

# 架空线-高压电缆混合线路故障测距改进算法

陈明军, 陈益平, 连新凯

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 为了提高架空线-高压电缆混合线路故障测距的精度, 并解决测距的伪根问题, 提出了一种混合线路的双端不同步数据故障测距改进算法。基于分布参数混合线路模型, 分析了测距中伪根的产生原因, 通过对二分搜寻法改进来避开伪根, 通过改进算法测出故障位置, 并将测距结果与自动重合闸技术配合, 从而提高了电力系统的安全可靠性。Matlab 仿真结果表明, 该测距算法不受伪根、过渡电阻、故障类型和位置以及不同步采样角等条件的影响, 能够快速、精确地实现故障测距。

**关键词:** 故障测距; 混合线路; 伪根; 重合闸

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)09-1132-04

## Improved algorithm of fault location on overhead power line and high voltage cable hybrid line

CHEN Ming-jun, CHEN Yi-ping, LIAN Xin-kai

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

**Abstract:** In order to improve the accuracy of fault location on overhead power line and high voltage cable hybrid, and solve the problem of pseudo roots, an improved algorithm of fault location on hybrid line by two-terminal asynchronous information was proposed. Based on distributed parameter hybrid line model, the cause of pseudo roots in the fault location was analyzed, binary search to avoid pseudo roots was improved, the improved algorithm was used to locate fault, and the results and auto-reclosing technology were cooperated. Accordingly, the safety and reliability of the power system were improved. Matlab simulation results show that the fault location algorithm does not be affected of pseudo roots, transition resistance, fault type, fault position and asynchronous angle, and it shows that the fault location algorithm is fast and accurate.

**Key words:** fault location; hybrid line; pseudo roots; reclosing

## 0 引言

现代电力系统中为减少用地和美化环境, 埋地电缆发展迅速。在原有输电线路的基础上, 架空线路—高压电缆混合线路的应用越来越广泛。架空线路受外部环境的影响会发生短路故障; 电缆输电线相对架空线故障发生率大大降低, 但由于绝缘老化、制造工艺等问题, 也会引起接地故障。准确的故障测距能减轻巡线工作, 加快恢复供电, 减少停电损失和负面影响, 提高供电可靠性<sup>[1]</sup>。

国内外关于单独架空线路或电缆的故障测距的研

究较多, 主要分为行波法和阻抗法两大类; 阻抗法又分为单端法和双端法。而关于混合线路的研究较少, 架空线-电缆混合线路对阻抗分析法而言不再是均匀传输线, 对行波法而言波阻抗差异导致波速不一致。文献[2]提出了一种基于分布参数模型的混合线路测距方法, 通过推算结合点电压判定故障在架空线路还是在电缆, 简化为单独线路的测距。但该方法在出现伪根时, 将出现误判。文献[3]提出了一种基于双端故障录波信息的混合线路测距方法, 分段递推算出电气量分布, 通过全局搜索测出故障位置, 用最小值法排除伪根。该方法存在的问题是计算量大、时间慢、无法为混合线路提供在线的快速决策。文献[4]提出了一种

收稿日期: 2011-02-28

作者简介: 陈明军(1962-), 男, 浙江嵊州人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统保护及控制、智能电气及自动控制系统方面的研究。  
E-mail: cmj@ejut.edu.cn

基于分布参数模型的区段故障定位法,实现简单,但忽略了伪根问题,有一定局限性。

本研究提出一种基于双端不同步数据的架空线-高压电缆混合线路故障测距算法。采用分布参数模型,分析故障时沿线电气量规律及伪根产生原因,用改进二分搜寻法避开伪根,快速地计算出故障点,并应用于自动重合闸。

### 1 沿线电气量与伪根分析

分布参数模型线路上1、2两点的均匀长线方程<sup>[5]</sup>为:

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

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。如果存在不同步角 $\delta$ ,则须在公式的左侧乘上 $e^{j\delta}$ 。

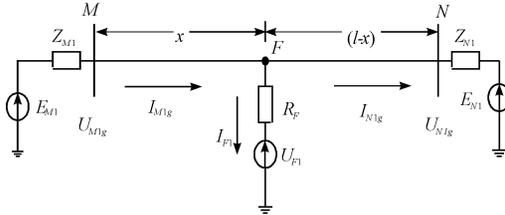


图1 双端电源系统故障正序网

双端电源系统故障正序网如图1所示。由图1,并按分布参数模型的均匀输电线路方程得:

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

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

式(2,3)中: $\dot{U}_{XM}$ 、 $\dot{U}_{XN}$ —根据M、N端电气量计算的沿线任意X点电压,x—计算点到M端的距离, $Z_c$ —线路的特性阻抗, $\gamma$ —传播常数, $\delta$ —不同步角。

由该两式可得均匀长线路电压趋势如图2所示,图中超出线路长度部分为虚拟的沿线电压趋势。

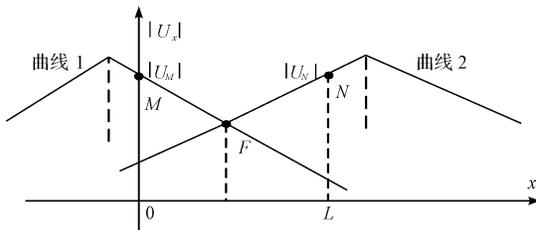


图2 均匀线路双端电源系统故障时沿线电压分布

本研究进一步考虑伪根存在的情况,并考虑架空线-电缆混合线路为非均匀长输电线。电缆正序阻抗通常比架空线小,斜率发生变化,混合线路双端电源故障时沿线电压分布如图3所示。

图3中:J为混合线路的结合点处。沿线电压有

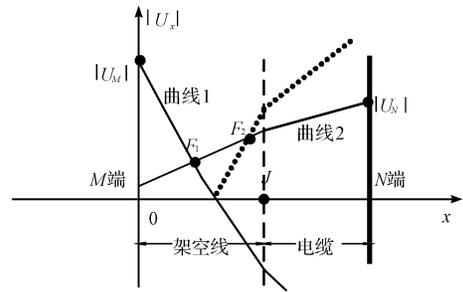


图3 混合线路双端电源故障时沿线电压分布

两个交点, $F_1$ 为故障点, $F_2$ 则是求电压模解时,负平面镜像产生的伪根。该情况下,文献[2]判定结合点J电压大小的方法会误判;直接用二分搜寻法查找故障时存在死区和伪根。

### 2 故障测距算法

本研究通过上述方法分析分布参数模型混合线路故障时沿线电气量及伪根产生原因,提出了一种用改进二分搜寻法避开伪根、快速准确地实现混合线路故障测距的算法。

故障后两端数据除了基波外,还含有大量的谐波和衰减直流分量。本研究采用文献[6]提出的差分傅氏改进滤波算法(快速且有较高精度),滤出基波分量;再通过三相对称分量法进行相模变化得到正序分量。

本研究使用故障前1个周期的采用数据,利用双端推算J点的电压模相等原理,计算出不同步角度。

本研究将故障后第2个周期采用数据的正序分量应用于混合线路测距算法,得电压推算过程:由M端推算距离小于等于J的电压直接根据式(2)推算沿线电压;超出距离J时,先根据式(2)推算J点电压,再根据式(4)和电缆线路参数推算。N端根据式(3,5)类似推算。

$$\dot{U}_{XM} = \dot{U}_{JM} \cosh \gamma_2(x-J) - \dot{I}_{JM} Z_{c2} \sinh \gamma_2(x-J) \quad (4)$$

$$\dot{U}_{XN} = [\dot{U}_{JN} \cosh \gamma_1(J-x) + \dot{I}_{JN} Z_{c1} \sinh \gamma_1(J-x)] e^{j\delta} \quad (5)$$

然后本研究给二分法查找过程中加上小范围 $\varepsilon$ 区间内单调性判定,快速逼近V形交点(真实故障点),使搜索避开伪根。

改进二分查找过程和判据:

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

(2) 比较 $x_3, (x_3+\varepsilon)$ 与J的大小。

(3) 由M、N分别按上述电压推算过程计算出混合线路上 $x_3$ 点和 $x_3+\varepsilon$ 点的电压模量,并判断小范围的单调性。

(4) 向V形交点方向查找的判定如下:

$|U_{XM}| \geq |U_{XN}|$ ,且 $|U_{XM}|$ 递减,或者 $|U_{XM}| < |U_{XN}|$ ,且 $|U_{XN}|$ 递减,则令下一查找点向N端方向二分;

$|U_{XM}| \geq |U_{XN}|$ ,且 $|U_{XM}|$ 递增,或者 $|U_{XM}| < |U_{XN}|$ ,

且  $|U_{xN}|$  递增, 则令下一查找点向  $M$  端方向二分。

(5) 循环迭代, 直到搜索单位达到设定的精度。输出测距结果, 并判定故障点的传输介质, 用于重合闸配合。

测距算法流程如图 4 所示。



图 4 改进测距算法流程

该测距算法能适用于架空线 - 混合线路全线范围内故障的测距, 以及从查找原理上排除伪根, 快速收敛于正确的唯一解。

### 3 故障测距与重合闸的配合

自动重合闸装置的作用是在线路故障时尽可能减少停电范围, 在瞬时性故障时能重合闸以成功恢复供电, 在永久性故障时不多次重合闸, 防止冲击电流的危害。针对在具有断路器条件下的架空线-高压电缆线路, 如果用电设备允许且没有备用电源自动投入时, 一般都应装设自动重合闸装置。

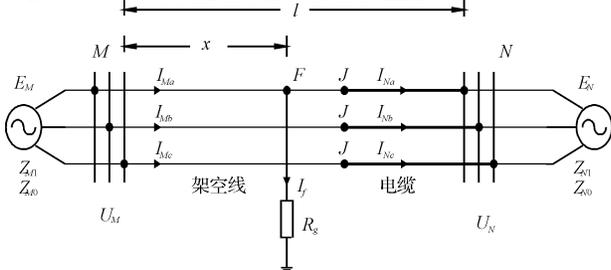
根据本研究提出的测距算法, 可以快速、准确地计算出混合输电线路故障点的位置, 并判定出传输介质。将测距结果应用于重合闸的策略包括:

(1) 如果测距结果表明故障发生在架空线部分, 瞬时性故障的可能性较大, 在保护动作跳闸后, 故障点的电弧可能熄灭并恢复了绝缘强度, 此时进行重合闸能成功恢复供电。

(2) 如果测距结果表明故障发生在电缆部分, 永久性故障的可能性很大。电缆线路由于制造工艺、绝缘老化等造成接地故障时, 即使在跳闸后, 故障点绝缘强度仍无法恢复, 此时重合闸不但不能恢复供电, 而且将再次产生短路冲击电流, 引起系统振荡。此时采用不进行重合闸的策略。

### 4 仿真验证

双端供电混合线路系统如图 5 所示,  $M$ 、 $N$  为双端母线,  $F$  为故障点,  $l$  为线路总长,  $x$  为故障点距离,  $R_g$  为过渡电阻,  $J$  为混合线路结合位置。



本研究设置采样频率 2 kHz,用差分傅氏改进滤波算法进行数据处理,结果如图 8 所示,即滤波后的 M 端 A 相数据。

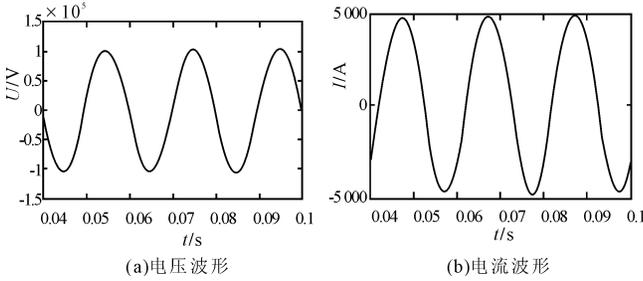


图 8 滤波后 M 端 A 相电压、电流波形

为了验证混合线路伪根存在的情况,本研究根据 25 km 处两相短路故障时仿真数据推算的沿线电压模值趋势,如图 9 所示,验证了伪根的存在。

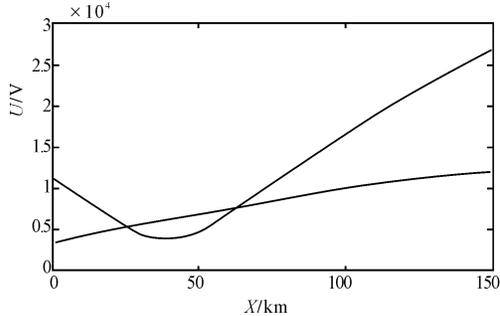


图 9 混合线路故障时沿线电压分布仿真图

本研究根据测距算法编程,循环次数设置为 17 次,则搜索最小单位近似为 0.001 1 km,计算量相对全局搜索法大大减少。加载不同故障位置、故障类型、不同同步角度时仿真双端数据,测距结果如表 1 所示。

表 1 单相接地故障不同位置、过渡电阻时的测距结果

故障位置 /km	过渡电阻 /Ω	测距值 /km	误差/(%)	介质
15	10	15.532 3	0.35	架空线
	50	15.486 0	0.32	架空线
	150	15.219 2	0.15	架空线
65	10	65.686 2	0.46	架空线
	50	65.987 1	0.66	架空线
	150	65.833 6	0.55	架空线
105	10	105.998 9	0.67	电缆
	50	104.532 8	0.31	电缆
	150	106.114 7	0.74	电缆
135	10	135.205 9	0.14	电缆
	50	136.394 3	0.93	电缆
	150	136.307 0	0.87	电缆

表 1 的仿真数据验证了测距算法在不同故障位置及不同过渡电阻的情况下,都具有较高精度,能迅速有效地测出故障距离,并根据测距结果准确地判断出故障处的传输介质,用于自动重合闸策略。

表 2 不同故障类型、不同同步角度时的测距结果 (故障位置 75 km 时,测距结果单位:km)

不同同步角	30°	90°	150°	210°	270°
单相接地	74.331 8	75.327 6	75.721 4	75.762 2	73.962 2
相对误差	0.45%	0.22%	0.48%	0.51%	0.69%
两相接地	76.058 2	75.142 2	74.282 5	73.836 6	75.236 6
相对误差	0.71%	0.09%	0.48%	0.78%	0.16%
两相相间	76.297 1	76.017 6	75.488 0	74.817 6	75.176 2
相对误差	0.86%	0.68%	0.33%	0.12%	0.12%
三相接地	75.974 3	75.949 0	75.551 3	74.325 1	75.225 1
相对误差	0.65%	0.63%	0.37%	0.45%	0.15%

仿真数据如表 2 所示,验证了测距算法对混合输电线路的 4 种故障类型的精度都很高;用故障前数据计算不同同步角度,能有效解决故障录波的不同步问题。

仿真结果的相对误差在 1% 以内,没有出现较大失误测距点,验证了测距算法,能避开伪根,快速收敛于唯一正确的解,验证了测距算法不受过渡电阻、故障位置、不同同步角度和故障类型的影响。

## 5 结束语

本研究分析了架空线-电缆混合输电线路的故障测距的沿线电压分布和伪根产生原因,提出了一种基于双端不同步数据的架空线-高压电缆混合线路故障测距算法,采用了能提高故障测距精度的分布参数模型,通过分析故障时沿线电压分布和伪根,提出了改进二分搜寻法避开伪根,快速地计算出故障点,并应用于自动重合闸策略。Matlab 仿真表明,本研究提出的测距算法不受伪根、过渡电阻、故障类型和位置、不同同步角度等条件的影 响,测距算法计算量少且精度较高。

研究结果表明,该研究能实现快速、精确地故障测距,从而减轻巡线工作,加快恢复供电,提高电力系统供电可靠性,具有一定的研究意义和实用价值。

## 参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 陈 宾, 陈 皓, 刘 伟. 基于分布参数模型的混合线路故障测距和重合闸的研究[J]. 四川电力技术, 2010, 33(2): 42-44, 63.
- [3] 杨 军, 伍咏红, 江文波. 基于双端故障信息的高压电缆-架空线混合线路故障测距方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 208-212.
- [4] 吴承恩, 邵能灵, 郁惟铺. 超高压电缆-架空线混合线路故障测寻方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 26-30.
- [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] 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]