

# 基于零序电流长时变化特征的中压导线碰树接地故障识别方法

王鹏玮<sup>1</sup>, 徐丙垠<sup>1,2</sup>, 梁 栋<sup>1</sup>, 王连辉<sup>3</sup>, 王 超<sup>2</sup>, 邹国锋<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东省淄博市 255000;

2. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东省淄博市 255087; 3. 国家电网福建省电力有限公司, 福建省福州市 350001)

**摘要:** 判别中压配电线路故障是否由导线碰触树木引起,对于厘清森林火灾的成因、防治线路故障引发的森林火灾具有重要意义。文中通过真型试验获取了各类高阻接地故障的零序电流,分析了高阻接地故障零序电流波形长时间尺度的变化特征。分析可知,导线碰树接地故障的零序电流有效值波形的波动性、单调性以及尖锐程度与其他高阻接地故障存在明显差异。设计了包含零序电流有效值曲线的标准差、离散系数、峭度、偏度在内的多特征融合参数组,构建了基于支持向量机的中压配电网导线碰树接地故障识别方法。结果表明,所提方法故障识别正确率达到了98%。

**关键词:** 配电线路; 故障识别; 高阻接地故障; 碰树接地故障; 零序电流; 支持向量机

## 0 引言

穿越山林的中压架空配电线路极易发生导线碰树故障,该类故障具有过渡电阻大、明火出现概率高等特点引发森林火灾风险高,对人民群众生命财产安全威胁大<sup>[1-2]</sup>。2009年澳大利亚维多利亚州发生的“黑色星期六”特大森林火灾<sup>[3]</sup>以及2018年美国加州森林火灾等<sup>[4]</sup>,均由导线碰树故障引起<sup>[5]</sup>。美国南加州爱迪生公司(SCE)的2019年年度报告显示<sup>[6]</sup>,2015—2017年所收到的302项电气火灾报告中,92%的电气火灾发生在中压配电系统,导线碰触树木引发的火灾占全部电气火灾的17%。目前,中国中压配电线路逐步开展架空线路绝缘化改造,但仍有一部分穿越林区的架空配电线路为裸导线。同时,线路绝缘化初期防范导线碰树故障的能力虽然较强,但也会带来线路敷设要求降低、导线与树木接触频繁的问题;随着树木生长、极端天气频发等,与树木接触的绝缘层会不可避免地逐渐破损,发生导线碰树故障的概率日益升高。因此,研究中压配电网导线碰树故障识别技术,对于尽快降低导线碰树故障引发森林火灾的风险、溯源森林火灾成因、确定导线碰树故障高风险线路以及有针对性地采取线路检修措施,具有十分重要的意义。

森林火灾期间可能发生的线路故障包含导线碰树故障以及森林火灾引发的相间或接地故障等。目

前,针对故障检测与保护方法的研究已经趋于完善,实际工程中常用的接地故障保护方法耐过渡电阻能力可达 $5\text{ k}\Omega$ <sup>[7-8]</sup>,而对于导线碰树故障识别方法的研究较少。根据过渡电阻的大小,中压配电线路的接地故障可分为低阻接地故障与高阻接地故障两种<sup>[9-10]</sup>。导线碰树故障属于高阻接地故障,其初始过渡电阻可达数千甚至数百千欧姆,随着故障不断发展,过渡电阻呈波动变化状态;树木剧烈起火后,过渡电阻降低至数百欧姆<sup>[11]</sup>。此外,高阻接地故障还有导线坠落(接触)于水泥等非金属介质的接地故障,以及水泥杆塔上的绝缘子击穿故障等<sup>[12]</sup>,这两类故障实质上均为导线接触非金属介质后对大地放电的故障,下文统称为其他高阻接地故障。对于导线碰树故障的识别,首先根据故障电流的幅值大小来判断是低阻还是高阻接地故障<sup>[13-14]</sup>,然后再利用零序电气量的特征差异来实现导线碰树故障与其他高阻接地故障的区分<sup>[11,15-20]</sup>。文献[11]提出将零序电流有效值的越限持续时间作为识别导线碰树故障的判据,该方法的越限阈值难以整定,健全线路有误判的风险。文献[15-17]对不同种类的树木进行通电试验,利用故障在零序电压<sup>[15-16]</sup>或零序电流<sup>[17]</sup>中引入的高频噪声,结合机器学习等方式来识别此次故障是否为导线碰树故障。导线碰树故障零序电压、电流幅值低,该类利用高频噪声特征的识别方法难以确保灵敏度与可靠性,对采样频率要求较高( $\geq 1\text{ MHz}$ ),实现难度较大。文献[18-19]进行了导线碰树与坠地故障试验,通过经验模态分解等方式获取了零序电气量的谐波含量及占比,利用人工神经

收稿日期: 2024-03-15; 修回日期: 2024-07-16。

上网日期: 2024-10-28。

国家电网公司总部科技项目(5500-202221138A-1-1-ZN)。

网络<sup>[18]</sup>或粗糙集<sup>[19]</sup>等方法来实现故障类型的识别。该类利用谐波变化特征的方法,未利用导线碰树故障与其他高阻接地故障在故障特征上的根本性差异,同时其可靠性有待探究。

本文基于大量高阻接地故障真型试验数据,归纳总结出了长时间尺度下导线碰树故障零序电流有效值曲线独有的波形形态学特征,构建了包含标准差、离散系数、峭度以及偏度在内,用于量化波形形态学差异的特征参数,提出了一种基于支持向量机的导线碰树故障识别方法,能够准确地将导线碰树故障与其他高阻接地故障进行区分。

## 1 中压导线碰树故障特征试验研究

### 1.1 高阻接地故障试验系统

导线碰树故障包含电-热-磁的多物理参数耦合过程,现场多以树种、温度、风速、湿度等可测物理参数进行描述,这些物理参数与故障特征之间存在较为复杂的映射关系,目前未见可精确描述故障全过程的数学模型。现有的数学模型仅能近似模拟故障初始阶段,零序电流幅值随故障持续时间增加而缓慢上升的过程<sup>[1,11]</sup>。对于其他高阻接地故障,现有研究将其等效为过渡电阻不随时间变化的弧光高阻接地故障<sup>[7,20]</sup>,所建立的数学模型仅适用于分析故障电弧引入的波形畸变与非线性等短时特征,无法获取长时间尺度下故障电气量的变化特征。由于目前的保护装置检测能力有限、录波时间较短(最长仅为数百毫秒),难以获取完整的导线碰树故障数据。因此,有必要通过真型试验来直接观察导线碰树故障与其他高阻接地故障的零序电气量差异,为制定合理的导线碰树故障识别方法奠定基础。

试验系统为电容电流为10 A的10 kV中性点不接地系统,附录A图A1给出真型试验系统示意图。采用 $\pi$ 型集中参数来等效实际线路。实际工程中,常用于表征接地故障并能直接测量到的电气量为零序电压与零序电流<sup>[21]</sup>。试验过程中使用零序电流互感器采集零序电流数据,使用三相五柱电压互感器采集电压数据,以10 kHz采样频率的AD7606采集卡连续采集并记录数据。测试结果表明,当一次电流大于500 mA时,所用零序电流互感器的角度测量误差小于 $1.7^\circ$ ,幅值误差小于 $2.4\%$ <sup>[22]</sup>;当一次电压大于额定值的 $10\%$ (1 kV)时,所用电压互感器对于零序电压的角度测量误差小于 $4.3^\circ$ ,幅值误差小于 $0.6\%$ 。

### 1.2 高阻接地故障试验过程

导线碰树故障的试验过程中,导线与树木的接触情况包括导线搭接树干、一级树枝以及二级树枝

3种情况,附录A图A2给出导线搭接树木不同位置的示意图。

试验过程中,通过试验现象确定故障发展各个阶段的范围与分界点。导线碰树试验结束的标志为树干体燃烧到根部、树枝烧断或故障电流有效值大于电流越限保护定值(5 A)。其他高阻接地故障试验结束的标志为故障点闪络现象消失或故障电流有效值大于电流越限保护定值(5 A)。

### 1.3 高阻接地故障试验结果

以导线搭接国槐树干故障为例,使用离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)获取零序电气量工频有效值,其零序电气量波形图如图1所示。图中: $3U_0$ 、 $3U_{0rms}$ 分别为零序电压及其有效值; $3I_0$ 、 $3I_{0rms}$ 分别为零序电流及其有效值。附录A图A3为导线搭接国槐树干故障零序电气量波形图。

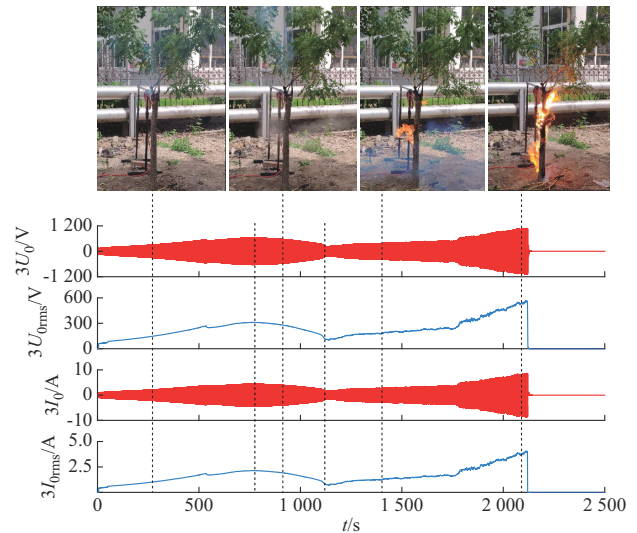


图1 导线搭接国槐树干故障零序电气量波形  
Fig. 1 Zero-sequence electrical waveforms of fault caused by line contacting sophora tree trunk

事实上,导线碰树故障除了稳定性导线碰树故障之外,还包括树木与导线保持间断性的接触-分离-再接触过程而形成的间断性导线碰树故障。由于树木的保温效果好、通电所造成的损伤不可逆,间断性的接触基本不会导致反应重新开始<sup>[5]</sup>。附录A图A4给出导线间断性接触杉树树枝放电试验的零序电流有效值曲线,去除间断部分的零序电流基本呈连续性发展状态,故本文后续仅进行稳定性导线碰树故障的试验研究。

图2为其他高阻接地故障的零序电气量波形图。导线坠落于水泥地故障可分为内部受热—(预击穿)—完全击穿的2个或3个阶段,导线坠落于大理石故障以及坠落于砾石故障没有明显的阶段性变

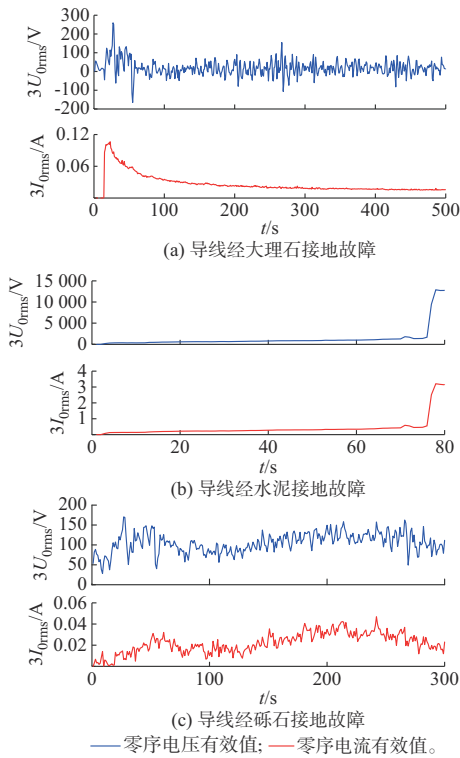


图2 其他高阻接地故障零序电气量波形  
Fig. 2 Zero-sequence electrical waveforms of other high-impedance ground faults

化规律。

观测试验现象可知,导线碰树故障的试验过程包括3个阶段:第1阶段树干体持续受热升温;第2阶段树干体水分持续析出;第3阶段碳化路径迅速发展,树木剧烈燃烧。其他高阻接地故障主要是接触点闪络与介质内部持续受热的演化过程,其中,导线坠落于水泥故障的发展过程可分为“水泥受热—(预击穿)—完全击穿”的2个或3个阶段,导线坠落于砾石与大理石故障的发展过程没有明显的阶段性发展现象。

## 2 中压导线碰树故障特征分析

### 2.1 短时间尺度特征分析

在短时间尺度下(数个周期内),高阻接地故障的过渡电阻可认为是非线性电阻与电弧的串联模型<sup>[23]</sup>,其特征体现在零序电气量波形的畸变现象以及谐波含量。

以导线搭接国槐一级树枝故障为例,图3所示为其各阶段短时间尺度下的试验结果,附录B图B1为导线搭接松树一级树枝故障各阶段短时间尺度下的试验结果。观察试验结果可知,在树木受热阶段中,零序电压、电流的畸变与零休现象不显著;在水分析出阶段,零序电压、电流的波形接近稳定的正弦

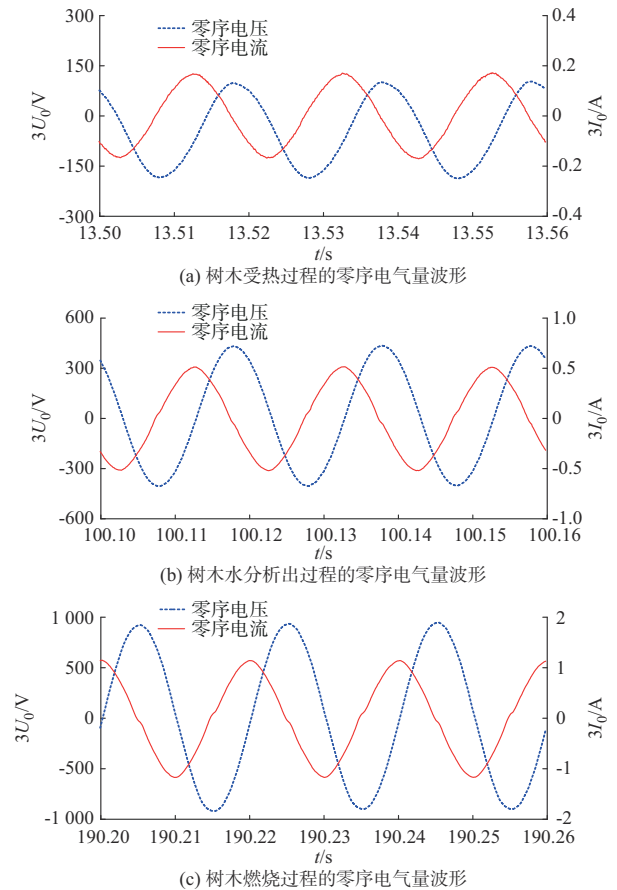


图3 导线搭接国槐树枝故障的试验结果  
Fig. 3 Experimental results of fault caused by line contacting sophora tree branch

信号,没有出现明显的畸变现象;在树木燃烧阶段中,随着碳化通道的电弧与火焰中放电现象的加剧,零序电压电流存在明显的畸变与零休现象。

附录B图B2为导线坠落于水泥地故障各阶段短时间尺度下的试验结果。在水泥受热阶段中,零序电压电流的畸变与零休现象不显著,在水泥“预击穿”与击穿的过程中,水泥内部逐渐形成击穿通道,电弧造成零序电压、电流存在明显畸变。导线坠落于大理石与砾石故障的试验现象接近,附录B图B3给出导线坠落于大理石故障短时间尺度的试验结果,零序电压电流出现了较明显的畸变与零休现象。

附录B图B4给出短时间尺度下,导线搭接国槐一级树枝故障与导线坠落于水泥地故障的零序电气量的3、5、7次谐波分量对比结果。在故障发展过程的前2个阶段,即发展过程的绝大多数时间内,零序电气量谐波分量占比小于6%,并且2类故障之间没有明显差异;故障发展过程的第3阶段,即树木燃烧/水泥击穿阶段中,谐波分量占比升高,导线坠落于水泥地故障的零序电气量的谐波分量占比远高于导线碰树故障。



## 2.2 长时间尺度特征分析

### 2.2.1 导线碰树故障长时特征分析

以导线稳定接触树干体故障为例,故障第1阶段与第2阶段中都包含接触点的碳化过程,但碳化过程的持续时间短,对过渡电阻的影响可以忽略。高阻接地故障的零序电压与零序电流有着确定的函数关系,长时间尺度的变化趋势基本一致,下文仅分析零序电流的变化特征。第1阶段中,树干体电阻随着通电时间的增加及热效应的累积,近似呈指数趋势下降,此时树木体电阻  $R_{f,tree}$  随时间的变化趋势可以近似为<sup>[11]</sup>:

$$R_{f,tree}(t) = k_{1,tree} e^{-\frac{t}{k_{2,tree}}} + k_{3,tree} \quad (1)$$

式中:  $t$  为故障持续时间;  $k_{1,tree}$  为过渡电阻指数衰减分量系数;  $k_{2,tree}$  为过渡电阻减小的时间常数;  $k_{3,tree}$  为过渡电阻随时间下降的最小值,  $k_{1,tree} + k_{3,tree}$  即为过渡电阻初始值。

$$3I_{0,tree}(t) = \frac{U_m}{X_{0\Sigma} + 3R_{f,tree}(t)} = \frac{U_m}{3k_{1,tree} e^{-\frac{t}{k_{2,tree}}} + 3k_{3,tree} + X_{0\Sigma}} \quad (2)$$

式中:  $3I_{0,tree}(t)$  为零序电流;  $U_m$  为故障相对地电压;  $X_{0\Sigma}$  为除故障点下游线路外的线路零序电容容抗之和。

为便于分析,将式(2)变换为:

$$3I_{0,tree}(t) = \frac{U_m}{k_{1,tree,eq}} e^{-\frac{t}{k_{2,tree}}} + \frac{U_m}{k_{3,tree,eq}} \quad (3)$$

式中:  $k_{1,tree,eq}$ 、 $k_{3,tree,eq}$  分别为该阶段零序电流的衰减分量系数与直流分量系数。

第1阶段中,导线碰树故障的零序电流由初始值呈指数上升趋势。第2阶段中,包含水汽大量析出(电阻增大)与碳化路径进一步发展(电阻降低)的两个相互“博弈”的过程,此时零序电流的变化趋势取决于水分散失与碳化路径发展两个过程的强弱。导线搭接松树树干故障长时间尺度下的试验结果如图4所示。

对比图1与图4可知,由于松树的含水量较低,碳化路径的逐渐发展占据第2阶段的主导地位,零序电流有效值呈现波动上升趋势。第3阶段中,火焰的热传递效应使得碳化路径迅速向地面发展,树干体电阻迅速下降,零序电流激增。

总体而言,长时间尺度下导线碰树故障零序电流的变化趋势可分为:

1)缓慢上升阶段。该阶段树干体持续受热、电阻持续降低、零序电流逐渐上升。

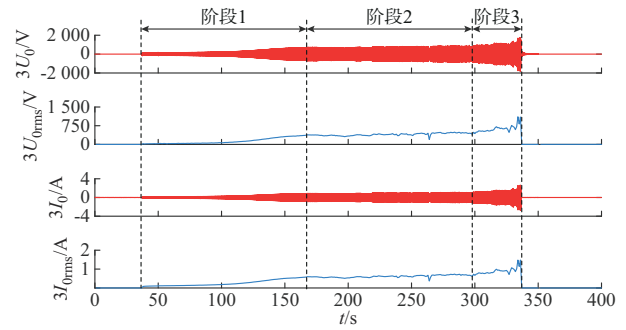


图4 导线搭接松树树干故障长时间尺度下的试验结果  
Fig. 4 Experimental results of fault caused by line contacting pine tree trunk in long-term scale

2)波动变化阶段。该阶段水汽析出与碳化路径发展几乎是同时进行的,零序电流的变化趋势取决于上述两过程的竞争结果。对于含水量高的树种(国槐等),水分析出过程占主导地位,此时零序电流呈缓慢下降趋势;对于含水量低的树种(松树等),碳化路径发展占主导地位,此时零序电流呈波动上升趋势。

3)迅速上升阶段。该阶段碳化路径发展与燃烧占主导地位,零序电流迅速上升。

### 2.2.2 其他高阻接地故障长时间尺度特征分析

图5给出用于分析长时间尺度特征的导线坠落(接触)于非金属介质故障的过渡电阻等效电路。图中:  $R_{arc}$  为导线与介质接触间隙的电弧电阻,由于接触间隙仅有几个毫米,几乎在通电瞬间就会被击穿,电弧电阻  $R_{arc}$  可以忽略;  $R_m$  为介质电阻,在故障持续时间内的表现取决于介质的内部特性;  $R_g$  为土壤电阻,对于厚度较小且与地面良好接触的接地介质,温度很容易就能传导到地面。土壤电阻率可近似认为只与土壤含水率有关<sup>[24]</sup>,随着通电时间的增加,土壤含水率降低,  $R_g$  逐渐增大。

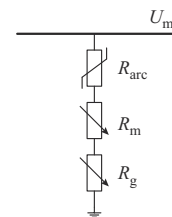


图5 非金属介质接地故障过渡电阻等效电路  
Fig. 5 Equivalent circuit of transition resistance of non-metallic dielectric ground fault

根据其内部密度的差异,非金属介质可分为低密度介质(如水泥等)与高密度介质(如大理石等)两种。对于大理石、砾石等高密度接地介质,通电路径难以在其内部发展,介质电阻几乎不随时间变化。而对于水泥等低密度接地介质,随着通电时间增加,

温度升高,会在介质内部逐渐形成通电路径,此时电阻缓慢降低,当通电路径发展到地面时,介质内部被击穿,电阻迅速降低。

不同密度接地介质的过渡电阻表达式如式(4)所示。

$$\begin{cases} R_{f,Hd}(t) = R_{m,Hd} + R_{g0}e^{W_g\beta(t)} \\ R_{f,Ld}(t) = R_{m,Ld} - R_{m,Ld}kt + R_{g0}e^{W_g\beta(t)} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $R_{f,Ld}$ 、 $R_{f,Hd}$ 分别为低密度、高密度接地介质的总过渡电阻; $R_{m,Ld}$ 、 $R_{m,Hd}$ 分别为低密度、高密度接地介质的初始过渡电阻; $R_{g0}$ 为初始土壤电阻; $\beta(t)$ 为土壤的水分散失系数; $W_g$ 为土壤含水率; $k$ 为低密度介质内部通电路径的发展速率。

当导线坠落于大理石时,零序电流变化趋势主要取决于土壤含水量的变化,随着时间缓慢降低。当导线坠落于砾石时,由于其初始过渡电阻很高,整体的零序电流幅值微弱,没有明显的变化规律。当导线坠落于水泥地时,零序电流的变化趋势取决于介质内部通电路径的发展与土壤含水量降低的竞争关系。试验结果表明,此时的热量主要集中在水泥内部,其零序电流变化趋势与导线碰树故障相似,呈现出先缓慢上升、后迅速升高的变化趋势。

### 2.2.3 特征的总结与差异化分析

在故障发展过程的大多数时间内,导线碰树故障与其他高阻接地故障在短时间尺度下的电气量差异不明显。而在长时间尺度下,相较于其他高阻接地故障,导线碰树故障的零序电气量呈现出独特的阶段性变化特征。各类高阻接地故障的零序电压与零序电流的变化趋势基本上一致,但在故障发展过程的最后阶段(树木燃烧、水泥击穿等)之前,导线碰树故障的零序电压幅值在大多数时间内低于电压互感器满量程的20%(2 kV),难以确保其测量精度。现有的高精度零序电流互感器在一次电流为几百毫安时仍具有较高的测量精度<sup>[22]</sup>,可以满足标称误差的要求,故应使用包含故障全过程、长时间尺度下的零序电气量变化特征作为导线碰树故障识别的依据。图6为典型的高阻接地故障零序电流波形,附录B表B1为曲线特征的差异对比情况。

导线碰树接地故障的零序电流整体呈平缓的波动上升趋势,波动性较强,并且其前3次的波动均呈现上升—下降—上升的趋势。导线搭接不同树种、不同位置的故障波形特征基本上是一致的。导线经高密度介质(砾石与大理石)接地故障与导线碰树故障是易于区分的,导线经大理石接地故障的零序电流呈缓慢下降趋势,而导线经砾石接地故障的零序电流有效值的波动性不明显。而对于导线经水泥接

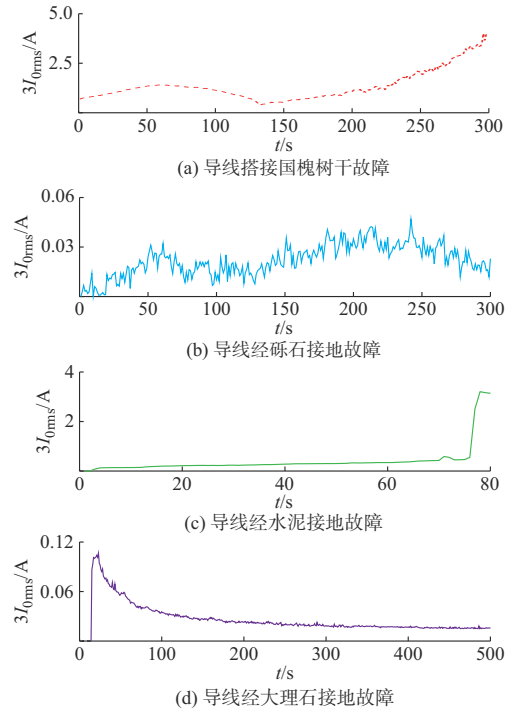


图6 典型高阻接地故障零序电流波形  
Fig. 6 Waveforms of zero-sequence current of typical high-impedance grounding fault

地故障,由于其介质内部可能存在预击穿现象,其零序电流变化趋势与导线碰树故障有相似之处,但相较于导线碰树故障,其零序电流变化趋势较为尖锐,波动性不明显并存在明显的尖峰。

## 3 导线碰树故障识别所用的特征参数

### 3.1 特征参数的选取

对于导线碰树故障的识别问题,通过观察真型试验数据获取的零序电流有效值曲线之间的波形特征差异,本文选取了标准差、离散系数、峭度以及偏度作为描述长时间尺度下零序电流变化特征参数。

标准差是衡量变量取值分散程度的重要指标<sup>[25]</sup>,本文选用标准差来量化零序电流有效值曲线偏离均值的情况。但对于均值差异较大的数据样本,采用标准差比较其数据波动状态的效果较差,而离散系数作为一个无量纲量,可以更好地描述多组均值差异较大的数据波动程度,进一步突出波动性的差异化程度<sup>[26]</sup>。峭度可以较好地描述曲线数据分布的陡峭程度或尖锐度。数据样本分布的峰态明显,波形越尖锐,其峭度计算结果越大,反之越小<sup>[27]</sup>。偏度是统计数据分布偏斜的方向和程度的量度<sup>[28]</sup>。将标准差、离散系数、峭度以及偏度作为表征导线碰树故障与其他高阻接地故障零序电流有

效值波形形态学差异的特征参数。特征参数的计算公式及其物理意义见表1。表中： $X$ 为数据的总称； $x_i$ 为第*i*个数据； $\bar{X}$ 为数据整体的均值； $n$ 为数据总数； $k_2$ 为数据整体的2阶中心矩； $k_3$ 为数据整体的3阶中心矩。

表1 描述波形形态学差异的特征参数及其物理意义  
Table 1 Feature parameters and their physical meanings for describing morphological differences of waveforms

特征参数	计算公式	物理意义
标准差 $s_{td}$	$s_{td}(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}}$	电流有效值偏离均值的程度
离散系数 $c_v$	$c_v(X) = \frac{s_{td}(X)}{\bar{X}}$	电流有效值波形的波动程度
峭度 $k_{ur}$	$k_{ur}(X) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^4}{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \right]^2}$	电流有效值波形的尖锐程度
偏度 $s_{kew}$	$s_{kew}(X) = \frac{k_3}{\sqrt{\frac{3}{2} k_2}}$	电流有效值波形的单调趋势

为进一步提取导线碰树故障独有的特征参数，消除个别样本差异，选择各阶段偏度作为识别用特征参数的补充。计算分阶段偏度时需要确认故障发展的阶段，默认分成3个阶段，对无法分成3个阶段的波形对应部分偏度赋0<sup>[28]</sup>。

### 3.2 特征参数的分布特点

对于标准差而言，导线坠落于砾石故障的零序电流有效值几乎都在其均值附近波动，其标准差较小。导线坠落于大理石故障的零序电流有效值随故障持续时间的增加近似呈指数趋势下降，衰减时间常数在几十秒至几百秒之间，指数衰减函数的标准差可近似为衰减常数的倒数，故其标准差的数值较小。导线碰树故障与部分坠落于水泥地故障的零序电流有效值波形随时间波动的情况较明显，其标准差的数值较大。附录C图C1、图C2分别给出不同类型高阻接地故障零序电流有效值曲线的标准差与离散系数的分布情况。对于峭度而言，导线坠落于水泥地故障的零序电流有效值波形具有明显的尖峰，其峭度最大。导线碰树故障各阶段的转折趋势较平缓，没有明显的尖峰。导线坠落于砾石故障的零序电流波形的峭度最小。附录C图C3给出各类高阻接地故障零序电流的峭度分布情况。

利用单一维度的特征参数难以确定导线碰树故障与其他高阻接地故障的边界，而进行多重特征融合，即综合利用多维度下的特征参数可以有效地明

晰导线碰树故障与其他高阻接地故障的边界。以综合利用标准差与离散系数的二维特征参数组为例，图7给出其联合分布示意图。可见，相较于单一维度的特征参数，综合利用二维特征参数进一步明确了导线碰树故障与其他高阻接地故障的边界。附录C图C4出综合利用标准差、离散系数与峭度的三维特征参数联合分布情况，与二维特征参数相比，此时导线碰树故障与其他高阻接地故障特征参数群边界得到了进一步的明晰。

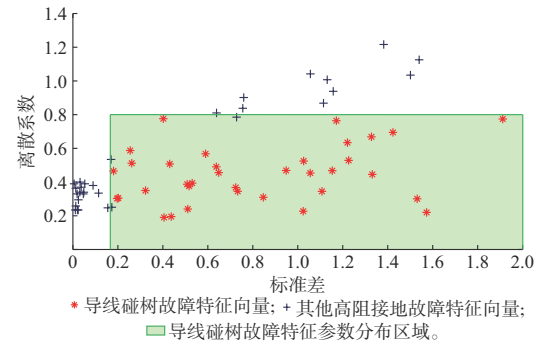


图7 标准差与离散系数的二维联合分布情况  
Fig. 7 Two-dimensional joint distribution of standard deviation and discrete coefficient

## 4 基于支持向量机的故障识别方法

支持向量机 (support vector machine, SVM) 是一种基于统计学习理论的监督式机器学习方法<sup>[29]</sup>。SVM的最终分类决策函数只由样本中少数的支持向量所确定，与空间样本的总数量无关，这意味着SVM算法更加适用于小样本、数量不对称样本的分类场景<sup>[30]</sup>，非常适合作为导线碰树故障识别的工具。但SVM对于特征提取及数据挖掘的能力较差，对特征参数的选取与构造提出了较高的要求。

式(5)为多特征融合后的特征参数表达式，即整合后输入SVM的特征参数(向量)组。

$$T_{con} = [s_{td} \quad c_v \quad k_{ur} \quad s_{kew}] \quad (5)$$

式中： $T_{con}$ 为融合后的特征参数矩阵； $s_{td}$ 为标准差向量； $c_v$ 为离散系数向量； $k_{ur}$ 为峭度向量； $s_{kew}$ 为分段偏度向量。

附录D图D1为导线碰树故障识别方法流程图。其中，在感知到故障发生后，装置或主站每1s计算并存储一次零序电流工频有效值。基于真型试验数据的结果，识别所用的录波长度应不小于300s。

由于故障的不稳定性，零序电流有效值曲线存在较多“毛刺”，不利于量化分析长时间尺度下的零序电流变化特征，故需要对零序电流有效值曲线进行光滑处理。移动平均法平滑滤波可以消除随机噪声干扰，是一种易于实现、计算量小的信号处理手



段<sup>[31]</sup>,附录D图D2给出光滑处理前后的导线搭接国槐一级树枝故障零序电流曲线。光滑处理前后的曲线确定系数为0.97,证明在滤除“毛刺”的同时仍可准确描述曲线的变化趋势。量化分析零序电流的单调性特征,需要确定故障的发展阶段。本文通过寻找曲线导数符号突变点的方式,结合试验现象,确定各变化阶段的交替点。附录D图D3给出导线搭接国槐树干故障的零序电流有效值及其导数曲线。可知,该方法可以精准确定零序电流有效值曲线的导数突变点,明确各变化阶段的转折点。

## 5 导线碰树故障识别方法的验证

### 5.1 多特征参数融合-SVM的识别结果

将导线碰树故障样本的类别标签设置为1,其他高阻接地故障样本的类别标签设置为2。SVM的参数 $g \in [0.01, 10]$ ,  $c \in [0.01, 100]$ 。图8给出多特征参数-SVM识别方法的故障类型识别结果,所提方法的识别正确率可达98%。

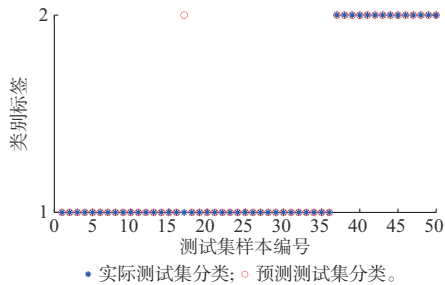


图8 识别结果示意图

Fig. 8 Schematic diagram of identification results

### 5.2 多特征参数融合与单一特征参数的比较

为对比单一特征参数与融合特征参数下的SVM的识别成功率差异,构造包含不同特征参数的测试组,在第4章中给出的测试集、训练集以及SVM模型参数下,观察各测试组的识别成功率,附录E图E1给出各测试组的特征参数分配情况,附录E图E2给出综合特征参数测试组与其他测试组的识别成功率及差异对比。由附录E图E2与表2可知,综合利用多维特征参数融合可将识别成功率提升10%~34%。

### 5.3 参数寻优方法及其性能分析

鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)是一种模拟座头鲸狩猎行为的元启发式优化算法,采用随机或最佳搜索代理来模拟捕猎行为,具有机制简单、寻优能力强等优点<sup>[32]</sup>。为进一步提高参数寻优的效果与速度,本文选用改进鲸鱼优化算法(improved whale optimization algorithm, IWOA)对SVM的两个参数 $g$ 与 $c$ 进行寻优,附录E

表2 综合特征参数测试组与其他测试组的识别成功率  
Table 2 Identification success rate of comprehensive feature parameter test group versus other test groups

标签	特征参数	识别成功率/%
Tcon	综合	98
Tcon1	标准差	64
Tcon2	离散系数	72
Tcon3	峭度	78
Tcon4	分段偏度	68
Tcon6	标准差+离散系数	80
Tcon7	标准差+离散系数+峭度	88

式(E1)至式(E3)给出改进过程。

为对比测试IWOA-SVM与WOA-SVM两种支持向量机模型的性能,在测试环境、同一训练集与测试集以及同一输入参数的前提下,观察不同参数寻优方法的识别成功率。附录E图E3给出WOA-SVM模型的识别正确率,优化后的IWOA-SVM可以有效提高识别成功率。

附录E表E1给出同一测试环境下,本文所提的优化方法与常用粒子群支持向量机(PSO-SVM)<sup>[33]</sup>与最小二乘支持向量机(LS-SVM)<sup>[34]</sup>的分类性能对比。所提方法在收敛次数方面与其他两种SVM模型的差异较小,但在识别准确率与运行时间方面均有明显优势。

### 5.4 接地保护动作对所提方法的影响

Q/GDW 10370—2016《配电网技术导则》<sup>[35]</sup>对单相接地故障提出了“快速切除、就近隔离”的要求,接地保护动作后故障消失,可能无法得到包含故障发展全过程的导线碰树故障零序电流数据。实际工程中,中压配电网接地保护的耐过渡电阻能力一般小于 $5 \text{ k}\Omega$ <sup>[7-8,14]</sup>,此时的故障电流约为1 A。以1 A作为保护动作门槛,图9给出计及保护切除故障影响的典型导线碰树故障零序电流有效值曲线,其中,阴影部分为计及保护切除影响后实际可获取的零序电流有效值曲线。

观察试验数据,导线碰树故障零序电流有效值大于1 A的现象,大多数情况下会出现在故障发展的第3阶段,即便此时导线碰树故障消失,对零序电流有效值曲线的整体的波动性、峰态以及各阶段的单调性影响较小。为验证保护切除故障的影响,以零序电流有效值首次大于1 A为分界点,剔除分界点后的数据,按照5.1节给出的SVM模型、测试环境以及训练集与测试集的划分方式,附录E图E4给出此时的故障识别结果。由于模拟了保护装置将故障切除的现象,导致部分导线碰树故障样本缺少了故障发展第2、3阶段的数据,削弱了整体的波动性

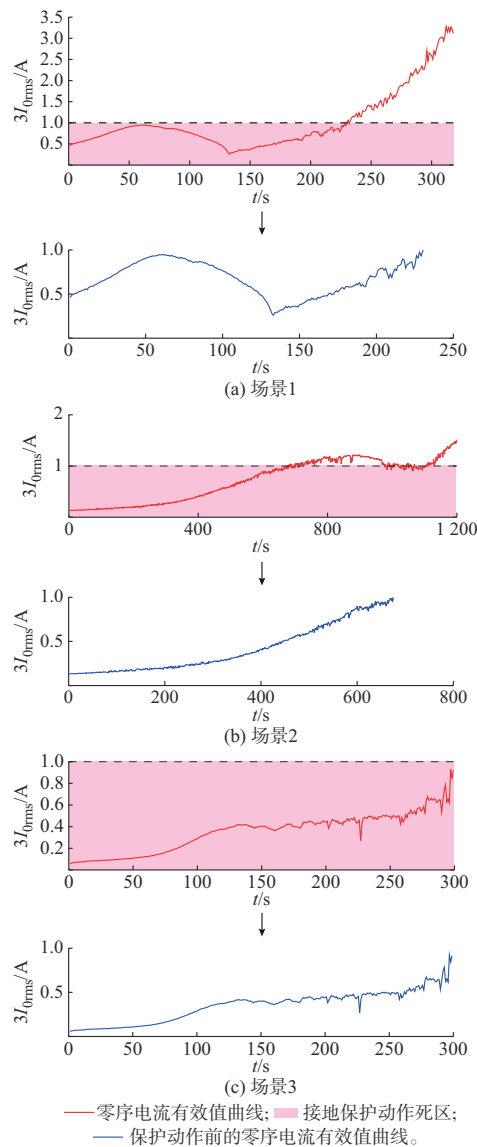


图9 典型导线碰树故障零序电流有效值曲线

Fig. 9 Root-mean-square value curves of zero-sequence current of typical line with tree-contacting grounding faults

与峰态,使得导线碰树故障与其他高阻接地故障的特征差异变小。但该情况出现的概率较小,对所提方法的识别正确率的影响不大,仅降低了2%。下一步的研究应进一步深入明确保护切除故障对导线碰树故障特征提取的影响,提高识别方法的适用性。

### 5.5 所提方法与现有方法的对比

对比本文所提方法和已有识别方法的效果。已有两类识别方法分别为基于高频噪声差异与谐波差异的识别方法。基于高频噪声差异的识别方法对采样频率的要求较高( $\geq 1$  MHz),实用性较差。实际工程中,中国常用中压配电保护终端的采样频率最高不超过 12.8 kHz,该类方法难以大面积推广。同

时,该类方法对外界噪声的耐受能力弱,对软硬件滤波与抗干扰性能的要求较高,实现难度较大。

基于谐波差异的识别方法,实质上利用的是导线碰树故障与其他高阻接地故障全过程零序电流的3、5、7次谐波分量及其占比的差异。由于现有文献没有给出明确的分类模型及参数,将其组成的特征参数集作为SVM的输入样本,观察其分类成功率。附录E图E5给出基于零序电流谐波分量及其占比的导线触树故障识别方法识别结果,其正确率仅有58%。问题在于导线碰树故障前两个阶段,即树木受热与水分析出阶段的电弧现象并不明显。因此,故障引入的谐波分量较低并且各类故障之间的差异不明显。只利用第3阶段的零序电流谐波分量及其占比时的成功率为82%,但第3阶段树木燃烧阶段发展迅速,其时间长度仅约为故障全过程的10%~15%,难以确保识别的可靠性。

相较于现有方法,所提方法利用秒级的零序电流有效值曲线的波形形态学特征,对配电保护终端的采样频率以及软硬件的要求较低,现有配电保护终端的采样频率即可满足要求。同时,体现出导线碰树故障与其他高阻接地故障在故障特征上的根本性差异,在识别正确率与实用性上具有明显优势。

## 6 结语

短时间尺度下,导线碰树故障与其他高阻接地故障的零序电气量差异较小。本文提出利用长时间尺度下零序电流有效值曲线的形态学差异作为导线碰树故障的识别依据。导线碰树故障的发展过程可分为树木受热、水分析出、树木燃烧3个阶段,其零序电流有效值曲线整体呈平缓的波动上升趋势。导线坠落于水泥地故障时的零序电流有效值曲线较为尖锐,波动性不明显且可能存在明显尖峰。导线经大理石接地故障时的零序电流有效值曲线整体呈缓慢下降趋势,而导线经砾石接地故障时的零序电流有效值曲线的波动性不明显。选取了标准差、离散系数、峭度以及偏度作为量化长时间尺度下曲线形态学差异的特征参数,综合利用多维特征参数可以有效地明晰导线碰树故障与其他高阻接地故障的识别边界。提出了一种基于多特征融合-SVM的导线碰树故障识别方法,结果表明,所提方法的识别正确率可达98%。综合利用多维特征参数,可将识别正确率提高10%~34%。未来,将进一步收集不同树种、不同季节以及不同环境下的导线碰树故障样本,明晰外界环境中的可测物理参数与故障特征之间的一一映射关系,提升识别方法泛用性与可靠性。



本文实际故障实验数据已共享,可在本刊网站支撑数据处下载(<http://www.aepsinfo.com/aeps/article/abstract/20240315002>)。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参 考 文 献

- [1] 梁栋,徐丙垠,唐毅,等.10 kV 架空导线单相触树接地故障模型及其检测方法[J].中国电机工程学报,2021,41(15):5221-5231.  
LIANG Dong, XU Bingyin, TANG Yi, et al. Model and detection method for tree-contact single-phase-to-earth faults on 10 kV overhead lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5221-5231.
- [2] 丛子涵,刘亚东,严英杰,等.配电线路树线早期故障动态特性仿真与试验[J].高电压技术,2023,49(3):1224-1233.  
CONG Zihan, LIU Yadong, YAN Yingjie, et al. Simulation and experiment on tree-contact incipient fault dynamic characteristic in the distribution network [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1224-1233.
- [3] MILLER C, PLUCINSKI M, SULLIVAN A, et al. Electrically caused wildfires in Victoria, Australia are over-represented when fire danger is elevated [J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 167: 267-274.
- [4] 梁栋,王鹏玮,徐丙垠,等.面向森林电气火灾防治的配电线路继电保护方案[J].供用电,2021,38(12):15-20.  
LIANG Dong, WANG Pengwei, XU Bingyin, et al. Relay protection scheme of distribution lines for electrical forest fire prevention[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(12): 15-20.
- [5] 姚福星,苗世洪,涂青宇,等.考虑强对流天气的乡镇配电网树线矛盾风险预警及优化处理[J].电工技术学报,2023,38(22):6188-6203.  
YAO Fuxing, MIAO Shihong, XU Qingyu, et al. Risk warning and optimization processing for tree-line contradiction in rural distribution network considering severe convective weather [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6188-6203.
- [6] KRIS G V. 2019 Annual report for Southern California Edison Company (U338-E) of compliance with general order 166 [R]. California: Southern California Edison Company, 2019.
- [7] 王宾,崔鑫,董新洲.配电线路弧光高阻故障检测技术综述[J].中国电机工程学报,2020,40(1):96-107.  
WANG Bin, CUI Xin, DONG Xinzhou. Overview of arc high impedance earthing fault detection technologies in distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 96-107.
- [8] GHADERI A, GINN H L III, ALI MOHAMMADPOUR H. High impedance fault detection: a review [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143: 376-388.
- [9] 韦明杰,余越,梁英,等.宽频信号在谐振接地有源配电网高阻故障选线中的应用[J].电力系统自动化,2023,47(19):166-176.  
WEI Mingjie, YU Yue, LIANG Ying, et al. Application of broadband signal in high-resistance fault line selection of resonant grounded active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 166-176.
- [10] 韦明杰,石访,张恒旭,等.基于零序电流波形区间斜率曲线的配电网高阻接地故障检测[J].电力系统自动化,2020,44(14):164-171.  
WEI Mingjie, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. Detection of high impedance grounding fault in distribution network based on interval slope curves of zero-sequence current [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 164-171.
- [11] 梁栋,徐丙垠,王鹏玮.10 kV 架空导线单相触树接地故障检测方法[J].电力系统自动化,2021,45(14):149-157.  
LIANG Dong, XU Bingyin, WANG Pengwei. Detection method for tree-contact single-phase-to-ground fault of 10 kV overhead line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 149-157.
- [12] 张大波,李雪婷,陶维青.基于边缘计算和深度学习的有限信息配电网单相接地故障区段定位[J].电力系统保护与控制,2023,51(24):22-32.  
ZHANG Dabo, LI Xueting, TAO Weiqing. Single-phase ground fault section location in distribution networks with limited information based on edge computing and deep learning [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 22-32.
- [13] 邵庆祝,崔鑫,谢民,等.弧光高阻接地故障建模及数据修正算法[J].电力系统自动化,2021,45(11):120-125.  
SHAO Qingzhu, CUI Xin, XIE Min, et al. Modeling and data correction algorithm for arc high resistance earthing fault [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 120-125.
- [14] 徐丙垠,李天友,薛永端.配电网继电保护与自动化[M].北京:中国电力出版社,2017.  
XU Bingyin, LI Tianyou, XUE Yongduan. Relaying protection and automation of distribution networks [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [15] GOMES D P S, OZANSOY C, ULHAQ A. Vegetation high-impedance faults' high-frequency signatures via sparse coding [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(7): 5233-5242.
- [16] GOMES D P S, OZANSOY C, ULHAQ A, et al. The effectiveness of different sampling rates in vegetation high-impedance fault classification [J]. Electric Power Systems Research, 2019, 174: 105872.
- [17] OZANSOY C, GOMES D P S. Volatility diagnosis in phase-to-phase fault detection for branch across wire faults [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 19-29.
- [18] GHADERI A, MOHAMMADPOUR H A, GINN H L, et al. High-impedance fault detection in the distribution network using the time-frequency-based algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1260-1268.
- [19] MA Jun, CHENG J C P, JIANG Feifeng, et al. Real-time detection of wildfire risk caused by powerline vegetation faults using advanced machine learning techniques [J]. Advanced Engineering Informatics, 2020, 44: 101070.
- [20] 王宾,耿建昭,董新洲.基于介质击穿原理的配电线路高阻接地故障精确建模[J].电力系统自动化,2014,38(12):62-66.

- WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. High-impedance fault modeling based on solid dielectric electrical breakdown theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 62-66.
- [21] 王文轩,程力涵,樊轶,等.不依赖零序电压的配电站所接地故障识别方法[J].电力系统自动化,2021,45(9):122-129.
- WANG Wenxuan, CHENG Lihan, FAN Yi, et al. Identification method of grounding fault for distribution station independent of zero-sequence voltage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 122-129.
- [22] 王鹏玮,徐丙垠,陈恒,等.零序电流互感器误差对小电流高阻接地保护影响及选型[J].电力系统自动化,2023,47(12):154-162.
- WANG Pengwei, XU Bingyin, CHEN Heng, et al. Influence of error of zero-sequence current transformer on small-current high-resistance grounding protection and type selection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 154-162.
- [23] 柯亮,李波,廖凯,等.基于XGBoost的配电网高阻接地故障检测方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(6):88-98.
- KE Liang, LI Bo, LIAO Kai, et al. High impedance fault detection method in a distribution network based on XGBoost [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 88-98.
- [24] 段国秀.黄土区土壤电阻率特性及应用研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2022.
- DUAN Guoxiu. Study on characteristics and application of soil resistivity in loess area [D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2022.
- [25] 李腾辉,李卫东,申家锴,等.双馈风电机组利用转子动能进行一次调频能力动态估计[J].电力系统自动化,2024,48(10):109-117.
- LI Tenghui, LI Weidong, SHEN Jiakai, et al. Dynamic estimation of primary frequency regulation capability of doubly-fed wind turbines using rotor kinetic energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 109-117.
- [26] 朱宝,顾伟飞,孙永平,等.一种基于样本大数据监测汽动给水泵组性能的方法[J].中国电机工程学报,2020,40(23):7659-7666.
- ZHU Bao, GU Weifei, SUN Yongping, et al. A method for monitoring the performance of turbine driven boiler feed water pump set based on big sample data [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7659-7666.
- [27] 周文杰,周俊,柳小勤,等.基于AVMD-IMOMEDA的滚动轴承声信号复合故障特征分离提取[J].振动与冲击,2023,42(24):152-159.
- ZHOU Wenjie, ZHOU Jun, LIU Xiaoqin, et al. Separation and extraction of composite fault features of rolling bearing acoustic signals based on AVMD-IMOMEDA [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(24): 152-159.
- [28] 陈彦州,赵俊华,文福拴,等.偏度风险价值下供电公司/电力零售公司动态购电组合策略[J].电力系统自动化,2011,35(6):25-29.
- CHEN Yanzhou, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A skewness-VaR based dynamic electricity purchasing strategy for power supply companies/retail companies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 25-29.
- [29] 武昕,严萌,郭一凡,等.基于结构化特征图谱的组合支持向量机非侵入式负荷辨识[J].电力系统自动化,2022,46(12):210-219.
- WU Xin, YAN Meng, GUO Yifan, et al. Non-intrusive load identification by combined support vector machine based on structured characteristic spectrum [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 210-219.
- [30] 谢桦,亚夏尔·吐尔洪,陈昊,等.基于支持向量机算法的配电线路时变状态预测方法[J].电力系统自动化,2020,44(18):74-80.
- XIE Hua, Yaxar TURGUN, CHEN Hao, et al. Prediction method for time-variant states of distribution line based on support vector machine algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 74-80.
- [31] 马文涛,寇晓,郭耀松,等.基于扩展KRSL无迹卡尔曼滤波的约束动态状态估计[J].电力系统自动化,2023,47(6):185-196.
- MA Wentao, KOU Xiao, GUO Yaosong, et al. Constrained dynamic state estimation based on extended kernel risk sensitive loss unscented Kalman filter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 185-196.
- [32] 唐捷,杨银,刘斯亮,等.基于改进SVM与NSGA-III的台区相序在线优化方法[J].电力系统自动化,2022,46(3):50-58.
- TANG Jie, YANG Yin, LIU Siliang, et al. On-line optimization method for phase sequence in station area based on improved support vector machine and non-dominated sorting genetic algorithm- III [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 50-58.
- [33] 戚远航,侯鹏,金荣森.基于Q学习粒子群算法的海上风电场电气系统拓扑优化[J].电力系统自动化,2021,45(21):66-75.
- QI Yuanhang, HOU Peng, JIN Rongsen. Optimization of electrical system topology for offshore wind farm based on Q-learning particle swarm optimization algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 66-75.
- [34] 陈卫东,梁朔,肖园园,等.基于模糊最小二乘支持向量机的微电网群状态评估方法[J].电力系统自动化,2019,43(2):76-82.
- CHEN Weidong, LIANG Shuo, XIAO Yuanyuan, et al. Evaluation method for microgrid cluster state based on fuzzy least squares support vector machine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 76-82.
- [35] 配电网技术导则:Q/GDW 10370—2016[S].2016.
- Technical guidelines for distribution network: Q/GDW 10370—2016[S]. 2016.
- 王鹏玮(1996—),男,博士研究生,主要研究方向:配电网继电保护与自动化、电力线路故障监测技术。E-mail:wpwsdut@163.com
- 徐丙垠(1961—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:配电网继电保护及其自动化、电力线路故障监测技术。E-mail:xuby@vip.163.com
- 梁 栋(1988—),男,博士,讲师,主要研究方向:电力线路故障监测技术。E-mail:greache@foxmail.com

(编辑 代长振)

## Identification Method for Tree-contacting Grounding Fault of Medium-voltage Line Based on Long-term Variation Features of Zero-sequence Current

WANG Pengwei<sup>1</sup>, XU Bingyin<sup>1,2</sup>, LIANG Dong<sup>1</sup>, WANG Lianhui<sup>3</sup>, WANG Chao<sup>2</sup>, ZOU Guofeng<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Shandong Kehui Electric Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China;

3. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** Distinguishing whether faults in medium-voltage distribution lines are caused by lines contacting trees is of great significance for clarifying the causes of forest fires and preventing line faults from causing forest fires. The zero-sequence currents of various high-impedance grounding faults are obtained through prototype experiments in the paper, and the long-term variation features of the zero-sequence current waveforms of high-impedance grounding faults are analyzed. Analysis shows that there are significant differences in the fluctuation, monotonicity, and sharpness of the waveforms of the root-mean-square value of the zero-sequence currents of line with tree-contacting grounding faults compared to other high-impedance grounding faults. A multi-feature fusion parameter set including standard deviation, discrete coefficient, kurtosis, skewness of the zero-sequence current root-mean-square value curve is designed, and an identification method for tree-contacting ground fault of medium-voltage line based on support vector machine is constructed. The results show that the proposed method achieves a fault recognition accuracy of 98%.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5500-202221138A-1-1-ZN).

**Key words:** distribution line; fault identification; high-impedance grounding fault; tree-contacting grounding fault; zero-sequence current; support vector machine

