

# 输电线路绝缘的几种闪络方式辨识

曾 琴<sup>1</sup>, 周 凯<sup>1</sup>, 赵世林<sup>2</sup>, 万 航<sup>1</sup>, 龚 薇<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川省电力公司技能培训中心, 四川 成都 610072)

**摘 要:**为及时评估输电线路绝缘状态, 保证系统稳定性, 提出一种用于辨识输电线路绝缘的几种闪络方式的方法。首先, 利用工频叠加冲击试验平台模拟3种输电线路故障类型, 从而获得闪络电流数据; 然后, 对采集到的各种闪络电流信号进行小波变化得到各频带下的重构信号, 并计算信号在各个频段内的能量; 最后, 利用小波能量谱构造高频段能量重心作为识别特征量, 与低频段能量值结合提出综合识别判据, 对三类诱因的多次试验数据进行分析辨别。结果表明: 该文提出的方法可直观有效地识别工频叠加冲击下的污秽、覆冰及植被闪络, 闪络原因判断正确率可达91.1%。

**关 键 词:**冲击; 小波能量谱; 闪络; 绝缘子; 植被

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.004 中图分类号: TM866 文章编号: 1673-9140(2020)06-0028-08

## The identification of several flashover factors for the transmission line insulation

ZENG Qin<sup>1</sup>, ZHOU Kai<sup>1</sup>, ZHAO Shilin<sup>2</sup>, WAN Hang<sup>1</sup>, GONG Wei<sup>1</sup>

(1. School of Electric Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. SiChuan Electric Power Corporation Training Center, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** In order to evaluate the insulation status of transmission line and ensure power system stability, a method is proposed to identify several flashover factors for the transmission line insulation in this paper. Firstly, the impact test platform superimposed by the power frequency is utilized to simulate three types of transmission line faults to obtain flashover current data. Secondly, the flashover current signals are transformed into reconstructed signals in different frequency band using the wavelet transformer. Finally, the wavelet energy spectrum is used to construct the high-frequency energy center of gravity as the identification feather, combined with the low frequency energy value to propose a comprehensive identification criterion. Furthermore, three types of inducement data are analyzed and distinguished. The results show that these three flashover under power frequency superimposed shocks-pollution, icing and vegetation flashover, can be accurately identified by the proposed method, and the correct identification rate can reach 91.1%.

**Key words:** impulse voltage; wavelet energy spectrum; flashover; insulator; vegetation

随着中国架空输电线规模的扩大, 线路故障在电力系统中愈加频繁。目前, 输电线路故障主要分

为雷击和非雷击故障。虽然雷击故障是引起输电线路跳闸的主要原因, 但其为瞬时性故障, 重合闸成功

率可高达 89.32%。2005—2014 年某省级电网输电线路故障统计发现,山火、冰灾及风偏等自然灾害故障重合闸成功率最高只有 36.31%<sup>[1]</sup>。其中冰害导致的线路故障有增长趋势,树闪故障已被普遍认为是引发电力中断的最重要原因<sup>[2-5]</sup>,污闪和冰闪带来的经济损失远高于普通雷击事故。因此,准确预测出输电线路的潜在故障因素,对检修人员判断输电线路运行状况,及时采取故障预防处理措施进而避免其发展为永久性故障,减少因电力中断而导致的国民经济损失,具有重要参考意义。

小波分析是研究、识别电力系统暂态现象的有力工具,在故障辨识与定位方面应用甚广<sup>[6]</sup>。文献[7-8]对暂态电流信号进行小波分析,提取小波能量谱特征参数,分别利用 BP 神经网络、模糊识别方法完成了对非故障性雷击、故障性雷击及短路故障的识别,但分类器及模糊识别方法都属于黑箱操作,不易理解,且具体冲击波参数或故障条件对暂态能量影响较大,有必要提出更清晰直观的可靠识别方法。对于污闪、冰闪、树闪等自然灾害故障,文献[9-10]利用各故障行波电流暂态特征差异建立波形数据库进行分析辨别,但以上几种典型故障均属于工频电压击穿故障。事实上,当绝缘子处于严重覆冰或积污状态时,其工频电压虽会明显降低,但绝缘子不会立即闪络,而雷电或操作冲击这类短时过电压的出现将会成为绝缘子闪络的导火索。可见,冰闪、污闪或树闪等典型故障在雷电或操作冲击下极易形成击穿通道,并在工频电压下形成续弧进而发生闪络,而单纯的工频电压击穿并不能完全模拟实际情况,更合适的试验条件需要被考虑。

该文针对现有研究的不足,采用工频叠加冲击试验平台以模拟实际输电线路因遭受冲击而发生污闪、冰闪与树闪的情况,对工频与冲击联合作用下的输电线路闪络电流特征进行小波分析,得到各频段下能量分布,通过对不同频带下能量分布的差异分析,提出高频段能量重心特征量,并综合低频段能量值及其与高频段最大能量值之比以实现工频叠加冲击下造成线路闪络的积污、覆冰及树木过高这 3

类诱发因素的判断。

## 1 小波能量谱基本原理

### 1.1 小波变化

小波变换作为一种多尺度分析方法,具有良好的时频局部化特性,可反映特定频带下的故障暂态信号的内在特征。若有  $\psi \in L^2(R)$  满足容许性条件  $\int \psi(t) dt = 0$ , 称  $\psi$  为基小波,则将任意  $L^2(R)$  空间中的信号  $f(t)$  在小波基下展开的连续小波变换定义为

$$\omega t(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中  $a, b \in \mathbb{R}, a > 0$  为与频率对应的尺度参数,对基小波作伸缩,  $b$  为与时间对应的位移参数,用于确定对  $f(t)$  进行分析的时间中心,  $\omega t(a, b)$  为小波变换系数。

将小波基函数的  $a$  和  $b$  限定在离散点上取值,对尺度参数和位移参数进行离散化 ( $a = a_0^j, b = ka_0^j b_0, j \in \mathbb{Z}$ ), 可得离散小波的定义式:

$$d_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{a^j}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \bar{\psi}(a_0^{-j} t - kb_0) dt \quad (2)$$

从多分辨分析的角度理解,小波分解的实质是通过一对镜像滤波器,对故障信号进行二等分逐层分解<sup>[11]</sup>,以得到细节部分(高频分量)和大尺度逼近部分(低频分量),然后将大尺度逼近部分进一步二分,如此重复可得到任意尺度上的逼近部分和细节部分,则第  $j$  尺度下的逼近系数  $a_j(k)$  和细节系数  $d_j(k) (j=1, 2, \dots, j)$  为

$$\begin{cases} a_{j+1}(k) = \sum_n a_j(n) h_0(n-2k) \\ d_{j+1}(k) = \sum_n a_j(n) h_1(n-2k) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $h_0(k), h_1(k)$  为满足二尺度差分方程式的 2 个滤波器。

若记  $a_0(k)$  所处频带为空间  $V_0, a_1(k)$  位于  $V_1$  空间,  $d_1(k)$  位于空间  $W_1, W_1$  为  $V_1$  在  $V_0$  的正交补空间,类推可知  $V_0 = V_1 \oplus W_1, \dots, V_{j-1} = V_j \oplus W_j,$

其中  $\oplus$  表示空间正交,得

$$V_0 = W_1 \oplus V_1 = W_1 \oplus W_2 \oplus V_2 = \dots = W_1 \oplus W_2 \oplus \dots \oplus W_j \oplus V_j \quad (4)$$

## 1.2 小波能量谱

小波能量谱反映了原信号从低频到高频的能量分布<sup>[6]</sup>。由小波分解的正交性可知,各频段下重构信号的平方和就等于原信号在该时间域的能量。对故障信号进行  $j$  层小波分解,得到从低频到高频  $j+1$  个重构信号,第  $i$  频段的能量计算为

$$e_i = \sum_n |S_i|^2 \quad (5)$$

式中  $S_i$  为第  $i+1$  频段重构信号的小波系数( $i=0,1,\dots,j$ ); $n$  为总采样点数。

## 2 试验设计与分析

### 2.1 试验装置

为模拟实际输电线路在运行中遭受冲击而发生污闪、冰闪及树闪情况,该文采用变压器绕组尾部直接接地方式以等效 110 kV 及以上输电线路的单相网络,并搭建工频叠加冲击试验平台,具体接线原理如图 1 所示。试验平台主要由工频电压产生电路、冲击电压发生器、耦合电容和模拟架空线构成,其中,冲击电压发生器产生  $1.2 \mu\text{s}/50 \mu\text{s}$  的冲击波。选用 TJF100 交流电容式分压器监测过电压<sup>[12-13]</sup>,分压器分压比为 1 000 : 1,电容为 1.044 nF;故障电流的测量由电流传感器 OPCT10AL(变比 1 : 3 000)进行采集,将其套在绝缘子接地线上,传感器输出端与示波器相接,通过 RIGOL 示波器 D6104 采集故障电流信号。

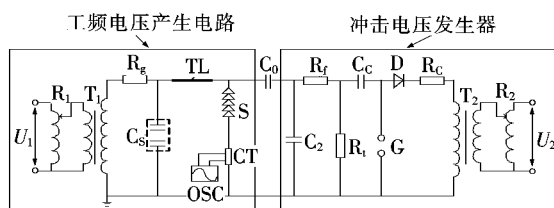


图 1 工频叠加冲击试验电路

Figure 1 Circuit diagram of power frequency superimposed impact test

其中,工频电压产生电路由调压器  $R_1$ 、变压器  $T_1$ 、保护电阻  $R_g$ 、模拟输电线 TL、交流电容分压器  $C_s$  和试品 S 所构成;冲击电压发生器由调压器  $R_2$ 、变压器  $T_2$ 、保护电阻  $R_c$ 、高压硅堆 D、放电球隙 G、充电电容  $C_c$ 、波头电阻  $R_f$ 、波尾电阻  $R_i$  和负载电容  $C_2$  等器件所构成,冲击电压发生器经耦合电容  $C_0$  与工频电压产生电路相连接。

### 2.2 试品设计

国内外研究认为,当绝缘子串长不超过 5 m 时,污闪与冰闪电压与绝缘子串长呈线性关系<sup>[14-15]</sup>,且当绝缘子遭受雷电或操作冲击过电压时,其放电电压接近干闪电压而与绝缘子的结构、外形关系不大,故可用短串试品以模拟输电线路中的大多数类型的绝缘子闪络。相同气象条件下,支柱类绝缘子因其伞间距离为线路绝缘子相邻绝缘子片间距离的  $1/2$ <sup>[16]</sup>,且爬电比距配置过低,更易在系统过电压甚至正常电压下发生污闪与冰闪。因此在冰闪与污闪试验中选以支柱绝缘子作为试验对象,以模拟最严重情况下的闪络。

植被在故障闪络通道中可视为一圆柱形高阻,与导线电阻计算相同。不同季节下的树阻现场测试结果表明,冬季树阻近似为夏季树阻的 5 倍,长 10~12 m 的松树树阻在冬季可高达 800 k $\Omega$ 。该试验时间处于冬季,植被闪络选用高为 4 cm、直径为 1.5 cm、树干导电率为 43  $\Omega\text{m}$  的松树枝。计算可得其树阻值为 30 k $\Omega$ ,可近似模拟输电线路中的高阻树木。

### 2.3 试验方案

在冰闪与污闪试验中选以 ZJ-10Q $\Phi 65 \times 140$  支柱绝缘子作为试验对象,其技术参数如表 1 所示。试验以单片绝缘子作为加压对象,每片绝缘子的额定电压为 1.2~1.5 kV,故在绝缘子与树枝试品两端均施加 1.5 kV 的工频电压。

在污秽闪络试验中,根据标准规定<sup>[17]</sup>,采用喷污法对清洁绝缘子进行湿润,将配置好的污秽溶液

表 1 试品绝缘子技术参数

Table 1 Parameters of test insulator

结构高度/mm	直径/mm	耐受电压/kV	额定电压/kV
12	65	5	1.2~1.5

(盐密  $\rho_{\text{SDD}} = 0.1 \text{ mg/cm}^2$ , 灰密  $\rho_{\text{NSDD}} = 0.5 \text{ mg/cm}^2$ ) 置于加湿器中, 正对清洁绝缘子表面均匀喷雾, 使其均匀地覆盖一层污秽物, 当其表面出现水膜, 边缘将要滴水时, 采用恒压升降法预加工频电压, 然后再叠加冲击电压至闪络<sup>[18]</sup>。

在覆冰闪络试验中, 用喷壶将电导率为  $100 \mu\text{S/cm}$  的冷却水均匀喷洒在清洁绝缘子表面, 置于冰箱冷却结冰, 重复上述操作直至绝缘子表面形成一层  $1\sim 2 \text{ mm}$  厚的冰, 然后将覆冰绝缘子置于试验平台, 在绝缘子表面冰层未融化之前进行试验, 采用上述污闪加压方式获取闪络电流。

植被闪络试验中选用高为  $4 \text{ cm}$ 、直径为  $1.5 \text{ cm}$  的松树细枝作为试品。由于输电线路下方树木过度生长, 使线路和树木间的净空距离小于击穿距离时, 就可能发生树闪故障<sup>[2]</sup>, 线路过热下垂导致树闪故障是大停电中经常遇到的情况。试验中将树枝置于输电线路下方, 树梢与导线垂直距离设为  $1 \text{ mm}$ 。

### 3 输电线路闪络原因判断方法

#### 3.1 闪络暂态分析

输电线路遭受雷电或操作冲击, 发生树闪、污闪和冰闪后, 试验设备采集到的闪络电流在不同频段下的能量分布不同。对采集到的故障电流进行 6 层小波分解, 得到 7 个频带内的重构信号, 由式(5)得到 3 类故障的小波能量谱。试验中示波器采样率为  $500 \text{ MHz}$ ,  $V_6$  对应频段为  $0\sim 3.91 \text{ MHz}$ ,  $W_6\sim W_1$  对应频段为  $3.91\sim 250 \text{ MHz}$ 。不同故障类型的能量分布特征如下:

1) 植被闪络故障的  $V_6$  低频段能量  $e_0$  明显低于污秽与覆冰闪络。植被闪络过程中, 温度随时间变化小, 树阻基本保持恒定<sup>[19]</sup>, 且阻值较金属性电阻大, 一般为千欧级, 常将植被闪络视作高阻性闪络;

而污秽闪络和覆冰闪络过程中, 随着电弧发展使绝缘子全面闪络, 其电弧电阻较小, 故将其视作金属性闪络。闪络电流衰减系数、低频段能量分布与过渡电阻大小关系密切, 过渡电阻越大, 低频段能量分布越小<sup>[7]</sup>。如表 2 所示, 可知植被闪络在  $V_6$  频段能量  $e_0$  远小于污闪或树闪, 很好地说明了这一点。

2) 覆冰闪络故障在中频段的电流信号较污秽闪络丰富。工频叠加冲击电压后, 绝缘子发生闪络, 在绝缘子闪络初期, 冲击波起主要作用<sup>[7]</sup>, 高频能量丰富且主要分布于  $W_6\sim W_4$  频段。由于冲击波在绝缘子闪络时波头被截断, 形成频率更高的截断波, 由截波产生的暂态电流高频分量主要分布于高频段  $W_3\sim W_1$ , 因此绝缘子的闪络重燃信号特征主要体现在中频段  $W_6\sim W_4$ 。覆冰闪络时融冰水电导率较大, 具有沿冰层表面及冰层内部多条电弧通道, 覆冰过程总会频繁产生短接更多伞裙的电弧<sup>[17]</sup>; 而污秽闪络时, 工频电压对污层有烘烤作用, 使得污层干湿分布不均, 导致污秽绝缘子表面出现干燥带<sup>[9]</sup>, 阻止电弧进一步发展。可见覆冰闪络的电弧发展比污秽闪络更为剧烈。为突出污秽闪络及覆冰闪络电流的高频信号差异, 将暂态电流原信号减去  $V_6$  低频段重构信号, 所得高频信号为故障特征信号<sup>[20]</sup>, 具体波形如图 2 所示, 可见覆冰闪络的高频信号明显较污秽闪络丰富, 能较好地体现绝缘子电弧重燃特征。

根据以上分析可知, 对故障暂态电流进行 6 层小波分析, 植被闪络的低频段能量  $e_0$  远大于污秽或覆冰闪络故障。但仅利用单一频段的能量值不能保证可靠判断出闪络诱发因素。故该文在此基础上提出低频段能量值与高频段最大能量值之比这一特征量以表征各种闪络下的暂态特征, 并与低频段能量值相结合初步辨识出植被闪络, 再利用小波能量谱计算能量重心, 进一步辨识污秽与覆冰闪络。

表 2 暂态电流的能量分布

故障类型	$e_0$	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$
植被闪络	8.198 5	8.113 9	7.876 4	17.721 4	32.038 7	18.100 7	13.625 8
污秽闪络	139.911 7	31.821 0	28.883 9	21.631 5	30.314 9	17.124 1	6.485 3
覆冰闪络	179.607 1	14.405 3	28.446 1	15.760 5	9.884 5	10.162 7	15.267 1

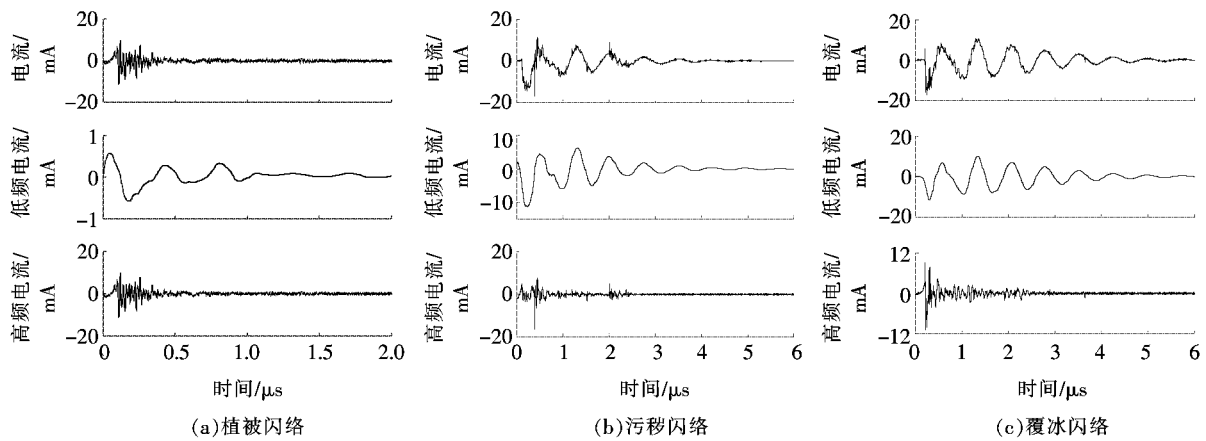


图 2 闪络电流及其高、低频分解波形

Figure 2 Waveforms of flashover current and its high & low frequency decomposition

### 3.2 闪络特征量提取

低频段能量值反映了输电线路闪络过渡电阻的大小,过渡电阻越大,低频段能量值越小,可据此判断闪络因素是树木过高导致净空距离减小,还是绝缘子表面因积污或覆冰导致绝缘裕度下降。由于植被闪络与绝缘子污秽和覆冰闪络故障在  $V_0$  低频段的能量值相差很大,可初步判断植被闪络。

为进一步准确识别树闪这类高阻性闪络,采用低频段( $V_0$ )能量值与高频段( $W_6 \sim W_1$ )最大能量值之比,用  $\alpha$  表示,以突出暂态电流在低频与高频段的差异,提高识别可靠性。特征值  $\alpha$  的数学表达式为

$$\alpha = \frac{e_0}{\max_{i=1}^6 e_i} \quad (6)$$

特征值  $\alpha$  越大,闪络在低频段分布越多,其过渡电阻越小。当特征值满足  $\alpha < 1$  判据时,可判定闪络为植被闪络,否则为金属性闪络。

由于污秽及覆冰闪络在低频段能量分布相似,因此去除低频段能量,仅对高频段能量进行分析以突出各类闪络电流下的暂态特征。为提取暂态信号能量集中频段特征,将物理学中的重心概念推广到能量重心<sup>[21]</sup>,以反映能量集中位置。在辨识出树闪的基础上,利用各频段能量分布特征,提出能量重心构成判据,其定义为

$$k = \frac{\sum_{i=1}^6 e_i i}{\sum_{i=1}^6 e_i} \quad (7)$$

式中  $e_i$  为闪络电流第  $i$  个高频段的能量。 $k$  值越大,闪络电流在高频段能量分布越多。

能量重心  $k$  反映了闪络电流能量集中频段,其

值越大,能量分布越是集中于高频段,可依据其数值大小判断配电线路是发生了污秽还是覆冰闪络故障。经计算可知,若配电线路在工频与冲击联合作用下发生污秽闪络,则  $k \in (2, 3)$ ;若输电线路发生了覆冰闪络,则  $k \in (3, 4)$ 。

### 3.3 输电线路闪络诱因判断步骤

该文利用小波能量谱分析辨识,由绝缘子积污、覆冰及树木过高而引发的输电线路闪络的诱因识别流程如图 3 所示。具体辨识步骤如下:

1) 利用工频与冲击联合作用试验模拟输电线路因绝缘子积污、覆冰及树木生长过高 3 类因素而诱发的闪络,获取采集到的闪络电流信号;

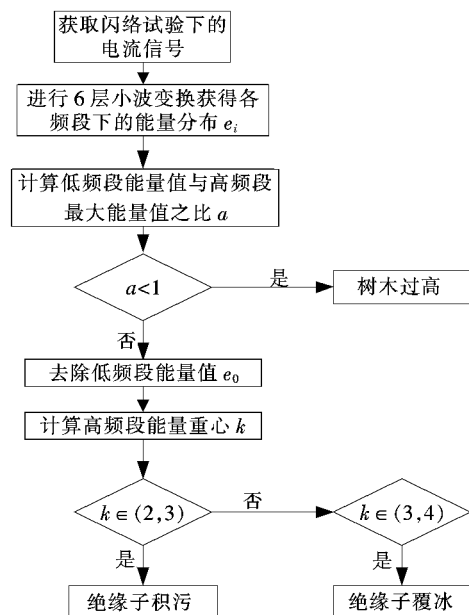


图 3 输电线路闪络诱因判断流程

Figure 3 Flow chart for identification method of line flashover inducement

2)对闪络电流信号进行 6 层小波变换,取得从低频到高频的 7 个频带重构信号,计算得到其小波能量值;

3)提取低频段能量值  $e_0$  作为初步辨识判据;

4)构造低频段( $V_6$ )能量值与高频段( $W_6 \sim W_1$ )最大能量值之比  $\alpha$  作为特征值,结合低频段能量值综合判别故障类型。若  $\alpha < 1$  且低频段能量  $e_0$  远大于其他两类故障,可判定为树木过高诱发的植被闪络,否则为金属性闪络;

5)在识别出树闪基础上,构造能量重心  $k$  以反映污闪与冰闪的高频段能量集中位置。若  $k \in (2, 3)$ ,可判定为绝缘子积污引发的污秽闪络;若  $k \in (3, 4)$ ,为绝缘子覆冰引发的闪络,实现对 3 类闪络诱因的分类判断。

6)将试验结果进行分析,验证辨识方法的有效性。

### 3.4 试验验证

在图 1 所搭建的试验平台分别对施加 1.2  $\mu\text{s}/50 \mu\text{s}$ 、50  $\mu\text{s}/2 500 \mu\text{s}$  的冲击对污闪、冰闪及树闪 3 类故障进行试验,将得到的暂态电流信号利用文中提出的判据对污闪、冰闪及树闪进行辨识,结果分析如表 3 所示。

表 3 输电线路闪络识别结果

**Table 3** Identification results of transmission line flashover

实际故障	冲击波类型/ ( $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ )	$e_0$	$\alpha$	$k$	识别结果
树闪		8.198 5	0.255 9	3.872 3	树闪
	1.2/50	7.437 2	0.205 3	3.804 1	树闪
		8.319 9	0.264 8	3.777 3	树闪
		0.148 3	0.444 0	2.667 7	树闪
	50/2 500	0.208 6	0.271 4	3.197 7	树闪
		0.145 3	0.369 3	2.990 9	树闪
污闪		139.911 7	4.396 8	2.932 6	污闪
	1.2/50	294.547 9	8.564 0	2.883 8	污闪
		246.570 5	3.708 3	2.559 7	污闪
		89.129 0	13.667 2	3.134 5	冰闪
	50/2 500	96.627 0	5.289 7	2.517 3	污闪
		104.690 0	5.836 5	2.607 2	污闪
冰闪		179.607 1	6.313 9	3.199 4	冰闪
	1.2/50	191.481 0	6.877 8	3.168 0	冰闪
		170.418 0	5.361 4	3.286 4	冰闪
		40.268 7	4.957 7	3.186 2	冰闪
	50/2 500	75.140 3	5.511 9	3.339 3	冰闪
		59.030 2	7.297 4	3.524 4	冰闪

对上述 3 类典型故障进行试验,共得到 114 组不同故障类型的暂态信号,在 1.2  $\mu\text{s}/50 \mu\text{s}$ 、50  $\mu\text{s}/2 500 \mu\text{s}$  冲击下分别采集到 48、66 组数据,再利用低频段能量值、高频段能量偏度与能量重心判据完成对以上 3 类故障类型的辨识,识别结果与实际故障类型基本一致。所有试验数据的识别准确率如表 4 所示,总的正确识别率可达 91.1%。由此可见,该文所提出的判据可有效识别冲击下的输电线路植被、污秽及覆冰闪络故障。

表 4 测试样本识别准确率

**Table 4** Test sample recognition accuracy

故障类型	冲击波类型/ ( $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ )	样本数	识别正确数	识别准确率/%
树闪	1.2/50	27	27	100.0
	50/2 500	22	22	100.0
污闪	1.2/50	9	7	77.8
	50/2 500	16	13	81.3
冰闪	1.2/50	12	10	83.3
	50/2 500	26	23	88.5
样本合计	—	112	102	91.1

## 4 结语

利用小波能量谱对输电线路工频与冲击联合作用下的输电线路闪络电流信号进行分析,得到如下结论。

1)植被闪络类高阻接地故障的低频段能量值远小于污秽或覆冰闪络这类金属性接地故障,且低频段能量值与最大高频段能量值之比远大于污秽和覆冰闪络,可据此综合判断是否发生植被闪络。

2)覆冰闪络较污秽闪络存在更多的电弧,其高频段信号较污秽闪络丰富,故其能量重心比污秽闪络的能量重心高,据此可区分污秽与覆冰闪络。

3)该文提出的辨识方法简单且辨识效果显著,完成了对污秽、覆冰与树闪 3 类故障闪络特征的分析,对准确判断输电线路绝缘状态具有一定应用价值与参考意义。

4)将该文方法应用于实际工程应用中,会存在录波器采样率不足的情况,后续研究可着重于在低频采样率下对输电线路中污秽、覆冰、风偏、鸟闪、山

火等故障进行分析辨识。

### 参考文献:

- [1] 陆佳政,周特军,吴传平,等.某省级电网 220 kV 及以上输电线路故障统计与分析[J].高电压技术,2016,42(1):200-207.  
LU Jiazheng,ZHOU Tejun,WU Chuanping,et al. Fault statistics and analysis of 220 kV and above power transmission line in province-level power grid[J]. High Voltage Engineering,2016,42(1):200-207.
- [2] 刘怀东,陈伟,高晓辉,等.从大停电观点分析一类输电线路树闪故障[J].电网技术,2007,31(1):67-69.  
LIU Huaidong,CHEN Wei,GAO Xiaohui,et al. Analysis of vegetation-related failures on transmission lines from the viewpoint of blackouts[J]. Power System Technology,2007,31(1):67-69.
- [3] 甘艳,顾德文,张昌,等.500 kV 架空线雷击过电压与冲击接地电阻关系[J].中国电力,2018,51(9):118-125.  
GAN Yan,GU Dewen,ZHANG Chang,et al. Relationship between lightning overvoltage and impulse grounding resistance of 500 kV transmission line[J]. Electric Power,2018,51(9):118-125.
- [4] 杨哲,樊平,王庆丰,等.高压输电线路用复合绝缘子内部间隙电场分析[J].电网与清洁能源,2019,35(6):1-8.  
YANG Zhe,FAN Ping,WANG Qingfeng,et al. Analysis of the electric field through internal gap of composite insulator used in HV transmission lines[J]. Power System and Clean Energy,2019,35(6):1-8.
- [5] 黄道春,卢威,姚涛,等.植被火条件下导线一板短空气间隙泄漏电流特性研究[J].电工技术学报,2019,34(16):3487-3493.  
HUANG Daochun,LU Wei,YAO Tao,et al. Study on leakage current characteristics of conductor-plane short air gap under vegetation fire condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(16):3487-3493.
- [6] 张举,王兴国,李志雷.小波包能量熵神经网络在电力系统故障诊断中的应用[J].电网技术,2006,30(5):72-80.  
ZHANG Ju,WANG Xingguo,LI Zhilei. Application of neural based on wavelet packet-energy entropy in power system fault diagnosis[J]. Power System Technology,2006,30(5):72-80.
- [7] 王钢,李海锋,赵建仓,等.基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别[J].中国电机工程学报,2004,24(4):139-144.  
WANG Gang,LI Haifeng,ZHAO Jiancang,et al. Identification of transients on transmission lines caused by direct lightning strokes based on multiresolution signal decomposition[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(4):139-144.
- [8] 廖学静,肖先勇,唐启红,等.采用小波能量谱的输电线路暂态扰动的模糊识别法[J].高电压技术,2009,35(10):2486-2497.  
LIAO Xuejing,XIAO Xianyong,TANG Qihong,et al. Fuzzy identification method of transient disturbance on transmission line using wavelet energy eigenvector[J]. High Voltage Engineering,2009,35(10):2486-2497.
- [9] Liu Yadong,Sheng Gehao,Hu Yue,et al. Identification of lightning strike on 500 kV transmission line based on the time-domain parameters of a traveling wave[J]. IEEE Access,2016,4:7241-7250.
- [10] 申元,马仪,孟见刚,等.基于BP神经网络的输电线路故障原因辨识研究[J].智能电网,2017,5(2):134-141.  
SHEN Yuan,MA Yi,MENG Jiangang. Research on transmission line fault reason recognition based on BP neural network[J]. Smart Grid,2017,5(2):134-141.
- [11] 吴昊,肖先勇,沈睿佼.小波能量谱和神经网络法识别雷击与短路故障[J].高电压技术,2007,33(10):64-68.  
WU Hao,XIAO Xianyong,SHEN Ruijiao. Lightning strike and fault identification by the wavelet energy-spectrum and neural network method[J]. High Voltage Engineering,2007,33(10):64-68.
- [12] 周凯,何珉,熊庆,等.基于两级分压器的6~35 kV系统过电压在线监测装置[J].高电压技术,2015,41(11):3583-3589.  
ZHOU Kai,HE Min,XIONG Qing,et al. On-line monitoring device for overvoltages in 6~35 kV grids based on two-stage divider[J]. High Voltage Engineering,2015,41(11):3583-3589.
- [13] 周凯,熊庆,何珉,等.10 kV 电网过电压监测装置设计及实测与仿真对比分析[J].高电压技术,2015,41(1):35-41.

- ZHOU Kai, XIONG Qing, HE Min, et al. Design of overvoltage monitoring device for 10 kV power grid and contrastive analysis of its measured and simulation waveforms[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 35-41.
- [14] Farzaneh M, Kiernicki J. Flashover problems caused by ice build up on insulators[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1995, 11(2): 5-17.
- [15] 万小东, 黄浩, 徐涛, 等. 绝缘子长串交流污耐压特性及海拔修正系数[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4144-4149.
- WAN Xiaodong, HUANG Hao, XU Tao, et al. AC contamination performance and its altitude correction factor of long string insulators[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4144-4149.
- [16] 李黎, 华奎, 李哲, 等.  $\pm 800$  kV 特高压换流站支柱绝缘子自然积污特性[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3591-3597.
- LI Li, HUA Kui, LI Zhe, et al. Contamination accumulating features of post insulators in 800 kV UHVDC convertor station[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3591-3597.
- [17] Pakonen P. Characteristics of partial discharges caused by trees in contact with covered conductor lines[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1626-1633.
- [18] 胡琴, 殷攀程, 吴彬, 等. 交流工作电压下染污方式对 220 kV 复合绝缘子覆冰及闪络特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4817-4824.
- HU Qin, YIN Pancheng, WU Bin, et al. Influence of polluting methods on icing and flashover characteristics of 220 kV composite insulators under AC working voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4817-4824.
- [19] 张虹. 输电线路故障原因综合辨识研究[D]. 山东: 山东大学, 2016.
- [20] 林力辉, 闫瑞航, 岳鑫桂, 等. 输电线路树闪故障的行波信号分析[J]. 南方电网技术, 2014, 8(3): 47-51.
- LIN Lihui, YAN Ruihang, YUE Xingui, et al. Traveling-wave analysis of transmission lines vegetation-related faults[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(3): 47-51.
- [21] 肖先勇, 张文海, 汪颖, 等. 基于故障相暂态信号特征的二维故障选线法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 178-184.
- XIAO Xianyong, ZHANG Wenhai, WANG Yin, et al. Two-dimensional fault line detection based on transient signal features of fault phase[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 178-184.