

Computer Simulation of Partial Discharge in Void

Jin Wei¹, Li Junhao²

¹ZhenZhou power company., zhengzhou, China

²Xi'an Jiaotong University, xi'an, China

Email: jwjh2010@gmail.com, zzljh2003@163.com

Abstract: The mechanism of partial discharge is the basic of PD detection, monitor and risk assessment. A PD computer simulation model which is based on a physical discharge model is created in this paper. The simulation results are conforming to the experiment results. The influence of dielectric surface and gas state of cavity to PD pattern can be interpreted using this model. The effect of supply voltage frequency to PD pattern also can be explanation by this model.

Keywords: Partial discharge; Computer simulation; Frequency

气隙局部放电的计算机模拟

靳 巍¹, 李军浩²

¹郑州供电公司, 郑州, 中国, 450000

²西安交通大学, 西安, 中国, 710049

Email: jwjh2010@gmail.com, zzljh2003@163.com

摘 要: 局部放电的机理研究是其检测、监测及危险评估的基础, 本文从空间电荷的角度对局部放电进行了分析, 在对其物理过程进行分析的基础上进行了计算机数值模拟, 模拟结果与实验结果是一致的。利用该模型可以解释局部放电发展过程中缺陷处介质状态和气体状态对局部放电谱图的影响, 同时, 利用该模型, 还可以进行不同电源频率下局部放电谱图的分析与研究。

关键词: 局部放电; 计算机模拟; 频率

1 引言

局部放电是指绝缘结构中由于电场分布不均匀, 局部电场过高而导致的绝缘介质中局部范围内的放电或击穿现象。它可能产生在固体绝缘孔隙中、液体绝缘气泡中或不同绝缘介质的交界面上^[1]。绝缘介质中发生的局部放电与绝缘材料的劣化和击穿过程密切相关, 是绝缘劣化的主要原因和早期征兆, 它能有效地反映变压器内部绝缘的故障, 尤其对突发性故障的早期发现比介质损耗测量、油中气体含量分析等方法要有效得多^[2]。绝缘介质中的局部放电包含了丰富的绝缘状况信息, 对局部放电进行检测不仅能反映变压器绝缘的绝缘状态, 检测到许多制造与安装中的缺陷, 而且还可能检测出绝缘故障的发生及严重程度, 在事故的早期阶段提出预警, 以便有计划地安排维修, 减少设备的损坏, 避免由于事故带来巨大的直接或间接损失^[3]。因此, 国内外无论是研究机构、制造厂商, 还是电力系统

运行部门, 都愈来愈关心局部放电检测技术的发展, 并把局部放电作为质量监控的重要指标^[4]。特别是随着我国电力系统正朝着特高压、大容量的方向发展, 使得电力变压器等设备的绝缘系统承受的工作场强愈来愈高, 绝缘介质的局部放电问题也越来越突出。

目前对局部放电的研究主要集中在检测、去噪、模式识别等方面。但对局部放电的发生机理进行研究, 是对局部放电进行有效快速检测、检测和危险评估的基础。计算机模拟已经成为继机理分析、试验研究之后的又一科学研究方法。在仔细研究局部放电发展的基础上, 以局部放电的物理过程为基础建立模型, 进行局部放电的计算机模拟, 是进行局部放电研究和分析的有效方法。

2 实验线路及试品模型

固体绝缘内气隙放电是一种典型的局部放电,

其发生机理和发展过程中空间电荷的变化文献[5]均有描述, 本文对环氧绝缘内部气隙缺陷模型进行了实验室试验, 试验线路及试品结构如图 1 所示。

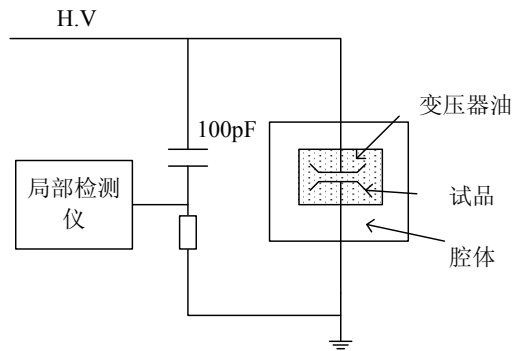


Figure 1. Test system
图 1 试验系统

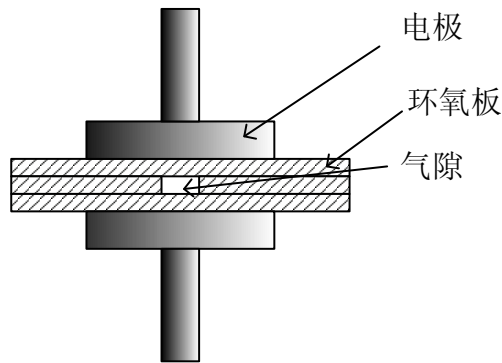


Figure 2. Structure of specimen
图 2 试品结构

将整个试品放入变压器油中以防止沿面闪络, 局放仪采用 PDChecker System, 可以记录发生局部放电时的放电谱图。

以局部放电发展过程中的物理过程为基础对次模型进行了计算机模拟[5]。

3 计算机模拟

3.1 放电初始条件

采用基于放电物理过程的单个气隙放电模型, 进行数值计算来进行计算机模拟。根据试验条件, 缺陷的几何尺寸可确定, 即缺陷高度半径为 $a = 1\text{mm}$, 缺陷半径 $b = 0.5\text{mm}$, 介质厚度

$D = 3\text{mm}$ 。

在气隙内发生一次局部放电, 必须满足如下条件: (1) 存在初始电子触发产生放电; (2) 气隙内的场强要足够高, 足以维持放电所需要的电子崩。初始电子可以由光辐射(光电离)等外界因素产生, 也可能由之前放电沉积在气隙壁的空间电荷脱陷产生, 具有随机性, 即局部放电的随机性由初始电子产生的随机性决定; 条件 2 则由缺陷的尺寸结构和外加电场所决定。

初始电子的出现概率由如下公式给出:

$$h(t) = h_0 + h_1(t)$$

式中 h_0 是气体光电离因素导致自由电子产生的概率; $h_1(t)$ 是 t 时刻由于之前放电产生的气隙壁沉积电荷脱陷引起的自由电子的概率, 其产生概率遵从表面电子热发射的 Richardson-Schottky 公式。

针对条件 (2), 缺陷气隙内的临界击穿场强根据文献[5]可由如下公式给出:

$$E_{str} = (E/p)_{cr} p \left[1 + \frac{B}{(2pa)^n} \right]$$

在气体为空气的条件下, $(E/p)_{cr} = 25.2\text{VPa}^{-1}\text{m}^{-1}$, $n = 1/2$, $B = 8.6\text{m}^{1/2}\text{Pa}^{1/2}$, 根据缺陷的结构尺寸, 可以确定缺陷气隙的临界击穿电压。

3.2 2 个时间常数

设 $N(t)$ 是 t 时刻前一次放电产生的空间电荷总数, 而且会随着时间的推进不断因为空间扩散/复合、表面流逝等作用而慢慢衰减, 其衰减服从指数规律:

$$N(t_2) = N(t_1) \exp(-\Delta t / \tau_1)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

Δt 是两次放电之间的时间间隔, τ_1 为空间电荷衰减时间常数。

此外, 沉积到气隙壁的空间电荷会逐渐入陷到介质内, 随着时间的增加入陷深度会越来越深, 直

接表现为脱陷功函数 ψ 的增加, 则其变化可表达为:

$$\psi(t) = \psi + \Delta\psi(1 - \exp[-\Delta t / \tau_2])$$

τ_2 表征了由于入陷电荷导致的功函数的增加速度, τ_2 越小, 则增加速度越快, τ_2 越大, 则增加速度越慢。这里 $\Delta\psi = 0.2eV$ 。

3.3 介质表面电导率的影响

介质的表面电导率会使放电产生的空间电荷在介质表面流失加速, 由此导致由空间电荷引起的空间电场发生变化, 空间电荷变化遵从如下公式:

$$dq = -\left(\frac{\pi}{2}\right)k_s E 2a dt$$

式中 k_s 为表面电导率, $E 2a$ 为 t 时刻的气隙内的电压差。

3.4 放电量及残压

气隙内放电产生的真实放电量 q 由气隙内的放电前后的电场差 ΔE 决定, 可由下式确定:

$$\pm q = \varepsilon_0 \pi b^2 \left[1 + \varepsilon_r (K(a/b) - 1) \right] \Delta E$$

式中 ε_0 为真空中的介电常数, ε_r 为介质的相对介电常数, $K(a/b)$ 是与缺陷几何尺寸相关的无量纲函数。

$$K = \begin{cases} \sim 1 & a/b \ll 1 \\ = 3 & a/b = 1 \\ \sim 4a/b & 1 < a/b < 10 \end{cases}$$

视在放电量 q' 可表示为:

$$q' = \frac{4}{3} \pi a b^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r K(a/b) \Delta E \frac{1}{D}$$

放电之后气隙内的残余电压为

$$E_{res} = E_{ch} = \gamma E_{cr} = \gamma (E/P)_{cr} p$$

$$\gamma = 0.35$$

3.5 模拟过程

模拟方法采用蒙特-卡罗模拟方法, 模拟过程为:

1. 确定表面功函数 ψ ;

2. 确定两个时间常数 τ_1, τ_2 ;

3. 确定介质表面电导率 k_s ;

4. 确定缺陷气隙内气压 P ;

5. 根据以上条件计算 $[t, t + \Delta t]$ 时间段内的初始电子产生率, $h(t)$;

6. 在 $[0 \sim 1]$ 内产生随机数 u ;

7. 如果 $u < h(t)$ 且气隙内场强高于临界击穿场强, 则发生一次放电, 计算放电量, 更新气隙内的电荷状态。

8. 如不满足步骤 7 的两个条件, 则返回步骤 5 继续。

4 模拟结果

图 3、图 4 为在 17.5kV 下的计算机模拟结果和试验结果。

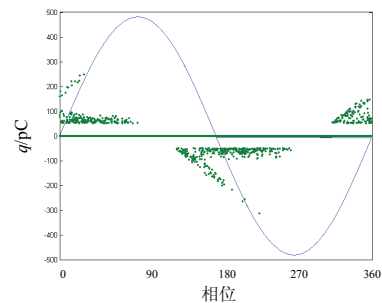


Figure 3. Result of computer simulation
图 3 计算机模拟结果

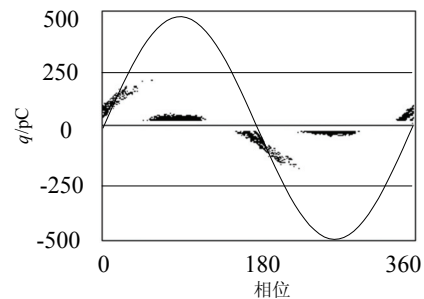


Figure 4. Result of experiment
图 4 试验结果

固体绝缘内气隙放电的一个重要特征是具有类似“兔耳朵”的放电谱图, 从图 3 及图 4 可以看出, 其 PRPD 谱图基本类似, 都出现了“兔耳朵”谱图, 说明了计算机模拟是正确可行的。

5 模型应用

在电力设备的高压试验中, 电源频率已不仅仅局限于 50Hz 交流系统, 越来越多的电力设备开始使用不同频率的电源进行试验。当试品的电容值很

大时, 为了消除试品残余电荷的影响, 多采用超低频率电源系统, 如高压电力电缆的高压试验目前多采用 0.1Hz 超低频率电源。而当试品的电感值很大时, 如变压器绕组试验, 则多采用 150-400Hz

的高频电源进行试验。那么不同频率下设备的局部放电表现差异就可以通过计算机模拟进行分析。利用本文提到的模型, 将电源频率设为 0.1Hz, 20Hz, 50Hz 及 200Hz 进行模拟, 其结果如图 5 所示。

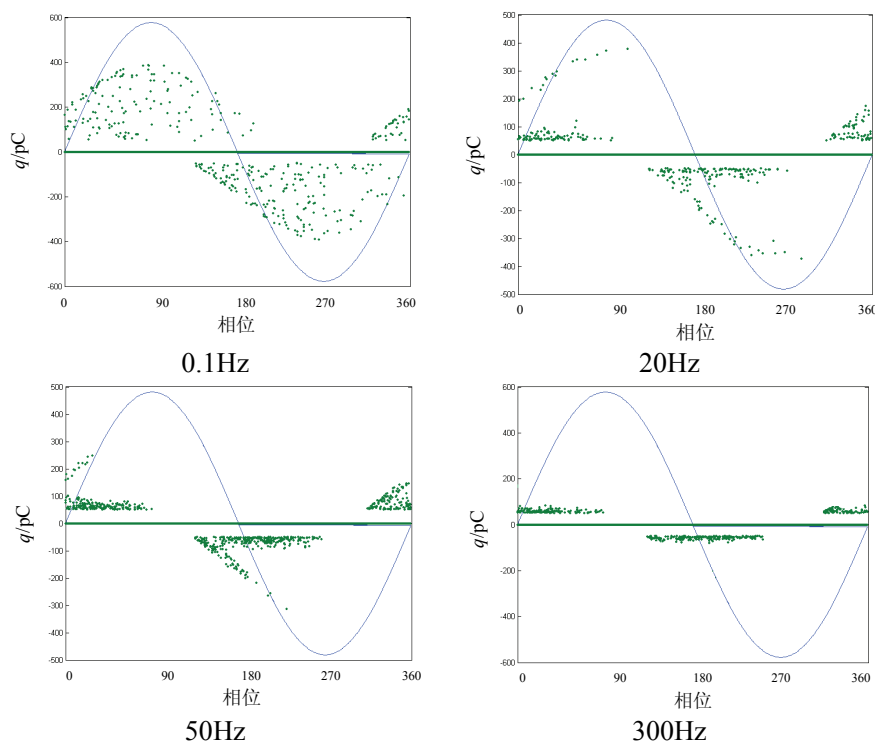


Figure 5. computer simulation results in different supply frequencies
图 5 不同电源频率下的计算机模拟 PRPD 谱图

从图 5 可以看出, 在 0.1Hz 超低频率下, 气隙内显示不出记忆效应, 所以其谱图没有“兔耳”。在 20Hz、50Hz 下均表现出“兔耳”状谱图, 而在 300Hz

时, 由于电源转换太快, 致使放电谱图呈现“直线”状。对比试验测量谱图^[6], 可以看出, 模拟的谱图与试验所得是一致的。

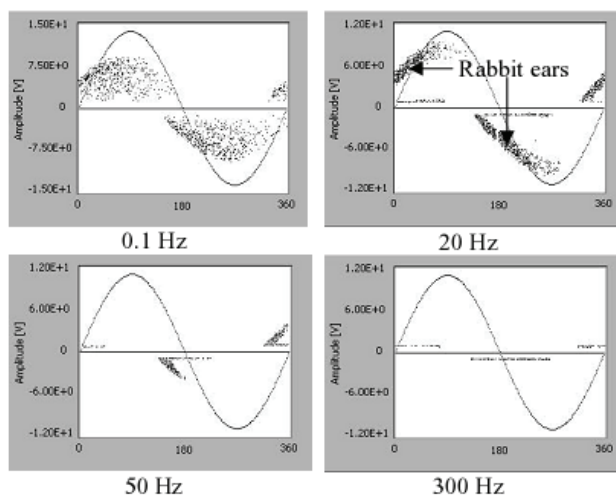


Figure 6. Experimental results in different supply frequencies
图 6 不同电源频率下的试验 PRPD 谱图

6 结论

从气隙内空间电荷变化的角度建立了气隙放电的计算机模拟模型，可以对局部放电的 PRPD 谱图进行计算机模拟，通过对模型各种参数的研究进而可以对影响局部放电谱图的各种因素进行讨论和分析。

利用该模型可以进行不同电源频率下局部放电谱图的计算机模拟，进而可以进行进一步的研究。

References (参考文献)

- [1] M. D. Judd, S. D. J. McArthur, J. R. McDonald and O. Farish, "Intelligent condition monitoring and asset management: Partial discharge monitoring for power transformers", IEE Power Engineering Journal, 2002, Vol. 16, No. 6, pp. 297-304.
- [2] M. Wang, A. J. Vandermaar and K. D. Srivastava, "Review of condition assessment of power transformers in service", IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, Vol. 18, No. 6, pp. 12-25.
- [3] B. H. Ward and S. Lindgren, "A survey of developments in insulation monitoring of power transformers", Conf. Record of the 2000 IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation, Anaheim, 2000, pp. 141-147.
- [4] R. Bartnikas, "Partial discharges—Their mechanism, detection and measurement", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, Vol. 9, No. 5, pp. 763-808.
- [5] Lutz Niemeyer. A Generalized approach to partial discharge modeling [J]. IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995, 2(4): 510-527.
- [6] A.Cavallini, G.C.Montanari. Effect of supply voltage frequency on testing of insulation system [J]. IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2006, 13(1): 111-121.