

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2020.01.012

半波长输电线路行波传播特性及故障测距

彭楠¹, 程真何², 崔玉³, 陈轩⁴, 梁睿¹

(1. 中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 国网江苏省电力有限公司连云港供电分公司, 江苏 连云港 222004; 3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 4. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

摘要:为了研究行波测距在半波长输电线路上的适用性,首先基于行波幅值衰减特征和折反射规律,估计适用单端测距的临界故障距离。其次,分析不同故障状况下行波畸变对传统测距方法的影响,据此提出适应半波长线路故障定位的新方案。该方案在线路中间布置额外测点,利用该测点行波极性判断故障区段,选择在故障区段内采用单端或双端法进行精确测距。利用PSCAD/EMTDC搭建半波长输电线路模型,进行不同情况下的故障仿真,结果表明:单端行波测距可以适用的临界故障距离约为100~240 km;此外,所提方案能消除测距死区,有效提升测距精度,基本不受故障条件、调谐网络和负载状况影响,具有较高可靠性。

关键词:行波色散;波头畸变;波形极性;行波测距;半波长输电

中图分类号:TM726

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)01-0086-09

0 引言

随着社会经济发展,全国用电量增加显著,电网输电电压等级不断提高。此外,我国能源结构呈不均匀分布,远距离、大容量的输电方式不可避免^[1-3]。半波长输电具有输送容量大、无需无功补偿装置和中间开关站等优势^[4-5],可以作为一种有效输电方案,以满足未来日益增长的用电需求。半波长输电线路肩负着连接大电网、输送大功率电能的重任。由于其输电距离极远(工频下可达3 000 km),线路翻山越岭,跨江过河,很可能因恶劣天气、不利环境、人为等因素发生故障。因此,故障测距对于加快半波长线路故障查找和检修、减小线路故障造成的经济损失、保证输电系统安全稳定运行具有重要意义。

许多专家学者针对特高压交流半波长输电线路的电磁暂态和稳态特性进行了研究^[6-8],结果表明其线路受端和送端电流相差不大,沿线电流呈“V形”均匀分布,但是其潜供电流较大,暂态恢复过电压较高^[9-12],因此需要安装快速接地开关加以限制。针对故障测距,有学者将行波法直接应用于半波长输电线路,仿真结果表明在极端故障状况下传统行波测距误差较大^[13],这主要是由于半波长输电线路行波色散和衰减较普通输电线路更为严重。因此,有学者对特高压交直流输电线路行波衰减特

性进行了研究^[14-15],研究结果表明线路越长,频率越高,故障暂态信号衰减越显著^[16]。虽然目前对于半波长输电暂稳态电气分布特性的研究不少,但是鲜有对于半波长输电线路暂态行波传播特性以及故障测距的系统研究。

输电线路故障测距方法大体可分为2类,即阻抗法^[17]和行波法^[18-19]。阻抗法简便易行,但易受故障条件的影响;行波法基本不受故障条件影响,已经在现场得到应用。与普通短距离输电线路不同,特高压交流半波长输电线路输电距离非常长,线路依频特性显著。故障发生后,由于行波传播距离远,行波波头色散和衰减明显,加上噪声干扰,波头难以精确辨识。如果直接采用传统单端或者双端行波测距,可能会产生较大误差。在故障距离测点很远或者噪声干扰严重等极端情况下,甚至导致测距失败。因此,有必要对半波长输电线路上的行波传播规律以及行波测距方案进行研究。

文中以特高压交流输电半波长线路故障后产生的暂态行波为对象,采用理论计算和仿真模拟相结合的手段,深入分析了模量电流行波传播特性,并探究了这些特性对行波测距的影响,进而提出了适应半波长输电线路的行波测距方案,仿真计算结果证明了其有效性和可靠性。

1 半波长输电线路模量行波传播特性

半波长输电线路模型如图1所示。其中, S_A 和 T_A 分别为系统两端等效电源和变压器; A, B, C 分别为线路首端、末端和中点。假设故障发生在 F 点, F

收稿日期:2019-08-15;修回日期:2019-09-24

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20161185);江苏省“六大人才高峰”资助项目(XNY-046)

点与 A 点间的距离为 x ; Z_f 为故障阻抗; I_{1b} 和 I_{1f} 分别为初始电流反向和前向行波, 虚线箭头表示电流行波的传播路径。线路总长度 L 为 3 000 km。

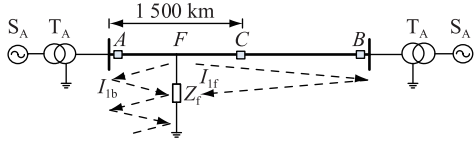


图 1 半波长输电线路示意

Fig.1 Diagram of UAHT line and tower simulation model

初始线模电流前向行波 I_{1f} 到达 B 点发生正极性全反射再传播至 F 点时, 其波头 (相当于实际检测到的第 2 个波头) 中频率为 ω_i 的高频分量幅值 I_{1f-1} 可由下式表示:

$$I_{1f-1} = 2 |\beta_i^f| e^{-2\alpha_i^{(1)}(L-x)} \frac{A^{(1)}}{\omega_i} \quad (1)$$

式中: $\alpha_i^{(1)}$ 为行波传播常数的实部; $A^{(1)}$ 为电流行波初始幅值, 上标(1)表示线模分量。 $\alpha_i^{(1)}$ 和 $A^{(1)}$ 均为实数, β_i^f 为故障点线模电流行波折射系数, 取值为:

$$0 < |\beta_i^f| \approx \frac{|2z_i^T|}{|z_i^{2eq} + z_i^T|} = \frac{|2z_i^T|}{\left| \frac{z_f z_i^T}{z_f + z_i^T} + z_i^T \right|} < 2 \quad (2)$$

式中: z_i^T 为频率 ω_i 下的线路波阻抗; z_i^{2eq} 为故障阻抗 Z_f 与故障点下游线路波阻抗 z_i^T 的等效阻抗。

当 $x=0$ 时, F 点的初始线模电流行波首波头中相同频率分量的幅值为:

$$I_{1b,0} = \frac{A^{(1)}}{\omega_i} \quad (3)$$

求式(1)与式(3)的比值有:

$$R_{10} = \frac{I_{1f-1}}{I_{1b,0}} = 2 |\beta_i^f| e^{-2\alpha_i^{(1)}(L-x)} \quad (4)$$

由式(4)可知: 当故障与线路首端 A 点之间的距离 x 足够小时, R_{10} 的值会很小, 对端母线测点 B 反射回的线模行波幅值 I_{1f-1} 衰减严重, 其对 A 点和 F 点之间线模行波折射的影响可忽略。此时, F 点线模电流行波经线路首端母线 A 处 N 次折反射后波头信号中频率为 ω_i 高频分量的幅值为:

$$I_{1b,N} = 2^N |\beta_i^f - 1|^N e^{-2N\alpha_i^{(1)}x} \frac{A^{(1)}}{\omega_i} \quad (5)$$

F 点初始线模电流行波信号中频率为 ω_i 的高频分量幅值为 $I_{1b,0}$, 经过近端母线 N 次折反射后的 F 点线模行波高频分量与初始高频分量幅值比为:

$$R_{N0} = \frac{I_{1b,N}}{I_{1b,0}} = 2^N |\beta_i^f - 1|^N e^{-2N\alpha_i^{(1)}x} \quad (6)$$

行波测距应用中, 一般考虑 1~2 个波头。以单

端测距为例, 若要在实际故障距离为 x 时能够在 A 点应用单端行波测距, 则式(6)需满足如下条件:

$$\begin{cases} N = 2 \\ R_{N0} \leq R_{\text{Limit}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: R_{Limit} 为一个较小的数值, 其值取 0.000 1%。重新整理式(6)和式(7)可得如下判据:

$$0 \leq x \leq \frac{\ln(2^N |\beta_i^f - 1|^N) - \ln R_{\text{Limit}}}{2N\alpha_i^{(1)}} \quad (8)$$

若已知 ω_i , $\alpha_i^{(1)}$, β_i^f 及 R_{Limit} , 则由式(8)可确定能应用单端行波测距进行故障定位的临界故障距离。

通过式(8)可以得到 7 个不同频率 (200 kHz, 250 kHz, 300 kHz, 350 kHz, 400 kHz, 450 kHz, 500 kHz) 和故障阻抗 (1 Ω , 50 Ω , 100 Ω , 150 Ω , 200 Ω , 250 Ω , 300 Ω) 下, 半波长线路上应用单端行波测距的临界故障距离, 见图 2。由于采样频率为 1 MHz, 根据香农采样定理, 能够测量得到的信号最大频率为 500 kHz。在进行单端行波测距时, 需要提取小波变换 d_1 层细节系数, 因为该层系数代表了原信号中最高频段 (250~500 kHz), 该频段对应的小波细节系数能够最大程度反映波头信号的突变。根据行波的衰减规律可知: 行波分量频率越高, 衰减越显著。为了确定单端测距能够应用的故障距离, 需要对行波最高频段信号的幅值衰减特征进行分析, 文中选择的 7 个频率基本上覆盖了行波的最高频段。此外, 输电线路故障阻抗大都小于 300 Ω 。选择 1 Ω 的阻抗, 表示故障阻抗很小的近似金属性接地故障; 选择 300 Ω 的阻抗, 表示故障阻抗较大的非金属性接地故障。剩下的故障电阻从 1~300 Ω 范围中等间隔选择, 表示故障阻抗在这个范围内随机分布, 其选择并不影响最终计算结果。

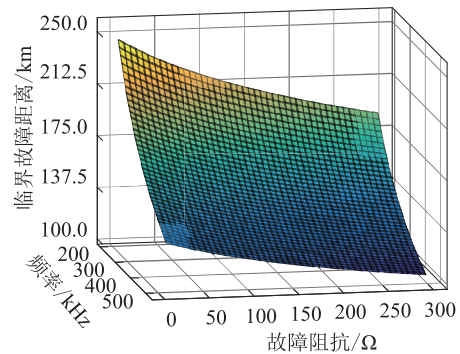


图 2 不同故障阻抗和信号频率对应的临界故障距

Fig.2 Critical fault distances corresponding to different fault impedances and frequencies

由图 2 可知: 故障阻抗越大, 频率越高, 线模电流行波波头高频分量的幅值衰减就越显著, 能够在半波长线路端点应用单端测距的临界故障距离就

越小。对于不同的频率分量和故障阻抗,最近的临界故障距离为 100 km 左右,最远的临界故障距离为 240 km 左右。

2 线模电流行波传播特性对半波长输电线路行波测距的影响

利用 PSCAD 搭建特高压交流半波长输电线路依频特性模型,分别采用单端法和双端法验证半波长线路行波测距的精度。

2.1 对单端行波测距的影响

单端行波测距原理可用下式表示^[20]:

$$x = (T_2 - T_1)v/2 \quad (9)$$

式中: x 为距离线路首端的故障距离; T_1 和 T_2 分别为行波首波头和第 2 个波头的到达时刻; v 为电流行波波速。

单端行波测距可以应用的故障距离大约为 0~240 km,且对端母线 B 反射波在此距离下不影响线路首端 A 点与故障点 F 之间的行波折反射。为此,从线路首端 10 km 起每隔 60 km 模拟故障,直至 240 km 处为止。故障电阻均 300 Ω ,故障初相角为 10°。采用单端行波法的测距误差如表 1 所示。

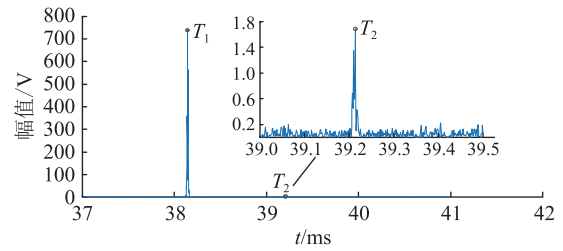
表 1 半波长线路单端行波测距误差

Table 1 Fault location errors of single-end traveling wave method in UTL

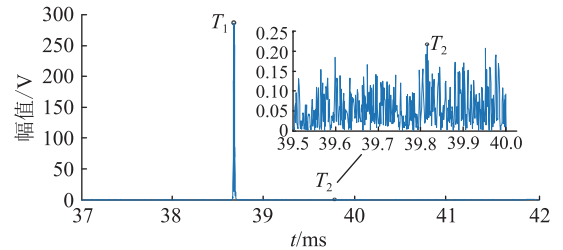
故障距离/km	定位误差/%	故障距离/km	定位误差/%
10	0.052	180	0.34
60	0.13	240	0.47
120	0.26		

根据仿真计算结果可知:随着故障距离的增加,单端行波测距的精度有所下降,但是仍满足工程应用的标准。故障距离主要影响 d_1 层小波细节重构系数模值大小。其他条件不变时,随着故障距离的增加, d_1 层小波细节重构系数模值逐渐减小。故障初相角为 10°时,初始线模电流行波幅值较小,再加上传播过程中幅值衰减,以致到达时刻检测误差上升,行波测距精度下降。

图 3(a) 和 (b) 分别是故障距离为最小和最大临界故障距离,即 100 km 和 240 km 时,受高斯白噪声污染后的 A 点线模行波 d_1 层小波细节重构系数。由图 3 可见,当取最小临界故障距离时,第 2 个行波波头可以清楚辨识,即当故障距离小于 100 km 时,行波第 2 个波头一定可以辨识;当取最大临界故障距离时,第 2 个行波波头对应的模极大值只能勉强辨识出,即当故障距离超过 240 km 时,第 2 个行波波头将很难辨识。



(a) 故障距离为100 km



(b) 故障距离为240 km

图 3 故障距离为 100 km 和 240 km A 点 d_1 层小波重构系数

Fig.3 Curve of d_1 level detailed reconstruction coefficients when the fault is 100 km and 240 km from A point

2.2 对双端行波测距的影响

双端行波测距的基本原理可用下式表示:

$$x = [L + (T_1 - T_2)v]/2 \quad (10)$$

式中: T_1 和 T_2 分别为线路首端 A 点和末端 B 点检测到线模行波首波头的到达时刻。

为验证行波衰减对双端行波测距的影响,从距离线路首端 100 km 处起,每隔 100 km 模拟故障,直至 1 500 km 止。其中,故障电阻为 300 Ω ,故障初相角为 10°,线路处于轻载。仿真结果如表 2 所示。

表 2 半波长线路双端行波测距误差

Table 2 Fault location errors of double-end traveling wave method in UTL

故障距离/km	定位误差/%	故障距离/km	定位误差/%
50	—	800	0.37
100	2.11	900	0.32
200	1.25	1 000	0.29
300	0.87	1 100	0.24
400	0.63	1 200	0.18
500	0.54	1 300	0.16
600	0.48	1 400	0.12
700	0.41	1 500	0.01

表 2 中,“—”表示因远端行波波头难以检测而导致测距失败。可知故障越靠近线路中点,测距误差越小;反之,测距误差越大,最大相对测距误差可达到 2% 以上。

值得注意的是,在极端情况下(比如故障距离某端点较远等),可能因远端波头检测不到而导致

测距失败(如故障距离为 50 km)。图 4 是故障电阻为 300 Ω ,故障初相角为 10°,故障点距离线路首端 A 点 50 km 时,远端测量点 B 的线模行波 d_1 层小波细节重构系数模值, T_b 为边缘效应点。该情况下,远端测点 B 处线模行波因衰减过甚导致其 d_1 层小波细节重构系数模值存在边缘效应。此时,因 B 点首波头 T_2 难以准确辨识而导致测距失败。

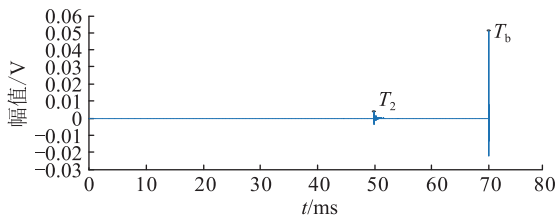


图 4 故障距离 B 点较远时其 d_1 层小波细节重构系数曲线

Fig.4 Curve of d_1 level detailed reconstruction coefficients when the fault is far from B point

3 半波长输电线路行波测距方案

如果单独将单端或双端行波测距应用于半波长输电线路,可能会导致故障测距误差大,甚至测距失败。根据前文分析,提出适应半波长输电的单双端相结合的行波测距方案,其流程如图 5 所示。

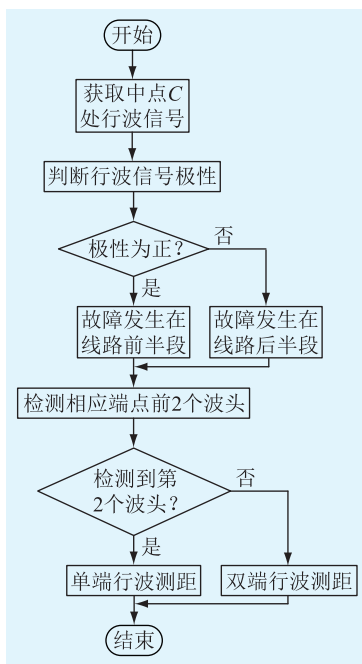


图 5 半波长输电线路故障定位策略流程
Fig.5 Flow chart of the fault location scheme for UTLs

首先,在线路中点加装测点 C,线路发生故障后,通过 C 点测得的电流行波极性,判断故障发生于线路前半段还是后半段。假设故障发生在前半

段,判断线路首端 A 点是否能检测到第 2 个行波波头,若能则说明故障位于临界故障距离内,利用 A 点前 2 个行波波头到达时刻,采用单端法进行故障精确测距;否则说明故障位于临界距离范围外,利用 A 点和 C 点行波首波头到达时刻,采用双端法进行故障测距。当故障发生在后半段时,测距方案与前半段线路发生故障一致。

上述测距方案中,加装测点 C,相当于间接减小了行波传播至测量点的距离,进而减小长距离下行波的衰减对波头辨识乃至故障测距的不利影响。其次,将单端法和双端法相结合的测距精度要高于使用单一方法的测距精度。再次,电流行波具有显著的方向性,利用中点电流行波的极性,能够迅速、准确地判断故障发生区段。最后,所提波头检测方法对行波较低频率分量辨识,低频率分量衰减较缓慢,有助于波头辨识。

3.1 基于波形极性因子的波头极性判定

单相接地故障(故障电阻为 300 Ω ,初相角为 10°)发生在线路前半段和后半段时(分别距中点 C 500 km),中点 C 处的电流行波波头信号如图 6 所示。 I_{c1} 和 I_{c2} 分别为故障发生在前半段和后半段对应的中点线模电流行波波头信号。由图 6 可见,这 2 个信号曲线在 S 点之前基本重合,而在 S 点之后分离开,分别位于虚线的上下两侧。

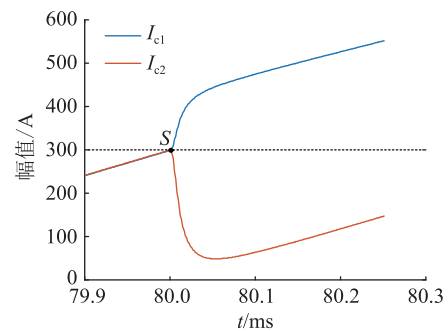


图 6 故障发生在不同区段时中点 C 的电流行波波头信号
Fig.6 Current wavefront signals at C when the fault occurs in the first and second half of the UTL

根据图 6 所示不同区段故障行波波头信号分布特征,提出基于波形极性因子的波头极性判定准则,其具体流程如图 7 所示。

(1) 选择以往故障发生在线路前半段时,线路中点的电流行波信号为参考信号,记作 $I_1(k)$;

(2) 当线路检测到发生故障后,提取线路中点测量的电流行波信号,记作 $I_c(k)$;

(3) 分别对参考信号和实时测量的电流行波信号进行小波变换,利用小波模极大值原理确定行波到达时刻,分别记作 t_1 和 t_c 。以这 2 个时刻为参考,

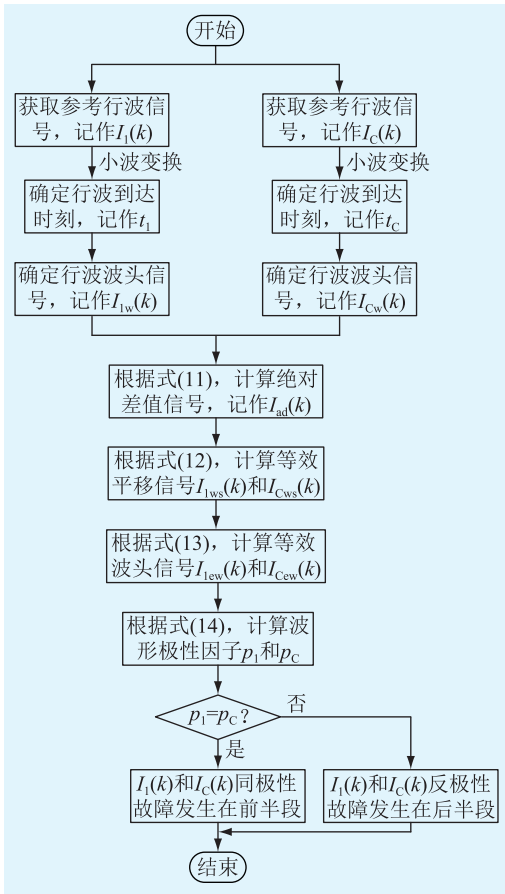


图7 波头极性判定流程

Fig.7 Flow chart of determining the polarity of the wave front signal

分别向后取信号 $N_b = 300$ 点, 得到相应的波头信号, 分别记作 $I_{1w}(k)$ 和 $I_{cw}(k)$;

(4) 计算 $I_{1w}(k)$ 和 $I_{cw}(k)$ 的极性因子, 首先根据下式计算 $I_{1w}(k)$ 和 $I_{cw}(k)$ 的绝对差信号 $I_{ad}(k)$:

$$I_{ad}(k) = |I_{1w}(1) - I_{cw}(1)| \mathbf{e}(k) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{e}(k)$ 为和 $I_{1w}(k)$ 长度一致的单位向量。

其次计算 $I_{1w}(k)$ 和 $I_{cw}(k)$ 等效平移信号 $I_{1ws}(k)$ 和 $I_{cws}(k)$, 如下所示:

$$\begin{cases} I_{1ws}(k) = I_{1w}(k) + I_{ad}(k) & I_{1w}(1) < I_{cw}(1) \\ I_{cws}(k) = I_{cw}(k) + I_{ad}(k) & I_{1w}(1) > I_{cw}(1) \end{cases} \quad (12)$$

然后按照下式计算 $I_{1w}(k)$ 和 $I_{cw}(k)$ 等效波头信号 $I_{1ew}(k)$ 和 $I_{cew}(k)$:

$$\begin{cases} I_{1ew}(k) = I_{1ws}(k) - I_{1ws}(1) \mathbf{e}(k) & I_{1w}(1) < I_{cw}(1) \\ I_{cew}(k) = I_{cws}(k) - I_{cws}(1) \mathbf{e}(k) & I_{1w}(1) < I_{cw}(1) \\ I_{1ew}(k) = I_{1w}(k) - I_{cws}(1) \mathbf{e}(k) & I_{1w}(1) > I_{cw}(1) \\ I_{cew}(k) = I_{cw}(k) - I_{cws}(1) \mathbf{e}(k) & I_{1w}(1) > I_{cw}(1) \end{cases} \quad (13)$$

最后计算 $I_{1w}(k)$ 和 $I_{cw}(k)$ 的波形极性因子 p_1 和 p_c , 如下式所示:

$$\begin{cases} p_1 = \text{sign} \left(\int I_{1ew}(k) dk \right) \\ p_c = \text{sign} \left(\int I_{cew}(k) dk \right) \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{sign}(k) = \begin{cases} 1 & k > 0 \\ 0 & k = 0 \\ -1 & k < 0 \end{cases} \quad (15)$$

(5) 根据波形极性因子确定行波波头极性, 即如果 $I_c(k)$ 和 $I_1(k)$ 的极性因子 p_1 和 p_c 相等, 则说明 2 个信号同极性, 故障发生在线路前半段; 否则, 说明 2 个信号反极性, 故障发生在后半段。

3.2 基于小波 Teager 能量的波头到达时刻计算

Teager 算子可有效削弱高频噪声的能量, 因此采用离散小波重构系数 Teager 能量法来检测行波波头, 具体流程如图 8 所示。

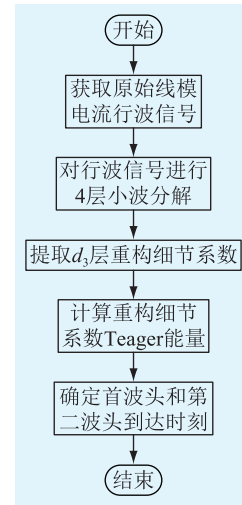


图8 波头到达时刻计算流程

Fig.8 Flow chart of calculating the arrival time of the wave front signal

(1) 获取相应测量点原始线模电流行波信号;

(2) 保持采样频率为 1 MHz, 采用 db6 小波, 选择 1 阶边缘平滑模式, 对所获得信号进行 4 层小波分解, 提取 d_3 层细节系数;

(3) 采用同样的母小波对 d_3 层细节系数进行小波重构, 得到相应的重构细节系数, 记为: $D_{r2} = [d_{r1}, d_{r2}, \dots, d_{rm}] = d_r[m]$, 其中 m 为原始线模电流行波信号的长度;

(4) 带入下式计算该重构系数的 Teager 能量向量 $\Psi_e^{[21]}$:

$$\Psi_e[d_r[m]] = d_2^2 r^2[m] - d_2 r^2[m-1] d_r[m+1] \quad (16)$$

在向量 Ψ_e 中, 最大值元素对应的时刻即为首波头到达时刻 T_1 , 第 2 个局部极大值元素对应的时刻为第 2 个波头到达时刻 T_2 。

4 仿真验证

4.1 案例分析

在 PSCAD 半波长输电线路模型上进行大量故障仿真,表 3 为故障测距结果。其中, F_D 为实际故障距离, E_r 为相对测距误差。表中 95 dB 信噪比代表噪声水平较高, 115 dB 代表噪声水平一般。线路前半段和后半段测距误差基本呈对称分布。限于篇幅, 表 3 仅展示前半段线路的故障测距误差。

表 3 不同故障状况下的故障定位误差

Table 3 Fault location errors under different conditions

F_D /km	$E_r/\%$							
	10°		90°		180°		270°	
	95 dB	115 dB	95 dB	115 dB	95 dB	115 dB	95 dB	115 dB
10	0.31	0.28	0.29	0.26	0.29	0.27	0.29	0.27
50	0.29	0.28	0.28	0.27	0.29	0.28	0.28	0.28
100	0.29	0.28	0.26	0.25	0.29	0.28	0.29	0.28
200	0.24	0.22	0.21	0.21	0.23	0.21	0.21	0.20
300	0.13	0.11	0.11	0.11	0.12	0.10	0.11	0.09
400	0.06	0.05	0.04	0.04	0.06	0.04	0.05	0.04
500	0.11	0.09	0.01	0.01	0.10	0.09	0.04	0.02
600	0.06	0.05	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03
700	0.13	0.11	0.10	0.10	0.12	0.11	0.11	0.11
800	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06
900	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02
1 000	0.02	0.01	0.008	0.007	0.01	0.01	0.009	0.07
1 100	0.08	0.08	0.04	0.03	0.08	0.07	0.04	0.03
1 200	0.09	0.08	0.05	0.04	0.09	0.08	0.06	0.05
1 300	0.10	0.09	0.07	0.06	0.09	0.09	0.08	0.06
1 400	0.13	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11
1 500	0.16	0.14	0.14	0.13	0.15	0.15	0.15	0.14

信噪比为 95 dB, 故障距离 A 点 230 km, 故障电阻 300 Ω , 故障初相角 10° 时, A 点前 2 个线模电流行波 Teager 能量分布如图 9 所示。此时, 行波第 2 个波头可以勉强辨识, 能够采用单端测距。图 10 为同样噪声下, 故障距离 A 点 50 km, 故障电阻 300 Ω , 故障初相角 10° 时, 计算的 B 点线模电流行波首波头 Teager 能量分布图。此时, 由于故障距离 B 点很远, 采用传统小波变换会出现边缘效应, 导致波头辨识失败。然而, 采用文中小波 Teager 能量法能够清晰地辨识波头。

另外, 由表 3 可知文中半波长输电线路行波测距方案在不同故障情况下的定位误差为: 最大不超过 0.32%, 最小仅为 0.01%。定位精度高于单独使用单端或者双端法。在故障距离测量点较远时, 文中方法仍能够精确测距。

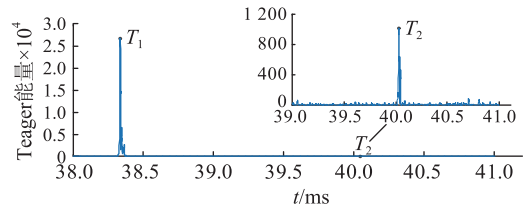


图 9 故障距离 A 点 240 km A 点小波 Teager 能量分布
Fig.9 Teager energy at A with 240 km fault distance

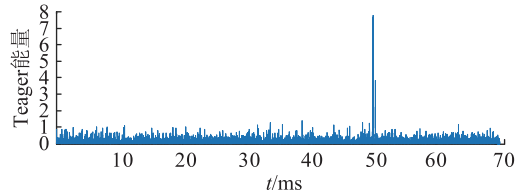


图 10 故障距离 A 点 50 km 时 B 点小波 Teager 能量分布
Fig.10 Teager energy at B with 50 km fault distance

4.2 不同补偿网络的影响

实际输电距离达不到半个工频波长, 往往需要在线路两端或者沿线架设人工调谐网络(补偿网络)。为了探究不同类型补偿网络对所提故障测距方案的影响, 现将 3 种常用调谐网络(T 型、 π 型、分布电容型)分别应用于一条总长仅为 $1/4$ 波长的输电线路(对应线路首末端相角差为 90°)。

为了调谐至半波长, 对于 T 型和 π 型网络而言, 其首末端连接电路需对应 45° 相角差。分布电容采用 9 组对地电容器, 每组对应 10° 相角差。通过计算, 确定不同补偿网络中电容、电感调谐参数。3 种调谐半波长输电线路如图 11 所示。

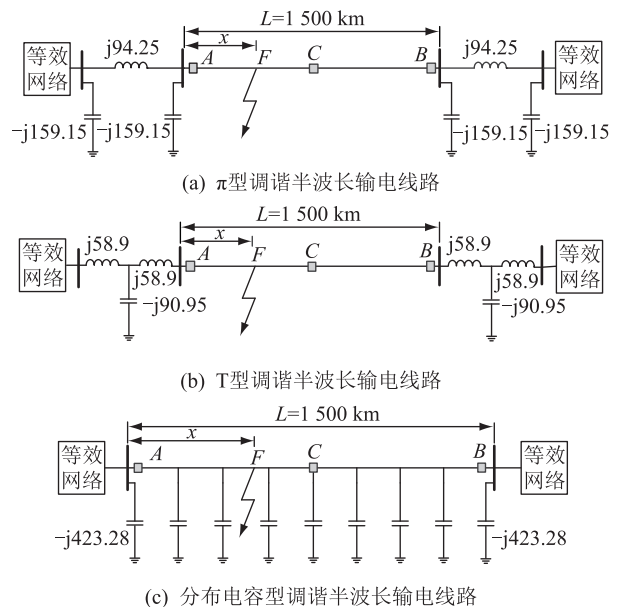


图 11 3 种不同调谐半波长输电线路
Fig.11 Three types of tuned half-wavelength lines

分别在上述3种补偿网络中,线路近首端、中点和近末端模拟故障。其中,故障电阻为 $300\ \Omega$,故障初相角为 10° 。利用文中方案进行故障测距,结果见表4。可知该测距方案仅检测行波前2个波头,能够适应于不同类型调谐网络,定位精度基本不受影响。

表4 不同调谐网络中的测距结果

Table 4 Fault location results with different tuned networks

调谐网络	故障距离/km	测距误差/%
π 型	10	0.280
	1 500	0.001
	2 990	0.270
T型	10	0.280
	1 500	0.001
	2 990	0.290
电容型	10	0.290
	1 500	0.001
	2 990	0.280

4.3 负载状况的影响

按照实际负载与额定负载的比值,将线路运行状况划分为3类:轻载、自然功率和重载。线路沿线电压、电流与输送功率有关。分别在上述3类运行状况下,在线路近首端、中点和近末端处模拟故障。

其中,故障电阻为 $300\ \Omega$,故障初相角为 10° 。利用文中方案测距,计算结果如表5所示,可以看出不同负载状态对测距结果无显著影响。

表5 不同负载状况下的测距结果

Table 5 Fault location results with different load conditions

负载状况	故障距离/km	测距误差/%
轻载	10	0.290
	1 500	0.003
	2 990	0.300
自然功率	10	0.280
	1 500	0.001
	2 990	0.290
重载	10	0.270
	1 500	0.002
	2 990	0.280

4.4 与现有方法比较

为进一步说明文中故障测距方案的优势,将该方案与现有单端、双端行波测距^[13]进行了综合比较,结果如表6所示。由于单端测距法需辨识第2个行波波头,因此该方法适用故障距离有限,且易受补偿网络的影响。双端法只检测行波首波头,无需检测后续波头,因而不受补偿网络的影响。然

而,在极端情况(故障距离某一端很近等情形)下,首波头检测也有困难。与传统行波测距方法相比,文中方法故障定位精度较高,且该方法能够适用的故障距离覆盖线路全长,不受补偿网络的影响。

表6 与现有行波测距方法比较

Table 6 Comparison with current traveling wave methods

方法	最大误差/%	最小误差/%	适用距离/km	补偿网络
单端法	0.47	0.052	<250	有影响
双端法	2.11	0.01	<2 950	无影响
文中方法	0.32	0.01	全长	无影响

5 结论

文中深入分析了模量电流行波在半波长线路上的传播特性,研究了其对行波测距的影响,提出了适应半波长输电线路的故障测距方案,主要结论如下:

(1) 基于半波长输电线路依频特性模型,研究了行波在故障点与线路首末端之间的折反射和幅值变化规律,给出单端行波测距可以适用的临界故障距离,其值约为 $100\sim 240\text{ km}$;

(2) 在线路中点加装额外的行波测量装置,采用文中的离散小波细节重构系数Teager能量法,能够有效克服环境噪声干扰与行波衰减给故障测距带来的影响,防止极端情况下行波测距失败。

(3) 与传统单端、双端行波测距相比,文中方法定位精度更高,适用故障距离覆盖线路全长,基本不受故障状况、负载情况及补偿网络的影响。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2018036)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 张志强,秦晓辉,徐征雄,等. 特高压半波长交流输电技术在我国新疆地区电源送出规划中的暂态稳定性研究[J]. 电网技术,2011,35(9):42-45.
ZHANG Zhiqiang, QIN Xiaohui, XU Zhengxiong, et al. Steady state voltage characteristic of UHV half-wavelength AC transmission line [J]. Power System Technology, 2011, 35 (9): 42-45.
- [2] 梁旭明. 半波长交流输电技术研究及应用展望[J]. 智能电网,2015,3(12):1091-1096.
LIANG Xuming. Technology research and application prospect of half-wavelength alternating current transmission [J]. Smart Grid, 2015, 3(12): 1091-1096.
- [3] 孙珂. 特高压半波长交流输电经济性分析[J]. 电网技术,2011,35(9):51-54.
SUN Ke. Economic analysis on UHV half-wavelength AC power

- transmission[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 51-54.
- [4] 韩彬,林集明,班连庚,等. 特高压半波长交流输电系统电磁暂态特性分析[J]. 电网技术, 2011, 31(9): 22-27.
HAN Bin, LIN Jiming, BAN Liangeng, et al. Analysis on electromagnetic transient characteristics of UHV half-wavelength AC transmission system[J]. Power System Technology, 2011, 31(9): 22-27.
- [5] 秦颖,周沛洪,修木洪,等. 特高压半波长交流输电线路电磁暂态仿真[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1459-1465.
LOU Ying, ZHOU Peihong, XIU Muhong, et al. Electromagnetic transient simulation of UHV half-wavelength AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1459-1465.
- [6] 秦晓辉,张志强,徐征雄,等. 基于准稳态模型的特高压半波长交流输电系统稳态特性与暂态稳定研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 66-76.
QIN Xiaohui, ZHANG Zhiqiang, XU Zhengxiong, et al. Study on the steady state characteristic and transient stability of UHV AC half-wave-length transmission system based on quasi-steady model[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 66-76.
- [7] 孙栩,董鹏,朱艺颖,等. 特高压交直流线路同塔架设对交流线路电磁暂态特性的影响[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 148-153.
SUN Xu, DONG Peng, ZHU Yiyang, et al. Impact of tower-shared UHV DC and AC line installation on electromagnetic transient characteristics of AC line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 148-153.
- [8] 董曼玲,黎小林,何俊佳,等. 特高压直流输电系统换流站内部故障电磁暂态响应特性及控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 5-10.
DONG Manling, LI Xiaolin, HE Junjia, et al. Electromagnetic transient response characteristics of internal faults in UHVDC converter station and corresponding control strategy[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 5-10.
- [9] 丛浩熹,李庆民,孙秋芹,等. 半波长输电线路潜供电弧弧根运动和熄灭特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4171-4178.
CONG Haoxi, LI Qingmin, SUN Qiuqin, et al. Experimental study on arc root motion and extinction characteristics of the secondary arcs with half-wavelength power transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4171-4178.
- [10] 师伟,孙秋芹,李庆民,等. 半波长输电线路故障暂态过电压特性研究[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 43-47.
SHI Wei, SUN Qiuqin, LI Qingmin, et al. Research on characteristics of transient overvoltages caused by faults occurred in half-wave length AC transmission lines[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 43-47.
- [11] 张黎,邹亮,吕鑫昌,等. 半波长输电线路的工频暂态过电压[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2728-2734.
ZHANG Li, ZOU Liang, LYU Xinchang, et al. Power frequency temporary overvoltage on half-wave length AC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2728-2734.
- [12] 孙秋芹,李庆民,陈全,等. 特高压半波长输电线路潜供电弧弧根模拟实验研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 350-358.
SUN Qiuqin, LI Qingmin, CHEN Quan, et al. Experimental research on secondary arcs of UHV half-wavelength AC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 350-358.
- [13] FV Lopes. Traveling wave-based fault location on half-wavelength transmission lines[J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(1): 248-253.
- [14] 孔飞,张保会,甄威,等. 高压直流输电线路边界高频电压信号衰减特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 85-90.
KONG Fei, ZHANG Baohui, ZHEN Wei, et al. Analysis on high frequency voltage signal attenuation characteristic of HVDC transmission line boundary[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 85-90.
- [15] 陈仕龙,张杰,毕贵红,等. 一种基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 77-83.
CHEN Shilong, ZHANG Jie, BI Guihong, et al. A fault location method based on high frequency attenuation characteristic of UHVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 77-83.
- [16] 徐敏,蔡泽祥,刘永浩,等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 259-265.
XU Min, CAI Zexiang, LIU Yonghao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 259-265.
- [17] 李澄,袁磊平,严慧,等. 基于函数幅值和线路等分法的双端故障定位研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 126-131.
LI Cheng, YUAN Leiping, YAN Hui, et al. Two-terminal fault location method based on amplitude of function and line equal partition[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 126-131.
- [18] 王博,谷昌瑞,吉晓筱,等. 基于多点故障行波检测的改进分布式故障测距方法研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 31-38.
WANG Bo, GU Changrui, JI Xiaoxiao, et al. Research on improved distributed fault location method based on multi-point fault's traveling wave detection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 31-38.
- [19] 徐铭铭,肖立业,林良真. 基于零模行波衰减特性的配电线路单相接地故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 397-404.
XU Mingming, XIAO Liye, LIN Liangzhen. A fault location method for the single-phase-to-earth fault in distribution system based on the attenuation characteristic of zero-mode traveling wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,

2015, 30(14):397-404.

- [20] NGUEE, RAMAR K. A combined impedance and traveling wave based fault location method for multi-terminal transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(10):1767-1775.
- [21] 杨青乐, 梅检民, 肖静, 等. Teager 能量算子增强倒阶次谱提取轴承微弱故障特征[J]. 振动与冲击, 2015, 34(6):1-5.
- YANG Qingle, MEI Jianmin, XIAO Jing, et al. Weak fault feature extraction for bearings based on an order cepstrum enhanced with Teager energy operator[J]. Journal of Vibration

and Shock, 2015, 34(6):1-5.

作者简介:



彭楠

彭楠(1993),男,博士在读,研究方向为小电流接地选线及定位(E-mail:99669424@qq.com);

程真何(1966),男,学士,高级工程师,从事电力系统运行管理工作;

崔玉(1978),女,硕士,高级工程师,从事电网运行和继电保护管理工作。

Travelling wave propagation characteristics and fault location of half-wavelength transmission lines

PENG Nan¹, CHENG Zhenhe², CUI Yu³, CHEN Xuan⁴, LIANG Rui¹

- (1. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Grid Lianyungang Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Lianyungang 222004, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; 4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: To explore the applicability of traveling wave fault location in half-wavelength transmission line (UTL), based on the amplitude attenuation feature and the reflection and refraction characteristics of the travelling waves, the critical fault distance within which the single-end traveling wave method can be applied is estimated. Then, the impacts of traveling wave distortion on traditional traveling wave fault location in the UTL are investigated, and a novel fault location scheme applicable to UTL is proposed. In the scheme, an additional measuring point is mounted in the middle of the line, and the polarity of the current traveling wave at the point is used to detect the fault section. The single-end or double-end traveling wave method is selected to pinpoint the fault in the determined fault section. An UTL simulation model is constructed by PSCAD/EMTDC and various fault simulations are conducted. The results indicate that the critical fault distance for single-end fault location is about 100~240 km. The proposed scheme eliminates the dead zone of fault location and shows high accuracy. In addition, the fault condition, tuning network, and load condition barely have any impact on the scheme, which demonstrates its high reliability.

Keywords: traveling wave dispersion; wave head distortion; waveform polarity; traveling wave fault location; half-wavelength transmission

(编辑 方晶)