

基于复小波分析的牵引网故障测距算法

周建辉, 康劲松, 徐国卿

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 故障暂态分量能够充分地描述故障的特征, 用来研究故障测距具有传统算法不可比拟的优点. 针对复线牵引网的故障暂态高频分量和故障距离间的关系展开研究, 绘制了故障距离和始端等效阻抗谐振频率的对应关系曲线, 证明故障电压暂态信号和始端等效阻抗具有相同的谐振频率点. 用 Morlet 复小波提取故障电压信号的谐振频率, 并依据得到的谐振频率曲线, 实现了牵引网的故障定位. 分析表明, 基于复小波分析的暂态谐振频率法进行牵引网故障测距, 可以消除过渡电阻等对故障测距的影响, 具有较高的精度和可靠性.

关键词: 故障测距; 牵引网; 暂态谐振频率; Morlet 复小波
中图分类号: TM 715; U 223.6 **文献标识码:** A

Study of Traction Network Fault Location Based on Complex Wavelet

ZHOU Jianhui, KANG Jinsong, XU Guoqing

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The study of the traction network fault location using the transient component can achieve better results than those using traditional methods. The paper presents a study of the relations between the high frequency parts of the transient components and the fault locations to apply the double lines of traction network. The correlative curve between the fault locations and the resonance frequency of the equivalent impedances at the beginning of the traction lines was analyzed through soft simulations. The resonance frequency of the transient component of voltage signals was proved to be the same as the resonance frequency of the equivalent impedances at the beginning of the traction lines. Morlet complex wavelet was utilized to get the resonance frequency of the transient component of the voltage signal. The fault point was located by using the correlative curve between the fault locations and the resonance frequency of the equivalent impedances at the

beginning of the traction lines.

Key words: fault location; traction lines; the transient resonance frequency; Morlet complex wavelet

随着世界石油资源的日益短缺和各国对环境保护的日益重视, 世界电气化铁路以及城市轨道交通将进行一轮更快速的发展. 电气化铁道牵引网故障测距技术是提高牵引网安全可靠运行的重要手段. 准确的故障测距能减少维修人员巡线检查时间, 加快线路恢复, 减少因线路故障停电造成的经济损失. 因此对电气化铁道牵引网故障测距算法研究具有着重要的理论意义和实用价值.

阻抗法故障测距是发展最早且较成熟的测距方法, 但由于过渡电阻的影响很难消除, 降低了该方法的测距精度. 行波法故障测距在电气化铁道牵引网中的应用还刚刚起步, 波速、线路参数、行波波头到达时间等因素都影响着行波法的精确性. 相位信息是牵引供电系统中的重要特性, 通过相位分析可更全面地认识非平稳信号的本质^[1-4]. 复小波既能提供被分析信号的幅值信息又能提供相位信息, 并可以聚焦到被分析信号的任意细节, 将复小波应用于牵引网故障信号的分析中, 可以获得比傅立叶分析更好的效果, 从而提高了故障测距算法的精确度^[5].

1 暂态谐振频率法原理

复线牵引网最大的优点是安全可靠, 一旦一条线路发生故障可以切换到另一条非故障线路, 从而避免发生大面积停电, 保障线路安全可靠地运行. 本文以复线直供末端并联牵引网为研究对象展开分析.

收稿日期: 2009-10-21

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金(0800241006)

作者简介: 周建辉(1979—), 女, 讲师, 博士生, 主要研究方向为检测技术及其自动化装置. E-mail: zhoujianhui@tongji.edu.cn

统计分析牵引网的故障,其中,接地短路故障发生的几率在 70%以上,是故障测距的主要研究对象.复线直供末端并联牵引网接地短路故障发生的等效模型如图 1 所示.图中,牵引变电所等效为带有内阻 Z_s 的电源 E_s ;线路采用分布参数模型, m 为线路的始端, n 为线路的末端;单位长度的自电阻、自电感、自电导和自电容分别为 R, L, G 和 C ;互电阻、互电感、互电导和互电容分别为 R_m, L_m, G_m 和 C_m .故障点过渡电阻为 R_f ,机车可等效为一定的阻抗 Z_t (馈线空载运行时为无穷大).线路总长为 L ,故障点到始端的距离为 L_f 、机车到始端母线的距离为 L_t .若

下行线 a 相发生接地短路,根据故障点与机车的相对位置可分为两种情况讨论:①机车位于故障点之前,即 $L_t < L_f$,如图 1a 所示;②机车位于故障点之后,即 $L_t > L_f$,如图 1b 所示.

利用电路理论中的传输线方程可以求得始端等效阻抗为

$$Z_e = \frac{Z_{mn} Z_s}{Z_{mn} + Z_s} = f(\omega, L_f) \quad (1)$$

式中, Z_{mn} 为线路 mn 的阻抗.由式(1)可知,在线路参数已知的前提下, Z_e 应为频率 ω 的函数.随着频率的变化应该存在和故障距离 L_f 相关的谐振频率点.

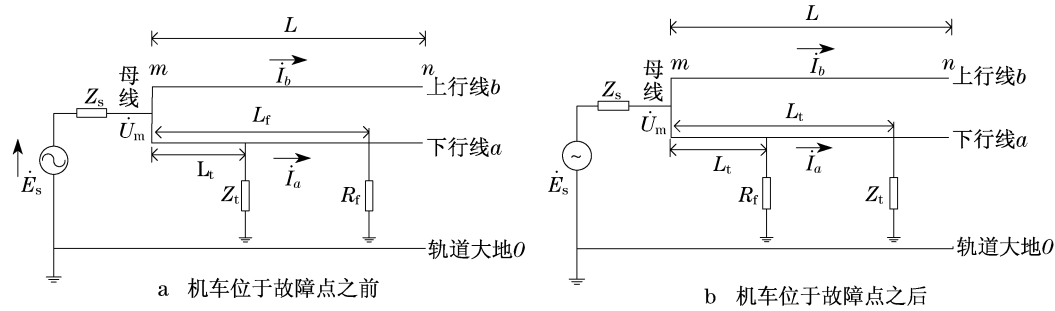


图 1 复线牵引网故障等效图

Fig.1 Double line traction network fault equivalent sketch

2 故障距离与谐振频率的对应关系

由式(1)的推导过程可知该函数包含较多的参数,包括系统阻抗、线路参数、过渡电阻、机车位置、机车等效阻抗等,求解量巨大,必须利用数字仿真的方法分析谐振频率及其影响因素.若取线路参数如下:上下行线路自阻抗、自导纳、自电感和自电容分别为: $R = 0.217 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$, $G = 0$, $L = 1.515 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$, $C = 9.5 \text{ nF} \cdot \text{km}^{-1}$;上下行线路互阻抗、互导纳、互电

感、互电容分别为: $R_m = 0.039 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$, $G_m = 0$, $L_m = 0.3756 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$, $C_m = 3.16 \text{ nF} \cdot \text{km}^{-1}$.牵引变电所等效阻抗取为 $Z_s = 0.245 + \text{j}1.055$,机车等效阻抗取为 $Z_t = 60 + \text{j}80$, $L_t = 17 \text{ km}$, $R_f = 0$,线路全长 $L = 30 \text{ km}$.分别取故障距离为 $L_f = 14 \text{ km}$, $L_f = 24 \text{ km}$,用 Matlab 电力系统工具箱中的电力系统分析元件,得出等效阻抗和频率的对应关系,如图 2 所示.随着故障距离的改变,谐振频率的分布也发生相应的改变.经过大量仿真实验和数据分析比较,发现谐振频率与故障距离之间存在非线性的对应关系.

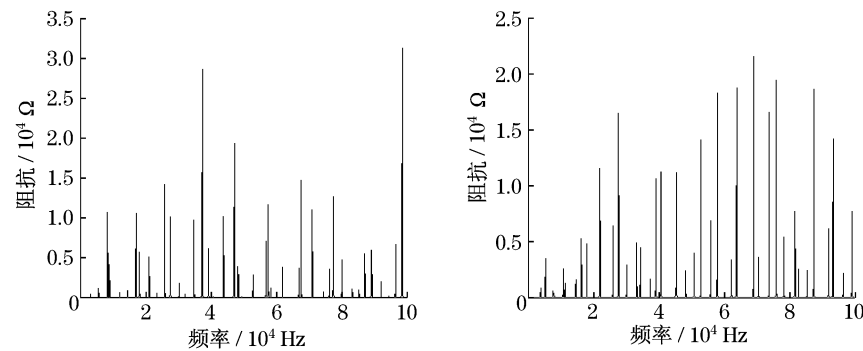


图 2 不同故障距离下阻抗与谐振频率关系图

Fig.2 Relational graph of the impedance and the resonance frequency under the different fault locations

3 基于 Morlet 复小波的谐振频率法^[6]

Morlet 复小波的表达式为: $\Psi(t) = \exp(j2\pi f_0 t) \exp(-\beta^2 t^2/2)$. 其在尺度因子 a 下的傅立叶变换为:

$$\Psi_a(\omega) = \frac{a}{\beta} \exp[-a^2(\omega - (2\pi f_0/a))^2/(2\beta^2)],$$

其中, f_0 是中心频率, β 为频宽参数. 此时的滤波器中心角频率为 $\omega_0 = 2\pi f_0/a$, 带宽为 $\Delta f = \sqrt{2}\beta/(\pi a)$.

3.1 中心频率 f_0 的选取

若信号所要分析的频率范围为 $[f_L, f_H]$, 其中 f_L, f_H 为频率范围的下限和上限. 只要选择 $f_0 < f_H$, 通过调节尺度因子 a 即可获得 f_H 以下的频率. 通常可取为信号的采样频率 f_s , 以提高频率分辨率.

3.2 尺度因子 a 的选取

设频率分辨率需提高为 ΔF . 由于小波在不同的尺度下其对应带通滤波器的中心频率 f_0/a 会随着 a 的增大而向低频方向移动, 带宽 Δf 也相应减小, 即低频下的频率分辨率会越来越高. 因此只要保证在最高频的频率分辨率满足要求, 就能达到要求. 取 $a = a_0^k$ ($k = 1, 2, \dots$). 为满足频率分辨率的要求, 应有: $\Delta F a_0^2 - f_0 a_0 + f_0 \geq 0$ 结合条件 $a_0 > 1$, 即可求出合适的 a_0 .

3.3 频宽参数 β 的选取

为防止频率混叠, 带宽必须满足: $\beta \leq \pi f_0 (a_0 - 1)/(\sqrt{2} a_0)$. 一般地, 离散小波变换定义为:

$$W_f(a, iT_s) = \frac{T_s}{\sqrt{a}} \sum_n \bar{\Psi}((n-i)T_s/a) f(nT_s),$$

其中, T_s 是信号采样时间, i 为时域变换系数. 由于谱估计的目的是为了分析不同尺度下小波变换系数的幅值分布, 即频域的信息, 因此可以放弃时域的信息, 以减少计算量. 式中取 $i = 0$, 则有: $W_f(a, 0) =$

$$\frac{T_s}{\sqrt{a}} \sum_n \bar{\Psi}(nT_s/a) f(nT_s).$$

小波系数 $W_f(a, 0)$ 会随着尺度 a 的变化而变化, 这就构成了信号 $f(t)$ 在不同频率(尺度)下的小波特征谱分布. 为测试基于 Morlet 小波的高分辨率谱估计算法的精度和有效性, 取信号 $f(t) = \sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t)$, 其中, $f_1 = 1.3 \text{ Hz}$, $f_2 = 1.4 \text{ Hz}$; 信号采样频率 $f_s = 10 \text{ Hz}$, 采样点数 $N = 80$. 信号经小波谱分析算法处理后的谱值分布曲线见图 3. 其中, 取频率分析范围为 $[0.48 \text{ Hz}, 2.18 \text{ Hz}]$,

$\alpha_0 = 1.006 \text{ Hz}$, $\beta = 0.1$, 则 k 的取值范围为 ($k = 250, 251, \dots, 500$). 图中存在两个明显的波峰, 也就清晰分辨出了 f_1 和 f_2 . 可见该方法有很高的频率分辨率.

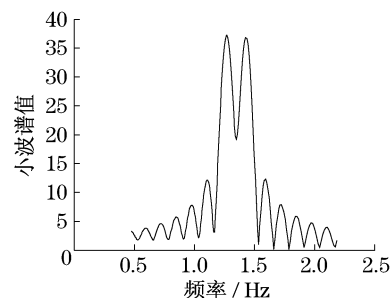


图3 Morlet 小波谱分布图

Fig.3 Distribution map of Morlet wavelets

4 故障测距算法的实现

4.1 频谱极值点与故障距离的对应关系

经分析可知, 不同过渡电阻, 机车位置和机车取流对谐振频率的影响可忽略不计, 线路参数和系统阻抗虽然对谐振频率有较大影响, 但可通过在线测量的方法减小影响. 由此可先确定系统阻抗和线路参数, 后建立复线牵引网模型, 按线路空载, 过渡电阻为零, 从 0 到 30 km 以 0.5 km 为故障距离步长分别求取故障距离与谐振频率的对应关系, 绘制第 1, 第 2 和第 3 个谐振频率点与故障距离的对应关系曲线, 经过大量的仿真得到图 4. 图中 $f_{\max 1}$, $f_{\max 2}$, $f_{\max 3}$ 分别表示第 1、第 2、第 3 谐振频率和故障距离的对应关系. 观察可知 $f_{\max 2}$, $f_{\max 3}$ 同一谐振频率对应的故障距离不唯一, 若用第 2 和第 3 谐振频率来求取故障距离会产生真伪根, 给故障测距带来干扰. 第一谐振频率与故障距离的关系曲线是单调上升的, 因此选用 $f_{\max 1}$ 来求取故障距离.

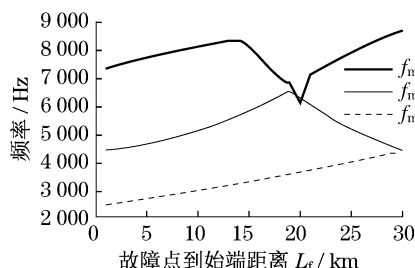


图4 频率极值点 f_{\max} 与故障距离的关系曲线

Fig.4 Curves of frequency point f_{\max} and fault location

4.2 基于谐振频谱的测距算法的原理

牵引网发生故障后,故障暂态电压 U_z 和电流 I_z 以行波的形式沿输电线路传播,具有从低频到高频的连续频谱^[1].经过推导可得如下公式:

$$U_z = \left| \frac{Z_{mn}}{Z_s + Z_{mn}} \right| E_s = |Z_{e1}| E_s$$
$$I_z = \left| \frac{1}{Z_s + Z_{mn}} \right| E_s = |Z_{e2}| E_s$$
$$Z_e = \frac{Z_{mn} Z_s}{Z_{mn} + Z_s} = f(\omega, L_f)$$

可以看出, E_s 为常数(27.5 kV), U_z, I_z (为频率的函数)的极值点应分别与电压最大值等效阻抗 $|Z_{e1}|$, 电流最大值等效阻抗 $|Z_{e2}|$ 相一致. 而 $|Z_e|$, $|Z_{e1}|$ 和 $|Z_{e2}|$ 有相同的分母因子 $|Z_s + Z_{mn}|$, 也就是说三者的谐振频率点相同, 可以用 $|Z_e|$ 将后两者统一起来. 经分析可知, 故障后产生的暂态电压和电流对应频率的变化都存在相应的极值点, 而这些极值点的分布与测量端的等效阻抗 Z_e 的谐振频率一一对应. 因此, 只要在故障发生后获取暂态电压和电流信号, 通过高通滤波器获取高频信号, 分析其频谱, 求出极值点对应的频率, 即为测量端等效阻抗的谐振频率, 之后利用等效阻抗谐振频率和故障距离的对应关系曲线即可求得故障距离.

4.3 基于谐振频谱的测距算法的实现

通过分析电压或电流信号的谐振频率来确定对应的测量端阻抗的谐振频率. 经过仿真和试验对照, 发现电流信号的频谱极值点的幅值相差较大, 后段的极值点幅值较小难以分辨, 因此采取电压暂态信号作为分析对象提取谐振频率^[6].

故障发生后, 对经过滤波器的暂态电压信号进行频谱分析, 利用 Morlet 复小波求取其在高频段的频谱分布. 若采样频率取为 f_s , 电压信号取故障发生后的一个工频周期, 采样点数为 N , 则频率分辨率为 $\Delta f = f_s \cdot N^{-1} = 50 \text{ Hz}$.

在 $[0, f_s/2]$ 整个频率段寻找极值点及相应的频率点. 具体步骤如下: ①找到电压频谱最大幅值点 $|F_V|_{\max}$, 以 $0.35 |F_V|_{\max}$ 作为阈值, 凡小于该值的都设为零, 以消除频率后段干扰的影响; ②设 k 为搜索步长, $|F_V(k)|$ 斜率从正变负的那点即为极值点. 其后将找到的谐振频率在图 4 上第一谐振频率对应的曲线上寻找故障距离, 若 f_u 为所搜寻的极值点频率, 且满足 $f_u \in [f(k-1), f(k)]$, 可按下式进行线性计算:

$$L_f = \frac{f(k-1) - f_e}{f(k-1) - f(k)} \cdot$$

$$(L(k) - L(k-1)) + L(k-1),$$

其中, $L(k-1), L(k)$ 分别为 $f(k-1), f(k)$ 所对应的故障距离.

5 数字仿真分析结果

以复线牵引网为研究对象, 机车模型以 SS4 型电力机车为模型^[7], 采用复线末端并联, 线路总长为 30 km, 分别取线路空载和机车负荷位于 17 km 两种情况仿真, 故障发生角为 30° , $f = 50 \text{ Hz}$, 线路参数同前面一致. 经过误差分析, 得到表 1, 表 2 所示测距结果.

表 1 馈线空载时的测距结果

Tab.1 Results of fault location when traction network unloaded

实际距离/km	$R_f = 0$		$R_f = 50 \Omega$		$R_f = 100 \Omega$	
	测距结果/km	误差/%	测距结果/km	误差/%	测距结果/km	误差/%
0.5	0	1.666 7	0	1.666 7	0	1.666 7
1	1.107 1	0.357 0	0	3.333 3	0	3.333 3
2	3.240 0	4.133 3	0	6.666 7	0	6.666 7
5	5.112 5	0.375 0	3.227 2	5.909 3	0	16.666 7
10	10.175 8	0.586 0	8.555 0	4.816 7	10.175 9	0.586 3
15	14.738 2	0.872 7	14.007 4	3.308 7	13.254 4	5.818 7
20	19.815 7	0.614 3	19.815 7	0.614 3	19.821 6	0.594 7
25	24.916 2	0.279 3	24.916 2	0.279 3	24.916 2	0.279 3
26	26.065 6	0.218 7	26.065 6	0.218 7	26.065 6	0.218 7
27	26.723 4	0.922 0	26.723 4	0.922 0	26.723 4	0.922 0
28	28.012 8	0.426 7	28.012 9	0.426 7	28.012 6	0.426 7
29	28.871 1	0.429 7	28.884 2	0.386 0	28.874 0	0.420 0

表 2 机车运行位于 17 km 处的测距结果

Tab.2 Results of fault location when locomotive running at 17 km

实际距离/km	$R_f = 0$		$R_f = 50 \Omega$		$R_f = 100 \Omega$	
	测距结果/km	误差/%	测距结果/km	误差/%	测距结果/km	误差/%
0.5	1.104 8	2.016 0	0	1.666 7	0	1.666 7
1	2.229 2	4.097 3	0	3.333 3	0	3.333 3
2	3.227 0	4.090 0	0	6.666 7	0	6.666 7
5	6.005 4	3.351 3	4.190 7	2.697 7	0	16.666 7
10	10.175 0	0.583 3	9.375 8	2.080 7	10.175 0	0.583 3
15	14.738 2	0.872 7	14.735 3	0.882 3	14.738 2	0.872 7
20	19.828 6	0.571 3	19.828 6	0.571 3	19.828 6	0.571 3
25	24.729 7	0.901 0	24.716 2	0.946 0	24.716 2	0.946 0
26	26.065 6	0.218 7	26.065 6	0.218 7	26.065 6	0.218 7
27	26.723 4	0.922 0	26.723 4	0.922 0	26.723 4	0.922 0
28	28.012 8	0.042 7	28.012 9	0.043 0	28.012 6	0.042 0
29	28.870 3	0.432 3	28.870 3	0.432 3	28.870 4	0.432 0

(下转第 1860 页)