

电容器直流局部放电的统计指纹分析

刘华昌¹, 吴春艳²

(1. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院朝晖学校, 四川 绵阳 621900)

Statistical Fingerprint Analysis for Capacitor PD under DC

LIU Hua-chang¹, WU Chun-yan²

(1. The Institute of Electronic Engineering of CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Zhaohui School of CAEP, Mianyang 621900, China)

摘要: 针对电容器直流局部放电测试中的离散数据,借助统计理论,合理地对局部放电数据进行峰度、偏度、相关度、变异性等参量提取,然后利用 BP 网络对提取的参量进行识别,获得了较高的识别率,并发现选择不同的识别输入量,识别的结果有一定的不同,这对以后的深入研究有很大的参考价值。

关键词: 局部放电; 统计量; BP 网络; 模式识别

中图分类号: TM855

文献标识码: A

Abstract: According to statistical theory, this paper aims at discrete datum of PD measurement for capacitor under DC. Parameters of, kurtosis, skewness, correlation coefficient, variance coefficient etc, are extracted from the PD datum reasonably. Then the extracted parameters are recognized by using BP network, and it has a remarkable discrimination. It is found different recognition results with different inputs, which has tremendous values for future study.

Key words: PD; statistical variable; BP network; pattern recognition

1 引言

局部放电^[1](PD)是绝缘体在强电场作用下部分区域发生放电但整体没有击穿的现象,局部放电分析^[2](PDA)是对局部放电进行检测,对采集的数据进行分析,提取放电特征参量(放电量、放电重复率、放电次数、放电的平均电流等),识别放电指纹(变异性、相关度、峰度等)的技术。PDA 技术^[3]可用于高压设备的出厂试验和运行中的初期故障分析。对于电容器,通过直流局部放电的特征分析,根据统计理论分析局部放电指纹,区别不同状况的电容器,从而有利于判断电容器绝缘老化状况,预测电容器的储存寿命和检测电容器初期故障缺陷,对提高整机的可靠性和安全性有重大意义。

2 局部放电数据的统计分析

试验中选取同一生产批次的两个不同状况电容器,均为出厂合格品,能正常用于实际工作中。但其中一支是完好品,定为 C_1 ;另一支电容器预置有微小缺陷(电容器膜中某一层有微孔),定为 C_2 。在相同条件下进行了两个电容器的局部放电试验,测量电容器在不同寿命下的局部放电情况:共进行了 0,1 000,2 000,3 000 次寿命试验,在每次寿命试验完后均对每个放电门限重复测试 10 次,得到放电门限对应的放电次数的试验数据,然后利用统计理论进行处理^[4]。图 1 为一次测得的放电门限与放电次数的关系曲线。

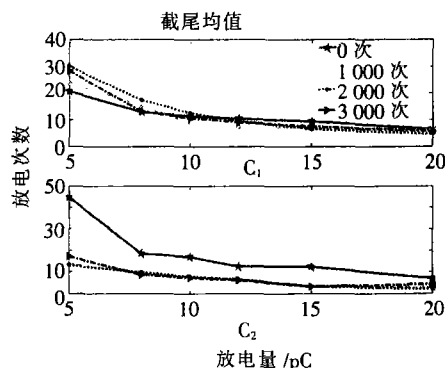


图 1 电容器寿命的局部放电曲线

(1) 峰度

对于样本数据 X , 样本的峰度由下式定义:

$$k = \frac{E(X - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (1)$$

式中: $E(X)$ 为 X 的期望值,对于离散的样本数据也可以用式(2)表示:

$$k = \left[\frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \right] \quad (2)$$

收稿日期:2005-07-21

作者简介:刘华昌(1979-),男,助理工程师,硕士,从事高压方面的研究工作。

峰值反映与正态分布相比某一分布的尖锐度或平坦度。正峰值表示相对尖锐的分布。负峰值表示相对平坦的分布。对于正态分布的峰度为 3, 当样本数据的曲线峰度值比正态分布高时, 峰度大于 3; 反之, 比正态分布低时, 峰度值小于 3。

(2) 偏度

对于样本数据 X , 样本的偏度可定义为:

$$s_k = \frac{E(X - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (3)$$

式中: $E(X)$ 为 X 的期望值, 对于离散的样本数据也可以用式(4)表示:

$$s_k = \left[\frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \right] \quad (4)$$

偏度反映以平均值为中心的分布的不对称程度。正偏度表示不对称部分的分布更趋向正值, 即数据均值右侧的离散性比左侧的强; 负偏度表示不对称部分的分布更趋向负值, 即数据均值左侧的离散性比右侧的强, 对于正态分布的偏度为 0, 表示正态分布是严格的对称分布。

为了便于观察, 列举了一次测量的电容器 C_1, C_2 在相同放电量门限对应放电次数曲线的分布情况, 见图 1。根据上述方法利用 MATLAB^[5]求得峰度和偏度指纹见图 2。

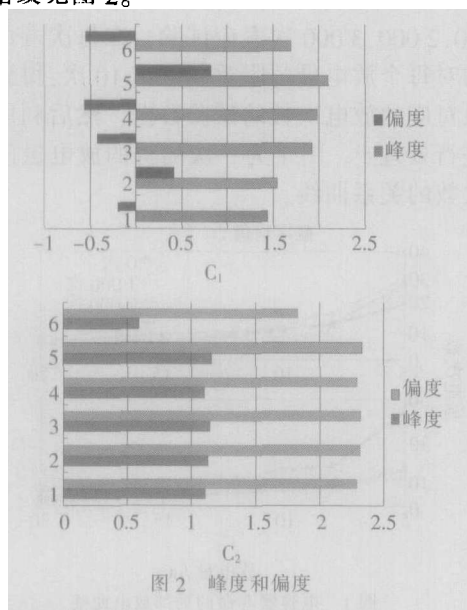


图 2 峰度和偏度

(3) 相关系数

设矩阵 X 的协方差 $C(i, j)$ 存在, 且 $C(i, i), C(j, j)$ 均大于 0, 则称 $R(i, j)$ 为矩阵 X 的相关系数 (矩阵中各列之间的相关程度), 即:

$$R(i, j) = \frac{C(i, j)}{\sqrt{C(i, i)C(j, j)}} \quad (5)$$

用相关系数可以确定两种属性之间的关系, 如, 可以检测某地的平均局部放电和寿命试验情况之间的关系。由此求得电容器相邻寿命试验之间的相关度见表 1

表 1 相关系数

电容器	相邻寿命试验间的相关系数		
	0~1 000	1 000~2 000	2 000~3 000
C_1	0.951 4	0.978 1	0.981 3
C_2	0.916 2	0.958 6	0.918 6

(4) 变异系数

变异系数是衡量资料中各观测值变异程度的另一个统计量。标准差与平均数的比值称为变异系数。样本数据 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的变异系数 v_c 可以根据式(6)求得:

$$v_c = \frac{S}{\bar{x}} \quad (6)$$

其中: S 为标准差, $\bar{x}$ 为样本均值:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

变异系数可以消除不同数列的不同计量单位及各自平均水平的影响, 真正反映不同水平数列的变异程度。图 3 所示为一次测量电容器局放随寿命变化的变异曲线。

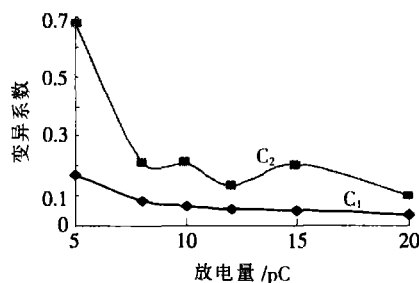


图 3 变异系数

3 局部放电指纹识别

3.1 指纹识别原理

BP 网络的模式 (指纹)^[6] 识别是误差反向传播算法。其基本思想是将输出层产生的误差, 通过连接权值传到隐含层, 逐步后退最后到达输入层, 从而根据误差调整各层间的权值。笔者所用的 BP 网络算法, 是在信号导师指导下, 以梯度下降法修正权值实现收敛的, 包括一个输入层和输出层以及若干个隐含层, 结构原理图见图 4, 其计算步骤如下。

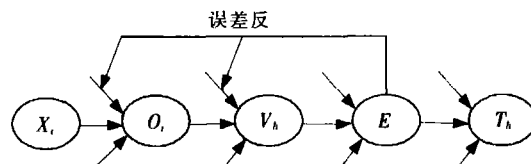


图 4 BP 网络结构原理图

(1) 前向传播过程

对第 P 个样本信号, 依次计算各层的输入和输出:

$$\text{net}_{op} = UX_p; Q_p = f(\text{net}_{op}); \text{net}_{vp} = VO_p; Y_p = f(\text{net}_{vp})$$

(2) 反向传播过程

对导师信号和输出信号的误差, 修正隐含层和输出层权值矩阵 W 和 V :

$$w_{ij} = w_{ij} - \mu \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = w_{ij} - \mu \sum_{k=1}^N \delta_{yk} v_{jk} f'(\text{net}_{jk}) x_{ik}$$

$$v_j = v_j - \mu \frac{\partial E}{\partial v_j} = v_j - \mu \sum_{k=1}^N \delta_{yk} O_{jk}$$

重复步骤(1),步骤(2),直到收敛。

(3)模式识别

利用训练好的 BPNN, 输入待识别信谱图的特征向量 $X, Y=f\{V[f(UX)]\}$ 。输出向量 Y 即代表所识别信号的模式类。

3.2 模式识别结果分析

(1)以放电次数 N_y 为模式识别输入

N_y 为 6×10 维矩阵, 所对应的 BP 网络输入层神经元个数为 60; 因模式类型为两类, 则输出层神经元个数为 2; 隐含层神经元个数经过反复调试选择为 4 个。抽取试验采集的两种信号各 10 个样本, 分别输入已训练好的 BPNN, 各种模式信号的识别结果见表 2。可见, 对 20 个样本的总模式识别正确率为 83%。

表 2 BP 网络识别结果

模式类型	微小缺陷品	无缺陷品
模式正确率/%	85	81

(2)以统计算子为模式识别输入

$H_n(k, s_k)$ 谱图统计算子为 6 个, 所以 BPNN 输入层神经元为 6 个, 输出层神经元仍为 2 个, 隐含层神经元为 3 个。采用与前面相同的信号, 训练和过程同上, 各模式信号的识别结果见表 3。可见, 对 20 个样本的总模式识别正确率为 89%。

对比分析以上两种识别, 以 $k-s_k$ 谱图统计算子为

表 3 BP 网络识别结果

模式类型	微小缺陷品	无缺陷品
模式正确率/%	92	86

(上接第 404 页)

(4)涂灰绝缘子在湿润和含盐湿润状态下, 其奇次和偶次谐波的谱峰均变窄, 谱峰值增加; 涂灰绝缘子在盐水湿润状态下各次谐波的谱峰值和宽度均大于去离子水湿润状态下的对应值。

(5)无论干净还是污秽的绝缘子表面湿润后, 其高频泄漏电流波形均会畸变成三角波, 表明表面水膜会导致高频电压下绝缘子表面的非线性效应。

(6)饱和湿润状态下, 高频泄漏电流 1, 2 次和 3 次谐波幅值以及 1 次和 2 次谐波幅值之差的爬电比距归一化值与绝缘表面的等值盐密有明显的相关性。可以根据这些特征参数来预测绝缘表面的等值盐密, 从而间接地预测绝缘的工频污闪电压。

BP 网络输入时的模式识别率高于以放电次数 N_y 为输入时的模式识别率; $Q-N$ 谱图的放电次数特征量能反映局部放电的基本特征参数, 但不能归纳出各个信号的潜在本质特征; $k-s_k$ 谱图的特征量综合归纳了放电谱图的更多参数, 区分了谱图的偏度、峰度、变异性等差异, 能较有效地表达局部放电的特征。

4 结语

经过以上分析, 可以得出电容器的直流局部放电信号中含有丰富的特征信息, 对于不同性能的电容器具有不同的局部放电特征。通过试验研究表明, BP 神经网络的模式识别可识别电容器的微小缺陷, 以局部放电次数 N_y 为 BP 神经网络模式识别输入量的识别正确率, 低于以 $k-s_k$ 谱图的统计算子为 BP 神经网络模式识别输入量的识别正确率。这些对如何合适选择识别图谱、减小原始图谱的维数、建立高质量的指纹数据库, 以及选择合适的模式识别方法具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 库钦斯基 Г. С. 高压电器设备局部放电 (徐永禧, 胡维新译) [M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [2] Bartnikas R. DC Partial Discharge Detection and Analysis Techniques[A]. Annual Report 2002[C]. CEIPD, 2002: 736-739.
- [3] IEC Standard Publication 270. Partial Discharge Measurements [S]. Second Edition, 1981.
- [4] 张昌法, 唐质敏. 统计学原理 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
- [5] 苏金明, 张莲花, 刘波, 等. MATLAB 工具箱应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [6] 袁曾任. 人工神经网络及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

参考文献:

- [1] 关志成, 王绍武, 梁曦东, 等. 我国电力系统绝缘子污闪事故及其对策[J]. 高电压技术, 2000, 26 (6): 37-39.
- [2] 宿志一. 防止大面积污闪的根本出路是提高电网的基本外绝缘水平—对我国电网大面积污闪事故的反思 [J]. 中国电力, 2003, 36(12): 57-61.
- [3] 周建国. 华东电网 500 kV 大面积污闪的反措探讨 [J]. 华东电力, 1998(1): 24-26.
- [4] 李治, 王永江, 王黎明, 等. 绝缘子泄漏电流和放电现象的初步研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(120): 1-2.
- [5] Tomotaka Suda. Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of a String of Suspension Insulators [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2005, 20(1): 481-487.
- [6] Fernando M A R M, Gubanski S M. Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 688-694.