基于时域方法的输电线路两点异相故障测距

王亚强[1], 焦彦军[1], 王宏伟[2]
(1. 华北电力大学,河北 保定 071003; 2. 平顶山供电局,河南 平顶山 467000)

摘要: 提出了一种利用双端电压电流同步采样值进行高压短输电线路两点异相故障的时域测距方法。该方法基本上不受系统运行方式和过渡电阻大小影响。所有解算均在相坐标中进行,避免了两端电气量的坐标变换。最小二乘技术的应用从理论上保证了该测距算法具有较高精度。对于一点故障测距问题,该方法同样有效。

关键词: 同步采样; 异相; 故障测距; 过渡电阻

中图分类号: TM77 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2005)06-0025-04

0 引言

在高压电网中,为了加速线路故障的切除、减少因停电造成的经济损失,需要高精度的故障测距技术。近年来,国内外提出了大量的故障测距原理和方法,但是,其算法大都针对线路一点故障情况,当应用于两点异相故障时完全无效[1]。虽然电力系统中两点异相故障发生的概率较小,但不能忽略其存在,有必要研究适合于两点异相故障的测距算法[2,3]。目前,电力通信技术不断发展, GPS技术在电力系统中的应用日益广泛和成熟,从而使得双端同步采样所需的高精度时钟有了保证。据此,本文利用两端线路的同步采样数据,在时域进行故障测距。时域方法可以利用故障后暂态过程数据,使用的数据量少,时窗短。并且本文所有解算均在相坐标中进行,适合于对称和不对称线路;不但适用于两点异相故障测距,当一点故障时也毫无问题。ATP仿真表明本算法有效。

1 故障定位方程

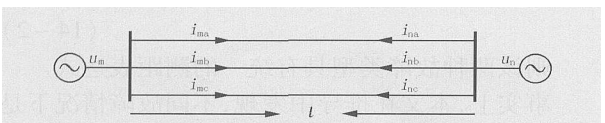

图 1 正常双端系统

Fig. 1 Normal two-terminal system

图 1为一正常运行的双端系统,线路总长为 l,电流方向规定由母线指向线路为正方向,测距装置装设在 M端。下面讨论在发生不同两点异相接地故障时,故障定位方程的具体表达式,以期得到各种故障情况下的统一测距公式。

1.1 BC两相两点接地故障

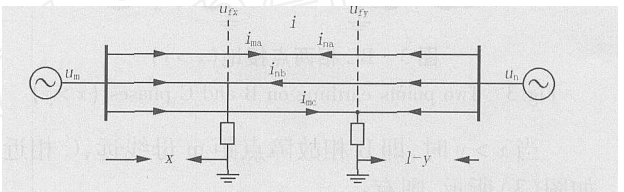

图 2 BC相两点接地 ($x < y$)

Fig. 2 Two points earthing on B and C phases ($x < y$)

设 B相故障点距 m母线 x公里, C相故障点距 m母线 y公里。若 $x < y$,如图 2则有:

$$u_m(t) = x\left(R i_m(t) + L\frac{di_m(t)}{dt}\right) + u_{fx}(t) \quad (1)$$

$$u_n(t) = (l-y)\left(R i_n(t) + L\frac{di_n(t)}{dt}\right) + u_{fy}(t) \quad (2)$$

其中: $u_s(t) = [u_{sa}(t)\ u_{sb}(t)\ u_{sc}(t)]^T$;

$i_s(t) = [i_{sa}(t)\ i_{sb}(t)\ i_{sc}(t)]^T$ $(s = m, n)$;

$u_{fx}(t) = [u_{fxa}(t)\ u_{fxb}(t)\ u_{fxc}(t)]^T$;

$u_{fy}(t) = [u_{fya}(t)\ u_{fyb}(t)\ u_{fyc}(t)]^T$;

R和 L分别为线路的电阻和电感,均为 3×3矩阵。

由图 (2)易知:

$$u_{fx}(t) - u_{fy}(t) = (y-x)\left(R i(t) + L\frac{di(t)}{dt}\right) \quad (3)$$

$i(t)$为一三维列向量,对应于每一种故障有其具体表达式。在这里有:

$$i(t) = [i_{ma}(t) / -i_{na}(t) \quad -i_{nb}(t) \quad i_{mc}(t)]^T$$

其中: $i_{ma}(t) / -i_{na}(t)$表示或者为 $i_{ma}(t)$,或者为 $-i_{na}(t)$,以下类似表述同。

令式 (1)减去式 (2),并结合式 (3)得:

$$u_m(t) - u_n(t) + l\left(R i_n(t) + L\frac{di_n(t)}{dt}\right) =$$

$$x\left(Ri'_m(t)+L\frac{di'_m(t)}{dt}\right)+y\left(Ri'_n(t)+L\frac{di'_n(t)}{dt}\right) \tag{4}$$

式中:

$$i'_m(t)=i_n(t)-i(t)=[0/i_{ma}(t)+i_{na}(t)\quad i_{mb}(t)+i_{nb}(t)\quad 0]^T \tag{5-1}$$

$$i'_n(t)=i_n(t)+i(t)=[0/i_{ma}(t)+i_{na}(t)\quad 0\quad i_{mc}(t)+i_{nc}(t)]^T \tag{5-2}$$

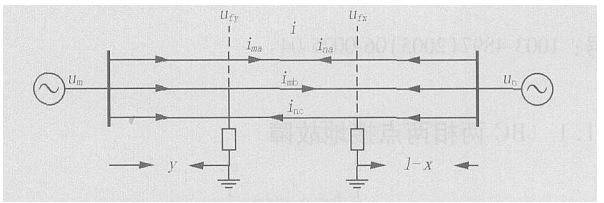

图 3 BC相两点接地 ($x>y$)

Fig 3 Two points earthing on B and C phases ($x>y$)

当 $x>y$时,即 B相故障点距 m母线远,C相近,如图 (3)所示,则有:

$$u_m(t)=y\left(Ri_m(t)+L\frac{di_m(t)}{dt}\right)+u_{fy}(t) \tag{6}$$

$$u_n(t)=(l-x)\left(Ri_n(t)+L\frac{di_n(t)}{dt}\right)+u_{fx}(t) \tag{7}$$

$$u_{fy}(t)-u_{fx}(t)=(x-y)\left(Ri(t)+L\frac{di(t)}{dt}\right) \tag{8}$$

对应于该种故障情况,有:

$$i(t)=[i_{ma}(t)/-i_{na}(t)\quad i_{mb}(t)-i_{nc}(t)]^T$$

同前述推导可得:

$$u_m(t)-u_n(t)+l\left(Ri_n(t)+L\frac{di_n(t)}{dt}\right)=x\left(Ri'_n(t)+L\frac{di'_n(t)}{dt}\right)+y\left(Ri'_m(t)+L\frac{di'_m(t)}{dt}\right) \tag{9}$$

式中:

$$i'_n(t)=i_n(t)+i(t)=[0/i_{ma}(t)+i_{na}(t)\quad i_{mb}(t)+i_{nb}(t)\quad 0]^T \tag{10-1}$$

$$i'_m(t)=i_m(t)-i(t)=[0/i_{ma}(t)+i_{na}(t)\quad 0\quad i_{mc}(t)+i_{nc}(t)]^T \tag{10-2}$$

将式 (4)、(5)和式 (9)、(10)进行比较易知,这两种情况具有统一的测距表达式。

将上述推导推广到 CA两相和 AB两相两点接地可知,这两种故障类型也分别具有统一的测距表达式,因此只对 $x<y$和 $x>y$中的一种情况分别进行讨论即可。下面对 $x<y$时分析,由于均具有式 (4)所示形式,因此只对 $i'_m(t)$和 $i'_n(t)$在不同故障类型下的具体表达式讨论。

1.2 AC两相两点接地故障

设 A相故障距离为 x,C相为 $y(x<y)$。此时:

$$i(t)=[-i_{na}(t)\quad i_{mb}(t)/-i_{nb}(t)\quad i_{mc}(t)]^T$$

则

$$i'_m(t)=[i_{ma}(t)+i_{na}(t)\quad 0/i_{mb}(t)+i_{nb}(t)\quad 0]^T \tag{11-1}$$

$$i'_n(t)=[0\quad 0/i_{mb}(t)+i_{nb}(t)\quad i_{mc}(t)+i_{nc}(t)]^T \tag{11-2}$$

1.3 AB两相两点接地故障

A相故障距离为 x,B相为 $y(x<y)$,此时:

$$i(t)=[-i_{na}(t)\quad i_{mb}(t)\quad i_{mc}(t)/-i_{nc}(t)]^T$$

则

$$i'_m=[i_{ma}(t)+i_{na}(t)\quad 0\quad 0/i_{mc}(t)+i_{nc}(t)]^T \tag{12-1}$$

$$i'_n=[0\quad i_{mb}(t)+i_{nb}(t)\quad 0/i_{mc}(t)+i_{nc}(t)]^T \tag{12-2}$$

现在对式 (5)、式 (11)、式 (12)进行分析比较,可得以下结论:

a 对 BC相两点故障和 AC相两点故障两种故障类型,若:

$$i'_m(t)=[i_{ma}(t)+i_{na}(t)\quad i_{mb}(t)+i_{nb}(t)\quad 0]^T \tag{13-1}$$

$$i'_n(t)=[0\quad 0\quad i_{mc}(t)+i_{nc}(t)]^T \tag{13-2}$$

则该两种故障类型具有统一的测距表达式。

b 对 AC相两点故障和 AB相两点故障两种故障类型,若:

$$i'_m(t)=[i_{ma}(t)+i_{na}(t)\quad 0\quad 0]^T \tag{14-1}$$

$$i'_n(t)=[0\quad i_{mb}(t)+i_{nb}(t)\quad i_{mc}(t)+i_{nc}(t)]^T \tag{14-2}$$

则该两种故障类型具有统一的测距表达式。

事实上,本文在推导中发现,不同故障情况下是否具有统一测距表达式与设定故障距离 x、y时所对应的故障相有关,得出以下结论:

1) 对于 3种两点异相故障 (AB, BC, CA),若 x (或 y)对应相别各不相同,则任何两种故障类型不具有相同测距表达式。如本文中 AC两相故障时,若令 C相对应 x,A相对应 y,其余设定不变,则 3种故障情况有各自的测距公式。

2) 不同故障情况下,若其公共相均对应 x (或

均对应 y),则有关故障情况有相同测距表达式。如本文中 AB相和 AC相故障情况,其公共相 A对应 x; BC相和 AC相故障其公共相 C对应 y。

由上述易知,由于 3种故障情况只是两两间存在公共相,因此不存在对应于 3种故障情况的统一测距表达式。

另外须说明的是,由于故障距离 x和 y的设定有两种可能:如 A - x, B - y;或 A - y, B - x,因此 3种两点异相故障可以产生 8种组合,本文分析针对其中一种组合。

2　测距方程的离散化和求解

线路两端的相电压和相电流可通过采样而得,对式 (4)进行离散化处理得:

$$A(k)X = B(k) \tag{15}$$

式中:

$$B(k) = u_m(k) - u_n(k) + l\left(R\,i_n(k) + L\frac{i_n(k) - i_n(k-1)}{\Delta t}\right)$$

$$A(k) = \left[R\,i'_m(k) + L\frac{i'_m(k) - i'_m(k-1)}{\Delta t} \cdot R\,i'_n(k) + L\frac{i'_n(k) - i'_n(k-1)}{\Delta t}\right]$$

$X = [x \quad y]^T$。

对应于某一次采样值 B(k)为三维列相量; A(k)为 3 ×2矩阵。

其中, k为第 k次采样; Δt为采样步长。

对于具体两点异相故障,选用式 (13)、(14)中与故障类型相对应的代入式 (15)即可实现故障测距。

对于线路只有一点发生故障时,用本文算法做到准确测距,亦毫无问题。

式 (15)为一超定方程组,把三相 k次采样计算后所得之值用最小二乘法求解,可得:

$$X = \frac{\sum_{k=1}^{m} A(k)^T \times B(k)}{\sum_{k=1}^{m} A(k)^T \times A(k)} \quad (m \geq 1)$$

3　ATP仿真实验

为验证算法的正确性,用 ATP软件进行数值仿真研究。所用线路模型为 500 kV线路,全长 100 km,三相对称 (对于线路参数不对称的情况,用本算法进行计算时只需把线路三相不对称参数代入计算,同样可得到测距结果)。

a. 系统参数 (Ω)

$Z_{M1} = 1.051 + j21.8$　$Z_{M0} = j14.5$

$Z_{N1} = 1.042 + j30.5$　$Z_{N0} = j21.3$

b. 线路参数 (阻抗:Ω/km; 电容:μF/km)

$Z_1 = 0.029 + j0.278$　$C_1 = 0.012$

$Z_0 = 0.188 + j0.652$　$C_0 = 0.013$

为计及线路分布参数特性,以若干 π型电路建模。每周期采样 32点。

故障过渡电阻如表 1。

表 1　过渡电阻

Tab. 1　Transient resistances

	1#	2#	3#	4#	5#
R_f/Ω	0	10	50	100	200

仿真计算针对以下几种情况:

1) 两点异相故障时的测距结果,如表 2。其中 BC相两点接地时 $x = 65$, $y = 35$; AB相两点接地时 $x = 50$, $y = 70$; AC相两点接地时 $x = 30$, $y = 80$。

表 2　两点异相故障定位结果

Tab. 2　Results of two points on different phases

	过渡电阻/Ω				
	(1#, 1#)	(2#, 3#)	(3#, 4#)	(3#, 3#)	(4#, 4#)
BCG	64.642	64.321	64.746	64.242	64.551
	34.714	34.510	35.337	35.090	35.775
ABG	49.876	50.098	50.553	50.660	50.575
	69.229	69.367	69.047	69.371	68.869
ACG	30.013	30.165	30.522	30.329	30.813
	79.770	79.801	79.466	79.214	80.029

2) 一点故障时测距结果,如表 3。对 BC相接地故障 $x = y = 50$; AC相接地故障 $x = y = 80$; AB相接地故障 $x = y = 60$。

表 3　一点故障时定位结果

Tab. 3　Results of one point fault

		过渡电阻/Ω			
		(1#, 1#)	(2#, 3#)	(3#, 4#)	(3#, 3#)	(4#, 4#)
BCG		50.107	49.875	49.841	50.397	50.528
		49.873	49.884	50.089	50.268	50.448
ACG		79.652	79.772	79.497	80.531	80.742
		80.173	80.247	79.371	80.452	80.686
ABG		60.067	60.035	60.094	60.279	59.755
		60.110	59.884	59.937	60.380	60.055
			1#	3#	4#	5#
实际故障距离 75km	BG		74.941	74.865	74.399	73.899
	BC		75.660	75.777	76.065	
			75.616	75.824	76.113	
	ABCG		75.110	74.725	75.766	
			75.245	74.579	75.822	

3) 线路长度对测距的影响。以 BC相两点故

障为例, $x = 65$, $y = 35$, 过渡电阻为 (50, 100)。结果如表 4。

表 4 线路长度对测距的影响

Tab. 4 Effect of line length on the location

	线路长度/km			
	130	190	210	250
测量	65.900	66.693	67.129	70.311
结果	36.366	39.953	41.649	43.472

将上述结果与表 2中相比较可见,随着线路长度的增加,线路的分布参数特性愈发明显,电容的影响明显增强,忽略电容的算法将产生较大误差。

4) 两端数据同步误差对测距影响

为考察双端数据同步误差对该算法影响,人为设定双端数据不同步角度为 22.5°,即相差两个采样点。故障为 BC相两点异相故障,B相故障距离为 70 km,C相为 50 km。在仿真中发现,当过渡电阻较大时,测距误差可达 15%以上,远远大于工程实际中不超过 2%的原则。究其原因,是同步误差对单个采样点造成的测距误差累积而致。

所幸的是,近年来 GPS在电力系统中的应用日益广泛成熟,其误差小于 1 μs的高精度同步时钟为数据的同步采集提供了可靠保证,再加上通讯技术的发展应用,从而使得本文基于双端同步采样数据的测距算法得以实现。

4 结论

本文提出的利用输电线路两端数据同步采样值的两点异相故障测距算法的主要特点有:

①算法具有简易性,只需知道线路参数和两端同步采样数据,线路其余部分的运行情况无需知道。

②利用双端电气量,有效克服了故障过渡电阻对测距精度的影响。

③不必事先区分是一点故障还是两点故障,可根据计算结果来判定。

④由于所有分析均在相坐标中进行,当输电线路参数不对称时同样有效。

⑤不但适用于两点异相故障测距,对同点故障做到准确测距亦无问题。

⑥由于算法推导忽略了沿线分布电容,因此适用于短输电线路。当线路加长时,测距误差较大。

参考文献:

[1] 孙立山,孙桂瑛. 使用输电线两端数据两点异相故障测距的研究[J]. 电网技术, 1999, 23(11): 47-49.
SUN Li-shan, SUN Gui-ying. Research on Fault Location Using Two Terminal Data of Transmission Line for Two Point Fault Occurring on Different Phases[J]. Power System Technology, 1999, 23(11): 47-49.

[2] Akagi T T, Yamakoshi Y. Development of a New Type Fault Locator Using the One Terminal Voltage and Current Data[J]. IEEE Trans on Apparatus and Systems, 1982, 101(8): 2892-2898.

[3] 魏孝铭,凌俊银. 故障测距方法及现场实测结果分析[J]. 电网技术, 1994, 18(3): 49-54.
WEI Xiao-ming, LING Jun-yin. Fault Location Algorithm and Field Measured Results Analysis[J]. Power System Technology, 1994, 18(3): 49-54.

收稿日期: 2004-06-29; 修回日期: 2004-08-31

作者简介:

王亚强 (1978 -),男,硕士研究生,从事超高压输电线路微机继电保护方面的学习研究; E-mail: wyq984@163.com

焦彦军 (1963 -),男,博士,硕导,从事微机继电保护方面的教学和科研工作;

王宏伟 (1971 -),男,从事继电保护工作。

Fault location of transmission line for two point fault occurring on different phases based on the time-domain method

WANG Ya-qiang[1], JIAO Yan-jun[1], WANG Hong-wei[2]

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Pingdingshan Power Bureau, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: A time-domain fault location method for the fault of two points on different phases of HV short transmission lines is introduced based on synchronized samples of voltages and currents at two ends of a line. The method is not influenced by the operating mode of the system and transient resistance. All analysis is processing in phase coordinates, and the coordinates' transformations are avoided. The application of least error squares ensures this method high accuracy of locating fault theoretically. For the fault location of one point, this method is also effective.

Key words: synchronized sampling; different phases; fault location; transient resistance