

基于暂态行波特性的电缆-架空线混合线路区段定位方法

罗伟,董静,郭忠诚,周光尧

(济南轨道交通集团有限公司,山东 济南 250000)

摘要:提出基于暂态行波综合特征分析的电缆-架空线混合线路区段定位方法。对混合线路故障后暂态行波传播过程进行了分析,当故障发生在混合线路不同区段时,暂态行波在各阻抗不连续点折反射产生的故障点、连接头一次、二次反射波在幅值、极性上存在差异。通过对电压、电流反射波特征的对比,可以识别故障点位于架空线段或电缆段,用于辅助线路重合闸投切决策,通过EMTDC仿真验证了该方法的有效性。

关键词:混合线路;故障定位;暂态行波;仿真验证

中图分类号:TP183;TM774 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)03-0043-05

Section Location Method for Mixed Lines of Hybrid-Overhead Line Based on Transient Traveling Wave Analysis

LUO Wei, DONG Jing, GUO Zhong-cheng, ZHOU Guang-yao

(Jinan Rail Transit Group, Jinan 250000 China)

Abstract: This paper presents a faulty-section location method of hybrid line combined with overhead lines and cables, which is based on transient traveling wave process analysis. The traveling wave propagation process is analyzed after failure. When fault occurs in hybrid line, transient traveling wave reflects and refracted when traveling wave arrive point that characteristic impedance is discontinuous. When fault point locates on different section in hybrid line, there are differences in the amplitude and polarity between primary and the secondary reflected wave from cable terminal and reflected wave from fault point. By comparing the characteristics of the voltage and current traveling waves, the fault section can be identified, which can be used to aid decision-making for reclosing switching. The validity of the methods is proved by the EMTDC simulation.

Keywords: hybrid line; fault location; transient traveling waves; simulation validity

0 引言

电缆-架空线混合线路在国内电网应用日益广泛,但也对继电保护及重合闸配置提出了新要求。由于电缆故障多为永久性故障,重合闸的投入会导致二次冲击,为保证电缆安全,一些电缆比例较高的混合线路重合闸未投入,瞬时性故障就会造成长时间停电^[1-2]。从提高供电可靠性及安全性角度考虑,混合线路重合闸应具备故障区段定位功能,在故障点位于架空线段时投入重合闸,电缆段故障则闭锁重合闸^[3-5]。

近年来,国内外部分单位在混合线路区段定位领域开展了许多研究工作,AREVA公司提出基于距离元件设置两段保护^[6],通过阻抗配合来识别故障区段;ABB公司提出在电缆-架空线路连接头加装电流互感器及光纤电流差动保护,根据差动保护判断故障区段^[7-9]。目前,一些研究单位提出根据故障点的位置定位确定混合线路的故

障区段^[10]。有学者提出了通过双端行波测距判断故障点位置实现区段定位的方法;有学者提出了引入工频量信息,与行波定位方法配合,通过阻抗法、频域法或与神经网络结合完成区段定位的方法^[11-12]。

现有方法主要存在以下不足:(1)对于数量众多的中低电压等级混合线路,受成本,施工条件限制,需要双端数据或增加互感器的区段定位方法基本不具备现场实施条件;并且需要两端通讯配合也使其难以满足重合闸配合时间要求。(2)无论是基于单端行波法、双端行波法、距离元件或工频量比较的定位方法都存在误差,对于架空线-电缆终端接头(简称为连接头)附近故障判断困难,而连接头是混合线路故障率最高的位置^[13]。为此本文提出基于暂态行波特性的电缆-架空线混合线路区段定位方法,利用暂态电压、电流行波的故障点反射波、连接头一次、二次反射波的时域特征差异识别判断故障区段。从工程角度看,基于单端量的混合线路区段定位较容易满足快速性要求,更具备工程可行性。

*基金项目:济南轨道交通集团资助项目(HX2020-B32)

收稿日期:2023-05-19

1 混合线路暂态波过程分析

目前,在国内电力系统及轨道交通电网中电缆-架空线混合线路最普遍的情况是电缆位于变电站出口段,之后为架空线路,因此,本文重点分析电缆位于混合线路前段的情况,电缆位于线路中段波过程分析及识别方法与之类似。

当故障点位于电缆段时,暂态行波的传播及折反射过程如图1所示。故障后初始行波向两侧传播,初始行波到达连接头后发生反射,本文中该反射波称之为连接头一次反射波(简称为连接头反射波);初始故障行波到达母线端发生反射,反射波返回故障点再次反射,即故障点反射波;母线反射波通过故障点折射,到达连接头再次反射,称之为连接头二次反射波。

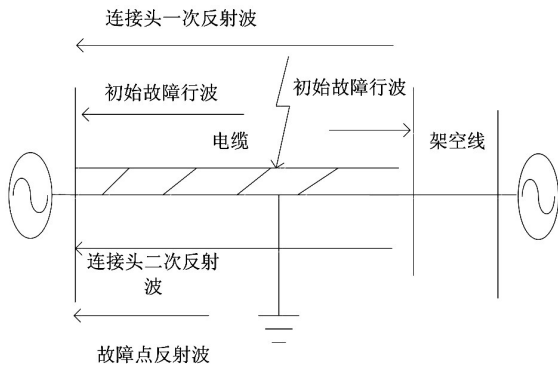


图1 故障点位于电缆段波过程

当故障点位于架空线段时,暂态行波过程如图2所示。故障后初始行波向两侧传播,当初始故障行波到达连接头后发生反射,反射波返回故障点再次反射,称之为故障点-连接头反射波;由于故障点位于架空线段,因此,不存在连接头一次反射波;而初始故障行波到达母线端反射后,再次回到连接头发生二次反射,即连接头二次反射波。

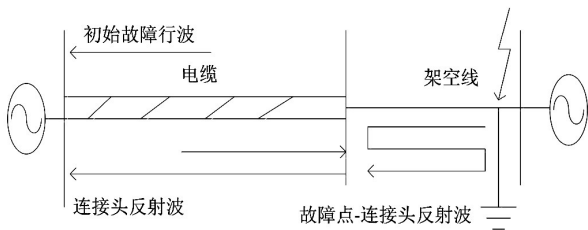


图2 故障点位于架空线段波过程

当故障点位于电缆-架空线连接头时,暂态行波过程如图3所示。故障后初始故障行波到达母线后反射回连接头,此时,在定时窗(假定电缆长度为 L_1 ,电缆波速为 v_1 ,定时窗则为 $2 \times L_1/v_1$)内只存在一种反射波即故障点反射波(也可认为连接头反射波)。

当混合线路区段定位只用于辅助重合闸判断时,理论上并不需要精确故障点位置,只需判断在电缆段或连

接头是否存在故障点即可。如前所述,当故障点位于混合线路不同区段时,故障后定时窗内能够识别的反射波类型以及特征是存在差异的,可基于上述特征完成混合线路故障区段定位。

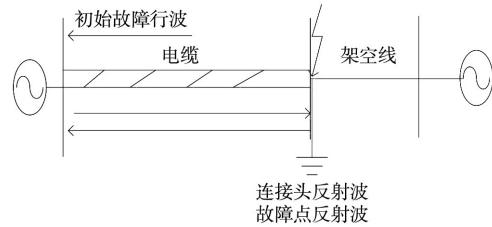


图3 故障点位于连接头波过程

2 反射波特征分析

2.1 故障点位于电缆段时暂态行波特征

当行波到达阻抗不连续点时,暂态电压、电流行波会发生折反射。架空线路的特征阻抗 Z_{c1} 一般认为在 $250 \Omega \sim 400 \Omega$,电缆特征阻抗 Z_{c2} 在 $50 \Omega \sim 100 \Omega$ 之间。假设故障点过渡电阻为 R_g ,各阻抗不连续点的折反射系数如下。

(1) 电缆-架空线连接头反射系数:

$$\beta_{i2} = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c2}} \quad (1)$$

(2) 故障点反射系数:

$$\beta_{i1} = \frac{Z_{c2} - Z_{c2} // R_g}{Z_{c2} + Z_{c2} // R_g} \quad (2)$$

(3) 母线端反射系数:

$$\beta_{i0} \approx 1/(n-1) \quad (3)$$

(4) 故障点折射系数:

$$\alpha_{i1} = \frac{2Z_{c2} // R_g}{Z_{c2} + Z_{c2} // R_g} \quad (4)$$

式中, $Z_{c2} // R_g$ 代表过渡电阻与电缆的并联阻抗, n 为同母线分支线路数。电压与电流行波的反射系数极性相反,折射系数极性相同,用于故障识别原理类似。下文分析中主要采用电流行波,假设初始故障电流行波为 i_f ,则母线端测量到的初始行波为:

$$i_{f0} = (1 - \beta_{i0}) i_f e^{-\gamma l} \quad (5)$$

故障点反射波 i_{f1} 为:

$$i_{f1} = \beta_{i0} \beta_{i1} (1 - \beta_{i0}) i_f e^{-2\gamma l} \quad (6)$$

式中, $e^{-\gamma l}$ 为经过 l 距离后线路衰减, γ 为衰减系数。当信号频率低于 5 MHz 时,信号在电缆传输过程衰减基本都在 0.005 dB/m 以下,因此,当电缆长度较短时,影响反射波幅值的最主要因素是反射系数。假设忽略信号在传输过程中的衰减,以初始行波为基准值,求故障点反射波与初始行波相对值,即幅值归一化后:

$$i_{yf0} = \beta_{i0} \beta_{i1} \quad (7)$$

而连接头反射波相对值为:

$$i_{xf2} = \alpha_{i1} \beta_{i2} \quad (8)$$

而连接头二次反射波相对值为:

$$i'_{xf2} = \alpha_{i1} \alpha_{i1} \beta_{i0} \beta_{i2} \quad (9)$$

由式(7)~式(9)可知,混合线路故障后,故障点反射波、连接头一次反射波均为正极性;由于电缆特征阻抗小于架空线特征阻抗,因此,连接头二次反射波为负极性。

2.2 故障点位于架空线段时暂态行波特征

故障点位于架空线段时,与故障点位于电缆段相比较,增加了故障点-连接头反射波,不存在连接头一次反射波。与2.1节分析类似,故障点-连接头反射波幅值为:

$$i_{xf1} = \alpha_{i1} \beta_{i2} \beta_{i1} \quad (10)$$

此时,连接头二次反射波幅值为:

$$i'_{xf2} = \beta_{i0} \beta_{i1} \quad (11)$$

由式(11)可知,当故障点位于架空线段时,连接头二次反射波幅值与过渡电阻等无关,只与连接头、母线反射系数及电缆长度相关,其幅值基本为常数。

2.3 故障点位于连接头时暂态行波特征

故障点位于电缆-架空线终端连接头时,在定时窗内,故障点电压/电流反射波幅值为:

$$i_{xf0} = \beta_{i0} \beta_{i1} \quad (12)$$

但此时,故障点或连接头的反射系数变为:

$$\beta_{i1} = \frac{Z_{c2} - Z_{c1} // R_g}{Z_{c2} + Z_{c1} // R_g} \quad (13)$$

式中, $Z_{c1} // R_g$ 代表架空线与过渡电阻并联阻抗,当 $Z_{c1} // R_g$ 小于电缆特征阻抗时,故障点/连接头反射波均为负极性,当 $Z_{c1} // R_g$ 大于电缆特征阻抗时,故障点/连接头反射波则变为正极性。以典型电缆特征阻抗 70Ω ,架空线阻抗 250Ω 计,过渡电阻 R_g 需大于 90Ω ,连接头反射波才会变为正极性。考虑到多数情况下,连接头金属性故障概率较高,因此,多数情况下与故障点位于电缆/架空线段相比,故障点反射波幅值上会明显降低。

2.4 不同类型反射波特性及区段定位原理

表1 故障点位于不同区段时反射波特征

故障区段	反射波类型	时间差	幅值
架空线	连接头二次反射波	T	$\beta_0 \beta_1$
	故障点-连接头反射波	--	--
	连接头二次反射波	T	$\alpha \alpha \beta_0 \beta_1$
电缆	故障点反射波	$<T$	$1-\alpha$
	连接头反射波	$<T$	$\alpha \beta_1$
连接头	连接头二次反射波	T	$\beta_0 \beta_1$
	故障点反射波	--	--

备注:时间差代表反射波与初始波头时间差。

当故障点位于混合线路不同区段时,各类型反射波特征如表1所示。表1中 β_0 代表母线反射系数, β_1 为连接

头反射系数, α 为故障点折射系数。 β_0, β_1 为定值; α 与过渡电阻 R_g 相关, β_1 与 R_g 相关; 当过渡电阻 $0 \leq R_g \leq 300 \Omega$ 时, $0 \leq \alpha \leq 0.89$ 。

由表1可知,连接头二次反射波幅值主要由电缆及架空线的特征阻抗决定,令该值为 δ , 其基准值如下:

$$\delta \approx (Z_{c1} - Z_{c2}) / (Z_{c1} + Z_{c2}) \quad (14)$$

无论故障点位置如何,连接头二次反射波与初始波头时间差均是固定的。当故障点位于电缆段或连接头处,共同特征是:负极性的连接头二次反射波幅值显著降低;故障点位于架空线时,负极性的连接头二次反射波幅值则趋近于基准值。因此,根据连接头二次反射波幅值可实现故障区段的判断。在反射波识别方面,连接头二次反射波具有2个特点:(1)负极性;(2)与初始行波时间差是固定的,识别难度相对降低。

3 仿真分析

3.1 仿真模型

本文采用 EMTDC/PSCAD 建立暂态仿真模型如图4所示,按照安徽淮南供电公司的220 kV洛河变电站电气接线配置,出线电压等级35 kV,电缆为35 kV单芯电缆,系统中性点经消弧线圈接地,架空线及电缆采用 EMTDC 提供的频率相关模型(Phase模型),电缆段长度为1300 m,架空线总长度13.1 km,暂态行波波速在架空线段约为290~298 m/us,电缆段约为150~165 m/us,采集线路侧电压、电流,仿真中信号采样率为10 MHz。

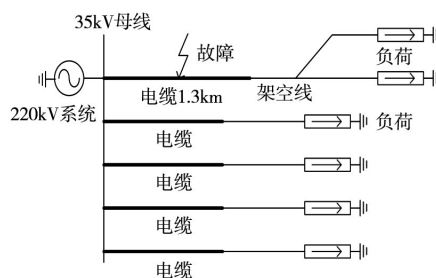


图4 EMTDC仿真系统模型

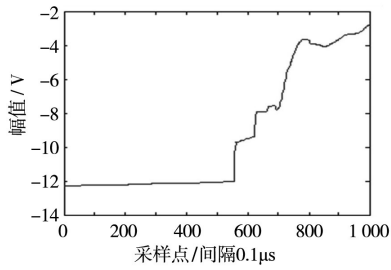
3.2 典型故障条件下的仿真实验

3.2.1 故障点位于电缆段

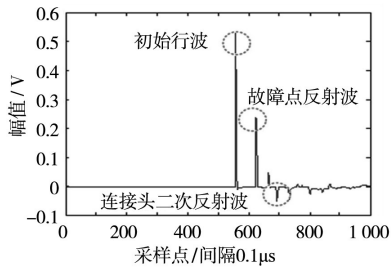
当故障点位于电缆段,距离电缆-架空线接头0.5 km时,暂态电压、电流波形以及小波变换细节系数如图5所示。设初始时刻为 t_0 ,故障点反射波时刻为 t_{f1} ,连接头反射波时刻为 t_{f2} ,连接头二次反射波时刻为 t'_{f2} 。当故障点位于电缆段时,呈现以下特征:

(1) 故障点、连接头反射波均为正极性,在时域上呈现强相关性,满足约束条件: $(t_{f1} - t_0) \times v + (t_{f2} - t_0) \times v \approx L$ 。

(2) 连接头二次反射波为负极性,但由于经过多次折射显著降低,相对值仅为-0.127。



(a) 故障行波波形

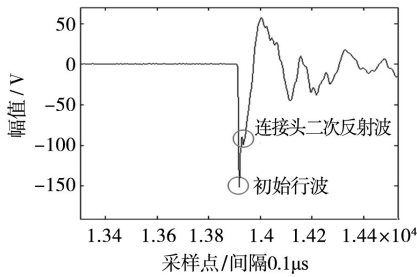


(b) 小波变换系数

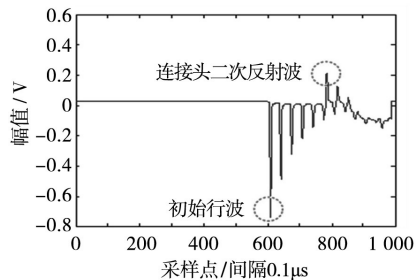
图5 故障点位于电缆段时仿真波形

从识别上看,假定初始行波时刻为 t , $t+T$ 时刻出现了负极性的连接头二次反射波。在 $t\sim t+T$ 时刻之间出现了一组满足 $(t_{11}-t_0)\times v+(t_{12}-t_0)\times v\approx L$ 的反射波头,表明故障点位于电缆段。

3.2.2 故障点位于架空线段



(a) 故障行波波形



(b) 小波变换系数

图6 故障点位于架空线段时仿真波形

(1) 当故障点位于架空线段,距离电缆-架空线接头0.5 km时,仿真波形如图6所示。呈现以下特征:1)连接头-故障点反射波均为正极性,由于连接头与故障点距离较近,呈现多次折反射过程,但产生的反射波均为正极性;2)连接头二次反射波为负极性,其与初始行波的时间差与电缆长度严格吻合 $(t'_{12}-t_0)\times v=L$,与故障点位于电

缆段相比,由于不存在故障点折射,幅值相对较高。连接头二次反射波的幅值以及极性与故障点位置或过渡电阻无关,基本为定值,与前文分析一致。

表2 故障点位于架空线段时反射波

波头时刻	相对值	波头性质	时间差
614	1	初始波头	—
617	0.472 9	连接头反射	13
776	0.075 3	故障点反射	162
790	-0.279	连接头二次反射	176

在本文仿真中, $Z_{c1}\approx 72\ \Omega$, $Z_{c2}\approx 250\ \Omega$, δ 上限值为0.552。考虑到电缆传输衰减,入射/反射波叠加等因素的影响,实际定值应略小于该定值。

3.2.3 故障点位于电缆-架空线连接头

当故障点位于电缆-架空线接头(连接头)时,仿真波形如图7所示,当故障点位于电缆-架空线接头位置时,仅有负极性连接头二次反射波,时轴位置与电缆长度严格吻合 $(t'_{12}-t_0)\times v=L$ 。与故障点位于架空线相比较,由于连接头本身为接地点或短路点,反射端等效阻抗 $Z_2//R_g<Z_2$,因此,连接头二次反射波仅有-0.111 9,的幅值显著降低。

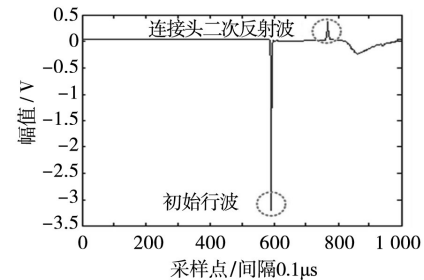


图7 故障点位于电缆-架空线连接头时仿真波形

当故障点位于连接头时,过渡电阻对连接头二次反射影响较大,过渡电阻越小,连接头二次反射波相对降低。随着过渡电阻增大,连接头二次反射波幅值也相对增大,不同过渡电阻情况下,仿真数据如表3所示,当过渡电阻达到500 Ω ,连接头二次反射波幅值与故障点位于架空线段时幅值较为接近,因此,在此情况下宜参考暂态量绝对值辅助识别。

表3 不同电阻情况下连接头反射波幅值

过渡电阻/ Ω	反射波相对值
1	-0.111 9
100	-0.129 8
300	-0.250 3
500	-0.259 8

4 算法流程及影响因素分析

4.1 混合线路路段定位步骤

基于本文所述原理的混合线路路段定位方法步骤包括:

- (1) 相模变换,定位初始波头时刻;

(2) 提取初始波头后的定时窗数据,并在定时窗内搜索各类型反射波;

(3) 反射波识别,根据极性以及时域位置判断故障点、连接头一次、二次反射波,并根据反射波幅值判断故障区段。

需要指出的是,在完成故障区段的基础上,利用故障点反射波、连接头反射波可以完成进一步精确的故障点定位。

4.2 主要影响因素

不同类型反射波识别是方法的基础,与输电线路单端故障定位类似,影响反射波识别的因素有:

(1) 当特征阻抗不连续点相距较近时,不同类型暂态行波的混叠影响反射波的幅值以及波峰时刻;

(2) 当故障点位于电缆段时,在高阻或纯金属故障情况下,由于故障点折射会降低反射波幅值。

暂态行波混叠对反射波识别的影响程度与波形相关,如图8所示。

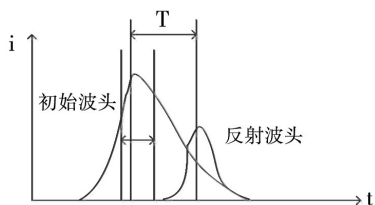


图8 不同类型暂态行波混叠

当初始波头和反射波时间差 T 较小,而反射波的波峰时长 $(t_0 - t_1)$ 较长时,就存在初始波与反射波混叠。初始波头与反射波时间差与故障点位置相关,而波峰时长与故障原因及线路电感等参数相关,当故障为金属性故障或雷击故障时,波峰时长一般在 $2 \mu\text{s}$ 以内。在 EMTDC 仿真中,在电缆段故障点与连接头间隔 100 m 以上时波形混叠对反射波识别影响较小。此外,较高的装置采样频率也有助于降低信号混叠的影响。对于本文所述方法,以下两种情况的行波混叠影响相对较大。

(1) 故障点靠近变电站母线端,初始波头与故障点反射波的混叠。当故障点距离变电站母线为 50 m 时,由于故障点与变电站距离较近,存在初始波头与故障点反射波的混叠改变了电流、电压反射波幅值,对距离相对较远的连接头一次、二次反射波影响则相对较小,仍然可以从连接头二次反射波幅值变化判断出故障区段。

(2) 当故障点靠近电缆-架空线接头位置时,分为两种:故障点靠电缆侧和故障点靠架空线侧,当故障点靠电缆侧 100 m 和故障点靠架空线侧 250 m 时,当故障点靠近电缆侧时,存在连接头反射波与连接头二次反射波叠加,由于连接头反射波与二次反射波极性相反,降低了二次反射波幅值。当故障点靠近架空线侧,存在故障点-连接头来回折反射信号叠加,增强了连接头二次电流反射波幅值,但也降低了连接头二次电压反射波幅值,可以从

连接头二次反射波幅值变化判断出故障区段。

5 结束语

对电缆-架空线混合线路故障后暂态行波过程进行分析,分析结果表明当故障点位于电缆段、架空线段或电缆-架空线接头处,故障点反射波、连接头一次、二次反射波在幅值、极性以及与初始行波时间差等特征上存在差异,可以作为区段定位的基础。提出了一种基于暂态行波综合特征识别的混合线路区段定位方法,与传统方法相比较,该方法无须定位故障点位置,通过判别是否存在电缆-架空线接头(连接头)一次反射波或二次反射波幅值是否越限实现故障区段定位。相对于现有混合线路区段定位,本文所述方法基于单端电气量无需两端数据支持,且仅需要故障初始时刻后较短数据即可完成区间定位,算法逻辑较为简单,在快速性上容易满足与重合闸配合时间要求。本文通过仿真验证所提方法的有效性。

参考文献:

- [1] 陈新岗,朱莹月,马志鹏,等.考虑瞬时功率特性的直流配电网线路故障定位及保护[J].重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(1):179-186.
- [2] 曹俊平,黄勃,王成珠,等.基于小波变换的高压电缆混合线路故障定位方法及验证试验[J].浙江电力,2021,40(2):14-19.
- [3] 覃思明,李焱.架空线-电缆-架空线混合线路故障定位方法研究[J].广西电力,2019,42(4):24-28.
- [4] 方毅,李本瑜,石恒初,等.基于改进双端测距原理的带变压器线缆混合线路故障定位方法[J].自动化技术与应用,2019,38(7):105-110.
- [5] 简学军,傅兴强,王秋影.多端高压架空线和电缆混合线路故障定位及诊断系统的设计[J].电子设计工程,2019,27(14):30-34.
- [6] 张科,朱永利,郑艳艳,刘帅.基于冗余度参数估计的多分支混合线路故障定位方法[J].电网技术,2019,43(3):1034-1040.
- [7] 汪磊,刘辉,邱诗怡,等.基于罗氏线圈的VSC-HVDC系统的混合线路故障定位[J].电测与仪表,2018,55(21):125-131.
- [8] 许文杰,蒋道宇,王剑英,等.利用暂态行波的架空线-海底电缆混合线路故障定位方法[J].山东电力技术,2016,43(12):15-19.
- [9] 杨东海,许艳华,方正,等.基于分布参数模型的混合输电线路精确测距及重合闸方案的研究[J].电测与仪表,2023,60(3):136-144.
- [10] 程远,简学军,马圣明.基于行波原理的架空线与电缆混合线路准确故障定位技术研究[J].电工技术,2018(16):3-9.
- [11] 李舟,乔文,谈震,等.基于行波特征频率的配电网混合线路故障定位方法[J].电网与清洁能源,2021,37(5):11-16.
- [12] 杨耿杰,许晔,高伟,等.基于能量谱相似度自适应聚类的配电网接地故障区段定位方法[J].电力自动化设备,2021,41(3):25-32.
- [13] 蒲涛,许欣,曾举鹏.基于行波时差的多段混合线路故障定位方法[J].电学学报,2022,37(4):302-308.
- [14] 李舟,乔文,谈震,褚子平,等.基于行波特征频率的配电网混合线路故障定位方法[J].电网与清洁能源,2021,37(5):33-42,51.

作者简介:罗伟(1981-),男,本科,工程师,研究方向:工程管理。