

基于Teager能量谱极限学习机的GIL局部放电识别

戴锋¹,陈轩¹,王立宪²,马宏忠²

(1. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211102;

2. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要:对气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)设备进行局部放电故障诊断与定位对其内部绝缘保护具有重要意义,由于GIL呈全封闭结构,现有外置式的检测方式对内部缺陷检测不够敏感,无法实现局部放电的量化描述与定位。因此,提出一种基于Teager能量谱极限学习机的局部放电故障诊断与定位方法。以脉冲电流能量波动特征与频段为分析对象,首先,利用Teager能量算子提取不同放电故障位置的能量波动特征;其次,利用小波包变换对不同位置的放电故障能量特征频段占比进行计算;最后,结合极限学习机(ELM)对GIL设备局部放电故障进行定位与诊断。结果表明,不同位置的局部放电缺陷能量波动差别明显,利用小波包变换分析后的特殊频段能量占比可以作为故障分类的依据。通过与其他在线监测方法的对比,表明ELM可以实现GIL设备局部放电故障的有效定位与诊断。

关键词:气体绝缘金属封闭输电线路;局部放电;脉冲电流;Teager能量谱;小波包变换;故障诊断与定位

中图分类号:TM595 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd23165

Partial Discharge Recognition of GIL Based on Teager Energy Spectrum ELM

DAI Feng¹, CHEN Xuan¹, WANG Lixian², MA Hongzhong²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, Jiangsu,

China; 2. College of Energy and Electrical Engineering, HoHai University,

Nanjing 211100, Jiangsu, China)

Abstract: Partial discharge fault diagnosis and location of gas insulated metal enclosed transmission line (GIL) is of great significance for its internal insulation protection. Because GIL is fully enclosed structure, the existing external detection method is not sensitive to the internal defect detection, so it is unable to realize the quantitative description and location of partial discharge. Therefore, a partial discharge fault diagnosis and location method based on Teager energy spectrum extreme learning machine was proposed. Firstly, Teager energy operator was used to extract the energy fluctuation characteristics of different discharge fault locations. Secondly, wavelet packet transform was used to calculate the proportion of characteristic frequency band of discharge fault energy at different positions. Finally, combined with extreme learning machine (ELM), the partial discharge fault of GIL equipment was located and diagnosed. The results show that the energy fluctuation of partial discharge defects at different positions is obviously different, the energy proportion of special frequency band analyzed by wavelet packet transform (WPT) can be used as the basis of fault classification. Compared with other on-line monitoring methods, ELM can effectively diagnose and locate partial discharge fault of GIL equipment.

Key words: gas insulated metal enclosed transmission line (GIL); partial discharge (PD); pulse current; Teager energy spectrum; wavelet packet transform (WPT); fault location and diagnosis

气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)是我国跨区域、长距离电能输送的重要输电设备,已先后

应用在天生桥水电站、溪洛渡水电站和苏通GIL综合管廊等重要输变电建设之中^[1-3]。局部放电

基金项目:国网江苏省电力公司重点科技项目(J2020040)

作者简介:戴锋(1973—),男,硕士研究生,高级工程师,Email:zjdf0992@sohu.com

通讯作者:王立宪(1997—),男,硕士研究生,Email:837213579@qq.com

(PD)是造成GIL内部绝缘裂化、影响GIL设备绝缘性能的主要原因^[4]。

目前,国内外对于GIL及其他高压设备的局部放电监测主要包括振动法、暂态对地电压(transient earth voltage, TEV)定位法、超声波法、特高频法以及脉冲电流法。文献[5-7]利用振动法,以GIL设备异常振动信号为研究对象,利用振动信号特征对GIL内部局部放电故障进行诊断。但在实际工程中,GIL振动信号包含GIL的固有振动信号与噪声信号等干扰,而且由于振动信号的监测极易受外界环境的影响(例如GIL设备相间涡流引起的振动^[8]),导致测得的频谱过于复杂,这些因素都影响着利用振动信号对GIL设备内部局部放电进行诊断的可靠性。文献[9-10]对TEV和超声波在高压开关柜局部放电诊断方面的研究表明,超声波虽不受电磁干扰,但是由于超声波在固体中的衰减速度较快,导致利用其对高压设备内部局部放电进行检测灵敏度较低;而当高压设备内部产生局部放电时,产生的暂态对地电压信号会首先在设备内部传播,利用TEV定位法对局部放电进行定位准确性不高,同时TEV信号较易受到电磁干扰。文献[11]表明特高频检测法灵敏度虽高,但在实际工程中易受到电磁干扰。

GIL设备内部的局部放电缺陷大多由设备在出厂、运输、安装以及运行过程中造成的尖端金属污染物引发。GIL内部为稍不均匀电场,绝缘形式主要为气体-固体复合绝缘体,内部的局部放电首先以区域性轻放电为主,在放电过程中SF₆的分解会产生对绝缘子有腐蚀性的物质^[12],随着气体-固体复合绝缘体绝缘性能的不断退化,最终GIL内部局部放电造成放电击穿。

相比于其他检测方法,脉冲电流检测法具有更丰富的局部放电信息,也常被用作高压设备局部放电的离线检测方法^[13]。由于脉冲电流包含信息复杂,目前尚没有有效的分析方法对其内部放电特征信息进行分析,所以利用局部放电产生的脉冲电流实现GIL故障定位与诊断的研究相对匮乏。

在信号分析与处理方面,快速傅里叶变换方法常用于振动信号的分析,其处理非线性与非平稳信号的过程复杂,准确性也不具有优势;经验模态分解法(empirical mode decomposition, EMD)常被用作处理非平稳与非线性信号,但其存在模态混叠与端点效应^[14-16]。相比之下,Teager能量算子解调方法不仅能估计复杂信号的能量波动,

又可以实现时间、频率、能量包络的多重分析^[17]。文献[18]利用Teager能量算子对电缆中的局部放电信号传播行为进行研究,精准度较高;文献[19]利用灰色关联度和Teager能量包络联合对轴承振动行为进行分析进而得出早期故障诊断结果。小波包变换可以有效对高频率序列进行特征提取,同时在时域与频域的优化方面也比傅里叶变换、小波变换等方法更具有优势^[20]。

在智能学习算法方面,机器学习算法(support vector machine, SVM)需大量的样本数据进行训练;BP神经网络需要人工参与设置权值和阈值等参数,去依赖性不够理想;卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)是深度学习领域中性能较为优异的方法,但由于其反向传播过程中的平移不变性,导致该算法在反向传播过程中需要大量的数据进行训练与试错。极限学习机(ELM)是基于前馈神经网络(feedforward neuron network, FNN)的改进方法,优化了反向传播过程,只需人工设置隐藏层的初始节点个数即可,适用于非监督学习问题,具有一定的自适应性。

针对脉冲电流检测法以及其他方法中存在的不足,文中提出了基于Teager能量谱极限学习机的GIL局部放电故障诊断与定位方法,设计了两种局部放电缺陷。首先,利用Teager算子对脉冲电流能量波动进行计算,形成Teager能量谱;其次,利用小波包变换对特殊能量频段占比进行计算;最后,以特殊频段能量占比为依据,结合ELM实现GIL设备局部放电故障诊断与定位。

1 试验系统及信号获取

1.1 试验平台及缺陷设置

文中建立了110 kV的GIL试验平台来模拟尖端放电与绝缘子沿面放电两种放电缺陷。

GIL故障模型包含调压器、滤波器、隔离保护装置、220 kV无局放变压器、分压器以及110 kV GIL试验腔体。GIL设备导电杆直径60 mm,腔体内直径360 mm,试验腔体含石英观察窗便于拆卸与观测,试验平台如图1所示。

信号同步采集系统使用HCPD-2622型局部放电检测仪,最大采样频率20 MHz,放电测量灵敏度0.1 pC,放电量量程0.1~10 000 pC。

故障设置参数。尖端放电缺陷设置需结合GIL设备额定电压与结构参数,为防止起始电压过高,尖刺长度不宜过短,确定为65 mm,材质为

铝,用绝缘胶带固定在导电杆上;绝缘子沿面放电铝线长度 55 mm,用绝缘胶带固定于绝缘子凸面,缺陷设置如图 2 所示。



图1 试验现场

Fig.1 Experimental site

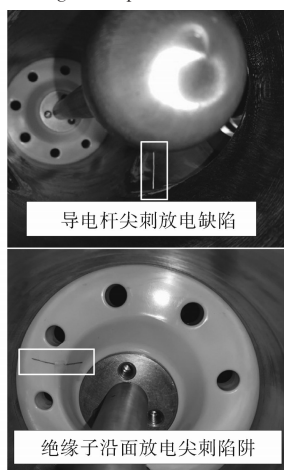


图2 缺陷设置

Fig.2 Defect setting diagram

1.2 试验标准及参数

缺陷模拟试验在工频周期电压下开展,试验标准及参数如下:

1)电源系统:试验系统功能来自 380 V 常规电源。为了调节试验电压,将 380 V 电源接入感应调压器,调压器实现出口电压的精确控制。将调压器输出接入升压器,将电压升高至试验电压。

2)调压器:额定容量 56 kV·A;额定输入电压 380 V;额定输出电压 0~420 V。

3)升压器:额定电压 0.4/250 kV;额定电流 125/0.2 A;测量绕组电压比 1/1 000。

4)GIL 脉冲电流测量时,需要考虑放电的相位,因此采用电容器串联的方式设计了分压器,分压变比 1/1 000。

5)为了增强试验击穿的保护,试验系统接入了 110 kΩ 保护电阻和 430 pF 耦合电容;HCPD-1-2 型测量阻抗输出脉冲电压波形,阻值为 75 Ω。

6)利用信号采集仪可以实时测量放电量、放

电次数、工频周期内的放电波形与统计相位。脉冲电流试验电路如图 3 所示。

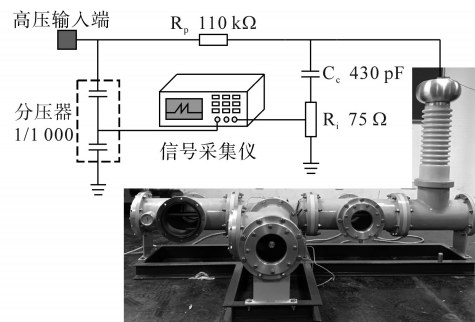


图3 脉冲电流法检测电路图

Fig.3 Circuit diagram of pulse current method

1.3 试验步骤

试验过程采用逐步升压法,从初始电压 0 kV 逐渐升高电压,当观察到第一次出现脉冲电流信号时确定为该位置的局部放电起始电压 V_0 ,并保持恒压 3 s,重复此试验 5 次。在确定起始电压之后按步长 5 kV 逐步升高电压,同时通过局部放电检测仪记录不同阶段的脉冲电流信号,当出现密集放电信号时保持恒压 3 s,具体的试验流程如图 4 所示。

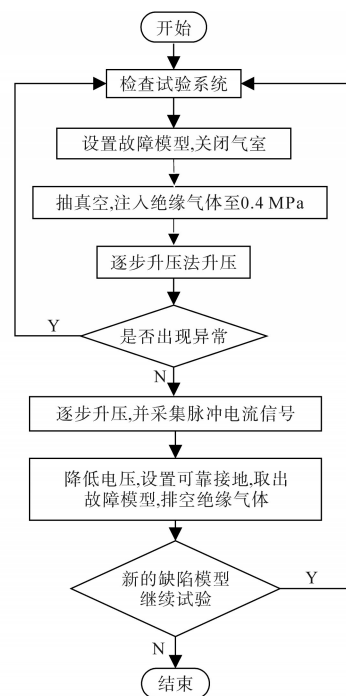


图4 试验流程图

Fig.4 Experiment flow chart

1.4 信号获取

图 5 为利用试验平台测取的高压导电杆发生尖端放电与绝缘子发生沿面放电后的脉冲电流的时域信号,图 6 为两种不同位置 PD 缺陷单次放电脉冲电流时域图。

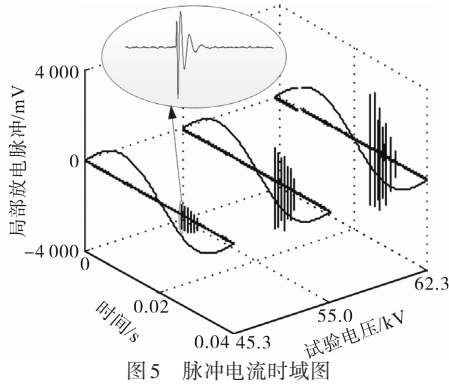


图5 脉冲电流时域图

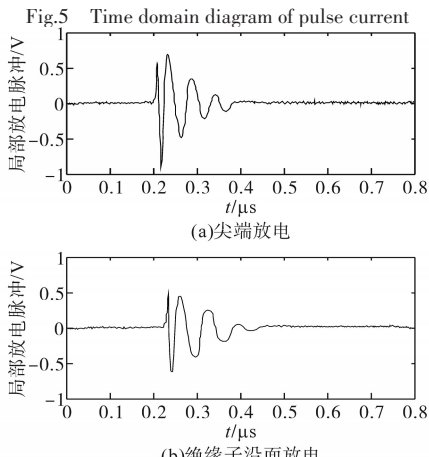


图6 单次脉冲电流信号

Fig.6 Single pulse current signal

2 信号分析与特征提取

2.1 Teager-Kaiser 能量谱

由于Teager-Kaiser能量算子在待分析信号的每一时刻,都利用三个相关样本值来进行能量计算,所以其对时间变化率较为敏感,可以精准捕捉信号能量的波动特征,适合于分析脉冲电流这种瞬时变化较快的物理量。

定义Teager-Kaiser算子(TKEO)为 $f(\cdot)$,若待分析信号 $x(t)$ 为连续信号,其可以表示为

$$f[x(t)] = [x'(t)]^2 - x(t)x''(t) \quad (1)$$

式中: $x'(t), x''(t)$ 分别为信号 $x(t)$ 的一阶求导和二阶求导。

若待分析信号 $y(t)$ 为离散信号,求导可以利用时间差代替,表示为

$$f[x(n)] = x^2(n) - x(n+1)x(n-1) \quad (2)$$

2.2 DESAs 算法

为对信号的包络 $v(t)$ 、频率 $y(t)$ 与能量联合进行分析,Maragos等人基于TKEO算子提出了离散能量分离算法(discrete energy separation algorithms, DESA-s),包含DESA-1a, DESA-1, DESA-2三种类型,经过对比,其运算能力最好的为DESA-1

型^[20],表示如下:

$$\begin{cases} v(t) = \arccos \left\{ 1 - \frac{f[x(t)] + f[x(t+1)]}{4f[x(t)]} \right\} \\ |y(t)| = \sqrt{\frac{f[x(t)]}{1 - \left\{ 1 - \frac{f[x(t)] + f[x(t+1)]}{4f[x(t)]} \right\}^2}} \end{cases} \quad (3)$$

2.3 基于Teager能量谱的放电脉冲信号分析

对两种放电情况进行Teager-Kaiser能量变化特征分析,绘制Teager能量谱如图7与图8所示。

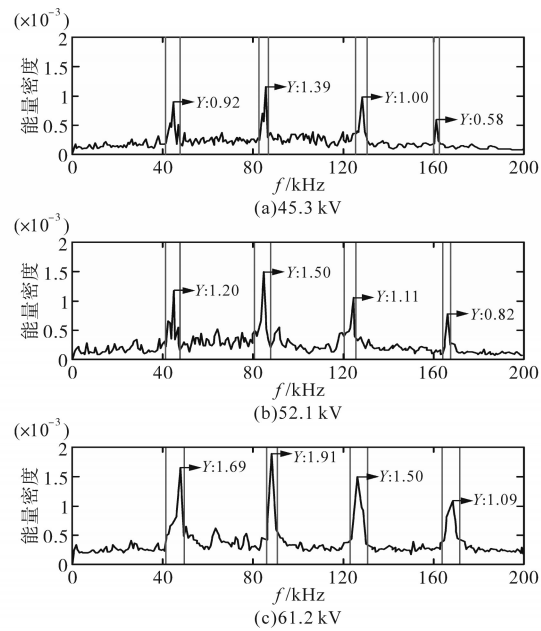


图7 尖端放电Teager能量谱

Fig.7 Teager energy spectrum of tip discharge

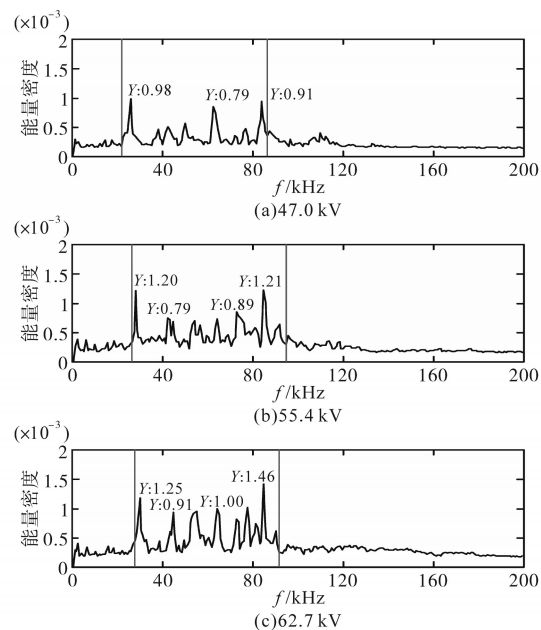


图8 绝缘子沿面放电Teager能量谱

Fig.8 Teager energy spectrum of the surface of insulator discharge

通过两种放电情况 Teager 能量谱的对比可以发现:两种放电情况的能量密度都发生在 20 kHz 以上的频段,随着电压等级的增加,两种放电情况的能量密度也有所增加,但能量密度发展整体趋势不受影响,故放电脉冲能量波动特征不会因为电压等级的变化而产生本质变化。

针对放电故障的不同位置,从 Teager 能量谱角度出发,尖端放电脉冲能量密度呈“尖刺”状,且其能量密度分布多集中在 40~50 kHz, 80~95 kHz, 120~130 kHz 以及 160~170 kHz 频段;绝缘子沿面放电脉冲能量密度呈“波浪”状,其能量密度分布多集中在 20~95 kHz 频段。

产生这一现象的原因在于二者的故障位置不同,尖端放电位置发生在导电杆上,在发生局部放电时电压等级高、脉冲电流大,能量占比较大,又因导电杆导电性能好,脉冲电流衰减速度快,因此在其故障特征频段范围内能量密度普遍偏高且呈“尖刺”状上升下降;而发生绝缘子沿面放电时脉冲电流较小,能量占比较小,且由于绝缘子优异的绝缘特性导致脉冲电流衰减较慢,所以能量密度波动难以达到尖端放电的效果,而呈“波浪”状。因此,在 GIL 设备发生局部放电时,工作人员可以依据 Teager 能量谱的波动特征对放电类型与放电位置进行粗略判断。

2.4 基于小波包变换的脉冲能量特征提取

在 GIL 实际运行过程中,脉冲电流信号不够稳定,虽得出尖端放电与绝缘子沿面放电两种放电脉冲的能量波动特征,但在 20~95 kHz 范围内两种放电现象均存在能量波动,工作人员仍需具体工况数据才能对放电故障类型与位置进行准确诊断。

为进一步提高 GIL 局部放电故障定位与诊断的准确性,文中采用小波包变换(WPT)对 Teager 能量谱进行分解,提取能量特征。对三种电压等级下两种放电情况的 Teager 能量谱进行 13 层小波包变换,对于尖端放电取 0~200 kHz 全部频段,对于绝缘子沿面放电取 0~118 kHz 频段,单个频段宽度为 112 Hz,由于试验与 Teager 能量谱频率单位均为 kHz 级别,在进行小波包变换时单个图像频段的始末频率量相差不大,最大为 112 Hz,故图像中将一个频段内的峰值用该频段内整数值的平均值表示。其次,由于研究的目的是寻找不同放电情况能量占比的主要区别,故图中尽可能忽略能量占比小于 5% 的频段,将其余待分析

点绘制成折线图便于观测,峰值坐标已进行近似处理,如图 9 和图 10 所示。

可以发现,尖端放电情况在三种电压等级下的能量占比峰值均在 46 kHz, 91 kHz, 125 kHz 出现,绝缘子沿面放电情况在三种电压等级下的能量占比峰值均在 23 kHz, 52 kHz, 90 kHz 出现,且

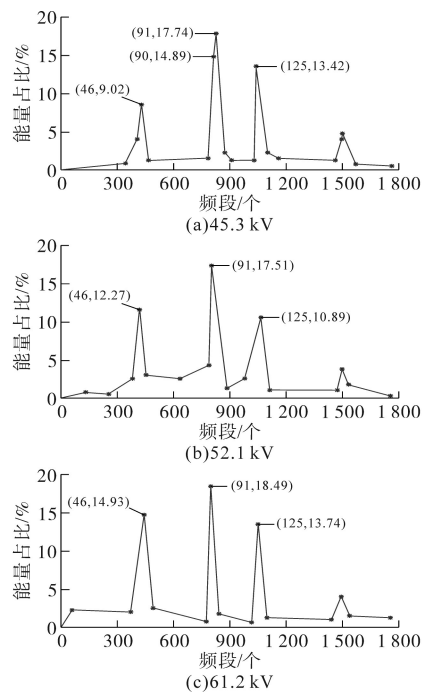


图 9 尖端放电脉冲电流能量特征图谱

Fig. 9 Energy characteristic spectrum of tip discharge pulse current

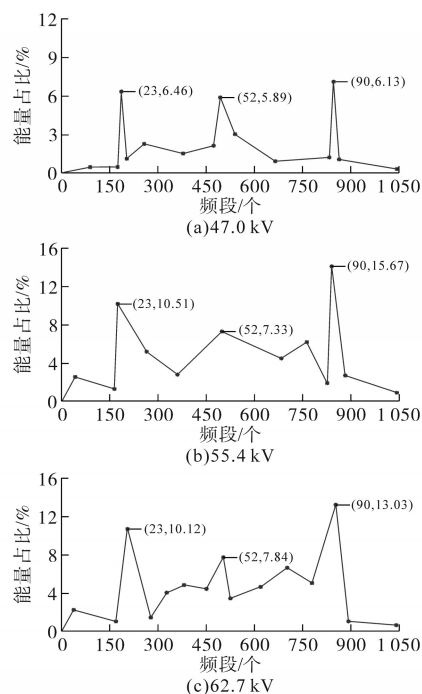


图 10 沿面放电脉冲电流能量特征图谱

Fig. 10 Energy characteristic spectrum of surface of insulator discharge pulse current

随着电压等级的提高,两种放电情况峰值的能量占比整体有所提高。除此之外,两种故障位置的峰值能量出现的3个特殊频段相差较大。因此,将两种试验所得三个电压等级各50组数据中的3个频段能量占比求和,经对比发现,尖端放电与绝缘子沿面放电的能量最小值占比分别为25%~35%,23%~34%,相差不大;而能量最大值占比分别为50%~60%,30%~40%。这也印证了Teager-Kaiser能量谱中的能量波动特征,由于尖端放电的能量波动呈“尖刺”状,能量最大值与最小值相差较大,占比区分明显;而绝缘子沿面放电的能量波动呈“波浪”状,能量最大值与最小值相差较小,占比区分近似。造成这一现象的物理试验原因是:当尖刺位置在绝缘子表面时,第二频段的能量占比增加,峰值区间变大。结合Teager能量谱的能量波动特征与小波包变换后的能量特征占比可以对局部放电故障位置进行大致判别。

3 基于ELM的GIL局部放电定位与诊断

3.1 极限学习机

极限学习机(ELM)作为一种人工智能算法,其优势在于设定的只有隐藏层节点个数,在运行过程中网络的输入权值以及隐元的偏置无需人为调整,并且产生的最优解有且仅有一个。其结构图如图11所示,ELM最终表示如下:

$$f_{ELM}(x) = \sum_{j=1}^L \beta_j g_j(x) = \sum_{j=1}^L \beta_j g_j(\omega_j \times x_j + b_j) \quad (4)$$

式中: x 为输入向量; L 为隐藏层单元数量; β_j 为权重向量,位于隐藏层和输出层之间; ω_j 为位于输入和隐藏层输出之间的权重; g_j 为激活函数,文中使用对于特征值感知更为明显的Sigmoid函数作为激活函数; b_j 为偏置。

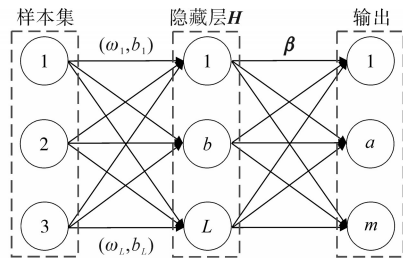


图11 ELM结构图

Fig.11 Structure diagram of ELM

ELM的反向传播过程如下:

$$T = H\beta \quad (5)$$

其中

$$H = \begin{bmatrix} g(\omega_1 \times x_1 + b_1) & \cdots & g(\omega_L \times x_1 + b_L) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ g(\omega_1 \times x_D + b_1) & \cdots & g(\omega_L \times x_D + b_L) \end{bmatrix}_{D \times L}$$

$$T = \begin{bmatrix} t_1^T \\ \vdots \\ t_D^T \end{bmatrix}_{D \times m} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_L^T \end{bmatrix}_{L \times m}$$

式中: H 为隐藏层输出矩阵; T, β 分别为训练集目标矩阵与权重向量矩阵; m 为输出数量; D 为样本数量。

3.2 诊断流程

由于本文研究的目的不仅是对局部放电类型进行诊断,而且还要对其故障位置进行判别,故将三种电压等级下尖端放电与绝缘子沿面放电实验数据各50组进行合并,按4:1的比例进行模型训练与测试,每种电压等级下,1~40组用来训练,41~50组用来测试,高压导电杆故障位置设为“0”,绝缘子故障位置设为“1”,诊断流程如图12所示。最后,将诊断输出与实际结果进行对比,得出综合故障诊断准确率96.8%,具有较高的准确性。

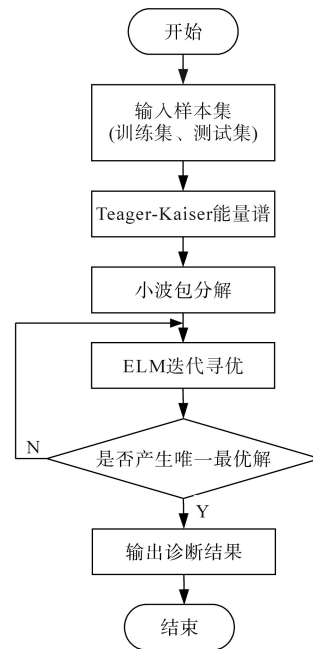


图12 诊断流程图

Fig.12 Diagnosis flow chart

3.3 实例分析与对比

选取尖端放电和绝缘子沿面放电三种电压等级各2组数据,共12组数据输入ELM模型进行分类,诊断结果如表1所示。3个频段能量占比分别用Class₁~Class₃表示。

表1 故障模拟诊断结果

故障位置	施加电压 U/kV	$Class_1/\%$	$Class_2/\%$	$Class_3/\%$	判别结果
导电杆	45.3	12.7	15.4	13.3	0
		9.8	16.2	13.1	0
	52.1	15.9	18.7	16.0	0
		13.7	17.7	12.0	0
	61.2	16.4	19.9	14.5	0
		17.2	18.7	17.6	1
绝缘子	47.0	12.3	15.6	15.1	1
		14.7	14.5	12.9	1
	55.4	16.3	14.5	12.8	1
		18.9	18.0	14.3	1
	62.7	19.6	17.7	16.4	1
		20.1	22.3	19.8	1

由表1可知,在61.2 kV导电杆处的尖端放电(由字体加粗标出)出现了误判现象,其余诊断均正确,精确度较高。为对比文中方法与其他在线监测方法的诊断速度与准确性,文中与MEEMD^[7]、卷积神经网络^[21]以及Kohonen方法^[22]进行了对比,检验标准为响应时间 T_r ,存储花销,判别准确度 δ ,结果如表2所示。

表2 模型评价指标

故障位置	诊断方法	响应时间 T_r/s	存储花销/ mb	判别准确度 $\delta/\%$
导电杆	MEEMD	62.3	124.6	32.2
	卷积神经网络	10.7	26.4	88.3
	Kohonen	33.1	45.3	56.1
	文中方法	6.7	12.4	95.4
绝缘子	MEEMD	75.3	184.6	27.7
	卷积神经网络	9.9	24.0	87.6
	Kohonen	26.7	39.6	61.8
	文中方法	5.2	11.9	97.3

结合表2可以发现,在四种方法中效果最不理想的是MEEMD方法,由于此方法需对放电信号进行多次分解与处理,导致其响应时间较长,所需存储花销也更大,同时此方法只适用于对是否产生局部放电故障进行诊断,而不能对于故障位置进行判别;Kohonen方法诊断效果较MEEMD方法有所提升,但该方法需要逐个计算竞争层节点个数以及多次人工设置参数,导致该方法也需要一定的响应时间与存储花销,同时算法的去依赖性也很低。对比发现,卷积神经网络与文中方法表现较好,相比卷积神经网络,文中方法省去了卷积和池化等操作,也无需大量训练数据,对

于局部放电的脉冲能量特征与频段提取,具有一定的针对性。结合表中检验标准,验证了文中方法对于GIL局部放电的故障定位与诊断具有一定的有效性。

4 结论

针对基于脉冲电流的GIL局部放电故障定位与诊断方法研究的不足,文中设计了两种不同类型与位置的局部放电缺陷,并提出基于Teager能量谱极限学习机的GIL局部放电故障定位与诊断方法,得出结论如下:

1)根据三种电压等级下尖端放电与绝缘子沿面放电的Teager能量谱,发现当故障位于导电杆上时,局部放电的脉冲能量波动呈“尖刺”状,当故障位于绝缘子上时,局部放电的脉冲能量波动呈“波浪”状。同种故障类型与位置下,达到相近能量密度峰值趋势与电压等级呈正相关;

2)在不同故障位置,3个特殊频段的能量占比之和的最大值的波动范围有显著区别,尖刺放电占比50%~60%,绝缘子沿面放电占比30%~40%,根据能量占比联合Teager能量谱基本可以确定故障发生位置;

3)对Teager能量谱进行小波包变换,提取特殊频段特征,对特殊频段能量占比进行分析并作为特征代入极限学习机进行分类与诊断,综合准确率达到96.8%,可以实现对于GIL局部放电故障的有效定位与诊断。

参考文献

- [1] 黄志高. 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)[M]. 北京:中国电力出版社,2018.
Huang Zhigao. Qi ti jue yuan jin shu feng bi shu dian xian lu (GIL)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [2] 李鹏,颜湘莲,王浩,等. 特高压交流GIL输电技术研究及应用[J]. 电网技术,2017,41(10):3161-3167.
Li Peng, Yan Xianglian, Wang Hao, et al. Research and application of UHVAC gas-insulated transmission line[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3161-3167.
- [3] 刘泽洪,王承玉,路书军,等. 苏通综合管廊工程特高压GIL关键技术要求[J]. 电网技术,2020,44(6):2377-2385.
Liu Zehong, Wang Chengyu, Lu Shujun, et al. Key technical parameters of UHV GIL in Sutong utility tunnel project[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2377-2385.
- [4] Fletcher P L, Degen W. A summary of the final results and conclusions of the second international enquiry on the reliability of high voltage circuit-breakers[C]//Reliability of Trans-

- mission and Distribution Equipment, 1995, IET, 2002.
- [5] Liu B W, Ma H Z, Ju P, *et al.* Partial discharge diagnosis by simultaneous observation of discharge pulses and vibration signal [J]. IEEE Trans. on Dielect. and Electric. Insula., 2017, 24(1): 288-295.
- [6] He L, Li S T, Zhou D B, *et al.* Analysis method of abnormal condition in GIS based on ultrasonic detection[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, IEEE, 2016:570-573.
- [7] 臧旭, 马宏忠, 吴金利, 等. 基于改进集总经验模态近似熵的GIS放电故障诊断[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 129-137.
Zang Xu, Ma Hongzhong, Wu Jinli, *et al.* Diagnosis of GIS discharge fault based on MEEMD approximate entropy[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 129-137.
- [8] 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]. 中国电力, 2022, 55(3): 80-86.
Zhang Li, Qu Bin, Wang Yongning, *et al.* GIS shell vibration mechanism and partial discharge optimization diagnosis[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 80-86.
- [9] 王鹏, 刘玉婷, 邹阳, 等. TEV和超声波检测法在开关柜局部放电检测中的应用评述[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 75-83.
Wang Peng, Liu Yuting, Zou Yang, *et al.* Application of TEV and ultrasonic detection methods in partial discharge detection of switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 75-83.
- [10] 罗思敏, 田妍, 郑邦利, 等. 开关柜局部放电检测技术应用[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 204-208.
Luo Simin, Tian Yan, Zheng Fuli, *et al.* Application of partial discharge detection technology in switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 204-208.
- [11] 邹阳, 周克宽, 刘明军, 等. 局部放电特高频检测装置抗电磁干扰性能的量化评估方法研究 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(10): 2275-2282.
Zou Yang, Zhou Qiukuan, Liu Mingjun, *et al.* Research on quantitative evaluation on anti-electromagnetic interference capability of ultra high frequency partial discharge detection instrument[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(10): 2275-2282.
- [12] 侯志强, 郭若琛, 李军浩. 直流电压下SF6/N2混合气体沿面局部放电特性[J]. 电工技术学报, 2020, 35(14): 3087-3096.
Hou Zhiqiang, Guo Ruochen, Li Junhao, *et al.* Partial discharge characteristics of the surface discharge in SF6/N2 of the mixed gas under DC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14): 3087-3096.
- [13] 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.
Tao Shiyang, Feng Yi, Zhang Tianchen, *et al.* High-voltage switch cabinet partial discharge on-line monitoring device based on pulse current method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 145-149.
- [14] Leob L B, Meek J M. The mechanism of the electric spark[M]. California: Stanford University Press, 1941.
- [15] 彭华, 朱永利, 袁胜辉. 风电场集电线路单相接地故障组合测距[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 88-97.
Peng Hua, Zhu Yongli, Yuan Shenghui. Combined fault location for single-phase grounding of wind farm collection line[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 88-97.
- [16] 张若兵, 金森, 杜钢. 基于EMD与DTW算法的振荡波下电缆局部放电定位方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 273-281.
Zhang Ruobing, Jin Sen, Du Gang. Method of partial discharge localization for cable under oscillatory wave voltage conditions based on EMD and DTW algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 273-281.
- [17] 王望望, 邓林峰, 赵荣珍, 等. 基于二次聚类分割与Teager能量谱的滚动轴承微弱故障特征提取[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 246-253.
Wang Wangwang, Deng Linfeng, Zhan Rongzhen, *et al.* Weak fault feature extraction of rolling bearing based on secondary clustering segmentation and teager energy spectrum[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(13): 246-253.
- [18] 刘波, 孟祥震, 迟鹏, 等. 基于EMD和Teager能量算子的电缆局部放电辨识[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 36-42.
Liu Bo, Meng Xiangzhen, Chi Peng, *et al.* Cable partial discharge identification based on EMD and Teager energy operator [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 36-42.
- [19] 杨超, 杨晓霞. 基于灰色关联度和Teager能量算子的轴承早期故障诊断[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 224-229.
Yang Chao, Yang Xiaoxia. Early fault diagnosis of rolling bearing based on GRD and TEO[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(13): 224-229.
- [20] 高云鹏, 李峰, 陈婧, 等. 基于Teager-Kaiser能量算子Rife-Vincent窗频谱校正的电压闪变测量[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 248-256.
Gao Yunpeng, Li Feng, Chen Jing, *et al.* Voltage flicker measurement using the Teager-Kaiser energy operator based on Rife-Vincent window spectral correction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 248-256.
- [21] 张聪聪, 王刚, 高栋, 等. 基于卷积网络的GIS局部放电缺陷诊断方法与应用[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(3): 72-80.
Zhang Congcong, Wang Gang, Gao Dong, *et al.* Partial discharge pattern recognition based on convolutional neural network[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(3): 72-80.
- [22] 江杰波, 陈珂, 施永贵, 等. 基于Kohonen网络的典型绝缘缺陷局部放电模式识别[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 43-48.
Jiang Jiebo, Chen Ke, Shi Yonggui, *et al.* Partial discharge recognition of typical insulation defect based on Kohonen network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 43-48.

收稿日期:2021-03-06

修改稿日期:2021-05-16