

小相角故障行波测距方法研究

韩志锐

(江苏省电力设计院, 江苏 南京 211102)

摘 要: 输电线路小相角故障由于故障行波信号微弱, 加之环境干扰影响, 故障行波波头的识别和定位十分困难。为滤除干扰, 提取微弱行波信号, 实现准确故障测距, 本文应用能量比法, 从行波能量的角度出发, 利用时窗滚动处理故障行波, 计算波头时延以实现故障测距。考虑并研究了不同时间窗宽度对滤波和提取信号的影响, 选择合理的时间窗进行能量比计算。仿真试验结果表明, 该方法在低信噪比环境下有很好的抗干扰能力, 对微弱突变有效信号也十分敏感, 对小相角故障信号的识别和提取有相当的实用价值。

关键词: 能量比; 小相角故障; 故障测距; 时间窗; 干扰

0 引言

输电线路故障时电压相位, 即故障初相角的大小影响到产生的故障行波的幅值, 进而影响行波故障测距的精度。如果故障发生时, 电压相角很小, 这时产生的故障行波数值较低, 不易识别, 容易使测距装置误判或根本无法测距。虽然现实中绝大部分线路故障是由于绝缘击穿造成的, 故障基本都发生在电压峰值附近 30° 以内, 发生在电压过零点附近的故障很少。但是不能排除一些特殊原因的影响, 比如风雨雷电等恶劣气候、施工误操作、人为破坏等等因素都有可能导导致小电压相角故障的发生, 所以对小相角故障行波测距的方法进行研究还是有必要的。

事实上, 小相角故障是针对某一相来说的, 比如A相发生小相角故障, 此时对于故障点B、C相来说, 其电压相角并不小, 所以如果发生两相短路 $f^{(2)}$ 、两相接地 $f^{(1,1)}$ 、三相短路故障 $f^{(3)}$, 产生的故障行波信号并不微弱。因此本文对小相角故障的研究仅针对单相接地故障 $f^{(1)}$ 而言。

文献[1]中提出了一种基于检测信号相位突变的行波测距方法, 这种方法依据故障发生时, 出现的暂态信号使原来信号的相位发生突变的原理, 用小波变换的方法提取出故障信号相位^[2], 并对相位进行处理, 提取出突变点, 以此来进行行波故障测距。暂态信号的相位与其幅值无关, 对于幅值变化微弱的信号突变, 利用相位检测其突变效果更好, 所以这种方法对于小相角故障有较好的测距效果。但是这种方法也有一定的缺点, 实小波变换算法提

取信号相位较为复杂, 而且信号相位对于噪声干扰特别敏感, 所以实际处理中必须进行消噪处理。

针对干扰下利用微弱行波信号进行故障测距, 本文提出使用能量比函数法。能量比函数是通过信号能量的比值来确定信号的突变点, 其本质是放大了信号的突变程度, 使得有效信号到达时刻更加清晰容易辨认。能量比法对受强噪声干扰、经过多路传递的信号在求取时延^[3]的计算上简单实用, 计算参数易于选择, 算法稳定性高, 便于实际应用。本文将这种方法应用到干扰下微弱行波信号的识别和提取, 进而进行故障测距, 验证其适用性, 得出了一些有用的结论。

1 输电线路小初相角故障的仿真

1.1 小相角故障模型

本文主要使用的仿真工具为 ATP-EMTP, 并通过 Matlab 读取 ATP-EMTP 仿真出来的原始数据。

500 kV双电源系统线路ATP-EMTP仿真线路模型如图 1 所示。模型中三相线路采用Jmarti架空线路模型, 导线经过换位。线路长度为 200km, M侧系统参数为电源 $\dot{E}_M = 500 \angle 0^\circ$, 正序零序参数分别为 $R_1=0.711\Omega$ 、 $L_1=0.011857H$ 、 $R_0=0.55\Omega$ 、 $L_0=0.00898H$; N侧系统参数为电源 $\dot{E}_N = 500 \angle -25^\circ$, 正序零序参数分别为 $R_1=26\Omega$ 、 $L_1=0.14298H$ 、 $R_0=20\Omega$ 、 $L_0=0.11927H$, 线模分量的行波波速^[4]取加拿大 B.C.Hydro 行波定位系统中推荐的 $v_\alpha=2.95 \times 10^8 \sim 2.96 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

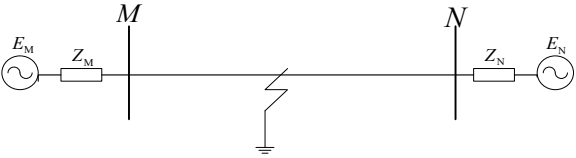


图 1 双电源系统

通过 ATP-EMTP 对线路进行仿真,发现模型正常运行时,在采样过程中 B 相电压值有过零点的情况。所以可以通过更改仿真实验中故障发生时间来

控制故障发生时 B 相电压初相角的大小。

对该线路模型进行仿真,仿真时间长度为 5ms、故障发生时间控制在不同点、采样率为 1MHz。正常运行时, B 相在 0.002006s 到 0.002007s 之间电压通过零点。假设该系统距 M 母线 80km 处发生 B 相单相接地故障,接地阻抗为 10Ω,则不同时间发生故障时,发生故障时间 t ,故障前瞬间 B 相的相电压瞬时值 u ,故障初相角 φ_0 的对应关系表 1 所示。

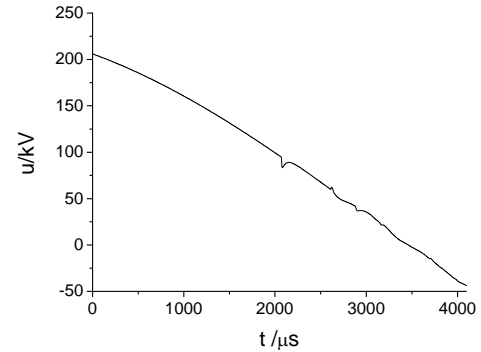
表 1 B 相故障时间、电压和相角

故障时间 t/s	0.0016	0.0017	0.0018	0.0019	0.002	0.002006	0.002007
B 相的相电压瞬时值 u/V	-52818	-39868	-26879	-13864	-836	-54	76
故障初相角 φ_0	7.32°	5.52°	3.72°	1.92°	0.115°	0.007°	0.011°

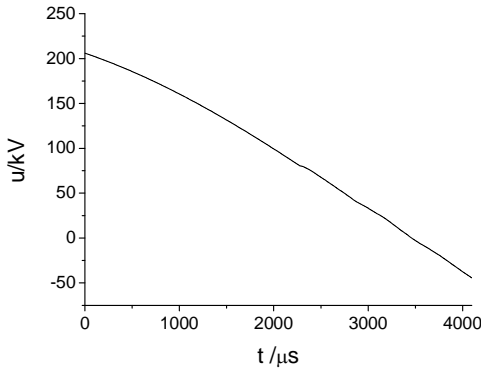
由仿真模型可以得到 M, N 两端的三相故障电压行波。为了消除三相耦合的影响,将得到的 M, N 端行波进行凯伦布尔相模变换,分别得到 0.0018s 和 0.002s 故障时两端 α 模故障电压行波,如图 2 所示。由图可见,故障初相角为 3.72° 时能够产生较微弱的故障行波,但当故障初相角继续减小到 0.115° 时,故障行波已经极其微弱,几乎无法辨识。

1.2 干扰下的故障行波信号

在实际应用中,环境中的干扰噪声是不可避免的,行波信号作为高频信号,因而易于与噪声干扰相混淆,造成测距困难^[5],对于小相角故障,本身行波故障暂态分量幅值就很小,在有干扰的情况下,识别起来难度更大,所以有必要研究一下这些方法在噪声干扰下的适用性。



(a) 0.0018s 时故障, 初相角为 3.72°



(b) 0.002s 时故障, 初相角为 0.115°

图 2 两种不同初相角故障的 M 端故障电压行波

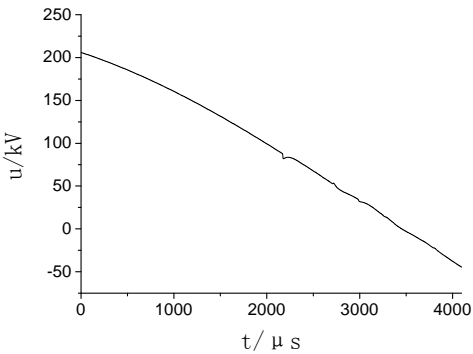


图 3 1.92° 故障时 M 端电压行波

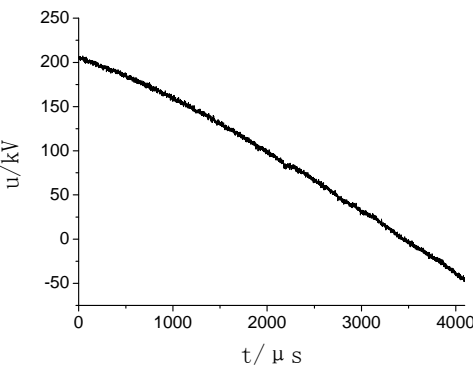


图 4 考虑干扰时的故障行波

以初相角为 1.92° 的故障为例,故障时 M 端电

压行波波形如图 3 所示。此时考虑环境干扰，给图 3 中的行波加上一定程度变电所现场用示波器提取到的实际环境干扰得到干扰下的故障行波如图 4。经测算，此时行波信号的信噪比 SNR (Signal to Noise Ratio) 为 36.8dB。可以看出波形中的故障分量几乎被干扰信号所淹没，突变较难识别。

2 能量比法

行波故障测距的关键是找到故障信号到达的时刻。在故障信号到达前，检测装置得到的只是噪声，而没有有效故障信号；而在它之后则是需要的故障信号和噪声的复合信号。假设环境噪声表示为 $n(t)$ ，有效信号成分为 $s(t)$ ，在 t_0 时刻有用信号 $s(t)$ 到达，则检测装置接收到的信号 $x(t)$ 可表示为：

$$x(t) = \begin{cases} n(t) & , t < t_0 \\ n(t) + s(t) & , t \geq t_0 \end{cases} \quad (1)$$

要进行能量比计算，首先要得到信号的能量。对于连续信号 $x(t)$ ，在时间段 $[0, T]$ 上的有效值 x_R 定义为：

$$x_R = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2)$$

很明显， x_R 和信号的能量存在比例对应的关系，可以代替能量进行计算。

在信号 $x(t)$ 上取时间长度为 T 的一段，该段时间的起点为 T_1 ，终点为 T_2 ，中间点为 T_0 ，分别计算该时间段前半段和后半段的有效值，然后用后边段的有效值与前半段相比，这样就得到该时间段前后部分的能量比值。对于离散信号，计算时根据采样率转换为采样点数。能量比^[6]的基本公式为：

$$P = \frac{\left[\sum_{t=T_0}^{T_2} x^2(t) \right]^{1/2}}{\left[\sum_{t=T_1}^{T_0} x^2(t) \right]^{1/2}} \quad (3)$$

式中， P 为一个窗内的相对能量。而这个时间段的长度 T 就是时间窗宽。容易看出对于一个已知信号， P 的取值与两个参数有关，一是时间窗宽 T ，另一个是时间窗的中点 T_0 。

将时间窗宽 T 取一个合适的固定值，从记录的起点开始逐点移动时间窗，直至记录的终点，这时时窗中点 T_0 不断变化，能得到一系列不同的能量比

值，这样就得到一个以 T_0 为自变量的能量比函数^[7]，函数定义为：

$$P(T_0) = \frac{\left[\sum_{t=T_0}^{T_2} x^2(t) \right]^{1/2}}{\left[\sum_{t=T_1}^{T_0} x^2(t) \right]^{1/2}} \quad (4)$$

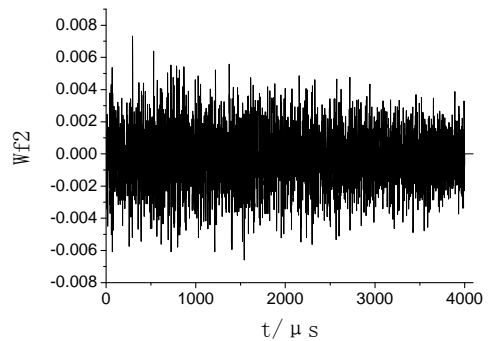
将式(1)的信号借助公式(4)做能量比函数计算，可以得到以时间窗中点 T_0 为变量的能量比函数，该函数从能量的角度重新审视行波信号，将时间窗前后两部分能量差别最大的点凸显出来，这样就能排除干扰影响，使行波信号突变点更清晰。

需要注意的是，时间窗宽度 T 的选择^[8-9]会影响能量比函数 P 的模极大值点的位置，从而影响测距精度。一般来说， T 较小时突变点位置确定更为精确，但时间窗前后两部分能量差异不够明显，突变点位置放大作用较弱，甚至造成无法显现突变点位置； T 较大时则相反，此时能量比函数模极大值较大，但是极大值处波形不够尖锐，对应时间点难以准确定位。所以 T 的选择对实现测距很重要。

3 能量比法应用于干扰下的小相角故障测距

3.1 能量比法 T 的选择对干扰的抑制

用能量比函数法处理干扰下的小相角故障测，有两个难点：一是要提取出微弱的有效故障信号，二是要排除环境噪声对微弱有效信号的干扰。通过实验验证，以上两点对能量比法中时间窗 T 的要求是矛盾的， T 越大对信号的降噪效果越好，而 T 越小则对信号微弱突变点越敏感。所以为了达到最佳的降噪提取信号效果，需要先验证时间窗宽 T 的最佳取值。不同的时间窗 T 下能量比法处理图 4 中的行波信号，结果如图 5。



(a) $T=6 \mu s$

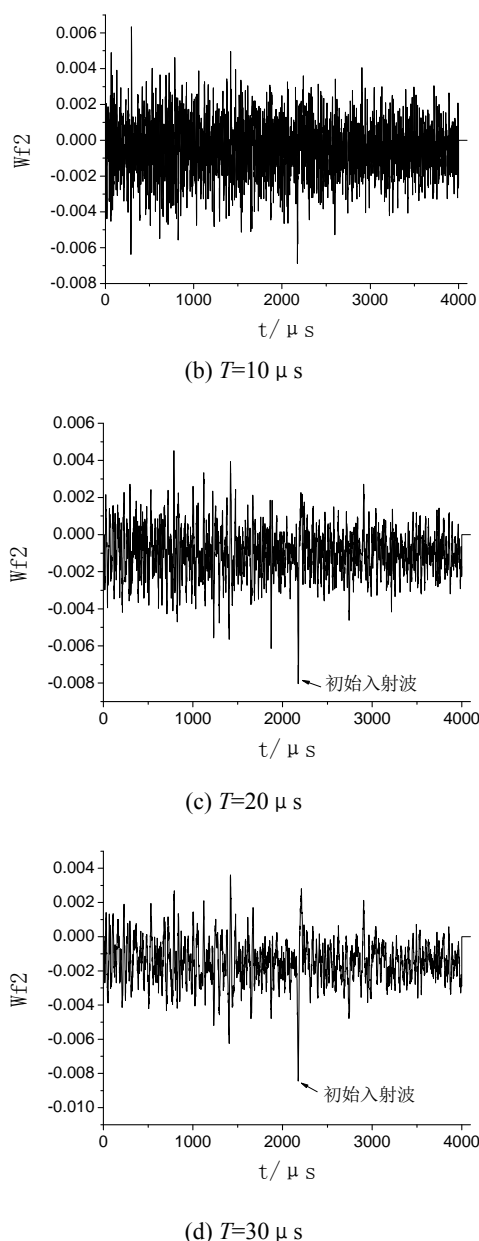


图 5 不同时间窗 T 下能量比法处理故障行波结果

从图中可见在不同时间窗 T 下, 随着 T 的不断增大, 行波处理效果越来越好, 初始入射波波峰越来越清晰, 且幅值不断增大, 干扰波峰变小、减少。而在 T 较小的 a 图和 b 图中, 首波峰无法辨识。这说明了干扰下用能量比法检测小相角故障时, 时间窗 T 选择相对大一些的值, 能够有更好的实现故障测距。究其原因, 主要是干扰信号由大量变化的离散点构成, 如果这个时间段越长, 该段信号离散点越多, 信号的有效值 x_R 就越趋向于一个稳定的固定值; 而如果时间段很短, 包含离散点很少的话, 该段信号有效值可能就会因为个别离散点的幅值大小的变化有较大波动。这种波动与该时间段的长短有关, 长

度越长则波动越小, 干扰信号有效值越稳定。所以, 选择较大的时间窗 T , 很大程度上抑制了干扰对有效故障信号的影响, 能够取得较好的突变点检测效果。

但是同时有一点值得注意, 如果行波故障分量幅值很微弱, 此时应尽量减小时间窗 T 的取值, 以此来提高对突变点的识别灵敏度, 而本小节在考虑了环境干扰以后, 又需要提高 T 的取值来抑制干扰信号对故障信号的影响, 这是一个难以两全的选择。综合考虑, 本文中用能量比函数法分析处理的小相角故障都取时间窗 T 为 $10 \mu s$ 。

3.2 能量比法在小相角故障定位中的应用研究

取 $T=10 \mu s$, 用能量比法处理考虑干扰下的小初相角故障的行波数据, 得到分析结果如图 6 所示。

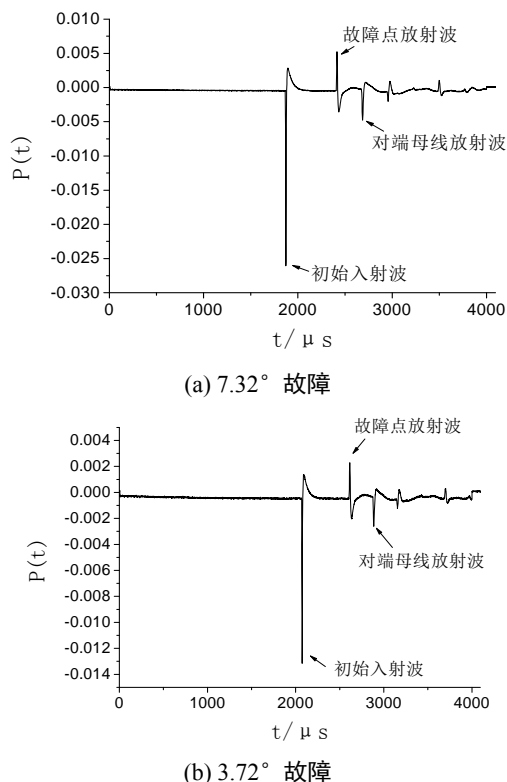


图 6 $T=10 \mu s$ 两种相角故障 M 端电压行波能量比分析结果

图 6 可以看到两个不同故障相角时能量比法处理故障行波得到很好的结果, 可以得到较好的滤波效果, 初始入射波十分清晰, 而且故障点放射波和对端母线反射波也十分明显。利用单端测距公式(5)和双端测距公式(6), 用能量比函数法进行单端和双端小相角故障测距, 得到的结果如表 2,3 所示。

$$x = \frac{v(t_2 - t_1)}{2} \quad (5)$$

$$x = \frac{L - v(t_N - t_M)}{2} \quad (6)$$

表 2 单端法能量比函数处理的小相角故障结果

故障时间 t/s	故障初相角/ $^\circ$	初始入射波位置 t_1/s	故障点反射波位置 t_2/s	$\Delta t/s$	测距结果/km	误差/%
0.0016	7.32	1873-	2415+	542	80.216	0.27
0.0017	5.52	1973-	2515+	542	80.216	0.27
0.0018	3.72	2073-	2615+	542	80.216	0.27
0.0019	1.92	2173-	2715+	542	80.216	0.27
0.002	0.115	2273-	/	/	/	/

表 3 双端法能量比函数处理的小相角故障结果

故障时间 t/s	故障初相角/ $^\circ$	M 端首波头位置 t_M/s	N 端首波头位置 t_N/s	$\Delta t/s$	测距结果/km	误差/%
0.0016	7.32	1873-	2009-	136	79.872	0.16
0.0017	5.52	1973-	2109-	136	79.872	0.16
0.0018	3.72	2073-	2209-	136	79.872	0.16
0.0019	1.92	2173-	2308-	135	80.02	0.025
0.002	0.115	2273-	2407-	134	80.168	0.21

由表可见, 0.115° 时由于故障点反射波信号被干扰淹没无法进行单端测距, 但双端法由于只用到 M、N 两端行波的初始入射波头, 所以能够实现双端测距。其他情况均能实现单端和双端的故障测距, 且精度也能满足测距要求。

4 结论

本文介绍了能量比法在处理小相角故障时的应用情况, 并以算例对其进行了仿真验证。结果表明: 能量比法在小相角故障行波测距中有较好应用。但提高能量比法识别灵敏度和提高抗干扰能力两个指标对时间窗 T 的要求相矛盾, 所以在应用能量比法

实现小相角故障测距时, 应仔细斟酌 T 的取值, 这对测距精度乃至能否实现测距都十分重要。

参考文献:

- [1] 郭宁明, 覃剑, 陈祥训. 基于信号相位检测的输电线路行波故障测距方法[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 20-24.
- [2] 陈祥训. 实小波变换提取相位信息方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 8-13.
- [3] 卢毅, 姜玉磊, 杨静. 能量比函数法估算局部放电时延[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 87-89.
- [4] 黄雄, 王志华, 尹项根, 等. 高压输电线路行波测距的行波波速确定方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 34-37.
- [5] 王昌长, 李福琪, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京, 清华大学出版社, 2006. 251-273.
- [6] 毛汉领, 陈仲仪, 庄红宇. 能量比时间延迟估计法及在定位中的应用[J]. 广西工学院学报, 1994, 5(2): 12-16.
- [7] 卢毅, 姜玉磊, 杨静. 能量比函数法估算局部放电时延[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 87-89.
- [8] 卢毅, 杨静. GIS 在线检测中局部放电和外部干扰信号的识别[J]. 电力系统自动化设备, 2007, 27(6): 71-73.
- [9] 卢毅, 韩志锬, 陈瑜. 基于能量比预处理的 FFT 窄带滤波方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(5): 948-951.

作者简介:

韩志锬(1984-), 男, 硕士, 从事电力系统相关设计工作,

Email: hanzhikun@jspdi.com.cn。