

DOI: 10.7667/PSPC180230

融合行波时频信息的 HVDC 线路雷击点与短路故障点不一致时的定位方法

孙沛瑶, 林 圣, 刘 磊, 何正友

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 雷电流在输电线路传播时, 可能导致线路的绝缘薄弱环节被击穿, 发生短路故障, 此时现有时域行波测距算法只能获取雷击点位置而无法获取精确的故障距离。因此, 针对高压直流输电线路雷击点与短路故障点不一致的情况, 提出一种综合利用输电线路两端电流行波的时域信息和频域信息的故障定位方法。该方法首先根据线路两端故障电流行波的时域信息判断雷击点位置, 然后利用雷击点与短路故障点存在的位置关系判断输电线路短路故障点位置区段, 最后根据线路双端或单端的故障电流行波固有频率计算短路故障点距离。PSCAD/EMTDC 仿真结果表明, 该方法在高压直流输电线路雷击点与短路故障点不一致情况下对短路故障点定位精度高, 且不受雷击点与短路故障点位置、过渡电阻及噪声干扰的影响, 具有良好的适用性和实用价值。

关键词: 高压直流输电; 雷击点定位; 故障点定位; 行波时域波头; 行波固有频率

Location method for HVDC transmission line under lightning stroke fault with short-circuit fault position different from lightning position based on time-domain and frequency-domain information of traveling waves

SUN Peiyao, LIN Sheng, LIU Lei, HE Zhengyou

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: When lightning current transmits along transmission line, the weak points of insulation may be broken down which will result in short circuit faults of line. At this time, for the current fault location method, the location of the lightning location can be obtained by time-domain characteristics of traveling wave, however the precise fault point is failed to be got. Therefore, considering the condition that the positions of lightning and fault are different for HVDC transmission line, a fault location method based on time-domain and frequency-domain information of traveling waves is put forward in this paper. Firstly, the lightning position is located using time-domain information of two-terminal traveling wave. And then the line section where fault occurs is judged according to the relation between the lightning stroke point and the fault point. Finally, the fault distance can be calculated based on the single-terminal/ two-terminal values of the nature frequencies component reflecting the certain transmission path of fault-traveling wave. Simulation results based on PSCAD/EMTDC indicate that the fault distance can be estimated accurately based on the presented location method under the situation that the positions of lightning and fault are different for HVDC transmission line, and the locating performance is not affected by lightning stroke positions and fault positions, fault resistances and noise, provided with great applicability and practical value.

This work is supported by Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Plan of China (No. 2016YFB0900600), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094017000W) and Technology Planning Project of Sichuan Province of China (No. 2018GZ0392).

Key words: HVDC; strike point location; fault location; travelling wave time domain; natural frequencies

0 引言

高压直流(High Voltage Direct Current, HVDC)输

电线路长、跨度大, 且沿线地理环境复杂多变, 故其故障率高且故障点难以查找^[1]。在实际运行中, 雷击是导致线路短路故障的主要原因之一^[2]。当线路遭受绕击雷时, 雷电将绕过避雷线直接击中导线并产生冲击电流, 雷电流沿输电线路向两侧传播至线路绝缘薄弱处时可能会发生闪络^[3], 此时雷击点与短路故障点不一致。然而, 目前广泛应用于高压

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项资助(2016YFB0900600); 国家电网公司科技项目资助(52094017000W); 四川省科技计划项目资助(2018GZ0392)

直流输电线路故障定位的行波法^[4], 在输电线路出现雷击点与故障点不一致时, 由于线路上的波阻抗不连续点增加, 行波在线路上的折反射情况更为复杂, 波头的准确识别愈发困难, 因而故障定位的准确性难以保障。可见, 研究具有准确、可靠的适应于雷击点与短路故障点不一致情况下的高压直流输电线路故障定位方法具有重要的工程应用价值^[5]。

目前, 已有学者针对雷击点与短路故障点不一致情况下的故障定位方法进行了一定的研究。如文献[6]针对交流输电线路雷击点与短路点不一致的情况, 在已知雷击点位置的前提下, 通过雷电流行波和短路点电流反射波到达的时间差计算雷击点与短路点的相对位置进而定位短路点, 此方法能可靠定位短距离交流输电线路故障, 但对直流长线路的适应性有待进一步研究。文献[7]针对交流线路雷击与故障点不一致且雷击点位置未知的情况, 根据输电线路两侧的高低频能量的分布特征区分雷击侧与故障侧, 继而利用两侧分别采样到的电压行波首波头幅值之间的差异确定雷击点与故障点的相对位置; 但该算法在一定程度上受系统物理边界条件和雷电流参数等因素的影响。文献[8]针对高压直流线路雷击与闪络点不一致的情况, 根据线路两端检测到的后续波头中与首波头极性相同的第一个波头所含故障信息, 对雷击点与闪络点的一致性进行辨识和故障点定位, 但是在雷击点与故障点不一致时, 雷电流行波和短路故障行波在线路上反复折射、反射并交替反映在测量端的时域信息, 增大了后续波头识别的难度, 从而导致算法复杂度高, 可靠性较低。

为了克服时域行波定位方法所面临的上述困难, 本文结合线路两端电流行波的时域、频域特征, 提出一种适用于雷击点与短路故障点不一致时的高压直流输电线路故障定位方法, 该方法根据故障电流行波的时域信息定位雷击点, 并依据雷击点与短路故障点的位置关系判断短路故障点在输电线路的位置区段, 然后利用从故障电流行波中提取到的固有频率值对短路故障点进行精确定位, 仿真实验验证了该方法的可靠性和有效性。

1 HVDC 输电线路雷击故障行波时频特性分析

1.1 雷击故障行波时域特征分析

输电线路雷击故障情况发生时, 首先为雷电流注入过程, 此时线路行波时域特征与雷击未故障时相同; 随后线路绝缘子因电压过高发生闪络, 形成电流入地通路, 此时变为短路故障。短路故障发生后, 故障点将产生向线路两端传播的电流、电压行

波; 行波在传播过程中到达波阻抗不连续点(如故障点、线路终端、母线处等)时, 将发生折射和反射。以图 1(a)所示高压直流输电线路作为对象, 雷电流 1 造成输电线路雷击故障, 此时雷击点与短路故障点一致, 该情况下行波传播途径如图 1(b)所示。

当雷绕击导线时, 雷电流幅值通常较小, 此时在雷击点未发生闪络, 雷电流行波沿输电线路传输一段距离后, 在绝缘较薄弱处发生闪络, 形成雷击点与短路故障点不一致的情况。由于雷击点与短路故障点位置不同, 行波的传播路径有所不同。比如在图 1(a)中雷电流 2 的作用下, 线路 F 处发生雷击短路故障, 此时雷击点与短路故障点不一致, 雷击信号与故障信号均向两端传播, 并且雷击通道的存在将造成雷击点的波阻抗不连续, 在雷击点处也会发生行波的折、反射, 且折、反射的情况会受雷击的持续时间的影响, 该情况下故障行波折、反射传播路径如图 1(c)所示。

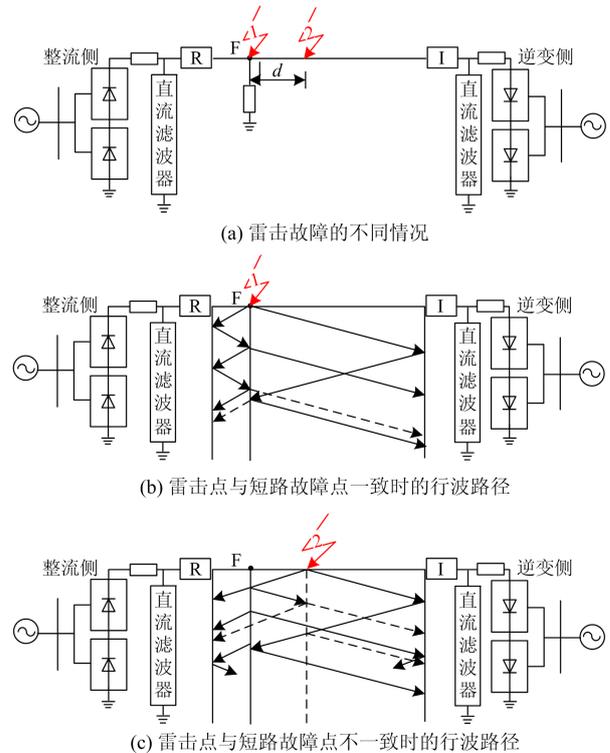


图 1 HVDC 线路雷击故障及行波传播路径示意图

Fig. 1 Sketches of HVDC transmission lines under lightning stroke fault and propagation path of traveling wave

当高压直流输电线路发生雷击短路故障时, 雷击产生的初始电流行波沿着输电线路向两侧传输, 利用线路两端检测到的电流行波首波头到达时差得到雷击点与线路两侧距离之间的关系^[9]。根据上述分析, 本文利用故障电流行波波头到达两端的时间

确定雷击点的位置。设高压直流输电线路全长为 L ，当线路发生雷击故障时，雷击电流初始行波到达整流端(R 端)、逆变端(I 端)的时刻分别为 t_R 、 t_I 。根据双端行波测距方法可得到雷击点与输电线路整流侧、逆变侧的距离分别为 x_R 、 x_I ，其计算公式为

$$x_R = \frac{L + (t_R - t_I)v_0}{2} \quad (1)$$

$$x_I = \frac{L - (t_R - t_I)v_0}{2} \quad (2)$$

式中， v_0 为雷电流波速的经验值。

1.2 雷击故障行波频域特征分析

故障行波沿着输电线路传播，在频域上可以由一系列谐波形式的频率表示，称之为固有频率。其中低次频率幅值最大，称之为固有频率主成分，即一次频率，其他固有频率成分含量会随着频率增大而减小^[10]。图 2 为固有频率示意图。

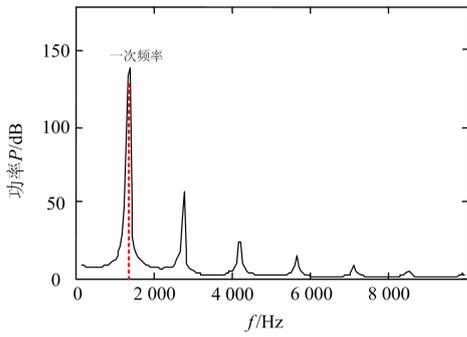


图 2 固有频率示意图

Fig. 2 Sketch of natural frequency

直流输电线路发生短路故障，相当于在故障点叠加一个与故障电压等值反向的电压源^[10]，输电线路可等效为输入-状态-输出的模型。采用 Laplace 变换对该独立电压源串联系统等效阻抗组成的戴维南等效电路进行分析，可得到故障距离的计算公式如式(3)^[11-13]。

$$d = \frac{(\theta_1 + \theta_F + 2k\pi)v}{4\pi f_n} \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (3)$$

式中： d 为故障点与保护安装处之间的距离； f_n 为行波固有频率 n 次成分，其中一次成分即固有频率主成分； θ_1 和 θ_F 分别为系统测量侧和故障点处的反射角； v 为此频率下的波速； k 为使方程为非零正值中的最小整数。

$$\theta_1 = \arg(\Gamma_1) \quad (4)$$

$$\theta_F = \arg(\Gamma_F) \quad (5)$$

式中， Γ_1 和 Γ_F 分别为系统测量侧和故障点处的电流行波反射系数。

$$\Gamma_1 = \frac{Z_C - Z_R}{Z_C + Z_R} \quad (6)$$

$$\Gamma_F = \frac{Z_C - Z_F}{Z_C + Z_F} \quad (7)$$

式中： $Z_F = Z_C // R_F$ ， R_F 为故障点处的过渡电阻， Z_C 为线路特征阻抗； Z_R 为线路系统侧电源阻抗。

2 基于融合行波时频信息的故障定位方法

2.1 故障定位基本思路

雷电流行波在沿输电线路传播的过程中，会受到冲击电晕和大地阻抗频率特性影响，因而雷电波在传播过程中会发生衰减^[14]；同时，故障行波在传播过程中也会发生衰减，短路故障点距线路测量侧越远，故障行波固有频率主成分的频率值越难反映故障的真实距离，使故障定位结果误差变大。因此基于行波固有频率的故障定位方法在输电线路较长的情况下精度会降低^[15]。实际工程经验表明，雷电波的衰减特性使得输电线路发生雷击短路故障时，雷击点与短路故障点的间距相对较小，一般不超过 50 km^[16]。因此，本文首先利用故障电流行波的初始波头定位雷击点，然后根据雷击点与短路故障点的间距不超过 50 km 的工程经验判断发生短路故障的线路区段。

如图 3 所示，A 为线路整流侧端点，G 为线路逆变侧端点，O 为线路中点，根据雷击点与短路故障点间距的经验值，取 C、D 两点使得 OC、OD 的距离为 50 km，取 B、E 两点使得 BC、DE 的距离为 50 km。此时 BE 段构成线路中间区段 β 。

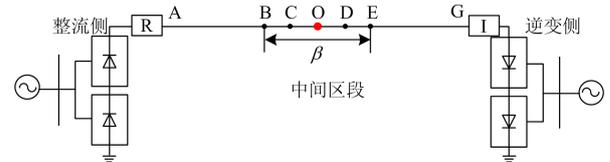


图 3 高压直流输电线路区段示意图

Fig. 3 Sketch of HVDC block

基于上述线路区段划分原则，当雷击发生在 AC 段，即 $x_R - x_I < -0.5\beta$ 时，短路故障区段为 AO 段，此时短路故障点靠近整流侧，利用整流侧采集到的数据定位故障更为准确，因此选取从整流侧故障电流行波中提取到的固有频率进行短路故障点定位；当雷击发生在 DG 段，即 $x_R - x_I > 0.5\beta$ 时，短路故障区段为 OG 段，此时短路故障点靠近逆变侧，利用逆变侧采集到的数据定位故障更为准确，因此选取从逆变侧故障电流行波中提取到的固有频率进行短路故障点定位；当雷击发生在 CD 段，即 $|x_R - x_I| \leq 0.5\beta$ 时，短路故障区段为输电线路中间区段 BE，此时

利用整流侧或逆变侧的故障电流行波中提取到的固有频率进行短路故障点定位的准确度相差不大, 因此采用二者定位结果的平均值作为最终结果可以进一步提高定位精度。

2.2 故障定位具体方案

按上述原理所构成的方法可分为雷击点定位、短路故障点位置判定及定位两个步骤。

1) 雷击点位置确定

根据式(1)和式(2)对雷击点进行双端行波测距, 得到雷击点与输电线路整流侧、逆变侧的距离 x_R 、 x_I 。在系统双极运行的条件下, 为避免发生电流相量各模量之间的“模混杂”现象, 需要对线路两侧采集到的故障电流行波信号进行 Clark 相模变换。

2) 短路故障点位置判定及定位

设输电线路整流侧故障电流行波模信号 $i_R(t)$ 、逆变侧故障电流行波模信号 $i_I(t)$ 的固有频率的主成分分别为 f_R 、 f_I , 采用基于固有频率的单端故障测距方法, 短路故障点与整流侧的距离 d_R 和短路故障点与逆变侧的距离 d_I 可由式(8)和式(9)计算。

$$d_R = \frac{(\theta_R + \theta_F) v_R}{4\pi f_R} \quad (8)$$

$$d_I = \frac{(\theta_I + \theta_F) v_I}{4\pi f_I} \quad (9)$$

式中, v_R 、 v_I 分别为在频率 f_R 、 f_I 下的波速。

a. 当 $x_R - x_I < -0.5\beta$ 时, 提取整流侧故障电流行波模信号的固有频率的主成分 f_R , 利用式(8)计算出 d_R , 可得到短路故障点与整流侧的距离为

$$d_F = d_R \quad (10)$$

b. 当 $x_R - x_I > 0.5\beta$ 时, 提取逆变侧故障电流行波模信号的固有频率的主成分 f_I , 利用式(9)计算得出 d_I , 可得到短路故障点与整流侧的距离为

$$d_F = L - d_I \quad (11)$$

c. 当 $|x_R - x_I| \leq 0.5\beta$ 时, 同时提取输电线路整流侧、逆变侧故障电流行波模信号的固有频率主成分 f_R 、 f_I , 利用式(8)和式(9)计算得出 d_R 和 d_I , 可得到短路故障点与整流侧的距离为

$$d_F = \frac{d_R + (L - d_I)}{2} \quad (12)$$

融合行波时频信息的高压直流输电线路雷击点与短路故障点不一致时故障定位方法其具体实施流程如图 4 所示。

由于输电线路故障行波固有频率的形成与线路终端物理条件有关, 需要考虑线路终端安装平波电抗器与直流滤波器的情况。多信号分类(Multiple

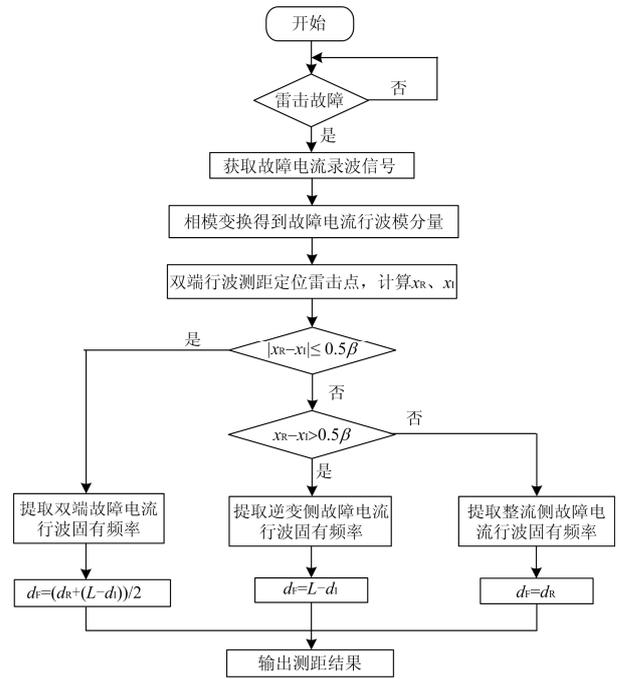


图 4 故障定位方案流程图

Fig. 4 Flow chart of the fault location method

Signal Classification, MUSIC)算法在此条件下提取固有频率具有高分辨率、高估计精度及稳定性, 且该方法同样适用于行波衰减速度快、有效行波信号数据短的情况, 故本文采用 MUSIC 方法进行固有频率的提取。

3 仿真实验与分析

3.1 仿真系统及其参数

基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台建立高压直流输电系统的仿真模型对所提的定位方案进行验证。系统额定电压为 800 kV, 额定容量为 3 200 MW, 线路全长 800 km, 采用 J. R. Marti 频率相关模型, 线路两侧装有 40 mH 平波电抗器和直流滤波器, 其中直流滤波器为 12/24/36 三调谐滤波器^[17]。故障录波装置(保护装置)采样率 F_s 为 1 MHz。由于直流输电控制系统最短响应时间不小于 5 ms, 即在 5 ms 内控制系统的响应不会叠加到故障行波波头^[18], 为避免固有频率发生偏移和“混叠”, 保证固有频率提取的准确性, 本文以发生故障 5 ms 内的行波电流数据作为分析对象。

雷电流模型采用与实际雷电流波形最接近的双指数模型^[19], 雷电放电为负极性脉冲波, 其数学表达式为

$$I(t) = I_0 (e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \quad (13)$$

式中: $I(t)$ 为雷电流瞬时值; I_0 为雷电流幅值; T_1 为

波头时间常数, 取值为 $1.2\sim 10\ \mu\text{s}$; T_2 为波尾时间常数, 取值为 $10\sim 100\ \mu\text{s}$ 。

3.2 典型算例分析

3.2.1 短路故障点近整流侧

假设线路在距离整流侧 150 km 处遭受绕击雷, 雷电流幅值为 50 kA, 导致在距离整流侧 100 km 处线路发生短路故障, 雷击点和短路故障点相距 50 km。此时线路两侧故障电流行波时域波形如图 5 所示。

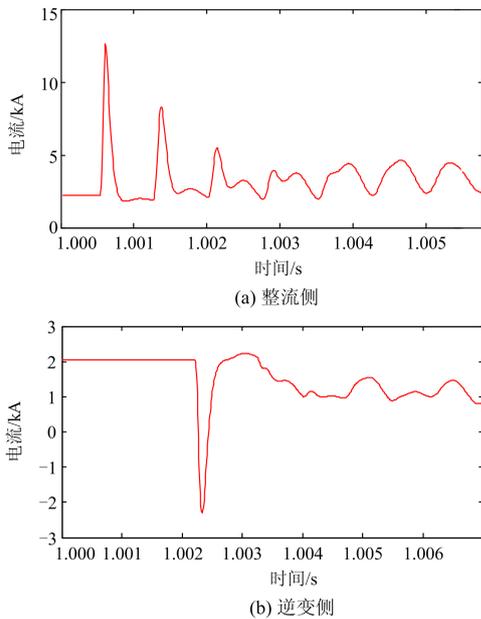


图 5 故障点近整流侧时线路两侧故障电流行波波形
Fig. 5 Fault current waveforms of line two sides in the condition that fault position is close to the rectifier side

双端首波头到达时刻分别为 $t_R=1.000\ 487\ \text{s}$ 、 $t_I=1.002\ 16\ \text{s}$ 。根据式(1)和式(2)可得到雷击点距 R、I 侧距离分别为 149.6 km 和 650.4 km; 两者之间的关系为 $x_R-x_I=-500.8\ \text{km}<-100\ \text{km}$, 判断故障发生在输电线路近整流侧。提取到的整流侧故障电流行波信号的固有频率频谱如图 6 所示。整流侧固有频率的主

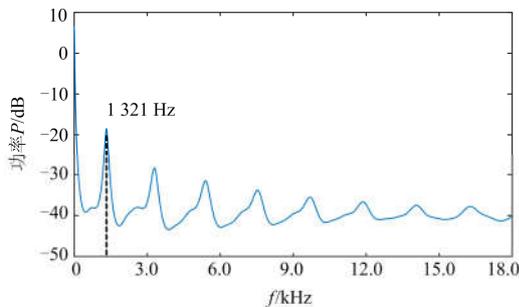


图 6 整流侧故障电流行波频谱
Fig. 6 Spectrum of fault current traveling wave at the rectifier side

成分 $f_R=1\ 321\ \text{Hz}$, 利用式(8)和式(10)得出短路故障点与整流侧的距离 $d_F=99.74\ \text{km}$ 。

因此, 该算例的定位结果为高压直流输电线路距整流侧 149.6 km 处发生雷击, 而在 99.74 km 处发生短路故障, 故障定位误差为 0.26 km。

3.2.2 短路故障点在中间区段

假设线路在距离整流侧 450 km 处遭受绕击雷, 雷电流幅值为 50 kA, 导致在距离整流侧 400 km 处发生短路故障, 雷击点和短路故障点相距 50 km。此时线路两侧的故障电流行波波形如图 7 所示。

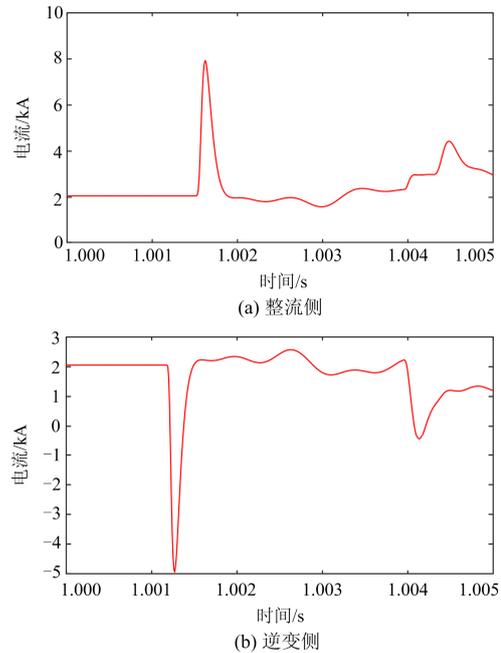
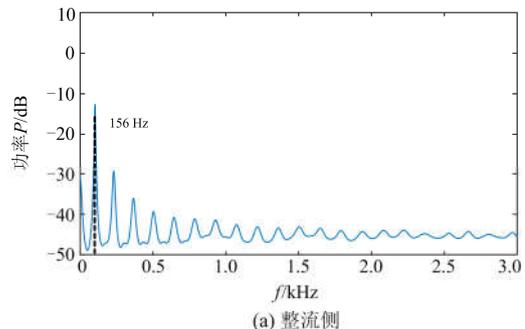


图 7 线路中间区段故障时两侧故障电流行波波形
Fig. 7 Fault current waveforms of line two sides in the condition that fault position is in the middle section

双端首波头到达时刻分别为 $t_R=1.001\ 513\ \text{s}$ 、 $t_I=1.001\ 187\ \text{s}$ 。根据式(1)、式(2)可得到雷击点距 R、I 侧距离分别为 448.5 km 和 351.5 km; 两者之间的关系为 $|x_R-x_I|=97\ \text{km}<100\ \text{km}$, 判断故障发生在线路中间区段。提取到的整流侧、逆变侧故障电流行波信号的固有频率频谱如图 8 所示。



(a) 整流侧

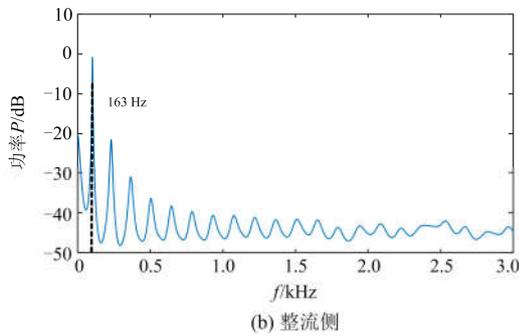


图 8 线路两侧故障电流行波频谱

Fig. 8 Spectrum of fault current traveling wave at both ends of line

由图 8 可知, 整流侧固有频率的主成分 $f_R=156$ Hz, 逆变侧固有频率的主成分 $f_I=163$ Hz, 利用式(8)、式(9)及式(12)得出短路故障点与整流侧的距离 $d_F=400.92$ km。

表 1 雷击点与短路故障点位置不同时的测距结果

Table 1 Fault location results of different position of lighting position and short circuit fault point

故障工况		t_R/s	t_I/s	雷击点定位结果/km	$(x_R-x_I)/$ km	故障区段判断	固有频率		故障定位结果/km	故障定位误差/km
雷击点位置/km	故障点位置/km						$f_R/$ Hz	$f_I/$ Hz		
30	80	1.000 31	1.002 64	30.2	-739.6	近整流侧	1 730	—	79.83	0.21
50	100	1.000 56	1.002 56	49.8	-700.4	近整流侧	1 324	—	100.18	0.18
100	150	1.000 37	1.002 39	99.4	-601.2	近整流侧	710	—	149.67	0.33
150	200	1.000 54	1.002 20	150.7	-498.6	近整流侧	644	—	199.78	0.22
250	300	1.000 86	1.001 85	248.9	-302.2	近整流侧	459.2	—	299.74	0.26
400	350	1.001 37	1.001 36	401.5	3	中间区段	363	342	349.24	0.76
450	400	1.001 18	1.001 51	448.5	-97	中间区段	156	163	400.92	0.92
500	550	1.001 68	1.001 02	501.3	202.6	近逆变侧	—	560	550.48	0.48
600	650	1.002 02	1.000 68	601.2	402.4	近逆变侧	—	710.3	650.40	0.40
650	700	1.002 15	1.000 49	649.5	499	近逆变侧	—	1 321	700.26	0.26
700	750	1.002 16	1.000 36	700.3	600.6	近逆变侧	—	2 656	749.86	0.14

由表 1 可知该方法通过线路两侧故障电流行波首波头的到达时间能够准确地定位出雷击点并判定故障区段, 根据故障区段的不同, 分别利用单侧或两侧故障行波的固有频率主成分能够对高压直流输电线路中任何区段的雷击短路故障点进行准确的故障定位; 当雷击短路故障发生在线路近整流侧或近逆变侧时, 故障定位绝对误差在 0.5 km 以内, 即使发生在线路中间区段, 故障定位绝对误差也可以保证在 1 km 以内。

为验证短路故障点与雷击点之间的不一致距离对本文所提方法的影响, 表 2 给出了故障过渡电阻为 10 Ω 时, 短路故障点分别距雷击点 50 km、30 km、10 km 时的定位结果。从表 2 可以看出, 该方法的定位精度不受雷击点与短路故障点间距的影响。

因此, 该算例的定位结果为高压直流输电线路距整流侧 448.5 km 处发生雷击, 而在 400.92 km 处发生短路故障, 故障定位误差为 0.92 km。

3.3 测距方法适应性分析

为验证该定位方法的适应性^[20-23], 分别对不同的雷击点与短路故障点位置、雷击点与短路故障点的间距及过渡电阻等故障工况下的定位方法进行了验证。部分仿真结果如表 1—表 3 所示, 其中雷击点位置、短路故障点位置及故障定位结果均归算为距 R 侧的距离。

表 1 为雷击点与短路故障点的间距为 50 km、过渡电阻为 10 Ω 时, 线路不同位置遭受雷击时的雷击点与短路故障点定位结果。为验证本文方法的抗干扰性能, 在仿真获得的线路故障电流行波数据中均加入了信噪比为 25 dB 的噪声; 后续仿真验证均进行了相同的处理。

表 2 雷击点与短路故障点间距不同时的测距结果

Table 2 Fault location results of different inconsistent distances

雷击点位置/km	故障点位置/km	雷击点定位结果/km	故障区段判断	故障定位结果/km	故障定位误差/km
90	140	90.3	近整流侧	140.23	0.23
	120	90.2	近整流侧	120.18	0.18
	100	89.9	近整流侧	99.83	0.17
390	440	389.6	中间区段	440.52	0.52
	410	390.1	中间区段	410.56	0.56
	400	390.3	中间区段	400.76	0.76
690	740	690.3	近逆变侧	739.85	0.15
	720	689.6	近逆变侧	719.81	0.19
	700	689.7	近逆变侧	700.28	0.28

为验证故障过渡电阻对本文提出的定位方法的影响,进行了不同过渡电阻下的仿真验证。表3为各故障区段雷击点位置固定、雷击点与短路故障点的间距为50 km,线路故障点过渡电阻不同时雷击点与短路故障点定位结果。从表3可以看出,本文提出的方法基本不受过渡电阻的影响。

表3 过渡电阻不同时的测距结果

Table 3 Fault location results of different fault resistances

雷击点位置/km	故障点位置/km	过渡电阻/ Ω	雷击点定位结果/km	故障区段判断	测距结果/km	故障定位误差/km
50	100	10	50.15	近整流侧	100.14	0.14
		50	49.80	近整流侧	100.18	0.18
		100	50.07	近整流侧	100.32	0.32
430	380	10	430.52	中间区段	380.82	0.82
		50	429.25	中间区段	379.11	0.89
		100	430.49	中间区段	380.91	0.91
770	720	10	769.63	近逆变侧	720.18	0.18
		50	769.59	近逆变侧	720.24	0.24
		100	770.44	近逆变侧	719.75	0.25

综上所述,本文提出的基于行波时频信息的短路故障点定位方法不受雷击点位置、雷击点与短路故障点间距、过渡电阻的影响,且具有良好的抗噪性能。

4 结论

本文针对高压直流输电线路雷击点与短路故障点不一致的情况,提出了融合行波时频信息的HVDC线路雷击点与短路故障点定位方法。通过理论分析和大量仿真验证表明:

- 1) 基于故障电流行波时域信息可以得到雷击点位置,并判断短路故障可能发生的区段。
- 2) 根据故障发生的区段,利用相近测点故障电流行波以获得更为准确的固有频率主成分,从而提高故障定位精度;对于发生在中间段的故障,同时利用两侧故障电流行波的频率信息求取故障平均距离以提高定位精度。
- 3) 融合行波时频信息的定位方法不受雷击点的位置、雷击点与短路故障点之间的距离以及过渡电阻大小的影响,定位精度高且具有较强的抗噪能力。

参考文献

[1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[2] 宋国兵, 高淑萍, 蔡新雷, 等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 123-129.

SONG Guobing, GAO Shuping, CAI Xinlei, et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 123-129.

[3] 彭勇, 王志新, 陈军, 等. 输电线路雷击故障定位与识别[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 406-410.

PENG Yong, WANG Zhixin, CHEN Jun, et al. Lighting fault location and recognition technologies in transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 406-410.

[4] 徐敏, 韩昆仑, 蔡泽祥. 高压直流输电线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 20-25.

XU Min, HAN Kunlun, CAI Zexiang. Propagation characteristic of fault traveling wave on HVDC line and its influence on HVDC line traveling wave protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 20-25.

[5] 张冰, 赵书强, 甄永赞, 等. 柔性直流输电的改进行波保护仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 58-63.

ZHANG Bing, ZHAO Shuqiang, ZHEN Yongzan, et al. Simulation study of an improved traveling wave protection for VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 58-63.

[6] 郭宁明, 覃剑. 输电线路雷击故障情况下的短路点定位方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 74-77.

GUO Ningming, QIN Jian. Location method of short-circuit point for transmission lines under lightning stroke fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 74-77.

[7] 束洪春, 张斌, 张广斌, 等. ± 800 kV 直流输电线路雷击点与闪络点不一致时的行波测距[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 114-120.

SHU Hongchun, ZHANG Bin, ZHANG Guangbin, et al. Traveling wave based fault location with flashover position different from lightning position for UHVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 114-120.

[8] 马仪, 黄然, 申元, 等. 输电线路雷击点与闪络点不一致的辨识与定位[J]. 电力系统自动化, 2016, 44(16): 63-71.

MA Yi, HUANG Ran, SHEN Yuan, et al. Inconsistent identification and location of transmission line lightning point and flashover point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 44(16): 63-71.

[9] 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.

LIN Sheng, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. Single terminal fault location by natural frequencies of traveling wave considering its time-domain characteristics[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 243-248.

- [10] 廖凯, 何正友, 李小鹏, 等. 基于行波固有频率的高压直流输电线路故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 104-109.
LIAO Kai, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. Fault location of HVDC transmission line based on the natural frequency of traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 104-109.
- [11] 郭林勇, 何正友, 钱清泉. 一种提取行波自然频率的单端故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 69-75.
WU Linyong, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. A single ended fault location method using traveling wave natural frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 69-75.
- [12] 黄荣辉, 李勋, 张宏钊, 等. 线缆混合输电线路故障组合行波测距方法及影响因素[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 73-81.
HUANG Ronghui, LI Xun, ZHANG Hongzhao, et al. Research on combined traveling wave fault location method of overhead line-cable hybrid line and influencing factors[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 73-81.
- [13] 高杉, 林圣, 何正友. 基于行波固有频率一、二次频差的 HVDC 输电线路纵联保护方法[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2002-2009.
GAO Shan, LIN Sheng, HE Zhengyou. A HVDC transmission line pilot protection method based on frequency difference between dominant natural frequency and secondary natural frequency of traveling wave[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2002-2009.
- [14] 陈丛丛, 张小青. 雷电波的衰减与变形问题研究[J]. 中国电力, 2013, 46(12): 12-16.
CHEN Congcong, ZHANG Xiaoqing. Research on attenuation and distortion problems of lightning overvoltage[J]. Electric Power, 2013, 46(12): 12-16.
- [15] 张泽宁, 郝洪民, 李京, 等. 脉冲注入法和单端故障行波法相结合的直流输电系统接地极线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 117-122.
ZHANG Yining, HAO Hongmin, LI Jing, et al. Fault location of HVDC grounding electrode lines based on combination of pulse injection method and single-ended fault traveling wave method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 117-122.
- [16] 赵玉龙. ± 800 kV 特高压直流输电线路雷击特性分析[J]. 企业技术开发, 2017, 36(5): 83-85.
ZHAO Yulong. Analysis of lightning stroke characteristics of ± 800 kV UHVDC transmission lines[J]. Technological Development of Enterprise, 2017, 36(5): 83-85.
- [17] 雷霄, 许自强, 王华伟, 等. ± 800 kV 特高压直流输电工程实际控制保护系统仿真建模方法与应用[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1359-1364.
LEI Xiao, XU Ziqiang, WANG Huawei, et al. A modeling method for actual control and protection system of ± 800 kV UHVDC transmission project and its application[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1359-1364.
- [18] 束洪春, 田鑫萃, 张广斌, 等. ± 800 kV 直流输电线路故障定位的单端电压自然频率方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 104-111.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, ZHANG Guangbin, et al. Fault location for ± 800 kV HVDC transmission lines using natural frequency of single terminal voltage data[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 104-111.
- [19] 郭乾晋, 周全, 黄义隆, 等. 高压直流典型线路雷击故障的控制保护响应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 140-145.
WU Qianjin, ZHOU Quan, HUANG Yilong, et al. Research of HVDC control and protection response for lightning stroke failures occurred in transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 140-145.
- [20] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6-10.
QIN Jian, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao, et al. A new double terminal method of traveling wave fault location using wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 6-10.
- [21] HE Z, LIN S, DENG Y, et al. A rough membership neural network approach for fault classification in transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 61: 429-439.
- [22] YOU M, ZHANG B H, CAO R F. Study of non-unit transient-based protection for HVDC transmission lines[C] // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009, Wuhan, China: 1-5.
- [23] YAO Z Q, ZHANG Q, CHEN P, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.

收稿日期: 2018-03-06; 修回日期: 2018-05-22

作者简介:

孙沛瑶(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电控制与保护; E-mail: sunpeiyaswjtu@163.com

林圣(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与故障定位; E-mail: slin@swjtu.edu.com

刘磊(1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高压直流输电控制与保护. E-mail: liulei_swjtu@163.com

(编辑 姜新丽)