

污秽绝缘子高频泄漏电流特征的研究

乐波^{1,2}, 王黎明¹, 毛颖科²

(1. 清华大学深圳研究生院能源与电工新技术实验室, 广东 深圳 518055; 2. 清华大学电机系, 北京 100084)

Study on the Characteristics of High Frequency Leakage Current of Contaminated Insulator

YUE Bo^{1,2}, WANG Li-ming¹, MAO Ying-ke²

(1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要: 泄漏电流和污闪放电的发展过程密切相关, 监测泄漏电流是评估绝缘污秽状态的重要手段。为克服传统泄漏电流法的缺点, 笔者通过人工污秽试验方法, 研究了玻璃绝缘子的高频泄漏电流, 并对几种污秽表面状态的高频泄漏电流的幅值、波形和频谱特征进行了分析, 提出了污秽绝缘子的高频泄漏电流特征, 以及高频泄漏电流特征参数与等值盐密的相关性。

关键词: 绝缘子; 污秽; 高频; 泄漏电流

中图分类号: TM216

文献标识码: A

Abstract: The leakage current is closely relative to the development of contamination flashover, and monitoring leakage current is an important measure to evaluate the contamination status of insulator. The high frequency leakage current of glass insulator is studied based on the artificial pollution tests in order to avoid the disadvantages of traditional leakage current measurement. In the paper, the amplitude, waveform and frequency spectrum of high frequency leakage current are analyzed. Finally the characteristics of high frequency leakage current are stated, and the relativity between the characteristic parameters and the ESDD is discussed.

Key words: insulator; contamination; high frequency; leakage current

1 引言

在脏污潮湿条件下, 瓷和玻璃绝缘子的外绝缘强度会急剧下降, 在运行电压下会随时发生污闪。污闪事故往往造成大面积长时间停电, 带来巨大的经济损失。所以, 防污闪一直是电力部门工作的重中之重^[1]。我国从 20 世纪 90 年代开始对污闪问题进行研究, 通过绘制污区图和调爬等措施普遍加强了外绝

缘^[2-3]。但污闪事故时有发生。为防止污闪事故的发生, 需要对染污绝缘状态进行及时准确的判断, 以便在污闪发生前采取措施。根据污闪电压来评价染污绝缘状态是最直接的评价办法, 但污闪电压不方便直接测量, 而且不可能在线测量污闪电压。近几年, 通过对污闪机理的研究, 发现泄漏电流和污闪放电的发展过程密切相关, 而且泄漏电流便于连续监测, 包含了丰富的信息, 可以综合反映污秽程度、受潮程度、绝缘子承受电压以及绝缘子形状等因素。同时, 绝缘子的泄漏电流变化反映了绝缘子污秽的积累变化过程, 所以绝缘子的污秽泄漏电流对于判断外绝缘的运行状态具有重要的意义^[4]。

但是传统的泄漏电流法具有许多缺陷和不足, 如需要的电压高、设备体积大、保护设备复杂、产生的工频泄漏电流较小、容易受到外界干扰的影响等。笔者主要研究污秽绝缘的高频泄漏电流特征, 为高频泄漏电流法评估绝缘状态提供理论参考。高频电流法主要测量分析流过外绝缘的容性泄漏电流, 该方法所需设备体积小、电压低、泄漏电流幅值大、频率高, 其频谱包含丰富的高频信息, 不易受到外界低频干扰的影响, 而且泄漏电流发热小, 很难在绝缘表面形成干区而导致干区放电的非线性效应, 不破坏污秽绝缘的表面状态^[5-6]。

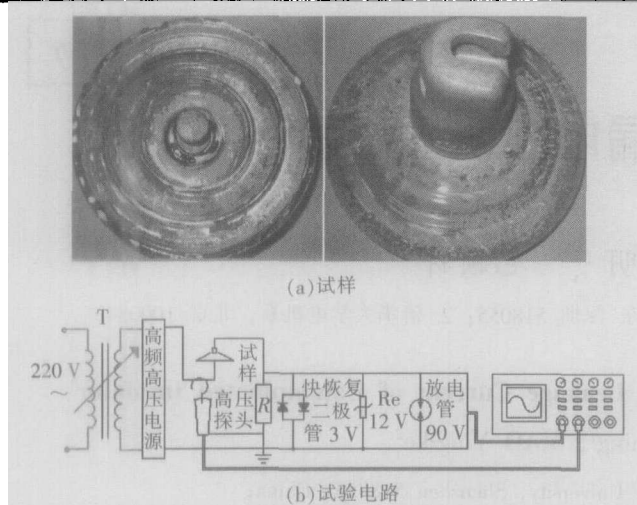
2 试验设备

试验所用高频电源频率 7~20 kHz, 输出电压 0~3 kV, 取样电阻 $R=55 \Omega$, 用高压探头和示波器直接监测高频电源输出电压。待试绝缘子为 LD-200 玻璃绝缘子 (表面积 1 575 cm², 爬距 31 cm), 见图 1(a)。试验电路见图 1(b)。

收稿日期: 2005-07-21; 修回日期: 2005-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50377020)

作者简介: 乐波 (1976-), 男, 陕西人, 博士后, 从事绝缘诊断和高电压新技术的研究。



注:污秽状态包括无污秽干燥表面、无污秽饱和和湿润表面和高浓度盐水饱和湿润表面、0/1.0 mg/cm²。(第 1 个数字代表盐密,第 2 个数字代表灰密)绝缘子的干燥和饱和湿润表面 0.2/1.0 mg/cm² 绝缘子的干燥和饱和湿润表面、0.3/1.0 mg/cm² 绝缘子的干燥和饱和湿润表面、0.4/1.0 mg/cm² 绝缘子的干燥和饱和湿润表面。

图 1 试样与试验电路

3 试验方法

按照《交流系统用高压绝缘子人工污秽试验方法-固体层法》的规定,首先将试品清洗干净后,再用电子天平称量所需的 NaCl 和硅藻土,然后用去离子水溶解后均匀地涂覆于绝缘子表面,待其干燥后,悬挂于试验架进行加压测量。若测量饱和和湿润条件下的泄漏电流,则用雾化器在绝缘上下表面喷去离子水待其表面完全湿润后迅速进行测量,喷水的过程中以表面污秽不滴下为原则。用 Tektronix TDS3052B 示波器进行波形测量,然后通过网络送入计算机进行处理,泄漏电流的频谱通过汉明窗 FFT 计算得到。

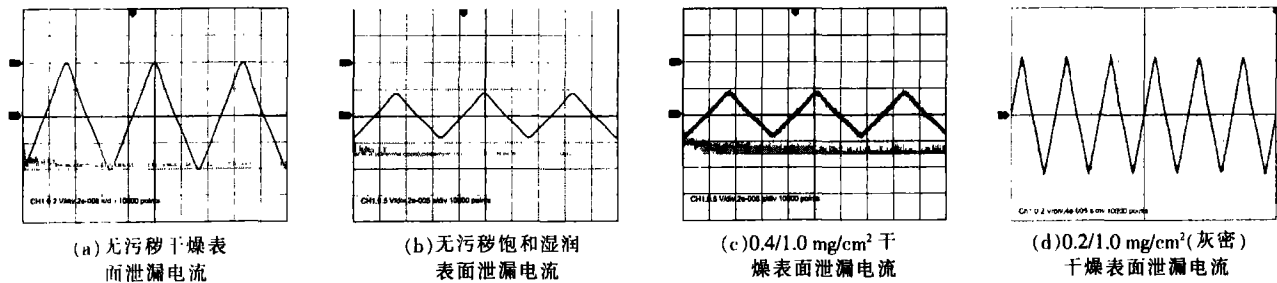


图 3 1 kV 15 kHz 绝缘表面泄漏电流波形

干燥状态下的高频泄漏电流几乎相同,无污秽绝缘表面在干燥和湿润状态下的高频泄漏电流也几乎相同。对于图 3 中的几种绝缘表面,用高阻计测量其直流电阻均为无穷大,所以流过绝缘表面的电流几乎为纯容性电流,无污秽绝缘表面湿润后的等效电容改变很小。

无污秽绝缘子在干燥和湿润条件下的频谱见图 4。可以发现形状和幅度基本相同,但干燥绝缘子的高频(高于 5 次谐波)频谱分量略低于湿润绝缘子。

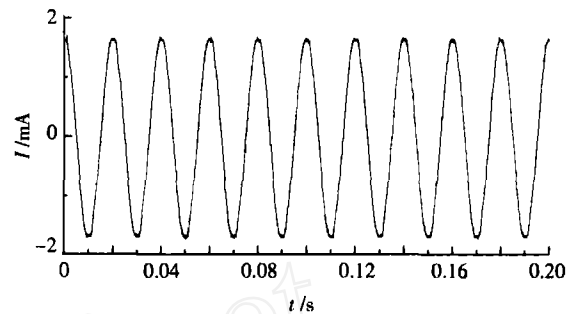


图 2 1.5 kV 工频电压下绝缘表面泄漏电流波形

4 试验结果分析

4.1 工频泄漏电流分析

0.4/1.0 mg/cm² 污秽度,饱和湿润状态下施加 1.5 kV 工频电压后绝缘表面的泄漏电流见图 2。其泄漏电流的峰-峰值约为 3.4 mA,相比同电压下的高频泄漏电流要小得多,而且是正弦波形,几乎无任何畸变。这表明在工频低电压下得到的泄漏电流为纯阻性泄漏电流,携带的频率信息很少。即使在大盐密饱和湿润状态下,由于绝缘表面的工频阻抗很大,所以测量得到的工频泄漏电流很小,仅为几个 mA。这么小的泄漏电流在现场很容易受到外界干扰的影响,所以很难准确测量,要得到较大的泄漏电流必须施加很高的电压。

4.2 干燥状态下的高频泄漏电流特征

干燥状态下几种绝缘表面的泄漏电流波形见图 3,电源频率 15 kHz,施加电压 1 kV。可以看到,在干燥状态下,无论是无污秽绝缘子还是含盐含灰的污秽绝缘子,其电流波形、幅值和频谱基本相同。所以,灰和盐只有在湿润状态下才对高频泄漏电流有影响。

由图 3 可知,无污秽绝缘子和污秽绝缘子在干

4.3 0.4/1.0 mg/cm²(灰密)绝缘子的泄漏电流特性

15 kHz 1 kV 条件下,0.4/1.0 mg/cm² 绝缘子在干燥和饱和湿润状态下的泄漏电流见图 3 (c)和图 5。从 15 kHz 1 kV 和 1.5 kV 干燥和湿润表面的频谱(图 6)对比可以看到,在湿润状态下,1 次谐波和高次谐波分量的峰值均增加,所以波形畸变严重。0.4/1.0 mg/cm² 绝缘子在干湿状态下频谱的低频特征基本相似,但湿润状态下,180 kHz 以下的谐波分

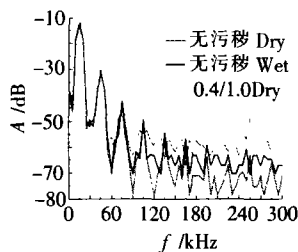


图4 1 kV 15 kHz 无污染干燥与湿润以及 0.4/1.0 mg/cm² 绝缘干燥状态下的频谱对比

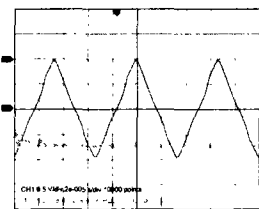
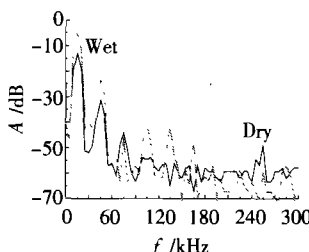
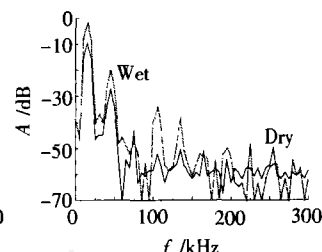


图5 1 kV 15 kHz 0.4/1.0 mg/cm² 饱和湿润表面泄漏电流



(a) 15 kHz 1 kV 电压



(b) 15 kHz 1.5 kV 电压

图6 15 kHz 0.4/1.0 mg/cm² 干燥与饱和湿润表面泄漏电流频谱对比

量大于干燥绝缘子;而更高频率的谐波分量,湿润绝缘子小于干燥绝缘子。湿润绝缘子总电流大于干燥绝缘子。干燥状态下的电流与无污染绝缘子干燥情况相近,但波形相对于无污染绝缘子明显畸变。污秽绝缘子无论干燥或湿润情况下的2,4,6次和8次等偶次谐波均出现小的波峰,而无污染绝缘子无论干湿情况下的偶次谐波均为波谷。可见污秽绝缘子湿润后的电流明显增大,由于阻性电流的贡献很小(饱和湿润后的直流电阻 150 kΩ),所以主要原因是污秽绝缘子表面湿润后等效电容增大,导致泄漏电流增大。

0.4/1.0 mg/cm² 污秽绝缘子在干湿状态下等效阻抗随电压频率的变化见图7。由于 0.4/1.0 mg/cm² 污秽绝缘子在干湿状态下等效阻抗随电压频率的变化近似呈现倒数曲线关系,所以污秽绝缘子在高频下可以等效成一个纯容性阻抗。

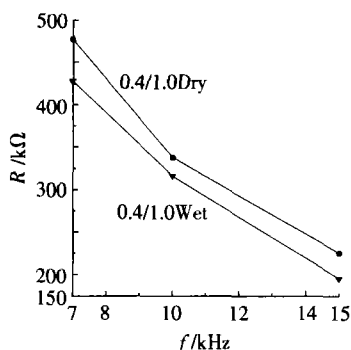


图7 0.4/1.0 mg/cm² 污秽绝缘子在干湿状态下等效阻抗随电压频率的变化

0.4/1.0 mg/cm² 绝缘子在干燥和饱和湿润状态时,不同频率 1.5 kV 电压下泄漏电流频谱的对比见图8和图9。干燥状态下,随着频率的增加,等效容

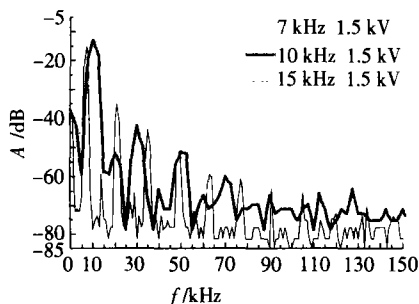


图8 0.4/1.0 mg/cm² 污秽绝缘子在干燥状态下不同电压频率时的频谱对比

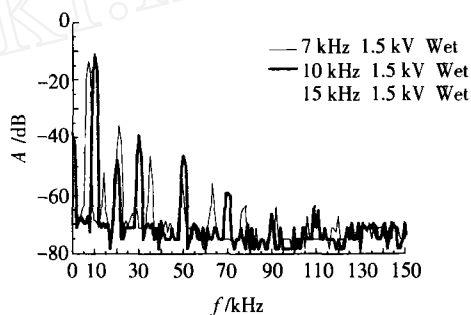


图9 0.4/1.0 mg/cm² 污秽绝缘子在湿润状态下不同电压频率时的频谱对比

抗减小,各谐波峰值相应增加,各频率下频谱形状几乎相似,但直流分量的大小几乎不变,表明在各频率下的直流电阻是相等的。

在表面湿润状态下,偶次和奇次谐波峰幅值相对干燥状态均增大,频谱形状与干燥状态下几乎相同,各频率下直流分量与干燥表面状态相同。

4.4 涂灰(无盐)绝缘子 0/1.0 mg/cm² 的试验结果

0/1.0 mg/cm² (只涂灰)绝缘子的干燥表面,分别进行去离子水饱和湿润以及喷高浓度盐水饱和湿润试验。3种绝缘表面的伏安曲线见图10。由图10可以看到,当污秽表面被去离子水饱和湿润后,高频电流相对无污染湿润表面明显增大;用高浓度盐水湿润表面后,通过绝缘子表面的高频电流进一步增大,表明盐会进一步增加绝缘的等效电容(假设流过绝缘本体的容性泄漏电流不变)。由图10还可以看到,电流随电压几乎成线性关系增大,表明绝缘表面发热很小,泄漏电流功率发热不足以导致表面形成干区而改变表面的污秽状态,所以高频泄漏电流能

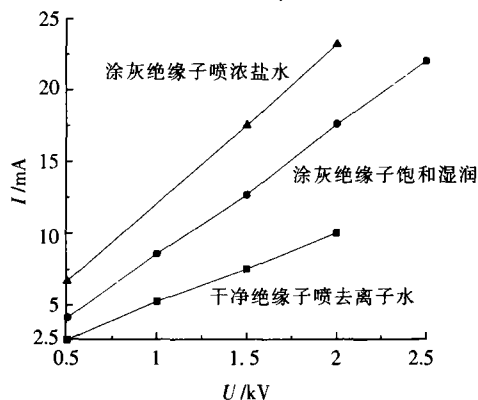


图10 3种绝缘表面的伏安曲线

反映绝缘表面的真实污秽状态。

从频谱上分析,4种绝缘表面的直流分量基本相同;无污秽绝缘子的频谱从直流开始略微下降后再开始增加,而有灰污秽绝缘子无论是用去离子水或盐水饱和湿润情况下,其频谱均是突然下降后又突然上升。

无污秽绝缘子在干燥和喷去离子水湿润状态下,频谱形状相似,谱峰较宽。在大于45 kHz后,干燥绝缘子的频谱值低于去离子水湿润后的绝缘子,而且无污秽绝缘子的偶次谐波为波谷,见图11。

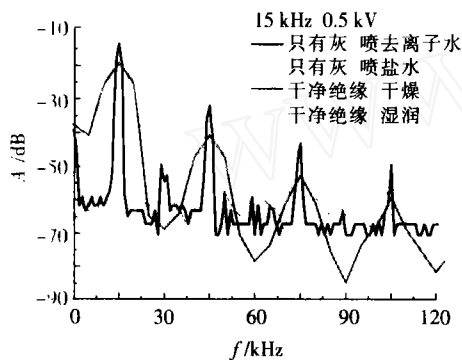


图11 4种绝缘表面的频谱

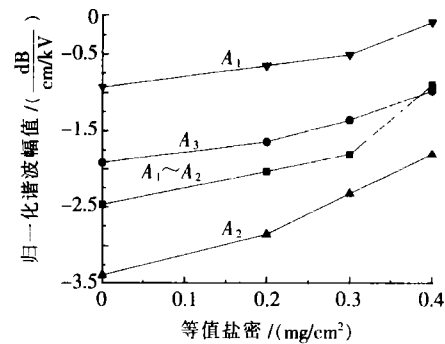
涂灰绝缘子在去离子水湿润和高浓度盐水湿润的状态下,其奇次和偶次谐波的谱峰均变窄,峰值增加,高浓度盐水湿润状态下的各次谐波谱峰值和宽度均大于不含盐湿润状态下的谱峰值,可见表面湿润状态下的盐可以增加绝缘的等效电容;在仅涂灰的状态下,无论是否用去离子水湿润或盐水湿润,2,4,6偶次谐波均为波峰,这一现象表明,当表面有灰后,对高频电流呈现非线性阻抗;当不用去离子水湿润和用去离子水湿润仅含灰的污秽绝缘子时,高阻计测量其直流电阻均为无穷大,所以其电阻泄漏电流可以忽略。在去离子水湿润表面时,15 kHz 2 kV时的泄漏电流为17.654 mA(直流电阻无穷大,所以忽略电阻电流);当喷盐水湿润时,直流电阻为150 kΩ。在15 kHz 2 kV时,总电流为23.22 mA,由直流电阻可以计算出阻性电流为0.013 3 mA,则总的容性电流为23.219 mA,减去去离子水湿润时的容性电流17.654 mA,得到由于喷盐水后导致表面电容增大而增加的容性泄漏电流为5.565 9 mA,占总泄漏电流的24%。相对于去离子水湿润时,容性电流增加了29.8%。所以,当绝缘子表面盐密改变时,会直接影响湿润表面的高频泄漏电流。

泄漏电流波形显示:无污秽绝缘干燥状态下的高频泄漏电流呈现正弦波形;但喷去离子水后,高频泄漏电流表现为三角形,幅值与干燥状态下的绝缘子电流基本相同;当灰密为1.0 mg/cm²时,喷去离子水饱和湿润后,电流峰-峰值增大,电流波形为三角形;当喷盐水饱和湿润后,高频泄漏电流峰-峰值进一步增大,电流波形明显畸变,峰顶变尖。因此,当绝

缘子表面(无论干净还是污秽)湿润后,其高频电流波形均会畸变成三角波。

4.5 高频泄漏电流特征参数与等值盐密的关系

图12为归一化谐波幅值与等值盐密的关系。试样为LD-200玻璃绝缘子,试验电压为15 kHz 1.5 kV,爬电比距为20.67 cm/kV,各等值盐密下表面均饱和湿润。由图12可以看到,无论A₁,A₂,A₃以及A₁~A₂,均与绝缘表面的等值盐密有明显的相关性,随着盐密的增加,这些谐波幅值近似地按照线性关系逐渐增加,盐密较大时,上升的斜率增加。所以,可以通过简单的线性关系曲线来推测等值盐密。由于特征参数和等值盐密有一定的相关性,所以也可以用这些参数联合实现等值盐密的预测(如作为神经网络的输入进行智能预测)。这样,通过高频泄漏电流特征参数就可以获得等值盐密。由于等值盐密和相对湿度与工频污闪电压已有较明确的关系,所以可根据等值盐密和相对湿度推测污秽绝缘的工频污闪电压,从而实现高频泄漏电流法评估绝缘的表面污秽状态。



注:横坐标为试验中的几种等值盐密值,纵坐标为高频泄漏电流各谐波幅值对爬电比距的归一化值。A₁,A₂和A₃分别为泄漏电流1,2次和3次谐波幅值的归一化值,A₁~A₂为一次和二次谐波幅值之差的归一化值

图12 归一化谐波幅值与等值盐密的关系(饱和湿润)

5 结语

(1)干燥状态下,无论是无污秽绝缘子还是含盐含灰的污秽绝缘子,泄漏电流的大小基本相同,其电流波形、幅值和频谱基本相同,灰和盐只有在湿润状态下才对高频泄漏电流有影响;无污秽绝缘子在干燥和去离子水湿润状态下,频谱形状相似,谱峰较宽,但在大于45 kHz后,干燥表面的频谱值低于去离子水湿润表面。

(2)污秽绝缘子无论干燥或湿润情况下的2,4,6次和8次等偶次谐波均为波峰,无污秽绝缘子无论干湿情况下偶次谐波均为波谷,表明表面灰污对高频泄漏电流呈现非线性阻抗。

(3)污秽绝缘子在高频下可以等效成一个纯容性阻抗,忽略电阻效应。污秽绝缘子湿润后的泄漏电流明显增大,主要是因为表面湿润后等效电容增加而导致。
(下转第407页)

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

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

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_{ij} 为模式识别输入

N_{ij} 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_{ij} 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、变异度等差异, 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_{ij} 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. 高压电气设备局部放电 (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.