

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221357

交流线路避雷线融冰故障电磁暂态分析与间接式行波故障定位方法

曹璞麟¹, 黄美琴¹, 王云龙², 陈诺², 束洪春¹, 杨博¹

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明 650500; 2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局, 云南 昆明 650000)

摘要: 由于避雷线通常逐塔接地, 因此往往对其进行消去处理以降低参数矩阵阶数, 但是在避雷线融冰过程中其与沿线杆塔绝缘, 会受到线路电磁耦合影响。在研究避雷线对地绝缘条件下多导体传输系统电磁暂态耦合的基础上, 推导双回非对称相数多导体传输系统的解耦方式, 提出避雷线对地绝缘情况下的相模变换矩阵, 并指出避雷线对地绝缘会造成由三相线路所构成模量中出现“零模提速”现象。在此基础上, 考虑电容式电压互感器暂态传变特性影响, 提出一种利用三相交流线路行波测距装置对避雷线直流融冰期间发生的故障进行间接式双端不同步故障测距的方法, 并通过渐进峭度曲线剔除现场实测信号中的电磁噪声, 实现波头准确辨识, 大量仿真表明该方法可行有效。

关键词: 避雷线; 直流融冰; 相模变换; 峭度; 故障测距; 行波

Electromagnetic transients analysis and indirect traveling wave fault location for ground wires of AC transmission line amid de-icing

CAO Pulin¹, HUANG Meiqin¹, WANG Yunlong², CHEN Nuo², SHU Hongchun¹, YANG Bo¹

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Kunming Electric Power Bureau, China Southern Power Grid EHV Transmission Company, Kunming 650000, China)

Abstract: The ground wire is usually eliminated to reduce the order of the parameter matrix because of its direct connection to towers. However, the tower must be insulated from ground wires in the process of de-icing. In this paper, on the basis of analysis of multi-conductor system electromagnetic transient coupling in the case of insulated ground wires, the decoupling method of double-circuit electromagnetic coupling with asymmetric phases is deduced. A phase-mode transform matrix for an insulated ground wire is obtained. In addition, the insulated ground wire causing ‘speed increase in zero mode’ with the traditional decoupling matrix is pointed out. Based on the analysis, in consideration of the transient frequency response of capacitive voltage transformers, an indirect fault location scheme using fault locators in three-phase transmission lines to locate ground wire faults is proposed for a double-terminal fault location without synchronization. The progressive kurtosis curve is applied to remove the electromagnetic noise of real measured signals and the wavefronts are identified accurately. A large quantity of simulations is carried out to verify the effectiveness of the proposed fault location scheme.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52167012).

Key words: ground wire; DC de-icing; phase-mode transformation; kurtosis; fault location; traveling wave

0 引言

输电线路在跨越高原、山地等地理环境复杂区

域时, 易受到雨雪霜冻、冰害冰灾等恶劣气候影响而形成覆冰, 输电线路正常运行时通过的电流能够产生热量抵御部分冰雪覆盖, 但是避雷线上通常没有电流流过, 其覆冰厚度往往远超输电导线^[1-3], 易诱发诸如绝缘子断裂^[4]、断线^[5]、杆塔倒塌^[6]等严重危害电力网络的事故。直流融冰是目前常用的除冰

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52167012); 云南省基础研究计划项目资助(202001AT070096)

手段之一^[7-9]。在对避雷线进行融冰时,加装了绝缘子的避雷线断开沿线接地刀闸,并对避雷线末端进行短接保证融冰电流能够流过避雷线全线。然而线路接地刀闸未完全断开或线路周边树木倾轧等情况会引起绝缘避雷线上出现异常接地点,导致直流融冰装置无法覆盖全线长,进而影响融冰效果并造成直流融冰装置横差保护动作。

采用晶闸管整流技术的直流融冰装置虽然在我国已被广泛应用,但其研究主要集中于分析覆冰对线路、风机等设施产生的影响^[10-11],针对直流融冰线路故障定位的研究极少。文献[12]分析了12脉动直流融冰装置换流变及换流器区域各类短路故障的电气量特征,并提出了基于过流相数的保护方案。文献[13]通过分析电压特征对交流线路融冰作业中的故障进行定位,但并未讨论绝缘避雷线融冰时发生的故障。随着DSP等计算机技术的广泛应用,双端行波测距^[14]已经发展为成熟的工业级应用,并出现了基于电流行波和电压行波两种方案^[15]。但是由于双端行波测距技术依赖于标准信号源定时精度与信道畅通,而山区、峡谷内变电站极易受到微气象影响导致信号接收不佳,因此学术界依然在对单端行波测距^[16]或双端非同步行波测距^[17]进行研究。行波波头的准确标定是行波测距原理的首要问题,小波变换^[18]是较早用于标定行波波头位置的方法,而且在实际工程中也得到了应用,但是在噪声较为严重的情况下依然存在误判的可能性。由于行波在电路上传播导致的色散,Logistic模型被用于提取其波前信息,以便于故障距离计算,但是最后依然回归于小波变换的波头标定。对于现在受到大量研究的神经网络技术^[19],文献[20]也提出利用神经网络解决行波非线性与色散时的标定问题,但是神经网络需要大量的合适样本训练,实际行波也会因周围自然环境差异而发生变化,难以保证样本完备性。文献[21]分析了行波测距方法在复杂电网中的应用问题,指出衰减与波到时刻标定是复杂电网多端定位的重要问题。为降低行波波头高频分量衰减快而导致的波头标定困难,文献[22]提出了全波形主频分量的概念,提取能量最大频段用于波头标定,有效解决了行波标定频段单一的问题。文献[23-24]分别提出了基于时间反转原理与电磁时间反演的测距方式,在一定程度上降低了对行波波头标定的苛刻要求。

融冰过程中的避雷线处于对地绝缘状态,与交流线路共同构成了多导体传输系统,不宜进行消去

处理,必须参与到多导体解耦的相模变换之中。相模变换虽为线路电磁暂态分析的基础,但是过去研究主要集中于同塔多回路相模变换^[25-26]或特殊变换形式^[27],而不同相数、不同参数线路同塔架设情况下的相模变换鲜有研究。本文在考虑绝缘避雷线参与构建多导体传输系统的基础上,研究了其完全解耦方法,并指出了单纯利用三相电气量构成的“零模”存在“提速”现象。由于避雷线上加装行波高速采集装置会带来大量额外的经济负担,实际运行不太可能实现,但是在避雷线融冰过程中交流导线处于停运状态,而线路电压互感器位于导线与断路器之间,依然能够采集得到线路上暂态波形,且无工频电压干扰,因此可以考虑使用线路电压互感器对避雷线故障产生的行波进行“间接”的测量。本文分析了绝缘避雷线行波暂态过程及其在交流导线上感应产生的电压行波传播特性。在计及电压互感器暂态转变特性的基础上,提出了基于交流导线电压行波的绝缘避雷线故障间接式测距方法。

1 避雷线对地绝缘情况下输电线路解耦矩阵求取

1.1 参数矩阵

在避雷线对地绝缘情况下,设线路均匀换位,三相交流线路和两根避雷线组成的微元段等效电路如图1所示。由于避雷线沿线对地绝缘,因此避雷线沿线与大地并非等电势。

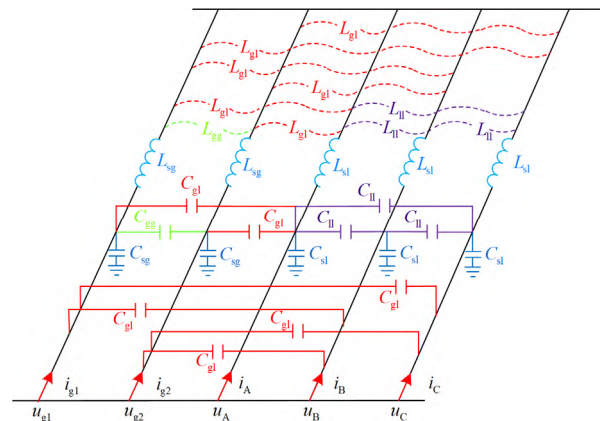


图1 交流线路与避雷线等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of AC line and ground wire

图1中: L_{sl} 和 L_{ll} 分别为交流输电线路的自感和互感; L_{gl} 为交流线路与避雷线互感; L_{sg} 和 L_{gg} 分别为避雷线自感和互感; C_{sl} 为三相交流输电线路对地电容; C_{ll} 为交流输电线路之间电容; C_{gl} 为交流

线路与避雷线间电容; C_{sg} 为避雷线对地电容; C_{gg} 为避雷线间电容; u_A 、 u_B 、 u_C 分别为接入融冰电流避雷线与交流输电线耦合产生的 A、B、C 三相感应电压; u_{g1} 、 u_{g2} 为避雷线接入的直流电压; i_A 、 i_B 、 i_C 分别为接入融冰电流避雷线与交流输电线耦合产生的 A、B、C 三相感应电流; i_{g1} 、 i_{g2} 为避雷线接入的直流电流。

由于交流输电线路的材料、结构等参数与避雷线截然不同, 结合图 1 中的耦合关系, 可以得出电感矩阵 L 和电容矩阵 C , 如式(1)、式(2)所示。

$$L = \begin{bmatrix} L_{sl} & L_{ll} & L_{ll} & L_{gl} & L_{gl} \\ L_{ll} & L_{sl} & L_{ll} & L_{gl} & L_{gl} \\ L_{ll} & L_{ll} & L_{sl} & L_{gl} & L_{gl} \\ L_{gl} & L_{gl} & L_{gl} & L_{sg} & L_{gg} \\ L_{gl} & L_{gl} & L_{gl} & L_{sg} & L_{sg} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{sl} & C_{ll} & C_{ll} & C_{gl} & C_{gl} \\ C_{ll} & C_{sl} & C_{ll} & C_{gl} & C_{gl} \\ C_{ll} & C_{ll} & C_{sl} & C_{gl} & C_{gl} \\ C_{gl} & C_{gl} & C_{gl} & C_{sg} & C_{gg} \\ C_{gl} & C_{gl} & C_{gl} & C_{sg} & C_{sg} \end{bmatrix} \quad (2)$$

若忽略线路电阻影响, 则多导体无损线路上电压与电流的波过程如式(3)、式(4)所示。

$$\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_{g1} \\ u_{g2} \end{bmatrix} = -L \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_{g1} \\ i_{g2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_{g1} \\ i_{g2} \end{bmatrix} = -C \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_{g1} \\ u_{g2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知, 在避雷线绝缘情况下, 避雷线与三相导线存在电磁耦合, 参数矩阵为满秩矩阵, 在进行电磁暂态分析时需考虑避雷线与导线之间的电磁耦合。

1.2 非对称相数多导体系统解耦过程

由于绝缘避雷线引入后导致传输线系统成为 5 阶系统, 其解耦方式与普通双回线路存在较大区别, 无法直接利用双回线的方式进行解耦。本文首先采用 5 阶 Karenbauer 变换矩阵 S_1 来实现初步解耦, 如式(5)所示。

$$S_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

利用式(5)变换矩阵, 可得到初步化简的电感矩阵 L_1 和电容矩阵 C_1 。

$$L_1 = S_1^{-1} L S_1 = \begin{bmatrix} 2L_{ll} + L_{sl} & 0 & 0 & 2L_{gl} & 0 \\ 0 & L_{sl} - L_{ll} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{sl} - L_{ll} & 0 & 0 \\ 3L_{gl} & 0 & 0 & L_{sg} + L_{gg} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{sg} - L_{gg} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C_1 = S_1^{-1} C S_1 = \begin{bmatrix} 2C_{ll} + C_{sl} & 0 & 0 & 2C_{gl} & 0 \\ 0 & C_{sl} - C_{ll} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{sl} - C_{ll} & 0 & 0 \\ 3C_{gl} & 0 & 0 & C_{sg} + C_{gg} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{sg} - C_{gg} \end{bmatrix} \quad (7)$$

再经矩阵 B 进行行列变换, 可得出化简的线路电感矩阵 L_2 与电容矩阵 C_2 。

$$B = B^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$L_2 = B^{-1} L_1 B = \begin{bmatrix} 2L_{ll} + L_{sl} & 2L_{gl} & | & 0 & 0 & 0 \\ 3L_{gl} & L_{sg} + L_{gg} & | & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & | & L_{sl} - L_{ll} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & | & 0 & L_{sl} - L_{ll} & 0 \\ 0 & 0 & | & 0 & 0 & L_{sg} - L_{gg} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C_2 = B^{-1} C_1 B = \begin{bmatrix} 2C_{ll} + C_{sl} & 2C_{gl} & | & 0 & 0 & 0 \\ 3C_{gl} & C_{sg} + C_{gg} & | & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & | & C_{sl} - C_{ll} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & | & 0 & C_{sl} - C_{ll} & 0 \\ 0 & 0 & | & 0 & 0 & C_{sg} - C_{gg} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $L_{sl} - L_{ll}$ 、 $C_{sl} - C_{ll}$ 为导线-导线模量; $L_{sg} - L_{gg}$ 、 $C_{sg} - C_{gg}$ 为避雷线-避雷线模量; 左上角未完全解耦的部分即为零模以及避雷线-交流线路之间存在耦合的模量。在避雷线对地绝缘情况下, 若直接使用仅针对三相线路的相模变换公式, 无法获得纯粹的零模, 而会获得包含避雷线-导线之间的模量。令 L_3 、 C_3 为

$$L_3 = \begin{bmatrix} 2L_{ll} + L_{sl} & 2L_{gl} \\ 3L_{gl} & L_{sg} + L_{gg} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} 2C_{ll} + C_{sl} & 2C_{gl} \\ 3C_{gl} & C_{sg} + C_{gg} \end{bmatrix} \quad (12)$$

若能将 L_3 和 C_3 矩阵完全对角化, 则能够实现避雷线与交流线路的完全解耦。但是在经过初次相模变换后, 未完成解耦的矩阵部分已经变为非对称矩阵, 无法利用通用的变换方法直接进行对角化, 必须采用数值计算方式计算其特征矩阵来获取解耦矩阵。由于 $L_3 C_3 \neq C_3 L_3$, 因此直接对 L_3 和 C_3 进行对角化后无法获得完全相同的特征向量, 导致 L_3 和 C_3 无法用同一解耦矩阵进行对角化, 由于模量波速计算以及电压、电流模量的提取依赖于解耦矩阵的特定形式, 参数矩阵不统一将不利于后续电压模量、电流模量以及模量波速的求取。为能够将参数矩阵用同一解耦矩阵进行对角化, 首先采用特征值求取的方法对 $L_3 C_3$ 进行对角化, 得到 $A_{L_3 C_3}$ 。

$$A_{L_3 C_3} = S_2^{-1} L_3 C_3 S_2 = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: S_2 为相应变换矩阵, 如式(14)所示; λ_1 为多导体系统零模分量, 如式(15)所示; λ_2 为避雷线与交流线路之间的线模分量, 如式(16)所示。

$$S_2 = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_2 - (C_0 L_\epsilon + C_\beta L_\beta)}{C_\gamma L_\epsilon + C_\epsilon L_\beta} & \frac{\lambda_1 - (C_0 L_\epsilon + C_\beta L_\beta)}{C_\gamma L_\alpha + C_\epsilon L_\beta} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

令 $L_\gamma = 2L_{ll} + L_{sl}$ 、 $L_\beta = L_{sg} + L_{gg}$ 、 $L_0 = 2L_{gl}$ 、 $L_\epsilon = 3L_{gl}$ 、 $C_\gamma = 2C_{ll} + C_{sl}$ 、 $C_\beta = C_{sg} + C_{gg}$ 、 $C_0 = 2C_{gl}$ 、 $C_\epsilon = 3C_{gl}$, 有

$$\lambda_1 = \frac{L_\gamma C_\gamma}{2} + \frac{L_0 C_\epsilon + L_\epsilon C_0 + L_\beta C_\beta + \sqrt{\Delta}}{2} \quad (15)$$

$$\lambda_2 = \frac{L_\gamma C_\gamma}{2} - \frac{L_0 C_\epsilon + L_\epsilon C_0 + L_\beta C_\beta + \sqrt{\Delta}}{2} \quad (16)$$

其中

$$\Delta = (L_\gamma C_\gamma + L_0 C_\epsilon) + (L_\epsilon C_0 + L_\beta C_\beta)^2 + 4(L_\gamma L_\beta C_0 C_\epsilon + L_0 L_\epsilon C_\beta C_\gamma) 2 \begin{pmatrix} L_\gamma L_\epsilon C_0 C_\gamma + L_0 L_\beta C_0 C_\beta - \\ L_\gamma L_\beta C_\gamma C_\beta - L_0 L_\epsilon C_0 C_\epsilon \end{pmatrix} \quad (17)$$

基于上述方式对 $L_2 C_2$ 构造变换矩阵, 可得变换矩阵 S_3 。

$$S_3 = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_2 - (C_0 L_\alpha + C_\beta L_\beta)}{C_\gamma L_\alpha + C_\alpha L_\beta} & \frac{\lambda_1 - (C_0 L_\alpha + C_\beta L_\beta)}{C_\gamma L_\alpha + C_\alpha L_\beta} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

综上所述, 获得特征向量组成的变换矩阵如式(19)所示。

$$S = S_1 B S_3 = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_2 - (C_0 L_\alpha + C_\beta L_\beta)}{C_\gamma L_\alpha + C_\alpha L_\beta} & \frac{\lambda_1 - (C_0 L_\alpha + C_\beta L_\beta)}{C_\gamma L_\alpha + C_\alpha L_\beta} & 1 & 1 & 0 \\ \frac{\lambda_2 - (C_0 L_\alpha + C_\beta L_\beta)}{C_\gamma L_\alpha + C_\alpha L_\beta} & \frac{\lambda_1 - (C_0 L_\alpha + C_\beta L_\beta)}{C_\gamma L_\alpha + C_\alpha L_\beta} & 1 & -2 & 0 \\ \frac{\lambda_2 - (C_0 L_\alpha + C_\beta L_\beta)}{C_\gamma L_\alpha + C_\alpha L_\beta} & \frac{\lambda_1 - (C_0 L_\alpha + C_\beta L_\beta)}{C_\gamma L_\alpha + C_\alpha L_\beta} & -2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

由此, 可以实现交直流同塔非对称电磁耦合矩阵的完全解耦, 如式(20)所示。

$$S^{-1} L C S = S^{-1} C L S = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, Z_1, Z_2, Z_3) \quad (20)$$

其中

$$Z_1 = Z_2 = (L_{sl} - L_{ll})(C_{sl} - C_{ll}) \quad (21)$$

$$Z_3 = (L_{sg} - L_{gg})(C_{sg} - C_{gg}) \quad (22)$$

由式(20)可得, 交流线路与避雷线解耦后独立的零模与线模分量。可利用交流输电线路上的 CVT 采集避雷线故障时的交流输电线路电压波形, 使用行波测距装置进行故障测距。

2 绝缘避雷线电磁暂态分析与故障

2.1 绝缘避雷线故障行波电磁暂态过程

在进行避雷线融冰操作时, 交流线路断路器会跳开以防止避雷线脱冰抖动等引起线路放电造成交流线路故障, 故线路末端的电流互感器无法采集到电流波形, 但是在 500 kV 交流线路上, 电压互感器安装于断路器与线路之间, 即使在断路器断开的情

况下, 电压互感器依然能够检测到线路末端电压行波。因此本节对避雷线与断开线路上的电压行波电磁暂态特征进行分析。

故障在避雷线上引起的行波传播会通过线间耦合造成交流导线上出现相应电磁暂态过程。如图 2 所示, 在线路首端(M 端), 由于直流融冰装置前置的平波电抗器对高频信号近似于开路, 而交流线路也因断路器断开而处于开路状态, 故线路首端对于避雷线与导线上高频量而言都处于开路状态, 电压行波反射系数为+, 因此电压行波初始浪涌 u_{gM1} 在线路首端边界处形成的反射波与 u_{gM1} 具有相同极性。同理, 设避雷线上初始行波浪涌 u_{gM1} 在交流导线上耦合产生的电压行波为 u_{IM1} , u_{IM1} 在线路首端形成的反射波亦与 u_{IM1} 具有相同极性。

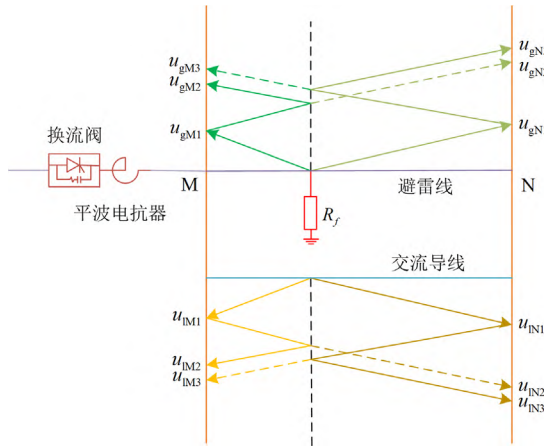


图 2 行波折反射网格图

Fig. 2 Grid diagram of travelling wave reflection and refraction

但是在线路末端(N 端), 避雷线末端需要短接以保证直流回路畅通, 而交流导线处于断开状态, 导致不同模量所对应回路的末端接线形式存在差异。由于避雷线与导线在末端并无直接联系, 二者所形成回路的边界可视为开路, 故该模量回路电压行波反射系数为+, 即初始行波浪涌 u_{IN1} 在交流导线末端形成的反射波与 u_{IN1} 具有相同极性。但是两根避雷线末端为短接形式, 因此其边界反射系数为-, 电压反射波极性将在末端发生改变, 导致 u_{gN1} 在末端形成的反射波与 u_{gN1} 具有相反的极性。

与电流行波不同, 电压行波在故障点反射时会发生极性翻转^[28], 导致在故障点处产生的反射波 u_{gM2} 及其在交流导线上耦合产生的 u_{IM2} 在极性方面与初始行波 u_{gM1} 及 u_{IM1} 完全不同。同理, u_{gN3} 的极性应与入射至故障点的行波极性相反, 由于入射至

故障点的行波浪涌与 u_{gN1} 极性相反, 因此 u_{gN3} 与 u_{gN1} 具有相同极性。通过 u_{gN3} 耦合至交流线路上的 u_{IN3} 和 u_{gN2} 具有相反的极性, 故 u_{IN3} 与 u_{IN1} 具有相同的极性。

在故障点形成的边界上, 折射波极性与入射波极性相同, 因此从线路末端通过故障点折射至线路首端的行波浪涌 u_{gM3} 极性与其对应的初始浪涌 u_{gN1} 极性相反。由于 u_{IN1} 在线路末端形成的反射波与 u_{IN1} 极性相同, 故 u_{IM3} 与 u_{IN1} 具有相同极性。由于线路首端避雷线与交流导线边界都近似于开路, 故折射至线路末端的 u_{gN2} 和 u_{IN1} 分别与 u_{gM1} 和 u_{IM1} 具有相同极性。

根据上述分析, 假设故障在避雷线上引起的行波浪涌极性为+, 则避雷线与交流导线上初始行波浪涌、故障点反射波和对端母线反射波的极性如表 1 所示。

表 1 行波极性判别

Table 1 Traveling wave polarity discrimination

故障偏向侧	量测端	第一次	第一次	第二次	第二次
		行波浪涌	行波极性	行波浪涌	行波极性
M	M	u_{IM1}	+	u_{IM2}	-
	N	u_{IN1}	+	u_{IN2}	+
N	M	u_{IM1}	+	u_{IM3}	+
	N	u_{IN1}	+	u_{IN3}	+

利用相关系数可以对波头极性进行判别, 可以得到^[29]

$$r(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}[X], \text{Var}[Y]}} \quad (23)$$

式中: $\text{Cov}(X, Y)$ 为 X 和 Y 的协方差; $\text{Var}[X]$ 、 $\text{Var}[Y]$ 分别为 X 、 Y 的方差。

值得注意的是, 表 1 的结论仅适用于避雷线融冰过程中线路末端开路与避雷线末端短接的特殊接线形式, 在此接线情况下, 故障初始行波、故障点反射波与线路末端反射波 3 种行波浪涌在避雷线与导线上的极性存在不同。当对导线进行融冰操作时, 导线末端为短接形式, 其反射系数与故障点反射系数同极性, 导致故障点反射波与线路末端反射波极性相同, 无法辨识。

2.2 波头标定方法

为充分利用直流融冰装置产生的电流进行融冰, 直流融冰装置直流侧未加装滤波器, 故避雷线与交流导线上存在较大谐波, 加之高频采集装置易受现场电磁噪声影响, 高频采集装置采集的波形中

会包含大量噪声。考虑到现场工程实际中电磁噪声过大、小波等时频域检测手段存在失效问题，而峭度是衡量数据非高斯性的重要指标，通常用来衡量信号当中的冲击特性，故采用峭度相关算法来表征线路故障冲击特性，峭度的计算公式为

$$K = \frac{E(x - \bar{x})^4}{[E(x - \bar{x})^2]^2} - 3 \quad (24)$$

式中： x 为信号时间序列； \bar{x} 是 x 的平均值； E 为内部变量期望值。当信号近似服从正态分布时，其峭度值约为 3，若信号中的冲击信号成分增多，其值会增大^[30]。本文采用式(25)所示的渐进峭度对行波浪涌进行标定。

$$K(n) = \frac{E(x(1:n) - \mu(x(1:n)))^4}{\sigma(x(1:n))^4} \quad (25)$$

式中： μ 为时间序列 $x(1) \sim x(n)$ 的平均值； σ 为时间序列 $x(1) \sim x(n)$ 的标准偏差。

峭度为波形归一化 4 阶中心矩，对时间序列中冲击性信号非常敏感，常用于检测某波形是否存在冲击性信号，采用渐进峭度可以最大化突出波形的异常变化点，并在渐进计算中弱化噪声产生的波形畸变。渐进峭度的全局最大值点为初始行波浪涌到达时刻，即波形出现的第一个不同于电磁噪声的突变点，而在后续渐进计算中，峭度值会逐渐减小直至第二个行波浪涌到达而出现局部最大值点。因此可以利用全局最大值点和之后的第一个局部最大值点标定初始行波浪涌和第一个到达的反射波。通过采集前两个行波浪涌最大值点的前后 3 个点，利用式(23)判断两端初始行波浪涌极性及其第二个行波浪涌的极性，通过对比得到故障近端。

本文所提方法整体流程如图 3 所示。

3 仿真建模

本文采用±800 kV 昆北换流站中大功率直流融冰装置及相应交流线路在 PSCAD/EMTDC 软件中进行仿真建模，仿真采样率为 1 MHz。图 4 为昆北换流站所连 500 kV 交流输电线路杆塔模型。交流导线型号为 JL/G1A-300/40，避雷线型号为 LBGJ40A-150，通过 1 片绝缘子与杆塔隔开，线路全长 122 km。

直流融冰装置通过 500 kV/35 kV 的换流变接入系统，其直流侧接于避雷线上。融冰装置经过三相换流变 T_1 变压，使正负两极的额定输出电压为 ±20 kV，额定输出电流为 ±4.5 kA，融冰装置的平波电抗器额定电感值为 25 mH，融冰装置连接图如图 5 所示。

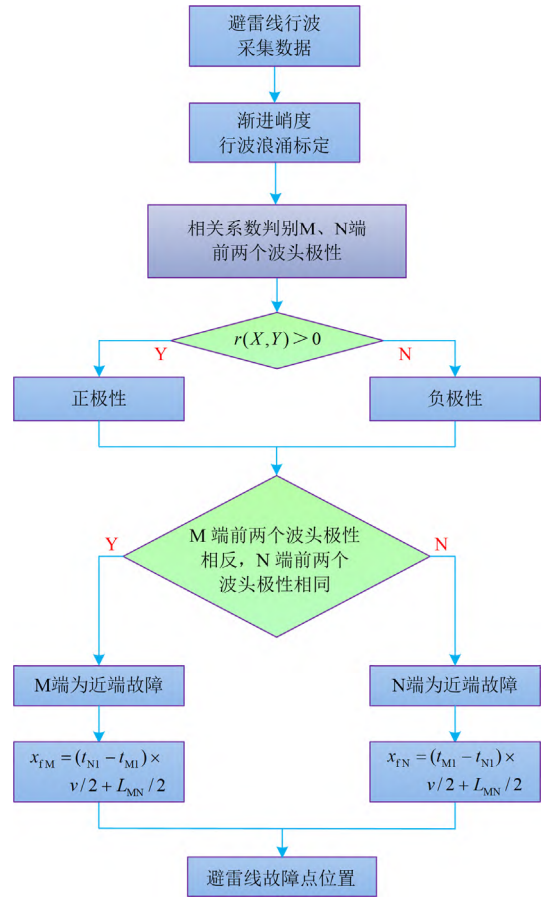


图 3 测距方案流程图

Fig. 3 Flow chart of ranging scheme

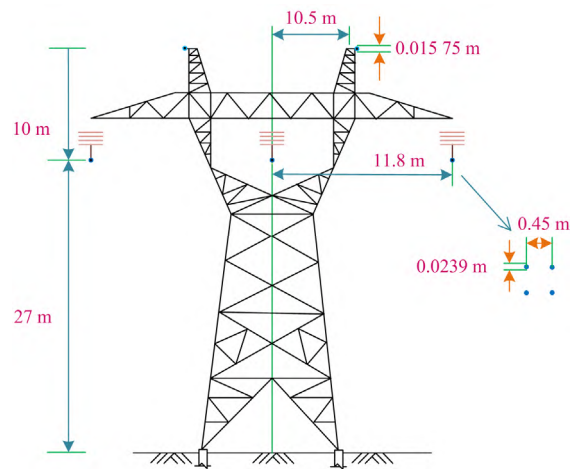


图 4 杆塔模型

Fig. 4 Tower model

考虑到本文所提方案需要使用电压行波，为模拟 CVT 对行波的传变，采用文献[25]的 CVT 模型进行仿真模拟。CVT 虽然长期被业界认为不适于传变行波信号，但是根据 CVT 电磁暂态模型与电压行

波测距装置的现场应用情况, CVT 二次输出或其电容末屏电流都可用于初始波头与后续波头的标定。本文所用 CVT 等值电路模型和参数参见文献[25]。

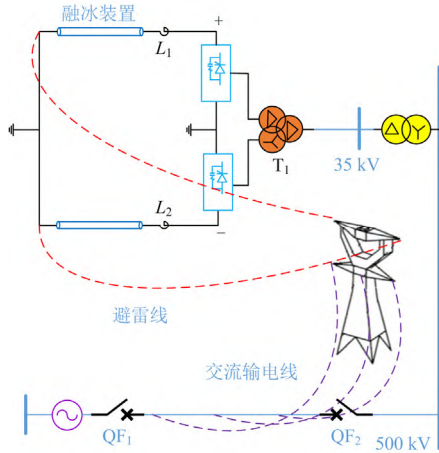


图5 融冰装置连接图

Fig. 5 Connection diagram of de-icing device

4 算例验证

4.1 不同模量波速比较

图4中输电线路模型工频情况下的输电线路参数矩阵如式(26)、式(27)所示。

$$L = \begin{bmatrix} 0.1723 & 0.0849 & 0.0849 & 0.0845 & 0.0845 \\ 0.0849 & 0.1723 & 0.0849 & 0.0845 & 0.0845 \\ 0.0849 & 0.0849 & 0.1723 & 0.0845 & 0.0845 \\ 0.0845 & 0.0845 & 0.0845 & 0.2421 & 0.0782 \\ 0.0845 & 0.0845 & 0.0845 & 0.0782 & 0.2421 \end{bmatrix} \times 10^{-5} \text{ H} \quad (26)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.1155 & -0.0155 & -0.0155 & -0.0103 & -0.0103 \\ -0.0155 & 0.1155 & -0.0155 & -0.0103 & -0.0103 \\ -0.0155 & -0.0155 & 0.1155 & -0.0103 & -0.0103 \\ -0.0103 & -0.0103 & -0.0103 & 0.0665 & -0.0040 \\ -0.0103 & -0.0103 & -0.0103 & -0.0040 & 0.0665 \end{bmatrix} \times 10^{-10} \text{ F} \quad (27)$$

根据式(26)、式(27)线路参数矩阵形成 LC 矩阵, 并按照式(6)—式(19)所示的解耦方法进行解耦, 解耦变换矩阵 S 为

$$S = \begin{bmatrix} 0.7273 & -0.2765 & 1 & 1 & 0 \\ 0.7273 & -0.2765 & 1 & -2 & 0 \\ 0.7273 & -0.2765 & -2 & 1 & 0 \\ 0.6863 & 0.9610 & 0 & 0 & 1 \\ 0.6863 & 0.9610 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

由于线路零模以及避雷线-交流线路之间模量未完全解耦, 其构成的二阶矩阵为非对称矩阵, 必

须采用数值计算方式计算其特征矩阵方能获取解耦矩阵, 所以代入参数计算的变换矩阵与式(19)有一定的误差, 式(29)是计算得到 LC 各个模量参数矩阵。

$$A_{LC} = S_{LC}^{-1} L C S_{LC} = \text{diag}[0.2699 \ 0.1449 \ 0.1146 \ 0.1146 \ 0.1155] \times 10^{-16} \quad (29)$$

为验证 LC 与 CL 两种矩阵构造方式形成的参数矩阵在解耦后所得特征值一致, 本文对 CL 矩阵也进行解耦处理, 所得解耦变换矩阵与 CL 对角化矩阵为

$$S_{CL} = \begin{bmatrix} 0.9182 & -0.5325 & 1 & 1 & 0 \\ 0.9182 & -0.5325 & 1 & -2 & 0 \\ 0.9182 & -0.5325 & -2 & 1 & 0 \\ 0.3962 & 0.8464 & 0 & 0 & 1 \\ 0.3962 & 0.8464 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$A_{CL} = S_{CL}^{-1} L C S_{CL} = \text{diag}[0.2699 \ 0.1449 \ 0.1146 \ 0.1146 \ 0.1155] \times 10^{-16} \quad (31)$$

由此利用式(32)、式(33)可计算出各个模量的波速和衰减系数^[31], 如式(32)、式(33)所示。

$$v_n = \frac{1}{\sqrt{L_n C_n}} \quad (32)$$

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{1}{2} (R_n G_n - \omega^2 L_n C_n + \sqrt{(R_n^2 + \omega^2 L_n^2)(G_n + \omega^2 C_n^2)})} \quad (33)$$

式中: v_n 为第 n 个模量的波速; L_n 和 C_n 为第 n 个模量的电感和电容; α_n 为第 n 个模量的衰减系数; R_n 和 G_n 为第 n 个模量的电阻和电导; ω 为角频率, 考虑到均匀传输线路的电导远小于输电线路其他参数, 实际计算时一般可忽略不计。由式(32)、式(33)可绘制出不同模量波速与衰减特性随频率变化的曲线, 如图6、图7所示。

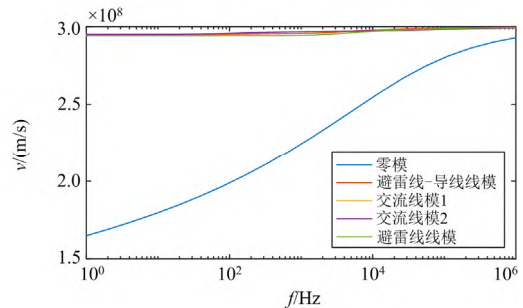


图6 模量波速

Fig. 6 Modulus wave velocity

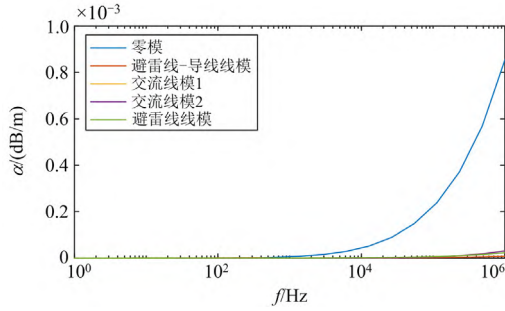


图 7 衰减系数

Fig. 7 Attenuation coefficient

从图 6 和图 7 中可以看出，零模波速在低频段与线模差距巨大，随着频率升高，零模波速逐渐接近线模波速，而衰减系数快速上升，零模中的高频分量经过长距离传播后将非常微弱。交流导线之间线模以及避雷线之间线模的波速极为接近，相差极小，其衰减系数也远小于零模。由于线路材质不同、间距较大等因素影响，避雷线与交流导线之间模量相较于其他线模波速略微偏慢，但在频率超过 10^4 Hz 时，差距极小，波速都接近于 $298 \text{ m}/\mu\text{s}$ 。避雷线之间线模的衰减系数与避雷线和交流导线之间线模的衰减系数较为接近，虽然略大于交流导线之间线模的衰减系数，但是也远远小于零模的衰减系数。

根据上述分析，由于零模高频分量的快速衰减与波速差距，零模波形会极为平缓，在三相交流线路上，线模依然占据主导部分。由于避雷线行波在三相导线上感应产生的行波突变方向相同，为突出行波波头，本文将三相电压相加，虽然该形式与传统的零模求取方式相同，但是所得混合模量也以避雷线与导线之间的模量为主，导致三相相加所得模量为“虚假”的零模，其行波波速与其他线模基本一致，造成“零模提速”现象。因此，本文采用三相交流电压相加构建的“虚假”零模以增加行波波头辨识度。

4.2 基于峭度曲线双端不同步对时故障测距

实际标准信号源对时常会受到变电站周围高山与恶劣微气象影响，对时不精确时有发生，故本文考虑在双端不同步时采用 CVT 所采集的交流线路行波对绝缘避雷线故障进行测距。在此基础上，引入白噪声使信噪比为 40 dB。

以故障点距离 M 端 20 km、N 端 102 km 为例，仿真波形经过 CVT 传变后，在 M、N 端采集的原始故障波形变换后与对应的峭度曲线对比图如图 8、图 9 所示。

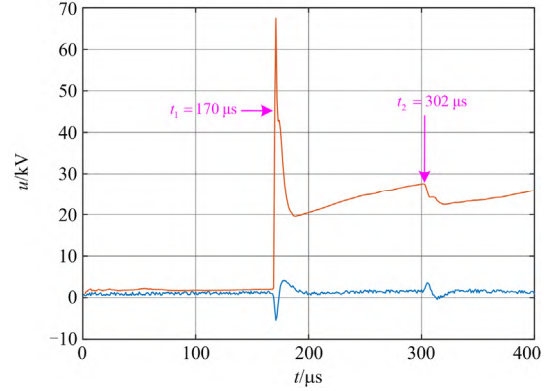


图 8 M 端峭度曲线与故障波形对比图

Fig. 8 Comparison between kurtosis curve and fault waveform at terminal M

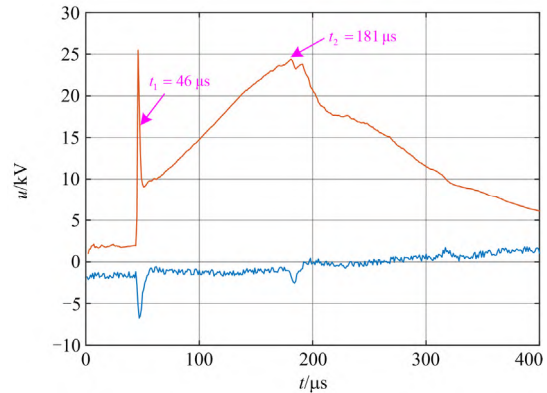


图 9 N 端峭度曲线与故障波形对比图

Fig. 9 Comparison between kurtosis curve and fault waveform at terminal N

为增加行波波头辨识度，根据上述理论，在图 9 和图 10 中所示的 M、N 端变换后的故障波形为故障时三相交流电压相加所构建的“虚假”零模。从图 9 和图 10 中可看出，故障电压行波浪涌引起的波形突变会造成渐进峭度迅速上升，在行波浪涌后，峭度值逐步减小，从而产生局部极大值点。由于初始行波在线路的损耗小，产生的波形突变最为明显，其对应的峭度值为全局最大值。全局最大值后的第一个局部最大值点为第二次行波浪涌。

通过式(23)对图 9 和图 10 中渐进峭度标定的行波浪涌进行极性判别，所得结果如表 2 所示。

表 2 行波极性判别

Table 2 Traveling wave polarity discrimination		
量测点	第一次行波浪涌极性	第二次行波浪涌极性
M 端	+	-
N 端	+	+

根据表 3 所示结果, 故障点靠近 M 侧, 故障距离 M 侧 22.052 km, 与实际故障距离相差仅 52 m。为了进一步验证两端故障电压行波极性特性对故障点近端判断, 通过调整不同的故障距离与过渡电阻, 对绝缘避雷线融冰过程中出现的接地故障进行仿真分析, 所得结果如表 3 所示。

基于测量点第二次行波浪涌与初始行波浪涌极性比较, 可初步判断故障点近端, 再结合对端两次行波浪涌极性, 进一步验证近端故障侧。计算得到的故障距离与实际故障距离误差极小, 如表 3 所示。

表 3 行波浪涌极性 & 测距结果

Table 3 Wave surge polarity and ranging results

故障类型	接地电阻/ Ω	M 端前两个波头极性	N 端前两个波头极性	实际故障距离/km	测距结果/km
单极故障	100	(+,-)	(+,+)	5	5.063
	50	(+,-)	(+,+)	50	50.362
	10	(+,-)	(+,+)	100	99.830
	100	(+,+)	(+,+)	117	117.11
	50	(+,+)	(+,+)	72	71.818
	10	(+,+)	(+,+)	22	22.052
双极故障	100	(+,-)	(+,+)	15	15.198
	50	(+,-)	(+,+)	40	39.932
	10	(+,-)	(+,+)	90	89.698
	100	(+,+)	(+,+)	107	106.680
	50	(+,+)	(+,+)	82	81.950
	10	(+,+)	(+,+)	32	32.184

考虑到避雷线上通常不装设任何的故障录波类装置, 融冰过程中避雷线上发生的故障难以得到有效记录, 更难以进行故障定位。本文针对避雷线融冰过程中线路末端开路 & 避雷线末端短接的特殊接线形式, 分析故障后的行波过程及其特点进行分析, 指出故障初始行波、故障点反射波 & 线路末端反射波 3 种行波浪涌在避雷线 & 导线上的极性存在不同。该方法仅适用于避雷线融冰过程中特殊的线路接线形式, 当对导线进行融冰操作时, 导线末端为短接形式, 其反射系数 & 故障点反射系数同极性, 导致故障点反射波 & 线路末端反射波极性相同, 无法辨识。

5 结论

本文基于避雷线在融冰过程 & 交流线路形成的多导体系统, 推导出一种对非对称相数多导体传输系统进行解耦的相模变换方式, 由此利用交流线

路上 CVT 的传变特性采集避雷线在融冰故障时在交流线路耦合产生的故障行波, 间接对故障点进行定位, 通过仿真验证得出以下结论:

1) 在避雷线对地绝缘情况下, 三相电气量相加所得结果包含避雷线-导线之间的线模分量, 而无法获得纯粹的零模分量。避雷线-导线线模分量的波速 & 衰减系数 & 导线-导线线模相差无几。

2) 在多导体传输系统中, 不同导体末端边界若存在不同, 会导致边界处不同模量的反射出现区别。绝缘避雷线末端接地, 但是其首端所接平波电抗器对高频信号而言接近于开路, 导致其两端反射系数不一致, 故障侧判别提供了理论依据。

3) 渐进峭度能够对波头位置标定, 并降低电磁噪声引起的干扰。

参考文献

- [1] 庄文兵, 祁创, 王建, 等. 基于微气象监测的输电线路覆冰动态过程估计模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 87-94.
ZHUANG Wenbing, QI Chuang, WANG Jian, et al. Dynamic ice process estimation model of transmission line based on micrometeorological monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 87-94.
- [2] 王黎明, 曹露, 梅红伟, 等. 特高压交流同塔双回输电线路严重脱冰跳跃抑制措施仿真研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1475-1482.
WANG Liming, CAO Lu, MEI Hongwei, et al. Simulation research on suppressing measures against severe ice-shedding jump of UHVAC double-circuit transmission lines on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1475-1482.
- [3] 蒋兴良, 侯乐东, 韩兴波, 等. 输电线路导线覆冰扭转特性的数值模拟[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1818-1826.
JIANG Xingliang, HOU Ledong, HAN Xingbo, et al. Numerical simulation of torsion characteristics of transmission line conductor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1818-1826.
- [4] 晏致涛, 李正良. 重冰区输电塔-线体系导线断线分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 92-97.
YAN Zhitao, LI Zhengliang. Analysis of the transmission tower-line system in heavy ice regions subjected to cable rupture[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 92-97.
- [5] 朱大林, 席晓强, 张龙. 覆冰导致连续倒塔事故的原因分析[J]. 华东电力, 2009, 37(4): 626-628.
ZHU Dalin, XI Xiaoliang, ZHANG Long. Causes of

- successive tower collapse due to ice covering[J]. East China Electric Power, 2009, 37(4): 626-628.
- [6] GUO P, DAVID I. Wind turbine blade icing detection with multi-model collaborative monitoring method[J]. Renewable Energy, 2021, 179: 1098-1105.
- [7] 崔建业, 徐嘉龙, 姜文东, 等. 220 kV 架空线路防雷防冰灾地线系统直流融冰电源设计[J]. 高压电器, 2021, 57(12): 209-217.
CUI Jianye, XU Jialong, JIANG Wendong, et al. Design of DC deicing power supply for lightning protection and anti-icing disaster ground wire system of 220 kV overhead line[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 209-217.
- [8] 王云龙, 邵俊人, 陈开智, 等. 基于排列熵的绝缘架空地线直流融冰扰动与故障辨识[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 229-235.
WANG Yunlong, SHAO Junren, CHEN Kaizhi, et al. Identification of faults and disturbance induced by de-icing for overhead transmission line based on the permutation entropy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 229-235.
- [9] 李宽宏, 梁一桥, 毕仁明. 避雷线不停电直流融冰感应电压抑制方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(3): 126-131.
LI Kuanhong, LIANG Yiqiao, BI Renming. Study on induction voltage suppression method when DC de-icing of lightning conductor without power outage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3): 126-131.
- [10] DONG X H, GAO D, LI J, et al. Blades icing identification model of wind turbines based on SCADA data[J]. Renewable Energy, 2020, 162: 575-586.
- [11] 班国邦, 牛唯, 杨旗, 等. 模块化多电平直流融冰装置谐振机理及抑制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 180-187.
BAN Guobang, NIU Wei, YANG Qi, et al. The resonance mechanism and suppression measures of DC ice-melting equipment based on a modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 180-187.
- [12] 张云柯, 李博通, 李斌, 等. 超高压输电线路直流融冰过程中接地故障定位技术[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 105-111.
ZHANG Yunke, LI Botong, LI Bin, et al. Ground-fault location technology for extra-high voltage transmission lines during DC de-icing process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 105-111.
- [13] 李振兴, 吴李群, 谭洪, 等. 基于简单通信的双端行波测距新方法[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 74-79.
LI Zhenxing, WU Liqun, TAN Hong, et al. A novel method for double terminal traveling wave fault location based on simple communication[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 74-79.
- [14] 高淑萍, 徐振曦, 宋国兵, 等. 基于小波阈值去噪和 CEEMD 的混合三端直流输电线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 29-40.
GAO Shuping, XU Zhenxi, SONG Guobing, et al. Fault location of hybrid three-terminal HVDC transmission lines based on wavelet threshold denoising and CEEMD[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 29-40.
- [15] 李泽文, 曾祥君, 徐晓菁, 等. 输电线路双端行波故障定位新算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 40-43.
LI Zewen, ZENG Xiangjun, XU Xiaojing, et al. New fault location algorithm based on double terminal traveling waves for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 40-43.
- [16] XU F, DONG X Z, WANG B, et al. Self-adapted single-ended travelling wave fault location algorithm considering transfer characteristics of the secondary circuit[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(14): 1913-1921.
- [17] 穆卡, 王丰华, 刘亚东. 基于参数识别的非对称故障双端不同步测距方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3763-3768.
MU Ka, WANG Fenghua, LIU Yadong. Asynchronous two-terminal fault location method for unbalanced fault based on parameter identification[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3763-3768.
- [18] 陶彩霞, 杜雪, 高锋阳, 等. 基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 105-112.
TAO Caixia, DU Xue, GAO Fengyang, et al. Single-phase to ground fault location of hybrid transmission lines based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 105-112.
- [19] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲, 等. 利用波前广义 Logistic 函数拟合的直流输电线路快速保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3168-3176.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou, et al. Principle of high speed protection for DC transmission line using wave front generalized Logistic function fitting[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3168-3176.
- [20] 王永进, 樊艳芳, 唐勇, 等. 考虑强非线性和波速变化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, 2020, 48(5): 17-25.
- WANG Yongjin, FAN Yanfang, TANG Yong, et al. Fault location method for UHVDC transmission lines considering strong nonlinearity and wave velocity variation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 17-25.
- [21] 梁睿, 王全金, 孔令昌, 等. 考虑行波波速衰减及波头时间误差的复杂输电网故障精准定位[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4512-4524.
- LIANG Rui, WANG Quanjin, KONG Lingchang, et al. Precise location of complex power grid faults considering velocity attenuation and time error of traveling waves[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4512-4524.
- [22] 邓丰, 祖亚瑞, 黄懿菲, 等. 基于行波全波形主频分量的单端定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2156-2168.
- DENG Feng, ZU Yarui, HUANG Yifei, et al. Research on single-ended fault location method based on the dominant frequency component of traveling wave full-waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2156-2168.
- [23] 杨欢红, 朱子叶, 黄文焘, 等. 基于直接时间反转法的直流配电网故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 66-75.
- YANG Huanhong, ZHU Ziye, HUANG Wentao, et al. Fault location of a DC distribution network based on a direct time reversal method [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 66-75.
- [24] 张希鹏, 邵能灵, 郑晓冬, 等. EMTR 理论在电力系统线路故障测距中的应用基础 I: 理论部分[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 845-854.
- ZHANG Xipeng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Application basis of EMTR theory for line fault location in power system I: theoretical part[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 845-854.
- [25] 李海锋, 郭履星, 王钢, 等. 局部同塔双回直流线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 51-60.
- LI Haifeng, GUO Lüxing, WANG Gang, et al. Propagation characteristics of fault travelling wave on double-circuit HVDC transmission lines partially on the same tower and its effect on travelling wave protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 51-60.
- [26] 郑涛, 于溯, 吴建云, 等. 基于波形相关性的混压同塔四回线故障选相新方案[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 138-143, 149.
- ZHENG Tao, YU Su, WU Jianyun, et al. Novel scheme of fault phase selection for mixed-voltage four-circuit lines on same tower based on waveform correlation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 138-143, 149.
- [27] 于仲安, 丁雯苏, 陈璐, 等. 不对称参数同塔四回线行波测距[J]. 电测与仪表, 2022, 59(2): 77-83, 91.
- YU Zhongan, DING Wensu, CHEN Lu, et al. Traveling wave fault location for four-parallel transmission lines on the same tower with asymmetric parameters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2): 77-83, 91.
- [28] 王志华. 超高压线路故障行波定位及高压变频技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- WANG Zhihua. Study on traveling-wave based fault location for extra high voltage transmission lines and research on medium-voltage inverter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [29] BENWSTY J, CHEN J, HUANG Y, et al. Pearson correlation coefficient[M]. Heidelberg, Berlin: Noise Reduction in Speech Processing, Springer, 2009.
- [30] 刘鸣洲. 微弱机械冲击信号的检测与提取方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- LIU Mingzhou. Research on the detection and extraction of weak mechanical impact signal[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [31] 束洪春, 曹璞璘, 董俊. 考虑线路参数依频特性的特高压半波长交流输电线路行波传播分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 716-723.
- SHU Hongchun, CAO Pulin, DONG Jun. Analysis of traveling wave in UHV half-wavelength transmission lines considering frequency dependent characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 716-723.

收稿日期: 2022-08-21; 修回日期: 2023-02-13

作者简介:

曹璞璘(1986—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: pulincao_kust@sina.com

黄美琴(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 2276240512@qq.com

杨博(1988—), 男, 通信作者, 教授, 研究方向为电力系统优化控制。E-mail: yangbo_ac@outlook.com

(编辑 姜新丽)