

# 使用两端电气量故障测距算法的研究

孙立山, 陈学允

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**【摘要】** 以分布参数作为高压输电线路的模型, 提出了利用线路一端电压电流和另一端电流(或电压)的测距方法。根据故障类型可求出两端数据采样不同步角, 可对不对称短路故障进行准确测距。其测距精度不受对侧系统运行方式变化的影响。仿真计算表明, 该方法有效。

**【关键词】** 故障测距; 分布参数; 双端输电系统

## 1 引言

故障阻抗测距算法可分为利用单侧信息和双侧信息两种方法。利用单侧信息测距方法不受通信技术条件的限制, 曾得到极大的关注与应用<sup>[1]</sup>, 但在原理上很难克服对侧系统运行方式变化和过渡阻抗的影响。利用双侧信息测距可不受这些因素的影响, 在原理上可以精确地测距。该方法可分为两类, 一是利用两侧电压电流信息<sup>[3-5]</sup>, 二是利用近端电压电流和对端电流信息<sup>[2]</sup>。第一种方法对通信条件要求较高, 在现有的条件下一般只能用于故障后分析。第二种方法所要求传送的信息较第一种方法少一半, 可以根据继电保护已有的信息实现即时测距。

采用双端信息测距所面临的主要问题是两侧数据采样同步问题。正如文献<sup>[3]</sup>所指出的那样, 即使采样同步或采样同步化处理, 考虑到硬件等引入的误差, 亦不应忽视长输电线两侧测量坐标之间客观上的不同步相差。文献<sup>[2]</sup>采用集中参数模型利用两端电流和一端电压进行故障定位, 并对电容充电电流进行了迭代补偿, 但没有考虑两侧数据采样不同步问题。

本文以分布参数做为高压输电线路的模型。利用线路一端电压电流和另一侧的电流(或电压)进行故障定位。首先讨论两侧数据同步的测距方法, 对不同步采样数据, 根据不对称短路的边界条件求出两侧不同步角, 进而实现测距。

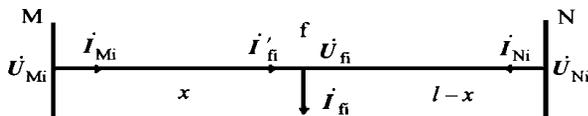


图1 序网结构图

## 2 测距方法

图1为双端系统发生故障时的某序结构图( $i = 0, 1, 2$  分别表示零序, 正序和负序分量)。线路模型为分布参数模型。故障点  $f$  距  $M$  端的距离为  $x$ , 线路总长度为  $l$ 。首先假设两端数据采样同步。对称三相电路, 有  $Z_{c1} = Z_{c2}$ ,  $1 = 2$ 。

### 2.1 故障点电压和电流的表达式

若已知  $M$  侧的电压电流。则故障点的电压  $\dot{U}_{fi}$  可表示为

$$\dot{U}_{fi} = \dot{U}_{Mi} \operatorname{ch}_{-ix} - \dot{I}_{Mi} Z_{ci} \operatorname{sh}_{-ix} \quad (1)$$

若已知  $N$  侧的电流  $\dot{I}_{Ni}$ , 则有

$$\dot{I}_{fi} = \dot{I}_{Ni} \operatorname{ch}_{ix} - \dot{U}_{Ni} / Z_{ci} \operatorname{sh}_{ix} - \dot{I}_{Ni}$$

$$(\dot{I}_{fi} - \dot{I}_{Ni}) \operatorname{ch}_{i(l-x)} - \frac{\dot{U}_{fi}}{Z_{ci}} \operatorname{sh}_{i(l-x)}$$

$$\text{推出 } \dot{I}_{fi} = \frac{\dot{I}_{Ni} + \dot{I}_{Mi} \operatorname{ch}_{il} - \dot{U}_{Mi} / Z_{ci} \operatorname{sh}_{il}}{\operatorname{ch}_{ri}(l-x)} \quad (2)$$

同样, 若已知  $N$  侧的电压  $\dot{U}_{Ni}$ , 则有

$$\dot{U}_{Ni} = \dot{U}_{fi} \operatorname{ch}_{i(l-x)} - (\dot{I}_{fi} - \dot{I}_{Ni}) Z_{ci} \operatorname{sh}_{i(l-x)}$$

$$\text{推出 } \dot{I}_{fi} = \frac{\dot{U}_{Ni} - \dot{U}_{Mi} \operatorname{ch}_{il} + \dot{I}_{Mi} Z_{ci} \operatorname{sh}_{il}}{Z_{ci} \operatorname{sh}_{i(l-x)}} \quad (3)$$

### 2.2 定位方程

假设过渡阻抗是一纯电阻, 则过渡电阻上的无功功率为零。过渡电阻上的复功率为

$$P_f + jQ_f = \sum_{i=0}^2 \dot{U}_{fi} \dot{I}_{fi}^* \quad (* \text{表示取共轭})$$

定位方程

$$Q_f(x) = \operatorname{Im} \left( \sum_{i=0}^2 \dot{U}_{fi} \dot{I}_{fi}^* \right) \quad (4)$$

$$Q_f(x) = 0$$

大量计算表明,  $Q_f(x)$  是单调的, 若选择牛顿—拉夫逊法代计算, 初值可选  $x_0 = l/2$ , 且一般迭代 3 到 5 次即可收敛。因此测距方程  $Q_f(x) = 0$  不存在

伪根剔除问题。

### 3 不同步角 的求取

若两侧数据采样不同步,设不同步角为  $\alpha$ ,若以 M 侧为基准,则 N 侧的电压电流应乘以  $e^j$ ,即 N 侧的电压电流分别表示为  $\dot{U}_{N_i}e^j$  和  $\dot{I}_{N_i}e^j$ 。根据故障边界条件可求出  $\alpha$ 。

#### 3.1 单相接地故障

设故障相为 A 相,故障电流在 A、B、C 座标系统中的边界条件是:

$$\dot{I}_{Af} = \dot{I}_f; \quad \dot{I}_{Bf} = \dot{I}_{Cf} = 0$$

将上式中电流用对称分量表示,则在 0、1、2 座标系统的边界条件为:

$$\dot{I}_{f1} = \dot{I}_{f2} = \dot{I}_{f0} = \frac{1}{3} \dot{I}_f$$

在式(2)和式(3)中分别令  $P_i = \frac{\dot{U}_{M_i}}{Z_{c_i}} \text{sh}_{-i} l - \dot{I}_{M_i}$

$$\text{ch}_{-i} l \text{ 和 } Q_i = \frac{\dot{U}_{M_i}}{Z_{c_i}} \text{ch}_{-i} l - \dot{I}_{M_i} \text{sh}_{-i} l,$$

$$\frac{\dot{I}_{N_1}e^j - P_1}{\text{ch}_{-1}(l-x)} = \frac{\dot{I}_{N_2}e^j - P_2}{\text{ch}_{-2}(l-x)}$$

$$e^j = \frac{P_1 - P_2}{\dot{I}_{N_1} - \dot{I}_{N_2}} \quad (\text{或 } e^j = \frac{Z_{c1}(Q_1 - Q_2)}{\dot{U}_{N_1} - \dot{U}_{N_2}}) \quad (5)$$

#### 3.2 两相短路故障

设故障相为 B、C 相,故障电流在 A、B、C 座标系统中的边界条件为:

$$\dot{I}_{Af} = 0 \quad \dot{I}_{Bf} + \dot{I}_{Cf} = 0$$

将上式中电流用对称分量表示,则得在 0、1、2 座标系统的边界条件为

$$\dot{I}_{f0} = 0; \quad \dot{I}_{f1} + \dot{I}_{f2} = 0$$

$$e^j = \frac{\frac{\dot{U}_{MA}}{Z_{c1}} \text{sh}_{-1} l - \dot{I}_{MA} \text{ch}_{-1} l + \dot{U}_{M0} \left( \frac{\text{sh}_{-0} l}{Z_{c0}} - \frac{\text{sh}_{-1} l}{Z_{c1}} \right) - \dot{I}_{M0} (\text{ch}_{-0} l - \text{ch}_{-1} l)}{\dot{I}_{NA}} \quad (9)$$

同样,若已知 N 侧电压,则有

$$e^j = \frac{\dot{U}_{MA} \text{ch}_{-1} l - \dot{I}_{MA} Z_{c1} \text{sh}_{-1} l + \dot{I}_{M0} \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c0}} \text{ch}_{-0} l - \text{ch}_{-1} l \right) - \dot{I}_{M0} Z_{c1} \left( \frac{-1}{0} \text{sh}_{-0} l - \text{sh}_{-1} l \right)}{\dot{U}_{NA} + \dot{U}_{N0} \left( \frac{-1}{0} \frac{Z_{c1}}{Z_{c0}} - 1 \right)} \quad (9)$$

#### 3.4 三相短路故障

对于三相短路,无边界条件可以利用,为了求出  $\alpha$ ,可利用故障前一周波的数据,若已知故障的两侧电压电流  $\dot{U}_M^{(1)}, \dot{I}_M^{(1)}, \dot{U}_N^{(1)}, \dot{I}_N^{(1)}$  则

$$e^j = [ \dot{U}_M^{(1)} \text{ch}_{-1} l - \dot{I}_M^{(1)} Z_{c1} \text{sh}_{-1} l ] / \dot{U}_N^{(1)}$$

$$e^j = [ \dot{I}_M^{(1)} \text{ch}_{-1} l - \dot{U}_M^{(1)} / Z_{c1} \text{sh}_{-1} l ] / ( - \dot{I}_N^{(1)} )$$

$$\frac{\dot{I}_{N_1}e^j - P_1}{\text{ch}_{-1}(l-x)} + \frac{\dot{I}_{N_2}e^j - P_2}{\text{ch}_{-2}(l-x)} = 0$$

$$e^j = \frac{P_1 + P_2}{\dot{I}_{N_1} + \dot{I}_{N_2}} \quad (\text{或 } e^j = \frac{Z_{c1}(Q_1 + Q_2)}{\dot{U}_{N_1} + \dot{U}_{N_2}}) \quad (6)$$

对两相短路故障,无零序分量,因此  $\dot{I}_{N_1} + \dot{I}_{N_2} = \dot{I}_{NA}, \dot{U}_{N_1} + \dot{U}_{N_2} = \dot{U}_{NA}$ ,因此上式可写为:

$$e^j = \frac{\dot{U}_{MA} / Z_{c1} \text{sh}_{-1} l - \dot{I}_{MA} \text{ch}_{-1} l}{\dot{I}_{NA}} \quad (\text{或}$$

$$e^j = \frac{\dot{U}_{MA} \text{ch}_{-1} l - \dot{I}_{MA} Z_{c1} \text{sh}_{-1} l}{\dot{U}_{NA}}) \quad (7)$$

#### 3.3 两相短路接地故障

设故障相为 B、C 相,在 A、B、C 座标系统的边界条件为

$$\dot{I}_{Af} = 0$$

将上式用对称分量表示,则在 0、1、2 座标系统的边界条件为

$$\dot{I}_{f1} + \dot{I}_{f2} + \dot{I}_{f0} = 0$$

$$\frac{\dot{I}_{N_1}e^j - P_1}{\text{ch}_{-1}(1-x)} + \frac{\dot{I}_{N_2}e^j - P_2}{\text{ch}_{-2}(1-x)} + \frac{\dot{I}_{N_0}e^j - P_0}{\text{ch}_{-0}(1-x)} = 0$$

若近似地取  $\text{ch}_{-1}(l-x) \doteq 1, \text{ch}_{-0}(l-x) \doteq 1$ ,则有

$$e^j = \frac{P_1 + P_2 + P_0}{\dot{I}_{N_1} + \dot{I}_{N_2} + \dot{I}_{N_0}} \quad (8)$$

同理,若近似地取  $\text{sh}_{-1}(l-x) \doteq \text{sh}_{-1}(l-x), \text{sh}_{-0}(l-x) \doteq \text{sh}_{-0}(l-x)$ ,则

$$e^j = \frac{Z_{c1}(Q_1 + Q_2 + \frac{-1}{0} Q_0)}{\dot{U}_{N_1} + \dot{U}_{N_2} + \frac{-Z_{c1}}{Z_{c0}} \dot{U}_{N_0}} \quad (8)$$

由  $\dot{I}_{N_1} + \dot{I}_{N_2} + \dot{I}_{N_0} = \dot{I}_{NA}, \dot{U}_{M_1} + \dot{U}_{M_2} + \dot{U}_{M_0} = \dot{U}_{MA}, \dot{I}_{M_1} + \dot{I}_{M_2} + \dot{I}_{M_0} = \dot{I}_{MA}$ ,得

#### 3.5 测量误差对 精度的影响

假设正常运行时,各母线测量值是准确的,发生故障后,非故障相电压电流变化不大,其测量值也是准确的;而故障相电压电流变化很大,假设其测量值与真实值之间有一误差。

对单相接地故障,假设故障相为 A 相,A 相电

电压电流测量值  $\dot{U}_A$  和  $\dot{I}_A$  与真实值  $\dot{U}_A$  和  $\dot{I}_A$  有一误差,分别为  $\dot{U}_A$  和  $\dot{I}_A$ ,而B、C相电压和电流测量值是准确的。在A、B、C座标系统可表示为  $\dot{U}_A = \dot{U}_A + \dot{U}_A, \dot{I}_A = \dot{I}_A + \dot{I}_A, \dot{U}_B = \dot{U}_B, \dot{I}_B = \dot{I}_B, \dot{U}_C = \dot{U}_C, \dot{I}_C = \dot{I}_C$ 。

在0、1、2座标系统可表示为:

$\dot{I}_1 = \dot{I}_1 + \dot{I}, \dot{I}_2 = \dot{I}_2 + \dot{I}, \dot{I}_0 = \dot{I}_0 + \dot{I}, \dot{U}_1 = \dot{U}_1 + \dot{U}, \dot{U}_2 = \dot{U}_2 + \dot{U}, \dot{U}_0 = \dot{U}_0 + \dot{U}$ 。由式(5)可得:

$$e^j = \frac{P_1 - P_2}{\dot{U}_{M1} - \dot{U}_{M2}} = \frac{P_1 - P_2}{\dot{U}_{M1} - \dot{U}_{M2}}$$

$e^j$  和测量误差  $I$  和  $U$  无关。即不受测量误差的影响。

对于两相短路故障,若A相是非故障相,假设A相的测量值是准确的,而BC相的测量值有误差,由式(7)可以看出  $e^j$  和B相及C相的电压电流无关,因此按式(7)计算出的  $e^j$  和测量误差无关,即不受测量误差的影响。

对于两相短路接地故障,若非故障相A相的测量值是准确的,由于有零序分量存在,而零序分量则受测量误差的影响,因此按式(9)或(9)计算,则受测量误差的影响,但影响不大;特殊地,若两侧电压的测量值是准确的,即零序电压是准确的,而故障相电流测量值有误差,由于  $\text{ch}_0 l \doteq \text{ch}_1 l, 1 \text{sh}_0 l \doteq 0 \text{sh}_1 l$ ,因些按式(9)或(9)计算出的  $e^j$  几乎不受电流测量误差的影响。

## 4 故障测距数字仿真

### 4.1 数字滤波

上述测距算法利用一侧电压电流和另一侧的电流(或电压)的工频量。本侧电压电流和通道送来的电流(或电压)均为瞬时值的离散形式,而这些代表

电压电流波形的瞬时值中含有衰减的直流分量和各次谐波分量。因此要考虑使用合适的数字滤波算法。本文利用故障后第二周波的采样值,采用一阶差分与全波傅里叶算法级联的综合滤波算法,一阶差分滤波对衰减的直流分量具有较强的抑制作用,而全波傅里叶算法能方便地求取复数相量,能滤除直流分量和奇次谐波。

### 4.2 仿真计算

系统模型如图2所示:

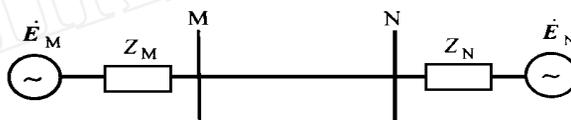


图2 仿真模型网络

系统参数为:

$$Z_{M1} = 1.0515 + j43.176$$

$$Z_{N1} = 1.0577 + j44.92$$

$$Z_{M0} = j29.0925, Z_{N0} = j32.47$$

线路参数为:

$$r_1 = 0.0208 / \text{km}, L_1 = 0.8984 \text{mH} / \text{km}, C_1 = 0.0129 \mu\text{F} / \text{km}, r_0 = 0.1148 / \text{km}, L_0 = 2.2885 \text{mH} / \text{km}, C_0 = 0.0523 \mu\text{F} / \text{km}, \text{线路全长 } l = 300 \text{km}$$

在仿真计算中,将N侧电流(或电压)旋转30°,即不同步角为30°。计算结果如表1所示。对单相接地和相间短路故障,由于可以准确求出不同步角,因而所求的故障位置  $x$  也是准确的。对两相短路接地故障,由于在求  $e^j$  时取了近似计算。因而所求  $e^j$  有一误差,并且越靠近M侧误差越大。由于算法采用分布参数模型,考虑了对地电容,因而,定位方程和故障电阻的大小无关。

表1 故障测距仿真结果

实际故障位置(km)			30	60	90	120	150	180	210	240	270
故障类型	A - G	$R_f = 5$	$30^\circ$	$30^\circ$							
		$x$	30.00	60.00	90.00	120.00	150.00	180.00	210.00	240.00	270.00
	B - C	$R_f = 100$	$30^\circ$	$30^\circ$							
		$x$	30.00	60.00	90.00	120.00	150.00	180.00	210.00	240.00	270.00
	B - C - G	$R_f = 5$	$30^\circ$	$30^\circ$							
		$x$	30.00	60.00	90.00	120.00	150.00	180.00	210.00	240.00	270.00
B - C - G	$R_d = 5$	$29.68^\circ$	$29.75^\circ$	$29.83^\circ$	$29.88^\circ$	$29.92^\circ$	$29.95^\circ$	$29.96^\circ$	$29.98^\circ$	$29.99^\circ$	
	$x$	29.75	59.98	89.98	119.98	149.99	179.99	210.00	240.00	270.00	
	$R_d = 50$	$29.82^\circ$	$29.86^\circ$	$29.90^\circ$	$29.92^\circ$	$29.95^\circ$	$29.96^\circ$	$29.98^\circ$	$29.99^\circ$	$29.99^\circ$	
	$x$	29.97	60.00	90.02	120.03	150.03	180.03	210.02	240.01	270.00	

## 5 结论

本文提出的利用一端电压电流和另一端电流(或电压)的双端输电线路故障测距算法其特点如下:

(1) 双端数据采样不必同步。对单相接地和相间短路故障,可以准确求出两侧不同步角,且不受测量误差的影响;对两相短路接地故障,可近似求出不同步角,其误差满足定位要求,且受测量误差的影响很小。

(2) 采用了分布参数模型,考虑了对地电容的影响,测距方程不受过渡电阻的影响。

(3) 算法所用到的信息量为本侧电压电流和对侧电流(或电压),需要传递的信息少,根据现有的条件,可以实现实时测距。

### [参考文献]

- [1] 胡帆,刘沛,程时杰. 高压输电线路故障测距算法仿真

研究. 中国电机工程学报, 1995, 15(1): 67 ~ 72.

- [2] 董新洲,葛耀中. 一种使用两端电气量的高压输电线路故障测距算法. 电力系统自动化, 1995, 19(8): 47 ~ 53.
- [3] Grgis A A, et al. A new fault location technique for two - and three - terminal lines. IEEE Trans, 1992, PWRD - 7(1): 98 ~ 107.
- [4] Damir Novosel, et al. Unsynchronized Two - Terminal Fault Location Estimation. IEEE Trans, 1996, PWRD - 11(1): 130 ~ 137.
- [5] 束洪春,陈学允,许承斌. 多端辐射状输电线路故障测距的一种实用算法. 电力系统自动化, 1998, 22(2): 21 ~ 25.

收稿日期: 1998—11—02

作者简介: 孙立山(1964 - ), 男, 讲师, 博士生, 研究方向为电力系统故障测距; 陈学允(1934 - ), 男, 教授, 博导, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统自动化技术及智能技术在电力系统中的应用。

## DEVELOPMENT OF A FAULT LOCATION METHOD FOR USING ONE TERMINAL VOLTAGE CURRENT AND ANOTHER TERMINAL CURRENT(OR VOLTATGE)

SUN Li-shan, CHEN Xue-yun

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract** This paper presets a new fault location method using one terminal voltage current and another terminal current (or voltage) based on distributed parameters line model. The two terminal data sampling unsynchronized angle can be acquired according to fault type. The method can precisely location for unsymmetrical fault and exclude the influences of fault resistance, system operation condition. The digital simulation verifies the high accuracy and applicability of provided algorithm.

**Key words** fault location; distributed parameters; two - terminal transmission systems

(上接第 3 页)

### [参考文献]

- [1] 刘健,倪建立,陈源等. 银川城区配电网自动化系统. 电力系统自动化, 1998, 8(8).
- [2] 叶世勋,张步林,叶曦,潘华明,汪政. 金藤工业园配电网自动化系统及其技术讨论. 电力自动化, 1988, 8(8).

收稿日期: 1998—10—20

作者简介: 孙德胜(1975 - ), 男, 哈尔滨工业大学电力科学研究所, 硕士研究生, 从事计算机在电力系统中的应用及配电自动化的研究; 郭志忠(1961 - ), 男, 哈尔滨工业大学电力系统及其自动化教研室主任, 教授, 博士生导师; 王刚军(1969 - ), 男, 许昌继电器研究所自动化室设计员, 硕士, 从事电力系统调度自动化及监控系统平台的设计研究工作。

## SUMMARIZATION ON DISTRIBUTION AUTOMATION SYSTEM

SUN De-sheng<sup>1</sup>, GUO Zhi-zhong<sup>1</sup>, WANG Gang-Jun<sup>2</sup>, LI Jiang-Lin<sup>2</sup>

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China)

**Abstract** This paper analyzes the international and national conditions about research and development of Distribution Automation. At the same time it introduces the functions and elements of Distribution Automation. At last, the paper puts forward some advice in dividing software.

**Keywords** distribution automation; transformer substation automation; feeder automation; power supplying in net - loop; load monitoring and controlling