

改进二分搜索算法在故障测距中的应用*

黄飞腾, 陈明军*

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 针对故障测距中搜索法的伪根、不收敛和低精度等问题, 将方向监测法应用到二分搜索故障测距中。开展了伪根原因和二分搜索的分析, 建立了避开伪根与搜索方向之间的关系; 提出了能对查找方向监测并修正的二分搜索改进算法, 以保证收敛, 并通过数据处理环节提高了测距精度; 在 Matlab 仿真系统中, 对改进算法的测距性能进行了评价, 进行了避开伪根和测距精度的试验。仿真结果表明, 该算法对全线范围有效, 能避开伪根, 保证收敛而且测距精度高; 此外, 该改进算法不受过渡电阻、故障类型和故障距离等影响。

关键词: 故障测距; 二分搜索算法; 伪根; 方向监测; 收敛

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)07-0833-04

Improved dichotomy iteration algorithm for fault location

HUANG Fei-teng, CHEN Ming-jun

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at pseudo-roots and non-convergence and low precision of iteration algorithm for fault location, the monitoring of direction method in dichotomy iteration was investigated. After the analysis of dichotomy iteration and causes of pseudo roots, the relationship of avoiding pseudo roots method and iteration direction was established. An improved dichotomy iteration algorithm was presented to ensure convergence and improve the accuracy by the data processing target, with the monitoring and correcting of direction. The performance of improved algorithm was evaluated on the Matlab simulation system, the avoiding pseudo roots method and fault location accuracy were tested. The simulation results indicate that, this algorithm is effective on the entire range of transmission line, can ensure convergence and it has high precision. Moreover, the results show that the fault resistance and the fault styles and the fault distance have little influence on this algorithm.

Key words: fault location; dichotomy iteration algorithm; pseudo root; monitoring of direction; convergence

0 引 言

输电线路是现代电力系统的重要组成部分, 输电线路发生故障的情形在电网事故中占有较高的比重。准确的故障测距可加快故障线路检修和恢复供电, 因而对减少停电造成的经济损失和社会影响, 具有重要意义^[1]。

现有的故障测距方法可以分为故障分析法和行波法两大类, 都具有很好的研究和应用前景。两者在原理上差别较大, 故障分析法是短路电流的逆运算, 而行

波法是利用行波传输理论测距^[2]。在资源利用方面, 故障分析法可以充分利用现今投运的微机保护、滤波装置等, 硬件投资小。行波法则需要专用设备, 硬件投入大, 技术复杂。故障分析法又分为单端法和双端法, 双端法是根据线路两端的工频量和必要的系统参数, 经过化简得到测距方程, 解出故障距离的方法, 双端算法已成为国内外故障测距领域的研究热点^[3]。

二分搜索法是解决双端测距算法复杂计算的一种有效途径。但精确的故障测距在用搜索法查找沿线电压交点时, 存在伪根和不收敛等情况。

收稿日期: 2011-12-27

基金项目: 浙江工业大学 2011 年校级自然科学基金资助项目(2011XY013); 浙江工业大学 2011 年校级自然科学基金资助项目(2011XZ003)

作者简介: 黄飞腾(1984-), 男, 浙江温州人, 主要从事电力系统保护及控制方面的研究。E-mail: hfthhftp@163.com

通信联系人: 陈明军, 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: hfthhftp@163.com

为解决伪根和不收敛问题,本研究提出一种能对查找方向监测并修正的二分搜索改进算法,以解决伪根、不收敛等问题,并且通过分别对沿线电压的模、实部和虚部 3 对曲线分别查找测距,通过误差分析和数据处理,提高了测距精度。

1 二分搜索与伪根分析

二分搜索法是指利用两条曲线的单调性,通过判断查找点的大小以确定搜索方向,用二分的方法取下次迭代值,使搜索点以 2^{-n} 快速向目标点或交点收敛^[4]。二分搜索算法适用于简单的集中参数模型测距,具有直观、简便的特点。但对于更为精确的分布参数模型,电压曲线只是在一定范围内单调,甚至存在伪根等情况,此时直接用二分搜索法进行故障测距存在死区,或者会查找到错误的故障点。

已知分布参数线路 1、2 点均匀长线方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma x & -Z_c \sinh \gamma x \\ -\sinh(\gamma x)/Z_c & \cosh \gamma x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

运用式(1),可根据任一端电压和电流数据计算出沿线路任意点的电压和电流^[5],得到分布参数模型线路上的电压方程:

$$\dot{U}_{XM} = \dot{U}_M \cosh \gamma x - \dot{I}_M Z_c \sinh \gamma x \quad (2)$$

$$\dot{U}_{XN} = [\dot{U}_N \cosh \gamma (l - x) + \dot{I}_N Z_c \sinh \gamma (l - x)] e^{j\delta} \quad (3)$$

式中: \dot{U}_{XM} , \dot{U}_{XN} 根据线路两端母线 M、N 端电气量计算的沿线任意计算点 F 点的电压; x —计算点到 M 端的距离; Z_c —线路的特性阻抗; γ —传播常数; δ —不同步角。

本研究考虑线路作集中参数近似,经过该假设后简化电压方程,可得线路电压趋势如图 1 所示,在一定程度上也能反映出分布参数情况下的电压走势。

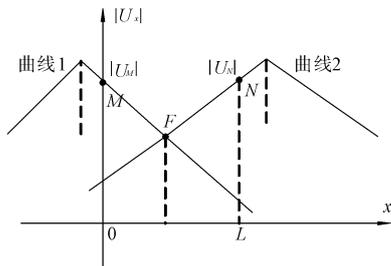


图 1 两端电源系统故障电压分布

本研究进一步考虑伪根存在的情况,伪根分析如图 2 所示^[6]。

由图 2 可见,当故障点靠近母线,曲线 1 电压下降

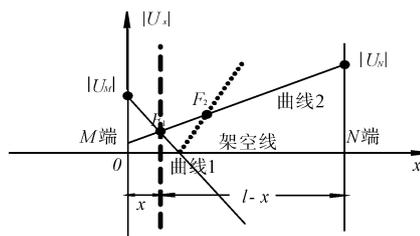


图 2 伪根分析

很快,超过横轴时取模求解,会得到负平面的镜像曲线,如图 2 中虚线部分,并与曲线 2 产生新的交点 F_2 。因此 F_1 为实际故障点, F_2 则是负平面镜像产生的伪根,直接用二分搜寻法查找故障点存在伪根和不收敛等情况。

2 二分搜索改进算法

2.1 改进方案

本研究通过分析伪根情况,提出了二分搜索改进算法,该算法监测查找方向,当其不符合设定时进行方向修正。改进后的算法从查找原理上排出伪根,使其收敛于正确的唯一解,并且通过对电压的模、实部和虚部 3 对曲线分别查找测距,将三者测距结果进行误差分析,在误差小于设定误差值时,才作为有效交点,然后通过有效交点求算术平均值来提高测距精度。

2.2 改进算法思路和流程

通过以上分析,本研究可判断电压模量曲线上正 V 形交点为真实故障点,改进思路为:给二分搜索过程中加上小范围 ε (仿真时取设定最小精度的 1/2,即 $2^{-(k_n+1)}L$) 内单调性判定,修正方向一直向 V 形交点收敛,避开伪根。

算法步骤如下:

(1) 设置初始值 $x_1 = 0, x_2 = L, x_3 = (x_1 + x_2)/2$ 。

(2) 由 M、N 分别按电压推算式(2,3)计算并比较混合线路上 x_3 点和 $x_3 + \varepsilon$ 点的电压模量,以判断出小范围的单调性。

(3) 向 V 形交点方向搜索迭代的判定如下:

$|\dot{U}_{XM}| \geq |\dot{U}_{XN}|$ 且 $|\dot{U}_{XM}|$ 小范围递减, 或者 $|\dot{U}_{XM}| < |\dot{U}_{XN}|$ 且 $|\dot{U}_{XN}|$ 小范围递减, 则向 N 端方向二分;

$|\dot{U}_{XM}| \geq |\dot{U}_{XN}|$ 且 $|\dot{U}_{XM}|$ 小范围递增, 或者 $|\dot{U}_{XM}| < |\dot{U}_{XN}|$ 且 $|\dot{U}_{XN}|$ 小范围递增, 则向 M 端方向二分。

(4) 循环迭代,直到搜索单位达到设定的精度,输出搜索结果。

(5)将查找内容扩展,把上述电压的取模改为分别求实部、虚部。按同样的方法求出搜索结果。将三者搜索结果中误差过大者排除,再按算术平均值求出测距结果 x 。

本研究由改进算法的思路和步骤绘出的流程图如图 3 所示。

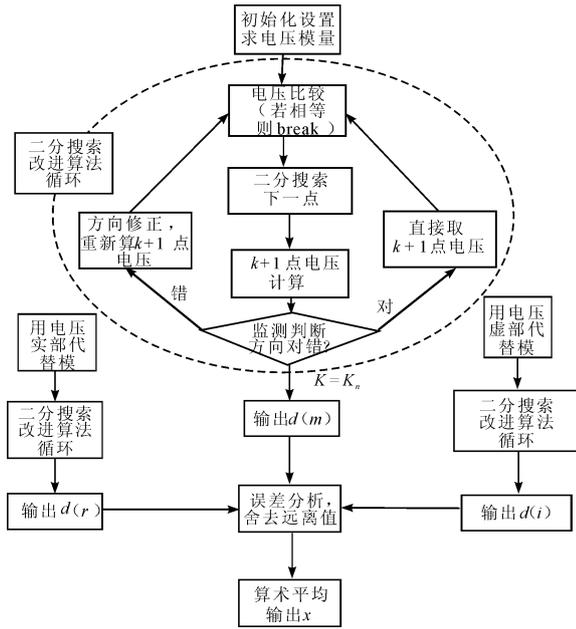


图 3 算法流程

3 测距算法的仿真

Matlab 仿真系统如图 4 所示。

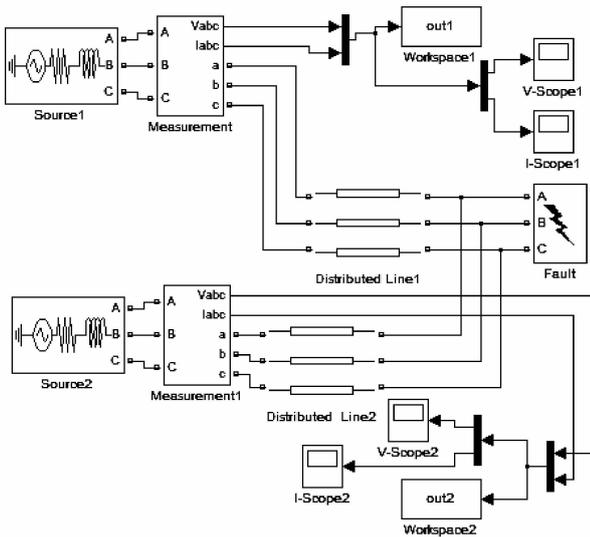


图 4 仿真系统模型

在图 4 中:两侧为三相电源,母线处设置了测量单元作为故障录波器。输电线路为均匀换位分布参数三相线路模型。故障单元可设置故障类型,而故障位置

由调解两个三相输电线路单元的长度参数来决定。该模型可仿真电力系统实际运行中输电线路常见的包括单相接地短路、两相接地短路、三相接地短路、两相相间短路等故障类型。双端数据滤波使用文献[7]中的差分傅氏滤波改进算法。

仿真系统参数:电压等级为 220 kV,50 Hz;

系统阻抗:

$$Z_{m1} = 0.95 + j36.50 \Omega, Z_{n1} = 1.15 + j42.20 \Omega,$$

$$Z_{m0} = j24.25 \Omega, Z_{n0} = j34.27 \Omega.$$

N 端初始相角超前 M 端 10° , 线路长度 300 km;

线路分布参数:

$$r_1 = 0.022 \Omega/\text{km}, r_0 = 0.115 \Omega/\text{km}, l_1 = 0.095 \text{ mH}/\text{km}, l_0 = 2.35 \text{ mH}/\text{km}, c_1 = 0.0140 \mu\text{F}/\text{km}, c_0 = 0.0060 \mu\text{F}/\text{km}.$$

本研究采用 Matlab 仿真,由两端数据求沿线电压模量曲线,取故障距离为 120 km 和 280 km。普通故障位置(120 km 处)电压曲线如图 5(a)所示,其变化趋势与图 1 相符;当故障点临近 N 端母线(280 km 处),其趋势如图 5(b)所示,与图 2 相符,出现两个交点的情况,此时采用普通的搜索法将会出现伪根、不收敛等问题。再用 Matlab 仿真 120 km 处故障时沿线电压的实部、虚部变化趋势,如图 5(c)、5(d)所示。

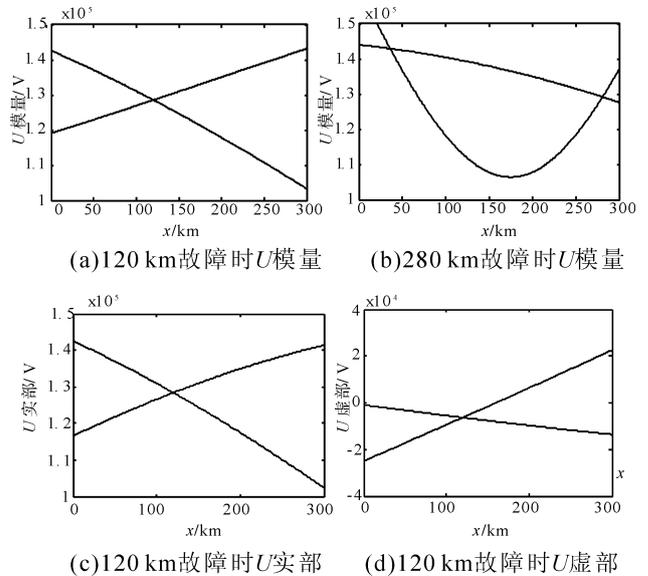


图 5 沿线电压模量、实部和虚部曲线

本研究将图 5(c)、5(d)与图 5(a)比较,它们的曲线在故障点位置都有对应的曲线交点,表明由双端数据分别推算出的沿线电压在故障点位置的电压模量相等,且实部和虚部也相等。

本研究选取不同故障点、不同故障类型等 6 种情况对改进前后算法进行仿真比较,比较结果如表 1 所示。相比改进前后的测距结果,改进前算法会出现伪

根或不收敛,而改进后算法的测距结果精度较高,且能避开死区,收敛于唯一正确的解。

表 1 改进前后比较

	单相接地		两相接地		三相接地	
	280 km		280 km		280 km	
	结果	误差	结果	误差	结果	误差
	/km	/(%)	/km	/(%)	/km	/(%)
改进后	281.044	0.348	278.323	0.558	281.674	0.558
改进前	293.354	4.451	292.192	4.064	不收敛	/
	单相接地故障		两相接地故障		三相接地故障	
	FM = 290 km		FM = 80 km		FM = 5 km	
	结果	误差	结果	误差	结果	误差
	/km	/(%)	/km	/(%)	/km	/(%)
改进后	291.623	0.541	80.239	0.079	6.604	0.533
改进前	不收敛	/	76.238	1.253	25.165	伪根

为了检验改进算法是否能够有效、准确地测距,本研究需检验不同过渡电阻、故障类型和故障位置对其测距精度的影响。仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同过渡电阻、故障类型

R_g/Ω	单相接地/km	两相接地/km	两相相间/km	三相接地/km
50	79.631	78.058	79.995	80.974
80	79.676	78.148	80.176	80.490
100	79.714	80.225	80.188	80.513
200	79.622	79.366	80.176	80.251
300	79.351 0	79.511 3	80.303 2	80.786 9

由表 2 可知,改进算法对各种故障类型的精度都很高,大多数测距结果的相对误差在 0.5% 左右。对于不同的过渡电阻,测距精度受到的影响也很小,从而验证了改进算法几乎不受过渡电阻和故障类型的影响,且具有很高的测距精度。

为进一步验证测距改进算法是否对全线范围有效,以单相接地为例,故障距离从 0 ~ L 变化,所得到的测距结果如表 3 所示。

表 3 不同故障点时的测距结果

故障/km	结果/km	故障/km	结果/km
1	0.01	180	180.93
20	20.48	200	200.78
40	39.64	230	230.73
80	79.67	260	260.66
120	119.38	280	278.79
150	149.81	299	299.99

本研究根据表 3 计算不同故障点时的相对误差,用虚线连接相邻误差点,可得如图 6 所示的测距误差曲线。

由表 3 和图 6 可以得出,故障测距改进算法在全线范围内都有效,并未出现伪根,而且所有数据都收敛

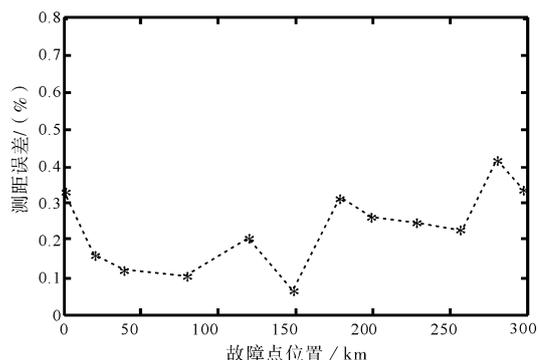


图 6 故障距离与测距精度

于正确的唯一解,相对精度都小于 0.5%,研究结果表明该算法具有很高的测距精度。

4 结束语

故障测距中采用分布参数模型可以提高故障测距精度,但由于存在伪根、不收敛和精度等问题,仍需得到解决和改善。本研究对故障线路电压趋势以及其在伪根情况进行了分析,提出了能对查找方向监测并修正的二分搜索改进算法,解决了伪根、不收敛等问题,并且通过对电压的模、实部和虚部分别查找测距,然后进行误差分析和数据处理,提高了测距精度。Matlab 仿真结果表明,本研究提出的二分搜索改进算法不受过渡电阻、故障类型和故障位置的影响;对全线范围有效,能够排除伪根,保证收敛而且测距精度高。该故障测距算法快速准确,对于加快故障线路检修、及时恢复供电和减少停电损失都有一定的理论研究意义和工程实用价值。

参考文献 (References):

- [1] GIRGIS A A, HART D G, PETERSON W L. A new fault location technique for two and three terminal lines [J]. *Transactions on Power Delivery*, 1992, 7(1): 98-107.
- [2] 张晓明, 徐岩, 王瑜, 等. 一种基于参数检测的双端故障测距算法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(12): 106-111.
- [3] 陈明军, 尤中璞, 黄飞腾. 故障测距中的参数误差归算修正算法 [J]. *机电工程*, 2010, 27(4): 104-107.
- [4] 李强, 王银乐. 高压输电线路的故障测距方法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37(23): 192-197.
- [5] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [6] 丁士长, 宋国兵. 高压输电线路双端故障测距新算法 [J]. *江苏电机工程*, 2010, 29(4): 16-19.
- [7] 黄飞腾, 陈明军, 郑慧. 故障测距中的差分傅氏滤波改进算法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37(11): 62-65.

[编辑:李 辉]