

高压线路故障测距实用方法

广州供电局 龚建平

摘要 高压线路故障测距有三种实用方法：(1) 微分方程法 (2) 相量迭代法 (3) 迭代修正的微分方程法。从基本原理、误差分析等方面较为详细的进行了理论推导分析和评价。对高压线路故障测距装置及算法的研究进行了探讨。

关键词 故障测距 微分方程法 相量迭代法 迭代修正法

1 引言

高压线路在发生故障之后，一项重要的工作是巡线找故障点并处理，这是确保电力系统安全可靠供电的重要措施。过去乃至目前，故障定位的方法大都是根据录波器显示出的短路电流，并假设故障短路是金属性的，去对照事先已计算好的某一最接近运行方式下的短路电流曲线，确定故障的位置。这种方法非常粗略，误差很大，甚至根本无法确定。给巡线人员带来了很大的困难，有时贻误了故障处理时机。

对故障定位，也即故障测距的研究，国内外已进行了几十年。测距技术有了较大的发展，出现了许多不同原理、不同方法的故障测距，如：利用阻抗距离继电器原理的测距方法、利用行波反射原理的测距方法、以及同步测量双侧变量进行计算的测距方法等。但这些方法不是误差大，就是实现复杂，没能真正走向实用。

微型计算机技术在电力系统的应用和发展真正给故障测距技术注入了活力。微型机体小量轻，价格低、设备少、速度快、软件设计灵活，这些都是故障测距技术走向实用的基础。特别是随着微型故障录波器的发展，可以在不增加硬件设备，而只需增加部分软件的情况下，实现故障测距，这样使故障测距技术如故障录波技术有机地结合在一起，使故障录波器被赋予了新的功能。

近年来，国内在故障测距方面发展很快，出现了不少基于微型机的故障测距技术方法。有些已在实际产品中被采用，进入变电站运行，如：微型线路保护 WXB-01，WXH-01，WGXL-01，微型故障录波器 WLB-96 和 WDS-2B，其中一些在实际故障测距中取得良好效果。微机故障测距技术出现时间不长，仍处于发展之中，特别是运行考验时间短，无论在理论上、还是实际使用中，都有不少需认识和改进。本文对实现较为现实的三种故障测距方法进行分析对比，并对它们的采用提供建议。

2 微分方程法

2.1 基本原理

假设所测输电线分布电容可以忽略，从故障点到装置安装处的线路段可用电阻—电感串联电路来表示，如图 1。在短路故障时，下列微分方程成立：

$$U = DR_1 i + DL_1 di/dt + R_f i_f \quad (1)$$

式中： R_1 、 L_1 为线路单位正序电阻和电抗

R_f 为短路的过渡电阻

i_f 为流经过渡电阻的电流

u 、 i 为装置安装处的测量变量

对于相间故障,如 AB 相间短路,取 u 为 $u_a - u_b$, 取 i 为 $i_a - i_b$, 有

$$u_{ab} = DR_1 i_{ab} + DL_1 \frac{di_{ab}}{dt} + R_f i_f \quad (2)$$

对于接地故障,如 A 相接地短路,取 u 为 u_a , 取 i 为 $i_a + k_1 3i_0$:

$$u_a = DR_1 (i_a + k_1 3i_0) + L_1 D \frac{d(i_a + k_1 3i_0)}{dt} + R_f i_f \quad (3)$$

式中: $k_r = \frac{R_0 - R_1}{3R_1}$, $k_l = \frac{L_0 - L_1}{3L_1}$ 为电阻及电感分量的零序补偿系数。

R_0 、 L_0 为线路单位长度零序电阻及电抗值。

式(1)、(2)、(3)中的 i 、 u 、 i_{ab} 、 u_{ab} 、 i_a 、 u_a 、 i_0 都是装置安装处可直接测量到的,而 i_f 的大小和幅角不能测量到, R_f 也是无法知道的。

显然,有如此多的未知量,而只根据式(2)或(3)计算出距离是很难的,必须作一定假设。

假设:故障处的某电流与装置安装处的某同类电流相位相同。

以下以单相 A 相短路故障为例,推导求解微分方程,得出故障距离。

单相短路时,故障处总电流为其零序电流的三倍:

$$i_f = 3i_{f0} \quad (4)$$

设故障处零序电流和装置安装处零序电流同相位,则有:

$$i_{f0} = k i_0 \quad (5)$$

$$\text{因此, } R_f i_f = R_f 3i_0 = R_f \cdot 3i_0 \quad (6)$$

将式(6)代入(3),整理后为:

$$u_a = DR_1 i_a + (DR_1 k_r + R_f) \cdot 3i_0 + DL_1 \frac{d(i_a + k_l 3i_0)}{dt} \quad (7)$$

这样,式(7)中真正只有二个未知数: D 和 R_f 。 u_a 、 i_a 、 $3i_0$ 分别是某一时刻的瞬时值, $\frac{d(i_a + k_l 3i_0)}{dt}$ 为某一时刻导数值,可以用差分近似计算得。因此,只要取两个时刻的值,就可列出两个独立的(7)方程式,可以很容易地解出两个未知数 D 和 R_f 。

取相邻时刻 t_1 、 t_2 , 有联立方程式:

$$\begin{cases} u_a(t_1) = DR_1 i_a(t_1) + (DR_1 + R_f) 3i_0(t_1) + DL_1 \frac{d(i_a + k_l 3i_0)}{dt} \Big|_{t_1} \end{cases} \quad (8)$$

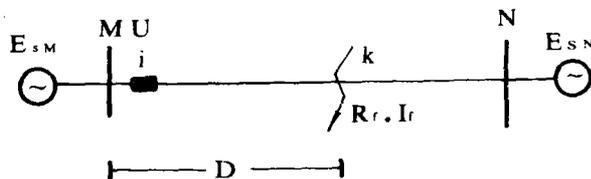
$$\begin{cases} u_a(t_2) = DR_1 i_a(t_2) + (DR_1 + R_f) 3i_0(t_2) + DL_1 \frac{d(i_a + k_l \cdot 3i_0)}{dt} \Big|_{t_2} \end{cases} \quad (9)$$

解得:

$$D = \frac{u_a(t_1) \cdot 3i_0(t_2) - u_a(t_2) \cdot 3i_0(t_1)}{R_1 [i_a(t_1) \cdot 3i_0(t_2) - i_a(t_2) \cdot 3i_0(t_1)] + L_1 [\rho(t_1) 3i_0(t_2) - \rho(t_2) 3i_0(t_1)]} \quad (10)$$

其中:

$$\rho(t_1) = \frac{d(i_a + k_l 3i_0)}{dt} \Big|_{t_1}$$



E_{SM} 、 E_{SN} 为两侧电源等值机
图 1 两侧电源线路系统示意图

$$p(t_2) = \frac{d(i_a + k_i \cdot 3i_0)}{dt} \Big|_{t_2}$$

2.2 误差分析

(1) 从原理看, 微分方程法的误差主要来自于所作的假设, 即: 故障处某电流与安装处某同类电流同相位。这只有在两侧均为理想无穷大电源时成立, 实际是不可能的。当故障是金属性短路时, $R_f=0$, 故障处于安装处某同类电流的相位差将不影响测距的精度。当短路为非金属性时 $R_f>0$, 该相位差将影响测距精度, 而且过渡电阻越大, 相位差越大, 测距误差也越大。这一点在动模试验中得到了证明, 当 R_f 大到一定时, 测距结果有时近乎荒诞。同时动模试验还证明, 误差与短路点位置, 双侧电源情况, 故障前负荷情况也不同程度地影响测距精度。

(2) 计算机计算时, 以差分代替导数也将引起误差。采样频率越低, 误差越大, 因此测距计算一般要求采样频率较高。

2.3 特点

- (1) 算法简单, 无需双侧电源参数, 与两侧和本线故障前运行方式无关。
- (2) 计算快速, 只需测几个时刻的瞬时值, 就可求出距离。
- (3) 算法不必滤除非周期分量, 需要的总时窗短。这在故障跳闸总时间较短时, 很有意义。
- (4) 算法存在有原理误差, 并且随过渡电阻增加而增大。

3 相量迭代法

3.1 基本原理:

在微分方程法中, 由于假设故障处某电流与安装处的某可测同类电流同相, 造成原理上测距误差。为解决这个问题, 出现了相量迭代法。相量迭代法以迭代计算, 使故障处电流的相位收敛于其真实值。

如图 2 为一双侧电源的线路发生区内故障 (以 A 相接地故障为例):

可列相量方程:

$$\dot{U}_a = (I_a + KI_0)Z_1 \cdot D + I_{fa} \cdot R_f \quad (11)$$

式中: $K = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}$

Z_1 、 Z_0 分别是线路的正序和零序阻抗 D 为故障处与装置安装处间的距离, D_0 为线路全长。

对单相 A 相接地短路, 故障时正负零序分量相等:

$$\begin{aligned} I_{fa1} &= I_{fa2} = I_{f0} \\ I_{fa} &= 3 \cdot I_{f0} \end{aligned} \quad (12)$$

根据零序序网图, 可得出如下关系:

$$I_0 = I_{f0} \frac{(D_0 - D)t_0 + Z_{S20}}{Z_{S10} + Z_{S20} + D_0 t_0} \quad (13)$$

$$I_{f0} = I_0 \frac{Z_{S10} + Z_{S20} + D_0 Z_0}{(D_0 - D)Z_0 + Z_{S20}} \quad (14)$$

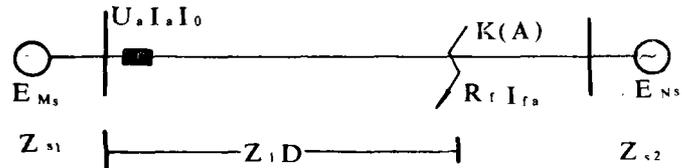


图 2 Z_{s1} 、 Z_{s2} 为两侧系统的等值阻抗

$$I_{f0} = I_0 C \angle \varphi \quad (15)$$

$$C \angle \varphi = \frac{Z_{S10} + Z_{S20} + D_0 Z_0}{(D_0 - D)Z_0 + Z_{S20}} \quad (16)$$

式中： $c \angle \varphi$ 为一复

量。

φ 为故障处和安装处零序电流的幅角差。

以 (15) 式代入 (11) 式，得：

$$U_a = (I_a + kI_0)Z_1 \cdot D + 3 \cdot C \cdot R_f \cdot I_0 \angle \varphi \quad (17)$$

根据式 (17) 画出相量图：

图 4 中：

φ_a 为 U_a 越前 I_a 的幅角 $\varphi_a = \arg \left\{ \frac{U_a}{I_a} \right\}$

φ_b 为 I_a 越前 I_0 的幅角 $\varphi_b = \arg \left\{ \frac{I_a}{I_0} \right\}$

φ_k 为 I_a 越前 $(I_a + KI_0)$ 的幅角

$$\varphi_k = \arg \left\{ \frac{I_a}{I_a + kI_0} \right\}$$

$$\alpha = \varphi_a + \varphi_b - \varphi \quad (18)$$

$$\gamma = \varphi_{a1} - \varphi_a - \varphi_k \quad (19)$$

$$\beta = 180 - (\varphi_b + \varphi_{a1} - \varphi_k - \varphi) \quad (20)$$

根据正弦定理有：

$$\frac{|(I_a + kI_0)DZ_1|}{\sin \alpha} = \frac{|U_a|}{\sin \beta} \quad (21)$$

$$D = \frac{|U_a|}{|(I_a + kI_0) \cdot |Z_1|} \cdot \frac{\sin(\varphi_a + \varphi_b - \varphi)}{\sin(\varphi_b + \varphi_{a1} - \varphi_k - \varphi)} \quad (22)$$

由式 (16) 得出式 (23)

$$\varphi = \arg \left(\frac{Z_{S10} + Z_{S20} + D_0 Z_0}{(D_0 - D)Z_0 + Z_{S20}} \right) \quad (23)$$

在式 (22) 和 (23) 中， U_a 、 I_a 、 I_0 、 φ_a 、 φ_b 、 φ_k 是可以测量到的或可计算出的， K 、 Z_1 、 φ_{a1} 、 D_0 、 Z_0 、 Z_{S20} 、 Z_{S10} 是已知的常量，只有 D 和 φ 是待求未知量。因此，可以由式 (22) 和 (23) 迭代求出，迭代过程如下：

上述推导及迭代是借助于零序电流及幅角进行。在有些故障中无零序电流或采用零序电流不方便时，也可以借助负序电流。借助零序电流及幅角的迭代称为零序相量迭代。

3.2 误差分析

(1) 从原理上看，这样方法没有误差，它与过渡电阻大小无关。

(2) 迭代运算求幅角差 φ 时，需要两侧电源等效阻抗 Z_{S10} 、 Z_{S20} 。这在大电网中要准确得到是比较困难，显然这与运行方式有关，实际上只能以某一不变的代表值去等效一个变化的系统，这就产生了误差。当然，运行方式变化式 Z_{S10} 、 Z_{S20} 变化从式 (23) 看，对幅角差 φ 的影响未必很大，特别是在双侧大电网时。

设 $\varphi = 0$ 时，即故障处与装置安装处的零序电压同相，则无需迭代，无需双侧电源等值参

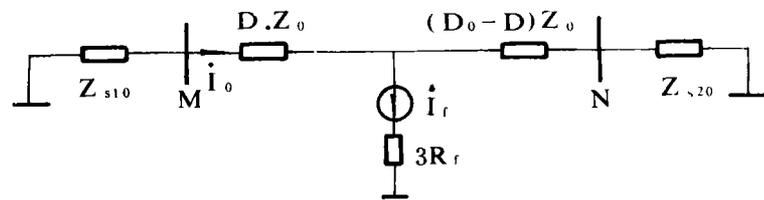


图 3 为故障时零序网图

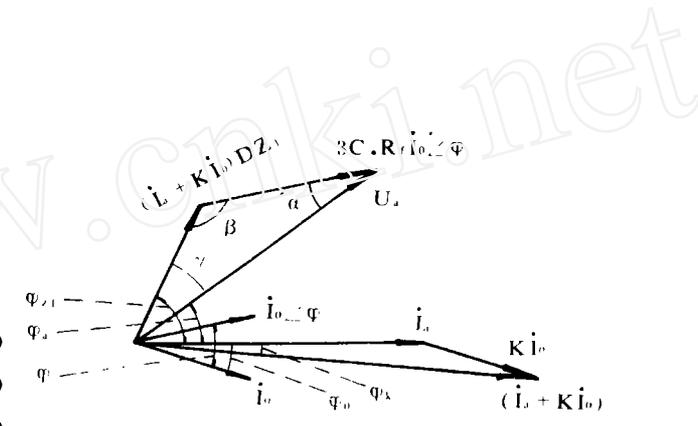


图 4

数,即可由式(22)求出距离D,这与微分方程法测距精度相同。

(3) 相量迭代法利用的是工频量(包括有效值、幅角及幅角差)。由于短路故障时存在一定的直流分量及谐波分量,使计算出这些工频量的过程存在误差。误差的大小取决于当时的各分量的含量、衰减及滤波算法情况。

3.3 特点

- (1) 无原理误差
- (2) 需要双侧系统等值参数,一定程度上受系统运行方式影响。
- (3) 需要较长的数据时窗,在跳闸快速的场合,使用误差较大。
- (4) 算法复杂,运行容量要求大,时间较慢。

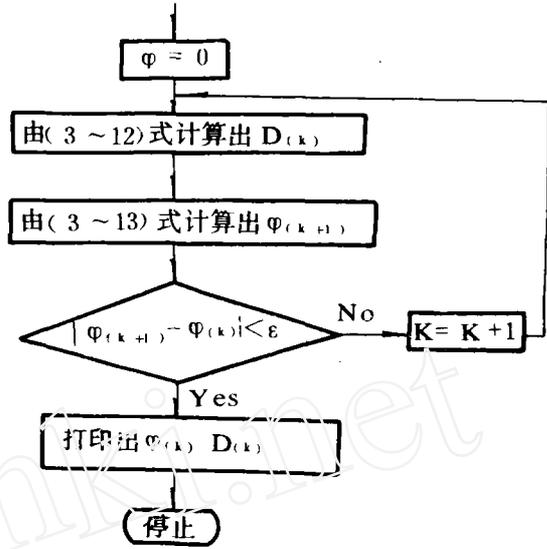


图 5

4 迭代修正的微分方程法

微分方程法简单快速,但有原理误差。相量迭代法无原理误差,但运算量多,复杂费时。这两种方法有很大的互补性,这样就出现了将两者结合折衷的算法——迭代修正的微分方程法。

迭代修正的微分方程法不需要计算电流、电压量的有效值及幅角差,采用瞬时值,经迭代运算,得到真实的距离D。

以下仍以A相接地故障为例,推出算法。式(15)可写成:

$$I_{f0} = I_0 \cdot C \angle \varphi = C \cdot |I_0| \cdot e^{j(\varphi_0 + \varphi)} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} i_{f0} &= C \cdot |I_0| \cdot \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi) \\ &= C \cdot |I_0| \cdot [\sin(\omega t + \varphi_0)\cos\varphi + \cos(\omega t + \varphi_0)\sin\varphi] \\ &= C[i_0\cos\varphi + \sqrt{1 - i_0^2}\sin\varphi] \end{aligned} \quad (25)$$

式中, i_{f0} , i_0 是故障处和装置安装处零序电流瞬时值。

用式(25)代入微分方程式(3)中:

$$u_a = DR_1(i_a + 3ki_0) + L_1D \frac{d(i_a + k_13i_0)}{dt} + 3R_fC \cdot [i_0\cos\varphi + \sqrt{1 - i_0^2}\sin\varphi] \quad (26)$$

微分方程式(26),取两个时刻值即可得到两个代数方程式,联合解得出D和φ的关系:

$$D = f(\varphi) \quad (27)$$

这样根据式(27)和式(23),即:

$$\varphi = \arg \frac{(Z_{S10} + Z_{S20} + D_0Z_0)}{(D_0 - D)Z_0 + Z_{S0}}$$

用前述的迭代,可计算出测距真实值。

迭代修正的微分方程法在一定程度上具有前两种方法的优点,即:无原理误差和速度较相量迭代法快。但和相量迭代法一样,需要双侧电源等值参数,和微分方程法一样,以差分

代替导数而产生误差，其测距误差和运算速度都介于相量迭代法和微分方程法之间。

5 三种测距方法的比较及应用

微分方程法，相量迭代法及迭代修正的微分方程法都是取单侧电流、电压信号作测距依据，这是方便实用，而且现实可行的。尤其是它们可以和微机保护，和微机故障录波器结合在一起，使微机保护装置及微机故障录波装置只需增加软件，无需额外增加硬件，即可实现故障测距。

三种测距方法中，微分方程法算法最简单，原理上与双侧系统状态无关，运算最快速，测距误差也最大。一般更适用于对测距要求不高的场合或装置，如微机保护装置。还由于它所需的数据窗短，在故障跳闸很快的场合，使用这种方法比较适合。目前，国内正进入广泛应用的微机保护装置所配置的测距软件算法就属于这种。

相量迭代法无原理误差，抗过渡电阻能力强，但需要双侧系统等效参数，它是三种方法中最复杂，但精度最高的。从多次的实际故障考验看，其测距误差小，而且稳定，特别适合220kV及以下线路的测距运算（因为直流分量及谐波分量衰减快，且跳闸时间较长，保证了有效的数据时窗）。但由于其要求时窗及滤除直流及谐波分量的关系，在更高电压系统（由于跳闸时间短，系统时间常数大）中的使用则要慎重，WLB-96型故障录波及测距装置采用了这种算法软件。

迭代修正的微分方程法是一种折衷的测距算法，它综合了前两种算法的优点，同时也伴有缺点，使用时因地制宜、扬长避短地进行选择。

征 订 通 知

《继电器》为电力系统继电保护及自动化专业的全国公开发行的科技期刊，是电工技术核心期刊之一，发行量占本行业科技期刊之首。

1994年征订工作已经开始，欢迎广大读者订阅。本刊为季刊，每期定价2.00元，全年8.00元，邮局代办发行。本刊邮发代号：36—135，如有漏订，请直接汇款到本编辑部。

通讯地址：河南省许昌市建设路183号《继电器》编辑部

邮编：461000

电话：(0374) 221172~254