的影响, 而利用故障分量测距, 则可以消除负荷电流的影响.

本文利用线路两端电压电流和线路的故障分量的模量和式(11)进行测距, 仿真发现模量 4(反向量线模)的测距误差最小, 所以采用故障分量的模量 4 进行测距.

3 仿真试验

3.1 线路模型

对本文的算法进行了仿真验证, 采用如图 2 所示的双机同杆双回线系统, 线路参数如下: 首端电源电压 $E_S = 354.178 \angle 0^\circ$ (kV), 电源正序阻抗 $Z_{S1} = (4.638 + j300.947) \Omega$, 零序阻抗 $Z_{S0} = j120.810 \Omega$; 末端等效电源电压 $E_R = 286.434 \angle -20^\circ$ (kV), 电源正序阻抗 $Z_{R1} = (4.922 + j55.374) \Omega$; 零序阻抗 $Z_{R0} = (49.221 + j166.121) \Omega$. 线路长度为 250 km.

线路参数由 EMTP 线路参数子程序计算得出, 每条线路首末端各有一组并联电抗器. 首端的额定电压为 550 kV, 容量为 120 MV·A (每相 40 MV·A); 末端的额定电压为 525 kV, 额定容量为 120 kV·A (每相 40 MV·A). 两侧的中性点小电抗 X_N 为 1 k Ω , 仿真中采样频率为 20 kHz.



图 2 仿真计算简化模型接线图

3.2 单回线故障测距

分别在距离 I 回线路首端 50 km、150 km、190 km、230 km 处设置发生各种短路故障, 利用 EMTP 仿真结果, 按式(11)进行故障测距, 结果如表 1 所示.

表 1 采用模量 4 时的单回线故障测距结果

故障类型	测距结果 x/km			
	50 km 处	150 km 处	190 km 处	230 km 处
IA 相接地	50.17	150.48	190.73	230.30
IBIC 相接地	50.29	150.76	190.73	230.23
IBIC 短路	50.43	150.35	190.75	230.52
IAIBIC 短路	50.35	149.06	190.74	230.44

3.3 跨线故障测距

对非同名相跨线故障进行了仿真试验, 故障类型取几种典型的情况, 即 I 回线 B 相-II 回线 C 相、I 回线 A 相-II 回线 BC 相、I 回线 AB 相-II 回线 BC、I 回线 A 相-II 回线 ABC 相跨线故障及跨线接地故障, 故障距离分别为距首端 50 km、150 km、190 km、230 km, 测距结果见表 2.

表 2 采用模量 4 时的跨线故障测距结果

故障类型	测距结果 x/km			
	50 km 处	150 km 处	190 km 处	230 km 处
IB-II C-G	50.23	150.42	190.28	230.30
IB-II C	50.23	150.45	190.52	230.41
IA-II BC-G	50.29	150.53	190.19	230.23
IA-II BC	50.28	150.54	190.23	230.54
IAB-II BC-G	50.19	150.24	190.23	230.52
IAB-II BC	50.28	150.57	190.46	230.46
IA-II ABC-G	50.20	150.43	190.48	230.53
IA-II ABC	50.31	150.34	190.36	230.44

3.4 过渡电阻对测距结果的影响

接地电阻 R 分别取 0Ω 、 25Ω 、 50Ω 、 100Ω 时,进行了仿真计算,限于篇幅,仅列出故障发生在距离 I 回线路首端 150 km 时的测距结果,如表 3 所示。可见,测距结果不受接地电阻的影响。

表 3 接地电阻对测距结果的影响

故障类型	测距结果 x/km			
	$R=0 \Omega$	$R=25 \Omega$	$R=50 \Omega$	$R=100 \Omega$
IA 相接地	150.14	150.32	150.25	150.41
IBIC 相接地	150.32	150.43	150.63	150.33
IBIC 短路	150.23	150.54	150.33	150.71
IAIBIC 短路	150.42	149.67	150.61	150.80

从表 1~表 3 的仿真结果可见,在各种故障情况下,所计算的故障位置均比较准确,满足了超高压同杆双回线故障测距的要求。

4 结 论

本算法将同杆双回线各参数进行相模变换,使得任一模分量只与同一模量有关,消除了回路间耦合的影响。利用模量进行故障测距,原理简单,求解方便。利用线路两端数据进行测距,克服了过渡电阻对测距精度的影响。所提出的方法可用于单回线故障测距,也可用于跨线故障测距。仿真结果表明,该算法具有较高的精度。

参考文献:

- [1] 全玉生,杨敏中,王晓蓉,等. 高压架空输电线路的故障测距方法[J]. 电网技术, 2000,24(4):27-33.

- [2] 索南加乐,吴亚萍,宋国兵,等. 基于分布参数模型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.
- [3] Kawady T, Stenzel J. A practical fault location approach for double circuit transmission lines using single end data [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003,18(4): 1 166-1 173.
- [4] Ha H, Zhang B, Lv Z, A novel principle of single-end fault location technique for EHV transmission lines [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18 (4): 1 147-1 151.
- [5] 陈 铮,苏进喜,吴欣荣,等. 基于分布参数模型的高压输电线路故障测距算法[J]. 电网技术, 2000, 24 (11):31-33.
- [6] 索南加乐,宋国兵,许庆强,等. 利用两端非同步电流的同杆双回线故障定位研究[J]. 电工技术学报, 2004,19(8): 99-106.
- [7] 宋国兵,索南加乐,许庆强,等. 基于双回线环流的时域法故障定位[J]. 中国电机工程学报, 2004,24(3):24-29.
- [8] 黄 雄,尹项根,辛振涛,等. 基于分布参数模型的平行双回线故障测距新算法[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(11): 5-9.
- [9] 束洪春,高 峰,葛耀中. 耦合双回输电线路故障测距方法研究[J]. 电工技术学报, 1999,14(6): 59-64.
- [10] 施 围. 电力系统过电压计算 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1988.
- [11] 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.
- [12] 吴维韩,张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京:科学出版社, 1989.

(编辑 杜秀杰)

【文摘预登】

一种适合 JPEG2000 编码的动态感兴趣区域提取算法

王 飞, 郑南宁, 刘跃虎, 刘晓东

(西安交通大学人工智能与机器人研究所, 710049, 西安)

在分析了 JPEG2000 感兴趣区域(ROI)编码标准的基础上,提出了一种基于形态学的动态 JPEG2000 的 ROI 提取方法。利用形态滤波器组与分水岭分割算法将 LL_n 小波子带图像划分为若干闭合区域,再利用区域纹理特征来判定 LL_n 小波子带图像的 ROI 以及生成 LL_n 子带的二值模板,最后依据离散小波变换结构以及坐标映射原理,动态生成全部子带的二进制 ROI 模板。在 JPEG2000 压缩软件中的应用结果证明,所提方法克服了目前 ROI 编码必须人工参与的缺陷,利用它可根据图像内容自动生成 ROI 编码图像,大大提高了批量 ROI 编码的效率。该方法同时还支持任意形状的图像,并与国际 JPEG2000 标准兼容。