

高压直流输电线路单端行波故障测距误差分析

王 宾, 杨 林

(清华大学电机系(电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点试验室), 北京 100084)

摘要: 快速准确的高压直流输电线路故障测距对于提高交直流混联电网的运行安全性非常重要。单端行波测距不受数千公里的通信可靠性及严格的两端同步性的影响, 具有较好的应用前景。但是直流线路的边界对初始及故障点反射行波的特性影响不同, 会造成较大的测距误差。针对该问题, 给出了不同阶数滤波器作为直流输电线路边界时, 故障后互感器检测到的初始波头的时域表达式, 分析并仿真验证了初始及故障点反射行波的误差来源, 为后续的单端行波测距算法改进奠定了理论基础。

关键词: 高压直流输电; 故障测距; 行波测距; 边界特性; 误差分析

Error analysis of single terminal traveling wave fault location for HVDC transmission lines

WANG Bin, YANG Lin

(State Key Lab. of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Fast and accurate fault location of HVDC transmission line is very important to improve the safety margin of hybrid HV AC-DC power grid. Single-terminal traveling wave fault location method is not affected by the reliability of thousands of kilometers of communication and strict synchronization of both ends, so it has a good application prospect. However, the boundary of DC line has different influence on the characteristics of reflected traveling wave at the initial and fault points, which will cause big fault location error. To solve this problem, this paper presents the time-domain expression of the initial current travelling wave head detected by the Current Transformer (CT) after the fault when the filters of different orders are used as the boundary of the DC line. And then the fault location error sources are analyzed and verified, which lays a theoretical foundation for the subsequent improvement of the single terminal traveling wave fault location algorithm.

Key words: HVDC; fault location; traveling wave-based fault location; boundary characteristics; error analysis

0 引言

高压直流输电距离长, 跨越地区的地形地貌、环境气候差别大, 故障率较高^[1]。特别是, 对于目前中国超特高压交直流混联大电网运行形态, 直流系统故障或长时间停运导致的大容量输

送功率缺失, 对电网的安全稳定运行冲击或隐患较大, 因此快速准确的故障定位极为重要^[2-3]。

高压直流输电线路故障后没有交流调制波, 故障行波过程、暂态衰减后达到稳态, 整个过渡过程较为清晰。现有的行波法、固有频率法和故

障分析法分别从时间、频率和空间三个角度建立了可检测电气量和故障距离之间的关系,是高压直流输电线路的三种主流故障测距方法。固有频率法稳定性较高,但是抗干扰能力较差,且存在测距死区;故障分析法同样具有较好的稳定性,但是受制于模型的准确度且其测距准确度有限,计算量很大^[4-5]。理论上,行波法测距的准确性不受线路类型、故障电阻、故障类型及两侧系统运行方式的影响,可以达到很高的测距准确度,双端行波测距是目前实际系统中主要采用的技术,但是上千公里的双端通信可靠性及同步性要求非常高^[6]。

单端行波测距的关键在于准确识别初始行波波头及故障点反射波头。由于直流输电电流没有过零点,一般不考虑弧光接地的故障情况,因此故障过渡电阻一般考虑为纯阻性,则故障点的折返射系数固定清晰。因此,在保证足够采样率的前提下,直流线路的边界特性就成为了单端行波测距准确度的最主要影响因素。

直流输电线路的边界元件(平波电抗器和直流滤波器)会导致行波的反射系数随频率变化。入射电流行波可以看作理想的阶跃波,含有全频带信息。不同频率分量经过边界反射后的幅值和相位变化不同,这将导致行波波头的振荡,使得波头平缓,小波变换的模极大值点出现的时刻和信号的到达时刻之间可能出现偏差,导致行波到达时刻标定不准确;行波的振荡过程对应多个突变点,进行小波变换后出现多个模极大值点,存在一些虚假模极大值点,可能导致行波到达时刻标定错误。

针对该问题,本文分析了直流线路边界的行波反射特性,给出了不同阶数滤波器作为边界时,故障后互感器检测到的初始波头的时域表达式,分析并仿真验证了误差来源,为后续的单端行波测距准确度提高奠定了理论基础。

1 直流线路边界的行波反射特性分析

图1给出了简化的高压直流输电系统及直流线路故障后行波的传播过程。单端行波原理测距

公式表示为

$$l_1 = \frac{(t_{M2} - t_{M1})v}{2} \quad (1)$$

式中, v 为行波的波速度; t_{M1} 、 t_{M2} 分别为故障后初始行波到达线路出口量测点的时间以及随后经故障点反射后再次到达量测点的时间。

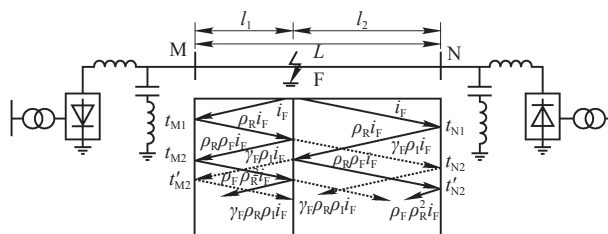


图1 故障电流行波传播过程示意图

Fig. 1 Propagation of fault traveling waves

图1中, ρ_R 、 ρ_I 和 ρ_F 分别为整流侧边界、逆变侧边界和故障点的反射系数; γ_F 为故障点的折射系数; l_1 为故障点到M端的距离; L 为线路长度。

以单极系统为例进行分析,在直流线路边界,电流反射系数可表示为

$$\rho_i = \frac{Z_c - [(sL_{dc} + sL_r) // Z_{lb}]}{Z_c + [(sL_{dc} + sL_r) // Z_{lb}]} \quad (2)$$

式中, L_{dc} 为交流系统和换流器归算到直流侧的等效电感; L_r 为平波电抗器的电感; Z_{lb} 为直流滤波器的阻抗。

如果将故障初始电流行波看作阶跃波激励,线路出口量测点检测到的初始波头看作响应,那么传递函数 $G(s)$ 可以用反射系数表示,即

$$G(s) = 1 + \rho_i = \frac{2Z_c}{Z_c + [(sL_{dc} + sL_r) // Z_{lb}]} \quad (3)$$

由式(3)可见,线路参数、换流站参数仅影响传递函数中各参数的数值,传递函数的形式仅受直流滤波器形式的影响。根据直流滤波器滤除谐波的次数,可以将其分为单调谐滤波器、双调谐滤波器和三调谐滤波器,具体如图2所示。

采用直流系统典型的滤波器参数绘制不同阶数滤波器的等效传递函数的阶跃响应,如图3所示。

采用不同阶数谐滤波器时,传递函数的零极点分布情况如图4所示。

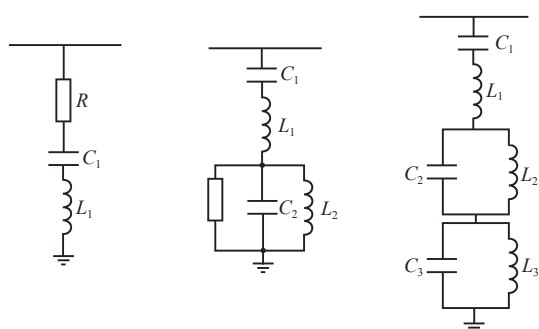


图2 单调谐、双调谐和三调谐滤波器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single tuning, double tuning and triple tuning filters

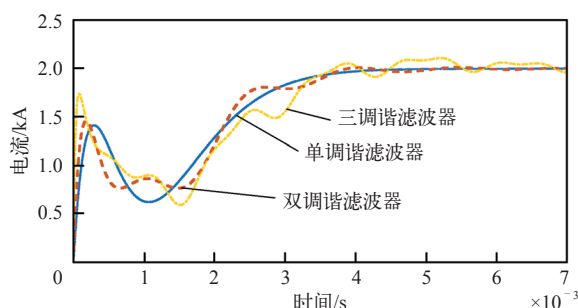


图3 不同类型滤波器的等效传递函数的阶跃响应

Fig. 3 Step response of equivalent transfer functions of different order of filters

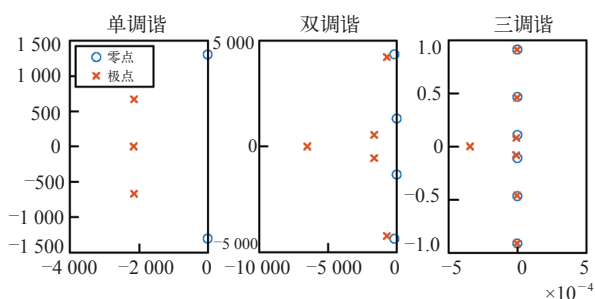


图4 采用不同阶数谐波滤波器时传递函数的零极点分布

Fig. 4 Zero pole distribution chart of transfer function with different order harmonic filter

可见,采用单调谐滤波器时,传递函数有3个极点和2个零点,其中一对极点和一对零点是关于实轴对称的;采用双调谐滤波器时,传递函数有5个极点和4个零点,其中两对极点和两对零点分别是关于实轴对称的;采用三调谐滤波器时,传递函数有7个极点和6个零点,其中三对极点和三对零点分别是关于实轴对称的。

当采用双调谐滤波器时,有一对零极点基本重合,可以相互抵消,化简后传递函数的形式和

单调谐滤波器相同。化简前后的传递函数阶跃响应如图5所示。可见消去一对基本重合的零极点后,传递函数阶跃响应与化简前基本重合。

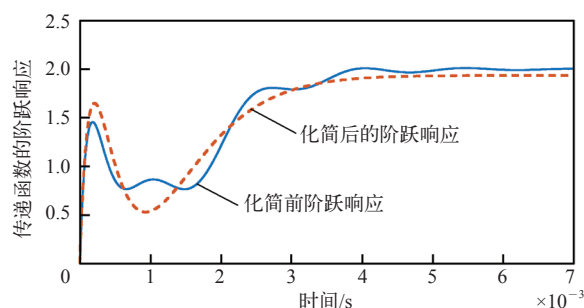


图5 采用双调谐滤波器时化简前后的传递函数阶跃响应

Fig. 5 Step response of transfer function before and after simplification with double tuned filter

采用三调谐滤波器时,有两对零极点基本重合,也可以相互抵消、化简。化简前后的传递函数阶跃响应如图6所示。化简前后的传递函数阶跃响应变化趋势一致。

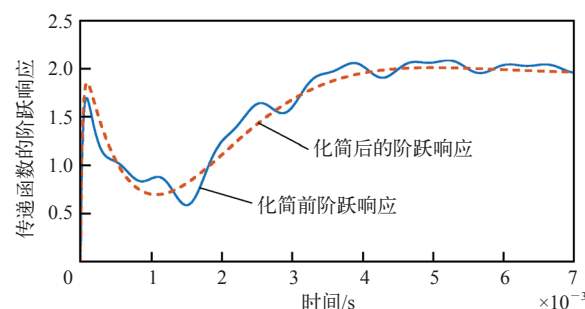


图6 采用三调谐滤波器时化简前后的传递函数阶跃响应

Fig. 6 Step response of transfer function before and after simplification with triple tuned filter

通过上述分析,可以得到如下结论:无论直流滤波器的形式是单调谐、双调谐还是三调谐,故障初始行波和互感器检测到的第一个波头间的传递函数都可以表示成如下形式,即

$$G(s) = \frac{K(s+a-jb)(s+a+jb)}{(s-p)(s+\alpha-j\omega)(s+\alpha+j\omega)} \quad (4)$$

由于故障初始行波可以表示为阶跃波,那么互感器检测到的第一个波头在频域可以表示为

$$Y(s) = X(s)G(s) = \frac{K(s+a-jb)(s+a+jb)}{(s-p)(s+\alpha-j\omega)(s+\alpha+j\omega)} \times \frac{K'}{s} \quad (5)$$

根据拉普拉斯反变换,互感器检测到的第一个波头在时域可以表示为

$$y(t) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ Y(0) + Ae^{-pt} + Be^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi) & t \geq t_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $Y(0)$ 为常数, 也就是波形中的直流偏移分量; A 、 p 为衰减直流分量的幅值和衰减系数; B 、 α 、 ω 和 φ 分别为衰减正弦分量的幅值、衰减系数、角频率和相位。

计算 $s=0$ 时的传递函数增益, 可知不同阶数的直流滤波器增益均为 2。这就意味着, 在输入函数为阶跃波的情况下, 输出函数的最终稳定值为 $2K'$, 也就是说 $Y(0)=2K'$ 。

因此, 无论直流滤波器的阶数是多少, 互感器检测到的初始波头在时域都可以表示为直流分量、衰减直流分量和衰减正弦分量的叠加, 其稳定值反映了故障初始行波的幅值。

对双极系统而言, 传递函数可进行解耦分解为线模和零模传递函数, 如图 7 所示, 可见线模和零模传递函数的阶跃响应具有相同的变化趋势, 对其进行分析也可以得到与单极系统传递函数相同的结论。

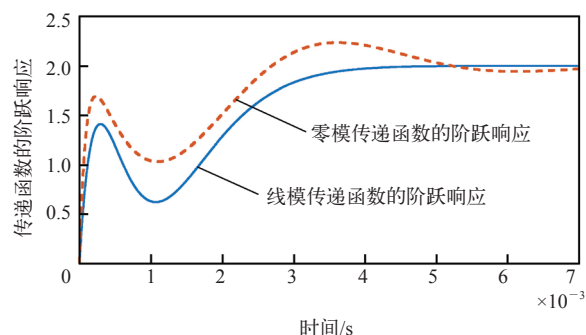


图 7 双极直流系统线模和零模传递函数的阶跃响应

Fig. 7 Step response of line mode and zero mode transfer functions in bipolar HVDC system

线路出口处检测到的故障初始行波波头仅会在线路边界处反射一次, 而来自故障点的反射波头将会在线路边界处反射两次才能被检测到, 因此由上述理论分析可知, 反射传递函数中的衰减直流分量和衰减正弦分量将会使得两次反射后的波形变形, 出现虚假波头, 从而可能会导致辨识来自故障点的反射波头延时甚至失效, 产生明显的测距误差。

2 单端行波故障测距的误差分析

小波变换是波头标定的良好工具, 模极大值对应时刻可以准确地反映行波到达的时刻^[6]。

给出具体的单端行波测距步骤如下:

1) 对故障电流行波 (或线模电流行波) 进行小波变换, 得到前三个尺度下的模极大值序列。

2) 通过考察不同尺度下的模极大值的变化情况消除噪声的干扰, 当某一模极大值不随着尺度的增加而增大时, 则被判定为噪声产生的模极大值。

3) 检测到的首个非零模极大值作为故障初始行波对应的模极大值, 根据极性判断检测到的第二个模极大值对应的是故障点反射波还是故障点折射波, 确定故障点反射波。当检测第二个波头时, 为避免其他波阻抗不连续点导致的行波影响, 需要设置阈值, 取值为当前尺度下初始行波模极大值的 10%。

4) 以初始行波模极大值最大的尺度作为检测尺度, 根据式 (1) 计算故障距离。

以单极输电系统故障为例, 按照上述步骤完成单端行波测距, 分析传统行波法的测距误差。在 PSCAD 中搭建单极直流输电系统, 电压等级为 500 kV, 输电线路采用贝瑞隆模型, 线路波阻抗为 394.06 Ω , 波速度为 2.9525×10^8 m/s, 长度设置为 1 000 km, 仿真的采样频率为 200 kHz。

直流滤波器选用单调谐滤波器, 具体参数为: $R=5.3 \Omega$, $L_1=70.362$ mH, $C_1=1 \mu\text{F}$ 。在距离整流侧 600 km 处设置故障, 过渡电阻 $R_f=0 \Omega$ 。为了更好地展现单端法误差的来源, 下述将双端和单端行波故障测距的误差进行对比分析。

对故障网络中整流侧和逆变侧的电流行波进行小波变换, 得到前三个尺度下的模极大值序列, 如图 8、图 9 所示。

从图 8、图 9 可见, 电流行波经小波变换后的模极大值序列中除了应对初始波头的模极大值之外, 还存在一系列虚假模极大值, 它们是波形振荡导致的, 在各个尺度下都同时存在, 无法通过噪声判定而剔除。而且虚假模极大值的数值往

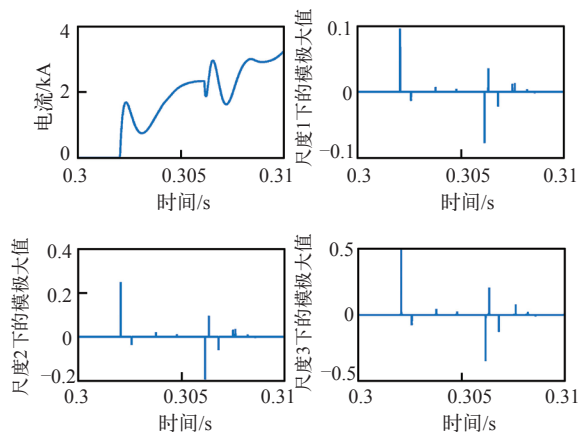


图8 整流侧电流行波波形和模极大值序列

Fig. 8 Wave form and modulus maximum sequence of current travelling wave at rectifier side of HVDC line

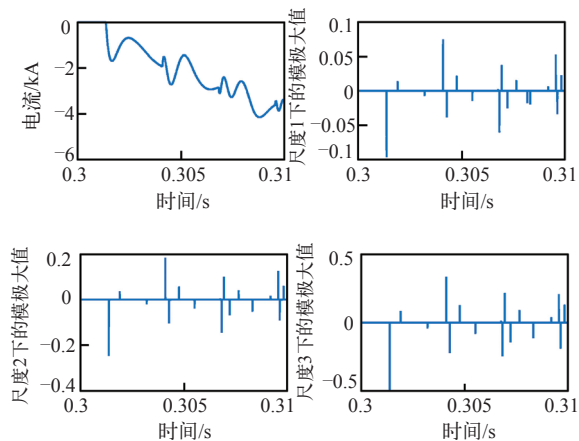


图9 逆变侧电流行波波形和模极大值序列

Fig. 9 Wave form and modulus maximum sequence of current travelling wave at inverter side of HVDC line

往会超过设定的门槛值,被误认为是有效的模极大值。整流侧电流行波的模极大值数值和对应时刻如表1~表4所示。

表1 整流侧电流行波的模极大值数值

Tab. 1 Mode maximum value of current traveling wave at rectifier side

	尺度1	尺度2	尺度3
初始行波模极大值	0.096 4	0.247 9	0.497 8
真实的故障点反射波模极大值	- 0.077 5	- 0.193 3	- 0.349 9
判定为故障点反射波的虚假模极大值	- 0.013 3	- 0.035 5	- 0.077 1

从表1~表4可见,同一个波头在高尺度下的模极大值出现时刻晚于低尺度下出现的时刻,这

表2 整流侧电流行波的模极大值对应时刻

Tab. 2 Corresponding time of mode maximum of current traveling wave at rectifier side

	尺度1	尺度2	尺度3
初始行波模极大值时刻/s	0.302 055	0.302 06	0.302 07
真实的故障点反射波模极大值时刻/s	0.306 155	0.306 16	0.306 165
判定为故障点反射波的虚假模极大值时刻/s	0.302 585	0.302 585	0.302 585

表3 逆变侧电流行波的模极大值数值

Tab. 3 Mode maximum value of current traveling wave at inverter side

	尺度1	尺度2	尺度3
初始行波模极大值	- 0.096 6	- 0.246 3	- 0.495 5
真实的故障点反射波模极大值	0.074 8	0.185 0	- 0.334 3
判定为故障点反射波的虚假模极大值	0.013 9	0.037 3	0.080 9

表4 逆变侧电流行波的模极大值对应时刻

Tab. 4 Corresponding time of mode maximum of current traveling wave at inverter side

	尺度1	尺度2	尺度3
初始行波模极大值时刻/s	0.301 37	0.301 375	0.301 385
真实的故障点反射波模极大值时刻/s	0.304 105	0.304 11	0.304 115
判定为故障点反射波的虚假模极大值时刻/s	0.301 905	0.301 905	0.301 91

是由于低频信号的传播速度低于高频信号,高尺度下的模极大值对应的原始信号频率低造成的。

利用双端行波测距时,定位结果距离整流侧600 190 m,相对误差为0.032%。虽然整流侧和逆变侧的电路结构对称,但是整流侧和逆变侧所连的交流系统不一致,这就导致了交流系统和换流站在直流侧的等效阻抗不一致,进而导致了初始波头上升速度的微小差别,因此也导致了双端测距结果与真实值之间的较小差距。

利用单端行波测距时,则存在两种测距误差偏大的风险。一是可能将虚假模极大值判定为故障点反射波,此时整流侧和逆变侧单端测距的结

果分别为75 235 m和76 788 m, 相对误差为87%和80%, 假设可以通过提高门槛值的方式避免将虚假模极大值判定为故障点反射波, 那么整流侧和逆变侧单端测距的结果分别为597 480 m和397 840 m, 结果的相对误差为-0.42%和-0.54%。此时的误差主要是: 第二个行波波头相当于经过了两次线路边界的反射, 所以初始行波波头和第二个行波波头的振荡特点完全不同, 其波头上升速度也不一致, 因此即使准确判别出了来自故障点的反射波头, 单端测距的误差也会比双端测距误差大。

总结如下, 如果直流系统沿用交流系统的行波测距方法, 则会存在三个问题: ①行波振荡会导致第二个行波波头的识别错误, 进而导致单端测距的错误; ②第一个行波波头和第二个行波波头的波头上升速度不同, 导致单端测距法的误差比较大; ③高阻故障时, 模极大值的数值比较小, 使得有效模极大值与噪声的区分难度进一步增大, 存在测距程序无法启动的问题。

3 结束语

单端行波测距不受通信可靠性及两端同步性的影响, 具有较好的应用前景, 但是其测距准确度受直流线路边界对行波反射特性的影响。本文给出了不同阶数滤波器作为直流输电线路边界时, 故障后互感器检测到的初始波头的时域表达式, 指出了无论直流滤波器的阶数是多少, 互感器检测到的初始波头在时域都可以表示为直流分量、衰减直流分量和衰减正弦分量的叠加。但直流线路的边界对初始行波及故障点反射波的反射次数不同, 会导致较大的波形差异性, 影响对波头到达时刻的准确标定; 同时也会产生虚假波头, 从而会造成对故障点反射波头的准确辨识, 进而会产生较大的测距误差甚至测距失败。

参考文献

- [1] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016(4): 985-991.
- [3] 屠竞哲, 张健, 王建明, 等. 大规模直流异步互联系统受端故障引发送端稳定破坏的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5492-5499.
- [4] 杨林, 王宾, 董新洲. 高压直流输电线路故障测距研究综述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 185-191.
- [5] 林圣, 何正友, 李小鹏, 等. 一种考虑时域特征的单端行波固有频率测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 243-248.
- [6] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-80.
- [7] 董新洲, 贺家李, 葛耀中. 小波变换 第3讲 二进小波变换及信号的奇异性检测[J]. 继电器, 1999(3): 65-68.

作者简介



王 宾

王宾(1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为电力系统继电保护、高阻故障检测及测距技术等。

杨林(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统故障测距技术。

(收稿日期: 2020-05-21) **EA**