

输电线路故障测距实用算法研究

王利平^{1,2}, 王晓茹¹, 王伟², 陈军², 余锐²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 国网四川省电力公司电力调度控制中心, 四川 成都 610041)

摘要: 针对输电线路双端故障测距算法需要进行双曲函数复杂的计算、牛顿-拉夫逊迭代和二分搜索计算量大、需要精确线路参数等问题, 提出了一种新的适合于输电线路差动保护装置的精确故障测距算法。算法原理简单, 经过简单的复数运算就可以计算出输电线路的精确参数、两侧非同步采样系数和故障距离。采用正序故障分量来计算故障距离, 能适应各种故障类型, 计算结果收敛快, 不受过渡电阻影响。

关键词: 故障测距; 输电线路; 非同步采样系数; 差动保护装置

Study of faults location utilizing algorithm on power transmission lines

WANG Li-ping^{1,2}, WANG Xiao-ru¹, WANG Wei², CHEN Jun², YU Rui²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Sichuan Electric Power Dispatching and Control Center, Chengdu 610041, China)

Abstract: A novel accurate location of faults on power transmission line with two-end phasor measurement used in differential protection device is proposed. The new algorithm may solve the shortages such as complex calculations of calculating the hyperbolic functions, large amount of calculation with the Newton-Raphson iteration and binary search and needing accurate line parameters. The algorithm is simple in principle, it can calculate the accurate parameters of the transmission line, coefficient of asynchronous sampling and fault distance through simple complex operation. The algorithm uses the positive sequence fault component to calculate the fault distance, is able to adapt to all type of fault, and the calculation results have fast convergence and do not influenced by the transition resistance.

Key words: faults location; transmission line; coefficient of unsynchronized sampling; differential protection device

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)16-0052-07

0 引言

输电线路精确的故障定位可以极大地缩短检修人员的巡线时间, 对提高电力系统供电的可靠性、安全稳定和经济运行有十分重要的意义。因此, 输电线路的精确故障测距一直受到电网运行、管理部门和专家学者的普遍关注。

输电线路故障测距算法从数据来源上可分为单端测距和双端测距。目前的单端测距算法^[1-4]主要有: 基于工频阻抗的测距方法、零序电流相位修正法、解微分方法相位修正法、行波法等。单端测距从原理上无法消除过渡电阻和对端系统阻抗变化带来的影响, 因此提出了许多双端故障测距算法。

双端故障测距算法都是基于线路两侧电气量同步采样来获得故障距离算法的, 根据是否对两侧采样的非同步性进行补偿又分为两端同步采样^[5-8]和

非同步采样^[9-15]两大类。双端故障测距的理论基础都是利用线路两侧电气量和线路参数(分布参数模型^[7-13]或集中参数模型^[6,14])推算出故障点电压, 然后根据该点电压相等(瞬时值相等^[6], 相量相等^[6,8-11,13-14]或标量相等^[12,15]), 来求解方程得到故障距离。

文献[5]通过求解电压电流瞬时值及其一阶、二阶导数形成的系数方程, 采用最小均方估计来消除方程冗余的影响。文献[9]通过牛顿-拉夫逊迭代求解方程, 文献[8,10-11,13-14]虽然避免了迭代求解, 但都需要计算双曲函数及其反函数, 计算量大。文献[12,15]利用故障时线电压沿线分布曲线最多由2条单调方向不同的曲线段组成的特点采用二分区间求根法或弦截求根法确定故障点, 并用故障点线电压幅值最低的原理来去除伪根; 这些算法为得到较高的测距精度需要进行大量的计算。

传统的双端测距算法除了计算量大、计算复杂外, 都是把精确的线路参数作为已知量来处理的, 需要对线路参数的精确值进行整定, 而实际工程运用中是很难做到的, 使测距精度受到了影响。

在电力系统生产运行现场, 故障测距功能通常包含在保护装置、故障录波器、行波测距装置等设备中。故障录波器和行波测距装置都是利用双端数据进行故障测距的, 通常需要建立主站、分站和专用通信系统, 增加了二次运维人员的工作量, 根据作者对二次设备多年的运行管理经验, 多数情况下故障测距设备处于亚健康状态。保护装置的故障测距功能只是其辅助功能之一, 绝大部分采用单端测距算法, 测距误差较大。保护装置、故障录波器、行波测距装置等设备中可靠性最高的是保护装置, 如能利用光纤差动保护保护装置及其光纤通道, 实现故障距离的精确计算对于生产实际将具有重要的意义。

本文提出的算法基于双端口网络理论, 采用输电线路的分布参数模型, 通过正常运行时实时计算线路参数, 并对两侧采样不同步进行补偿, 利用正序故障分量进行故障测距。本算法只需简单的复数运算, 计算量小, 可以运用到线路的差动保护中(增加向对侧传输本侧电压采样值), 利用通道交换得到两侧的采样数据, 实现故障的精确测距。

1 精确故障测距算法原理

1.1 分布参数的输电线路模型

输电线路的双端口分布参数 Π 型等值电路如图1所示。当采用如图1所示的电流极性规定时, 具有如下的表达式^[16]

$$\begin{cases} \dot{U}_M = \dot{U}_N(ZY+1) - \dot{I}_N Z \\ \dot{I}_M = \dot{U}_N Y(ZY+2) - \dot{I}_N(ZY+1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: Z 为线路阻抗, $Z=R+jX=Z_0 l$, $Z_0=R_0+jX_0$ 为线路单位长度的串联阻抗, l 为线路长度; Y 为线路导纳, $Y=G+jB=Y_0 l$, $Y_0=G_0+jB_0$ 为线路单位长度的并联导纳。

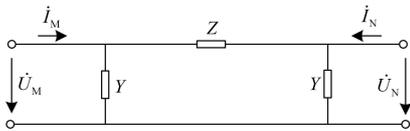


图1 输电线路的双端口 Π 型等值电路

Fig. 1 Double terminal π type equivalent circuit of transmission line

1.2 精确故障测距算法

输电线路距离 M 端 l_M 公里(距离 N 端 l_N 公里)处发生短路故障, 在故障点两侧分别采用双端口 Π

型等值电路如图2所示。

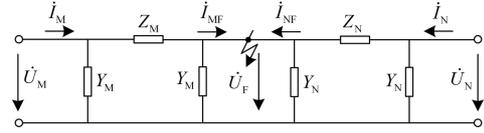


图2 线路发生故障时的双端口 Π 型等值电路图

Fig. 2 Double terminal π type equivalent circuit of fault in transmission line

由式(1)可得到故障点两侧的双端口表达式

$$\begin{cases} \dot{U}_F = \dot{U}_M(Z_M Y_M + 1) - \dot{I}_M Z_M \\ -\dot{I}_{FM} = \dot{U}_M Y_M(Z_M Y_M + 2) - \dot{I}_M(Z_M Y_M + 1) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_F = \dot{U}_N(Z_N Y_N + 1) - \dot{I}_N Z_N \\ -\dot{I}_{FN} = \dot{U}_N Y_N(Z_N Y_N + 2) - \dot{I}_N(Z_N Y_N + 1) \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)得到的故障点电压 \dot{U}_F 相等, 并考虑到线路阻抗 $Z=Z_M+Z_N$ 、导纳 $Y=Y_M+Y_N$ 、长度 $L=l_M+l_N$, 则可得到

$$\begin{aligned} (\dot{U}_N - \dot{U}_M)Z_M Y_M + (\dot{I}_M + \dot{I}_N)Z_M - \dot{U}_N(ZY_M + Z_M Y) = \\ \dot{U}_M - \dot{U}_N - \dot{U}_N ZY + \dot{I}_N Z \end{aligned} \quad (4)$$

可简化为

$$A l_M^2 + B l_M + C = 0 \quad (5)$$

式中

$$\begin{cases} A = (\dot{U}_N - \dot{U}_M)Z_0 Y_0 \\ B = (\dot{I}_M + \dot{I}_N)Z_0 - 2\dot{U}_N Z_0 Y_0 L \\ C = -(\dot{U}_M - \dot{U}_N - \dot{U}_N Z_0 Y_0 L^2 + \dot{I}_N Z_0 L) \end{cases} \quad (6)$$

求解式(5)的复系数方程就可以计算出故障点距离 M 侧母线的距离。为求解该复系数方程, 可以通过该方程的实部、虚部同时为 0 来求解, 则方程式(5)可以转化为

$$A_{Re} l_M^2 + B_{Re} l_M + C_{Re} = 0 \quad (7)$$

$$A_{Im} l_M^2 + B_{Im} l_M + C_{Im} = 0 \quad (8)$$

式中, A_{Re} 、 A_{Im} 、 B_{Re} 、 B_{Im} 、 C_{Re} 、 C_{Im} 分别为式(6)中复数 A 、 B 、 C 的实部和虚部。

满足实系数一元二次方程式(7)和式(8)的解分别有两个, 但其中一个要么为负数, 要么大于线路全长, 因此满足要求的只有一个解。设满足要求的解分别为 l_M^{Re} 和 l_M^{Im} , 则可得到故障距离为

$$l_M = \frac{1}{2}(l_M^{Re} + l_M^{Im}) \quad (9)$$

当忽略输电线路的并联导纳 ($Y_0=0$) 时, 方程式(9)就简化成了式(10), 与文献[14]的算法一致。

$$l_M = \frac{\dot{U}_M - \dot{U}_N + \dot{I}_N Z}{(\dot{I}_M + \dot{I}_N)Z_0} \quad (10)$$

1.3 输电线路参数实时计算

在求解方程式(5)时,输电线路的参数(阻抗、导纳、线路长度等)在故障测距中是作为已知量的,这些参数的精确度直接影响到故障测距的精确性。一般情况下,这些参数是在输电线路投运前进行实测得到的,可作为参数整定到保护装置中。但是,这些参数随着气候、周围环境及地理因素的变化而发生变化,从而影响测距精度。因此如能通过电气量实时在线估算出线路的参数,将具有十分重要的价值。

由式(1)可以求解得到

$$Z_0 = \frac{(\dot{U}_M + \dot{U}_N)(\dot{U}_M - \dot{U}_N)}{(\dot{U}_N \dot{I}_M - \dot{U}_M \dot{I}_N)L} \quad (11)$$

$$Y_0 = \frac{\dot{U}_M - \dot{U}_N + \dot{I}_N Z_0 L}{\dot{U}_N Z_0 L^2} \quad (12)$$

式中, L 为线路长度。

因此,利用正常运行时线路两端保护装置的电气量,可以由式(11)实时计算出线路的阻抗 Z ,然后再利用式(12)实时计算出线路的并联导纳 Y ,并进一步得到单位长度的阻抗和导纳值。

1.4 非同步采样系数的计算

上述算法都是在线路两侧采样同步的情况下得到的,如果两侧采样不同步,测距精度将会产生很大的误差。既使采用全球定位系统(GPS)同步采样或者线路差动保护的乒乓算法同步采样,都很难得到完全同步的采样数据。本文提出了计算非同步采样系数的方法,它基于输电线路的双端口分布参数 Π 型等值电路模型,采用线路正常运行时两侧的正序电气量和线路的正序参数来计算。

假设线路对侧(N侧)为采样基准,本侧(M侧)采样的不同步角为 δ 时,式(1)即为

$$\begin{cases} \dot{U}_M e^{j\delta} = \dot{U}_N (ZY + 1) - \dot{I}_N Z \\ \dot{I}_M e^{j\delta} = \dot{U}_N Y (ZY + 2) - \dot{I}_N (ZY + 1) \end{cases} \quad (13)$$

可求解出

$$\dot{k}_{\text{unsyn}} = e^{j\delta} = \frac{\dot{U}_N (ZY + 1) - \dot{I}_N Z}{\dot{U}_M} \quad (14)$$

式中, \dot{k}_{unsyn} 称为非同步采样系数,其相角就是两侧非同步采样角。当线路两侧采样不同步时,只需将 M 侧电气量按式(15)进行同步处理后代入 1.2 和 1.3 中各式即可。

$$\begin{cases} \dot{U}'_M = \dot{U}_M \dot{k}_{\text{unsyn}} \\ \dot{I}'_M = \dot{I}_M \dot{k}_{\text{unsyn}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: \dot{U}'_M 、 \dot{I}'_M 为 M 侧采样得到的电压、电流;

\dot{U}'_M 、 \dot{I}'_M 为 M 侧同步处理后的电压、电流。

2 精确测距线路模型

利用图 2 进行故障测距算法分析时,只有在故障状态回路,由于故障点对线路双端口网络连续性的破坏,对故障点两端运用双端口 Π 型等值方程的电压才能使式(4)成立。对正常运行回路,由于不存在故障,对全线路的任意点都满足式(4),计算得到的距离显然不正确。因此,利用线路两侧电气量计算故障点两侧电压,根据故障点电压相等得到的测距算法只适用于故障分量回路。

由电力系统故障计算理论可知,只有正序的故障分量存在于全部故障类型。线路的正序参数可以方便地利用式(11)、式(12)实时计算。因此,本算法采用正序的故障分量来进行精确故障测距计算,只需线路两侧正序分量(正序故障分量)和正序参数,也避免了使用线路的零序参数。

线路两侧电压、电流的正序故障分量可以采用式(16)来计算。

$$\begin{cases} \dot{U}_{j1} = \dot{U}_{j1}^F - \dot{U}_{j1}^P \\ \dot{I}_{j1} = \dot{I}_{j1}^F - \dot{I}_{j1}^P \end{cases} \quad (16)$$

式中: \dot{U}_{j1}^F 、 \dot{I}_{j1}^F 为故障时的正序电压、正序电流; \dot{U}_{j1}^P 、 \dot{I}_{j1}^P 为正常运行时的正序电压、正序电流; $j=M, N$, 表示 M 侧和 N 侧。

3 算法实用流程

本算法可在线路差动保护装置中实现,作为保护装置的一个软件模块,保护装置只需要增加向对侧传输本侧电压采样值,具体的流程图如图 3 所示。

本算法在具体使用时,只在线路正常运行时进行非同步采样系数和线路参数计算;在故障时假设两侧采样保持故障前的同步状态和线路参数保持不变。

在线路正常运行时进行同步采样补偿处理和线路参数实时计算,计算采用递推迭代方式。首先利用上一次计算出的线路参数根据式(14)计算出非同步采样系数 \dot{k}_{unsyn} (线路第一次运行时,采用线路实测参数作为初始值),然后根据式(15)进行采样同步补偿,再根据式(11)和式(12)计算线路参数,同时作为下一个采样点计算非同步采样系数的线路参数。从式(11)、式(12)和式(14)可知,线路参数和非同步采样系数相互关联。为提高准确度,可以进行反复迭代计算,实际上,从仿真算例可以看出,经过一次计算就可以达到足够的准确度。

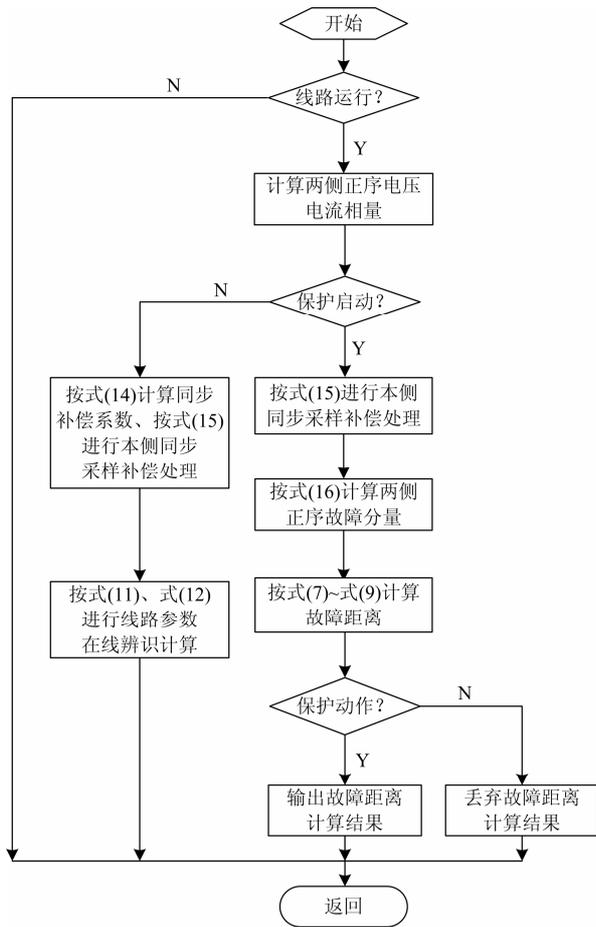


图 3 故障测距计算软件模块流程图

Fig. 3 Calculation flow chart of the software modules for fault location

4 仿真计算

4.1 仿真参数

利用 EMTDC/PSCAD 电磁暂态仿真软件对本文提出的精确故障测距算法进行了仿真试验。仿真模型为某 500 kV 线路, 如图 4 所示。500 kV 线路参数如表 1 所示, 两侧系统等值参数如表 2 所示。在进行仿真计算时, 保护装置每周波采样 40 点。

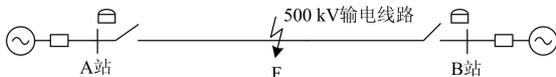


图 4 仿真系统图

Fig. 4 Simulation system

4.2 线路参数在线计算仿真

线路参数的准确度和两侧非同步采样直接影响故障测距精度, 利用图 3 的模型对在线实时辨识线路参数的式(11)、式(12), 非同步采样系数式(14)进

表 1 500 kV 输电线路的线路参数

Table 1 Line parameters of 500 kV transmission line

参数名称	每相实测值	每公里实测值
直流电阻/ Ω	3.474 1	0.019 3
正序阻抗/ Ω	50.585 4	0.281 0
正序电阻/ Ω	3.581 5	0.019 9
正序电抗/ Ω	50.453 8	0.280 3
正序电容/ μF	2.432 1	0.013 5
零序阻抗/ Ω	185.267 6	1.029 3
零序电阻/ Ω	35.244 1	0.195 8
零序电抗/ Ω	181.881 6	1.010 5
零序电容/ μF	1.586 5	0.008 8
线路长度/km	240	

表 2 500 kV 线路两侧系统等值参数

Table 2 Equivalent system parameters of 500 kV transmission line terminal grid

名称	A 站侧	B 站侧
正序阻抗/ Ω	$0.2757+j5.6503$	$0.1561+j15.00$
零序阻抗/ Ω	$1.3782+j11.025$	$2.4983+j18.2685$

行了仿真。仿真时考虑了线路参数分别变化 $\pm 10\%$ 的情况, 如表 3 所示。从表 3 中可以看出, 线路的感抗值误差非常小, 相对误差小于 0.1%; 而其他参数的相对误差也不大于 2%。

表 3 线路参数实时计算结果

Table 3 Calculating results of line parameters on line

变化范围	参数	真实值	计算值	相对误差
0	R_0	$0.019 9 \Omega$	$1.9603 \times 10^{-2} \Omega$	-1.494 2%
	X_0	$0.280 3 \Omega$	$2.8044 \times 10^{-1} \Omega$	0.049 0%
	G_0	0 S	$1.5776 \times 10^{-8} \text{ S}$	—
	B_0	$2.1206 \times 10^{-6} \text{ S}$	$2.1607 \times 10^{-6} \text{ S}$	1.893 7%
-10%	R_0	$0.017 9 \Omega$	$1.7713 \times 10^{-2} \Omega$	-1.099 3%
	X_0	$0.252 3 \Omega$	$2.5240 \times 10^{-1} \Omega$	0.052 5%
	G_0	0 S	$1.6375 \times 10^{-8} \text{ S}$	—
	B_0	$1.9085 \times 10^{-6} \text{ S}$	$1.9414 \times 10^{-6} \text{ S}$	1.723 2%
+10%	R_0	$0.021 9 \Omega$	$2.1482 \times 10^{-2} \Omega$	-1.865 0%
	X_0	$0.308 3 \Omega$	$3.0847 \times 10^{-1} \Omega$	0.045 1%
	G_0	0 S	$1.5863 \times 10^{-8} \text{ S}$	—
	B_0	$2.3327 \times 10^{-6} \text{ S}$	$2.3718 \times 10^{-6} \text{ S}$	1.676 2%

不同的非同步采样角(非同步采样系数)对线路参数的影响情况如表 4 所示。对于线路差动保护装置, 不同步采样角最大为采样间隔相位角。本算法仿真时, 每周波采样 40 点, 则最大非同步采样角为 9° ($360^\circ / 40 = 9^\circ$)。从表 4 中可以看出, 若不

进行非同步采样补偿，线路参数的误差非常大，根本不可用；进行非同步采样系数补偿处理后，线路

表 4 不同非同步采样角时线路参数实时计算结果

Table 4 Calculating results of line parameters on line in different unsynchronized sampling angle

非同步采样角	补偿情况	计算量	R_0	X_0	G_0	B_0
3.6°	未同步补偿	计算值	$1.5260 \times 10^{-2} \Omega$	$2.1277 \times 10^{-1} \Omega$	$5.2465 \times 10^{-8} S$	$1.6091 \times 10^{-6} S$
		相对误差	-23.316 6%	-24.092 2%	—	-24.120 2%
	进行同步补偿	计算值	$1.9610 \times 10^{-2} \Omega$	$2.8046 \times 10^{-1} \Omega$	$1.5988 \times 10^{-8} S$	$2.1604 \times 10^{-6} S$
		相对误差	-1.455 5%	0.055 3%	—	1.876 9%
7.2°	未同步补偿	计算值	$1.0980 \times 10^{-2} \Omega$	$1.4777 \times 10^{-1} \Omega$	$8.6491 \times 10^{-8} S$	$1.0898 \times 10^{-6} S$
		相对误差	-44.825 4%	-47.279 9%	—	-48.609 2%
	进行同步补偿	计算值	$1.9571 \times 10^{-2} \Omega$	$2.8047 \times 10^{-1} \Omega$	$1.5638 \times 10^{-8} S$	$2.1608 \times 10^{-6} S$
		相对误差	-1.652 4%	0.059 9%	—	1.898 4%
9.0°	未同步补偿	计算值	$8.8184 \times 10^{-3} \Omega$	$1.1500 \times 10^{-1} \Omega$	$1.0379 \times 10^{-7} S$	$8.2978 \times 10^{-7} S$
		相对误差	-55.686 3%	-58.972 5%	—	-60.869 9%
	进行同步补偿	计算值	$1.9653 \times 10^{-2} \Omega$	$2.8046 \times 10^{-1} \Omega$	$1.5844 \times 10^{-8} S$	$2.1605 \times 10^{-6} S$
		相对误差	-1.239 3%	0.058 6%	—	1.880 8%

4.3 故障测距仿真

由于保护装置快速动作，开关跳闸后，故障特征量就会随之消失，对于单相接地故障就会变成单相断线状态，对于相间或多相接地故障就会三相跳闸。虽然故障测距没有实时性要求，但如果测距算法不能具有快速的收敛性，就不能利用较短的故障电气量得到正确的测距结果。仿真系统在距离 A 站 40 km 发生经 10 Ω 过渡电阻单相接地故障，故障发生在 0.5 s，本算法的测距计算结果随时间变化情况如图 5 所示。从图 5 中可以看出，在故障后 25 ms (1.25 个周波) 测距结果就趋于稳定值，收敛速度非常快，能够适应线路主保护快速动作的要求。

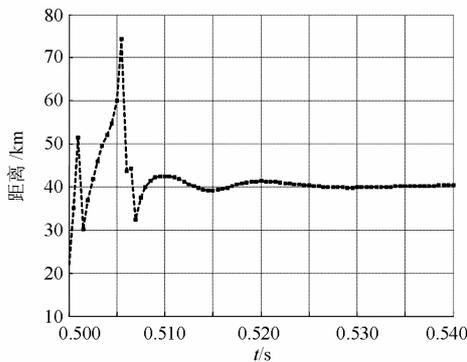


图 5 测距结果随时间变化情况

Fig. 5 Results of fault location over time

表 5 列出了在距离 A 站不同位置，经 10 Ω 过渡电阻发生各种故障类型时的故障测距结果和相

对误差。从表 5 中可以看出，故障的故障测距相对误差均小于 0.2%。

表 5 在不同位置发生各种故障的故障测距结果

Table 5 Calculating results of fault distance at different position for different fault

故障距离/km	故障类型	测距结果/km	相对误差/%
40.0	单相接地	39.979 6	-0.050 9
	两相接地	40.022 8	0.057 1
	两相相间	39.944 3	-0.139 2
	三相短路	40.054 6	0.136 4
70.0	单相接地	70.110 0	0.157 1
	两相接地	69.889 4	-0.158 0
	两相相间	70.124 9	0.178 4
	三相短路	69.905 1	-0.135 6
100.0	单相接地	100.163 0	0.163 0
	两相接地	100.181 9	0.181 9
	两相相间	99.846 1	-0.153 9
	三相短路	99.892 7	-0.107 3
150.0	单相接地	150.092 9	0.062 0
	两相接地	150.065 7	0.043 8
	两相相间	150.071 5	0.047 7
	三相短路	150.232 8	0.155 2
190.0	单相接地	189.796 6	-0.107 1
	两相接地	190.342 3	0.180 2
	两相相间	190.219 7	0.115 7
	三相短路	189.730 1	-0.142 0

表 6 列出了距离 A 站 150 km 处, 经 10Ω 过渡电阻发生单相接地故障时, 非同步采样对故障测距结果的影响情况。从表 6 中可以看出, 若不进行非同步采样补偿, 故障测距结果的误差非常大, 根本不可用; 进行非同步采样系数补偿处理后, 故障测距结果的误差和同步采样时几乎相同。

表 6 发生单相接地故障不同非同步采样角时的故障测距结果

Table 6 Calculating results of fault distance in different unsynchronized sampling angle for single-phase-to-ground faults

非采样同步角/ ($^{\circ}$)	未同步补偿		进行同步补偿	
	测距结果/	相对误差/	测距结果/	相对误差/
	km	%	km	%
3.6	153.325 0	2.216 7	149.833 6	-0.110 9
7.2	162.460 3	8.306 9	150.121 1	0.080 7
9.0	171.865 3	14.576 9	149.856 3	-0.095 8

表 7 列出了距离 A 站 90 km 处, 经不同过渡电阻发生单相接地故障时的故障测距结果。从表 7 中可以看出, 本文提出的故障测距算法几乎不受过渡电阻的影响, 抗过渡电阻的能力非常强。

表 7 不同过渡电阻时发生单相接地故障的故障测距结果
Table 7 Calculating results of fault distance in different fault resistances of single-to-ground faults

过渡电阻/ Ω	测距结果/km	相对误差/%
0	89.933 8	-0.073 6
10	90.087 8	0.097 6
30	90.017 2	0.019 1
50	90.077 4	0.086 0
100	89.965 9	-0.037 9
150	89.722 6	-0.308 3
200	90.254 3	0.282 6
300	90.093 2	0.103 5
400	90.178 8	0.198 6
500	90.584 1	0.649 0
600	89.146 1	-0.948 8

5 结论

(1) 本文提出的精确故障测距算法采用输电线路的 Π 型分布线路参数模型, 基于双端口网络理论, 原理简单, 只需进行简单的复数运算, 计算量小。计算结果收敛快, 能适应线路主保护快速动作的要求。目前的电流差动保护装置增加向对侧传输电压采样值, 就能方便地实现本算法的精确故障测距。

(2) 本算法在正常运行时, 实时在线计算线路的参数, 避免了线路参数因各种因素变化导致的测距不准确。

(3) 考虑到两侧保护装置采样不同步, 本算法通过计算非同步采样系数来进行同步采样补偿处理, 故障计算结果不受非同步采样影响。

(4) 本算法采用正序故障分量来计算故障距离, 能适应各种故障类型。通过求解一元二次方程, 避免了繁琐的迭代或搜索计算。

参考文献

- [1] 吴必信, 陈东菊. 综述单端故障测距算法(一)[J]. 电力自动化设备, 1995, 15(3): 30-34.
WU Bi-xin, CHEN Dong-ju. Summary of single-ended fault location algorithm (one)[J]. Electric Power Automation Equipment, 1995, 15(3): 30-34.
- [2] 李志民, 陈学允. 基于单侧信息的输电线路故障测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 416-420.
LI Zhi-min, CHEN Xue-yun. A novel algorithm for power transmission line fault location using the one-terminal current data[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 416-420.
- [3] 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): 42-46.
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): 42-46.
- [4] 倪传坤, 张克元, 杨生苹. 基于电子式互感器的 R-L 模型距离保护应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 132-135.
NI Chuan-kun, ZHANG Ke-yuan, YANG Sheng-ping. Applied research of R-L model distance protection based on ECT[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 40(15): 132-135.
- [5] 索南加乐, 齐军, 陈福锋, 等. 基于 R-L 模型参数辨识的输电线路准确故障测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 119-125.
SUONAN Jia-le, QI Jun, CHEN Fu-feng, et al. An accurate fault location algorithm for transmission lines based on R-L model parameter identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 119-125.

- [6] LEE C J, PARK J B, SHIN J R, et al. A new two-terminal numerical algorithm for fault location, distance protection, and arcing fault recognition[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1460-1462.
- [7] 王波, 周昱勇. 基于 PMU 的多端传输线路故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 32-35.
WANG Bo, ZHOU Yu-yong. A novel PMU-based fault location algorithm for multi-terminal transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 37(12): 32-35.
- [8] 林富洪, 王增平, 李金龙, 等. 基于双曲正弦函数相位特性高压故障线路相位测距法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 28(14): 28-33.
LIN Fu-hong, WANG Zeng-ping, LI Jin-long, et al. Fault location algorithm for HV transmission line based on phase characteristics of hyperbolic sine function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 38(14): 28-33.
- [9] JAN I, RAFAL M, EUGENIUSZ R, et al. Accurate location of faults on power transmission lines with use of two-end unsynchronized measurements[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 627-633.
- [10] JAN I, EUGENIUSZ R, PRZEMYSŁAW B, et al. Accurate noniterative fault location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(1): 72-80.
- [11] JAN I, EUGENIUSZ R, PRZEMYSŁAW B, et al. Accurate noniterative fault-location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(2): 547-555.
- [12] 桂勋, 刘志刚, 韩旭东, 等. 基于高压输电线电压沿线分布规律的故障双端测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 63-69.
GUI Xun, LIU Zhi-gang, HAN Xu-dong, et al. An accurate algorithm of two-terminal fault location based on the distribution of line voltage along HV transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 63-69.
- [13] 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.
ZHANG Xiao-ming, XU Yan, WANG Yu, et al. A fault location algorithm for two-terminal transmission lines based on parameter detection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 106-111.
- [14] 吴瑞春, 焦彦军, 张新国. 双端测距以及同步算法的实现[J]. 继电器, 2008, 36(5): 7-9.
WU Rui-chun, JIAO Yan-jun, ZHANG Xin-guo. Realization of two-terminal fault location and synchronization algorithm[J]. Relay, 2008, 36(5): 7-9.
- [15] 王伟, 余锐, 陈愚, 等. 特高压输电线路保护故障测距的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 40-46.
WANG Wei, YU Rui, CHEN Yu, et al. Application research of fault location of UHV transmission line protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 40-46.
- [16] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
LIU Zhen-ya. UHV power grid[M]. Beijing: Economic Press of China, 2005.

收稿日期: 2013-11-04

作者简介:

王利平(1972-), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 长期从事电力系统继电保护产品研发、运行维护和管理工作; E-mail: lp8wang@gmail.com

王晓茹(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护和安全稳定控制以及变电站自动化技术;

王伟(1964-)男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。