

一种高压输电线路双端故障测距的实用算法的实现

孙 莉

(河南公安高等专科学校, 河南 郑州 450002)

摘要: 提出了双端故障测距的实用化方法, 利用相模变换矩阵将不对称的三相线路解耦为完全独立的模量, 选择合适的模量绝对值实现测距。鉴于保护装置的计算局限性, 为使测距算法实用化, 首先考虑了双曲函数的泰勒逼近, 以及波阻抗和传播系数的简化。搜索故障位置时, 利用电压分布规律, 给出了两条直线相交搜索故障位置法。当线路两端带有并联电抗器时, 测距电流所用的数据必须去掉并联电抗器上的电流, 然后才开始计算。EMTP 仿真表明, 该实用算法不受过渡电阻的影响, 计算量小, 避免伪根, 同时精度可满足实际的测距要求。

关键词: 输电线路; 双端测距; 分布参数; 伪根; EMTP 仿真

New practical searching method of two-terminal fault location for EHV transmission line

SUN Li

(Information Security Department, Henan College of Public Security, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A new search way for fault location based on two-terminal is proposed in the paper. The two-terminal fault location method uses transform matrix between phase and modulus to decouple the asymmetric three phase line to absolute modulus, selects proper modulus absolute value to realize fault location. The practical algorithm uses Taylor series to approximate the hyperbolic function, simplifies wave impedance and propagation coefficients. When searching fault location, it first uses the intersect dot of two beeline to find the actual fault location. When the transmission line has shunt reactors, the current of fault measurement should get rid of the effect of shunt reactor's current. The simulation of EMTP shows that the proposed method has high accuracy, less calculation burden, avoids pseudo-root, satisfies the practical fault locating need, and can afford the effect of transition resistor.

Key words: EHV transmission lines; two-terminal fault location; distributed line parameter; pseudo-root; EMTP simulation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)23-0009-05

0 引言

高压输电线路的故障测距, 对于快速查找故障点, 尽快恢复供电具有重要的意义。高压输电线路的准确故障定位是从技术上保证电网安全、稳定和经济运行的重要措施之一, 具有巨大的社会和经济效益。

故障测距算法从工作原理上可分为行波法和故障分析法。

1) 行波法: 通过测量行波在观测点和故障点之间往返的时间实现故障定位。理论上, 行波测距的数据不需要滤波处理, 不受线路类型、故障类型、过渡电阻、系统运行方式变化、线路分布电容、系统不对称以及负荷电流等的影响, 但是该类方法对装置的要求高, 技术上实现比较困难, 同时测距算法无方向性、出口短路有死区。

2) 故障分析法: 利用故障时记录的电压电流量, 通过分析计算, 求出故障点的距离。就其采用的电气量, 分为单端测距和双端测距。单端测距不受通信条件的限制, 不需要额外设备, 因而一直是人们关注的热点。单端测距算法有零序电流相位修正法, 解微分方程法, 解一次方程测距法, 解二次方程法。但现有的单端测距算法, 难以克服对端系统运行方式变化和过渡电阻的影响。双端测距算法在原理上完全消除了故障过渡电阻和两端系统阻抗的影响, 它分为基于集中参数模型的测距算法和基于分布参数模型的测距算法。集中参数算法, 对于短线, 可以忽略分布电容的影响, 但对于中长线路, 不考虑分布电容会带来较大的误差。分布参数模型比集中参数模型更精确, 特别是对于高压长线路。但当两端电气量采样不同步时, 又会带来很大误差。

双端测距算法原理上克服了两端采样不同步

所带来的误差,但在实际的保护装置应用中,还需要考虑双曲函数的逼近,波阻抗及传播系数的简化问题,以及实际应用中的搜索迭代问题。常用的迭代法有牛顿法,定步长迭代法。本文首先给出各模量在线路各点的电压分布图,给出了一种简单又实用的两条直线相交搜索故障距离法。

EMTP 仿真表明,该实用算法不受过渡电阻的影响,计算量小,精度可满足实际的测距要求。

1 故障测距原理

1.1 测距方程

对于一条实际的高压输电线路,应考虑线路的分布参数特性,尤其对于长线,若不考虑这种特性将会造成较大的误差。假设输电线路为参数均匀分布的线路,线路单位长度阻抗为 $R + j\omega L$, 导纳为

$G + j\omega C$, 则线路的波阻抗为 $Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$,

输电线路的传播系数为

$$\gamma = \sqrt{(G + j\omega C)(R + j\omega L)}$$

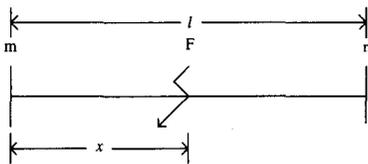


图 1 故障线路示意图

Fig.1 Faulted line diagram

图 1 为故障线路示意图,线路的两端分别标记为 m 和 n,线路全长为 l ,假定在距离 m 端 x 处的 F 点发生故障。m 和 F 之间的任一点的电压和电流可以用点 m 的电压和电流表示。同样 F 和 n 之间的任一点电压和电流可以用 n 点的电压和电流来表示。因此故障点 F 是唯一的一个可以用两端电压和电流值表示的点。 U_m 和 U_n 分别为线路两侧母线 m 端和 n 端的电压相量, I_m 和 I_n 为两侧的电流相量。根据输电线路传输线方程可得

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

$$U_F = (U_n \operatorname{ch} \gamma(l-x) - I_n Z_c \operatorname{sh} \gamma(l-x)) \cdot e^{j\delta} \quad (2)$$

其中: δ 为两端数据采样的不同步角度。

理论上,不同步只影响正弦信号的相位,而不影响其幅值。因此,用两端数据测得的故障点 F 处的电压幅值相等,即:

$$f(x) = \min \left(\left\| |U_F| - |U_F'| \right\| \right) \quad (3)$$

联立式 (1) ~ (3) 可解出具体故障位置 x 。

1.2 相模变换

对于三相输电线路,由于相间存在耦合,进行测距之前,需要通过相模变换对三相输电线路进行解耦。对于均匀换位三相输电线路系统,可采用的相模变换矩阵有很多种,如对称分量变换,凯伦贝尔变换,克拉克变换等。凯伦贝尔变换矩阵

$$[S] = [Q] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[S]^{-1} = [Q]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

经过变换,原来具有耦合关系的三相换位线路可以分解为 $\alpha, \beta, 0$ 模分量

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_0 \end{bmatrix} = [S]^{-1} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ I_0 \end{bmatrix} = [S]^{-1} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

1.3 $\alpha, \beta, 0$ 模分量电压沿线分布

1) 高阻接地故障,各模量的电压分布

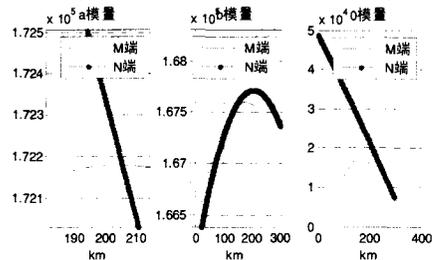


图 2 B 相高阻接地,各模量计算的两端电压分布 (200 km)

Fig.2 B phase ground fault with high impedance, two terminal voltage distribution

2) 金属性接地故障,各模量的电压分布

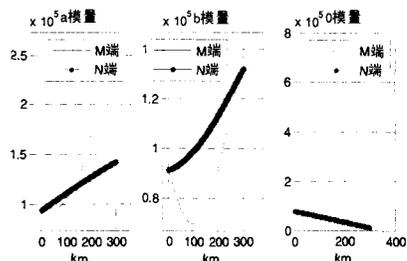


图 3 A 相金属性接地,各模量的电压分布 (0 km)

Fig.3 A phase metal ground fault, two terminal voltage distribution

图2为B相高阻接地故障时各模量沿线电压分布趋势,故障位置距M端200 km。从图中可以看出 α, β 模电压分布为抛物线,而两条抛物线相交会出现两个交点,此时会出现伪根。0模量计算的两端电压分布为两条直线相交。图3显示出 α, β 有伪根。

对输电线路传输线方程(1)进行如下变化:

$$U_F = U_m \operatorname{ch} \gamma x - I_m Z_c \operatorname{sh} \gamma x = \frac{1}{2}(U_m - I_m Z_c) \cdot e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(U_m + I_m Z_c) \cdot e^{-\gamma x}$$

由于 $\gamma \approx j\omega\sqrt{LC}$, 上式可化为

$$2|U_F| \approx 2|U_F e^{\gamma x}| = |(U_m - I_m Z_c)e^{2\gamma x} + (U_m + I_m Z_c)|$$

上述两式在变换前后 $|U_F|$ 的单调性和变化趋势不会发生改变。

大量模型仿真表明:在 $U_m - I_m Z_c$ 和 $U_m + I_m Z_c$ 中 α, β 模电压占主要成分,而0模电压不占主要成分,因此相量 $U_{mj} - I_{mj} Z_{Cj}$ ($j = \alpha, \beta$)和 $U_{mj} + I_{mj} Z_{Cj}$ ($j = \alpha, \beta$)在同一象限或相邻象限,而向量 $U_{m0} - I_{m0} Z_{C0}$ 和 $U_{m0} + I_{m0} Z_{C0}$ 则分布在不相邻象限。一般输电线路长度不超过500米,因此相量 $e^{\gamma x}$ 的幅角不超过 90° 。由相量的平行四边形法则可知,随着线路长度 x 的增加, $|U_{Fj}|$ ($j = \alpha, \beta$)不单调,而 $|U_{F0}|$ 单调增加。

因此我们采用0模量,这样既可以避免伪根的问题,同时也可以简化搜索迭代,避免牛顿迭代法不收敛问题,从而大大减少计算量。

2 算法具体实现

1) 双曲函数逼近

在超高压线路中,当线路不超过500 km时,

若 $m \geq 5$, 此时 $\frac{(\gamma x)^m}{m!} < 0.001$

因此在实用化方案中,对双曲正弦和双曲余弦函数,采用泰勒级数逼近,在这里取泰勒级数的前5项:

$$\operatorname{ch} \gamma x \approx \gamma x + \frac{(\gamma x)^2}{2!}$$

$$\operatorname{sh} \gamma x \approx 1 + \frac{(\gamma x)^2}{2!} + \frac{(\gamma x)^4}{4!}$$

2) 波阻抗和传播系数的近似波阻抗

$$Z_{vj} = \sqrt{\frac{R_j + j\omega L_j}{G_j + j\omega C_j}} \approx \sqrt{\frac{L_j}{C_j}}$$

传播系数

$$\gamma_j = \sqrt{(G_j + j\omega C_j)(R_j + j\omega L_j)} \approx j\omega\sqrt{C_j L_j}$$

3) 故障位置搜索方法

根据0模量计算的两端电压分布规律,在线路上取一点,用M端的0模量电压计算其上的电压值,此电压值和M端的0模量电压值相连会得到一条直线,同理N端也可以得到一条直线,两条直线相交的交点就是故障位置。

把1)、2)中的近似表达式带入式(2)

满足

$$f(x) = \min(|U_{mF0}| - |U_{nF0}|)$$

的 x 即为故障位置。

3 EMTF 仿真计算

为了验证文中所述测距方法的正确性与有效性,用EMTP软件对500 kV的三相输电线路系统进行数值仿真,线路模型如图2所示,其线路参数如下:

正序参数: $Z_1 = (0.0196 + j0.28) \Omega/\text{km}$,

$C_1 = 0.0135 \mu\text{F}/\text{km}$

零序参数: $Z_0 = (0.1828 + j0.86) \Omega/\text{km}$,

$C_0 = 0.0092 \mu\text{F}/\text{km}$

线路全长400 km,采样频率4800 Hz,故障位置 x 指指定的故障短路点F与m端母线之间的距离。仿真针对故障类型、故障位置、过渡电阻进行。进行测距计算前,对故障后的电压和电流要进行低通滤波。

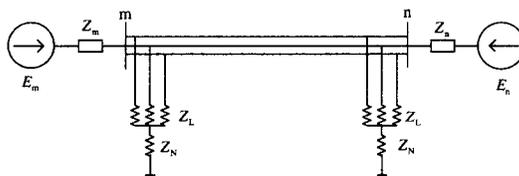


图4 系统仿真图

Fig.4 Simulation model

定义故障测距绝对误差为:

绝对误差=计算的故障距离-实际故障距离

相对误差=100%×|计算的故障距离-实际故障距离|/输电线路总长度

图 5 给出了故障距离为 160 公里处 α 、 β 和 0 模量的测距结果, 从图中可以看出利用 0 模量的测距效果最好, 所以本文采用 0 模量给出测距结果。

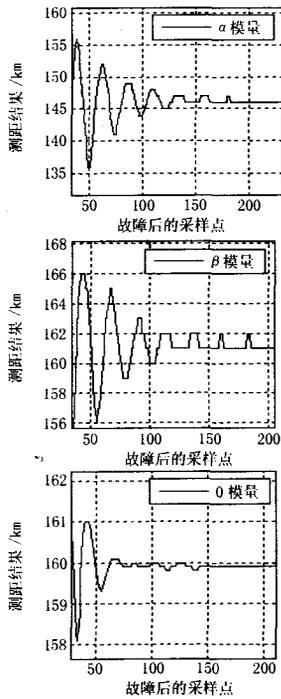


图 5 α 、 β 和 0 模量的测距结果(故障位置 160 km)
Fig.5 The fault locating results of α 、 β and 0 modulus(fault location 160 km)

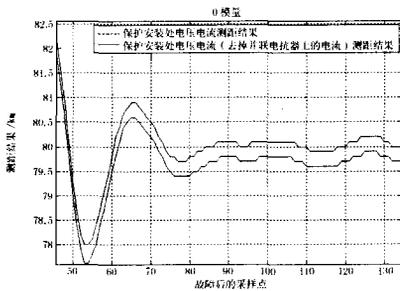


图 6 不考虑并联电抗器和考虑并联电抗器的测距结果比较
Fig.6 The results' comparison of fault locating with and no shunt reactors

图 6 给出了不考虑并联电抗器和考虑并联电抗器对线路两端电流影响的结果, 从图中可以看出去掉并联电抗器上的电流所计算的结果要比直接利用保护安装处的电压和电流的测距结果好。所以本文采用保护安装处的电流去掉并联电抗器上流过的电流来进行测距计算。

表 1 金属性接地故障, 不同故障点的测距结果和最大绝对和相对误差 (A 相)

Tab.1 Metal earth fault, different fault location results and maximum absolute and relative error (A phase)

故障位置 /km	测距结果 /km	最大绝对误差 /km	最大相对误差 / (%)
0	0.2	0.6	0.15
40	40.3	0.6	0.15
80	80.2	0.5	0.13
120	120.2	0.2	0.05
160	160.1	0.1	0.025
200	200.0	0.0	0.0
240	239.9	0.2	0.05
280	279.8	0.2	0.05
320	320.1	0.5	0.13
360	360.0	0.8	0.2
400	399.9	0.5	0.13

表 2 300 Ω 过渡电阻接地故障, 不同故障点测距结果和最大绝对和相对误差 (A 相)

Tab.2 The earth fault of 300 Ω transition resistor, different fault location results and maximum absolute error and relative error (A phase)

故障位置 /km	测距结果 /km	最大绝对误差 /km	最大相对误差 / (%)
0	0.2	0.2	0.05
40	40.2	0.2	0.05
80	80.1	0.1	0.03
120	120.1	0.1	0.025
160	160	0	0
200	200	0	0
240	240	0	0
280	279.9	0.1	0.025
320	319.8	0.2	0.05
360	359.8	0.2	0.05
400	399.8	0.2	0.05

表 1 给出了 A 相单相金属性接地时, 距离 M 侧不同距离发生故障时, 计算得到的故障发生 3 周波的测距结果和故障发生 3 周波后的最大绝对误差和相对误差。表 2 给出了 300 Ω 过渡电阻的情况下发生 A 相单相接地时, 故障发生后 3 周波的测距结果和 3 周波后测距的最大绝对误差和相对误差。表 3 给出了故障位置 300 km 处, 不同过渡电阻情况下的测距结果和故障发生 3 周后的最大绝对误差和相对误差, 不同步角 20° 。

表3 不同过渡电阻情况下的测距结果和测距误差
(实际故障距离 300 km)

Tab.3 Fault location results , maximum absolute error and relative error(300 km)

故障过渡电阻/ Ω	测距结果 /km	最大绝对误差 /km	最大相对误差 / (%)
10	299.9	0.2	0.05
50	299.9	0.2	0.05
100	299.9	0.1	0.025
150	299.9	0.1	0.025
200	299.9	0.1	0.025
250	299.9	0.1	0.025
300	299.9	0.1	0.025

4 结论

双端测距算法原理上克服了两端采样不同步带来的误差,但在实际的保护装置应用中,还需要考虑双曲函数的逼近,波阻抗及传播系数的简化问题,以及实际应用中搜索迭代问题。常用的迭代法有牛顿法,定步长迭代法。本文首先给出各模量在线路各点的电压分布图,给出了一种简单又实用的两条直线相交搜索故障距离,大大减少了计算量,同时又保证了很好的测距精度。EMTP 仿真表明,该方法计算量小,精度可满足实际的测距要求,同时不受过渡电阻和两端数据采样不同步的影响,适于实际测距方案的实施。

参考文献

[1] 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.

- [2] 毛鹏,张兆宁,苗有忠,等.基于双端电气量的输电线路故障测距的新方法[J].继电器,2000,28(5):24-27.
MAO Peng, ZHANG Zhao-ning, MIAO You-zhong, et al.A Novel Technique for Locating Transmission Line Fault Based on the Two-terminal Electrical Quantities[J].Relay,2000,28(5):24-27.
- [3] 范春菊,郁惟镛.基于基频电气量的输电线路故障测距的滤波的探讨[J].继电器,2004,32(4):36-39.
FAN Chun-ju, YU Wei-yong.Discussion on Fault Location Filter of Transmission Line Based on Basic Frequency Measurement[J].Relay,2004,32(4):36-39.
- [4] 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.
CHEN Zheng, SU Jin-xi, WU Xin-rong, et al.Fault Location Algorithm for High Voltage Transmission Line Based on Distributed Parameter[J].Power System Technology,2000,24(11):31-33.
- [5] 刘东超,李永丽,曾志安.带并联电抗器的双回线故障测距算法研究[J].电力系统及其自动化学报,2006,18(2):5-9.
LIU Dong-chao, LI Yong-li, ZENG Zhi-an.Research Accurate Fault Location Algorithm for Double Circuit Transmission Line with Shunt Reactors[J].Proceedings of the CSU-EPSSA,2006,18(2):5-9.

收稿日期:2007-07-03; 修回日期:2007-10-18

作者简介:

孙莉(1969-),女,教师,主要从事计算机及自控专业设计; E-mail: bhcpkfb@sina.com

许继新型光学电流互感器在漯河成功实现挂网运行

近日,从黑龙江省黑河供电公司传来喜讯,由北京许继电力光学技术有限公司自主研发的 POSS-OCT/LGZBT100-0110W2 型 110kV 光学电流互感器 11 月 16 日在黑河市西岗子变电站成功实现挂网运行。

POSS-OCT/LGZBT100-0110W2 型光学电流互感器是北京许继电力光学技术有限公司的最新型互感器产品,是在取得一些列突破性技术成果的基础上研制完成的,具有完全的自主知识产权,其核心技术已经达到国际领先水平。整个产品系统具有高精度、高频宽、高适应性、高可靠性和低成本等优点。

黑河市的全年最低气温接近-40℃,现场安装期间气温已达-18℃,这对任何互感器产品而言都是严峻的考验。在此期间,挂网产品运行状况良好,产品各项技术数据准确可靠,运行稳定,完全满足系统运行条件。该产品的成功挂网运行也将为国内数字化变电站的设计和建设积累宝贵的现场经验。