

[HHT算法]

基于HHT算法的固体绝缘开关柜局部放电智能识别方法

文/程维新

窑街煤电集团有限公司金河煤矿

提出基于HHT算法的固体绝缘开关柜局部放电智能识别方法。设置采样装置收集放电信号的信息数据，通过存储传送至上机位，然后在灰度图谱的分割中完成局部放电特征的提取，归一化处理后基于HHT算法分析局部放电信号。根据能量振荡反映，获得信号的端点极值，在数据训练中实现局部放电的智能识别。实验证明，所提方法可提升放电识别的准确度，可应用于开关柜局部放电的智能识别。

在开关柜的运行中，固体绝缘材料容易受到各种因素的侵蚀，致使开关柜内部绝缘材料损坏，而缺少了绝缘材料的防护，开关柜内则会产生局部放电。局部放电故障又会使绝缘材料的内部发生持续故障，导致其性能降低，缩短使用寿命，使得开关柜使用成本增加。因此，对于固体绝缘开关柜内局部放电的智能识别成为目前电力行业的一个重点研究方向。但是局部放电故障并非突发性状况，而是由于绝缘材料的逐步损坏导致的设备在不断的放电过程中逐渐积累，最后形成的开关柜故障，因此可以通过定期对开关柜内部进行问题识别，检测绝缘材料是否出现放电现象。随着技术及识别手段的不断发展，超声波识别、传感器技术及机器学习等越来越多的新型识别方法能够针对开关柜内的不同故障进行对点分析。本文选择了基于HHT算法对绝缘材料的局部放电区域进行分析识别，完成对开关柜内材料故障的优化。

固体绝缘开关柜局部放电智能识别方法

1. 采集局部放电信号

由于局部放电过程并非突发性状况，是一个由弱到强持续发生的过程。因此，为了避免缺少检测

导致开关柜内长期放电损坏设备，首先对开关柜内的局部放电信号进行采集，采集装置如图1所示。

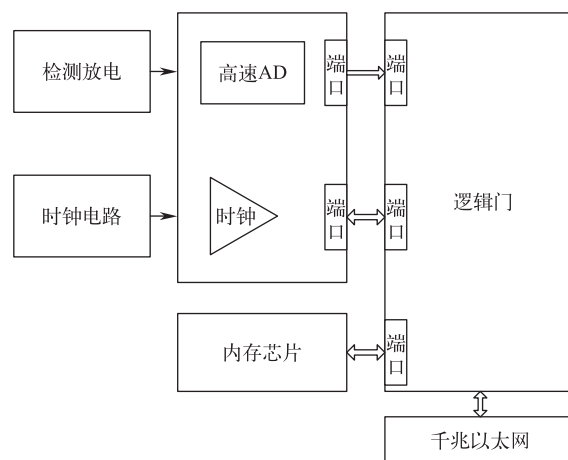


图1 采集装置示意图

该装置基于逻辑门，通过高速AD对局部放电信号进行连续采集、储存及上传。首选通过局部放电的时间以及特点，设定对应的采样频率，对放电信号数据做到实时采样，在内存芯片所开拓的缓存区域中暂时存储采样数据，通过以太网，将所采集的数据上传至固定机位。然后对局部放电信号进行分析，通过放大以及滤波等处理过程，得到可以用于

下一环节的放电信号，并将其传输至模拟机位中。

2. 提取局部放电特征

对局部放电信号采集、处理及上传后，需要对已有放电信号进行放电特征的提取，提取局部放电的相关过程，然后将其作为识别算法进行输入。

开关柜在运行过程中，由于几根母线的分布是平均的，因此想要确定开关柜内绝缘装置的位置具有一定的困难。为了解决对于局部放电信息位置的依赖，本文使用基于PRPD灰度图谱引申出的 Δt 图谱进行局部放电信号的特征提取。该图谱能够从所采集的放电信号中演化出相应的放电图谱，进而从图像及统计特征两个方面提出局部放电信号的特征值。为了准确提取特征值以完成对局部放电的智能识别，如何提取有效的放电图谱特征是关键环节。

在灰度图谱中，不同的放电信号的图像都可以视为一个平面物体。首先在图像的某点中将其视作图像的原点矩，在不停地矩阶划分中，针对灰度图谱选择其为二维矩阵。设定灰度图在二维矩阵中的大小，进而通过原点矩来描述灰度图像的特征值。

而对灰度图像进行二维矩阵化后，处理其中所传达的信息，并且分析图像呈现数据，得到图谱中的信号参数。虽然无法得到具体的放电位置和瞬时信息，但是也能作为对局部放电信号进行提取过程中的辅助方法。因此，为了进一步定位放电类型以及放电位置，本文在傅氏分析法之外采用周期性放电特征分析的方式，对局部放电产生时周围的周期性放电进行特征提取，构建相应的特征向量，并且将特征分类作为缺陷分类基础，实现对开关柜的智能识别的初步分类。

在特征提取的过程中，对于重复性放电特征提取方法为针对获取的图像数据计算二维矩阵中的均值

$$x' = D_{\sigma}^{-1}(x - E(x)) \quad (1)$$

式中， x 为二维矩阵中所体现的参数数据； $E(x)$ 为 x 的期望值； D_{σ} 为 x 的标准差。然后对计算出的特征向量的标准差作二值化处理，并且进一步构造图像中循环放电处的特征向量，对灰度图像数据进行重复性特征分析的周期

$$E_{3i} = \int |x_{3i}|^2 dt = \sum_{j=1}^n |x_{3i,j}|^2 \quad (2)$$

式中， n 为频段内的分解系数。

它不仅连接了小波包变换的常数变换，也是对 E_{3i} 进行归一化处理，然后构造特征向量 T 。而后对数据进行周期性叠加分析，并进行归一化处理，最后对归一化后的数据进行二值化，得到局部放电信号的特征向量。

3. 基于HHT算法分析局部放电信号

对局部放电信号进行局部特征提取后，在HHT算法的基础上对局部放电信号进行分析，获得放电类型及成因，同时获得放电时间以及对开关柜的影响。HHT算法的核心为经验模态分解，即对信号中的三条差值函数进行分解，通过上下包络线的求取，完成对信号中趋势变化的极值判断，最后得到平均值，用于判断信号处于的端口位置。

由于包络线产生波动，并不是固定状态，因此，对于差值函数的分解产生一定的影响，导致分解得到的分量失真，缺少对原始数据中的足值分析，也就无法反映真实的信号信息。为了解决该问题所产生的误差，对于不同长度的数据序列，数据端点所能产生的效应也不同。因此，为了改变将数据长短划分的方法，本文选择在延拓次数较少的情况下分析端头周期，对于信号分析的影响较小。

可以根据通过信号分解得到的信号振荡能量的强弱进行数据端口上的划分，通过原始的成分信号可以看出，经过分解得到的数据信号，与原有信号在端点处的变化并不大，因此，越低层的信号能量越弱，可以根据该信息差分析出放电信号的位置以及放电周期。

4. 模态混叠比对局部放电信号

通过对放电信号的周期及位置的分析，运用模态混叠法对局部放电信号进行比对。在数据采集环节，通过时间窗技术，将上述流程中的采样结果按照时间结构置于不同长度的时间窗内。时间窗的尺度需要满足一定的要求，通过窗内起始点和结束点的设定，使得每个时间窗都具有独特性。通过对时间窗内数据的分解，得到分量以及瞬时频率，在局部放电信号的周期中进行周期的减法，再次分解时间窗。在此次分解的时间窗内寻求模态混叠，若存在模态混叠，则将分解结果作为数值输出。对以上各个不同时间窗按照上述流程进行反复分解以及筛查，获得混加频率。

首先对时间窗内的极值进行定义，通过计算极

大值及极小值间的连线斜率 K ，来判断正常数据中是否有超过极值的 K' 。当 $K>K'$ 时，则以 K 为起点，开始记录数据。将变动的数据以时间窗为单位分割，一方面保证分割后极值点的存在；另一方面消除极值点中的端点效应，得到频率 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ ，然后推出数据长度，再次分解至出现不同的频率，判断该数据段是否具有模态混叠，若未出现，则表明不存在模态混叠。然后将发生模态混叠的时间窗进行时间上的定义，检测模态混叠振荡信号的表达式为

$$x(t)=\begin{cases} 0.1\sin(2\pi\times 0.1t) \\ \sin(\pi t+2.5)+\sin(0.5\pi t)+\sin(0.2\pi t)+e^{-t} \end{cases} \quad (3)$$

式中， e^{-t} 为信号振荡的衰减系数。

先对时间窗的数据进行整体分解，得到实际局部放电信号。基于极值点密度的信号分段时间窗技术找出混叠模态，显现淹没在趋势信号里的小范围极值点变化趋势。对分段叠加信号和两区四机系统的联络线功率振荡信号进行分析，识别局部放电信号。

5. 实现开关柜局部放电的智能识别

局部放电过程具有一定的随机性，在单个周期内的放电次数和脉冲时间间隔存在较大差别，仅通过单个工频周期的放电数据难以提取有效的统计特征参数。因此，在局部放电类型识别中，如果仅以单个周期放电脉冲作为样本进行特征量提取，会导致局部放电类型的特征量计算结果分散性大，同一放电类型下的特征量差异化明显，对放电类型识别产生较大影响。

局部放电的智能识别流程：将上述中的训练样本及数据输入到相应的训练区间中，在信号采样的基础上分为训练组和测试组，经过相应参数下的网络常规训练，根据结果显示的训练情况，调整训练规则，反复优化。得到隐含层第一层节点，以及第二层表现最优的节点数据，因此获得了最佳隐含层数目及训练数据，并且得到训练准确度要求。通过测量神经网络对应的数据拟合程度，获取测试结果与实际输出的差值，训练分类器，实现HHT算法下开关柜局部放电的识别^[5]。

实验论证

1. 实验说明

为了验证本文所设计的局部放电的智能识别方

法的准确性，分别采用基于可变性图谱约束的局部放电识别方法为对照组 I，基于超声波的具体绝缘开关柜局部放电智能识别方法为对照组 II，基于HHT算法的固体绝缘开关柜局部放电智能识别方法为实验组，设置对比实验。从历史的局部放电的开关柜中抽取部分资料作为本次实验的样本来源。取某时段内的绝缘固体发生放电的合集作为这次仿真应用的分析数据，提取样本431份，分为4组，分别为样本1、样本2、样本3和样本4，用三种识别方法在仿真实验中对样本中的局部放电进行识别，最后得出各方法的识别精确度。

2. 实验准备

由于开关设备自动化和智能化的普及，开关柜上集成了众多的传感器、控制器和电动机构等，导致其周围电磁环境非常复杂。即便增加噪声传感器进行双路采样也难以彻底滤除。因此，本文基于实验室环境下的局部放电采样数据，结合随机脉冲干扰的基本特征，人为制造随机脉冲干扰加入到局部放电实验数据中。随机脉冲干扰的特点是发生时间和幅值均没有规律，因此在每个工频周期图谱内随机生成幅值和相位变化的干扰数据。叠加250个工频周期，最终得到带有干扰信号的局部放电数据。

利用MATLAB软件搭建BP神经网络结构，将采集到的四种局部放电样本数据分为两部分，选取其中70%作为模式识别的训练集，另外30%作为验证集，四种放电类型的样本数量分布见表1。

表1 样本数量分配

放电类型	训练接样本数/份	验证集样本数/份
尖端放电	108	48
悬浮放电	105	44
内部放电	112	46
沿面放电	106	45

将真实局部放电数据的特征量作为BP神经网络输入，得出在不同特征量条件下的识别结果。

3. 实验结果

对4组放电样本进行提取和判断，不同识别方法的识别准确度见表2。

根据表2的实验结果可得，在第一组样本中，实验组对48份样本数据的识别，一份出现了误差，在不同的放电类型中，存在一定的差别，在四组样本中的平均识别准确率为97.68%。而对照组 I 的

识别准确度为89.92%，对照组Ⅱ的识别准确度为79.65%。从三组识别方法的准确度可以得出，基于HHT算法的固体绝缘开关柜局部放电智能识别方法具有相对较高的识别准确度，能够在一定程度上解决开关柜内局部放电问题。

表2 不同识别方法的识别精准度

序号	样本数量/份	识别正确数量/份		
		实验组	对照组Ⅰ	对照组Ⅱ
1	48	47	42	44
2	44	44	40	39
2	46	45	38	40
4	45	43	42	36
平均准确度（%）		97.68	89.9	79.65

结束语

本文提出的改进HHT算法的开关柜局部放电智能识别方法具备一定的准确度，而且可以大致确定局部放电的时间，由于端点效应的存在，时间分界线难于精确定位，还有待进一步提高。HHT算法能够为局部放电的识别提供良好的技术支持。EA

(收稿日期：2023-07-20)

参考文献

[1] 冯旗，邵振华，余祉宏．基于PRPD图谱的气体绝缘开关柜多缺陷局部放电模式识别[J]．电气应用，2023，42(6)：48-54.

[2] 王婷婷，丁浩，张周胜．基于深度学习和多模型融合的局部放电模式识别方法[J]．电力工程技术，2023，42(3)：188-195.

[3] 徐晓刚，侯春光，陈正擎．基于超高频和声学成像联合检测的开关柜局部放电研究[J]．电器与能效管理技术，2023(4)：34-39.

[4] 朱超越，徐良荣，戚伟，等．基于K平均最近邻法的开关柜现场验电安全检测[J]．分析仪器，2023(1)：84-89.

[5] 黎阳羊，胡金磊，赖俊驹，等．基于均值漂移聚类的开关柜局部放电异常检测[J]．电气传动，2022，52(10)：63-69.

[6] 唐波，邱浩宇，吴慧娟．高压电缆接头局部放电声光联合检测系统设计与实现[J]．电气应用，2021，40(5)：10-20.

(上接第 51 页)

光伏发电系统一直在追求与火电平价上网，成本是其中一个很大的考量因素。上述方案1是主要的选型方案，断路器可在逆变器发电系统中运行平稳。从实际的运行效果来看，本文所研究分析的选型方案是切实可行的。EA

(收稿日期：2023-07-19)

参考文献

[1] 孙海涛，韩志刚，刘毅．1 500 V直流光伏发电系统中塑壳断路器的性能研究[J]．太阳能，2022(3)：70-76.

[2] 尹天文，高孝天．双碳背景下低压电器行业发展思考[J]．电器与能效管理技术，2023(1)：1-7.

[3] 马钊，张恒旭，赵浩然，等．双碳目标下配电系统的新使命和新挑战[J]．中国电机工程学

报，2022(19)：6931-6945.

[4] 王鹏，韩筛根，林涛．应用于光伏发电系统的专用断路器[J]．低压电器，2013(22)：57-60.

[5] 伍仁库，江亨湖．IEC60947-2：2016断路器标准研究[J]．大众标准化，2019(12)：66-67.

[6] 侯婉秋，焦俊平．高海拔对低压电器产品的影响与对应措施[J]．青海大学学报（自然科学版），2019，27（6）：23-26.

[7] 秦海．高海拔条件下的光伏逆变器降容要求[J]．电子测试，2017(23)：110-111．

[8] 翁国璋，王智亮．低压断路器三段保护的延时时间可调的必要性分析[J]．现代建筑电气，2019，10(12)：12-13.

[9] 鲍国栋．电动机保护断路器选择探讨[J]．现代建筑电气，2020，11(10)：8-13.