

天然酯绝缘油-纸界面的多分支流注放电仿真

陈刚¹, 辛晓军¹, 宋普查¹, 王开正², 罗莉¹

(1. 成都大学电子信息与电气工程学院, 四川 成都 610106;

2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:油-纸界面的局部放电是油浸式变压器中油-纸绝缘失效的主要原因之一。文中在多分支流注放电数值模型的基础上进一步考虑油-纸界面的电荷输运特性, 构建油-纸绝缘系统中的多分支流注放电模型, 并利用有限元法分别对天然酯绝缘油和绝缘纸介电常数配比、针电极与纸板的间距影响下的沿面放电特性进行研究。结果表明, 针电极与纸板的间距及绝缘油与绝缘纸的介电常数配比均会显著影响流注分支; 针电极与纸板的间距越小, 油-纸界面处的流注分支间的抑制越明显, 油-纸界面的流注对 z -轴流注的影响更显著; 当绝缘油介电常数比纸板大时, 流注在油中的发展和分支更为显著, 反之则流注更易沿纸板表面发展及在油-纸界面聚集电荷。

关键词:天然酯绝缘油; 放电模型; 流注放电; 电场; 空间电荷; 油-纸界面

中图分类号: TM215

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)04-0245-08

0 引言

目前, 随着环保型液体电介质的不断发展, 天然酯绝缘油在理化特性和介电特性方面已能满足变压器用油的基本要求。虽然天然酯绝缘油与矿物绝缘油在雷电击穿电压、氧化安定性等方面还存在一定的差距^[1-2], 但天然酯绝缘油由于其燃点高、来源广、可再生且环保的特点, 仍被众多学者及电网公司认为是未来电力行业潜在液体电介质之一^[3-5]。众所周知, 液体电介质在许多电力设备的绝缘系统中并不是单独存在的, 如油-纸绝缘就是油浸式变压器的主要绝缘组成部分^[6-8]。因此, 研究油-纸界面的局部放电特性对提升变压器绝缘性能具有非常重要的意义。然而, 由于流注放电机理尚不清晰, 多分支流注放电模型不完善, 使得油-纸放电特性的模拟与实际放电行为还存在较大差距。因此, 有必要对天然酯绝缘油-纸系统中流注沿面放电特性进行深入探究。

目前, 已有众多学者进行了油-纸沿面放电试验方面的研究。文献[9]通过试验探究了双层油-纸绝缘层在不同前沿时间脉冲下的击穿和流光行为, 获得了不同前沿时间下的击穿电压、起始电压及放电的光信号, 该结果可检测油-纸绝缘设备在长期负脉冲条件下的缺陷。文献[10-11]研究了氮唑对油-纸绝缘界面电荷势垒和电荷输运的影响特性, 并获得了氮唑对绝缘油和油浸纸电荷迁移率的影响规律。文献[12-13]通过在针-板电极间设置纸板屏

障, 探究了天然酯绝缘油中流注绕过纸板屏障时的电流波形和光信号特性。文献[14-16]探究了天然酯和矿物绝缘油中油-纸界面的蠕变击穿特性, 解释了天然酯中的电应力偏移对变压器设计规则的影响, 获得了油-纸沿面放电的宏观行为特征。该类研究对含纸板屏障阻挡的油中流注放电特性及油-纸沿面流注放电特性进行了大量的宏观试验观测和数据统计分析, 但由于试验研究在设备和方法上的局限性, 使得沿面放电的微观影响机理及特性仍难通过试验获取, 油-纸绝缘的放电机理仍尚不清晰。虽然目前的流注放电仿真研究已有大量相关报道^[17-19], 对油-纸界面流注传播的微观特性和电场分布进行了分析, 获取了油-纸界面的电场、电荷分布特性^[20-21], 但这与试验中观测的多分支流注放电行为仍存在较大差异, 使得现有仿真模型和结果难以对流注分支间的相互作用及流注分支对电场、电荷分布、流注发展特性的影响进行分析^[22-23]。因此, 为揭示油-纸沿面放电的微观机理和特性, 进一步探究油-纸沿面放电的抑制机理和方法, 有必要在现有流注放电模型的研究基础上构建具有多分支的流注沿面放电模型。

针对现有流注放电模型难以探究油-纸界面多分支流注发展的微观特性问题, 文中研究在天然酯绝缘油的多分支流注放电模型基础上计及油-纸界面的电荷输运特性, 构建油-纸绝缘系统的多分支流注放电模型; 结合有限元仿真方法建立极不均匀场的针-板放电结构模型, 获取油-纸绝缘下的天然酯绝缘油中流注分支形貌, 分析流注分支的形貌及发展特性; 研究针电极与纸板的间距以及纸板与天然

酯绝缘油介电常数差异对流注分支特性、油-纸界面电场、空间电荷分布特性的影响,揭示油-纸界面流注传播的影响机理和抑制方法。

1 流注放电模型

文献[24-25]中进行了纯油中的多分支流注放电仿真,但对于油-纸绝缘系统中的沿面放电仿真,则还需在纯油仿真基础上对纸板表面的电荷输运进行设置。由于油-纸表面电荷密度可表示为油-纸界面处的位移场法向分量之差,因此油-纸界面电荷的表达式为^[17,23]:

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = \rho_s \quad (1)$$

式中: $\mathbf{D}_1$ 、 $\mathbf{D}_2$ 分别为油-纸界面的油区域和绝缘纸板区域的电位移矢量; $\mathbf{n}$ 为垂直油-纸界面的单位方向矢量; ρ_s 为油-纸界面的电荷密度。

此外,油-纸界面的电荷密度 ρ_s 对时间 t 的导数可由油-纸界面两侧法向传导电流差表示。因此可得:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{J}^l - \mathbf{J}^s) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{J}^s$ 为纸板内的导电电流密度; $\mathbf{J}^l$ 为绝缘油中总的导电电流密度。

$$\mathbf{J}^l = \mathbf{J}_p + \mathbf{J}_n + \mathbf{J}_e = (\rho_p \mu_p - \rho_n \mu_n - \rho_e \mu_e) \mathbf{E}^l \quad (3)$$

式中: $\mathbf{J}_p$ 、 $\mathbf{J}_n$ 、 $\mathbf{J}_e$ 分别为油-纸界面油区域表面上的正离子、负离子以及电子电流密度, $\mathbf{J}_p = \rho_p \mu_p \mathbf{E}^l$, $\mathbf{J}_n = \rho_n \mu_n \mathbf{E}^l$, $\mathbf{J}_e = \rho_e \mu_e \mathbf{E}^l$, $\mathbf{E}^l$ 为油中电场; ρ_p 、 ρ_n 、 ρ_e 分别为正离子、负离子以及电子浓度; μ_p 、 μ_n 、 μ_e 分别为正离子、负离子以及电子迁移率。

考虑到纸板电介质的电导率太小,因此文中仿真对其忽略不计^[17,23],即纸板内部的空间电荷视为零。进而 $|\mathbf{J}^s| = 0$,如式(4)和式(5)所示。

$$\nabla \cdot (\varepsilon_{PB} \varepsilon_0 \mathbf{E}^s) = 0 \quad (4)$$

$$|\mathbf{J}^s| = \sigma |\mathbf{E}^s| = 0 \quad (5)$$

式中: ε_{PB} 为纸板的介电常数; ε_0 真空介电常数; $\mathbf{E}^s$ 为纸板中的电场; σ 为纸板的电导率。

结合式(2)一式(5)可得油-纸界面的电荷密度,如式(6)所示,其可在有限元软件中通过广义型边界偏微分方程求出。

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = \mathbf{n} \cdot (\rho_p \mu_p - \rho_n \mu_n - \rho_e \mu_e) \mathbf{E} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为放电过程中的电场。

将式(6)与前期纯油研究中的多分支流注放电模型(式(7)一式(11))进行耦合,构建油-纸沿面放电模型。

$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \varepsilon_0 \mathbf{E}) = \rho_p + \rho_n + \rho_e \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_p \mu_p \mathbf{E}) &= G_{F1}(|\mathbf{E}|) + G_{F2}(|\mathbf{E}|) + \\ G_{F3}(|\mathbf{E}|)(1 - H(l)) &+ \frac{\rho_p \rho_e R_{pe}}{q} + \frac{\rho_p \rho_n R_{pn}}{q} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_e}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho_e \mu_e \mathbf{E}) &= -G_{F1}(|\mathbf{E}|) - G_{F2}(|\mathbf{E}|) - \\ G_{F3}(|\mathbf{E}|)(1 - H(l)) &- \frac{\rho_p \rho_e R_{pe}}{q} - \frac{\rho_e}{\tau_\alpha} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho_n \mu_n \mathbf{E}) = \frac{\rho_e}{\tau_\alpha} - \frac{\rho_p \rho_n R_{pn}}{q} \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = \frac{1}{\rho_{oil} c_v} (k_T \nabla^2 T + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}) \quad (11)$$

式中: ε_r 为绝缘油的相对介电常数; $G_p(|\mathbf{E}|)$ 、 $G_n(|\mathbf{E}|)$ 、 $G_e(|\mathbf{E}|)$ 分别为电离区中正、负离子和电子的产生源项,在式(8)、式(9)中分别对应场致电离源项 $G_{F1}(|\mathbf{E}|)$ 、碰撞电离源项 $G_{F2}(|\mathbf{E}|)$ 和载流子密度激增源项 $G_{F3}(|\mathbf{E}|)$ ^[17,24]; q 为单位电荷量; $H(l)$ 为阶跃函数^[23]; R_{pe} 、 R_{pn} 分别为正离子与电子及正离子与负离子的复合率; T 为放电过程中绝缘油的温度; k_T 为导热率; c_v 为比热容; ρ_{oil} 为绝缘油密度; τ_α 为电子附着时间; $\mathbf{v}$ 为油的流速,由于放电的时间尺度在纳秒到微秒范围内,因此忽略不计;电流密度 $\mathbf{J} = (\rho_p \mu_p - \rho_n \mu_n - \rho_e \mu_e) \mathbf{E}$ ^[17]。

在电离过程中,正离子和电子总是成对出现。因此,由电荷守恒可知,式(8)一式(10)的右边之和必须为零,需要满足 $G_p(|\mathbf{E}|) = -G_n(|\mathbf{E}|) = -G_e(|\mathbf{E}|)$ 。

电离能是场致电离模型中最重要的参数之一,反映了产生载流子的难易程度。根据文献[25]对天然酯绝缘油分子进行高斯仿真计算获取的天然酯绝缘油主要电离能分布规律,可认为天然酯绝缘油中主要存在2类电离能:低电离能 $\Delta_1 = 6.8$ eV,高电离能 $\Delta_2 = 7.2$ eV。其中,仿真中的低电离能和高电离能的分子数分别设置为 $n_1 = 1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, $n_2 = 1 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 。

在油-纸界面的放电过程中,由于高电场会导致高温和热流,致使油-纸界面出现气泡、水分、杂质及光电离,这些因素会使得放电过程中存在由载流子激增引起的载流子密度波动现象。因此,可将仿真中的流注放电过程理解为:外施电压率先使油分子电离产生初始流注,当放电场强达到某一阈值时,载流子密度激增源项参与到放电中,以此模拟放电过程中各因素引起的载流子密度波动现象^[25]。由于放电过程中载流子密度的波动值无法直接由试

验获得,因此文中模型根据现有文献中光电离引起的载流子密度波动范围($1 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$)近似设置^[17]。此外,设定 $G_{F3}(|E|)$ 为载流子密度波动的初值,取 $1.5 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ 。则不同电场下的载流子密度激增项 $G_{F3}(|E|)$ 可表示为^[24]:

$$G_{F3}(|E|) = G'_{F3} k_e \quad (12)$$

式中: k_e 为不同电场强度下载流子密度波动的修正系数,如式(13)所示; G'_{F3} 为载流子密度。

$$k_e = (|E| - |E_{\text{set}}|) / |E_{\text{set}}| + 1 \quad (13)$$

式中: $|E_{\text{set}}|$ 为设置的阈值场强,绝缘油中流注起始及发展过程中的电场范围大约为 $1 \times 10^8 \sim 4 \times 10^8 \text{ V/m}$,仿真中 $|E_{\text{set}}|$ 设置为 $2 \times 10^8 \text{ V/m}$ 。

2 仿真参数设置

主要仿真参数如表1所示。仿真研究中考虑了天然酯绝缘油分子的2种主要电离势分布^[26],正、负离子迁移率及其他重要参数及设置方法可参考文献^[17,24]。

表1 主要的仿真参数

Table 1 Main parameters of the simulation

参数	符号	数值
低电离能分子数/ m^{-3}	n_1	1×10^{25}
低电离能电离势/eV	Δ_1	6.8
高电离能分子数/ m^{-3}	n_2	1×10^{23}
高电离能电离势/eV	Δ_2	7.2
绝缘油密度/ $(\text{kg} \cdot \text{L}^{-1})$	ρ_{oil}	0.92
绝缘油相对介电常数	ε_r	3.2
电子吸附时间/ns	τ_a	50
正、负离子迁移率/ $(\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	μ_p, μ_n	0.36×10^{-9}
电子迁移率/ $(\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	μ_e	0.36×10^{-4}
正离子与负离子复合率/ $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	R_{pn}	1.64×10^{-17}
正离子与电子复合率/ $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	R_{pe}	1.64×10^{-17}

雷电冲击电压下的绝缘试验检验是变压器出厂时检验其绝缘性能的必要环节。为探究雷电冲击电压下变压器内的油-纸绝缘特性及绝缘强度的提升机理,文中选用雷电波形作为外施电压进行仿真,其波形函数为^[17,24]:

$$V = V_0 K (e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (16)$$

式中: V_0 为施加电压; K 为电压校正系数,取 1.037; τ_1, τ_2 分别为波尾和波头时间; t 为仿真时间。仿真时间步长设置为 $4.8 \times 10^{-10} \text{ s}$ 。其他边界条件可参照文献^[17,22]进行设置。

仿真模型结构及物理网格划分如图1所示。模型中的针电极针尖曲率半径为 $40 \text{ }\mu\text{m}$,板电极直径

为 30 mm ,针-板油隙为 15 mm 。网格全部采用三角形网格。为节省计算资源,在流注发展的主要区域添加辅助面,将流注发展区域内的最大网格边长控制在 $4 \text{ }\mu\text{m}$ 以内,其他区域采用控制网格变量法,网格大小从辅助面向外逐渐增大。对此网格密度进行进一步加密处理及分析后发现,加密网格后未对仿真结果造成明显影响,因此该仿真的网格划分符合要求。计算中使用 PARDISO 方法进行求解。流注放电中存在各项异性而导致的仿真数值波动问题,文中模型采用流线扩散增强仿真的稳定性^[17]。放电模型通过仿真软件中的静电模块、稀物质传递模块及流体传热模块对放电进行约束和设定。

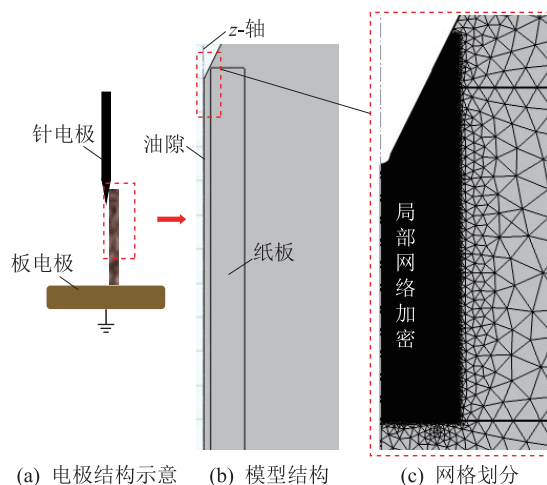


图1 模型结构及物理网格划分

Fig.1 Model structure and physical meshing

3 仿真结果分析

3.1 纸板间隙对流注分支与传播的影响

图2为纯油中不含纸板时的流注分支形貌,其中外施电压为 200 kV ,电压上升沿时间为 120 ns 。由图2可知,流注分支由针电极向板电极的方向呈发散状,针电极附近的初始流注随着仿真时间的增加而得到了显著发展,并在 z -轴流注分支上出现了较多的次流注分支。相比于现有流注放电模拟结果,多分支的流注形貌则更接近试验结果。

图3为针电极与纸板的间距 d 分别为 0.1 mm 、 0.2 mm 和 0.3 mm ,纸板介电常数为 4.2 时的流注发展形貌图。由图3可知,针电极与纸板的间距对初始流注的发展具有显著影响。如图3(a)所示,当 $d=0.1 \text{ mm}$ 时,除了 z -轴流注分支外,其余的流注分支在 30.24 ns 时均已接触纸板表面。在接触纸板的流注分支中,位于最下方的流注分支沿纸板表面得到了快速发展,位于最上方的2个流注分支的发展则受到了抑制。其中,位于最上方的流注分支沿垂

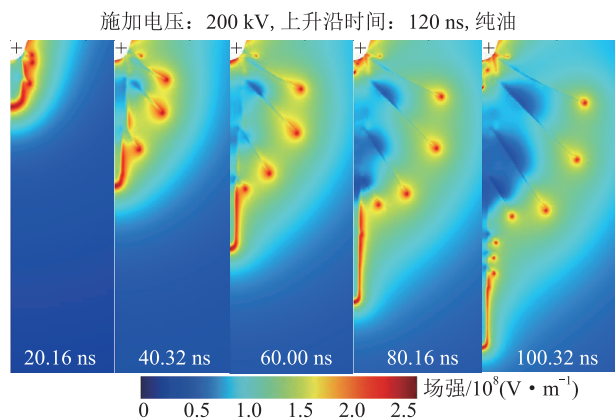


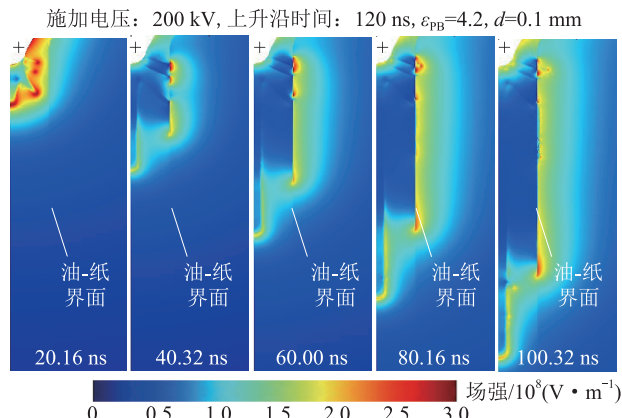
图2 纯油中的流注发展形貌与电场分布

Fig.2 Propagation morphologies and electric field distributions of streamer in the pure oil

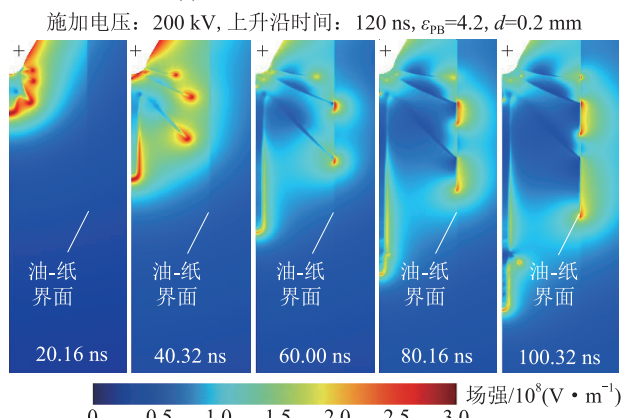
直于纸板的方向有明显向纸板内部发展的迹象,且其电场发生了明显的畸变,这表明该流注分支易对纸板造成损坏的概率较大。当 $d=0.2 \text{ mm}$ 时,流注分支在 50.4 ns 时接触纸板表面,其与 $d=0.1 \text{ mm}$ 时的发展情况类似,位于最下方的流注分支沿纸板表面发展最快;位于中间的流注分支在发展到最下方的分支与纸板的接触位置时便停止发展;位于最上方的流注分支则几乎垂直作用于纸板表面,如图 3 (b)所示。当 $d=0.3 \text{ mm}$ 时,流注分支在 70.08 ns 时接触纸板表面。在流注接触纸板表面前,流注分支在油中得到了充分发展,但针电极与纸板间隙的增大延缓了流注接触纸板表面的时间,因此流注在 100.32 ns 时仍没明显的沿面发展现象,如图 3 (c)所示。此外,由流注分支形貌可知,沿纸板表面发展的流注分支间的相对距离较大,增加了各流注分支在纸板表面的沿面发展空间,有利于降低分支间的相互抑制和电场畸变,减少对纸板的损坏。对比不同针电极与纸板间距下的 z -轴流注分支可知, $d=0.1 \text{ mm}$ 时的 z -轴流注分支发展相对其他两组更快。这是由于针电极与纸板间距的减小,使得沿纸板表面的流注头部产生的空间电场加剧了 z -轴头部的电场所致。因此,针电极与纸板的间距对流注沿面发展特性具有重要影响。

3.2 纸板介电常数对流注分支与传播的影响

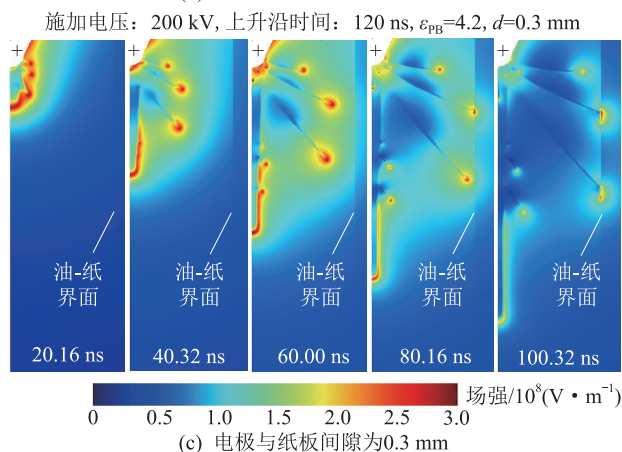
图 4 为不同油-纸介电常数配比下同一时刻的流注分支形貌对比。其中,纸板介电常数 ε_{PB} 分别设置为 2.2 (小于绝缘油介电常数)、3.2 (约等于绝缘油介电常数)和 4.2 (大于绝缘油介电常数),外施电压为 200 kV,电压上升沿时间为 120 ns。由图 4 可知,流注的发展形貌受不同介电常数纸板的阻挡而发生了显著变化,且 3 种介电常数下的流注均具有 z -轴流注分支。当 $\varepsilon_{\text{PB}}=2.2$ 时, z -轴流注分支上产



(a) 电极与纸板间隙为 0.1 mm



(b) 电极与纸板间隙为 0.2 mm



(c) 电极与纸板间隙为 0.3 mm

图3 针电极与纸板不同间隙下的流注形貌与电场分布

Fig.3 Streamer morphologies and electric field distributions under different clearances between the needle electrode and pressboard

生了较多的新流注分支,且随着纸板介电常数增加, z -轴上的流注分支明显减少, r -轴方向的流注分支则发展更显著。这说明当纸板介电常数小于绝缘油介电常数时,流注更容易在油中发展;当纸板介电常数大于绝缘油介电常数时,流注更倾向于沿纸板表面发展。当流注接触纸板后,流注更容易在介电常数较大的纸板表面产生沿面放电现象。此外,纸板介电常数越大,在油-纸界面的流注头部电场更容易形成向油中发散的“扇形”状分布。

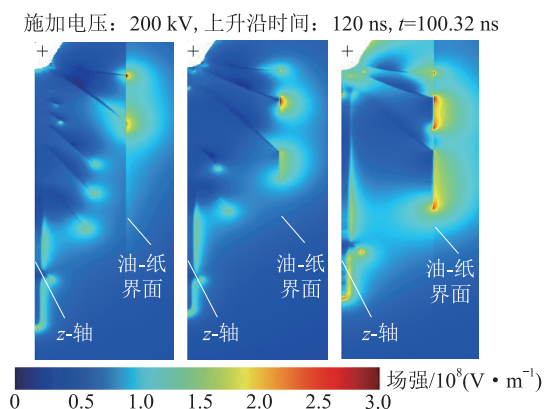


图4 绝缘油和绝缘纸不同介电常数配比下的流注形貌与电场分布

Fig.4 Streamer morphologies and electric field distributions under different dielectric constant ratios of insulating oil and insulating paper

图5给出了100.32 ns时 z -轴的电场和电荷分布特性。由图5可知, z -轴流注分支长度随纸板介电常数的增加而减小,并且纸板介电常数为3.2时的 z -轴流注头部电场强度最小。此外,针电极附近和流注头部附近为强电场区域,因此电离出的正离子和电子也主要分布在这2个区域附近。其中,针电极附件的强电场则是由于针电极始终处于较高的外施电压下,在初始流注发展的过程中又产生新流注的流注头部电场。由正离子和电子的迁移速率可知,相对正离子迁移较快的电子会迅速迁移出电离区,留下迁移较慢的正离子聚集在流注头部形成正空间电荷;而电子在迁移过程中也易被吸附成为负离子。形成的正空间电荷加强了外施电压形成的电场,有利于流注的发展,这与正流注发展过程中的电荷分布特性相符^[17]。因此,上述结果表明,绝缘油与绝缘纸介电常数的配比差异对油中空间电荷密度及电场强度的影响并不明显,但对 z -轴流注的发展长度和速度的影响较大。

图6给出了油-纸界面的电场和电荷分布。由图6可知,流注在接触纸板后会沿油-纸界面发展,并且油-纸界面处的电场和电荷分布与油中的电场和电荷分布特性具有显著差异。图6(a)为油-纸界面的电场强度分布特性,其中纸板介电常数为2.2时的场强最大,4.4时最小。由图6(b)可知,油-纸界面为正的空间电荷分布,这说明油-纸界面主要分布的是正离子。正离子的聚集会在油-纸界面形成正的空间电荷,并且正空间电荷之间除了会因电荷感应力相互排斥外,还会形成局部空间电场。纸板的介电常数越大,在纸板表面聚集的正离子越多,形成的空间电场也越大。由放电系统中电场分布与物质的介质常数成反比可知,纸板介电常数越

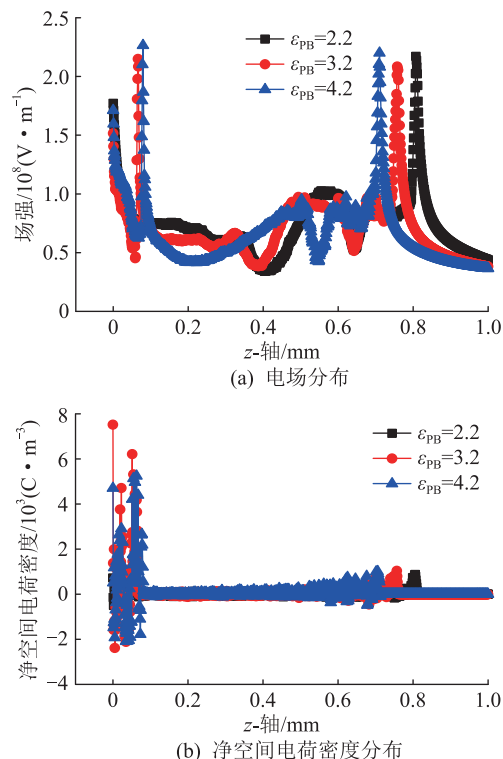


图5 z -轴电场和净空间电荷密度分布特性

Fig.5 Distribution characteristics of the electric field and net space charge density along the z -axis

大,油-纸界面的电场最大值则偏向于油中,这与图4中的纸板介电常数越大,油-纸界面处流注头部越容易在油中形成“扇形”的空间电场现象一致。此外,同一界面处不同分支间的电场和电荷密度均出现了明显的“沟谷”,电荷密度在“沟谷”处的数值也接近于零,这也反映了图4油-纸界面处的流注分支间的抑制现象。油-纸界面处流注分支间的抑制使得油-纸界面形成“锯齿”状的分布特征,纸板的损坏也最容易发生在电荷分布的凸起部位。

4 纸板对流注传播的影响机理分析

图7为图4条件下纸板介电常数对油-纸界面处电场流线分布的影响。由图7(a)可知,当 $\epsilon_{oil} > \epsilon_{PB}$ 时,虚线框中绝缘油侧的电场云图颜色分布比纸板侧深,并且电场线进入纸板后有明显向纸板内侧偏转的趋势,这表明油-纸两侧的场强分布不同,并且纸板侧的电场比绝缘油中更大。当 $\epsilon_{oil} = \epsilon_{PB}$ 时,图7(b)所示的电场线经过油-纸界面后没有发生明显偏转,虚线框中油-纸两侧的电场云图颜色分布相近,表明纸板侧的电场与绝缘油没有明显差异。当 $\epsilon_{oil} < \epsilon_{PB}$ 时,图7(c)所示的电场线在油-纸界面后有明显向纸板外侧偏转的趋势,并且虚线框中油-纸两侧电场云图颜色分布为纸板侧较绝缘油中颜色更深,表明纸板侧的电场较绝缘油中更小。因此,

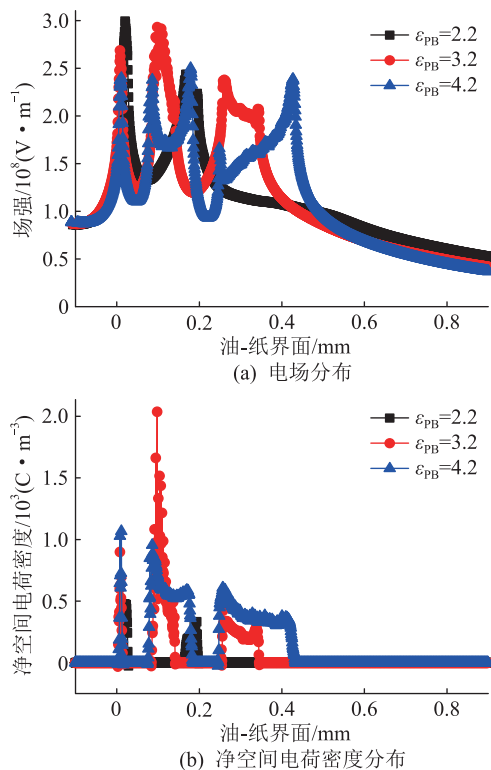


图6 油-纸界面的电场和净空间电荷密度分布特性
Fig.6 Distribution characteristics of the electric field and net space charge density at the oil-paper interface

由油-纸界面处的电场流线分布特性可知,油-纸介电常数差异对流注传播和电场分布具有显著影响,其机理则是由于油-纸界面存在大量自由电荷而产生了电荷感应力。当纸板介电常数小于绝缘油介电常数时,该电荷感应力将对油-纸界面的电荷产生斥力;反之则提供一个吸引力^[20]。此外,当 $\epsilon_{PB} < \epsilon_{oil}$ 时,纸板中的电场相对较大,电场畸变及热量对纸板的损坏可能性更大;反之则更小。因此,对于介电常数低于绝缘油的绝缘纸,应充分考虑纸板的绝缘性能;对于介电常数大于绝缘油的纸板,则更易引起流注沿油-纸界面传播,应充分评估沿面放电造成的失效性裕度。在设置和选择纸板时,应结合实际工况的油隙距离及经常出现的击穿失效特性来设置纸板,并应充分考虑纸板的绝缘强度及油-纸介电常数配比等因素的影响。

图8为油-纸绝缘失效机理示意。由图中的试验现象可知,明亮的击穿通道通常位于沿纸板表面处。一方面是由于纸板介电常数通常大于绝缘油介电常数,使得流注易向纸板表面靠拢;另一方面则是由于油中的流注分支对沿纸板表面发展的流注分支存在排斥作用,油中流注分支前端的正空间电荷形成的电场加快了纸板表面前端的流注发展,最终贯穿针板电极而导致绝缘失效,如图8(b)中的流注分支①所示。此外,沿油-纸界面的流注分

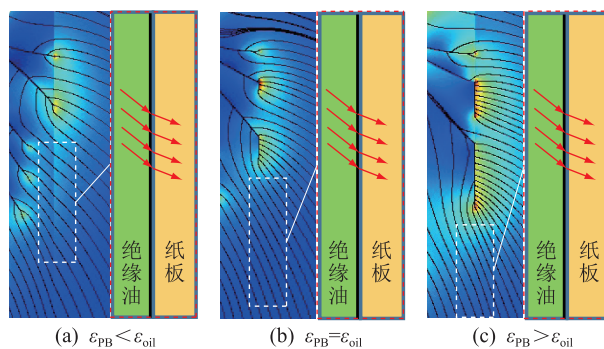


图7 纸板介电常数对油-纸界面处电场线分布的影响
Fig.7 Influence of pressboard dielectric constant on the distribution of electric field streamlines at oil-paper interface

支间也存在相互排斥作用,使得后端的分支受到其前方流注分支的抑制,导致大量电荷堆积而引起电场畸变,最终导致纸板被击穿而发生油-纸绝缘失效,如图8(b)的流注分支②所示。

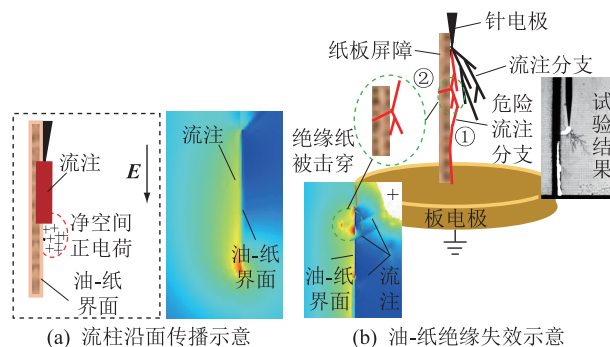


图8 油-纸绝缘失效机理示意
Fig.8 Schematic diagram of failure mechanism for the oil-paper insulation

5 结论

文中在多分支流注放电数值仿真模型基础上进一步考虑油-纸界面的电荷输运特性,构建了油-纸绝缘系统中的多分支流注沿面放电模型,并利用有限元法对天然酯绝缘油-纸沿面放电特性进行了仿真研究。主要成果如下:

(1) 获得了油-纸界面多分支的正流注分支形貌,表明文中构建的计及载流子密度波动的流注放电模型较好地揭示了放电过程中的载流子密度激增对流注分支和发展的影响机理。

(2) 油-纸介电配比会显著影响流注的分支和传播特性。当纸板介电常数小于绝缘油介电常数时,流注更容易在油中发展,且 z -轴流注分支明显;当纸板介电常数大于绝缘油介电常数时,流注分支更倾向于向纸板表面发展,且当流注接触纸板后,流注更容易在介电常数较大的纸板表面产生沿面

放电现象。油-纸界面的空间电荷和电场分布表明,纸板的介电常数越大,在纸板表面聚集的正离子越多,形成的空间电场也越大,导致沿油-纸界面传播的流注分支易相互排斥而造成局部电场激增。

(3) 针电极与纸板的间距会显著影响流注分支形貌和流注沿面发展长度。间距越近,油-纸界面的流注分支更易接触纸板,流注分支在油-纸界面间的相互抑制作用更显著;并且沿油-纸界面发展的流注头部形成的正空间电场会加剧油中 z -轴流注分支的电场,影响油中流注分支的发展。

参考文献:

- [1] 蔡胜伟,李华强,黄芝强,等. 天然酯绝缘油变压器技术发展及应用概况[J]. 绝缘材料,2019,52(11):9-16.
CAI Shengwei, LI Huaqiang, HUANG Zhiqiang, et al. Development and application of natural ester insulating oil-immersed transformer technology[J]. Insulating Materials, 2019, 52(11): 9-16.
- [2] 赵耀洪,何艳琪,钱艺华,等. 天然酯绝缘油的氧化安定性评估及性能提升研究进展[J]. 绝缘材料,2023,56(5):7-13.
ZHAO Yaohong, HE Yanqi, QIAN Yihua, et al. Research progress in oxidative stability assessment and performance improvement of natural esters[J]. Insulating Materials, 2023, 56(5): 7-13.
- [3] 李剑,姚舒瀚,杜斌,等. 植物绝缘油及其应用研究关键问题分析与展望[J]. 高电压技术,2015,41(2):353-363.
LI Jian, YAO Shuhan, DU Bin, et al. Analysis to principle problems and future prospect of research on vegetable insulating oils and their applications[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 353-363.
- [4] FOFANA I. 50 years in the development of insulating liquids[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(5): 13-25.
- [5] ASANO R, PAGE S A. Reducing environmental impact and improving safety and performance of power transformers with natural ester dielectric insulating fluids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(1): 134-141.
- [6] 黄伟嘉,李佳,王国庆,等. 矿物绝缘油浸纸在天然酯中的加速老化特性[J]. 绝缘材料,2023,56(8):32-36.
HUANG Weijia, LI Jia, WANG Guoqin, et al. Accelerated ageing characteristics of mineral insulating oil-impregnated paper in natural esters[J]. Insulating Materials, 2023, 56(8): 32-36.
- [7] WANG Y Q, WANG Z Q, ZENG Z, et al. Effect of aging degree on partial discharge degradation of oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(6): 2099-2107.
- [8] 郑蝶吉,王哲铭,赵文彬,等. 天然酯浸渍硅烷改性绝缘纸系统的长期热老化特性研究[J]. 绝缘材料,2023,56(7):67-73.
ZHENG Dieji, WANG Zheming, ZHAO Wenbin, et al. Long-term thermal ageing characteristics of natural ester impregnated silane modified insulating paper system[J]. Insulating Materials, 2023, 56(7): 67-73.
- [9] NI H L, ZHANG Q G, GUO C, et al. Breakdown and streamer behavior in double-layer oil-paper insulation under impulses of varying front time[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 103-111.
- [10] GAO L, WU Y, LV Z P, et al. Effect of BTA on interface charge barrier and charge transportation in oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(2): 412-419.
- [11] GAO L, XU H, GUO H M, et al. Effect of BTA on charge mobility in insulating oil and oil-immersed paper[C]//2023 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), East Rutherford, NJ, USA. IEEE, 2023: 1-4.
- [12] ROZGA P, STANEK M, PASTERNAK B. Characteristics of negative streamer development in ester liquids and mineral oil in a point-to-sphere electrode system with a pressboard barrier[J]. Energies, 2018, 11(5): 1088.
- [13] ROZGA P, STANEK M, STRZELECKI K. Positive streamer development in selected dielectric liquids in a point-to-sphere electrode system with pressboard barrier[C]//2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Athens, Greece. IEEE, 2018: 1-4.
- [14] HAEGELE S, VAHIDI F, TENBOHLEN S, et al. Investigation of interfacial surface creep breakdown at oil-pressboard interfaces in natural ester liquid and mineral oil[C]//2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, UK. IEEE, 2017: 1-5.
- [15] YI X, WANG Z D. The influences of solid surface on the propagation of creepage discharge in insulating liquids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 303-312.
- [16] REFFAS A, BEROUAL A, MOULAI H, et al. Comparison of creeping discharges propagating over pressboard immersed in olive oil, mineral oil and other natural and synthetic ester liquids under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 22(6): 2019-2026.
- [17] HWANG J W G. Elucidating the mechanisms behind pre-breakdown phenomena in transformer oil systems[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [18] 陈小波. 植物绝缘油中流注发展特性数值分析研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
CHEN Xiaobo. Study on numeric analysis of streamer growing in vegetable insulating oils[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [19] 贾斌,赵来军,陈芸,等. 微米尺度气隙放电击穿电压及放电路径的分析[J]. 绝缘材料,2023,56(7):102-108.
JIA Bin, ZHAO Laijun, CHEN Yun, et al. Analysis on breakdown voltage and discharge path in micro scale air gap discharge[J]. Insulating Materials, 2023, 56(7): 102-108.
- [20] 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(S2):620-

- 628.
- CHEN Gang, HUANG Zhengyong, DUAN Yu, et al. Simulation of surface discharge based on the different ratio of dielectric constants of oil and papers[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2020, 35(S2): 620-628.
- [21] 郑含博, 敬佳兴, 罗晓庆, 等. 基于多源融合的油纸绝缘套管缺陷辨识及绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 119-128.
- ZHENG Hanbo, JING Jiaxing, LUO Xiaoqing, et al. Defect identification and insulation condition assessment of an oil-immersed paper insulation bushing based on multi-source fusion [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 119-12.
- [22] JADIDIAN J, ZAHN M, LAVESSON N, et al. Effects of electrode size and solid barrier orientation on streamer discharge in transformer oil [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(14): 143304.
- [23] 李旭东. 交直流复合电压下油纸绝缘沿面局部放电特性与电老化失效模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- LI Xudong. Study on creeping discharge properties and electrical aging failure models of oil-paper insulation under AC-DC combined voltages [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [24] 陈刚, 李剑, 黄正勇, 等. 考虑载流子密度扰动的植物绝缘油中初始流注放电仿真[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 1176-1185.
- CHEN Gang, LI Jian, HUANG Zhengyong, et al. Simulation of streamer discharge considering carrier density fluctuation in vegetable insulating oil[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1176-1185.
- [25] CHEN G, LI J, HUANG Z Y, et al. Simulation of the effect of carrier density fluctuations on initial streamer branching in natural ester during pulsed positive discharges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(5): 1604-1610.
- [26] LI J, WANG Y C, WANG F P, et al. A study on ionization potential and electron trap of vegetable insulating oil related to streamer inception and propagation [J]. Physics Letters A, 2017, 381(44): 3732-3738.

作者简介:



陈刚

陈刚(1989),男,博士,讲师,研究方向为先进电介质材料的制备与介电理化性能提升、放电机理及放电模型、噪声及其信号检测(E-mail:chengang@cdu.edu.cn);

辛晓军(1989),男,博士,讲师,研究方向为自旋电子器件和锂电池的低维材料的理论设计和物理性能;

宋普查(1989),男,博士,讲师,研究方向为分布式自适应滤波网络、主动噪声控制、自适应信号处理。

Simulation of multi-branching streamer discharge at natural ester insulating oil-paper interface

CHEN Gang¹, XIN Xiaojun¹, SONG Pucha¹, WANG Kaizheng², LUO Li¹

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China;

2. School of Electrical Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Yunnan 650093, China)

Abstract: Partial discharge at the oil-paper interface is one of the main reasons for the failure of oil-paper insulation in oil-immersed transformers. In this article, based on the numerical model of multi-branching streamer discharge, a multi-branching streamer discharge model in oil-paper insulation system is constructed by further considering the charge transport characteristics of oil-paper interface. The surface discharge characteristics under the influence of the dielectric constant ratio between natural ester insulating oil and insulating paper, and the spacing between needle electrode and paperboard are studied by finite element method, respectively. The results show that the distance between the needle electrode and the paperboard, and the dielectric constant ratio of insulating oil and insulating paper both significantly affect the streamer branching. The smaller the clearance between the needle electrode and paper-board is, the more serious the inhibition of streamer branches at the oil-paper interface is, which resulting in the streamers near the oil-paper interface are more significant effect on the propagation of the z-axis streamer. When the dielectric constant of the insulating oil is larger than that of the paperboard, the development and branching of the streamer in the oil will be more significant. On the contrary, the streamer is more likely to develop along the surface of the paperboard and accumulate charge at the oil-paper interface.

Keywords: natural ester insulating oil; discharge model; streamer discharge; electric field; space charge; oil-paper interface

(编辑 钱悦 方晶)