

一种暂态分量故障测距方案

邓 华

(四川省电力公司超高压运检公司, 四川 成都 610041)

摘 要:超高压线路故障产生的周期性高频暂态分量在频域上表现为一系列谐波形式,在分析暂态频率特征的基础上,提出了一种基于暂态分量的单端故障测距方案,并分析了电源侧和故障点反射系数对测距结果的影响,针对实际应用中存在的若干问题给出了相应的对策。该方案计算简单,不受故障时刻、运行方式等因素的影响,ATP 仿真和 Matlab 分析验证了该方案有效性。

关键词:电力系统;固有频率;频谱分析;故障测距

Abstract: When a fault occurs in a transmission line, the fault-generated high-frequency components are a series of natural frequencies in frequency domain. Firstly, the natural frequency characteristics of extra high voltage transmission line are analyzed, and then a fault location scheme based on natural frequency is proposed. The effect of reflection coefficients on the source and the fault point are also discussed. Finally, some solutions are proposed against several problems in practical application. The scheme avoids identifying arrival time of traveling waves and reflecting traveling waves from fault point. It is immune to fault time and operation mode et al. The performance of the proposed scheme is verified by various faults on ATP simulation and Matlab.

Key words: power system; natural frequency; spectrum analysis; fault location

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0048-05

0 引 言

目前,电力系统大多采用阻抗法测量输电线路故障距离,但其测距精度受故障电阻、互感器误差、线路结构不对称、零序参数沿线路分布不均匀等因素影响,实际应用效果不理想,而且不适用于直流输电、带串补电容、T 接及部分同杆并架的线路。

早在 20 世纪 50 年代,人们就提出通过测量电压、电流行波在故障点及母线之间的传播时间来测量输电线路故障距离。通过十几年的发展,一些新的行波测距原理被提出^[1-8],并且得到了实际应用,国产行波测距系统已有数百套在国内外电力系统中投入使用,实际故障测距误差一般在 500 m 以内^[9-10]。对于基于时域行波的测距方法,关键问题是准确识别初始行波的波头,各种干扰及非故障点的行波波头都会影响测距的准确性。双端行波测距需要两端时间精确同步,同时需要远程通信;较双端测距而言,单端行波测距只需要一台装置,投资小,但是波形分析比较复杂,问题集中在如何正确识别来自故障点的反射波,对于电压接近零值时发生的故障,行波测距将失

效^[1]。

线路故障后的周期性高频暂态分量在频域上表现为一个特定频率的谐波形式,称为固有频率,这一特定频率是固有频率的主频^[11]。固有频率是故障距离的函数,利用其可以实现测距功能。文献[12]分析了故障后的固有频率和故障距离之间的关系,文献[13]提出对于线路永久性故障,当断路器跳闸后,提取开关产生的固有主频进行测距,该方法只对永久性故障且 TA 或 TV 位于线路侧的输电线路有效;文献[14]提出了利用 CVT 二次信号的固有主频进行测距,但是需要已知系统的运行方式和确定固有主频。

在分析周期性高频暂态分量频域特征的基础上,提出了一种利用固有频率差进行故障测距的方案,讨论了电源侧和故障点反射系数对测距结果的影响,同时给出了固有频率提取方法,针对实际应用中存在的若干问题进行了分析并给出相应的解决方案。

1 长距离输电线路固有频率的特征

线路故障后产生的周期性暂态高频分量中是短路后电磁波在输电线路上传播,并在短路点和电源阻

抗之间来回反射而形成的,在频域上表现为一个特定频率(固有主频)的谐波形式。

1.1 固有频率的产生

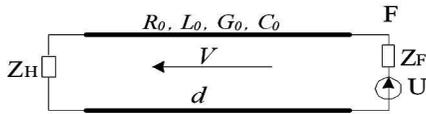


图 1 输电线路分布参数示意图

图 1 给出了利用分布参数等值的输电线路故障网络,图中 R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 分别为输电线路单位长度的电阻、电感、电导和电容, Z_H 为电源阻抗, F 为故障点, Z_F 为故障点处阻抗, U 为故障前 F 点处电压, d 为故障距离, V 为故障产生的初始行波。

故障产生的初始行波 V 沿线路向电源方向传播,然后在 Z_H 处和 F 点处发生多次反射,产生一系列具有固有频率的高频分量,固有频率的大小可以通过下式求出^[11]。

$$1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2\omega\tau} = 0 \quad (1)$$

式中, Γ_1 为电源处反射系数, $\Gamma_1 = (Z_H - Z_C) / (Z_H + Z_C)$; Γ_2 为故障点处反射系数, $\Gamma_2 = (Z_F - Z_C) / (Z_F + Z_C)$; Z_C 为线路波阻抗, $Z_C = [(R_0 + j\omega L_0) / (G_0 + j\omega C_0)]^{1/2}$; τ 为行波传播时间, $\tau = d/v$ v 为行波传播速度。

将式 (1) 转化为指数形式,可以表示为

$$1 - A_1 A_2 e^{j\theta_1} e^{j\theta_2} e^{-2\omega\tau} = 0 \quad (2)$$

式中: $A_1 = |\Gamma_1|$; $A_2 = |\Gamma_2|$; $\theta_1 = \text{angle}(\Gamma_1)$, $\theta_2 = \text{angle}(\Gamma_2)$ 。

可以看出,式 (2) 有无穷多个解,角频率 ω 可用下式表示。

$$\omega = \frac{1}{\tau} \ln(\sqrt{A_1 A_2}) + i\left(\frac{\theta_1 + \theta_2 + 2k\pi}{2\tau}\right) \quad (3)$$

固有频率大小为

$$f = \frac{\text{imag}(\omega)}{2\pi} = \frac{\theta_1 + \theta_2 + 2k\pi}{2\tau \times 2\pi} \quad (4)$$

时间衰减系数为

$$\alpha = \left| \frac{1}{\text{real}(\omega)} \right| = \left| \frac{\tau}{\ln(\sqrt{A_1 A_2})} \right| \quad (5)$$

由式 (4) 可得,固有频率主频的范围介于 $1/4\tau \sim 1/2\tau$ 之间。图 2 给出了线路发生三相短路时的电流信号频谱,从图中可以发现固有频率呈现为固有主频的谐波形式。

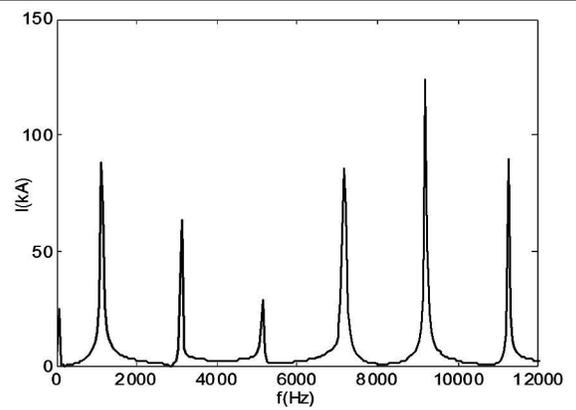


图 2 三相短路时电流信号频谱

1.2 不同故障类型下暂态高频分量的特征

1) 三相短路时,短路点两侧的系统是相互隔离的,所以故障点两侧的暂态分量互不影响,所以固有频率也互不影响。

2) 两相短路时,两故障相中的短路附加分量大小相等、方向相反,它们在健全相中感应的电动势之和为零,所以对于健全相电流接近于 0 对于故障相,短路点两侧暂态分量互不影响。两相接地故障时,由于 β 模量是在两故障相之间传播的,和接地电阻无关,所以 β 模量的固有频率特征和两相短路时相同^[15]。

3) 单相接地故障时,由于健全相中有暂态分量流通,系统两侧的暂态分量会相互影响,线路两侧不仅有本侧的固有频率,同时还有对侧的固有频率。

固有频率的影响因素可参考文献 [16]。

2 测距方案

这里提出了一种利用相邻两个固有频率之差进行故障测距的方案。具体原理如下。

根据式 (4),第 k 和 $k+1$ 次固有频率可表示为

$$f(k) = \frac{\theta_1(\omega) + \theta_2(\omega) + 2k\pi}{2 \times 2\pi} \times \frac{v}{d} \quad (6)$$

$$f(k+1) = \frac{\theta_1(\omega) + \theta_2(\omega) + 2(k+1)\pi}{2 \times 2\pi} \times \frac{v}{d} \quad (7)$$

$$f(k+1) - f(k) = \left(\frac{\theta_1(\omega_{k+1}) + \theta_2(\omega_{k+1}) + 2(k+1)\pi}{2 \times 2\pi} - \frac{\theta_1(\omega_k) + \theta_2(\omega_k) + 2k\pi}{2 \times 2\pi} \right) \times \frac{v}{d} \quad (8)$$

$$d = (\theta_1(\omega_{k+1}) - \theta_1(\omega_k) + \theta_2(\omega_{k+1}) - \theta_2(\omega_k) + 2\pi) \times \frac{v}{f(k+1) - f(k)} \times \frac{1}{4\pi} \quad (9)$$

由式 (9) 可知,故障距离与 θ_1 、 θ_2 、 v 相邻固有频

率差有关。对于固有频率差可以通过频谱直接获得,当信号频率高于 1 kHz 时, v 基本趋于稳值,可以利用线路参数计算得到。相间短路时, θ_2 是常数,接地故障时,过渡电阻为纯电阻时, θ_2 随固有频率变化很小。

对于电源处的反射系数角 θ_1 ,当电源阻抗为 $Z_H = R_H + j\omega L_H$, θ_1 随固有角频率 ω 的变化曲线如图 3 所示。从图中可以看出随着固有频率的增大, θ_1 变化很小,且呈线性变化。

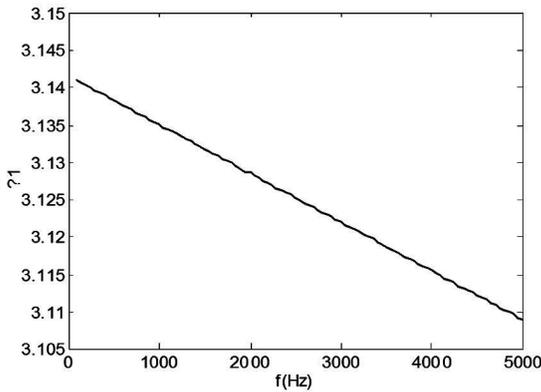


图 3 θ_1 与固有频率的关系曲线

根据以上分析,式 (9) 可以简化为

$$d = \frac{v}{f(k+1) - f(k)} \times \frac{1}{2} \quad (10)$$

由式 (10) 可得,测距方案不需要已知系统的运行方式和判断固有频率的次数,只要知道两固有频率之间的差就可以测距。而且可以利用任何间隔的固有频率进行测距。

本方案采用电流量采自线路 TV,为了保证故障测距的精度,本方案在进行测距时,分别利用四个相邻的固有频率差值进行计算,若其中某个固有频率差和其他两个差异较大,将其剔除掉,另取一个代替,然后求其平均值。

3 实际应用中若干问题的处理

3.1 波速度的选择

相间短路和接地故障时,行波的传播速度是不同的,由于单位长度零序电感、电容和正序电感、电容有较大的差异,所以线模和地模的固有频率不同。线模分量的固有频率高于零模分量的固有频率,零模分量衰减比线模分量快。

对于相间故障,利用线路正序参数求得的波速度进行测距,单相接地故障时,利用线路零序参数求得的波速度进行测距。

3.2 电压过零故障

线路故障后的周期性高频暂态分量主要是保证短路时刻分布电容上的电压不突变,分布电容中储存的电荷与电压成正比,故在电压接近最大值短路时电容放电产生的高频分量最大,在电压接近于零时短路高频分量最小,但是不为零,因为此时分布电容中电荷虽然为零,但电感中剩余的能量将向分布电容充电^[17]。所以故障时刻不会影响固有频率的大小,但是电压接近于零时发生故障,固有频率幅值会减小。

3.3 高阻接地故障

单相高阻接地故障时,故障暂态分量较少,幅值较低,衰减较快,利用 MUSIC 算法可以准确提取持续时间较短的固有频率信号。文献 [14] 对此进行了详细分析。

3.4 电源出口处发生故障

线路出口发生故障的情况下,此时近故障点侧保护测得的固有频率很高,当其高于采样率的一半时,将无法准确采集到固有频率成分,近故障点侧测距失效,需配合用其他辅助方法测距,但此时远故障点侧保护的固有频率要低很多,可以准确测距。

3.5 单相接地时固有频率的识别

前面已经分析接地故障时,故障点对侧的固有频率会通过健全线路传递到本侧,所以频谱会发生混叠,需要对固有频率进行识别。由于线路之间的互感系数小于 0.5,所以通过比较故障相和健全相的频谱,若故障相频谱对应的固有频率幅值大于健全相频谱该频率的幅值,则该固有频率保留下来,反之,将其剔除。这样就可以将本侧的固有频率提取出来。

3.6 采样信号误差

采样信号会存在一定的误差,主要是因为电磁式 TV 采集电流信号时会有传变误差,采用光电流互感器或电子式互感器时可以大大降低传变误差。另外不同的频谱分析工具频谱分辨率会存在差异,采用高分辨率的频谱分析工具可以解决。

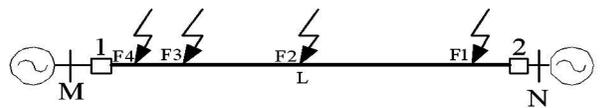


图 4 仿真系统图

4 仿真验证

利用 ATP 软件对所提测距算法进行了仿真验证。

表 1 三相短路时的测距结果

故障点	保护 1					保护 2				
	f_1 / Hz	f_2 / Hz	f_3 / Hz	计算距离 /km	误差 /%	f_1 / Hz	f_2 / Hz	f_3 / Hz	计算距离 /km	误差 /%
F1	510	518	515	289.768 4	0.079 9	14 900	—	—	10.002 1	0.021 0
F2	990	995	990	150.284 6	0.190 9	990	995	993	150.133 0	0.088 7
F3	2 980	2 985	2 980	49.982 6	0.034 8	590	596	600	250.344 6	0.137 8
F4	—	—	—	—	—	500	500	503	297.470 2	0.177 8

表 2 单相接地时的测距结果

故障点	保护 1					保护 2				
	f_1 / Hz	f_2 / Hz	f_3 / Hz	计算距离 /km	误差 /%	f_1 / Hz	f_2 / Hz	f_3 / Hz	计算距离 /km	误差 /%
F1	382	390	385	290.586 7	0.202 3	11 200	—	—	10.005 5	0.055 0
F2	740	748	745	150.555 7	0.370 5	745	740	750	150.422 6	0.281 7
F3	2 245	2 240	2 245	49.953 1	0.093 8	450	440	450	250.912 0	0.368 4
F4	—	—	—	—	—	370	378	375	299.386 0	0.465 1

图 4 是仿真系统图, 线路参数为: $L=300 \text{ km}$, $r_1=0.027 \Omega / \text{km}$, $L_1=0.886 3 \text{ mH} / \text{km}$, $C_1=0.012 7 \mu\text{F} / \text{km}$, $r_0=0.195 \Omega / \text{km}$, $L_0=2.212 1 \text{ mH} / \text{km}$, $C_0=0.009 0 \mu\text{F} / \text{km}$, M 侧电源 $E_M=500 \angle 50^\circ$, $R_{M1}=18 \Omega$, $R_{M0}=15 \Omega$, $L_{M1}=0.137 43 \text{ H}$, $L_{M0}=0.092 6 \text{ H}$, N 侧电源 $E_N=495 \angle 20^\circ$, $R_{N1}=26 \Omega$, $R_{N0}=20 \Omega$, $L_{N1}=0.142 98 \text{ H}$, $L_{N0}=0.092 6 \text{ H}$ 。采样频率为 200 kHz 数据窗长度为一周波 (20 ms)。利用 MUSIC 算法提取固有频率。故障点位 F1~F4, 分别距离母线 M 为 290 km 、 150 km 、 50 km 、 2 km 。保护安装在 1 和 2 处。

表 1 给出了线路发生三相短路时, 利用故障相电流的频谱得到的测距结果, 表中 f_1 、 f_2 和 f_3 是连续三个固有频率差, 计算距离为利用三个频差获得的测距结果的平均值, 误差是相对误差。从中可以发现, 三相短路时, 该方案测距精度很高, 当故障点位于电源出口时, 由于采样率的限制, 保护 1 处无法得到固有频差, 但保护 2 可以准确测距。若故障条件相同, 两相短路时的测距结果与三相短路时相同。两相接地时, 这是因为 β 模量是在两故障相之间传播的, β 模量的固有频率与两相短路时是相同的。

这里主要分析下单相接地故障下的测距结果。表 2 给出了线路不同位置发生单相接地故障时的测距结果, 过渡电阻为 50Ω 。

表 3 给出了 F2 点发生经不同过渡电阻单相接地时保护 1 处的测距结果。从表 3 可以看出随着过渡

表 3 不同过渡电阻情况下的测距结果

过渡电阻 / Ω	f_1 / Hz	f_2 / Hz	f_3 / Hz	计算距离 /km	误差 /%
0	740	750	746	150.355 3	0.236 9
50	740	748	745	150.555 7	0.370 5
100	735	756	740	150.709 4	0.472 9
200	730	755	743	150.919 2	0.612 8

表 4 给出了 F3 点发生不同时刻单相接地 (过渡电阻的增大, 固有频率的幅值会降低, 但是利用 MUSIC 算法仍然可以准确提取固有频率值。

表 4 不同故障时刻的测距结果

故障时刻 / $^\circ$	f_1 / Hz	f_2 / Hz	f_3 / Hz	计算距离 /km	误差 /%
90	2 245	2 240	2 245	49.953 1	0.093 8
45	2 235	2 245	2 240	50.027 6	0.055 2
5	2 230	2 270	2 256	49.763 6	0.472 8

电阻 100Ω) 时保护 1 处的测距结果。当故障时刻接近电压过零时, 固有频率幅值降低, 但不为 0, 本方案仍然有效。

5 结 论

以上提出了一种利用周期性暂态高频分量频域特征的单端故障测距方案, 讨论了电源侧和故障点反射系数对测距结果的影响, 同时给出了固有频率提取方法, 对实际应用中波速度的选择, 电压过零时故障等问题进行了分析并给出相应对策。

该方案避免了行波测距法中行波波头到达时刻和故障点反射波的识别问题, 也无须已知系统运行方式和确定固有主频, 原理简单, 易于实现。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [2] 王志华, 尹项根, 张小波, 等. 利用 CVT 捕捉电压行波实现故障测距的分析和实践 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 63—68.
- [3] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距的研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 76—80.

[4] 陈平. 输电线路现代行波故障测距及其应用研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2003.

[5] 陈平, 徐丙垠, 葛耀中. 一种利用暂态电流行波的输电线路故障测距方法 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(14): 29—32.

[6] 季涛, 薛永端, 孙同景, 等. 配电网行波故障测距初探 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 66—70.

[7] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 利用 GPS 的输电线路行波故障测距研究 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(12): 37—40.

[8] Mahmoud Gilany Doaa khalil Ibrahim, El Sayed Tag El din. Traveling-wave-based Fault-location Scheme for Multiend-aged Underground Cable System [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 82—89.

[9] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62—65.

[10] 陈平, 徐丙垠, 李京, 等. 现代行波故障测距装置及其运行经验 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 66—69.

[11] Giovanni Miano Transmission Lines and Lumped Circuits

[M]. Academic Press San Diego USA, 2001.

[12] G. W. Swift The Spectra of Fault Induced Transient [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1999, 98(3): 947—950.

[13] Styvaktakis E Bollen M H J Gu H Y. A Fault Location Technique Using High Frequency Fault Clearing Transient [J]. IEEE Power Engineering Review, 1999, 19(5): 58—60.

[14] 邬林勇, 何正友, 钱清泉. 利用 CVT 二次信号的频域行波故障测距方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 73—77.

[15] 黄少锋, 王兴国, 刘千宽. 一种基于固有频率的长距离输电线路保护方案 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 59—63.

[16] 黄少锋, 王兴国. 一种基于固有频率的超高压线路相间保护方案 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 58—62.

[17] 高中德. 超高压电网继电保护专题分析 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

(收稿日期: 2010—06—01)

(上接第 35 页)

工频电场强度, 减轻高压交流输电线路可能产生的工频电场生态效应影响。同时由于工频电场强度具有随着距导线距离的增加, 电场强度快速下降的特点, 输电线路设计阶段合理布置路径, 避开居民区, 也能有效减小工频电场可能形成的生态效应影响。

4 结 论

(1) 对处在电场中的人体感应电流可采用模拟电荷的方法进行近似计算, 身高约 1.7 m 的人体, 工频电场强度 $E_0 = 4 \text{ kV/m}$ 时, 通过人体脚的总感应电流仅为 $60 \mu\text{A}$, 其值远低于人体伤害电流 $6 \sim 9 \text{ mA}$ 。

(2) 当外加工频电场强度 $E_0 = 4 \text{ kV/m}$ 时, 人体内部电场强度为 $0.176 \times 10^{-3} \text{ V/m}$, 其人体内部产生的电场强度远小于高压输电线路产生的电场强度 $4 \times 10^3 \text{ V/m}$, 人体内部电场强度对外加电场强度而言是极其微弱的。

(3) 当外加工频电场强度 $E_0 = 4 \text{ kV/m}$ 时, 人体头部离子移动幅度仅为 $8.01 \times 10^{-12} \text{ m}$, 其值远小于人体活细胞直径 (平均为 $1 \sim 2 \times 10^{-5} \text{ m}$)。

(4) 采用增加导线对地高度、合理布置导线方式、架设架空屏蔽线、减小相间距、减小导线分裂间距及减少分裂导线根数等方式, 均能有效减少线下工频电场强度, 减轻高压交流输电线路可能产生的工频电场生态效应影响。同时合理布置线路路径能有效减轻高压交流输电线路工频电场可能存在的生态效应影响。

参考文献

[1] 邬雄. 电场、磁场和电磁场的环境问题 [J]. 电力环境保护, 2007, 23(4): 8—11.

[2] Friedlander Gordon D. UHV: onward and upward [J]. IEEE Spectrum, 1977, 14(2): 56—65.

[3] Paris L. Future of UHV Transmission Lines [J]. IEEE Spectrum, 1969, 6(9): 44—51.

[4] 邬雄. 1 000 kV 交流输电线路电磁环境研究 [J]. 电力设备, 2005, 6(12): 24—27.

[5] 超高压及特高压输电线路电磁环境研究 [R]. 杭州: 浙江大学, 2006: 58—62.

[6] Knave B. Electric and Magnetic Fields and Health Outcomes—an overview [J]. Scand J Work Environ Health, 1994(20): 78—79.

[7] 邬雄, 聂定珍, 张广州, 等. 架空送电线路的电磁环境及其污染影响 [J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 24—26.

[8] 邵方殷. 输电系统产生的电场和磁场 [M]. 北京: 水力水电出版社, 1984: 8—35.

[9] 栗福珩. 高压输电的环境保护 [M]. 北京: 水力水电出版社, 1988: 34—61.

[10] 蒋伟, 吴广宁, 黄震等. 有限元法分析特高压直流线路对人体的影响 [J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1826—1830.

[11] 李顺元. ± 500 千伏直流输电线路电场效应及人体感受的研究 [J]. 电网技术, 1991(2): 25—31.

作者简介:

张格红 (1976—), 女, 汉族, 陕西兴平人, 硕士, 讲师, 主要从事给水排水工程、环境工程的教学、设计工作。

(收稿日期: 2010—03—23)