

8-13-2020

Bubble Dynamics Simulation in Transformer Oil under AC Electric Field

Zhao Tao

1. School of Electrical engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;;

Yunpeng Liu

1. School of Electrical engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;;

Fangcheng Lü

1. School of Electrical engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;;

Liu Shan

2. State Grid Baoding Electric Power Supply Company, Baoding 071000, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Bubble Dynamics Simulation in Transformer Oil under AC Electric Field

Abstract

Abstract: The dynamics of gas bubbles in transformer oil was theoretically explored. *A numerical model was introduced for the bubble dynamics in the transformer oil under AC electric field. The electrodynamic force was calculated by integrating the Maxwell stress tensor on the surface of the bubble, and then the bubble trajectory was obtained through the force calculation of the bubble under the AC electric field. Notably, trajectories calculated indicate the bubble aggregation in concentrated area of the electric field between the needle-plane electrode, and different bubble radius will affect the trajectory of the bubble. Also, different bubble radiuses cause a small change in the equilibrium position of bubble between the electrodes.* It is concluded that the bubble can play a catalytic role in the breakdown of the oil gap.

Keywords

bubble trajectory, aggregation, transformer oil, electrodynamic force

Recommended Citation

Zhao Tao, Liu Yunpeng, Lü Fangcheng, Liu Shan. Bubble Dynamics Simulation in Transformer Oil under AC Electric Field[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(12): 3081-3087.

交流电场下变压器油中气泡动力学特性仿真

赵涛¹, 刘云鹏¹, 律方成¹, 刘山²

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003; 2. 国网保定供电公司, 河北 保定 071000)

摘要: 对交流电压下变压器油中柱板电极间气泡动力学特性进行了数值仿真研究。建立了交流电压下变压器油中气泡运动二维数值模型, 通过麦克斯韦应力张量在气泡界面上的面积分求得气泡受到的电动力, 通过气泡受力分析获得交流电场中不同位置释放后气泡的运动轨迹。计算结果显示在工频交流电场作用下, 气泡在柱板电极间场强集中区域存在振荡平衡位置, 不同大小的气泡对应的振荡平衡位置比较接近, 且处于柱板电极间场强集中区域。这意味着气泡有可能在该位置出现聚集, 导致油间隙击穿电压的降低。

关键词: 气泡轨迹; 聚集; 变压器油; 电动力

中图分类号: TM854

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 12-3081-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201612029

Bubble Dynamics Simulation in Transformer Oil under AC Electric Field

Zhao Tao¹, Liu Yunpeng¹, Lü Fangcheng¹, Liu Shan²

(1. School of Electrical engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Baoding Electric Power Supply Company, Baoding 071000, China)

Abstract: The dynamics of gas bubbles in transformer oil was theoretically explored. A numerical model was introduced for the bubble dynamics in the transformer oil under AC electric field. The electrodynamic force was calculated by integrating the Maxwell stress tensor on the surface of the bubble, and then the bubble trajectory was obtained through the force calculation of the bubble under the AC electric field. Notably, trajectories calculated indicate the bubble aggregation in concentrated area of the electric field between the needle-plane electrode, and different bubble radius will affect the trajectory of the bubble. Also, different bubble radiuses cause a small change in the equilibrium position of bubble between the electrodes. It is concluded that the bubble can play a catalytic role in the breakdown of the oil gap.

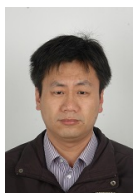
Keywords: bubble trajectory; aggregation; transformer oil; electrodynamic force

引言

工程液体电介质(如变压器油)被广泛用作电气设备的绝缘和冷却介质。气泡的存在会降低变压器油纸绝缘的电气强度, 可能导致变压器油纸绝缘

中出现局部放电, 甚至由于气泡的聚集导致油纸绝缘的击穿。

由于液体介质内放电的复杂性, 目前尚未形成对液体介质内放电物理过程在所有时间和空间发展阶段的物理解释^[1]。大量的试验研究发现, 液体介质的击穿电压与液体内的压强有关, 适当的压强可提高放电起始电压并提高液体介质的绝缘强度。基于此结论, 相关研究人员认为液体内存在的气泡对导致液体介质的击穿起到了重要作用。



收稿日期: 2015-12-04 修回日期: 2016-05-24;
基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金 (2015MS90);

作者简介: 赵涛(1982-), 男, 河北保定, 博士生, 讲师, 研究方向为电气设备绝缘在线监测; 刘云鹏 (1976-), 男, 安徽金寨, 博士, 教授, 研究方向为电气设备在线监测。

<http://www.china-simulation.com>

• 3081 •

电场作用下液体绝缘介质中气泡的动力学特性主要受电流体动力学(electrohydrodynamic, 简称 EHD)效应影响。此效应可影响液体绝缘间隙击穿过程, 同时在主动强化换热方面也有重要工程应用价值, 因此国内外相关学者进行了广泛研究。H. Sharbaugh 等的研究认为液体电介质中出现的气泡可能是存在于电极表面或液体中的气体在静电力的作用下析出的。当气泡内气体承受的电压达到帕邢曲线的最小值时发生击穿^[2]。Masanori Hara 等对不同上升时间的冲击电压下的液氮和液氦中气泡的形状及间隙击穿电压进行了实验观测, 结果显示在不同上升速度的斜角波作用下, 间隙中气泡可能呈现出球形, 被拉长的圆柱形和贯通间隙的气泡小桥^[3]。Sumitoshi Ogat 等通过实验观测到电场的增强会使液体介质中生成的气泡变小, 电场不仅影响气泡的运动, 还影响气泡的生成机制^[4]。文献[5-8]对不均匀电场下液氮中的气泡运动特点进行了理论和试验研究, 分析了不同电压和电极形式对气泡运动特性的影响。文献[9]针对液体介质内极不均匀电场作用下气泡的动力学行为展开研究, 认为气泡界面产生的流注由局部的最大电场值决定, 不同的气泡形状可能是产生不同流注模式的原因。国内清华大学的彭耀等对变压器油中气泡在电场作用下的行为特点进行了实验和数值研究, 结果发现气泡在电场下脱离时间变短, 并沿电场方向伸长^[10]。

而另一方面, 相关学者对变压器油纸绝缘中气泡的生成机制及其影响因素也做了大量研究。T. V. Oommen 和 S. R. Lindgren 实验研究了油浸式电力变压器在过载运行时气泡的产生过程, 分析了温度对气泡产生的影响, 指出油纸绝缘中的水分、气体含量和压力是气泡产生的主要影响因素; 当气泡产生后, 局部放电在一定条件下也会随之发生; 对于存在一定老化和含水量的变压器, 在 140 °C 以下就可以产生气泡^[11]。M. Koch 和 S. Tenbohlen 研究了油纸组合绝缘的气泡产生过程, 指出水分加速了油纸绝缘的老化, 降低了绝缘强度并诱发了气泡在高温下出现。当水分含量>2%时, 伴随快速的大负荷波

动会产生气泡, 如果气泡处在高场强位置易导致变压器发生故障^[12]。P. Przybylek 等学者指出气泡效应的起始温度, 老化纸低于新纸。因此老化纸绝缘中产生气泡效应几率远高于新纸。老化纸(DP=341)在 2.3%湿度, 120 °C 即可产生气泡效应^[13-15]。

由以上研究可以推测, 当变压器油纸绝缘内出现气泡后, 气泡在强电场区出现并聚集则可能发生气泡放电进而导致间隙的击穿。因此, 气泡在变压器油中的运动特性可能是引起间隙放电和击穿的重要原因。EHD 效应会对气泡在变压器油中的运动轨迹产生显著影响。图 1 拍摄的是变压器油中针板电极间气泡运动照片。图 1 中所示为浸入变压器油中的针板电极, 针电极接高压, 板电极接地, 两电极间距离约为 5.3 mm。一末端开口内径为 0.4 mm 的针管水平放置于板电极上, 并处于针电极侧下方。针管另一端接塑料软管, 空气通过软管缓慢压入, 气泡由针管端部开口出现, 与针管脱离后由底部的板电极起始向上运动。图 1(a)和图 1(b)中针电极上施加的电压分别为 0 V 和 14 kV。图 1(b)中气泡处于针电极附近的极不均匀电场内, 其运动轨迹相比图 1(a)有明显不同。电场对气泡的运动轨迹产生了较大影响。

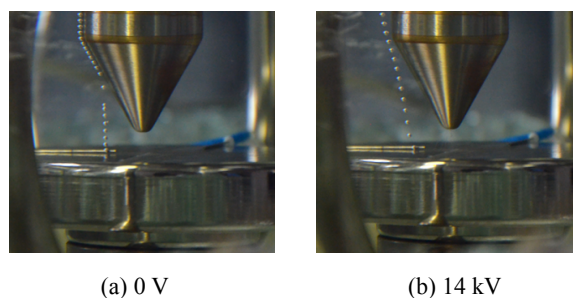


图 1 电场对气泡运动的影响

研究人员对液体电介质内气泡的生成、脱离、碰撞和变形等方面进行了大量研究, 而对气泡生成后的运动规律研究较少。本文主要研究交流不均匀电场作用下变压器油中气泡的运动轨迹及其对绝缘可能带来的风险。通过对气泡在变压器油中柱板电极间的受力分析, 建立了气泡运动的二维数值模型, 计算得到了气泡在油间隙中的运动轨迹和运动

速度, 并分析了气泡大小对运动轨迹的影响。基于理论计算结果, 对电极间气泡悬浮聚集的可能性进行了讨论。本文研究内容有利于对液体介质内气泡放电现象的理解, 还可以为绝缘设计中如何减少气泡导致的放电提供理论参考。

1 气泡运动数值模型

1.1 模型结构及电场计算

如图 2 所示, 考虑一半径为 r 的球形气泡处于变压器油内, 通过柱板电极模型在变压器油内施加一工频交流电场, 柱电极为高压电极, 板电极为接地电极。柱电极端部为半球形, 半径为 0.5 mm, 柱板电极间隙距离为 2.5 mm。模型中电场求解区域大小为 10 mm×5 mm。

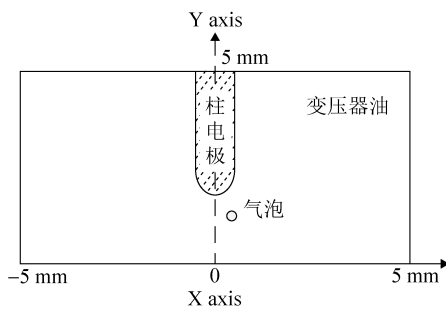


图 2 仿真模型结构图

根据电磁场理论, 模型中的电场计算方程为

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon\varepsilon_0\mathbf{E} \quad (3)$$

式中: \mathbf{E} 为电场强度; ϕ 为电位; ε 为介电常数; ε_0 为真空介电常数; \mathbf{D} 为电位移矢量; q 为自由电荷密度。

1.2 气泡的受力和运动

文献[5-8]对液氮内气泡的受力情况进行了分析, 在不均匀电场内, 假设流体(变压器油和气泡内气体)不可压缩, 气泡受到的力主要有电动力, 液体粘度导致的拖拽力和浮力。因此, 液体介质中气泡运动方程可表示为

$$m \frac{dv}{dt} = \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_B \quad (4)$$

式中: m 为气泡质量; \mathbf{v} 为气泡运动速度; t 为时间; \mathbf{F}_E 为气泡受到的电动力; \mathbf{F}_D 为气泡受到的拖拽力; \mathbf{F}_B 为气泡受到的浮力。

电场作用下流体(变压器油和气泡内气体)受到的电动力密度 \mathbf{f} 可表示为^[16-17]

$$\mathbf{f} = q\mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2\nabla\varepsilon + \frac{1}{2}\nabla\left[\rho\left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)E^2\right] \quad (5)$$

式中: ρ 为流体密度。式(5)右侧第一项 $q\mathbf{E}$ 为库伦力, 是包含自由电荷的介质体积微元受到的力。第二项为介电电泳力, 与相应空间位置的场强和介电常数的空间变化有关。第三项为电致伸缩力。本模型中假设介质内自由电荷为 0 且忽略气泡的变形, 气泡受到的电动力仅考虑施加到流体(变压器油和气泡内气体)上的介电电泳力。

介质所受的电场总作用力 \mathbf{F}_E 可以表示为式(5)所示的力密度 \mathbf{f} 对相应介质的体积分, 同时还可以通过介质的麦克斯韦应力张量 \mathbf{T}_1 在该体积表面上的面积分来计算^[16]。为了简化计算, 假设介质电极化率与介质密度成正比, 即

$$\varepsilon - 1 = \chi_e = \alpha\rho \quad (6)$$

ε 、 χ_e 和 ρ 分别为介质的相对介电常数、电极化率和密度, α 为比例常数。对于气体和相对介电常数较小的液体, 式(6)一般能够满足, 则麦克斯韦应力张量 \mathbf{T}_1 如式(7)所示^[18]

$$n\mathbf{T}_1 = -\frac{1}{2}n(\mathbf{E} \times \mathbf{D}) + (n \times \mathbf{E})\mathbf{D}^T \quad (7)$$

式中: \mathbf{n} 为介质界面的外法线方向。对式(7)在介质界面积分得到介质所受的电动力

$$\mathbf{F}_E = \oint_{\Omega} n\mathbf{T}_1 d\Omega \quad (8)$$

油粘度导致的拖拽力^[6]可表示为式(9)

$$\mathbf{F}_D = -4\pi\mu r\mathbf{v} \quad (9)$$

式中: μ 为变压器油的动力学粘度; r 为气泡半径; \mathbf{v} 为气泡运动速度。

气泡受到的浮力可表示为式(10)

$$\mathbf{F}_B = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_l - \rho_g)\mathbf{g} \quad (10)$$

式中: ρ_l 为变压器油密度, ρ_g 为气泡内气体密度, \mathbf{g} 为重力加速度。表 1 为计算模型中相关材料属性。

表 1 模型中材料属性

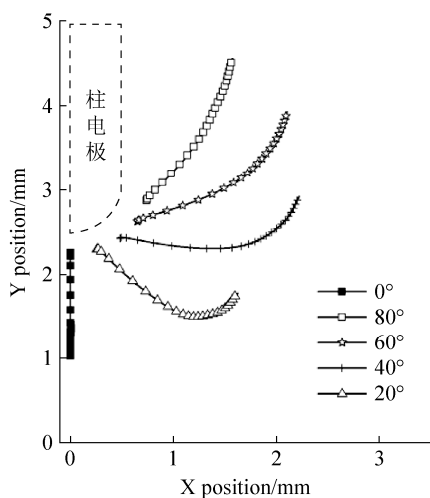
名称	数值
变压器油密度/(kg/m ³)	895
变压器油相对介电常数	2.4
变压器油动力学粘度/Pa.s	0.014 32
气泡内气体密度/(kg/m ³)	1.293
气泡相对介电常数	1

模型求解采用 COMSOL with MATLAB 软件编程^[19], 选用瞬态求解器, 时间步长为 50 us。此外, 计算模型还做了如下假设: 1) 气泡的初始速度为 0; 2) 气泡的初始位置在柱电极附近, 气泡表面与柱电极表面距离为 0.05 mm; 3) 不考虑气泡与电极或其它边界的碰撞, 当气泡与电极或边界相遇时停止计算; 4) 不考虑气泡的变形和油的对流。

2 仿真结果和讨论

2.1 气泡的运动轨迹

为了对比不同初始位置气泡的运动轨迹, 选择了 5 种不同情况。本文考虑了不同的气泡半径, 假设气泡在柱电极附近产生, 不同大小的气泡表面与柱电极表面距离均为 0.05 mm, 气泡的初始位置用气泡的初始角度来定义, 气泡的初始角度 θ 为气泡球心到柱电极端部球心的连线与 y 轴的夹角。对气泡半径 $r=0.2$ mm, $\theta=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ 和 80° 位置释放后气泡的运动轨迹进行了计算, 计算结果如图 3 所示。

图 3 气泡轨迹($r=0.2$ mm, 500 个时间步长)

2.2 气泡的运动速度

为便于比较, 将图 3 计算中气泡的运动速度进行正交分解, 不同初始角度下气泡沿 x 和 y 方向上的运动速度如图 4 所示。

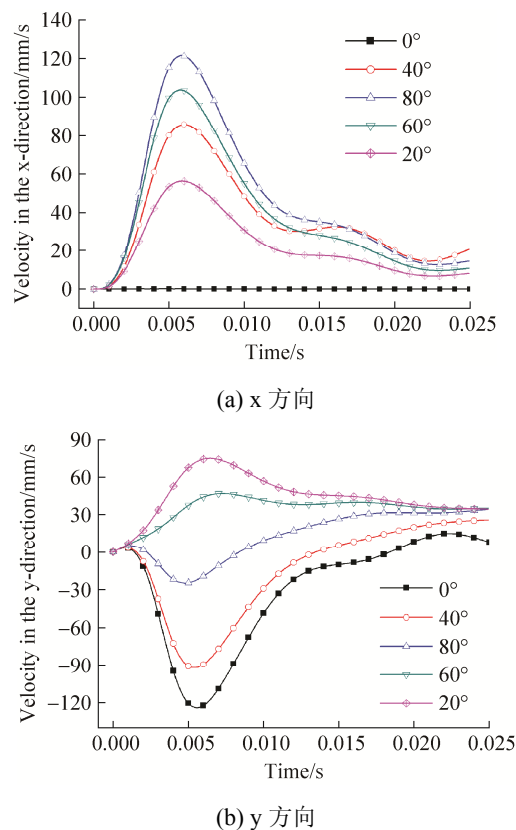
图 4 不同初始角度气泡的 x 方向和 y 方向运动速度 ($r=0.2$ mm, 500 个时间步长)

图 4(a)中, 在 x 方向, 气泡受到电场施加的电动力和变压器油粘度导致的拖拽力, 因此气泡的速度变化与气泡运动所经过位置的场强直接相关。由于求解域在 $x=0$ 两侧的电场对称分布, 所以初始角度为 $\theta=0^\circ$ 释放的气泡在 x 方向速度为 0, 但由于数值计算中存在误差, 随着计算步长的增加, 气泡位置会逐渐偏离 $x=0$ 位置, 通过计算 1 200 个时间步长, 最终气泡在 x 方向上偏移距离为 $-0.000 97$ mm, 此误差对模型计算结果的影响很小, 因此图 4(a)中初始角度为 $\theta=0^\circ$ 释放的气泡在 x 方向速度近似为 0。 $\theta=20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ 和 80° 位置释放的气泡被电场加速, 速度方向为场强减小的方向, 随着气泡远离强电场区, 气泡速度逐渐减小。由于外施电场为

工频交流电场, 运动过程中气泡速度曲线表现出了明显的脉动变化。

图 4(b)中, 在 y 方向, 气泡受浮力、电动力和粘滞力的联合作用。 $\theta=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ 时, 气泡受到的电动力大于浮力, 初始时刻速度为 y 轴负方向; $\theta=60^\circ$ 和 80° 时, 气泡受到的电动力与浮力同方向, 初始速度为 y 轴正方向。随着气泡远离强电场区, 各气泡均出现了减速, 且速度逐渐趋于相同。

图 5 为 $\theta=0^\circ$ 位置释放后气泡沿 y 方向的运动轨迹和速度变化曲线, 为了更清楚表现气泡的运动特点, 计算时长增加到 1 200 个步长。气泡运动轨迹和速度曲线显示, 气泡在工频交流电场作用下出现了振动, 气泡近似以 0.01 s 为周期在柱板电极间振荡运动。由图 5 中轨迹曲线可以推测, 气泡最终可能围绕柱板电极间的某个位置处于振动平衡状态。

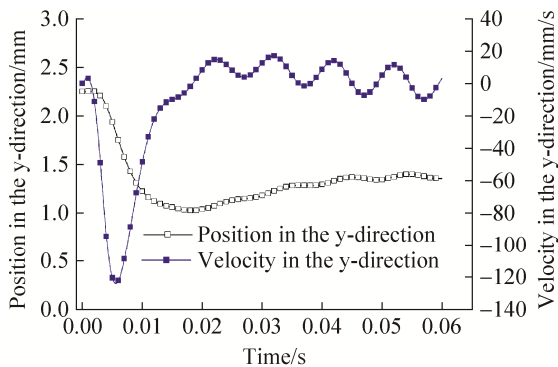


图 5 气泡沿 y 方向的运动轨迹和速度 (0° 初始角, $r=0.2$ mm, 1 200 个时间步长)

2.3 气泡大小的影响

气泡半径 $r=0.1$ mm, $r=0.2$ mm 和 $r=0.4$ mm 情况下, $\theta=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ 和 80° 位置释放后气泡的运动轨迹如图 6 所示。气泡在各位置释放后, 受浮力作用而向上运动, 同时受电动力驱使, 朝向电场强度减小的方向运动, 运动趋势与图 3 中类似。在计算的 500 个时间步长内, 同一初始角度释放的不同半径气泡的运动轨迹相似, 气泡半径越大, 受到的电动力越大, 水平方向上运动达到的距离越远。其中, $r=0.4$ mm, $\theta=80^\circ$ 时, 计算到第 354 个时间步长时, 气泡由模型上方运动出求解区域。

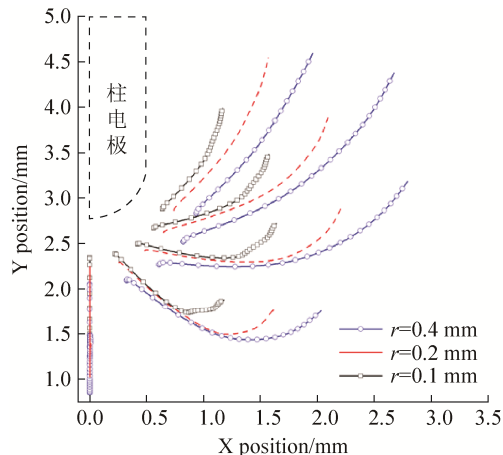


图 6 气泡半径对气泡运动轨迹的影响(500 个时间步长)

图 7 为 0° 初始角时不同半径气泡沿 y 方向的运动轨迹和速度曲线, 计算步长为 1 200 个。图中曲线显示出不同半径的气泡运动特点具有相似性。速度曲线显示, 起始阶段不同大小的气泡运动方向均为 y 轴负方向, 气泡越小, 加速度越大, 越快达到最大速度, 之后其速度衰减也越快。在工频交流电场作用下气泡速度出现了脉动, 气泡近似以 0.01 s 为周期在柱板电极间振荡。气泡运动轨迹曲线显示, 不同半径的气泡在 y 方向上存在振动平衡位置, 且非常接近。

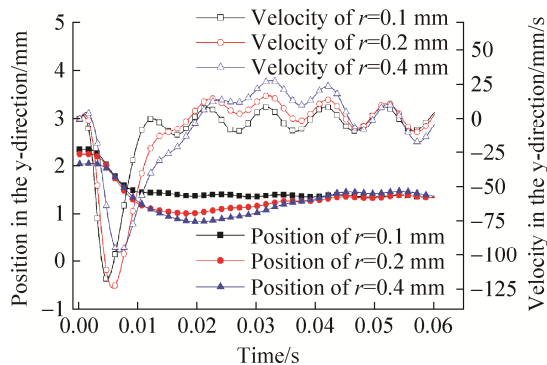


图 7 不同半径气泡沿 y 方向的运动轨迹和速度 (0° 初始角, 1 200 个时间步长)

2.4 气泡运动对变压器油间隙击穿的影响

对于本文计算的电极模型, 由 0° 初始角释放的气泡, 如图 5 和图 7 所示, 其运动轨迹为电极间场强最大的区域, 不同大小的气泡在间隙内均存在振荡平衡位置, 且平衡位置非常接近。在该位置气

泡 x 方向的运动速度趋于 0, y 方向受工频交流电场驱使而出现围绕平衡位置的脉动。这意味着气泡可以在柱板电极间某些位置聚集, 而该位置较强的电场强度可能导致气泡放电的出现。

文献[12]的研究显示当变压器油纸绝缘受潮升温速度较快时会导致气泡出现, 并指出如果气泡移动到高场强区域易导致变压器发生故障。结合本文的数值模型计算, 气泡可以在柱板电极间隙内强电场区域聚集, 进而导致油间隙击穿电压的下降。因此运行中变压器若在强电场区域生成了气泡, 则气泡可能会出现如本文所述的运动和聚集, 并导致击穿电压的降低。对于变压器的油纸绝缘结构设计, 应考虑到变压器过载运行中强电场区域内气泡的出现可能带来的风险。

3 结论

本文通过交流电场下变压器油中气泡动力学特性数值仿真研究, 得到了以下结论:

- 1) 气泡在交流电压下油中柱板电极间隙内存在振动平衡位置, 气泡可以在该位置聚集。
- 2) 工频交流电压作用下, 气泡的运动轨迹和速度曲线均表现出脉动特点, 脉动周期约为 0.01 s。
- 3) 气泡的运动轨迹显示, 不同的气泡半径会对气泡运动轨迹产生影响。不同半径的气泡的振动平衡位置比较接近, 且处于柱板电极间场强集中区域。

油纸绝缘中气泡的产生和聚集可能导致放电出现甚至间隙击穿, 这可能会对过载运行的变压器带来风险, 应引起注意。

参考文献:

- [1] Ushakov V Y, Klimkin V F, Korobeynikov S M. Impulse Breakdown of Liquids [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2007.
- [2] Sharbaugh H, Devins J S, Rzaad S J. Progress in the field of electric breakdown in dielectric liquids [J]. IEEE Trans. Elec. Insul. (S0018-9367), 1978, 13(4): 249-276.
- [3] Masanori Hara, Hironori Koishihara, Kenji Saita. Breakdown Behavior of Cryogenic Liquids in the Presence of Thermal Bubbles under Ramped Voltage [J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. (S1070-9878), 1991, 26(4): 685-691.
- [4] Sumitoshi Ogata, Shigehara K, Yoshida T, et al. Small Bubble Formation by Using Strong Non-uniform Electric Field [J]. IEEE Trans. on Industry Applications (S0093-9994), 1980, 16(6): 766-770.
- [5] Seok B Y, Tamuro N, Hara M. A Study of Thermal Bubble Behavior in the Simulated Electrode System of HT Superconducting Coils [J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. (S1070-9878), 1990, 6(1): 109-116.
- [6] Hara M, Kubuki M. Effect of Thermally Induced Bubbles on the Electrical Breakdown Characteristics of Liquid Nitrogen [J]. Proc. of IEE (S0143-702X), 1990, 137(4): 209-216.
- [7] Wang P, Swaffield D J, Lewin P L, et al. Thermal Bubble Behavior in Liquid Nitrogen between Inclined Plane Electrodes [C]// 2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. New York, NY, USA: IEEE, 2007, 10: 596-599.
- [8] Hang T P, Frayssines P E, Lesaint O, et al. Influence of vapor bubbles initiated by steady heating on the breakdown of liquid nitrogen [C]// 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. New York, NY, USA: IEEE, 2003, 10: 313-316.
- [9] Aka N T, Beroual A. Bubble dynamics and transition into streamers in liquid dielectrics under a high divergent electric field [J]. J. Phys. D: Appl. Phys. (S0022-3727), 2001, 34(9): 1408-1412.
- [10] Peng Y, Chen F, Song Y Z. et al. Single bubble behavior in direct current electric field [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering (S1004-9541), 2008, 16(2): 178-183.
- [11] Oommen T V, Lindgren S R. Bubble Evolution from Transformer Overload [C]// Proceedings of the 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, Georgia, America. USA: IEEE, 2001, 1: 137-142.
- [12] Koch M, Tenbohlen S. Evolution of bubbles in oil-paper insulation influenced by material quality and ageing [J]. IET Electr. Power Appl. (S1751-8660), 2011, 5(1): 168-174.
- [13] Przybyłek P. The Influence of Cellulose Insulation Aging Degree on its Water Sorption Properties and Bubble Evolution [J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. (S1070-9878), 2010, 17(3): 906-912.

(下转第 3094 页)

<http://www.china-simulation.com>

• 3086 •