

# 基于支持向量机GIS局放小波包能量谱故障诊断

张育炜,石琦,武恩光

(河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

**摘要:**为了研究气体绝缘全封闭组合电器(GIS)在绝缘故障中如何区分故障类型进而判断故障源具体位置的问题,在实验室中设计了GIS高压导电杆上金属尖刺缺陷、盆式绝缘子表面尖刺缺陷2种物理模型,选取了脉冲电流法对局部放电信号进行量测。针对测量信号非平稳、频率高的特点,选择小波包变换将信号从时域转化为频域,细化频带以减少谐波及噪声对故障模式分量分离的干扰,计算主要频带能量并提取特征。在此基础上,融合了智能分类算法——支持向量机,将3个特殊频段能量占比代入支持向量机算法中进行训练并分类。实验结果表明,不同缺陷下能量谱图具有明显不同的特征。若将此故障在线诊断方法应用在GIS实际运行中,可以大大加强供电可靠性、运行安全性,减少人员工作量。且此方法具有时效性和一定的预见性,在GIS故障在线诊断中有较好的应用前景。

**关键词:**气体绝缘全封闭组合电器;脉冲电流;小波包变换;能量谱;支持向量机

**中图分类号:**TM595 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd21791

## Fault Diagnosis of Wavelet Packet Energy Spectrum of Partial Discharge Pulse in GIS Based on Support Vector Machine

ZHANG Yuwei, SHI Qi, WU Enguang

(School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China)

**Abstract:** In an attempt to study how gas insulated switchgear(GIS) can distinguish types of fault and specifically locate the source of fault in the insulation fault, two physical models of metal spike defects on the GIS high-voltage guide rod and disc insulator surface spike defects were designed in the laboratory. The pulse current method was selected to measure the partial discharge signal. Targeting the characteristics of non-stationary and high-frequency of the measurement signals, wavelet packet transform was adopted to convert the signals from time domain to frequency domain; the frequency band was refined to reduce the interference of harmonics and noise on the separation of fault mode components; energy of the main frequency band was calculated and features were extracted. Meanwhile, an intelligent classification method—the support vector machine (SVM) was incorporated, three special frequency band energy proportions were put into support vector machine algorithm for training and classification. The experimental results show that the energy spectrums of different defects have obviously different characteristics. If this online diagnosing method for faults is applied into the actual operation of GIS, the reliability of power supply and operation safety will be enhanced substantially while personnel workload will be lessened. With timeliness and some predictability, this method shows great prospect in online diagnosis of GIS faults.

**Key words:** gas insulated switchgear (GIS); pulse current; wavelet packet transform; energy ratio map; support vector machine(SVM)

气体绝缘全封闭组合电器(GIS)是由断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷器、母线、连接件和出线端等组成的组合电器设备,内充一定压力的SF<sub>6</sub>绝缘气体。GIS因其高度集成化,具有可靠性高、体积小、现场安装工作量小、抗干扰能力强等优点,受到了许多用户的好

评,目前在水电站、核电站、变电所中的应用越来越多<sup>[1]</sup>。

虽然GIS因其许多优点备受用户的青睐,但其运行中出现的问题也不容忽视。GIS的故障有多种,其中最常见的是以高压断路器为主的机械故障和由局部放电引起的绝缘故障。首先,常

见的机械故障大多发生在传动机构、触头、螺丝等部位。GIS由于前述部件具有缺陷而发生异响,长时间的异响会导致绝缘气体泄露,严重时会发生绝缘事故<sup>[2]</sup>。因其振动信号频谱波动性大、特征明显,工程上可以通过采集分析GIS在运行时产生的振动信号来识别故障种类或者机械状态。早期的研究也表明,通过在GIS的壳体上测量振动来检测机械故障是可行的<sup>[3-4]</sup>。

其次,在工程上,GIS绝缘故障的分析一般通过采集故障的振动信号并对其进行分析,来实现故障的在线诊断,但在实际情况中,振动信号的频谱过于复杂。相反,当GIS发生绝缘故障时,故障点的局部放电信号却拥有丰富的绝缘状态信息,这类信息既可以反映GIS在制造与装配过程中由于诸多原因而引起的结构缺陷,又可以于在线诊断中高效检测出故障的发生及严重程度。因此,局部放电的量测也是GIS绝缘故障诊断中有力的手段<sup>[5]</sup>。

GIS绝缘故障的发生大多是由于设备出现尖刺后发生局部放电,伴随有电流脉冲的产生,通过测量该脉冲电流从而检测到局部放电发生的方法称为脉冲电流法<sup>[6]</sup>。脉冲电流法通常用于电气设备出厂时的型式试验以及其他测试中,但其信号较为复杂,有很大波动。因此,很少有工作人员将此方法运用至GIS故障诊断中。但值得注意的是:当GIS发生绝缘故障时,脉冲电流的出现相当于故障的预警灯,所以对其监测是诊断高压设备绝缘故障的好方法<sup>[7]</sup>。本文发现小波包变换法适合处理此类信号,并能准确提取其特征。

在信号的处理分析中,许多情况下工程人员采用时频分析法对信号进行分析。方法有:经验模态分解法、小波分析、快速傅里叶变换、小波包变换等。经验模态分解法具有自适应的优点,无需对待分析物理过程的初值进行详细求解,但其存在模态混叠的问题<sup>[8]</sup>。小波分析的主要优点是在时域和频域同时具有良好的局部化性质,但是由于小波分析只对信号的低频部分做分解,且不能很好地分解和表示包含大量细节信息(细小边缘或纹理)的信号,如非平稳机械振动信号、脉冲电流信号等。快速傅里叶变换由于窗宽的限制,其实时性较低,一般适用于进行离线计算,不适用于故障的在线诊断<sup>[9]</sup>,且必须要求信号具有时域上的全部信息。但与之

不同的是,小波包变换可以对信号的高频部分提供更加精细地分解,且小波包变换的时域、频域局部化处理能力也较为突出<sup>[10]</sup>。由于GIS绝缘故障的局部放电信号频率较高、包含信息较多,因此,采用小波包变换对其进行分析更加准确、有效。

小波包变换是基于小波分析的基础上延伸出来的理论分析方法,此方法可以同时信号的低频与高频分量进行分解并自适应地确定不同频段上信号的分辨率<sup>[11]</sup>。因此,相较于小波分析而言,它对信号的高频部分也具有很清晰的分辨率。把信号的能量集中到更小、更均匀的频带中,时频特性比小波分析更精确。

随着计算机技术的不断发展,出现了许多智能分类算法,例如:贝叶斯信念网络、神经网络、支持向量机等算法。神经网络随发明较早,但其学习效率较低、具有局部极小值等问题<sup>[12]</sup>。随后发明的支持向量机算法不但可以解决上述缺陷,并且适合处理样本量少、非线性度大的数据分类,而试验所得的脉冲电流信号也具有高度非线性的特点,且数据点有限。因此,很适合于运用支持向量机解决绝缘故障位置分类问题。

为了方便判别出GIS发生绝缘故障的位置,设计了缺陷模型,采集其脉冲电流信号并利用小波包变换加以分析,通过对比不同缺陷的能量谱趋势及3个特殊频段能量占比最大值的范围来判别故障位置,实现对故障位置的粗略判别。之后,将3频段能量占比作为向量代入支持向量机算法中进行分类,来实现GIS绝缘故障位置的在线诊断。

## 1 缺陷模型与测量装置的设计

### 1.1 缺陷模型的设计

#### 1.1.1 高压导电杆上金属尖刺缺陷物理模型

在生产和装配GIS设备时,常会因不良加工、部件损坏或者组装出现刮擦而导致金属尖刺的出现,当GIS处于运行状态时,尖头突出会形成高场强区,进而致使局部放电的发生。试验中在高压导电杆上安装长度为50 mm、直径为1.5 mm与长度为70 mm、直径为1.5 mm的钢针来模拟实际缺陷。

#### 1.1.2 绝缘子表面尖刺物理模型

试验中在盆式绝缘子表面中部装设不同尺寸

径均为 1.5 mm,用来模拟 GIS 实际生产运行时,因装配不当或者各种放电现象而使得在绝缘子表面产生的金属尖刺。

### 1.2 脉冲电流的测量装置

试验所用 GIS 内装有标准大气压的 SF<sub>6</sub> 气体 (即 101 kPa),该装置由铝制成,基本结构为:内导体和外壳。其中,内导体外径为 70 mm,外壳外径为 376 mm,厚度为 8 mm。在试验过程中<sup>[13]</sup>,对局部放电产生的 GIS 外壳上脉冲电流进行了测量,如图 1 所示,将脉冲电流的检测频率设置为 20 MHz,测量出的数据放入计算机端进一步进行处理<sup>[14]</sup>。

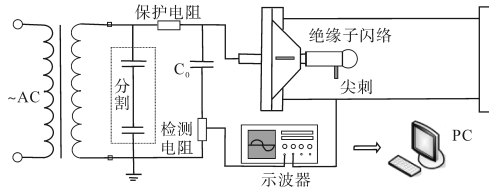


图1 脉冲电流法的试验原理图

Fig.1 Test schematic of the pulse current method

## 2 脉冲电流信号的小波包变换

### 2.1 基本理论分析

小波包变换实际是由小波包分解与小波包重构 2 部分组成,通过上述 2 个步骤,可以对信号能量的特征值进行提取。具体公式如下<sup>[15]</sup>:

给定正交尺度函数  $G(t)$  和小波函数  $H(t)$ , 可有下列递推关系式:

$$\begin{cases} \omega_{2n} = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_{0k} \omega_n(2t - k) \\ \omega_{2n+1} = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_{1k} \omega_n(2t - k) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $h_{0k}, h_{1k}$  为分辨率分析中的滤波器系数。当  $n=0$  时,  $\omega_0(t)=G(t), \omega_1(t)=H(t)$ 。上述的函数集合  $\{\omega_n(t), n \in \mathbf{Z}\}$  为  $\omega_0(t)=G(t)$  所确定的小波包。之后得出小波包系数递推公式和小波包的重构函数公式。

令  $f(t)$  为待分析信号, 设  $L_j^n f(t) \in U_j^n$ , 则  $L_j^n f(t)$  的表达式为

$$L_j^n f(t) = \sum_i d_i^{j,n} \frac{1}{2^j} \omega_n(2^j t - i) \quad (2)$$

式中:  $d_i^{j,n}$  为第  $j$  层上第  $n$  个小波包, 称为小波包系数。

因为下式:

$$L_j^n f(t) = L_{j+1}^{2n} f(t) + L_{j+1}^{2n+1} f(t) \quad (3)$$

所以小波包递推公式为

$$\begin{cases} d_k^{j+1,2n} = \sum_l h_{0(2l-k)} d_l^{j,n} \\ d_k^{j+1,2n+1} = \sum_l h_{1(2l-k)} d_l^{j,n} \end{cases} \quad (4)$$

最后,小波包的重构公式为

$$d_i^{j,n} = \sum_k g_0(l-2k) d_k^{j+1,2n} + \sum_k g_1(l-2k) d_k^{j+1,2n+1} \quad (5)$$

式中:  $g_0, g_1$  均为小波包重构滤波器。

$g_0$  与尺度函数有关,  $g_1$  与小波包函数有关。

小波包变换可以为 GIS 脉冲电流信号提供一种更加精细的信号时频分析, 将时域信号分解到多个频段内, 进而可以利用 2-范数求解出各频段的能量值, 因而非常适合提取特征向量<sup>[16]</sup>。

### 2.2 脉冲电流信号的小波包变换

图 2 中的信号为华北电力大学高压实验室的 GIS 设备模拟位于高压导电杆发生尖端局部放电与盆式绝缘子上发生沿面放电后的脉冲电流的时域信号, 在对其进行小波包变换时, 采样频率为 5 000 kHz, 根据采样信号的奈奎斯特频率为 2 500 kHz。由小波包分析基本原理可得, 对奈奎斯特频率为  $\omega_m$  的脉冲电流信号进行第  $i$  次分解, 可得到  $2^i$  个子频带, 每个子频带的宽度均为  $\omega_m/2^i$ 。高压导电杆上的尖刺尖端处电场集中, 当施加电压达到一定值时, 尖端出现电晕放电。而在实际运行过程中, 因绝缘故障而产生的放电会使得绝缘子表面形成由半导体或导体物质构成的尖刺, 进而畸变电场并引发局部放电。通过上述装置采集脉冲电流信号, 由于脉冲电流为时间域上的多段信号, 且具有周期性, 因此, 我们只选取第 1 段脉冲来进行分析。基于 Demy 小波基对脉冲电流信号进行 3 层分解, 按照频率大小对信号进行重排序, 之后, 得到 8 个小波节点的重构信号, 各频段均具有各自的小波包系数, 这为后续利用 2-范数作为各频段能量进行分析提供了条件。

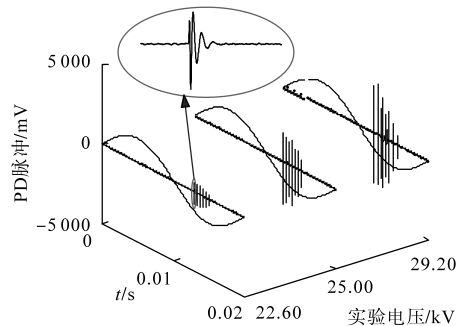


图2 脉冲电流的时域图像

Fig.2 Time domain image of pulse current

### 2.3 利用2-范数表示小波包变换后信号的能量

#### 2.3.1 帕塞瓦尔定理

帕塞瓦尔定理的定义为:一个函数平方的和(或积分)等于其傅里叶转换式平方之和(或者积分)。该定理指出,一个信号所含有的能量(功率)恒等于此信号在完备正交函数集中各分量能量(功率)之和。它表明信号在时域的总能量等于信号在频域的总能量,即信号经傅里叶变换后其总能量保持不变,符合能量守恒定律。

在工程研究中,帕塞瓦尔定理通常描述如下:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(f)|^2 df \quad (6)$$

式中: $x(f)$ 为 $x(t)$ 的连续傅里叶变换,其中, $f$ 为 $x$ 的频率分量,而非角频率。

对于离散时间信号,该理论表达式变换为

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x[n]|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |X(e^{j\omega})|^2 d\omega \quad (7)$$

式中: $X(e^{j\omega})$ 为 $x[n]$ 的离散傅里叶变换,即DTFT; $\omega$ 为 $x[n]$ 的角频率。

由于采用的小波包分解是正交分解,各个频段之间的信号相互独立,所以小波包分解与傅里叶变换一样均遵守帕塞瓦尔定理即能量守恒定律。

#### 2.3.2 利用2-范数表示小波包变换后信号的能量

在小波包变换中,原始信号 $f(x)$ 在矢量空间 $L^2(\mathbb{R})$ 上的2-范数定义为

$$\|f\|_2^2 = \int_{\mathbb{R}} |f(x)|^2 dx \quad (8)$$

因此,小波变换中信号2-范数的平方可以表征原始时域信号的能量。设小波包分解后第 $k$ 层第 $i$ 个频带的重构信号 $S_{ki}$ 对应的信号能量为 $E_{ki}$ ,则有:

$$E_{ki} = \int |S_{ki}(t)|^2 dt = \sum_{m=1}^N |X_m|^2 \quad (9)$$

式中: $N$ 为数据长度; $k$ 为小波包分解层数; $i$ 为分解频带的序号, $i=0,1,2,\dots,2^{k-1}$ ;  $X_m$ 为重构信号 $S_{ki}$ 离散点的幅值<sup>[17]</sup>。

## 3 基于小波包变换的脉冲电流能量提取

### 3.1 小波包变换的具体实施步骤

首先,对4种实验情况下不同电压等级的数据进行3层小波包变换,得到8个不同频段的图像,如图3所示。由图3可以发现能量主要集中在第1段,即0~310 kHz之间。为使得图像特征

更加明显,以便找到实验规律,对原始数据进行14层小波包分解,每个频带的宽度约为153 Hz。得出4种情况下的脉冲电流能量谱。

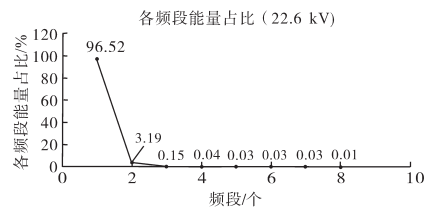


图3 3层小波包变换后的能量谱

Fig.3 Energy-ratio after 3-layer wavelet packet

### 3.2 脉冲电流能量占比的图像特征

由于本论文研究的目的是有效辨别GIS设备内不同位置发生的故障,需要找到不同故障的脉冲电流能量占比之间的主要区别,故可忽略掉能量占比小于1%的频段,并将其余点用直线连接构成折线图,方便观察图形趋势。处理后的图像如图4所示。

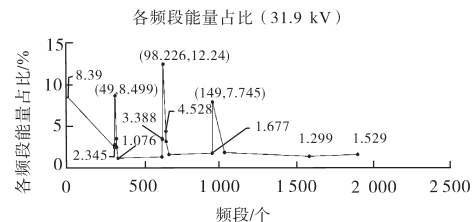
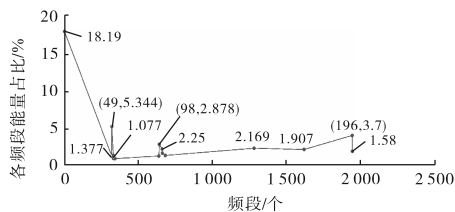


图4 忽略能量占比小于1%频段后的能量谱

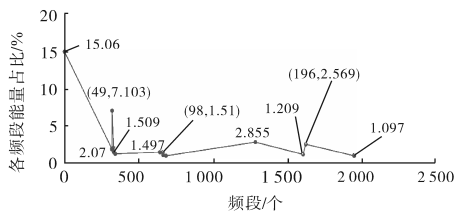
Fig.4 The energy ratio(without < 1%)

1) 试验1:此试验的基本环境为:人工凸起位于高压导电杆处,长50 mm,截面直径为1.5 mm的金属尖刺。通过对GIS施加22.6 kV,25.0 kV和29.2 kV电压后所得到脉冲电流能量谱如图5所示。由3幅图对比可知:整个折线的趋势呈“波浪”形;其次,因为每个频段之间所占频率宽度为153 Hz,而试验中的频率单位均是kHz级别,图像峰值所在频段的始末值映射到频率量上相差不大,只有153 Hz,所以,图像中的峰值所对应的一个频段范围内的频率值可以大致看作一个值(一般取这一频段所对应的频率范围的整数,下同)。因此,3种电压等级下,均是约在49 kHz,98 kHz和196 kHz处出现能量占比的峰值(为了方便观察,图中的峰值横坐标已做近似处理)。且随着电压的不断升高,高频段(210~310 kHz)能量占比总体来说逐渐减小。

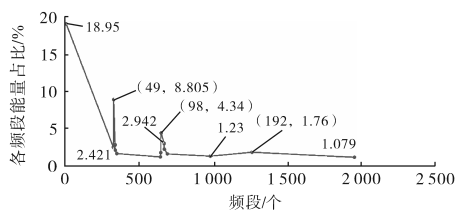
2) 试验2:此试验的基本环境为:人工凸起位于高压导电杆处,长70 mm,截面直径为1.5 mm的金属尖刺。相较于上一个试验,由于尖刺长度增加,当对GIS施加20.8 kV电压后,即可得到上



(a)22.6 kV电压下的脉冲电流能量谱



(b)25.0 kV电压下的脉冲电流能量谱



(c)29.2 kV电压下的脉冲电流能量谱

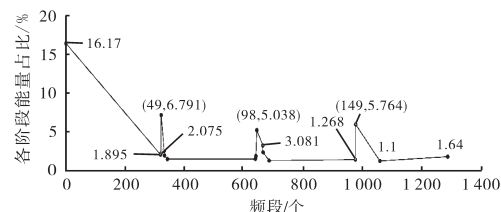
图5 试验1脉冲电流能量谱

Fig.5 Pulse current energy spectrum of test 1

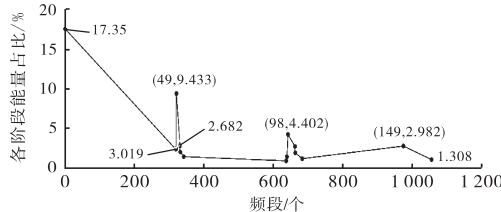
一试验中施加 22.6 kV 后所得到的脉冲电流能量谱,且第 3 个特殊频率值已由 196 kHz 减少至 149 kHz。这是由于有尖刺的存在,缩短了 GIS 内部导体间的绝缘距离,尖刺越长,绝缘距离越短,也就越容易发生局部放电现象,产生脉冲电流,且随着绝缘距离的缩短,局部放电持续时间更长,而脉冲电流信号的高频分量是在随着时间的增长而减少的,所以才会出现特殊频段缩减的现象。图像的其余特点与上一试验基本相同,能量谱如图 6 所示。

3) 试验 3: 此试验的基本环境为:人工凸起位于盆式绝缘子表面,长 50mm,截面直径为 1.5 mm 的金属尖刺。通过对 GIS 施加 28.1 kV, 31.9 kV 和 35.4 kV 电压后得出脉冲电流能量谱,如图 7 所示。在 49 kHz, 98 kHz 和 149 kHz 处出现能量占比的峰值,且在施加中高压后,该 3 频段能量占比有明显增加,且能量主要趋于 98 kHz 所示。由 3 幅图对比可知:整个折线的趋势呈“笔架”形状。高频段(210~310 kHz)能量占比逐渐减少。

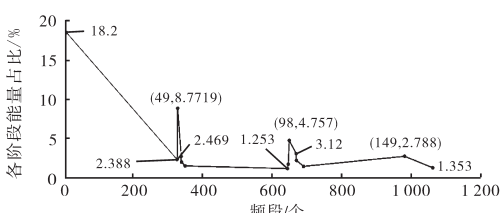
4) 试验 4: 此试验的基本环境为:人工凸起位于盆式绝缘子表面,长 70 mm,截面直径为 1.5 mm 的金属尖刺。试验过程中对 GIS 分别施加 28.3 kV, 30.4 kV 与 35.5 kV 电压,最后得出的能



(a)20.8 kV电压下的脉冲电流能量谱



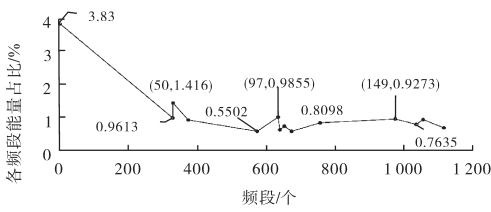
(b)23.5 kV电压下的脉冲电流能量谱



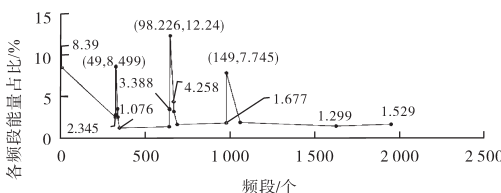
(c)28.1 kV电压下的脉冲电流能量谱

图6 试验2脉冲电流能量谱

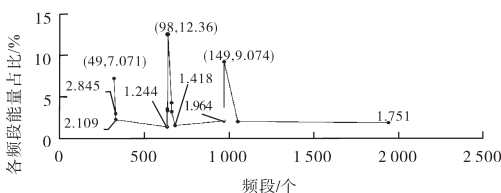
Fig.6 Pulse current energy spectrum of test 2



(a) 28.1 kV电压下的脉冲电流能量谱



(b) 31.9 kV电压下的脉冲电流能量谱



(c) 35.4 kV电压下的脉冲电流能量谱

图7 试验3脉冲电流能量谱

Fig.7 Test 3 pulsed current energy spectrum

量谱如图 8 所示。由 3 幅图对比可知:整个折线的趋势仍呈“笔架”形状,在 49 kHz, 98 kHz 和 149 kHz 处出现能量占比的峰值。但相较于上一试验,随着电压不断升高,3 处频率的能量占比均为先减小后增大,且能量主要趋于 98 kHz 处,高

频段(210~310 kHz)能量占比逐渐减少。

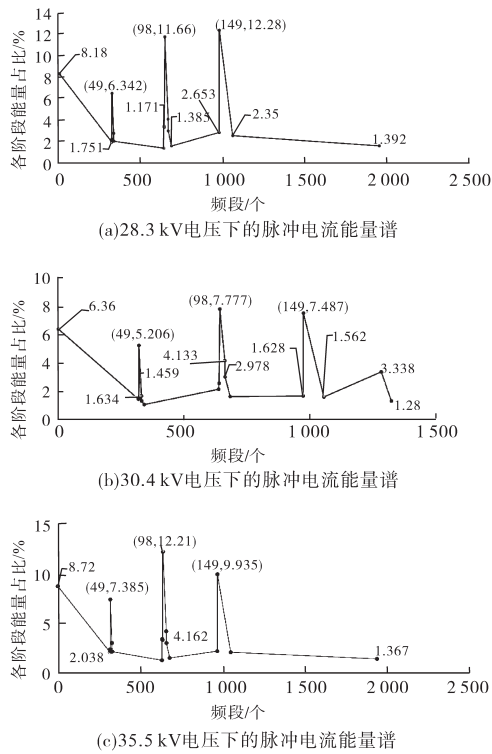


图8 试验4脉冲电流能量谱  
Fig.8 Test 4 pulsed current energy spectrum

### 3.3 不同故障位置之间的区别与辨识

相同故障位置下,由于尖刺长度的变化,导致导体绝缘距离发生变化,进而在不同的电压下,可以达到相近的能量占比,这里不再详述。

相较于不同的故障位置,从图像的角度出发,尖刺在高压导电杆上所得出的能量谱大致呈“波浪”形状,而尖刺在盆式绝缘子表面上所得出的能量谱大致呈“笔架”形状。产生这一区别的原因是:高压导电杆的导电性能较强,当发生局部放电时,脉冲电流信号由于前述原因随时间衰减速度较慢,因此能量占比的低频分量较大,3个特殊频段能量对比另一故障占比较低。由图像观察到前2组试验的低频分量(0~200段)占15%以上,而后2组数据均在9%以下,也可证明上述原因。反之,由于盆式绝缘子绝缘性较强,脉冲电流衰减较快,因此能量均分布在特殊频段所处的高频段。其次,当尖刺长度增加后,由于绝缘子较大的绝缘距离,缺陷长度的改变不会对脉冲电流产生很大影响,所以并未出现故障位于高压导电杆处的特殊频段缩减现象。因此,当GIS发生局部放电时,工作人员可以通过脉冲电流信号能量谱的对比大致得知故障的相应位置。

在GIS实际运行中,当发生故障时,由于脉

冲电流信号稳定性较差,图像的趋势对比无法成为有力的依据,工作人员需要通过具体数据的比对来实现故障位置的判别。由于上述多次试验中,总有相同的3个频段能量占比较高,且观察图像可知,2种故障位置的3个特殊频段所含能量相差较大。因此,对每个试验所得的约为90组数据共90×3×4组数据中3频段能量占比求和,经过纵向对比可以发现:每组数据能量占比之和的最小值范围均在30%~40%,且不同故障位置的数据相差不大。但能量占比之和的最大值却有较大区别:试验1与试验2的值在40%~50%,而试验3与试验4的值在60%~75%。造成这一差别的直接原因是:当尖刺位于盆式绝缘子表面时,第2个频段的能量占比大大增加,从而使得最大值的区间范围被拉大。通过2种故障位置能量占比之和最大值范围的比对,就可以粗略地进行判别。

## 4 基于支持向量机算法的故障诊断

### 4.1 支持向量机

支持向量机(support vector machine, SVM)算法是一种基于数理统计学的智能分类方法,于1964年被提出,上世纪九十年代后得到了快速发展。它是通过建立一个超平面作为决策曲面,使得样本之间的分割面达到最大<sup>[18]</sup>。通过将样本特征映射到高维空间,从而处理了非线性不可分的问题。SVM可以通过核方法进行非线性分类,是常见的智能分类算法之一,支持向量机算法的大致流程图如图9。

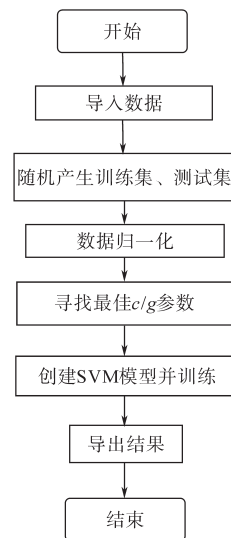


图9 支持向量机算法流程图

Fig.9 Algorithm flowchart of support vector machine

## 4.2 基于支持向量机算法的GIS绝缘故障诊断

根据前文所述方法步骤求解出每组数据3个特殊频段的能量占比,并将其作为特征向量 $X=[A_0, A_1, A_2]$ 代入SVM算法中进行训练。

由于本文研究的目的是判别不同位置的故障,因此,将试验1与试验2,试验3与试验4数据进行合并。每种故障每个电压取前20组能量占比,共计240组,放入训练集中,并把训练的类别号也放入数组中,对训练集进行训练。接着取每种故障每个电压21~30组共计120组能量占比,放入测试集中,用训练出来的参数对测试集进行测试。测试结果若为“+1”,则故障发生在高压导电杆;反之,则故障发生在盆式绝缘子。最后,将测试结果与实际故障类别对比,准确率为86.25%。

## 4.3 实例分析

取2种故障的不同电压等级下共8组数据代入SVM算法进行分类,最后的分类结果如表1所示。其中, $A_0 \sim A_2$ 为3频段能量占比。可以看出,有底色的部分为算法误判实例,虽无法做到全部准确判别,但每种故障只出现了一次误判,精确度较高。

表1 算例判别结果

Tab.1 Example discrimination results					
故障位置	施加电压 U/kV	$A_0/\%$	$A_1/\%$	$A_2/\%$	判别结果
高压导电杆	25.0	23.9	14.1	4.0	+1
	26.9	20.0	14.1	4.0	+1
	29.2	17.2	18.4	8.0	-1
	24.7	19.2	14.2	7.9	+1
盆式绝缘子	24.7	13.6	30.1	20.0	-1
	28.1	24.7	19.4	2.8	+1
	30.4	25.8	10.2	3.8	-1
	35.5	14.7	31.3	15.5	-1

## 5 结论

1)针对脉冲电流信号非平稳、持续时间短、能量大、迅速衰减的特点,将具有多分辨的小波包变换方法与能量守恒定律相结合,最后利用2-范数求得脉冲电流信号的能量占比。

2)分析了4种试验下的能量谱,发现当故障位于高压导电杆上时,图像基本呈“波浪”形状;当故障位于盆式绝缘子表面上时,图像基本呈“笔架”形状。同种故障位置下,随着尖刺长度的增大,达到相近能量占比趋势的电压有所下降。

3)对比2种不同的故障位置,3频段能量占

比之和最大值的范围有所区别:当故障位于高压导电杆上时,数值范围为40%~50%;当故障位于盆式绝缘子表面时,数值范围为60%~75%。

4)将部分数据的3频段能量占比作为特征向量代入支持向量机算法中进行分类,最后用剩余数据进行测试,发现准确率为86.25%。

5)对脉冲电流信号进行小波包变换,并利用得出的能量占比进行分析,再将特殊3频段能量占比作为特征向量代入支持向量机算法中进行分类,进而对故障位置进行大致判别,为GIS绝缘故障的分析与在线诊断提供了一种新思路。

上述GIS绝缘故障在线诊断技术若是应用在生产实践中,会给工作人员带来极大的便利。由于GIS属于组合封闭电器,在发生故障后进行传统人工检修的方法具有工作量大、成本高、危险性高等缺点。然而,将鲜有人研究的GIS脉冲电流信号作为判断故障的依据,并运用智能算法进行故障判别的方法可以大大减少工人的工作量,不需打开设备就可以了解故障的种类、位置,且具有故障探知的时效性。目前,也有以故障后产生的噪声作为特征信号的方法,但声信号较脉冲电流信号抗干扰能力差,且测点不易选择。另外,智能算法的快速识别可以使得工作人员迅速、及时地做出相应处理,相较于传统方法极大地减少了故障持续时间、用户停电时间,大大加强了供电可靠性、设备运行的安全性。最后,由于此种算法只对第1段脉冲电流信号进行特征分析,所以具有一定的故障预知性,暨在故障发生的初期就对其进行正确判别,这样可以减少GIS故障发生后的损失,节约一定的维修成本。因此,利用GIS发生局部放电时产生的脉冲电流作为分析对象,并结合支持向量机算法进行故障判别的方法对实际GIS运行提供了有力的安全保障。

## 参考文献

- [1] 杨哲,邢敬,高阳,等.GIS设备异响振动信号特性及检测系统研究[J].山东工业技术,2015(21):216-218.
- [2] 王超.GIS机械故障振动检测技术研究[J].内燃机与配件,2020(6):139-140.
- [3] 李秀广,吴旭涛,师愉航,等.基于声学成像的GIS机械故障带电检测系统[J].高压电器,2019,55(5):42-46.
- [4] 刘勇业,马宏忠,姜宁,等.GIS沿面放电缺陷的振动检测法分析[J].广东电力,2017,30(3):71-75,80.

(下转第114页)

[23] Schon A, Bakran M M. A New HVDC-DC Converter with Inherent Fault Clearing Capability[C]//15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013: 1-10.

[24] Veilleux E, Ooi B. Power Flow Analysis in Multi-terminal HVDC Grid [C]//IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition,2011.

[25] Hingorani N G, Gyugyi L. Understanding Facts: Concept and Technology of Flexible AC Transmission Systems [M]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press,2000.

[26] Veilleux E, Ooi B. Multi-terminal HVDC with Thyristor Power-flow Controller[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2012,27(3):1205-1212.

[27] Kim S, Cui S, Sul S. Modular Multilevel Converter Based on Full Bridge Cells for Multi-terminal DC Transmission[C]//16th European Conference on Power Electronics and Applications,2014:1-10.

[28] Zhang X, Chen J, Ma Y, *et al.* Bandwidth Expansion Method for Circulating Current Control in Parallel Three-phase PWM Converter Connection System [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014,29(12): 6847-6856.

[29] Li B, Shi S, Xu D, *et al.* Control and Analysis of the Modular Multilevel DC De-icer with STATCOM Functionality [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63 (9) : 5465-5476.

[30] Ranjram M, Lehn P W. A Multiport Power Flow Controller for DC Transmission Grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016,31(1):389-396.

[31] Bahram M, Baker M, Bowles J, *et al.* Integration of Small Taps Into Existing HVDC Links [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995,10(3):1699-1706.

[32] Luth T, Merlin M M C, Green T C. Modular Multilevel DC/DC Converter Architectures for HVDC Taps[C]//16th European Conference on Power Electronics and Applications, 2014: 1-10.

[33] Lin W, Wen J, Cheng S. Multiport DC-DC Autotransformer for Interconnecting Multiple High-voltage DC Systems at Low Cost[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12):6648-6660.

[34] Gowaid I A, Adam G P, Massoud A M, *et al.* Quasi Two-level Operation of Modular Multilevel Converter for Use in a High-power DC Transformer with DC Fault Isolation Capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (1):108-123.

[35] Xing Z, Ruan X, You H, *et al.* Soft-switching Operation of Isolated Modular DC/DC Converters for Application in HVDC Grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016,31(4):2753-2766.

[36] Gowaid I A, Adam G P, Ahmed S, *et al.* Analysis and Design of a Modular Multilevel Converter with Trapezoidal Modulation for Medium and High Voltage DC-DC Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5439-5457.

收稿日期:2018-03-15  
修改稿日期:2018-04-13

(上接第105页)

[5] 李继胜,赵学风,杨景刚,等. GIS典型缺陷局部放电测量与分析[J].高电压技术,2009,35(10):2440-2445.

[6] 陶诗洋,冯义,张天辰,等. 基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测装置[J].电力系统保护与控制,2019,47(9):145-149.

[7] 张利,屈斌,王永宁,等. GIS壳体振动机理和局部放电优化诊断与应用[J/OL].中国电力,2020[2020-04-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200403.1208.012.html>.

[8] 李月英,林家泉,李宗帅. 基于频率约束的经验模态分解的谐波检测方法[J].电气传动,2015,45(8):72-76.

[9] 李金,张喜铭,时伯年,等. 一种基于瞬时无功功率理论的改进谐波检测算法[J].电气传动,2020,50(3):92-96,106.

[10] 崔芮华,胡文达,耿丽恺. 基于小波重构信号奇异点的航空故障电弧检测[J].电气传动,2018,48(6):69-72.

[11] 陈石,张兴敢. 基于小波包能量熵和随机森林的级联H桥多电平逆变器故障诊断[J].南京大学学报(自然科学),2020,56(2):284-289.

[12] 张锦,唐友亮,张贞艳,等. 两电机系统模糊PID支持向量机逆控制[J].电气传动,2018,48(12):59-62.

[13] Liu B W, Ma H Z, Ju P, *et al.* Partial Discharge Diagnosis by Simultaneous Observation of Discharge Pulses and Vibration Signal[J].IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(1):288-295.

[14] Wang C N, Liu B W, Xu H H, *et al.* Novel Method for Partial Discharge Detection in Gas Insulated Substation[C]//IEEE 2016 China international Conference on Electricity Distribution,2016:10-13.

[15] 王伟,李兴华,陈作彬,等. 基于小波包变换的爆破振动信号能量熵特征分析[J].爆破器材,2019,48(6):19-23.

[16] 李强,车文龙. 基于改进粒子群优化神经网络的电机故障诊断[J].电气传动,2020,50(1):103-108.

[17] 郭立全,王克明. 基于小波包能量谱的航空发动机故障特征提取方法[J].沈阳航空航天大学学报,2014,31(1):12-15.

[18] 郭庆,何劫恺,苏海涛,等. 基于心理声学及支持向量机的扬声器异常音检测算法[J].华东大学学报(自然科学版),2020,46(2):275-281.

收稿日期:2020-04-18  
修改稿日期:2020-05-08