

气泡放电对变压器油流注放电的影响

刘波洋^{*}, 蔡新景

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Effect of Bubble Discharge on Transformer Oil Streamer Discharge

LIU Boyang^{*}, CAI Xinjing

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Based on fluid dynamics, a simulation model of transformer oil containing bubbles streamer discharge under the action of impulse voltage is established. The variation laws of electric field intensity and space charge density of transformer oil containing bubbles are studied by changing the position, size and number of bubbles. The simulation results show that when the breakdown voltage reaches a certain value, an electric field gradient is formed inside the bubble due to the accumulation of gas inside the bubble, resulting in an internal discharge phenomenon. The closer the bubble is to the high-voltage electrode the faster it is broken down, and the discharge proceeds in a relatively shorter time. The larger the size of the bubble, the slower the transformer oil streamer discharge. And the more the number of bubbles, the more intense the electric field during the streamer discharge, the longer the discharge lasts, and the greater the damage caused to the transformer.

Key words: bubble; transformer oil; streamer discharge; electric field; space charge

摘要: 以流体动力学为基础,建立了脉冲电压作用下含气泡的变压器油流注放电仿真模型。通过改变气泡的位置、大小及数量,研究了含气泡的变压器油的电场强度和空间电荷密度的变化规律。仿真结果表明,当击穿电压达到一定值时,由于气泡内部气体的积聚,气泡内部会形成电场梯度,从而产生内部放电现象。距离高压电极越近的气泡越先被击穿,放电进行的时间也相对更短;气泡的尺寸越大,变压器油流注放电的速度越缓慢;气泡的数量越多,流注放电时的电场越剧烈,放电持续时间越久,对变压器造成的伤害也越大。

关键词: 气泡; 变压器油; 流注放电; 电场; 空间电荷

基金项目: 辽宁省自然科学基金(2020-MS-214)

Natural Science Foundation of Liaoning Province, China (2020-MS-214)

0 引言

变压器是电力系统中必不可少的关键设备之一,变压器的正常运行直接影响着电力系统的稳定运行。变压器油作为绝缘介质,在变压器的绝缘系统中起着重要的作用。在 2000 年至 2004 年间,电力变压器故障占高压设备事故的 45%^[1],且绝缘故障又是影响电力变压器正常运行的主要原因^[2],因此加强变压器绝缘状况在线监测对保障电力系统安全稳定运行具有重要意义^[3]。目前常用的变压器绝缘状况在线监测方法是数值模拟法,主要包括流体体积函数模型法^[4]、水平集方法^[5]、相场方法和格子玻尔兹曼方法。数值模拟法的优点在于方法简洁方便、内容结果直观清晰,缺点是数据精确度不高,但是也能从宏观上看出模型的变化。

卡洛在 20 世纪 50 年代研究液体介质放电特性时,系统研究了温度、压力和电流作用时长三个因素对变压器油电绝缘性的影响,从试验角度指出气泡在电压击穿中的作用不容忽视,并初步分析和讨论了气泡如何影响绝缘油特性^[6]。Pompili 联合其研究小组采取狭频和超宽频的诊断技术,对变压器油在针状电极作用下的放电行为进行了分析,研究发现,在针尖区域,电荷注入导致的局部升温形成了对金属和绝缘体表面而言密度较小的地带^[7],这种现象引发了一连串周期性的脉冲群体的产生^[8]。俄罗斯科学家分别对空气气泡和 SF₆ 气泡进行了分析,在对变压器油绝缘性能的影响方面,空气气泡比 SF₆ 气泡的击穿电压更低,说明气泡的流注放电特性与变压器油间隙的击穿有一定的相关性^[9]。在研究局部放电方面,通常采用非电检测法和电检测法,非电检测

法包括超声波检测法^[10]、红外检测法^[11]以及光测法^[12]等。张宁等人分别从理论分析、仿真模拟及试验测试三个角度对现有成果进行了系统地梳理和论述^[13]。李云鹏研究了不同绝缘状态对绝缘油中单气泡拉伸“成桥”以及双气泡聚并“成桥”的作用规律^[14]。赵涛对交直流脉冲电压下针板电极气泡的运动进行了研究^[15]。张永泽等针对油流速度对含有气泡的变压器油的击穿特性进行了研究,发现流动状态下含气泡变压器油的工频击穿电压始终高于静止状态,随着油流速率增加击穿电压先上升后基本趋于平稳,且油流速率会改变气泡破裂时产生的微小泡团的分布从而影响击穿电压^[16]。

目前的研究主要集中于变压器油发生流注放电之后对掺杂气泡特性的研究,而关于气泡放电对变压器油流注放电影响的研究较少。鉴于此,本文在考虑气泡本身特性的基础上,构建了含气泡的变压器油二维轴对称流体模型;改变气泡的尺寸、位置以及数目并与纯变压器油流注放电进行对比,通过仿真研究了气泡放电对变压器油流注放电的影响。

1 含气泡的变压器油流注放电模型

1.1 变压器油流注放电模型

变压器油作为绝缘介质,具有低介电常数、低损耗和高热容量的特点。在运行过程中,变压器内部局部放电会导致油隙击穿、绝缘劣化甚至发生燃烧事故。本文模拟变压器油道掺杂气泡时的情况,为了更好地分析变压器油流注放电机理,需要建立合适的流注放电仿真模型。建模过程可以简化为对气泡和液体粒子分别施加一个电场和一个磁场。首先,通过流体力学方程组描述气体和液体在电场中的运动;其次,将粒子间的相互作用作为耦合条件,通过求解固体表面上的连续性方程组来描述粒子与壁面之间的相互作用;最后,将电场方程、磁场方程以及粒子间相互作用方程组合起来得到整个流注放电的数学模型。变压器油流注放电过程中,气泡和液体粒子的运动方程为

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho_e \mu_e \mathbf{E}) = -G_1(|\mathbf{E}|) - \frac{\rho_e \rho_p R_{pe}}{e} - \frac{\rho_e}{\tau_a} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_p \mu_p \mathbf{E}) = G_1(|\mathbf{E}|) + \frac{\rho_e \rho_p R_{pe}}{e} + \frac{\rho_p \rho_n R_{pn}}{e} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho_n \mu_n \mathbf{E}) = \frac{\rho_e}{\tau_a} - \frac{\rho_n \rho_p R_{pn}}{e} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{E}) = \rho_p + \rho_e + \rho_n \quad (4)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (5)$$

式中: t 为时间; \mathbf{E} 为局部电场强度; $G_1(|\mathbf{E}|)$ 为电荷密度产生速率的源项; e 为电荷; ρ_e 、 ρ_p 、 ρ_n 分别为电子、正离子、负离子的密度; μ_e 、 μ_p 、 μ_n 分别为电子、正离子、负离子的迁移率; τ_a 为电子吸附时间常数^[17]; R_{pe} 为正离子-电子复合系数; R_{pn} 为正离子-负离子复合系数; ε 为介电常数; ϕ 为电势。

确定各粒子的反应系数,本研究中主要存在电子与正离子的复合、正离子与负离子的复合以及电子与中性分子的复合,其中电子与中性分子的复合也是负离子产生的源项。在研究含气泡的变压器油流注放电现象时,通过调整气泡的特征和液体中粒子的数量,可以分析气泡放电对变压器油流注放电过程的影响。从而推导出各种粒子的运输和反应系数的相对精确值。模拟变压器油流注放电过程所需的运输和反应系数如表 1 所示。这些系数是根据国内外专家通过变压器油流注放电试验得到的经验公式计算得出的近似解。

表 1 变压器油运输和反应参数表

Tab. 1 Transformer oil transport and reaction parameters table

参数名称	参数值
正-负离子复合率 $R_{pn}/(m^3 \cdot s^{-1})$	1.64×10^{-17}
电子-正离子复合率 $R_{pe}/(m^3 \cdot s^{-1})$	1.64×10^{-17}
正离子迁移率 $Mue_p/(m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1})$	1×10^{-9}
负离子迁移率 $Mue_n/(m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1})$	1×10^{-9}
电子迁移率 $Mue_e/(m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1})$	1×10^{-4}
吸附时间常数 τ_a/ns	100
摩尔/mol	1

1.2 气泡局部放电模型

在通过对变压器油流注放电的研究之后,从微观角度进行分析,并且进行了许多试验研究,用等离子体模型模拟变压器油中气泡的输运过程。研究发现流注发展的过程是空间电荷产生的主要途径,所以用固体电介质的电子隧道效应来求解描述变压器油中场致分子电离过程,即:

$$\gamma(|\mathbf{E}|) = \frac{ea|\mathbf{E}|}{h} \exp\left(-\frac{\pi^2 m^* a \Delta^2}{e h^2 |\mathbf{E}|}\right) \quad (6)$$

$$G(|\mathbf{E}|) = \frac{e^2 n_0 a |\mathbf{E}|}{h} \exp\left(-\frac{\pi^2 m^* \Delta^2}{h^2 + e|\mathbf{E}|}\right) \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_q \quad (8)$$

式中: $\gamma(|\mathbf{E}|)$ 为Zener模型的电离产生项; h 为普朗克常数; a 为分子间距; m^* 为电子质量; Δ 为分子电离能; $G(|\mathbf{E}|)$ 为电子电量、正离子电量生成项; n_0 为分子数密度; ρ_q 为电荷密度^[18-19]; \mathbf{D} 为电位移。

通过式(6)~式(8)能够很好地解释流体动力学模型,足以阐述气泡放电过程中带电粒子之间的相互作用。气泡的输运和反应参数如表2所示。

表2 气泡运输和反应参数表

Tab. 2 Table of bubble transport and reaction parameters

参数名称	参数值
气泡介电常数 ϵ_b	1
平均摩尔质量 $Mn/(kg \cdot mol^{-1})$	2.897×10^{-2}
光子吸收系数 $\mu_d/(cm^{-1})$	5
气泡密度 $\rho_b/(kg \cdot m^{-3})$	1.293
频率 f/Hz	10^6
分子间距 a/m	3×10^{-10}
电子质量 m^*/kg	9.1×10^{-23}
普朗克常数 $h/(J \cdot s)$	6.63×10^{-34}
分子电离能 Δ/eV	6.5
分子数密度 n_0/m^3	1×10^{-23}
电场值 $E/(V \cdot m^{-1})$	$(4 \sim 7) \times 10^8$

1.3 数值计算方法

如图1所示,建立含气泡的放电针板电极配置,模拟的油隙间隔为2 mm,实际击穿距离为1 mm。为了使计算结果更精确,采用网格划分方法,即划分单元数量越多仿真结果越接近实际情况。为了降低计算量,对于模型不同位置,采用了不同的网格剖分方法。电场变化较剧烈的部分网格划分则较精细;对距离针点电极较远的部分采用较大网格。

对气泡所在区域进行细化,使计算结果更加准确。细化区域采用指定边框,以横坐标-0.133 mm为下界,0.288 mm为上界;纵坐标-0.076 1 mm为下界,1.355 mm为上界。最大单元增长率为1.3,曲率因子为0.8。由于放电主要发生在对称轴和相邻气泡区域周围,因此带电粒子的电场梯度和密度明显陡峭。非均匀空间网格划分对于精确高效地数值处理放电现象至关重要,在整个计算中,

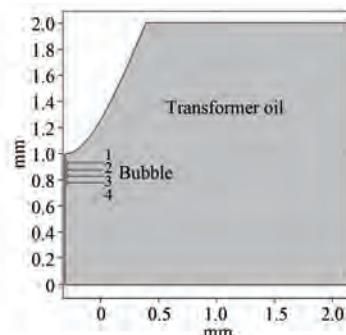


图1 含气泡的变压器油针板电极图

Fig. 1 Needle-plate electrode diagram of transformer oil containing bubbles

围绕对称轴的最大单元尺寸约为0.25 μm ,以促进收敛。

本文采用的计算模型是一组非线性方程组,求解过程非常复杂,为了简化计算,同时也为了计算结果更加精确,对模型做如下设置:

(1) 针对几何部分,本文模拟的是变压器油针板电极结构,流注放电发生在针板电极与平板电极之间,求解区域为2 mm,针板电极距离平板电极为1 mm,电极结构为对称式。

(2) 对于空间电场,对称轴1为 $r = 0$,求解区域的外边界条件设置为零电荷 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = 0$,其中 \mathbf{n} 为边界面的法向量;然后设置空间电荷密度为 $(c_p + c_n + c_e) \cdot q/mol$,采用双指数函数直流脉冲电压作为激励,如图2所示。直流脉冲电压初始值为 V_0 ,函数如式(9)所示:

$$V(t) = 200 \cdot (e^{-\frac{t}{t_1}} - e^{-\frac{t}{t_2}}) \quad (9)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为双指数函数的上升沿、下降沿。

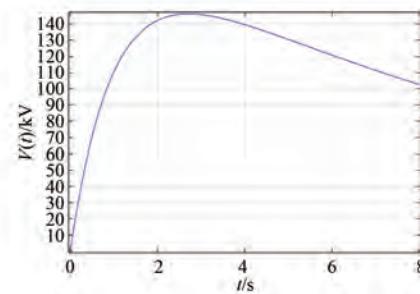


图2 双指数函数脉冲电压波形图

Fig. 2 Double exponential function pulse voltage waveform graph

(3) 三个对流扩散方程对称轴均为1和4。求解方程时,对比了各向同性扩散(Isotropic

Diffusion, ID)、流线扩散(Streamline Diffusion, SD)和侧风扩散(Crosswind Diffusion, CD)。由于在变压器油流注放电过程中,对流项远大于扩散项,为了保证求解的结果收敛,选择各向同性扩散,电子的扩散系数为 $1\ 800\ \text{cm}^2/\text{s}$,正离子和负离子扩散系数为0。

初始条件下,变压器油中的气体粒子处于电中性,其电场强度为零,因此不需要对流注起始电压进行定义。当气体粒子带电时,其电场强度发生变化。而油中气体粒子放电时,其电场强度一般为正电荷密度或负电荷密度的组合。因此,本文定义油中气体粒子的起始电压为0。由于油中气体粒子的带电与空气中带电不同,因此需要定义变压器油中气体粒子放电时的起始时间。考虑到实际情况下变压器油中油-气两相流混合均匀,该仿真模型中气体粒子带电采用正电荷密度或负电荷密度。

求解连续性方程。利用“静电学”、“对流与扩散”等子模块分别求解泊松方程式(4)、电荷输运方程式(1)~式(3)和漂移扩散方程。利用Pardiso求解器求解该模型。加入了ID、SD和CD三种人工扩散,以避免放电区域的局部振荡和过冲。变阶变步长向后微分公式(Backward Differentiation Formula, BDF)作为多步方法的进一步发展,被仿真软件用于时间微分。BDF使得当前模型符合输运方程式(1)~式(3)时间离散化的计算。空间和边界积分是使用仿真软件中构建的标准高斯积分(四阶)进行的。该模型中的时间步长和总模拟时间分别为0.01 ns和250 ns。时间步长的选择由指定的相对公差(0.01)和绝对公差(0.001)驱动。采用线性拉格朗日单元^[20]几何形函数,顶点单元数为11,边界单元数为264,总单元数为7 870,最小单元质量为0.347 7。

2 结果与讨论

通过和纯变压器油的流注放电情况进行对比,得到了含气泡的变压器油的电场强度和空间电荷密度的变化规律。

2.1 不含气泡的变压器油流注放电

本文首先基于变压器油的流注放电特性构建了纯变压器油的二维轴对称流体模型。图3为流注发展阶段的电场分布,从图中可以清晰地观察

到从针板电极开始到接地电极的电场变化过程。随着流注放电过程的逐步进行,电场从针板电极顶端逐渐扩大,向接地电极发展,但是流注后方的电场逐渐减弱,这是由于形成了空间电荷。图4为流注发展阶段的空间电荷密度分布,从图中可见随着电压的持续上升,针板电极即高压电极附近的电子和负离子浓度逐渐增加,正离子则远离高压电极,随着流注地不断发展,向接地电极运动,增强了流注头部的电场,电场也发生了畸变。图5为不含气泡的变压器油电场折线图。

2.2 含气泡的变压器油流注放电

气泡放电可以分为表面放电和内部放电。表面放电通常发生在气泡与油的交界面,而内部放电则发生在气泡内部。气泡对流体中的电荷分布产生重要影响,并促使流注放电发生。在施加直流电压后,产生局部放电,气泡被击穿几乎是瞬间完成的,与油流速相比时间非常短,可以看作相对静止的状态。通过改变气泡的位置、大小以及数量分别研究气泡放电对变压器油流注放电的影响。

图6为当存在两个气泡,且气泡位置不同的电场变化规律。图1中从上往下依次标号气泡1、2、3和4。圆心分别距离高压电极0.07 mm、0.12 mm、0.17 mm、0.22 mm。当1、2号气泡存在时,取两个时刻的电场变化图像即图6(a)和图6(b);当3、4号气泡存在时取相同时刻的电场变化图像即图6(c)和图6(d)。从图6中可以观察到,离针电极(高压电极)越近的气泡越早发生流注放电,越容易被击穿。在流注开始时,这些气泡周围的电场强度更大。随着时间的推移,靠近高压电极的气泡的电场衰减速度也更快,而远离高压电极的气泡的电场衰减速度较慢。距离高压电极较近的气泡的流注放电会直接向接地电极方向发展,而距离高压电极较远的气泡的流注放电则在穿过气泡后向两侧呈椭圆形扩散,然后继续向接地电极方向发展。并且,距离高压电极较近的气泡周围的电场强度也较大。根据图中的观察结果可以得出结论,当存在气泡时,流注放电对变压器造成的影响更为显著,损害更加严重。

图6为中的气泡直径为0.02 mm,在图6的基础上改变气泡直径,进一步研究气泡大小对变压器油流注放电的影响。图7为气泡直径为

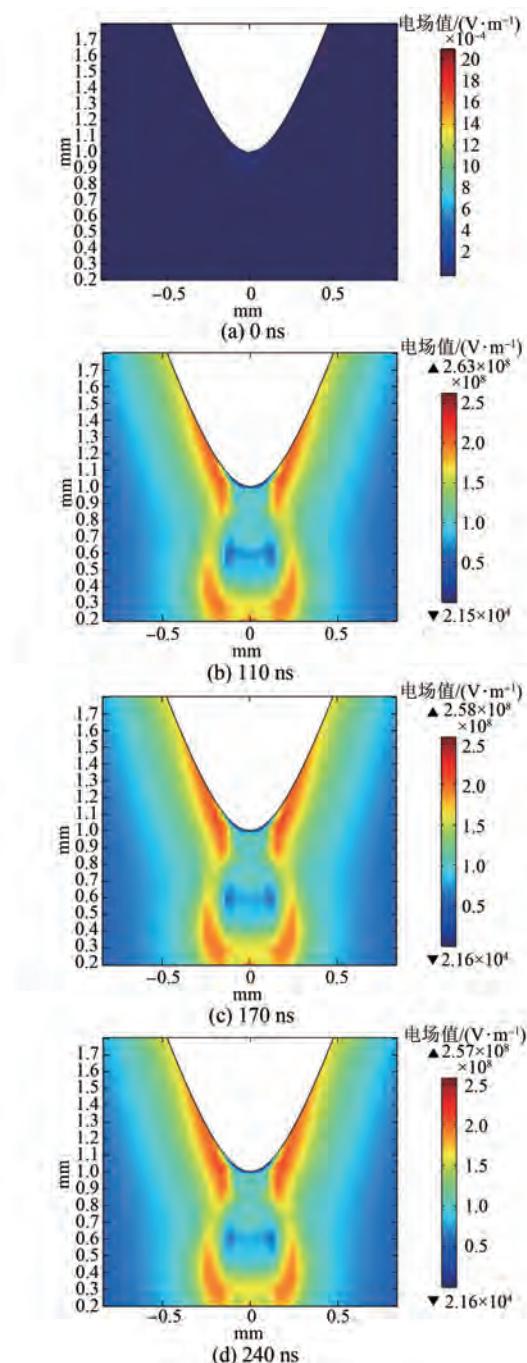


图3 流注发展阶段电场分布

Fig. 3 Electric field distribution in the development stage of streamer

0.03 mm 时电场的变化规律。分别取两个相同时刻 110 ns 和 240 ns, 与图 6(c) 和图 6(d) 进行对比。研究表明, 气泡的尺寸越大, 对变压器油流注放电的影响越大。在相同时刻下, 气泡直径为 0.03 mm 时流注放电速度较慢, 气泡仅被击穿而未继续向接地电极扩散; 而气泡直径为 0.02 mm

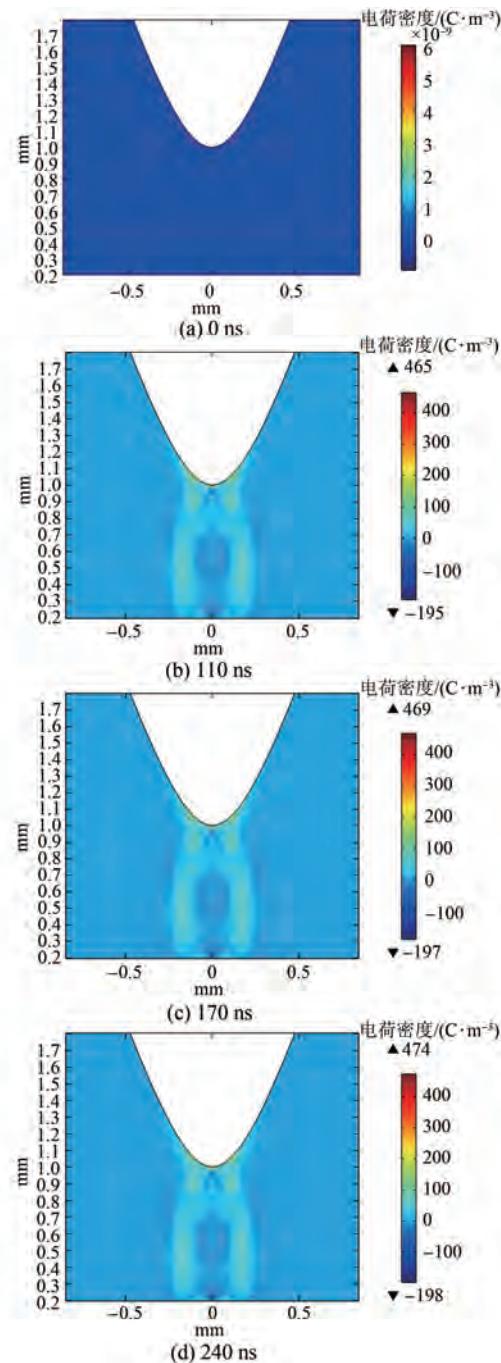


图4 流注发展阶段空间电荷密度分布

Fig. 4 Space charge density distribution in the development stage of streamer

时气泡在被击穿后继续向接地电极扩展。然而, 尺寸较大的气泡的流注放电电场变化比尺寸较小的气泡更显著。这是因为尺寸较大的气泡内部空间较大, 形成的电场梯度也较大, 因此变压器油流注放电变化更加明显。

进一步研究气泡数量对流注放电的影响。在

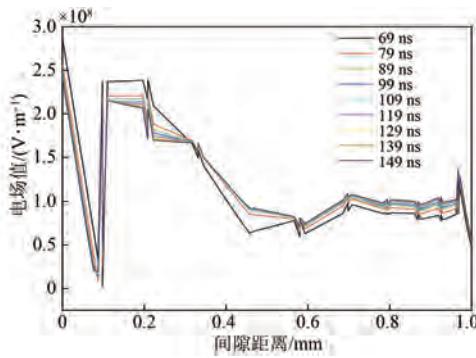


图 5 不含气泡的变压器油电场折线图

Fig. 5 Line graph of electric field of transformer oil without air bubbles

图 6 的基础上引入了另外两个气泡, 模拟含四个气泡放电时的电场分布, 如图 8 所示。图 9 和图 10 分别为含两个气泡和含四个气泡的变压器油电场折线图。由图 9 和图 10 可知, 在距离 0~0.2 mm 范围内, 遇到气泡之前, 两者的电场强度都会剧烈变化并短暂升高, 然而当电压接触到气泡后, 对于气泡含量较多的情况, 气泡将持续发生放电, 导致电场强度在之后的变化中短暂上升。随后, 电场强度将与气泡含量较少情况下一样降低到某一水平。

通过对图 5、图 9 和图 10 中同一时间点的电场变化, 可以明显看到当变压器油中存在气泡时, 电场强度明显高于不含气泡的情况。这说明当变压器油中含有气泡时, 更容易发生流注放电。随着间隙电压的增加, 气泡的放电变得更加剧烈, 放电幅值增大, 最终导致气泡被击穿。与此同时, 沿竖直方向的电场强度减小, 两侧的电场强度逐渐增大, 呈现椭球状分布。电场强度先升高, 然后在距离和时间变化的过程中趋于稳定。

图 11 为含气泡的变压器油的空间电荷密度分布图, 与不含气泡的变压器油的空间电荷密度分布, 即图 4 进行对比。由图 4 可知不含气泡的变压器油流注放电时, 空间电荷密度较小, 且随着电场的变化而变化。空间电荷主要在电场强度较大的地方聚集, 电荷密度仅能达到 $1 \times 10^3 \text{ C/m}^3$ 。与纯变压器油类似, 含气泡的变压器油的空间电荷集中区域也在电场强度较大的区域, 但区别在于含气泡的变压器油流注放电更为剧烈, 导致空间电荷密度更大, 远大于 $1 \times 10^3 \text{ C/m}^3$ 。流注放电过程含正离子和负离子的复合、电子和正离子的

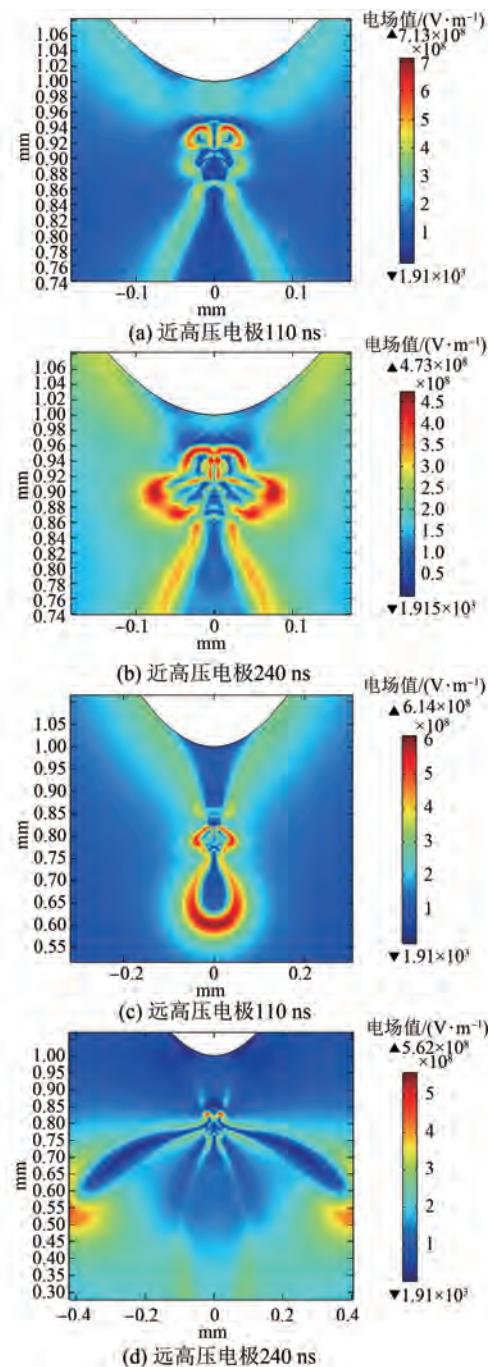


图 6 气泡位置不同的流注放电电场图

Fig. 6 Electric field diagrams of streamer discharge with different positions of bubbles

复合以及电子之间的吸附。随着电场强度的增大, 变压器油中的中性分子吸收大量能量, 将其中的低能电子转化为高能电子, 形成可以自由移动的电子。这些电子吸收能量, 使中性分子转变成带正电的离子, 并向接地电极方向迁移。并且, 在电场的作用下, 产生空间电荷, 同时空间电荷也会

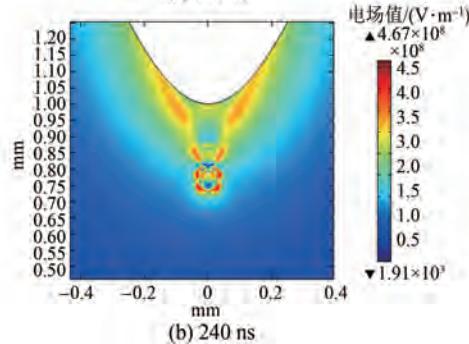
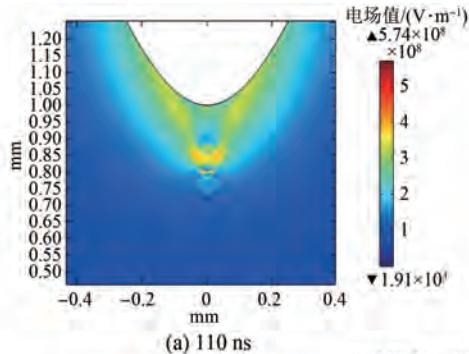


图 7 气泡直径为 0.03 mm 时的流注放电电场图

Fig. 7 Electric field diagrams of streamer discharge for bubble diameter of 0.03 mm

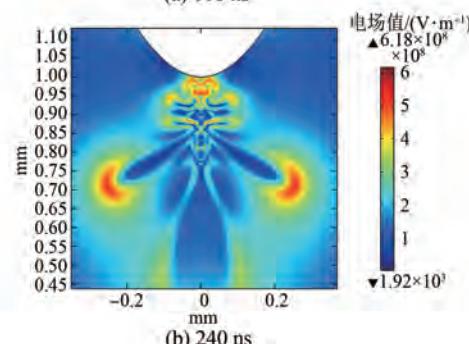
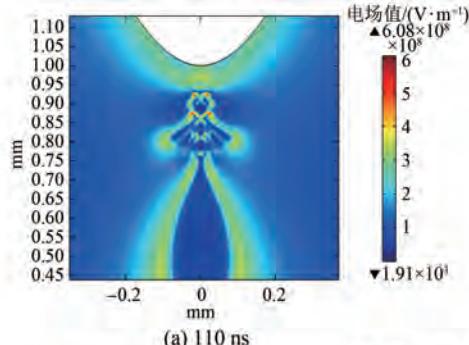


图 8 含四个气泡时的流注放电电场图

Fig. 8 Electric field diagrams of streamer discharge containing four bubbles

消散, 空间电荷的消散指正-负离子的结合、电子-中性粒子的结合以及电子之间的互相碰撞。这种彼

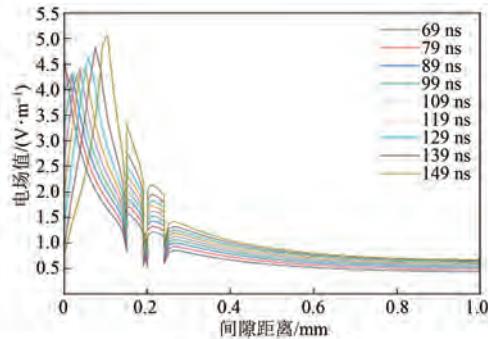


图 9 含两个气泡的变压器油电场折线图

Fig. 9 Line graph of electric field of transformer oil containing two bubbles

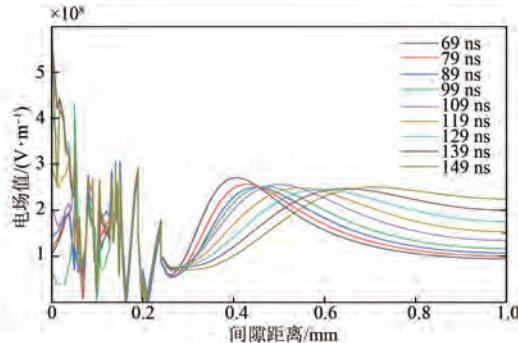


图 10 含四个气泡的变压器油电场折线图

Fig. 10 Line graph of electric field of transformer oil containing four bubbles

此平衡形成了流注放电时的空间电荷密度分布。

3 结语

本文研究了气泡放电对变压器油流注放电的影响, 得到如下结论:

- (1) 相比于纯变压器油, 含气泡的变压器油流注放电更加严重;
- (2) 变压器油中靠近高压电极的气泡先发生流注放电的概率更大, 且流注放电的持续时间也更短暂。同时刻下, 距离高压电极近的情况下电场强度较高;
- (3) 变压器油中气泡尺寸越大, 流注放电发展进程越缓慢;
- (4) 变压器油中气泡数量越多, 流注放电时的电场越剧烈, 放电持续时间越久, 对变压器造成的伤害也越大。

因此为了保证变压器的正常运行, 应尽量避免变压器油中存在气泡。如果无法避免, 可以通过控制温度、添加抗氧化剂等方法来减少气泡的

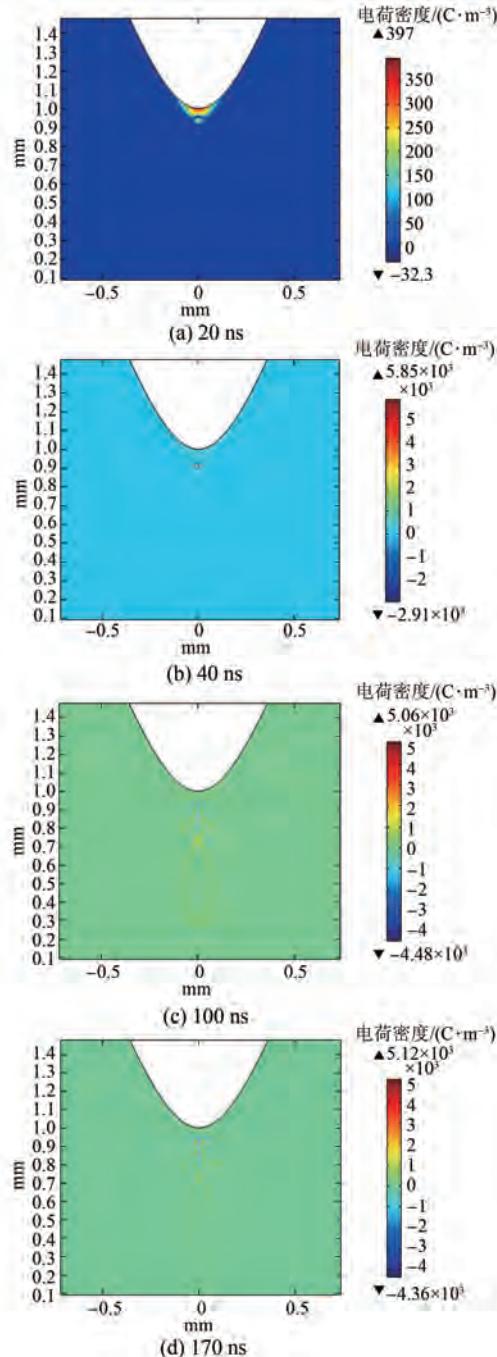


图 11 含气泡的变压器油空间电荷密度分布

Fig. 11 Space charge density distribution of transformer oil containing bubbles

影响。同时,在日常维护中应注意保持设备内部的清洁和干燥,避免气泡的积累和表面污垢的产生,防止绝缘性能下降而导致设备发生故障。

参 考 文 献

[1] 孙才新. 重视和加强防止复杂气候环境及输变电

设备故障导致电网大面积事故的安全技术研究 [J]. 中国电力, 2004, 37(6): 1-8.

SUN C X. Emphasis and reinforcement on the study of safety technique to avoid large scope blackout caused by complex climate condition and failures of power transmission and transformation equipments [J]. Electric Power, 2004, 37(6): 1-8.

[2] 严璋. 电气设备在线监测技术[M]. 1 版. 北京: 中国电力出版社, 1995.

YAN Z. On-Line Monitoring Technology of Electrical Equipment [M]. 1st edition. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

[3] 杨霁. 基于小波多尺度变换的局部放电去噪与识别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.

YANG J. Research on denoising and recognition of partial discharge based on wavelet multi-scale transform [D]. Chongqing : Chongqing University, 2004.

[4] 李昕晨. 双气泡聚并的流体力学行为研究[D]. 北京化工大学, 2015.

LI X C. Study of hydrodynamic behavior of two bubbles coalescence [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.

[5] 蔡丹, 刘列. 强电场下气泡形变对液体绝缘的影响[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(11): 2966-2970.

CAI D, LIU L. Impact of air bubble deformation on dielectric liquid subjected to strong electric field [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(11): 2966-2970.

[6] KOO C K, HIGHAM B J. The effects of hydrostatic pressure, temperature, and voltage duration on the electric strengths of hydrocarbon liquids [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1961, 108(6): 522-528.

[7] KOROBENNIKOV M S, RIDEL V A, MEDVEDEV A D, et al. Registration and simulation of partial discharges in free bubbles at AC voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019, 26(4): 1035-1042.

[8] MASSIMO P, RAY B. Gas formation in transient cavities undergoing PD pulse burst discharges in transformer oils [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(6): 1697-1703.

[9] GADZHIEV K M, TYUFTYAEV S A, II'ICHEV V M. Single bubble of an electronegative gas in

- transformer oil in the presence of an electric field [J]. Technical Physics, 2017, 62(10):1500-1504.
- [10] 黄建华,全零三. 变电站高压电气设备状态检修的现状及其发展[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 56-61.
- HUANG J H, QUAN L S. Current status and development of condition-based maintenance of high-voltage electric power equipment in substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(16): 56-61.
- [11] 王昌长,郭恒,朱德恒,等. 在线检测电力设备局部放电的电流传感器系统的研究[J]. 电工技术学报, 1990, 5(2): 42-46.
- WANG C C, GUO H, ZHU D H, et al. The study of current transducer system for on line monitoring partial discharge in electrical equipment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1990, 5(2): 42-46.
- [12] 徐永禧,胡维新. 高压电气设备局部放电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- XU Y X, HU W X. Partial Discharge of High-Voltage Electrical Equipment [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1984.
- [13] 张宁,刘士利,郝建,等. 变压器油中气泡杂质相局部放电特性研究综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(10): 2757-2776.
- ZHANG N, LIU S L, HAO J, et al. Review on partial discharge characteristics of bubble impurity phase in transformer oil [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38 (10): 2757-2776.
- [14] 李云鹏. 气泡在油纸绝缘中的分子积聚微观机制与迁移动力学过程研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- LI Y P. Study on molecular accumulation mechanism and migration dynamics of bubbles in oil paper insulation [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [15] 赵涛. 气泡和纤维素颗粒对变压器油冲击击穿特性影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- ZHAO T. Study of the effect of bubbles and cellulose particles on impulse breakdown in transformer oil [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [16] 张永泽,唐炬,潘成,等. 油流速度对含气泡变压
- 器油击穿特性的影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(2): 479-487.
- ZHANG Y Z, TANG J, PAN C, et al. Impact of velocity on breakdown characteristics of transformer oil containing bubbles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 479-487.
- [17] 高青青,王小华,杨爱军,等. SF₆气体中交流电晕放电电流及带电粒子的时空分布[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3355-3366.
- GAO Q Q, WANG X H, YANG A J, et al. Discharge current and charged spatial-temporal distribution of AC corona discharge in SF₆[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3355-3366.
- [18] 陈刚,黄正勇,段瑜,等. 基于不同油纸介电常数配比的油纸沿面放电仿真[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊2): 620-628.
- CHEN G, HUANG Z Y, DUAN Y, et al. Simulation of surface discharge based on the different ratio of dielectric constants oil and paper [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (S2): 620-628
- [19] 包欣. MAPS 仿真软件平台设计和应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- BAO X. Design and application of MAPS simulation software [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [20] 刘鑫,田文艳,李昊,等. 钨电极辅助微波等离子体水蒸汽制氢的多物理场计算[J]. 微波学报, 2021, 37(6): 92-97.
- LIU X, TIAN W Y, LI H, et al. Multi-physical coupling calculation of hydrogen production from microwave plasma water vapor assisted by tungsten electrode [J]. Journal of Microwaves, 2021, 37(6): 92-97.

收稿日期:2024-01-10

收到修改稿日期:2024-02-07

作者简介:

刘波洋(1998-),男,硕士研究生,研究方向为开关设备关断、绝缘性能及智能化,422674409@qq.com;

*通信作者:刘波洋(1998-),男,硕士研究生,研究方向为开关设备关断、绝缘性能及智能化,422674409@qq.com。

Effect of Bubble Discharge on Transformer Oil Streamer Discharge

LIU Boyang^{*}, CAI Xinjing

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Key words: bubble; transformer oil; streamer discharge; electric field; space charge

Transformer oil has good insulation properties, which can effectively isolate the coils and equipment inside the transformer and prevent electrical breakdown and short circuit, to ensure the normal operation of power transformer. Impurity bubbles in transformer oil can damage the insulating properties of the oil, leading to an increased risk of electrical breakdown and short circuit. Deterioration in insulation performance can make transformers unable to function properly and may even lead to equipment failures and accidents. So, it is of great scientific value and practical significance to study the effect of bubble discharge on transformer oil streamer discharge.

Based on fluid dynamics, a simulation model of transformer oil streamer discharge containing bubbles under the action of impulse voltage is established. A discharge needle-plate electrode configuration containing bubbles is established, as shown in Fig.1. The simulated oil gap spacing is 2 mm and the actual breakdown distance is 1 mm. In order to calculate the model results more accurately, the meshing method is adopted. The more the number of segmentation cells, the closer the simulation results are to the actual situation. In order to reduce the amount of computation, different meshing methods are adopted for different positions of the model. A finer mesh is used for the part that the electric field changes drastically, while a larger mesh is used for the part that is farther away from the pin point electrode.

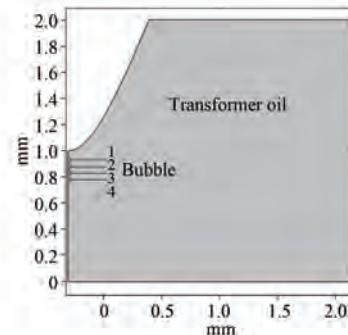


Fig. 1 Needle-plate electrode diagram of transformer oil containing bubbles

The variation laws of electric field intensity and space charge density of transformer oil containing bubbles are studied by changing the position, size and number of bubbles. The simulation results show that when the breakdown voltage reaches a certain value, an electric field gradient is formed inside the bubble due to the accumulation of gas inside the bubble, resulting in an internal discharge phenomenon. The closer the bubble is to the high-voltage electrode the faster it is broken down, and the discharge proceeds in a relatively shorter time. The larger the size of the bubble, the slower the transformer oil streamer discharge. And the more the number of bubbles, the more intense the electric field during the streamer discharge, the longer the discharge lasts, and the greater the damage caused to the transformer.