

Research of On-Line Fault Location for HV Power Cable Considering Frequency Characteristic

Xin Zhang

Power Dispatching Centre of Jiangsu Power Company, Nanjing
Email: zhang_xin128@126.com

Received: Nov. 1st, 2011; revised: Nov. 19th, 2011; accepted: Dec. 2nd, 2011.

Abstract: This paper analyses the dispersion rules of traveling wave produced by a short circuit fault in propagation process in a power cable and the propagation modes of every modulus, wavelet transform is used to extract traveling wave front information, and frequency-dependent wave velocity is chosen for fault location, finally a model of 110 kV XLPE cable is built by simulation tool ATP, and the accuracy of double terminal on-line fault location method is verified.

Keywords: Power Cable; Dispersion; Wavelet Transform; Traveling Wave

考虑频率特性的高压电缆在线故障测距研究

张欣

江苏省电力公司调度控制中心, 南京
Email: zhang_xin128@126.com

收稿日期: 2011年11月1日; 修回日期: 2011年11月19日; 录用日期: 2011年12月2日

摘要: 对电力电缆发生故障时产生的行波在传输过程中的色散规律进行了研究, 对各模量的传播模式进行了分析, 采用小波变换方法提取故障行波波头信息, 探讨了依频波速的选取, 并以 ATP 仿真软件建立 110 kV 交联聚乙烯绝缘电缆模型, 验证了双端在线故障测距算法的准确性。

关键词: 电力电缆; 色散; 小波变换; 行波

1. 引言

随着我国城市化进程的发展, 城市用地紧张, 又由于架空线路存在安全性问题, 而电力电缆安全可靠, 且具有可以美化城市等优点, 因此电力电缆在城市电网中的应用日益广泛。但在运行过程中, 电力电缆也会发生故障, 且由于其一般埋设于地下, 不易直接观察到故障点, 对电力系统的安全稳定运行产生威胁, 因此, 需要及时查找出故障点, 快速切除故障, 恢复供电。相比于离线故障测距方法, 在线故障测距方法省时且省力, 虽然电力电缆在线故障测距方法还不成熟, 但其应用前景很乐观^[1,2]。实际中, 线路参数

随频率变化, 导致故障行波发生衰减与畸变, 对行波测距的精度产生影响。本文将通过 ATP 构建电力电缆频率相关模型, 并采用 MATLAB 进行数值分析。

2. 电力电缆仿真模型

本文对 110 kV 的交联聚乙烯电力电缆进行分析, 电力电缆的实际结构较为复杂, 经过简化后电力电缆结构如图 1 所示。采用单芯电缆^[3], 三相水平排列, 深埋 2.5 m, 导体为铜, 电阻率为 $1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, 外皮材料为钢丝, 其电阻率为 $1.477 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$, 绝缘层 1 为 XLPE, 其相对介电常数为 2.31, 绝缘层 2 为 PVC,

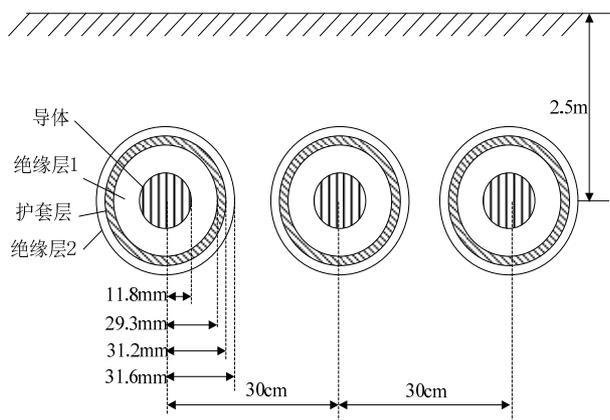


Figure 1. Configuration of power cable
图 1. 电力电缆结构图

其相对介电常数为 5.5，大地电阻率取为 $100 \Omega \cdot m$ 。

本文考虑线路参数的频率特性，采用较高频率的行波信号进行故障测距研究，因此，选用 ATP 中的 Semlyen 电力电缆模型，电力电缆外护套理想接地，线路长度 30 km，不换位。

3. 电力电缆行波传播依频特性

对于三相电力电缆进行故障分析时，需要采用模量分析理论，将相量变换为相互独立的模量，将对相量的求解问题转变成对模量的分析，根据文献[4]可知，在频率较高时变换矩阵差异很小，因此通过 ATP 根据上节中的电力电缆结构计算文中采用的 800 Hz 下的电流变换矩阵为：

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} -0.3370 & -0.5 & 0.3370 \\ 0.6512 & 0 & 0.3488 \\ -0.3370 & 0.5 & 0.3370 \end{bmatrix} \quad (1)$$

求出上面矩阵的逆矩阵 \mathbf{Q}^{-1} ，并根据相量、模量电流的关系有：

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5175I_a + I_b - 0.5175I_c \\ -I_a + I_c \\ 0.9662I_a + I_b + 0.9662I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据上式，可得到各模量的传播路径如图 2 所示。

由图 2 可见，模 1 分量由 *b* 相电缆导体注入，经 *a* 相与 *c* 相返回，模 2 分量由 *c* 相导体注入，经 *a* 相返回，模 3 分量由 3 相注入，经大地构成回路。由 ATP 仿真可得到各模量色散特性即衰减系数与波速如图 3 所示。

由图 3 可以看出，各模量在低频时随频率变化差异很大，但在频率达到 1 kHz 时，各模量衰减系数与波速趋于一致，且均趋于稳定，由于模 3 分量经大地构成回路，因此随频率变化较模 1、模 2 稍大。

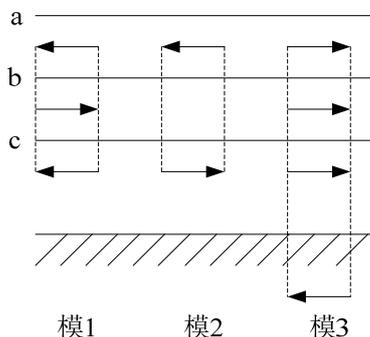


Figure 2. The propagation modes of every modulus
图 2. 模量传播路径

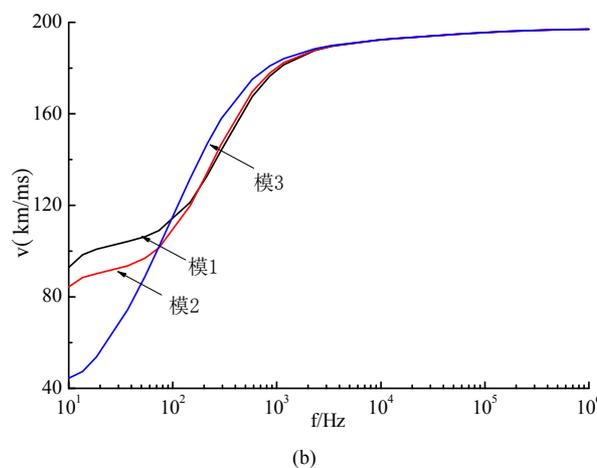
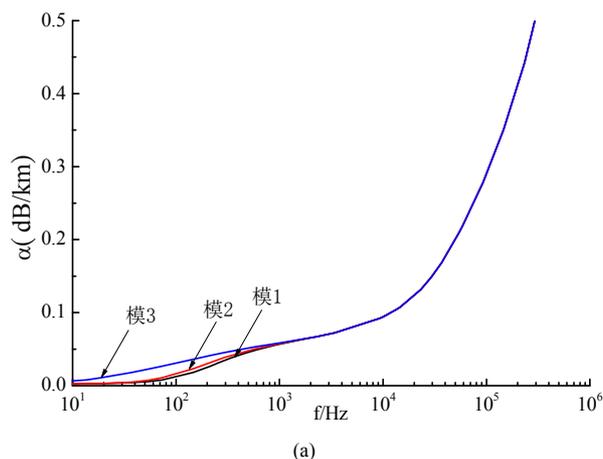


Figure 3. Frequency characteristic of every modulus: (a) Frequency characteristic of absorption coefficient; (b) Frequency characteristic of wave velocity
图 3. 电力电缆各模量频率特性: (a) 衰减系数频率特性; (b) 波速频率特性

由于行波故障测距采用的是高频信号的信息，由上面分析可知，对于电力电缆线路，在高频范围内，3个模量的衰减情况与传播速度几乎相同，因此，从这点来说无论选取何种模量均可，但由式(2)可知，当发生ac相间短路时，故障边界条件为： $i_b = 0$ ， $i_a = -i_c$ ，此时模1与模3的电流恒为0，同理当发生b相接地故障时，模2电流分量为0，可见单一模量不能反应所有故障类型，由于模3分量以大地为回路，在不接地相间短路时模3信号微弱，不易检测，因此本文以模1与模2分量配合，以初始行波幅值较大者作为测距模量。

4. 小波变换方法

4.1. 行波到达时间的确定

故障行波到达测量母线时会发生突变，我们需要提取这个时间信息，对于单纯的时域分析方法与频域分析方法均不适用于分析此类奇异性信号，小波变换是一种时频分析方法^[5]，可以提取信号的局部信息，适用于暂态行波的检测。

若实函数 $\theta(x)$ 为某一起平滑作用的低通函数，令 $\psi(x)$ 为其一阶导数，则对信号 $f(x)$ 的小波变换为：

$$\begin{aligned} W_{f(s,x)} &= f \cdot \psi(x) \\ &= f \cdot \left(s \frac{d\theta_s}{dx} \right) (x) = s \frac{d}{dx} (f \cdot \theta_s)(x) \end{aligned} \quad (3)$$

上式中， s 为尺度，可见，小波变换系数正比于信号被平滑后的一阶导数，即小波变换系数对应于信号的突变点，因此，选取平滑函数的一阶导数作为小波函数，就可由小波变换的模极大值点就可以确定信号的突变点。本文选取三次B样条小波检测故障行波到达的时刻，其具有一阶消失矩、线性相位且时域紧支撑等优点，可获得较精确的时间信息。B样条小波的滤波器系数为： $h = \{0.125, 0.375, 0.375, 0.125\}$ ， $g = \{2, -2\}$ 。

4.2. 波速的选取

由图3可以发现各模量的不同频率成分具有不同的传播速度，当用小波变换对信号进行分析时，在确定的尺度下，相当于对中心频率已知的波群进行分析，小尺度下，中心频率较大，波速较高，大尺度下，

中心频率较小，波速较低，由图3可以看出一定频带范围内的波速相差不大，因此，当线路结构已知的情况下，就可根据线路参数获取中心频率行波信号的波速，以此波速作为该频带范围内的波速。此时，行波传播速度就与该尺度下行波信号到达时间结合起来。

5. 在线故障测距算法

电力电缆在线故障测距方法^[6,7]有单端法及双端法两种，由于单端法需要判别第二个故障点反射波波头，在高阻故障时，电流行波在故障点透射系数大，而反射系数小，易造成误判，且其它干扰波也对波头的识别造成干扰，因此，单端法的可靠性较差，适用性不广，本文采用双端法进行测距研究。双端法的测距公式为：

$$d = \frac{L - v\Delta t}{2} \quad (4)$$

式中， d 为故障点距离， v 为行波传播速度， L 为电力电缆总长度， Δt 为行波到达两端的时间差。故障行波到达时间与波速的确定可采用上节中的方法，显然，由于双端法只需提取初始行波到达两端的时间信息，不需要对反射波进行判别，因此，相比于单端法可靠性较高。

6. 仿真实例

建立图4所示110 kV系统仿真模型，电力电缆参数如同图1。两侧电源集中参数阻抗为 $Z_{m1} = 0.95 + j36.5 \Omega$ ， $Z_{m0} = j24.25 \Omega$ ， $Z_{n1} = 1.15 + j42.2 \Omega$ ， $Z_{n0} = j34.27 \Omega$ ，采样间隔 $1 \mu s$ ，发生故障时间 $0.0001 s$ 。

研究发现第2尺度小波变换受噪声干扰较小且能准确提取故障行波到达的时间信息，因此，本文对第2尺度频率范围内的行波进行研究，由于采样频率为1 MHz，因此该频率范围为250 kHz~500 kHz，其中心频率为375 kHz，由图3曲线可以获得模1与模2

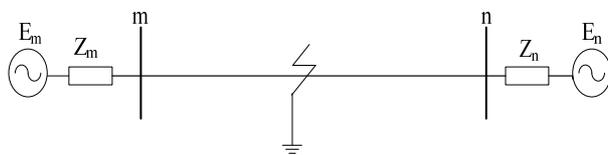


Figure 4. Simulation model
图4. 仿真模型

分量的波速均为 1.966×10^5 km/s。仿真选取常见的单相故障为例，当距离 m 端 5 km 处发生 a 相接地故障时，过渡电阻取为 50Ω ，比较发现模 2 分量初始波头幅值较大，两端获取的模 2 分量局部电流行波如图 5 所示。

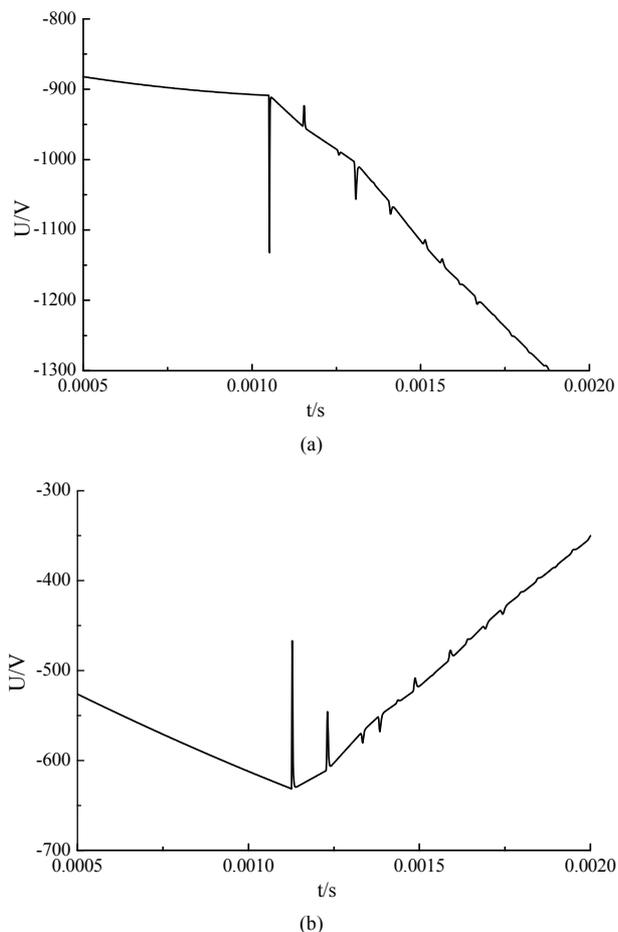


Figure 5. The fault current traveling wave of modulus 2: (a) The current traveling wave of bus m; (b) The current traveling wave of bus n

图 5. 模 2 故障电流行波: (a) m 端电流行波; (b) n 端电流行波

Table 1. Simulation results of phase a grounded
表 1. a 相接地短路仿真结果

故障距离/km	t_1/s	t_2/s	测距结果/km	相对误差/%
5	0.0001028	0.0001129	5.072	1.434
10	0.0001053	0.0001104	9.987	0.133
15	0.0001078	0.0001078	15	0
20	0.0001104	0.0001053	20.013	0.067
25	0.0001129	0.0001028	24.928	0.287

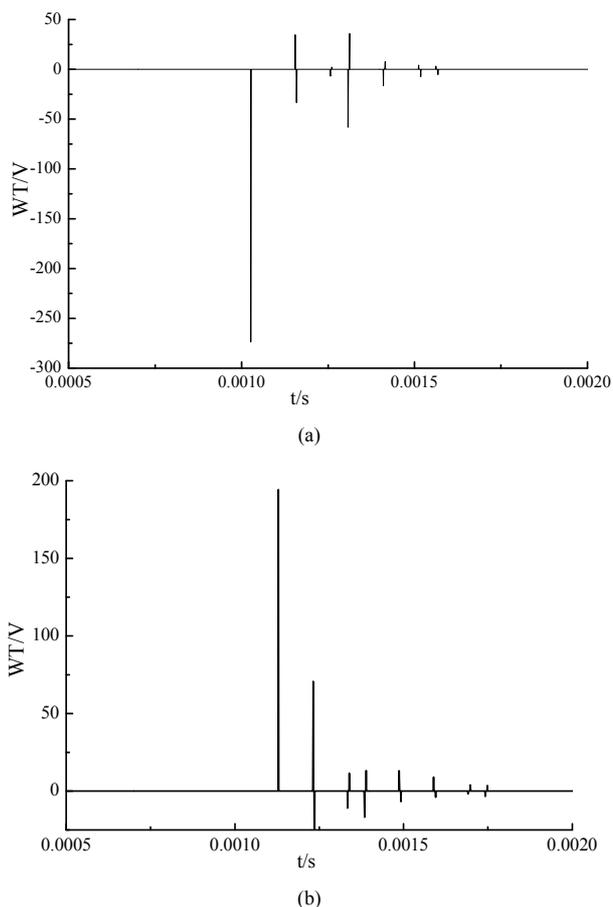


Figure 6. Modulus maximum of the fault current traveling wave of modulus 2: (a) Modulus maximum of the current traveling wave of bus m; (b) Modulus maximum of the current traveling wave of bus n
图 6. 模 2 故障电流行波模极大值: (a) m 端电流行波模极大值; (b) n 端电流行波模极大值

分别对两端电流行波进行小波变换，可以得到第 2 尺度模极大值如图 6 所示。

首波头到达 m 端的时间为 $t_1 = 0.001028$ s，到达 n 端的时间为 $t_2 = 0.001129$ s，因此根据式(4)可得到故障距离为 5.072 km，误差很小。不同故障点的单相故障测距结果见表 1。

仿真结果表明，该方法对电力电缆故障测距有较高的准确性，在近母线端发生故障时相对误差较其它故障点大，但仍然满足电力电缆测距的要求。

7. 结论

本文研究了电力电缆线路参数的频率特性，发现三个模量在低频段随频率变化差异较大，在达到一定频率后频率特性曲线几乎重合，在此基础上解决了测量模量的选取问题，并提出了影响测距精度最大的行

波到达时间及传播速度的确定方案,利用双端在线测距方法进行电磁暂态仿真,得到令人满意的仿真结果。

参考文献 (References)

- [1] 朱云华,艾芊,陆锋. 电力电缆故障测距综述[J]. 继电器, 2006, 34(14): 81-88.
- [2] 赖晓峰. 电力电缆故障测距方法的研究[J]. 广东电力, 2007, 20(6): 11-15.
- [3] 宋建. 基于小波变换的高压电缆故障行波测距研究[D]. 昆明理工大学, 2009.
- [4] 吴维韩. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 61-100.
- [5] 董新洲, 刘建政, 张言苍. 行波的小波表示[J]. 清华大学学报, 2001, 41(9): 13-17.
- [6] 林金洪. 电力电缆线路故障测距方法研究[D]. 重庆大学, 2003.
- [7] 刘嫣. 基于小波的电缆在线故障定位研究[D]. 西安科技大学, 2007.