

# 一种输电线路故障测距算法

周大敏 重庆后勤工程学院 (630041)

**摘要** 本文在分析文献<sup>[1][2]</sup>测距算法的基础上,提出了一种利用输电线路两端电气量进行故障点定位的方法。该方法无需将两端电气量进行坐标归一化处理,算法原理简单、计算量小,无真、伪根判别困难,适用于多种信号输入,大量的数字仿真结果证明算法是正确的。

**关键词** 输电线路 故障点定位 微机算法 数字仿真

## 引言

输电线路故障点的准确定位,对于加速线路故障的排除,从而提高运行可靠性,减少因停电造成的综合经济损失,具有十分重要的作用。因此,对故障定位方法的探索受到了人们的重视。特别是近年来,随着计算机在电力系统的广泛应用,计算机故障定位方法的研究,成为最热门的课题之一,已有一些实际装置投入运行,取得了明显的效益。

基于单端电气量的故障测距方法要解决以下几个问题:

- 故障点过渡电阻
- 对侧系统运行阻抗
- 负荷电流

针对以上问题进行了许多研究,在一定条件下提出了一些有影响的算法。但是,理论上说,单端电气量的测距算法受对端系统阻抗变化的影响不易消除,这导致在经过渡电阻短路时,测距出现很大误差。随着电网自动化水平的提高以及光纤通讯的引入,线路两端的数据交换已十分容易,利用线路两端的信息进行故障定位成为可能。文献<sup>[1]</sup>提出了利用本侧数字阻抗继电器的测量阻抗和电流以及对侧的相应量。一般情况下,该方法能获得满意的结果,但当短路发生在线路中心附近,两侧供给短路点的电流大致相等时,测距出现很大误差。由于线路两端电气量测量不同步,当用电气量向量表示故障距离时,需将两端电气量进行坐标归一化处理,文献<sup>[1][2]</sup>采用了相同的处理方法,且有以下不足:

- ①在单相接地时,通过信道交换的电气量较多( $I_0$ 幅值,  $I_0/(I_1+3KI_0)$ ,  $Z_m$ ),共计5个。
- ②两侧电气量相对相角计算式为:

$$\cos\theta = (-d \pm c \sqrt{c^2 + d^2 - 1}) / (c^2 + d^2)$$

对应的 $\theta$ 角有4个,进而根据 $\theta$ 求出的4个故障距离 $l$ 都可能落入被保护线内,真解判断比较困难。

- ③求解过程复杂,计算量大。

本文利用输电线路两端的基频分量电压、电流,提出了一种输电线路故障点准确定位方法。该方法允许线路两端电气量测量不同步,避免了坐标归一化处理过程,各种故障时,通过信道交换的数据仅三个。它们可以是:

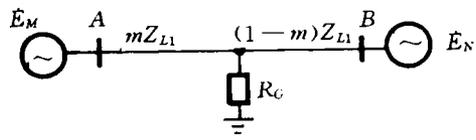
- ①电压、电流幅值和电流滞后于电压的相角。
- ②测量阻抗 $Z_m$ 和电流幅值。

本文1994年3月26日收稿

算法原理简单，计算量小，适用于相、序分量。最后给出的数字仿真结果，验证了算法的正确性。

## 1 故障定位算法

图 1 所示双侧电源系统，假定在线路 A、B 端装有微机保护或其它数字测量装置。在距母线 m 处发生三相接地短路，各相对地电阻为  $R_G$ 。故障点 F 的电压可以表示为



$$\begin{aligned} \dot{V}_F &= \dot{V}_{AR} - mZ_{L1} \dot{I}_{AR} & (1) \\ \dot{V}_F &= \dot{V}_{BR} - (1-m)Z_{L1} \dot{I}_{BR} & (2) \end{aligned}$$

$\dot{V}_{AR}$ 、 $\dot{I}_{AR}$ : 线路 A 端测得的电压、电流基波分量;  
 $\dot{V}_{BR}$ 、 $\dot{I}_{BR}$ : 线路 B 端测得的电压、电流基波分量;  
 $Z_{L1}$ : 线路正序阻抗。

图 1 双侧电源系统

由式 1、2 可求得故障点距 A 端的距离为：

$$m = \frac{\dot{V}_{AR} - \dot{V}_{BR} + \dot{I}_{BR} Z_{L1}}{\dot{I}_{AR} + \dot{I}_{BR}} \quad (3)$$

如果在同一坐标系中知道电压、电流的相角，由上式可计算出故障点的准确位置。由于线路两端电气量测量不同步，所以式 3 中电压、电流相角并非两端直接测量的结果，坐标归一化处理的计算是比较繁杂的。本文提出一种新的求解方法，避免了这种坐标归一化处理过程，所推导的算法适用于相、序分量，扩大了应用范围。

### 1.1 算法推导

令  $\theta_{AR}$ 、 $\theta_{BR}$  分别是  $\dot{V}_{AR}$ 、 $\dot{V}_{BR}$  的相角， $\theta_A$ 、 $\theta_B$  分别是  $\dot{V}_{AR}$ 、 $\dot{V}_{BR}$  超前于  $\dot{I}_{AR}$ 、 $\dot{I}_{BR}$  的角度。

在式 1 中，将等式两端向量顺时针转  $\theta_{AR}$ ，即乘上因子  $e^{-j\theta_{AR}}$ ，则：

$$\begin{aligned} \dot{V}_F e^{-j\theta_{AR}} &= \dot{V}_{FA} \\ \dot{V}_{AR} e^{-j\theta_{AR}} &= \dot{V}_{AR} \\ \dot{I}_{AR} e^{-j\theta_{AR}} &= \dot{I}_{AR} e^{-j\theta_{AR}} \end{aligned}$$

式 1 变成：

$$\dot{V}_{FA} = \dot{V}_{AR} = mZ_{L1} \dot{I}_{AR} e^{-j\theta_{AR}} \quad (4)$$

同样，式 2 两端向量顺时针转  $\theta_{BR}$ ，即：

$$\begin{aligned} \dot{V}_F e^{-j\theta_{BR}} &= \dot{V}_{FB} \\ \dot{V}_{BR} e^{-j\theta_{BR}} &= \dot{V}_{BR} \\ \dot{I}_{BR} e^{-j\theta_{BR}} &= \dot{I}_{BR} e^{-j\theta_{BR}} \end{aligned}$$

式 2 变成：

$$\dot{V}_{FB} = \dot{V}_{BR} - (1-m)Z_{L1} \dot{I}_{BR} e^{-j\theta_{BR}} \quad (5)$$

式 4、5 中， $\dot{V}_{FA}$ 、 $\dot{V}_{FB}$  分别是 A、B 端推得的故障点电压向量，它们的相角可能不同，但幅值必相等。即：

$$|\dot{V}_{FA}| = |\dot{V}_{FB}| \quad (6)$$

代入 4、5 两式，得：

$$|\dot{V}_{AR} - m\dot{I}_{AR}Z_{L1}e^{-j\theta_A}| = |\dot{V}_{BR} - (1-m)\dot{I}_{BR}Z_{L1}e^{-j\theta_B}| \quad (7)$$

由上式就可求出故障距离 m。令  $Z_{L1} = R + jx$ ，将式 7 两端平方，化简整理得：

$$Am^2 + Bm + C = 0 \quad (8)$$

式中:  $A = b_1^2 + b_2^2 - a_1^2 - a_2^2$ ,  $B = 2(b_0b_1 + a_0a_1 - b_1^2 - b_2^2)$ ,

$$C = (b_0^2 + b_1^2 + b_2^2 - 2b_0b_1 - a_3^2)$$

$$a_0 = V_{AR}, a_1 = I_{AR} (R \cdot \cos\theta_A + X \cdot \sin\theta_A), a_2 = I_{AR} (X \cdot \cos\theta_A - R \cdot \sin\theta_A)$$

$$b_0 = V_{BR}, b_1 = I_{BR} (R \cdot \cos\theta_B + X \cdot \sin\theta_B), b_2 = I_{BR} (X \cdot \cos\theta_B - R \cdot \sin\theta_B)$$

详细推导见附录。

解式 8 得到两个根:  $m_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ ,  $m_2 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ , 当输入信号类型不同时, 对应解的表达式也不一样, 后面将作讨论。

从式 7 看出, 从对侧送来的信息有  $V_{BR}$ 、 $I_{BR}$  和  $\theta_B$ , 而 A 端的电气量可以是实测的电压、电流向量  $V_{AR}$ 、 $I_{AR}$ , 无一定要换算成  $V_{AR}$ 、 $I_{AR}$  和  $\theta_A$  的必要。如 A、B 两端装有微机距离保护, 则两端的测量阻抗  $Z_A$ 、 $Z_B$  已知, 加上两端, 测得的电流幅值  $I_{AR}$ 、 $I_{BR}$ , 有:

$$V_{AR} = |Z_A| I_{AR} \quad \theta_A = \text{crg} Z_A$$

$$V_{BR} = |Z_B| I_{BR} \quad \theta_B = \text{crg} Z_B$$

式 8 中的电压、电流可以是各相的量, 也可以是各序故障分量及其组合, 下面分别讨论。

### 1.2 输入为相电压、相电流

当输入为各相电压、电流时, 本文的故障定位方法实际上是求图 2 中两直线  $L_1$ 、 $L_2$  的交点位置。

各种故障情况下, 电压、电流按表 1 选取:

表 1 各种故障情况下继电器的处理信号

故障类型	AG	BG	CG	ABC	AB	ABG	BC	BCG	CA
电压 $V_R$	$V_a$	$V_b$	$V_c$	$V_a - V_b$	$V_b - V_c$	$V_c - V_a$			
电流 $I_R$	$I_a + 3KI_0$	$I_b + 3KI_0$	$I_c + 3KI_0$	$I_a - I_b$	$I_b - I_c$	$I_c - I_a$			

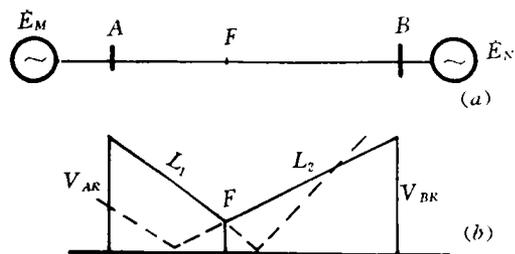


图 2 输入为相电压, 相电流

表中:  $K = \frac{Z_{L,2} - Z_{L,1}}{3Z_{L,1}}$ ,  $Z_{L,0}$ : 线路零序阻抗,  $Z_{L,1}$ : 线路正序阻抗

从图 2 看出如果短路靠近某一侧或某一侧的系统阻抗比较大时, 按式 8 求出的两个根  $m_1$ 、 $m_2$  都可能满足  $0 \leq m_1 \leq 1$ ,  $0 \leq m_2 \leq 1$ , 似乎会出现根的选择困难。真伪根的选择在其它算法中是一个棘手问题。事实上, 本文的算法是按幅值关系导出的, 理论分析和大量数字仿真都

说明, 当式 7 中信号  $V_R$ 、 $I_R$  的型式一定时, 真根所对应的表达式是不变的。当  $V_R$ 、 $I_R$  不是纯故障分量时, 应选取  $m_1$  作为方程 8 的真根, 即故障距离为:

$$m = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (9)$$

### 1.3 输入为故障序分量

当输入的电压、电流为正序、负序、零序故障分量时, 本文的故障定位方法实际上是求图 3 中两直线  $L_1$ 、 $L_2$  的交点位置。

从图 3 看出, 由式 8 求出的根  $m_1$ 、 $m_2$ , 仅有一个落于  $[0, 1]$  内, 并且该根所对应的解的表达

式为： $m = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ ，这是由于故障分量电流是由故障点流向系统，与短路电流流向相反所致。也可以将正序、负序和零序分量的组合作为输入。当组合信号中包含零序电流时，应引入系数  $K = (Z_{L0} - Z_{L1}) / (3Z_{L1})$ 。

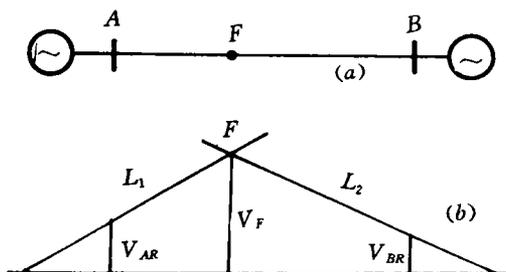
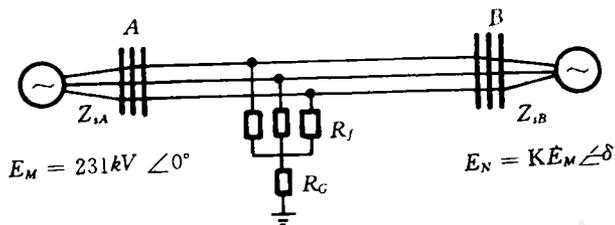


图3 输入为故障序分量



$Z_{L1} = 19.4 + j101.3 \Omega$   $Z_{L0} = 70.7 + j314.0 \Omega$   
系统阻抗  $Z_{S0}, Z_{S1}, Z_{S2}$  任意设定

图4 算法数字仿真模型

## 2 数字仿真结果

为验证本文的故障定位方法，以图4所示系统进行了数字仿真。对重负荷、轻负荷、功率换向、不同地点发生各种短路，以及输入为相电压、相电流，故障序分量及其组合等情况进行了大量计算。表2仅给出按相电压、电流作为输入的仿真结果。

表2 算法仿真结果

故障类型	实际故障位置(m), Pu	计算故障位置(m), Pu	条件
相一地	0.8	0.8	$\delta = 30^\circ$
相-相	0.8	0.8	$K = 0.8$
相-相-地	0.8	0.8	$R_f = 10 \Omega$
3相	0.8	0.8	$R_g = 1000 \Omega$
相-相	0.6	0.6	$\delta = -30^\circ$
相一地	0.6	0.6	$K = 1.2$
相-相-地	0.6	0.6	$R_f = 10 \Omega$
3相	0.6	0.6	$R_g = 1000 \Omega$
相一地	0.4	0.4	$\delta = 60^\circ$
相-相	0.4	0.4	$K = 0.8$
相-相-地	0.4	0.4	$R_f = 10 \Omega$
3相	0.4	0.4	$R_g = 1000 \Omega$
相一地	0.2	0.2	$\delta = -60^\circ$
相-相	0.2	0.2	$K = 1.2$
相-相-地	0.2	0.2	$R_f = 10 \Omega$
3相	0.2	0.2	$R_g = 1000 \Omega$

## 3 结论

本文基于输电线路两端的基频分量提出了一种故障定位方法，该方法原理简单，计算量

小,无多根的判断困难,同时具有适用于多种信号输入,由信道交换信息少等优点,数字仿真结果证明,本文的方法是正确的。

### 参考文献

- 1 Sachdev MS, Agarwal R. Accurate Fault Location Estimation from Digital Impedance Relay Measurements. 3rd International conference on Developments In power system protection.
- 2 Jeyasurya B, Rahman M. Accurate Fault Location of Transmission Lines Using Microprocessors. 4th International Conference on Developments In power System protection.

附录:

令  $Z_{L1} = R + jX$ , 代入式 7,

$$\begin{aligned} \text{左端} &= V_{AR} - mI_{AR}(R + jX)(\cos\theta_A - j\sin\theta_A) \\ &= V_{AR} - mI_{AR}(R \cdot \cos\theta_A + X \cdot \sin\theta_A) - jmI_{AR}(X \cdot \cos\theta_A - R\sin\theta_A) \\ &= a_0 - ma_1 - jma_2 \end{aligned} \quad (F-1)$$

其中:  $a_0 = V_{AR}$ ,  $a_1 = I_{AR}(R \cdot \cos\theta_A + X \cdot \sin\theta_A)$ ,  $a_2 = I_{AR}(X \cdot \cos\theta_A - R\sin\theta_A)$

$$\begin{aligned} \text{右端} &= V_{BR} - (1-m)I_{BR}(R + jX)(\cos\theta_B - j\sin\theta_B) \\ &= V_{BR} - (1-m)I_{BR}(R \cdot \cos\theta_B + X \cdot \sin\theta_B) - j(1-m)I_{BR}(X \cdot \cos\theta_B - R \cdot \sin\theta_B) \\ &= b_0 - (1-m)b_1 - j(1-m)b_2 \end{aligned} \quad (F-2)$$

其中:  $b_0 = V_{BR}$ ,  $b_1 = I_{BR}(R \cdot \cos\theta_B + X \cdot \sin\theta_B)$ ,  $b_2 = I_{BR}(X \cdot \cos\theta_B - R\sin\theta_B)$

根据式 7, 对 (F-1)、(F-2) 式取平方, 化简整理得到:

$$Am^2 + Bm + C = 0 \quad (F-3)$$

其中:  $A = (b_1^2 + b_2^2 - a_1^2 - a_2^2)$ ,

$$B = 2(b_0b_1 + a_0a_1 - b_1^2 - b_2^2)$$

$$C = b_0^2 + b_1^2 + b_2^2 - 2b_0b_1 - a_0^2$$

## 《机械科学与技术》征订启示

邮发代号: 28-220 全年定价: 10.80 元

国内统一刊号: CN32-1238/TH

国际标准刊号: ISSN1001-0513

《机械科学与技术》创刊于 1964 年, 系机械行业综合性技术刊物, 全国公开发行。

本刊以实用技术为主, 重点介绍机械设计(优化设计、可靠性设计、计算机辅助设计等)制造、管理等方面的新技术、新工艺、新产品、新材料、新经验以及国内外科技成果、现场经验和信息动态等, 并为用户刊登产品广告。

本刊由江苏省机械工业厅、江苏省机械工程学会和江苏省机械研究设计院联合出版。即日起办理 1994 年补订和 1995 年度订阅手续。

本刊为迎接创刊 30 周年将开展千字百元征稿评选和征集刊标设计等庆祝活动。

地址: 南京市长虹路 445 号《机械科学与技术》编辑部

邮政编码: 210012