

纳秒脉冲下变压器油两相流注放电仿真研究^{*}

王 琪, 王 萌, 王 珏, 严 萍

(中国科学院 电工研究所, 北京 100080)

摘 要: 为揭示液体电介质击穿过程中形成的气体放电通道对液体电介质放电过程的影响, 以针—板电极间隙变压器油为研究对象, 基于等离子体流体力学模型, 引入了液体电介质放电过程中气相放电通道对电离机制及自由电荷迁移率的影响, 建立了用于模拟脉冲电压下液体电介质放电过程的两相流体模型, 仿真研究了纳秒脉冲下针板电极流注放电的起始与发展过程。仿真结果表明: 采用 Heaviside 方程可以在模型的不同区域同时实现气相物理过程和液相物理过程的模拟与计算。气相物理过程的引入导致流注尾部电场显著降低, 流注头部电场进一步增强, 使流注通道的发展速度要高于传统液相模型, 有助于加深对纳秒脉冲下液体电介质中预击穿流注的起始、发展过程的认识和理解。

关键词: 纳秒脉冲; 变压器油; 流注; 空间电荷; 气液两相

中图分类号: TM315

文献标志码: A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.190380

Two-phase streamer characteristics in transformer oil under nanosecond impulses voltages

Wang Qi, Wang Meng, Wang Jue, Yan Ping

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 2703, Beijing 100080, China)

Abstract: To reveal the influence of the formation and development of gas-phase streamer channel on liquid discharge between pin-plane electrodes, a numerical model of the transformer-oil discharge in the pin-plane electrode system is built based on the continuity equations of free charge carriers, which are coupled with the Poisson's equation. The gas-phase processes during the streamer development process is also taken into consideration, including impact ionization and the increase in the mobility of free charge carriers in the gas-phase relative to the liquid-phase in the streamer channel. The Heaviside function is used to switch the simulation model between gas-phase and liquid-phase. The initial and propagation progress of streamer discharge under nano-second pulse voltage is simulated using the model. Simulating results show that the electric field at the streamer body is significantly reduced and the electric field at the head of the streamer is further enhanced with the addition of such low density gas-phase region. The propagation speed of the streamer in two-phase model is also faster than that of the ordinary liquid-phase model.

Key words: nanosecond impulse; transformer oil; streamer; space charge density; liquid-gas phase

变压器油作为一种优良的液体绝缘和冷却介质, 被广泛应用于高压电力设备与脉冲功率装置中, 而高电场条件下的电气绝缘性能直接影响这类设备的整体性能与可靠性, 因此提高其绝缘强度对脉冲功率装置小型化和可靠运行具有重要意义。近年来随着脉冲功率技术的不断发展, 纳秒级脉冲装置逐渐在高电压领域得到广泛应用, 纳秒脉冲下液体介质的放电特性成为了研究者关注的热点^[1-2]。由于纳秒脉冲电压具有作用时间短、液体介质击穿场强高, 可以极大减小电极表面物理化学反应、杂质等因素对绝缘液体击穿过程的影响^[3-5]。因此, 开展纳秒脉冲下变压器油等液体电介质的电气绝缘性能有利于揭示液体绝缘介质的本征特性, 具有重要的应用价值^[6]。

变压器油中流注的发展是变压器击穿过程的关键因素, 然而, 在纳秒脉冲电压下变压器油的击穿过程用时极短, 传统的通过实验装置测量放电过程中产生的电量及放电过程中辐射出的电磁波、光、声等宏观量的方法对描述纳秒脉冲下变压器油中流注的起始、发展、消散, 特别是带电粒子的倍增、运动等过程存在很大难度, 因此, 通过数值仿真建立描述预击穿过程中流注起始和发展过程的模型, 研究变压器油中的放电过程, 包括电荷的产生

* 收稿日期: 2019-09-24; 修订日期: 2019-11-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51707185)

作者简介: 王 琪 (1985—), 男, 博士, 从事高电压绝缘材料领域研究; wangqi@mail.iee.ac.cn.

及传播机制,有利于加深对放电微观过程和机理的理解。近年来,许多研究人员基于载流子的流体动力学方程对变压器油中流注开展了仿真研究。Hwang 等人建立了基于流体动力学方程的变压器油中流注发展的数学模型,并利用有限元方法对变压器油中载流子的对流扩散和电场泊松方程进行数值求解,仿真研究了放电过程中油中流注的发展过程^[7]。李元等人仿真研究了电压幅值、脉冲上升沿及电极间隙等对油中放电产生与发展的影响^[8]。施键等人仿真研究了初始分子密度对流注发展过程中的场强、空间电荷分布等特性的影响^[9]。

然而,现有的流注模型是通过电场相关分子电离模型来模拟流注,没有考虑到由于分子电离而形成的低密度或气相流注通道内的物理现象。为了更全面地描述流注的起始和发展过程,有必要对流注通道中的气相过程进行建模,包括气相流注通道中的碰撞电离和自由电荷载流子的迁移率增加。本文以变压器油为研究对象,在二维轴对称流体动力学模型基础上,将气相过程纳入电场相关分子电离模型来模拟流注中,建立了一个描述变压器油中流注发展的气液两相模型,并采用有限元方法对粒子的对流扩散方程和泊松方程进行求解,考察分析了气相流注通道对变压器油中放电产生与发展的影响。

1 液体介质放电仿真模型

1.1 几何仿真建模

本文依据绝缘油中脉冲击穿电压测试方法 (IEC Std. 60897)^[10]建立了变压器油中针板电极的 2-D 轴对称模型,其针电极的曲率半径为 40 μm ,针电极-板电极间距为 1 mm,如图 1 所示。由于流注发展的区域局限于针-板电极中心轴及附近介质中,该区域数值变化梯度极大,因此为保证计算的收敛性,在此部分区域划分极其精细的网格,而在同一时间其它区域具有比较稀疏的网格,这样可以减少计量。

1.2 液相介质中的流注通道仿真

变压器油放电过程中,正负离子和自由电子的产生主要依赖于场致电离,本文基于齐纳模型的场致电离理论,给出外电场作用下电荷产生速率的计算公式^[11-12]

$$G(|E|) = \frac{e^2 n_0 a |E|}{h} \exp\left(-\frac{\pi^2 m^* a}{h^2 e} \left(\frac{\Delta}{\sqrt{|E|}} - \gamma\right)^2\right) \quad (1)$$

式中: $G(|E|)$ 为外加脉冲电场下的电荷密度产生速率; E 为电场强度; e 为电子电量; n_0 为变压器油中可被电离的分子密度数; a 为分子间的间距; h 为普朗克系数; m^* 为有效电子质量; Δ 为变压器油分子电离所需电能; γ 为电场相关电位系数。

基于 Morrow 和 Lowke 提出的由液体电介质中载流子的对流与扩散方程以及电场的泊松方程所构成的流体动力学模型描述液体电介质中的放电过程,结合液体电介质放电过程中的热扩散方程,计算放电过程中变压器油的温升与气相流注通道的形成与发展^[8]。变压器油液相介质中放电的数学模型由以下方程组组成

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_p \mu_{pLP} \mathbf{E}) = G_{LP}(|E|) - \frac{\rho_p \rho_c R_{pe}}{e} - \frac{\rho_p \rho_n R_{pn}}{e} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_n \mu_{nLP} \mathbf{E}) = \frac{\rho_c}{\tau_a} - \frac{\rho_p \rho_n R_{pn}}{e} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c \mu_{cLP} \mathbf{E}) = G_{LP}(|E|) - \frac{\rho_p \rho_c R_{pe}}{e} - \frac{\rho_c}{\tau_a} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = \rho_p + \rho_n + \rho_c \quad (5)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = \frac{1}{\rho_1 C_v} (k_T \nabla^2 T + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}) \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = \rho_p \mu_{pLP} - \rho_c \mu_{cLP} - \rho_n \mu_{nLP} \quad (8)$$

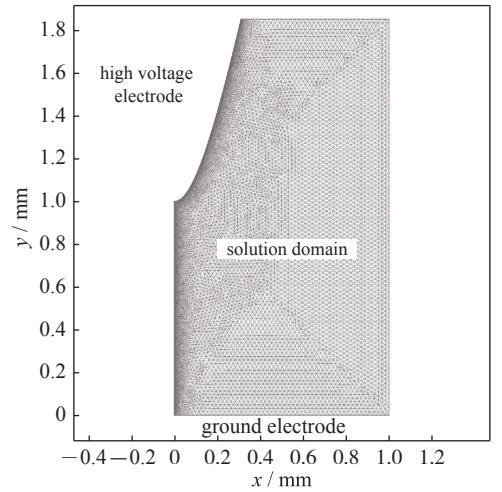


Fig. 1 Geometric structure of needle-plate electrode and its mesh generation

图 1 针板形电极几何结构及其网格划分

式中： $G_{LP}(|E|)$ 为液体电介质中外加脉冲电场下的电荷密度产生速率； J 为电流密度； t 为时间； ε 为介电常数； φ 为电位； ρ_p , ρ_n , ρ_e 分别为正负离子及电子密度； μ_{pLP} , μ_{nLP} 和 μ_{eLP} 分别为液体电介质中正负离子及电子的迁移速率； τ_a 为电子吸附于液体分子的吸附时间常数； R_{pe} 及 R_{pn} 分别为正离子与电子、正负离子间的复合率； T 为温度； v 为变压器油的流动速度； ρ_l 为变压器油密度； c_v 为变压器油的比热； k_T 为变压器油的导热系数。

本文仿真过程中所需主要物理参数取自文献 [13], 如表 1 及表 2 所示。

表 1 液相流注仿真所需主要物理参数

Table 1 Physical parameters required for simulation of liquid phase

$\mu_{pLP}/(\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$\mu_{nLP}/(\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$\mu_{eLP}/(\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$R_{pe}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$R_{pn}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	n_0/m^{-3}	a/m	τ_a/s	Δ/eV
1×10^{-9}	1×10^{-9}	1×10^{-4}	1.64×10^{-17}	1.64×10^{-17}	1×10^{23}	3×10^{-10}	2×10^{-7}	7.5

1.3 气相流注通道的控制方程

流注气相区的自由电子在外加电场的作用下向正极移动。当这些电子在气相状态油中传播时, 它们与气体中的中性分子碰撞。每一次碰撞都会释放出更多的电子, 从而导致更多的碰撞和更多的电子产生。本文基于汤逊电离的碰撞电离理论^[14], 给出外电场作用下气相流注通道内电荷产生速率的计算公式如下

$$G_{GP}(|E|) = -\alpha_T \rho_e \mu_{eGP} |E| \quad (9)$$

$$\alpha_T = \alpha_0 \exp\left(-\frac{B_0}{|E|}\right) \quad (10)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{\lambda} \quad (11)$$

$$B_0 = \frac{v}{e\lambda} \quad (12)$$

式中： $G_{GP}(|E|)$ 为气相流注中外加脉冲电场下的电荷密度产生速率； v 为气体分子电离能； λ 为碰撞之间的电子平均自由行程。则气相流注通道内载流子的对流与扩散方程如下

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_p \mu_{pGP} \mathbf{E}) = G_{GP}(|E|) \quad (13)$$

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_n \mu_{nGP} \mathbf{E}) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_e \mu_{eGP} \mathbf{E}) = G_{GP}(|E|) \quad (15)$$

式中： μ_{pGP} , μ_{nGP} 和 μ_{eGP} 分别为相流注通道中正负离子及电子的迁移速率。气相流注通道仿真所需主要物理参数如表 3 所示, 其中, α_0 为碰撞电离系数 α , β_0 为碰撞电离系数 β 。

表 3 气相流注通道仿真所需主要物理参数

Table 3 physical parameters required for simulation of gas phase

$\mu_{eGP}/(\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	α_0/m^{-1}	$\beta_0/(\text{V} \cdot \text{m}^{-1})$	$\mu_{pGP}/(\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$\mu_{nGP}/(\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
1×10^{-2}	25	2×10^7	1×10^{-7}	1×10^{-7}

本文基于液体电介质放电过程中的热扩散而导致的温升, 引入 Heaviside 方程控制数学模型在液相物理与气相物理间的切换。当油中油温低于变压器油汽化阈值温度时, 液相物理模型生效。而当油中油温高于阈值温度时, 则气相模型生效。阈值温度则根据文献中变压器油阴极放电起始的气泡模型推算^[15]。

2 仿真结果与分析

2.1 气相过程的引入对仿真结果的影响

为了观察气相过程的引入对变压器油中流注放电的影响, 选取了 1 mm 间隙下 200 kV 正极性脉冲电压, (零点

至峰值时间为 80 ns)的放电过程进行仿真。200 kV 正极性脉冲电压下纯液体电介质流体模型与气液两相介质模型的仿真结果如图 2 所示。由图 2(b)可见,纯液体电介质流体模型下的油中放电是一个典型的流注过程,流注头部沿着针板电极轴向向前发展,最大电场位置出现在流注头部位置,平均流注发展速度约为 15.6 km/s。而气液两相流注模型的放电过程则较为复杂,如图 2(a)所示,其流注头部同样沿着针板电极轴向向前发展且最大电场位置出现在流注头部位置,但在靠近针电极头部位置出现侧向流注分支,平均流注发展速度约为 17.2 km/s。此外在流注通道内部存在二次流注,此二次流注通道代表气相流注通道的形成。

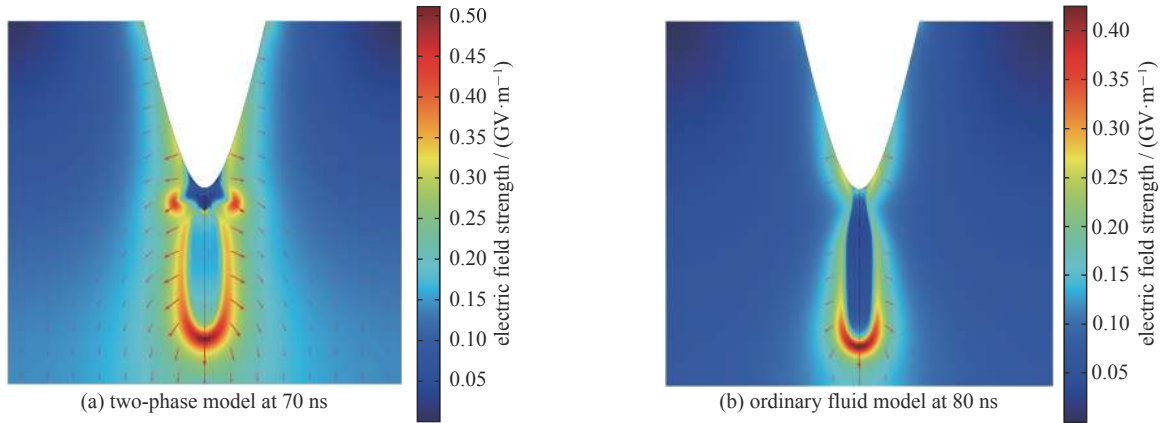


Fig. 2 Comparison of two-phase model and ordinary fluid model electric field simulation results

图 2 200 kV 正极性脉冲电压下气液两相介质模型与纯液体电介质流体模型的电场仿真结果对比

2.2 两相模型的流注电场强度分布

两相模型沿针板电极中心轴的流注电场强度分布如图 3 及图 4 所示,由图 3 可见,两相模型预测的流注尾部电场水平远低于流注通道其他部位的电场水平。其中图 4 给出了 $t = 70$ ns 时刻时的电场分布图,其流注通道尾部为气相区域,气相区域电场强度约为 15 kV/mm,远低于流注头部 500 kV/mm。这是因为气相区域内的自由电荷载流子(电子和离子)的迁移率高于液相。这意味着流注通道尾部的气相部分比流注头部的液相部分具有更高的导电性,亦即在流注通道尾部的气相部分的电场比在液相部分中要小。因此气液两相流注模型流注头部的电场场强要略高于传统的液体电介质流注放电模型,其流注发展速度也略高于传统的液体电介质流注放电模型。

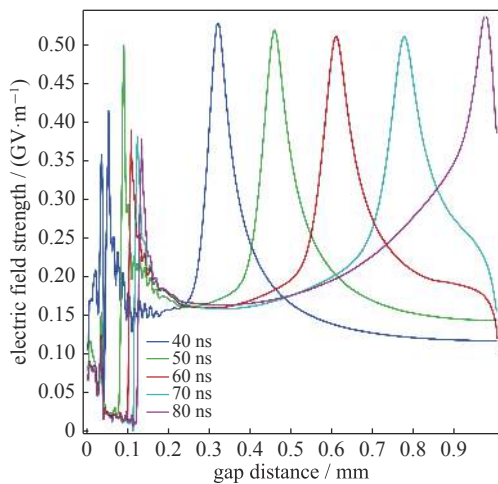


Fig. 3 Plot of electric field distribution along the needle-plane electrode axis given by the solution of the two-phase ionization model for $t = 40$ to 80 ns in intervals of 10 ns from the simulations in transformer oil

图 3 两相模型下变压器油在纳秒脉冲升压开始后 40 至 80 ns 期间沿针板电极中心轴的流注电场强度分布

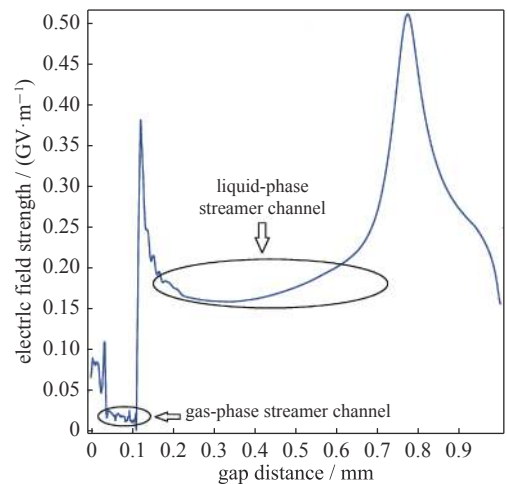


Fig. 4 Plot of electric field distribution along the needle-plane electrode axis given by the solution of the two-phase ionization model, showing the gas-phase and liquid-phase regions

图 4 两相模型下沿针板电极中心轴的液相与气相流注电场强度分布区分

3 结 论

本文采用 Heaviside 方程在现有液体电介质流注放电模型基础上引入了流注发展过程中的气相物理过程,建

立了用于模拟纳秒脉冲电压下液体电介质流注放电过程的气液两相模型, 仿真研究了纳秒脉冲下针板电极流注放电的起始与发展过程。结果表明: 利用 Heaviside 方程可以在模型的不同区域同时实现气相物理过程和液相物理过程的模拟与计算。气液两相流注模型的放电通道形貌与现有的液体电介质流注放电模型大体上类似, 其流注通道发展速度略高于现有的液体电介质流注放电模型计算得到的流注通道发展速度。本文认为其主要原因在于气相区域内的自由电荷载流子(电子和离子)的迁移率高于液相。因此在气相部分中, 电场强度比在液相部分中要小, 导致模型流注头部的电场场强要略高于传统的液体电介质流注放电模型。

参考文献:

- [1] Lesaint O. Prebreakdown phenomena in liquids: propagation 'modes' and basic physical properties[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(14): 144001.
- [2] Bluhm H. Pulsed power systems[M]. Karlsruhe: Springer, 2006.
- [3] 张晋琪, 蒋兴良, 陈志刚. 液体介质快脉冲电压下击穿特性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(6): 1053-1056. (Zhang Jinqi, Jiang Xingliang, Chen Zhigang. Characteristics study of short-pulsed dielectric breakdown in liquids[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(6): 1053-1056)
- [4] 黄文力, 孙广生, 王珏, 等. 液体介质击穿机理研究进展[J]. *高压电器*, 2005(2): 131-134. (Huang Wenli, Sun Guangsheng, Wang Jue, et al. Progress in the study of breakdown mechanism about liquid dielectric[J]. *High Voltage Apparatus*, 2005(2): 131-134)
- [5] 王珏, 邵涛, 袁伟群, 等. 重频纳秒高压脉冲下变压器油击穿特性的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(2): 268-270. (Wang Jue, Shao Tao, Yuan Weiqun, et al. Study on transformer oil breakdown under repetitive nanosecond pulses[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(2): 268-270)
- [6] 章程, 邵涛, 牛铮, 等. 大气压尖板电极结构重复频率纳秒脉冲放电中X射线辐射特性研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(3): 305-313. (Zhang Cheng, Shao Tao, Niu Zheng, et al. X-ray generation in repetitive pulsed discharge in atmospheric air with a point-to-plane gap[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(3): 305-313)
- [7] Hwang G. Elucidating the mechanisms behind pre-breakdown phenomena in transformer oil systems[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [8] 李元, 穆海宝, 邓军波, 等. 正极性纳秒脉冲电压下变压器油中流注放电仿真研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(12): 334-344. (Li Yuan, Mu Haibao, Deng Junbo, et al. Simulation study on streamer discharge in transformer oil under positive nanosecond pulse voltage[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(12): 334-344)
- [9] 施健, 司马文霞, 杨庆, 等. 初始条件对变压器油中流注特性的影响[C]//重庆市电机工程学会学术会议. 2012: 877-882. (Shi Jian, Sima Wenxia, Yang Qing, et al. Influence of initial condition on the propagation of streamer in transformer oil//Conference of Chong Qing Society of Electrical Engineering. 2012: 877-882)
- [10] IEC Standard #60897 (1987) Methods for the determination of lightning impulse breakdown voltage of insulating liquid[S].
- [11] Jadidian J, Hwang G, Zahn M, et al. Migration-ohmic charge transport in liquid-solid insulation systems[C]//IEEE International Conference on Dielectric Liquids. 2011: 1.
- [12] Jadidian J, Hwang G. Streamer initiation and propagation in transformer oil under positive and negative impulse voltages[C]//Pulsed Power Conference. 2011: 251.
- [13] Jadidian J, Zahn M. Charge transport analysis in two-phase composite dielectric systems[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2013, 41(9): 2464-2474.
- [14] Meek F, Craggs J. Electrical breakdown of gases[M]. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- [15] 王同磊, 张乔根, 倪鹤立, 等. 变压器油中阴极放电起始过程的气泡模型[J]. *高电压技术*, 2017, 43(6): 2042-2048. (Wang Tonglei, Zhang Qiaogen, Ni Heli, et al. Bubble model of breakdown initiation process from cathode in transformer oil[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(6): 2042-2048)