

文章编号:1000-582X(2007)02-0046-04

# 变压器典型油纸绝缘局部放电特性\*

杨眉<sup>1</sup>,李剑<sup>1</sup>,杨丽君<sup>1</sup>,李莉<sup>2</sup>,宁佳欣<sup>1</sup>

(1.重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030;

2.中电国华电力股份有限公司 北京热电分公司,北京:100025)

**摘要:**根据对变压器油纸绝缘内部常见缺陷的分析,制作了5种油纸绝缘缺陷放电模型,并在不同温度和电压下进行老化实验,用以模拟变压器中的实际缺陷.研究了不同类型放电的发展过程,分析了温度和电压对油纸绝缘局部放电的影响.对应于不同类型的放电和同一放电模型的不同放电阶段,放电的灰度图谱都存在较大差异,因此,可以通过灰度图谱来区分不同的放电类型和放电阶段.所得结果为进一步研究变压器局部放电模式识别和绝缘老化特征提供了实验依据.

**关键词:**局部放电;油纸绝缘;灰度图谱;老化

**中图分类号:**TM721

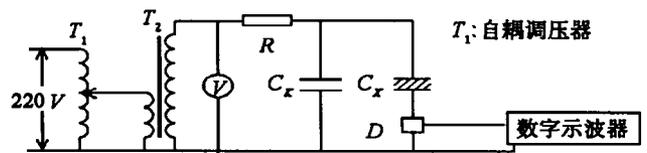
**文献标识码:**A

充油变压器中局部放电的发生非常普遍,而且通常是不可避免的.变压器内的主绝缘为油纸绝缘,从放电机理的角度分析,油纸绝缘内部缺陷导致的局部放电是由放电电极与绝缘介质的性质唯一确定的,所以不同类型的放电与其产生的放电脉冲信号应当是相对应的<sup>[1-4]</sup>.对变压器油纸绝缘缺陷的放电特性进行充分研究是进行局部放电模式识别的基础.从局部放电发生的位置、放电过程和现象来看,局部放电可以分为3种类型:内部放电、表面放电和电晕放电.作者根据电力变压器内实际存在的局部放电类型制作了5种典型油纸绝缘缺陷放电模型,在老化箱中进行了局部放电试验,研究了不同类型放电的发展规律,记录了不同模型在各种情况下的放电图谱.通过对放电图谱的分析,能够更有效地比较油纸绝缘缺陷的放电特征,以期对变压器的局部放电特性有更深入的认识,为进一步研究电力变压器绝缘老化诊断和局部放电模式识别提供科学依据.

## 1 实验线路及变压器典型局部放电模型

放电模型实验线路如图1所示,其中:实验回路建立在双层屏蔽试验室内,以抑制空间电磁干扰和电源传导干扰. $C_x$ 放在专门设计的老化箱中,数据采集采用美国力科公司的P7100数字示波器,最高采样率可

达10 GS/s,48 M cache.



$T_1$ :自耦调压器;  $T_2$ :高压试验变压器;  $V$ :静电电压表;  $C_x$ :耦合电容;  $C_x$ :放电模型;  $R$ :保护电阻10k $\Omega$ ;  $D$ :电流传感器.

图1 放电模型实验线路

变压器内部常见的放电故障类型包括:油间隙放电、空气隙放电、沿面放电和悬浮电位放电等.作者按照CMII(CIGRE Method II)电极系统结构尺寸制作了5种典型油纸绝缘缺陷模型来对这些放电过程进行模拟试验,放电模型结构如图2所示.所有模型试验时都浸在充有变压器油的容器中并置于专门设计的老化箱内,使用的绝缘纸板周围各边角事先均打磨光滑,无尖角或毛刺并在真空滤油机内经过充分的干燥(72 h)和浸油(120 h)处理.具体的放电模型结构如下:

### 1)油纸隔板结构放电模型

油纸隔板结构放电模型见图2(a).在厚2.0 mm的浸油绝缘纸板和地电极间垫上两片厚1.0 mm的条形绝缘纸板,中间形成油隙.

### 2)沿面放电模型

沿面放电模型见图2(b),图中的绝缘纸板直径为

\* 收稿日期:2006-09-30

作者简介:杨眉(1979-),男,硕士,从事电气设备绝缘在线监测与诊断技术研究.李剑,男,教授,博士,电话(Tel.):023-65106880;E-mail:lijian@cqu.edu.cn.

30 mm,厚1.0 mm.

3) 油中空气隙放电模型

见图2(c),模型中的介质为两层厚1.0 mm的浸油绝缘纸板中夹一层带有直径20.0 mm圆孔的1.0 mm厚绝缘纸板.为防止变压器油进入气隙中影响测量结果,绝缘纸板之间用一层非常薄的环氧树脂胶粘合.

4) 油中电晕放电模型

图2(d)为用于模拟油中电晕放电的针-板电极系统.针颈直径0.2 mm,针尖曲率半径小于0.1 mm.针与板电极间放置厚度为1.0mm的绝缘纸板,针尖到纸板距离d为10 mm.

5) 混合放电模型

笔者建立了油纸隔板结构与沿面混合模型,见图2(e).

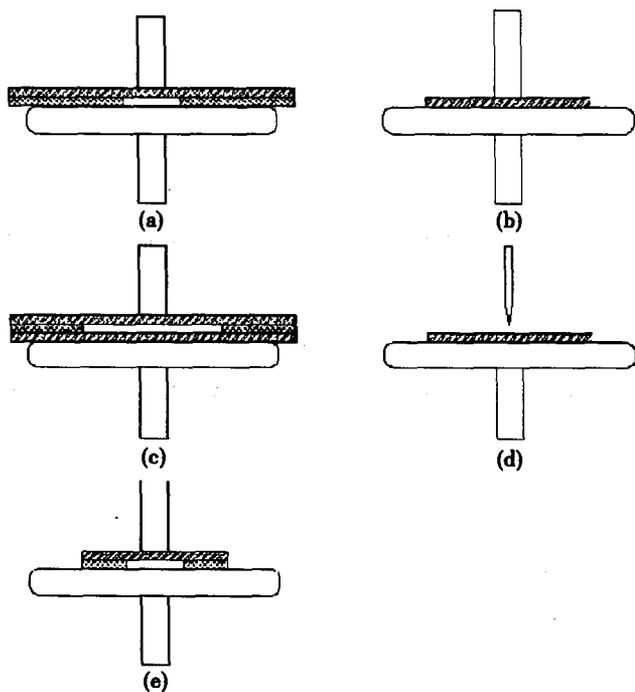


图2 局部放电模型

2 实验及其结果分析

实验时,每一种放电模型采用12个试样,每个试样加2种不同的电压和温度<sup>[5]</sup>见表1(“-”表示放电变化不大;“↑”表示放电幅值增加,放电进一步发展),并长时间加压,观察在老化过程中局部放电的发展情况.因此,作者在加压后4 h、24 h、72 h、168 h分别采集一次局放信号,每次采集一组数据,5种模型共得到4×12×4×5组数据.每次试验的记录长度为150个工频周期,采样频率为100 MHz.

n-q-φ三维图谱在q-φ平面上的投影也称为局部放电灰度图像,图像像素点的灰度值对应于放电重复

率.因此,局放灰度图像与三维图谱n-q-φ的差异仅在于数据格式的不同,本文的局部放电灰度图像分辨率为256(128(φ×q)),见图3.

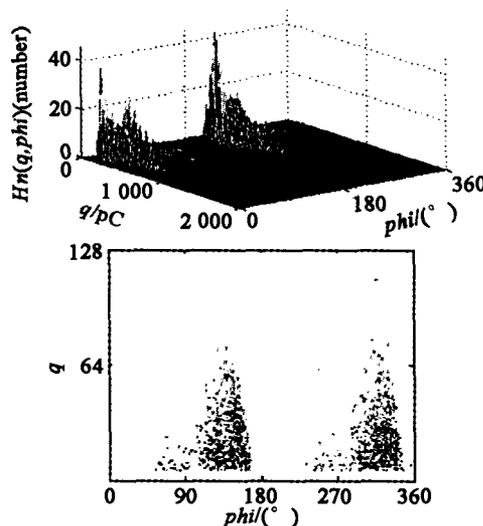


图3 沿面放电n-q-φ图谱及其灰度图像对比

灰度图像的灰度级为0-255,作者根据Hn(q,φ)平面上放电次数的最小值和最大值分别对应于最小灰度级和最大灰度级的原则,构造局部放电Hn(q,φ)灰度图像<sup>[6]</sup>,则各象素点的灰度值为:

$$m_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{n_{max}} \times 255, \tag{1}$$

式中m<sub>i,j</sub>为Hn(q,φ)图像象素点灰度;n<sub>i,j</sub>为Hn(q,φ)空间曲面放电次数;n<sub>max</sub>为Hn(q,φ)空间曲面最大放电次数.

在局部放电灰度图像可视化处理时,局部放电灰度值与式(1)计算结果相反,最大放电次数对应灰度最小值,而零放电次数对应于255灰度值,即可视化局部放电灰度图像各象素灰度值为:

$$m'_{i,j} = (1 - \frac{n_{i,j}}{n_{max}}) \times 255. \tag{2}$$

从表1可以发现,不同的试验条件,起始放电电压差别较大,这主要体现在温度的差别上.随着电压的升高,加压时间的增长,每种类型放电的脉冲量也随之增大,其单次放电脉冲的幅值相应增大.同时,除了电晕放电之外,温度对其他油纸绝缘的影响很大,温度升高到98℃时,放电发展非常迅速,并很容易导致击穿.

由图4可以看出,每种类型放电的灰度图谱都有其明显的特点,并有较大的差异.油隙、沿面与空气隙放电在正负半周对称性较好;电晕放电则基本出现在负半周.在理论上,绝缘内部放电的放电图形在工频正、负半波是对称的,但由于气隙周围绝缘材料的绝缘电阻并非理想情况下的无穷大,同时由于在放电中可能发生沿气隙或气泡壁表面放电等原因,实际的正、负

工频周期放电图形是不完全对称的.

表 1 试验条件和结果

放电模型	实验温度/℃	起始放电电压/V	实验电压/V	4 h	24 h	72 h	168 h
P1 油纸隔板 结构放电	40	11 000	13 000	放电稳定	↑	↑	↑
			15 000	放电稳定	↑	↑	↑
	98	4 500	6 000	放电稳定	↑	↑	放电剧烈
			8 000	放电稳定	↑	放电剧烈	击穿
P2 油中沿面 放电	40	12 000	14 000	放电稳定	↑	↑	↑
			16 000	放电稳定	↑	↑	↑
	98	5 000	7 000	放电稳定	↑	↑	↑
			9 000	放电稳定	↑	放电剧烈	击穿
P3 油中空气 隙放电	40	4 000	6 000	放电稳定	↑	↑	↑
			8 000	放电稳定	↑	↑	↑
	98	35 000	5 000	放电稳定	↑	↑	放电剧烈
			7 000	放电稳定	↑	击穿	
P4 油中电晕 放电	40	11 000	13 000	放电稳定	-	↓	↑
			15 000	放电稳定	-	正半周开始出现少而幅值大的脉冲	↑
	98	11 000	13 000	放电稳定	-	↓	-
			15 000	放电稳定	-	正半周开始出现少而幅值大的脉冲	↑
P1-3 油纸隔 板结构与沿 面混合放电	40	13 000	15 000	放电稳定	↑	↑	↑
			17 000	放电稳定	↑	↑	↑
	98	5 000	7 000	放电稳定	↑	↑	放电剧烈
			9 000	放电稳定	↑	放电剧烈	击穿

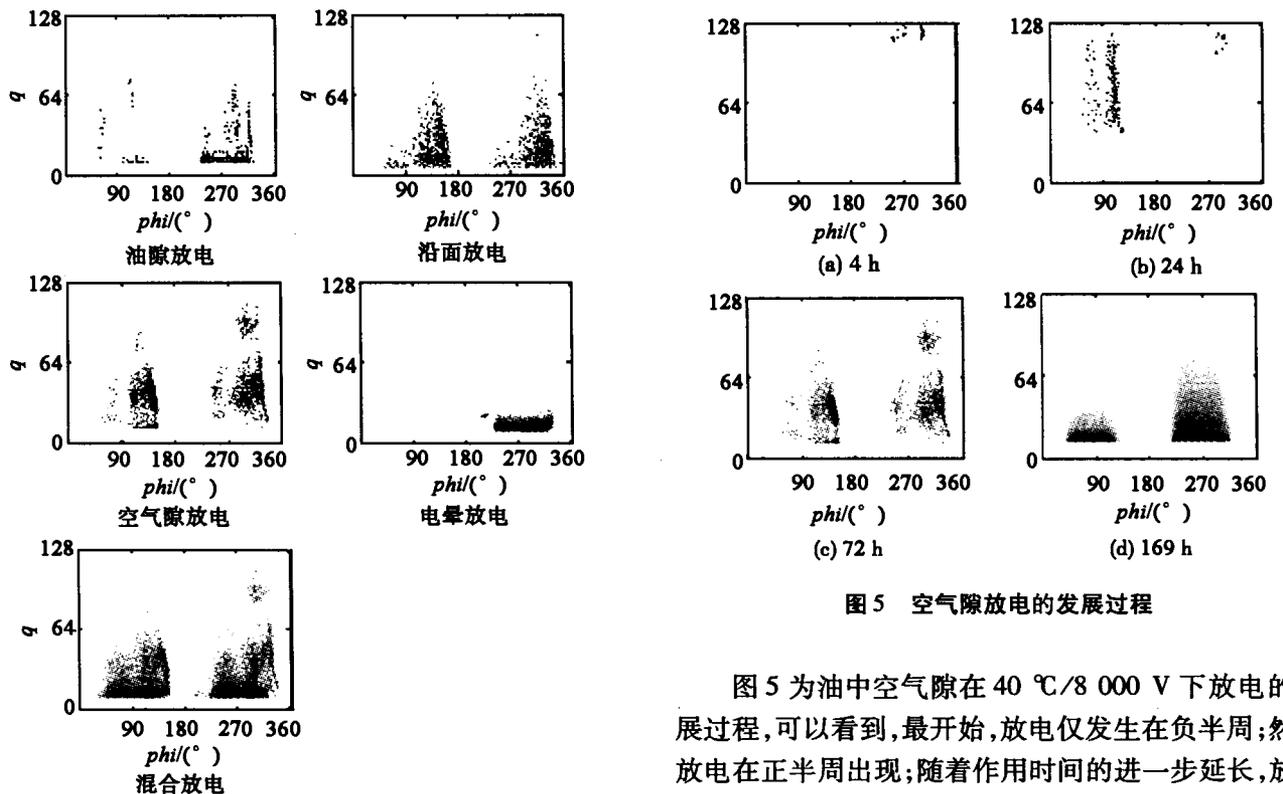


图 4 各种缺陷放电灰度图谱

图 5 空气隙放电的发展过程

图 5 为油中空气隙在 40 °C/8 000 V 下放电的发展过程,可以看到,最开始,放电仅发生在负半周;然后放电在正半周出现;随着作用时间的进一步延长,放电更为剧烈,在灰度图上表现为放电范围更广,灰度值更大.总的来说,油中空气隙模型在老化过程中,局部放

电在相位上展宽、放电幅值变大,放电次数增加.其他类型的放电也表现出相似的特点.

同时,当局部放电发展到比较剧烈的时候,因为放电幅值大、相位广,气隙、油隙、沿面放电的灰度图像会出现较高的相似性,对模式识别会造成一定的困难.所以,从局部放电的各个发展阶段提取特征量进行比较,可以更好的识别放电类型.

#### 4 结 论

根据试验可以总结出不同油纸绝缘模型中局部放电发展过程的异同:

1)不同类型的缺陷其放电特性存在较大差异并具有可重复性,随着电压的升高和作用时间的延长,局部放电随之发展.

2)温度对油纸绝缘的绝缘特性影响极大,随着温度的升高,其起始放电电压下降很快,在相同电压等级下,放电发展更为迅速.

3)不同类型缺陷和同一缺陷不同发展阶段放电的灰度图谱都存在着较大差异,因此,从局部放电发展

的各个阶段提取特征量进行模式识别将更有利于变压器绝缘的故障诊断.

#### 参考文献:

- [1] 姜磊,朱德恒,李福琪,等. 基于人工神经网络的变压器绝缘模型放电模式识别的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 21-24.
- [2] RAJA K, DEVAUX F, LELAIDIER S. Recognition of discharge sources using UHF PD signatures[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(5): 8-14.
- [3] 高文胜,王猛. 油纸绝缘中局部放电的典型波形及其频谱特性[J]. 中国电机工程学报. 2002, 22(2): 1-5.
- [4] 吴鹏,陈志勇. 电力变压器典型放电模型试验研究[J]. 高压电器, 40(3): 161-163.
- [5] LARS E LUNDGAARD, WALTER HANSEN, DAG LINHJELL, et al. Aging of oil-impregnated paper in power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 230-239.
- [6] 李剑;局部放电灰度图像识别特征提取与分形压缩方法的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2001.

## Partial Discharge in Oil-paper Insulation of Transformer

YANG Mei<sup>1</sup>, LI Jian<sup>1</sup>, YANG Li-jun<sup>1</sup>, LI Li<sup>2</sup>, NING Jia-xin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China;  
2. CLD Guohua Beijing Power, Beijing 100025, China.)

**Abstract:** Based on the analysis of defect in oil-paper insulation of transformer, 5 corresponding PD models were made to simulate the actual defects existed in transformers. Aging experiment was carried out at different temperature and test voltage. The developing process of different types of PD was studied and the influence of temperature and voltage on PD in oil-paper insulation. were analyzed. Gray images show differences for different typrs of PD or one type of PD at different precedures. Gray images can be used to recognize PD patterns and discharge stage. The research resalts coutribute for further research on PD pattern recognition and insulation aging of transformer.

**Key words:** Partial discharge; oil-paper insulation; gray images; aging

(编辑 张小强)