

文章编号:1000-582X(2002)04-0087-04

Weibull 分布在识别变压器局部放电中的应用

唐 炬, 王 静, 李 剑, 宋胜利

(重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:针对不同局部放电源产生不同幅值分布的脉冲,设计了5种典型的变压器人工缺陷局部放电模型,对来自不同放电源的脉冲幅值分布进行了比较,如电晕放电、沿面放电和内部气隙放电,用 Weibull 概率函数进行分析,并用最小二乘法对 Weibull 分布进行参数估计,最后用克莱姆法则对结果进行检验。结果表明,此概率函数与局部放电幅值分布吻合,用 Weibull 分布的参数值可以识别不同的放电源。在两个或多个放电源混合的情况下,用混合 Weibull 模型可以分离局放信号,得出每种放电现象幅值分布的参数值和标准平均值,根据这些参数就能量化重叠的局部放电现象。

关键词:Weibull 分布;局部放电;幅值分布

中图分类号:TM83

文献标识码:A

由于局部放电对电气设备绝缘具有危害性,对局部放电源进行模式识别是最近几年来局部放电研究中的一个难关。

由于局部放电现象可以看作是一个随机过程,测得的实验数据有很大的随机性,所以,绝缘系统中的局部放电现象可以通过统计学来进行研究,寻求一种概率方法作为诊断工具,用以评估绝缘系统的可靠性、对绝缘老化进行诊断以及描述局部放电发生的过程。局部放电机理和局部放电模式识别都能从适当的随机模型推导出来,包括局部放电幅值分布和相位分布。经研究表明,局部放电脉冲幅值分布(PAD)的累积概率函数符合两参数的 Weibull 分布^[1-4]。笔者在这种思想的基础上对变压器几种典型的人造绝缘缺陷进行分析,得到不同的脉冲幅值分布,研究了两参数 Weibull 概率函数在识别局部放电源中的应用。

1 Weibull 模型介绍

对绝缘系统缺陷的放电现象进行的研究表明,放电量是个随机变量,它在数值上是不均匀的。这些特征排除了用其他的一些常用分布,需借助于两参数 Weibull 分布。它的累积概率函数定义如下:

$$F(q) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{q}{\alpha}\right)^\beta\right] & q > 0 \\ 0 & q < 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 α 是尺度参数; β 是形状参数; $q = q_m - q_s$ 是测得的放电信号 q_m 与仪器灵敏度 q_s 之差。可以用多种方法估计出与参数值,例如图解法、极大似然法、矩法以及最小二乘法等等^[5-7],并可通过克莱姆法则(Cramer Von Mises 简称 CVM)对估计的结果进行检验:

$$W^2 = \frac{1}{12N_i} + \sum_{i=1}^N [F(q_i; \alpha, \beta) - F'(q_i)]^2 \quad (2)$$

其中 N_i 是测得的放电信号的总数; N 是多通道分析器的量化级或通道数。文献[2]把 0.2 作为 CVM 检验方法的拒绝域值,即认为 W^2 值低于 0.2 的参数估计值满足要求,大于 0.2 的参数估计值应被拒绝。

通过特征参数 α, β 可以推算以下参量:

1) 每个周期内的放电次

$$N_a^* = \frac{N_i}{f t_a} \int_{q_{mi}}^{q_{mu}} f(q; \alpha, \beta) dq = \frac{N_i}{f t_a} \quad (3)$$

2) 每个周期内的平均放电幅值

$$Q_a^* = \frac{N_i}{f t_a} (\alpha + q_s) \Gamma\left[1 + \frac{1}{\beta}\right] \quad (4)$$

3) 每次放电的平均幅值

$$q_a^* = \frac{Q_a^*}{N_a^*} = (\alpha + q_s) \Gamma\left[1 + \frac{1}{\beta}\right] \quad (5)$$

• 收稿日期:2001-12-10

基金项目:教育部骨干教师基金资助项目

作者简介:唐炬(1960-),男,四川蓬溪人,重庆大学教授,从事电气设备绝缘在线监测及故障诊断研究。

单一分布不能区分相互叠加的放电源,然而对多个简单分布进行加权组合而成的混合两参数 Weibull 分布函数可以分离这些放电现象:

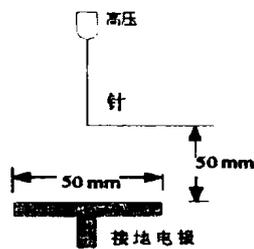
$$F(q) = \sum_{i=1}^{n_w} p_i F_i(q) = \sum_{i=1}^{n_w} p_i \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{q}{\alpha_i} \right)^{\beta_i} \right] \right\}$$

$$\sum_{i=1}^{n_w} p_i = 1 \quad (6)$$

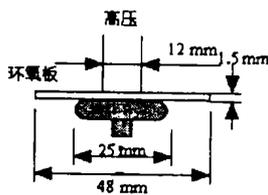
其中 n_w 是简单分布函数的个数; p_i 是各个函数的权重值; α_i, β_i 分别是各个函数的参数值。同理可以推算出 N_a^*, Q_a^*, q_a^* 等标准平均值。

2 几种典型的局部放电模型

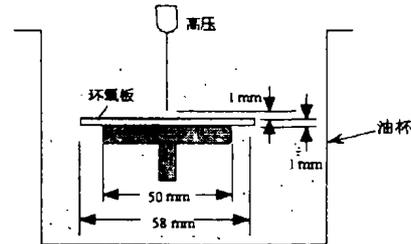
针对变压器的特点,设计了空气中的单点电晕及油中的尖板放电、空气中及油中的沿面放电和扁平空气隙放电这 5 种典型的局部放电模型。空气中的单点



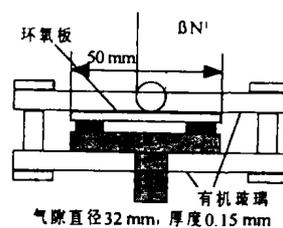
(a) 空气中单点电晕



(c) 空气中及油中沿面放电



(b) 油中尖板放电



(d) 扁平空气隙放电

图 1 人工缺陷模型

3 模拟实验分析

文中针对以上 5 种人工缺陷,用 Weibull 概率函数模拟脉冲幅值分布,用最小二乘法进行参数估计,用克萊姆法则对估计的结果进行检验,分析了每种放电源的幅值分布。图 2 中分别画出了代表各种类型局部放电幅值分布的图和对应的 Weibull 分布图。

从图中可以看出不同的局部放电源脉冲幅值分布有明显的区别:空气中单点电晕只有负极性的脉冲,这是因为在负极性比在正极性下容易起晕,放电量小但是放电次数多,放电也比较集中;油中尖板放电也只有负极性的脉冲,但是放电量比空气中单点电晕大,放电

电晕模型采用针板电极,如图 1(a) 所示,针尖与圆板电极之间距离为 5 cm,圆板电极上放置一 1 mm 厚的环氧绝缘板,针接高压,板接地。对于油中尖板放电,尖板距离太大不容易起晕,于是调整尖板距离为 1 mm,将其放入油杯中,如图 1(b) 所示。空气中的沿面放电模型如图 1(c) 所示,将绝缘板置于圆板电极上,圆柱电极紧压于环氧板上方。油中的沿面放电模型与空气中的沿面放电模型完全相同,仅仅是把图 1(c) 所示的模型置于油杯中进行实验。绝缘内部扁平空气隙放电的模拟(见图 1(d) 所示),我们采用稍加改造后的 CM-II 模型,空气隙由 0.2 mm 厚的绝缘纸夹于绝缘板和低压电极之间形成,整个模型放置于油杯中,为使气隙中不进油和其他的一些气体,在绝缘纸周围均匀地涂上硅橡胶以密封,用有机玻璃板将其紧压并用螺钉固定。

也比较分散;与前两者不同,空气中的沿面放电有正负两个极性的脉冲,分布稍有不同,因此 Weibull 图上有两条曲线;而油中沿面放电的正负脉冲分布非常对称,两条曲线几乎重合在一起,放电量也相当大;对于绝缘内部的扁平空气隙放电模型,放电量较小,而且正负极性的脉冲分布极不对称。其中参数值随着放电量的增大而增大,在 Weibull 图上表现为值越大则曲线在纵轴上的截距越大。

对每种模型随机抽取 10 组在同一实验电压下测得的数据进行分析,发现不同的局部放电源所对应的 α 参数值有明显的分布区间,如图 3 所示。

在 22 kV 实验电压等级下,空气中单点电晕放电

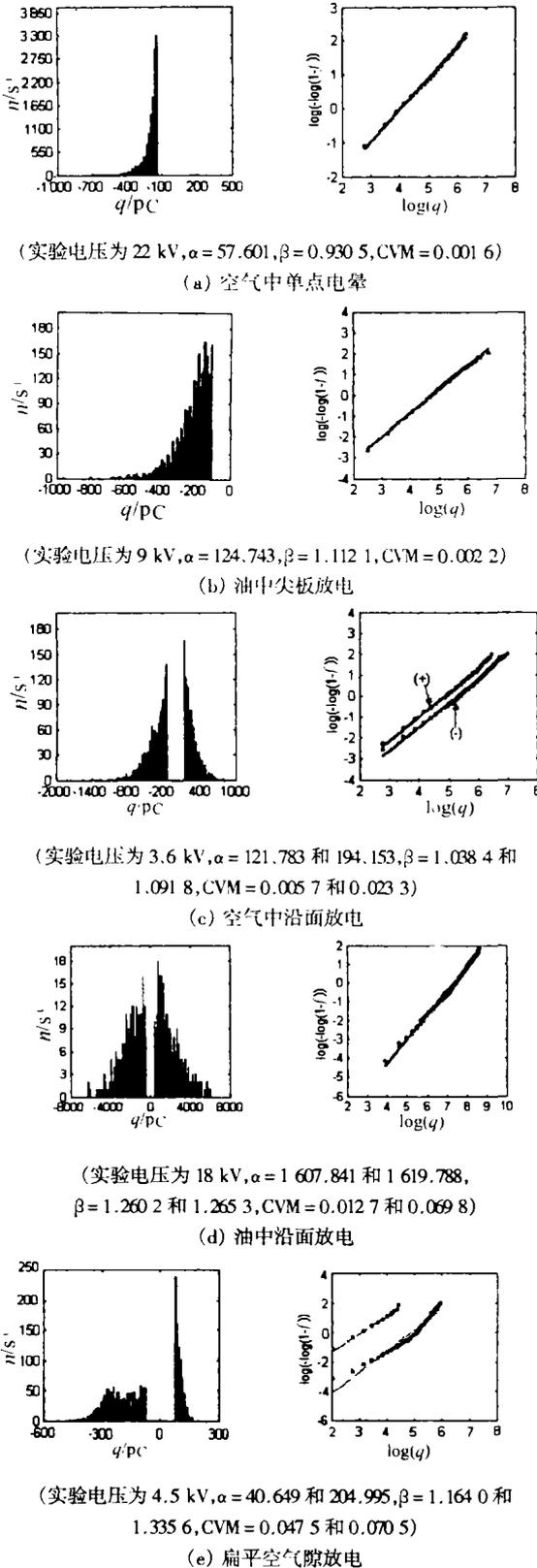


图 2 各种局部放电源的幅值分布图和 Weibull 分布图

的参数值分布在区间 40 ~ 100 上, 11 kV 下的油中尖板放电值分布在区间 100 ~ 140, 3 kV 下的空气中沿面放

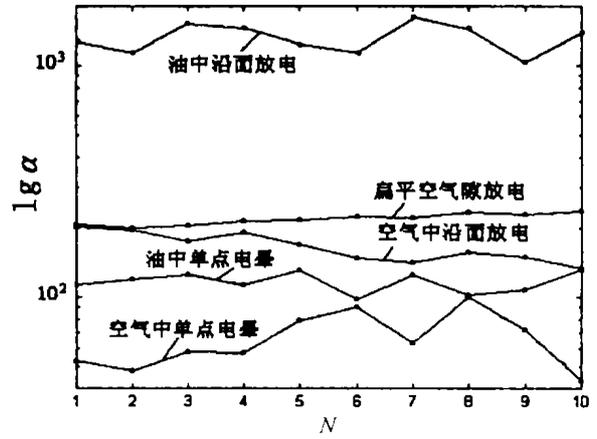


图 3 参数 α 的分布区间

电值分布在区间 140 ~ 200, 5 kV 下的扁平空气隙值分布在区间 200 ~ 240, 18 kV 下的油中沿面放电的值分布在区间 1560 ~ 1620, 明显区别与其他放电现象。

当实验电压在 120% ~ 150% 起始放电电压之间变化时, α 值的分布区间会发生重叠, 单从 α 值大小很难识别放电类型, 这时应结合放电的 Weibull 图的特征进行判别。

神经网络、统计算子等其他一些统计分析方法有着固有的缺陷。例如神经网络结构复杂, 学习时间长, 识别的结果与采用的样本有很大关系, 统计算子计算复杂, 不能识别混合放电等。相对而言 Weibull 分析有很大优势。首先从曲线形状就可以观察出放电源的个数, 通过混合 Weibull 模型可以进一步求出各放电现象的参数值和标准平均值, 从而量化各个放电现象并便于记录每个放电现象随电压或老化时间变化的发展过程, 这为诊断绝缘中出现的每个局放现象提供了依据。对此我们作了一组混合放电模型的试验, 结果如图 4 所示。

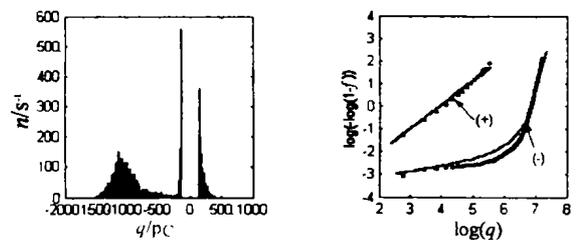


图 4 混合放电的幅值分布图和 Weibull 分布图

与单一放电源不同的是, 混合放电的 $n-q$ 图呈现双峰的形状, 而且在 WPP 图上可以看到有一个明显的拐点, 我们可以判断这是由两个混合放电源得出的数据。进一步分析, 算出各参数值如下: $p_1 = 0.1627, \alpha_1 =$

63.878 5, $\beta_1 = 0.574 4$; $p_2 = 0.837 3$, $\alpha_2 = 498.811 4$, $\beta_2 = 4.694 1$ 。由各个放电源的参数分布区间可知这是由空气中的单点电晕放电和油中的沿面放电组成的混合放电,与实际相符。标准平均值 $N_{a_1}^* = 19.1$, $Q_{a_1}^* = 5 161$, $q_{a_1}^* = 270$; $N_{a_2}^* = 5.8$, $Q_{a_2}^* = 3 152$, $q_{a_2}^* = 543$ 。

4 结 论

1) 实验证明局部放电脉冲幅值分布(PAD)的累积概率函数与 Weibull 分布非常吻合, Weibull 分布的参数值与发生的局放现象有内在联系。从不同类型放电的脉冲幅值分布提取出的特征参数相差很大,可用特征量 Weibull 参数值 α 和 β 作为样本形成特征库,以识别各种局部放电类型。

2) 在多个放电源混合的情况下,通过混合的 Weibull 模型可以分离局部放电信号并推算出各标准平均值 N_a^* 、 Q_a^* 、 q_a^* ,有效地量化各种放电类型。

3) 实现了局放现象的分离就能把对应于每种局放现象的脉冲幅值分布作为时间或电压的函数独立研究, Weibull 参数值和标准平均值为绝缘诊断提供了依据。

参考文献:

- [1] CONTIN A, MONTANARI G C, FERRARO C. PD Source Recognition by Weibull Processing of Pulse Height Distribution [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(1):48-58.
- [2] CACCIARI M, CONTIN A, MONTANARI G C. Use of a Mixed - Weibull Distribution for the Identification of PD Phenomena [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4):614-627.
- [3] CONTIN A, RABACH G. PD Analysis of Rotating ac Machines [J]. IEEE Transaction on Electrical Insulation, 1993, 28(6):1 033-1 042.
- [4] SCHIFANI R, CANDELA R. A New Algorithm for Mixed Weibull Analysis Of Partial Discharge Amplitude Distributions [J]. IEEE Trans On Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(2):242-249.
- [5] MONTANARI G C. Optimum Estimators for the Weibull Distribution from Censored Test Data [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(2):157-164.
- [6] JACQUELIN J. Inference of Sampling on Weibull Parameter Estimation [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(6):809-816.
- [7] 庄渭峰. 用微机实现威布尔分布参数的双线性回归最小二乘估计 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 1999, (5):2-7.

Application of the Weibull Distribution for the Recognition of Transformer PD Phenomena

TANG Ju, WANG Jing, LI Jian, SONG Sheng-li

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The problem of identification of partial discharge phenomena occurring in a transformer insulating system is addressed. Under the assumption that different PD sources can produce pulse of different PD distributions, five typical artificial defects have been designed to compare the PD distributions coming from different sources, such as internal voids, surface and corona discharges. In this aim, Weibull distribution has been introduced to estimate the parameters and the least square methods (LSM) have been used to estimate the parameters. The goodness of fit to a Weibull distribution is checked by the Cramer - von - Mises (CVM) test. It is shown that the probability function fits well the partial discharge height distribution. By this way, different discharge sources can be distinguished. by Weibull parameter. In addition, the recognition of two or more PD phenomena simultaneously active is approached by means of an additive Weibull distribution. It allows quantities related to each of the two or more superimposed PD phenomena to be estimated, according to the Weibull parameters and the standard mean quantities.

Key words: Weibull distribution; partial discharge; amplitude distribution

(责任编辑 李胜春)