

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.02.022

气压和湿度变化下的流注放电过程仿真研究

田晓云¹, 翟春雨¹, 岳永刚¹, 张德强¹, 赵琴¹, 宋辉²

(1. 内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古超高压供电分公司, 内蒙古 呼和浩特 010080;

2. 上海交通大学电气工程系, 上海 201100)

摘要:局部放电会对电气设备绝缘性能构成严重威胁。流注放电是高压领域气体放电的主要形式,也是气隙放电研究中的关键问题。电力设备在运行过程中会受到湿度、气压等外部环境的影响,因此研究不同外界条件对绝缘缺陷放电的影响对高海拔(低气压)和高湿度地区输电线路及输变电设备的设计和运行有重要意义。文中分析国内外外部条件对放电过程影响的研究现状,基于流体动力学模型,在COMSOL环境下建立尖端缺陷流注放电仿真模型,并利用该模型研究间隙距离为3 mm的尖端缺陷的流注放电过程在外界条件变化下的影响情况。研究表明,气压下降会加速流注传播速度,稍降低流注头部电场强度最大值,并加剧流注放电电离程度;湿度升高会加速流注传播速度,对流注头部电场强度最大值影响不大,但会加剧流注放电电离程度。以流注头部距离阴极1.5 mm为例,气压由101.325 kPa下降至81.060 kPa,会导致流注传播速度加快 0.56×10^6 m/s,头部电场强度减少 0.633×10^6 V/m,头部光强度增加 1.675×10^{28} m⁻³/s;湿度由3.04 g/m³上升至13.04 g/m³,会导致流注传播速度加快 0.08×10^6 m/s,头部电场强度减少 0.015×10^6 V/m,头部光强度增加 0.865×10^{28} m⁻³/s。

关键词:局部放电;流注放电;尖端缺陷;流体动力学模型;气压;湿度

中图分类号:TM852

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)02-0239-11

0 引言

局部放电会对电气设备的绝缘性能造成严重威胁^[1-4],监测局部放电对电气设备的运行维护至关重要^[5-7]。其中,流注放电是高压领域气体放电的主要形式,是先导放电和闪络出现之前的重要阶段,是气隙放电研究中的关键问题^[8-9]。电力设备运行环境复杂多样,在长期运行过程中会处于不同的湿度、气压等外部环境中,其绝缘缺陷的放电过程也会受到不同外界条件的影响。文中旨在探究外界气压和湿度变化对流注放电的影响,研究外界环境因素与流注放电行为之间的关系,从而更好地理解空气间隙击穿放电的产生和传播机制,对高海拔(低气压)和高湿度地区输电线路及输变电设备的设计和运行有重要意义。

关于外界条件对放电过程的影响,主要涉及湿度和气压等因素。例如,孟晓波及其团队运用一种基于针-板放电模型的实验装置,分析了低气压条件下流注放电过程受气压和湿度的影响,研究表明,流注传播所需的电场强度随着湿度的增加而增加,随着气压的降低而降低^[10];Robledo的研究发现,导线电晕起始电压会因为海拔升高而明显降低,同时,导线电晕起始电压会受到湿度的显著影

响,尤其在低气压下,湿度的影响更为显著^[11];Phelps采用三电极系统,分析了正向流注传播的电场强度与干燥空气的气压以及空气中水蒸气分压之间的关系^[12]。卞星明等探讨了气压和湿度对负直流电晕起始电压的影响规律,发现负直流电晕起始电压随气压降低和湿度增大而减小^[13]。惠建峰等关注正直流电晕起始电压受气压和湿度变化的影响,研究表明,正直流电晕起始电压随气压降低而减小,随湿度减小而增大^[14]。

流体动力学模型数值仿真是目前流注放电理论研究较为常用的方法。只要设置合理的放电几何模型与粒子移动参数,仿真可以达到与实验基本一致的结果。1971年,Davies及其团队首次提出利用流体模型探讨微观带电粒子在电场中的运动特性^[15]。该方法将所有带电粒子分为3种,即电子和正负离子。利用电场强度的泊松方程,同时联立3种粒子的连续性方程,成功求解出空间内部电场强度和带电粒子的散布特性,实现仿真模拟气体微观放电行为。流体模型是研究气体放电问题的常用方法。例如,李晓冉等利用流体模型研究空气中沿面流注放电的表面电荷的分布特性^[16];雷月在流体模型中加入等离子体化学反应,研究正极性和负极性的电晕放电的电磁特性^[17];支珊采用加权余量法的伽辽金弱形式对短空气间隙流注放电进行仿真,分析外加电压极性、棒头半径对流注放电发展

收稿日期:2024-07-05;修回日期:2024-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007117)

过程的影响^[18];刘洪顺等基于流体动力学的仿真模型研究沿面放电在凹陷中的形成和发展过程^[19];何东欣等基于流体动力学模型分析楔形电极的放电机理^[20];王宗祥基于流体动力学模型研究水中高压纳秒脉冲放电流注特性^[21];张家源利用流体动力学仿真研究典型局部放电过程和放电脉冲的特性,但所采用的参数仅适用于标况下空气放电的情况^[22];徐乐平也利用流体动力学模型研究空气针-板正负电晕微观放电的机理,但同样没有考虑外界情况变化对放电过程的影响^[23]。上述文献大多只考虑了标况下的放电情况,没有考虑外界情况变化下流体模型中的放电参数如何设置。

文中利用流体模型仿真研究外界条件对尖端放电流注发展过程的影响。尖端放电是电气设备的金属部分存在金属突出物缺陷所引起的,是一种典型的局部放电类型。文中在 COMSOL 环境下,利用流体动力学模型,建立针-板放电仿真模型,模拟空气中间隙距离为 3 mm 的尖端缺陷的流注放电过程,并使用控制变量法,以流体动力学模型为基础,通过改变放电参数来改变放电过程中的气压、湿度等外部条件,并通过观察流注传播速度、轴线处电场强度、光强度等参数的变化来观察外界条件变化对放电过程的影响。文中通过建立仿真模型和深入分析,提供了考虑气压、湿度变化下关于尖端缺陷流注放电过程的更全面的认识。研究结果可以为外部绝缘设备的改进提供参考,例如,在设计套管、支撑绝缘子等外部绝缘设备时,可以更加充分考虑气压和湿度等因素,以提高设备的性能和可靠性。

1 流注放电数学模型及参数控制方法

1.1 流体模型

仿真中的流体模型使用的粒子连续性方程^[24]如下:

$$\partial N_p / \partial t + \nabla \cdot (N_p \mu_p \mathbf{E} - D_p \nabla N_p) = \alpha N_e |\mu_e \mathbf{E}| - \beta_{ep} N_e N_p - \beta_{np} N_n N_p + S_{ph} \quad (1)$$

$$\partial N_n / \partial t + \nabla \cdot (-N_n \mu_n \mathbf{E} - D_n \nabla N_n) = \eta N_e |\mu_e \mathbf{E}| - \beta_{np} N_n N_p \quad (2)$$

$$\partial N_e / \partial t + \nabla \cdot (-N_e \mu_e \mathbf{E} - D_e \nabla N_e) = \alpha N_e |\mu_e \mathbf{E}| - \eta N_e |\mu_e \mathbf{E}| - \beta_{ep} N_e N_p + S_{ph} \quad (3)$$

式中: N_p 、 N_n 、 N_e 分别为正离子、负离子、电子的数密度; μ_p 、 μ_n 、 μ_e 分别为正离子、负离子、电子的迁移率; \mathbf{E} 为电场强度; D_p 、 D_n 、 D_e 分别为正离子、负离子、电子的扩散系数; α 为碰撞电离系数; η 为附着系数; β_{ep} 为电子与正离子的复合系数; β_{np} 为正负

离子的复合系数; S_{ph} 为光电离反应速率。

另外,需要考虑空间电荷分布和原始电场的互相影响,通过空间电荷分布计算出电场强度的大小变化,为此,将式(1)~式(3)耦合,计算出电场的分布。

$$-\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}) = -q(N_p - N_e - N_n) \quad (4)$$

式中: ε_0 为真空介电常数, $\varepsilon_0 = 8.854\ 187\ 817 \times 10^{-12}$ F/m; ε_r 为介质的相对介电常数,空气的相对介电常数值为 1; q 为元电荷,数值为 $q = 1.602\ 176\ 620\ 8 \times 10^{-19}$ C。

为了模拟尖端缺陷的流注放电过程,文中建立二维轴对称针-板放电仿真模型进行仿真模拟,模型的几何结构如图 1 所示,网格剖分如图 2 所示。

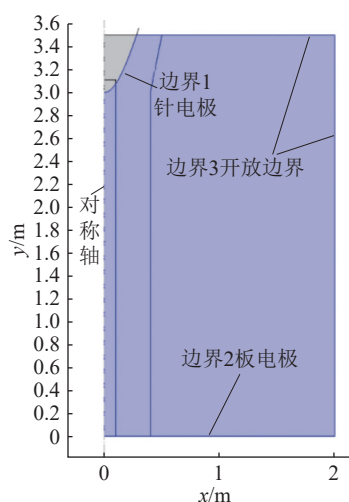


图 1 尖端缺陷放电的几何模型
Fig.1 Geometric model of tip defect discharge

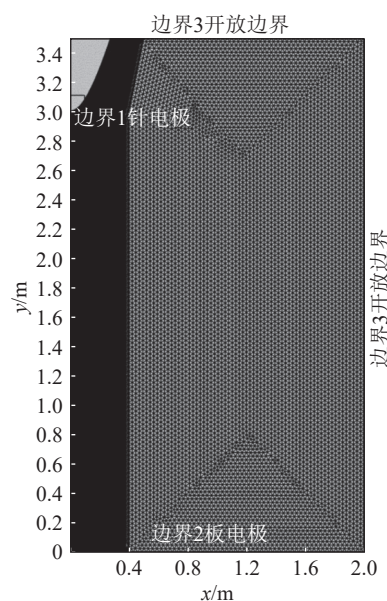


图 2 尖端缺陷放电模型的网格剖分
Fig.2 Mesh generation of tip defect discharge model

针尖电极电势设定为 11 kV,平板电极设定为接地。针尖形状采取双曲结构,即:

$$\left(\frac{y}{a}\right)^2 - \left(\frac{x}{b}\right)^2 = 1 \quad (5)$$

式中: a 为 1 mm; b 为 0.25 mm。

由于间隙的形状不规则, 选取了剖分效果更好的自由三角形网格。为了尽可能得到理想的收敛解, 同时减少计算时间, 在进行网格剖分时, 将电极附近以及流注通道内的网格进行加密处理, 最大单元大小设为 0.004 mm, 其他部分的网格最大单元大小设为 0.03 mm。

边界条件设置如表 1 所示^[25], 其中 \vec{n} 为法向量。

表 1 尖端缺陷放电的边界条件设定
Table 1 Setting of boundary conditions for discharge of tip defects

控制量	边界1	边界2	边界3
正离子	常量浓度: $N_p = 0$	流出: $-\vec{n} \cdot D_p \nabla N_p = 0$	开放边界: $-\vec{n} \cdot D_p \nabla N_p = 0$ $\vec{n} \cdot (\mu_p \mathbf{E}) \geq 0$ $N_p = 0$ $\vec{n} \cdot (\mu_p \mathbf{E}) < 0$
负离子	流出: $-\vec{n} \cdot D_n \nabla N_n = 0$	常量浓度: $N_n = 0$	开放边界: $-\vec{n} \cdot D_n \nabla N_n = 0$ $\vec{n} \cdot (\mu_n \mathbf{E}) \geq 0$ $N_n = 0$ $\vec{n} \cdot (\mu_n \mathbf{E}) < 0$
电子	流出: $-\vec{n} \cdot D_e \nabla N_e = 0$	流出: $-\vec{n} \cdot D_e \nabla N_e = 0$	开放边界: $-\vec{n} \cdot D_e \nabla N_e = 0$ $\vec{n} \cdot (\mu_e \mathbf{E}) \geq 0$ $N_e = 0$ $\vec{n} \cdot (\mu_e \mathbf{E}) < 0$
电场	电势: $V_0 = 11 \text{ kV}$	接地: $V = 0$	零电荷: $\vec{n} \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}) = 0$

1.2 参数控制

文中在建立模拟尖端缺陷的流注放电的仿真模型时, 采用的是文献 [26] 中的空气流注放电参数。关于如何模拟不同的外部条件, 可通过改变放电参数来实现。通过不同外部条件(包括气压、湿度)下放电参数的值的变化, 来体现不同外部条件对流注放电过程的影响。

根据文献 [26] 提供的空气流注放电参数表达式, 参数大多可表示为电场强度 \mathbf{E} 和气体粒子数密度 N 的函数。根据气体平衡方程, 在恒温状态下, 气体粒子数密度 N 与气压 p 成正比, 因此, 可通过修改气体粒子数密度 N 与气压 p 的值, 来体现气压变化对放电参数的值的影响, 并以此研究环境气压对流注放电过程的影响。具体放电参数如表 2 所示^[26], 其中 p_0 为标准大气压。气压为 101.325 kPa 时, $N = 2.6876 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$; 气压为 91.1925 kPa 时, $N = 2.41884 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$; 气压为 81.060 kPa 时, $N = 2.15008 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 。

湿空气是指主要组成部分为干空气和水蒸气

表 2 空气流注放电参数
Table 2 Air streamer discharge parameters

放电参数	表达式
α/m^{-1}	$\begin{cases} 6.619 \times 10^{-21} N \times \exp(-5.593 \times 10^{-19} N / \mathbf{E}) & \mathbf{E} /N < 1.5 \times 10^{-19} \\ 2 \times 10^{-20} N \times \exp(-7.248 \times 10^{-19} N / \mathbf{E}) & \mathbf{E} /N \geq 1.5 \times 10^{-19} \end{cases}$
η/m^{-1}	$\begin{cases} 1.068 \times 10^4 \frac{ \mathbf{E} }{N} \leq 1.2 \times 10^{-21} \\ N(6.089 \times 10^{-4} \frac{ \mathbf{E} }{N} - 2.893 \times 10^{-23}) + \\ N^2 [3.7986 \times 10^{-74} (\frac{ \mathbf{E} }{N})^{-1.2749}] & 1.2 \times 10^{-21} < \frac{ \mathbf{E} }{N} < 1.05 \times 10^{-19} \\ N(8.889 \times 10^{-5} \frac{ \mathbf{E} }{N} + 2.567 \times 10^{-23}) + \\ N^2 [3.7986 \times 10^{-74} (\frac{ \mathbf{E} }{N})^{-1.2749}] & \frac{ \mathbf{E} }{N} \geq 1.05 \times 10^{-19} \end{cases}$
$\mu_p/[\text{m}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}]$	$2.43 \times 10^{-4} p_0/p$
$\mu_n/[\text{m}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}]$	$\begin{cases} 1.86 \times 10^{-4} p_0/p & \mathbf{E} /N \leq 5 \times 10^{-20} \\ 2.7 \times 10^{-4} p_0/p & \mathbf{E} /N > 5 \times 10^{-20} \end{cases}$
$\mu_e/[\text{m}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}]$	$\begin{cases} (6.87 \times 10^{24} \frac{ \mathbf{E} }{N} + 3.38 \times 10^2) / \mathbf{E} & \mathbf{E} /N \leq 2.6 \times 10^{-21} \\ (7.297 \times 10^{23} \frac{ \mathbf{E} }{N} + 1.63 \times 10^4) / \mathbf{E} & 2.6 \times 10^{-21} < \frac{ \mathbf{E} }{N} \leq 1 \times 10^{-20} \\ (1.03 \times 10^{24} \frac{ \mathbf{E} }{N} + 1.3 \times 10^4) / \mathbf{E} & 1 \times 10^{-20} < \frac{ \mathbf{E} }{N} \leq 2 \times 10^{-19} \\ (7.4 \times 10^{23} \frac{ \mathbf{E} }{N} + 7.6 \times 10^4) / \mathbf{E} & \frac{ \mathbf{E} }{N} > 2 \times 10^{-19} \end{cases}$
$\beta_{np}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	2×10^{-13}
$\beta_{ep}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	2×10^{-13}
$D_e/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$4.86 \times 10^{10} (\mathbf{E} /N)^{0.54069}$

的气体混合物。干空气是指不包含任何水分子的空气; 水蒸气是指空气中水分子的气态存在, 由于水分子相对分压较低, 因此可以近似看作理想气体。对于湿空气中某一放电参数的值可以通过干空气和水蒸气占湿空气的分压加权得到^[27-28], 如下:

$$\alpha = \frac{P_d}{P} \alpha_d + \frac{P_w}{P} \alpha_w \quad (6)$$

$$\eta = \frac{P_d}{P} \eta_d + \frac{P_w}{P} \eta_w \quad (7)$$

式中: P 为总的湿空气的气压; P_d 为其中干空气的分压; P_w 为其中水蒸气的分压; 下标 d、w 分别表示干空气和水蒸气中对应的放电参数, 干空气中的放电参数即为表 2 中的参数。 P 、 P_d 、 P_w 满足:

$$P = P_d + P_w \quad (8)$$

根据相对湿度的定义, 即绝对湿度与饱和湿度的比值等于湿空气中水蒸气的分压与饱和湿空气下水蒸气的分压的比值, 可计算出不同湿度下湿空气中水蒸气的分压, 进而计算出不同湿度下放电参数的值, 来体现湿度变化对放电参数的值的影响, 并以此研究环境湿度对流注放电过程的影响。

在标准大气压下, 25 °C 时, 通过查阅标准饱和蒸汽压对照表计算得到, 空气的饱和湿度为 0.023 04 kg/m³, 饱和湿空气下水蒸气的分压为 3.168 4 kPa,

可推出 25 °C 时湿空气中的放电参数表达式为:

$$\alpha = \left(1 - \frac{h}{0.023\ 04} \times \frac{3.168\ 4}{101.325}\right) \alpha_d + \left(\frac{h}{0.023\ 04} \times \frac{3.168\ 4}{101.325}\right) \alpha_w = (1 - 1.357\ 2h) \alpha_d + 1.357\ 2h \alpha_w \quad (9)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{h}{0.023\ 04} \times \frac{3.168\ 4}{101.325}\right) \eta_d + \left(\frac{h}{0.023\ 04} \times \frac{3.168\ 4}{101.325}\right) \eta_w = (1 - 1.357\ 2h) \eta_d + 1.357\ 2h \eta_w \quad (10)$$

式中: h 为湿度。

对于 α_w 、 η_w , 文中采用 Fouad 给出的关系式^[29] 进行计算:

$$\alpha_w = N \left[3.536 \times 10^{17} (|E|/N)^2 - 6.0 \times 10^{-2} \times |E|/N + 2.828 \times 10^{-21} \right] \quad (11)$$

$$\eta_w = \begin{cases} N \left[-8.841 \times 10^{13} (|E|/N)^2 - 2.50 \times 10^{-6} \times |E|/N + 6.645 \times 10^{-24} \right] & |E|/N \geq 1.09 \times 10^{-19} \\ N \left[-1.298 \times 10^{13} (|E|/N)^2 + 2.60 \times 10^{-4} \times |E|/N - 7.726 \times 10^{-24} \right] & |E|/N < 1.09 \times 10^{-19} \end{cases} \quad (12)$$

2 外部条件变化对流注放电过程的影响

2.1 气压变化对流注放电过程的影响

为了研究气压变化对流注放电过程的影响, 选取在温度为 273.15 K, 湿度为 0 的环境条件下, 分别模拟气压为 101.325、91.192 5、81.060 kPa 时的尖端缺陷流注放电过程。

2.1.1 气压变化对流注传播速度的影响

当气压发生变化时, 流注的传播速度会发生变化。图 3 为 2.85 ns 时气压为 101.325 kPa 的尖端缺陷流注放电的电场模云图。可以看到, 流注通道内部电场模较小, 电场强度最大值集中在流注头部, 故将流注头部电场强度最大值所在处沿轴线运动的速度看作流注发展传播的速度。

表 3 为不同气压下流注头部电场强度最大值所在处到达特定位置所用的时间和速度。其中 d 为流注头部电场强度最大值所在处距阴极的距离; t 为到达该位置所用的时间; v 为 $[t-0.05, t+0.05]$ ns 这一段时间内流注传播的平均速度。

根据表 3, 流注传播速度随着流注头部与阴极之间的距离的减小而增大, 且增大的幅度也随着流注头部与阴极之间的距离的减小而增大。由表 3

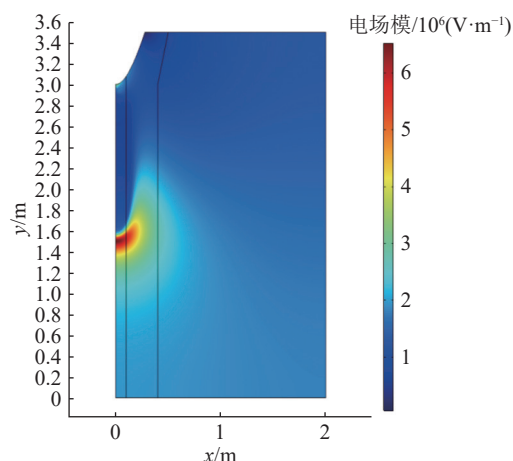


图 3 2.85 ns 时气压为 101.325 kPa 的流注放电电场模云图

Fig.3 Cloud diagram of streamer discharge electric field with a pressure of 101.325 kPa at 2.85 ns

表 3 不同气压下流注的传播速度

Table 3 The propagation speed of streamers under different atmospheric pressures

气压/ kPa	$d = 0.20$ cm		$d = 0.15$ cm		$d = 0.10$ cm		$d = 0.05$ cm	
	t /ns	$v/10^6$ ($m \cdot s^{-1}$)	t /ns	$v/10^6$ ($m \cdot s^{-1}$)	t /ns	$v/10^6$ ($m \cdot s^{-1}$)	t /ns	$v/10^6$ ($m \cdot s^{-1}$)
101.325	1.885	0.48	2.855	0.56	3.670	0.68	4.265	1.08
91.192 5	1.450	0.68	2.150	0.76	2.730	1.00	3.155	1.64
81.060	1.115	0.96	1.600	1.12	2.000	1.48	2.280	2.72

可知, 随着气压的减小, 流注传播速度逐渐加快, 这一结论与孟晓波等人的实验结果和潘梦莎的仿真结果一致^[10,30]。

影响流注传播能力的主要因素首先是电子在电场中获得的能量, 其次是电离区域中产生光电子的数量^[31]。流注传播速度随气压的降低而增大, 可能原因是气压降低导致空气中粒子浓度整体减少, 每单位距离内的粒子数减少, 导致电子与粒子之间的碰撞减少, 使得电子能够更快地向前移动。同时, 随着电子平均自由程的增大, 电子的运动速度也增加, 使其在电场中积累更多的动能。因此, 碰撞后的电子能够更快地向前移动, 加大了电子对空间电场的畸变作用, 进而改变电场的分布, 加快流注传播速度。与此同时, 光电离受气压变化的影响较小, 从而加快了流注的传播速度。

2.1.2 气压变化对电场强度大小的影响

流注头部的高电场强度是流注维持自身发展的关键。当气压发生变化时, 流注的电场强度也会发生改变。图 4、图 5、图 6 分别为气压 101.325、91.192 5、81.060 kPa 时流注头部电场强度最大值所在处到达距阴极 2.0、1.5、1.0、0.5 mm 处时轴线处

的电场强度分布, 电场强度最大值标注在图中, 单位为V/m, 数量级为 10^6 。

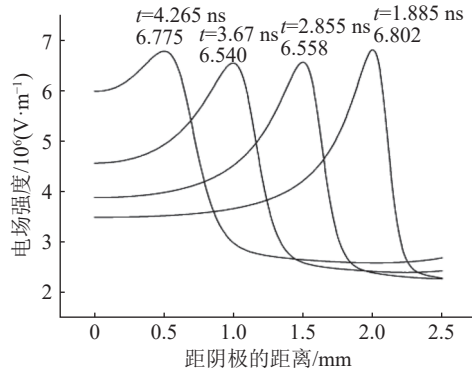


图4 101.325 kPa 时流注头部到达特定位置时电场强度分布

Fig.4 Electric field intensity distribution when the streamer head reaches a specific position at 101.325 kPa

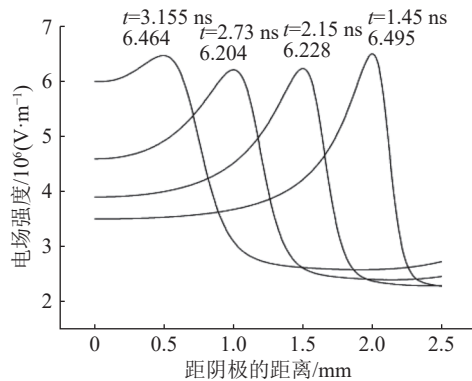


图5 91.1925 kPa 时流注头部到达特定位置时电场强度分布

Fig.5 Electric field intensity distribution when the streamer head reaches a specific position at 91.1925 kPa

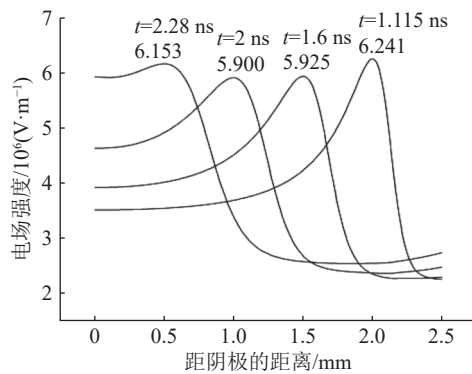


图6 81.060 kPa 时流注头部到达特定位置时电场强度分布

Fig.6 Electric field intensity distribution when the streamer head reaches a specific position at 81.060 kPa

由图4—图6可知, 流注头部电场强度最大值随着与阴极的距离的缩小而先减小后增大, 且随着气压的减小, 流注头部电场强度最大值略微下降。原因可能是随着气压的降低, 空气中的粒子浓度减少, 单位体积内的粒子减少, 导致流注周围的电离

区域中粒子数量减少, 而电场是由周围的带电粒子产生的, 故粒子数量减少会导致电场强度减小。

2.1.3 气压变化对光强度大小的影响

当气压发生变化时, 流注的光强度也会发生改变。碰撞电离时, 气体原子中的电子跃迁会释放光子辐射, 因此光强度可以看作是放电过程中电离程度的指示器。光强度的数值与电离的剧烈程度成正比, 计算如式(13)所示^[26]。光强度的值的变化, 可以反映不同气压条件下流注的电离程度的不同。

$$I_{\text{light}} = N_e \alpha |\mu_e E| \quad (13)$$

图7、图8、图9分别为气压 101.325、91.1925、81.060 kPa 时流注头部光强度最大值所在处到达距阴极 2.0、1.5、1.0、0.5 mm 处时轴线处的光强度分布图, 光强度最大值标注在图中, 单位为 m^{-3}/s , 数量级为 10^{28} 。

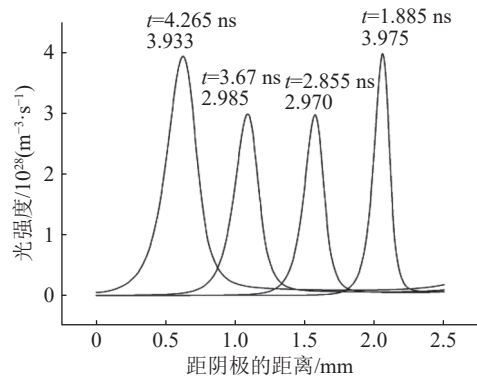


图7 101.325 kPa 时流注头部到达特定位置时光强度分布
Fig.7 Light intensity distribution when the streamer head reaches a specific position at 101.325 kPa

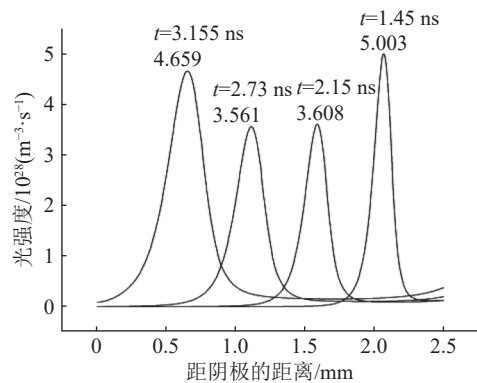


图8 91.1925 kPa 时流注头部到达特定位置时光强度分布

Fig.8 Light intensity distribution when the streamer head reaches a specific position at 91.1925 kPa

由图7—图9可知, 光强度的最大值随着流注向前推进而先减小后增大, 可见在阴极和阳极附近电离程度会增大。同时, 随着气压的减小, 光强度的最大值会增大, 且阳极附近增大的幅度要大于阴极附近增大的幅度, 可见气压的降低加剧了流注放

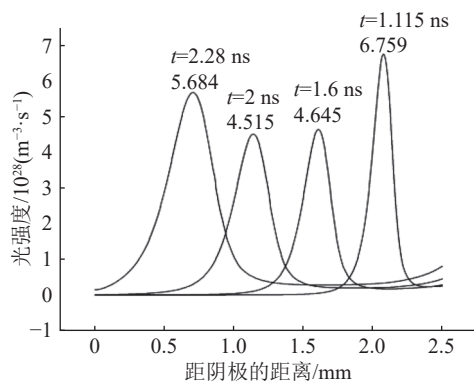


图9 81.060 kPa 时流注头部到达特定位置时光强度分布
Fig.9 Light intensity distribution when the streamer head reaches a specific position at 81.060 kPa

电过程的电离程度。原因可能是在较高的气压下, 气体分子之间的碰撞频率会增加, 这些碰撞会降低放电过程中的自由电子能量, 从而减少电离的可能性。当气压下降时, 碰撞的频率减少, 自由电子能够保持更高的能量, 因此更容易与其他分子发生碰撞并引起电离, 导致电离程度加剧。

2.1.4 气压变化的影响总结

气压变化对流注放电过程的影响可总结为表4。

表4 气压降低对流注放电过程的影响
Table 4 The effect of pressure reduction on streamer discharge process

流注参数	变化情况
流注传播速度	加快
流注头部电场强度	下降
流注头部电离程度	加剧

2.2 湿度变化对流注放电过程的影响

为了研究湿度变化对流注放电过程的影响, 选取在温度为 298.15 K, 气压为 101.325 kPa 的环境条件下, 分别模拟湿度为 0、3.04、13.04 g/m³ 时的尖端缺陷流注放电过程。

2.2.1 湿度变化对流注传播速度的影响

当湿度发生变化时, 流注传播速度会发生改变。表5为不同湿度下流注头部电场强度最大值所在处到达特定位置所用的时间和速度。

表5 不同湿度下流注的传播速度
Table 5 The propagation speed of streamers under different humidity

湿度/ (g·m ⁻³)	d=0.20 cm		d=0.15 cm		d=0.10 cm		d=0.05 cm	
	t/ns	v/10 ⁶ (m·s ⁻¹)	t/ns	v/10 ⁶ (m·s ⁻¹)	t/ns	v/10 ⁶ (m·s ⁻¹)	t/ns	v/10 ⁶ (m·s ⁻¹)
0	1.490	0.64	2.215	0.72	2.825	0.92	3.265	1.52
3.04	1.420	0.68	2.115	0.80	2.700	1.00	3.120	1.60
13.04	1.210	0.76	1.825	0.88	2.335	1.12	2.710	1.80

根据表5, 流注传播速度随着d的减小而增大, 且增大的幅度也随着d的减小而增大。由表5可知, 随着湿度的增大, 流注的传播速度逐渐加快。这一结论与赵一帆的研究结论相同^[32], 但与惠建峰等人的研究结论相反^[33]。之所以会出现2种相反的结论, 是因为在研究过程中所设置的电场强度的大小不同。水分子对电子存在2种作用, 一种是与电子结合吸附形成负离子, 另一种是与电子发生碰撞电离, 前者会降低电子的空间密度, 减慢流注的传播速度, 后者会导致更多的自由电子出现, 增大电离程度, 加快流注的传播速度^[31]。随着电场强度的增大, 电子的移动速度也会逐渐加快, 面对速度越来越快的电子, 水分子很难再吸附电子, 相对地, 与电子的碰撞作用正在增强。由于水蒸气的碰撞电离系数比干空气大, 所以随着湿度的增加, 碰撞电离的作用越强, 从而产生更多的自由电子, 导致放电电流增大, 流注传播速度加快。

图10、图11分别为不同电场下不同湿度对应的碰撞电离系数和附着系数。可见, 在不同场强下, 碰撞电离系数始终随着相对湿度的增大而增大; 在较低场强下, 附着系数随着相对湿度的增大而增大; 在较高场强下, 附着系数随着相对湿度的增大而减小。放电参数的具体计算公式见1.2节。

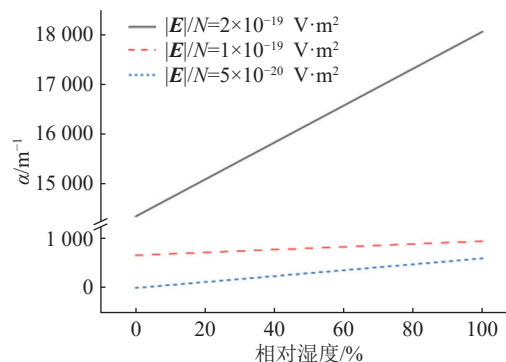


图10 不同电场下不同湿度对应的碰撞电离系数
Fig.10 Collision ionization coefficients corresponding to different humidity under different electric fields

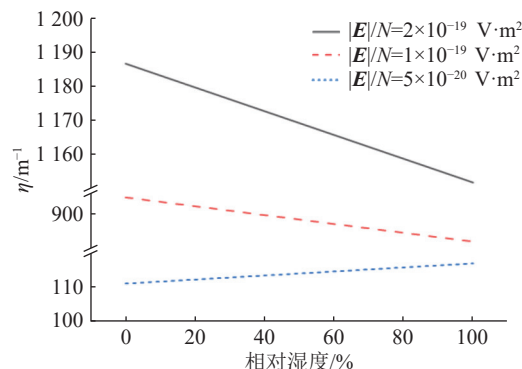


图11 不同电场下不同湿度对应的附着系数
Fig.11 Adsorption coefficients corresponding to different electric fields and humidity

经模型调试,发现阳极电势设为 5 kV 左右时,开始无法形成完整的流注,故将阳极电势设定为 5.5 kV,观测较低电场强度下流注发展速度随湿度变化的规律,结果如表 6 所示。表 6 为不同湿度下流注头部电场强度最大值所在处到达距阴极 1 mm 处所用的时间和速度,其中 v 为 $(t - 0.18, t + 0.18)$ ns 这一段时间内流注传播的平均速度。

表 6 较低电场强度下不同湿度下流注的传播速度
Table 6 The propagation speed of steamer under different humidity conditions under low electric field intensity

湿度/($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	t/ns	$v/10^5(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
0	29.64	1.00
3.04	27.66	1.05
13.04	23.31	1.11

由表 6 可知,随着湿度的增大,流注的传播速度逐渐加快。图 12 为阳极电势设定为 5.5 kV 时流注头部电场强度最大值所在处到达距阴极 1 mm 处时轴线处的附着系数大小。由图 12 可知,此时附着系数仍随着湿度增大而减小,可见此时的电场强度仍属于附着系数会随相对湿度的增大而减小的强电场的范畴。

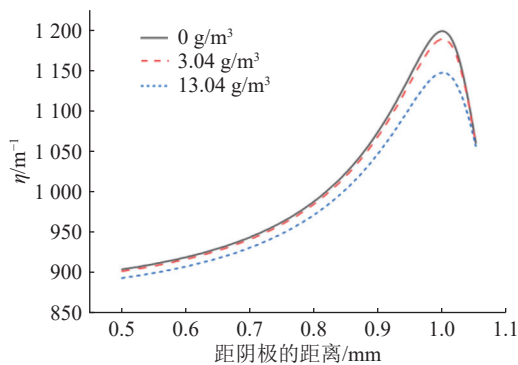


图 12 流注到达距阴极 1 mm 处时轴线处的附着系数
Fig.12 The adsorption coefficient at the axis when the steamer reaches a distance of 1 mm from the cathode

经文献查阅,孟晓波^[10]、惠建峰^[33]、董曼玲^[34]等人所得出的“湿度越大,流注传播速度越慢”的结论,均是根据在均匀电场中的实验或仿真结果得出,且此处的传播速度指的是平均速度,即放电间隙的距离除以流注发生的时间。其中,孟晓波使用的仿真模型为三电极模型,如图 13 所示,上下极之间的距离为 8 cm,下极板施加负直流电压 30 kV,上极板接地,极板之间形成一个近似均匀的电场。一根钢针位于上极板中心的圆孔处,针尖高于上极板平面 0.9 mm,并与上极板之间绝缘。针尖会使平行极板的电场发生畸变,但其对电场的影响随着距离的增加衰减很快,经过很小一段距离(约 1 cm)之后

影响可以忽略。

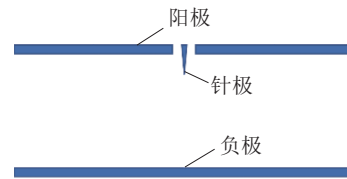


图 13 简化三电极结构

Fig.13 Simplified three-electrode arrangement

孟晓波记录了流注传播的实时速度,在流注传播的初始阶段,还未脱离针尖不均匀电场时,流注传播速度随湿度的增大而增大,而在脱离畸变电场之后,流注传播速度随湿度的增大而减小^[10],最终导致流注的平均传播速度随湿度的增大而减小。因此可以推论,文中模型之所以无法验证低电场强度下流注传播速度随湿度增大而减小的结论,可能是因为间隙距离过小,始终处在针尖的不均匀电场范围内,导致电场强度过大。之后可以搭建类似图 13 结构的长间隙仿真模型,通过在极板间施加不同大小的电场强度来验证电场强度大小不同对湿度影响流注传播速度的规律的影响。

2.2.2 湿度变化对电场强度的影响

图 14、图 15、图 16 分别为湿度 0、3.04、13.04 g/m^3 时流注头部电场强度最大值所在处到达距阴极 2.0、1.5、1.0、0.5 mm 处时轴线处的电场强度分布图,电场强度最大值标注在图中,单位为 V/m ,数量级为 10^6 。

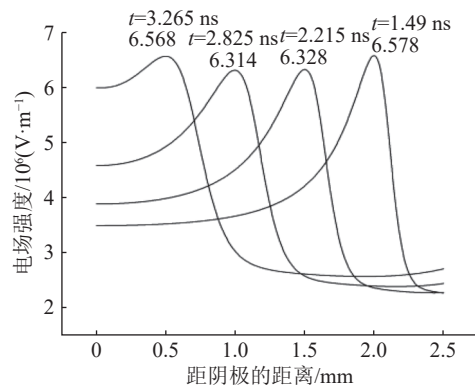


图 14 0 g/m^3 时流注头部到达特定位置时电场强度分布
Fig.14 Electric field intensity distribution when the steamer head reaches a specific position at 0 g/m^3

由图 14—图 16 可知,流注头部电场强度最大值随着与阴极的距离的缩小而先减小后增大,且随着湿度的增大,流注头部电场强度最大值有较小的下降,可以说湿度变化对流注的电场强度大小的影响不大。

2.2.3 湿度变化对光强度的影响

图 17、图 18、图 19 分别为湿度 0、3.04、13.04

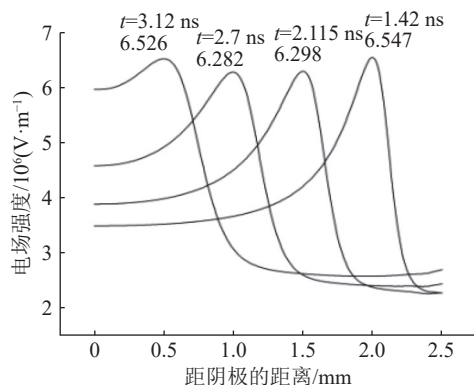


图 15 3.04 g/m³ 时流注头部到达特定位置时电场强度分布
Fig.15 Electric field intensity distribution when the streamer head reaches a specific position at 3.04 g/m³

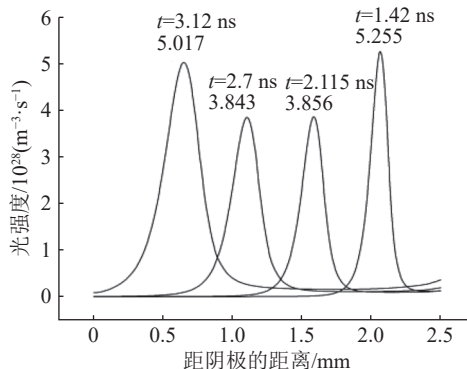


图 18 3.04 g/m³ 时流注头部到达特定位置时光强度分布
Fig.18 Light intensity distribution when the streamer head reaches a specific position at 3.04 g/m³

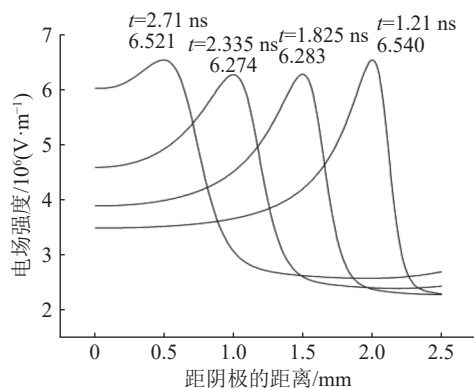


图 16 13.04 g/m³ 时流注头部到达特定位置时电场强度分布

Fig.16 Electric field intensity distribution when the streamer head reaches a specific position at 13.04 g/m³

g/m³时流注头部电场强度最大值所在处到达距阴极 2.0、1.5、1.0、0.5 mm 处时轴线处的光强度分布图,光强度最大值标注在图中,单位为 m⁻³/s,数量级为 10²⁸。

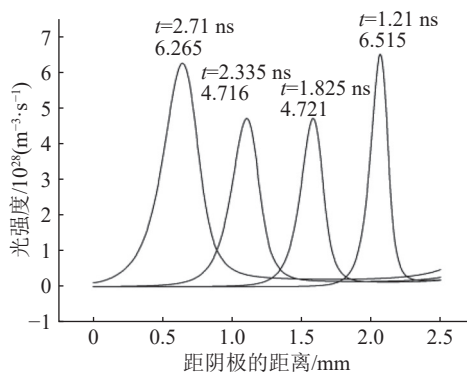


图 19 13.04 g/m³ 时流注头部到达特定位置时光强度分布
Fig.19 Light intensity distribution when the streamer head reaches a specific position at 13.04 g/m³

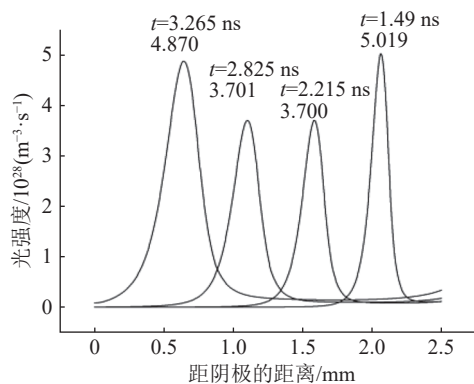


图 17 0 g/m³ 时流注头部到达特定位置时光强度分布
Fig.17 Light intensity distribution when the streamer head reaches a specific position at 0 g/m³

由图 17—图 19 可知,光强度的最大值随着流注向前推进而先减小后增大,可见在阴极和阳极附近电离程度会增大。同时,随着湿度的增大,光强

度的最大值会增大,可见湿度的增加加剧了流注放电过程的电离程度。原因可能是湿度增加时,空气中的水分子数量增多,导致水分子与自由电子之间发生相互作用。在这种情况下,水分子可以吸附在自由电子附近,形成水合离子或离子复合物。水分子的吸附作用会在一定程度上降低自由电子的运动速度,使其更容易被捕获形成负离子,让流注的有效电离度受到影响,电子密度减小。但是湿度增加就意味着空气中的水分子密度增大,也就意味着电子与水分子碰撞的机会增加。在较高湿度下,水分子与自由电子发生碰撞时,水分子能够吸收电子的能量,从而激发水分子内部的电子,使其变成带正电的离子。由于湿空气中含有水蒸气,碰撞电离系数要大于干燥空气中的碰撞电离系数,所以在较高湿度下,碰撞电离的作用变得更加显著。更多的水分子与电子碰撞并发生电离,产生更多的自由电子。在电场强度较大的背景下,电子的迁移速度较快,水分子对电子的捕获作用会被削弱,碰撞电离的影响会大于吸附作用。因此,湿度增加会促进水分子与电子的碰撞电离作用,进而增加流注的电离程度。

2.2.4 湿度变化的影响总结

湿度变化对流注放电过程的影响可总结为表7。

表7 湿度升高对流注放电过程的影响

Table 7 The effect of elevated humidity on streamer discharge process

流注参数	变化情况
流注传播速度	加快
流注头部电场强度	几乎不变
流注头部电离程度	加剧

3 结论

文中使用 COMSOL 有限元仿真软件, 通过流体动力学模型, 建立二维轴对称的针-板放电仿真模型, 模拟空气中尖端缺陷的流注放电过程, 并使用控制变量法, 以流体动力学模型为基础, 通过改变放电参数来改变放电过程中的气压、湿度等外部条件, 最终通过该模型观察流注的传播速度、轴线处的电场强度、光强度等参数的变化来观察外界条件变化对放电过程的影响。主要结论如下:

(1) 气压下降会使流注的传播速度加快, 流注头部电场强度最大值略有下降, 流注光强度上升, 即气压下降会加剧流注放电的电离程度。以流注头部距离阴极 1.5 mm 为例, 气压由 101.325 kPa 下降至 81.060 kPa, 会导致流注的传播速度加快 0.56×10^6 m/s, 头部电场强度减少 0.633×10^6 V/m, 头部光强度增加 1.675×10^{28} m⁻³/s;

(2) 湿度升高会使流注的传播速度加快, 对流注头部电场强度最大值的影响不大, 会使流注光强度上升, 即湿度升高会加剧流注放电的电离程度。以流注头部距离阴极 1.5 mm 为例, 湿度由 3.04 g/m³ 上升至 13.04 g/m³, 会导致流注的传播速度加快 0.08×10^6 m/s, 头部电场强度减少 0.015×10^6 V/m, 头部光强度增加 0.865×10^{28} m⁻³/s。

致谢

本文得到内蒙古电力(集团)有限责任公司科技项目“基于知识图谱的变电主设备状态评估关键技术”资助, 谨此致谢!

参考文献:

- [1] 王世玮. GIS 典型缺陷的局部放电特性研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.
WANG Shiwei. Study on partial discharge characteristics of typical defects in GIS[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2022.
- [2] HETTIWATTE S N, WANG Z D, CROSSLEY P A. Investigation of propagation of partial discharges in power transformers

and techniques for locating the discharge[J]. *IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 2005, 152(1): 25-30.

- [3] 严家明, 周一恒, 陈奎, 等. 重复脉冲电压下油纸的局部放电损伤对其电气性能影响的实验研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(12): 176-184.
YAN Jiaming, ZHOU Yiheng, CHEN Kui, et al. Experimental study on influence of oil-immersed paper damage caused by partial discharge on its electrical performance under repetitive pulse voltage[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(12): 176-184.
- [4] 倪鹤立, 傅晨钊, 刘家好, 等. 直流电压下油纸绝缘局部放电数值仿真研究述评[J]. *高压电器*, 2023, 59(10): 1-20, 29.
NI Heli, FU Chenzhao, LIU Jiayu, et al. Review on numerical simulation of partial discharge in oil-paper insulation under DC voltage[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(10): 1-20, 29.
- [5] 周晨辉, 金玉琪, 穆海宝, 等. 基于宽频等值电路的变压器局部放电电气定位研究[J]. *浙江电力*, 2023, 42(12): 3-11.
ZHOU Chenhui, JIN Yuqi, MU Haibao, et al. Research on localization of partial discharges in transformers based on wideband equivalent circuit[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2023, 42(12): 3-11.
- [6] 霍鹏, 李锐鹏, 张子骁, 等. 基于脉冲同步的配电网局部放电在线监测及定位方法[J]. *高压电器*, 2024, 60(8): 129-138.
HUO Peng, LI Ruipeng, ZHANG Zixiao, et al. Online monitoring and location method of partial discharge of distribution cable based on pulse synchronization[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(8): 129-138.
- [7] 相晨萌, 高树国, 刘宏亮, 等. 基于宽频振动传感器的电力设备状态监测方法可行性分析[J]. *高压电器*, 2024, 60(4): 83-91.
XIANG Chenmeng, GAO Shuguo, LIU Hongliang, et al. Feasibility analysis of power equipment condition monitoring method based on broadband vibration sensor[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(4): 83-91.
- [8] 张钊棋, 宋辉, 代杰杰, 等. 大气压下温度对针板空气间隙流注放电影响的仿真研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(8): 2929-2939.
ZHANG Zhaoqi, SONG Hui, DAI Jiejie, et al. Simulation research on the influences of temperature on streamer discharge of the needle plate air gap at atmospheric pressure[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(8): 2929-2939.
- [9] 陆怡冰, 李峰, 周游, 等. 雷电冲击电压下气制变压器油中流注放电发展机理研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(12): 130-137.
LU Yibing, LI Feng, ZHOU You, et al. Study on the streamer-discharge development mechanism in gas-made transformer oil under lightning impulse voltage[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(12): 130-137.
- [10] 孟晓波, 惠建峰, 卞星明, 等. 低气压下流注放电特性的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(25): 139-149.
MENG Xiaobo, HUI Jianfeng, BIAN Xingming, et al. Research on the characteristic of streamer discharge at low air pressure[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(25): 139-149.

- [11] ROBLEDO-MARTINEZ A. Characteristics of DC corona discharge in humid, reduced-density air[J]. *Journal of Electrostatics*, 1993, 29(2): 101-111.
- [12] PHELPS C T, GRIFFITHS R F. Dependence of positive corona streamer propagation on air pressure and water vapor content[J]. 1976, 47(7): 2929-2934.
- [13] 卞星明, 惠建峰, 黄海鲲, 等. 气压湿度对负直流电晕特性影响的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(4): 118-124.
BIAN Xingming, HUI Jianfeng, HUANG Haikun, et al. Effects of air pressure and humidity on the characteristics of negative DC corona[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(4): 118-124.
- [14] 惠建峰, 关志成, 王黎明, 等. 正直流电晕特性随气压和湿度变化的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(33): 53-58.
HUI Jianfeng, GUAN Zhicheng, WANG Liming, et al. Research on variation of positive DC corona characteristics with air pressure and humidity[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(33): 53-58.
- [15] DAVIES A J, DAVIES C S, EVANS C J. Computer simulation of rapidly developing gaseous discharges[J]. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1971, 118(6): 816.
- [16] 李晓冉, 张雅琪, 郭雨林, 等. 空气中沿面流注放电表面电荷分布特性的仿真研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(9): 84-89.
LI Xiaoran, ZHANG Yaqi, GUO Yulin, et al. Simulation study on surface charge distribution characteristics of surface discharges in air[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(9): 84-89.
- [17] 雷月. 基于针-板模型等离子体电晕放电的电磁特性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
LEI Yue. Study on electromagnetic characteristics of plasma corona discharge based on needle-plate model[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.
- [18] 支珊. 短间隙空气流注放电数值模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
ZHI Shan. Numerical simulation of short gap air jet discharge[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [19] 刘洪顺, 薛志通, 李斯盟, 等. 交直流复合电压下换流变绝缘纸板凹陷放电特性的模拟研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(18): 6461-6472.
LIU Hongshun, XUE Zhitong, LI Simeng, et al. Simulation research on the discharge characteristics of converter transformer paperboard depression under composite AC-DC voltage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(18): 6461-6472.
- [20] 何东欣, 巩文洁, 刘洪顺, 等. 直流电场下油纸绝缘楔形油隙局部放电仿真研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(16): 5779-5789.
HE Dongxin, GONG Wenjie, LIU Hongshun, et al. Simulation study on partial discharge of oil-paper insulated in wedge-shaped oil gaps under DC electric field[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(16): 5779-5789.
- [21] 王宗祥. 水中高压纳秒脉冲放电流注特性数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
WANG Zongxiang. Numerical simulation study on streamer characteristics of high voltage nanosecond pulse discharge in water[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [22] 张家源. 典型局部放电过程流体动力学仿真与放电脉冲特性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
ZHANG Jiayuan. Hydrodynamic simulation of typical partial discharge process and analysis of discharge pulse characteristics[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [23] 徐乐平. 空气针-板正负电晕微观放电机理仿真研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
XU Leping. Simulation study on micro-discharge mechanism of positive and negative corona of air needle-plate[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [24] GEORGHIOU G E, PAPADAKIS A P, MORROW R, et al. Numerical modelling of atmospheric pressure gas discharges leading to plasma production[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, 38(20): R303-R328.
- [25] 臧奕茗, 钱勇, 刘伟, 等. C_4F_7N/CO_2 混合气体中尖端缺陷的流注放电仿真研究[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(1): 34-42.
ZANG Yiming, QIAN Yong, LIU Wei, et al. Simulation study on streamer of tip defects in C_4F_7N/CO_2 mixed gas[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(1): 34-42.
- [26] MORROW R, LOWKE J J. Streamer propagation in air[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1997, 30(4): 614-627.
- [27] ABDEL-SALAM M. Positive wire-to-plane coronas as influenced by atmospheric humidity[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1985, IA-21(1): 35-40.
- [28] 卞星明, 惠建峰, 黄海鲲, 等. 负直流电晕流注脉冲特性随气压和湿度变化的规律[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(10): 134-142.
BIAN Xingming, HUI Jianfeng, HUANG Haikun, et al. Variation of the characteristics of negative DC corona streamer pulse with air pressure and humidity[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(10): 134-142.
- [29] FOUAD L, ELHAZEK S. Effect of humidity on positive corona discharge in a three electrode system[J]. *Journal of Electrostatics*, 1995, 35(1): 21-30.
- [30] 潘梦莎. 低气压下流注放电的仿真研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
PAN Mengsha. Simulation study on streamer discharge at low pressure[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [31] 潘梦莎, 吕玉祥, 王启银, 等. 低气压下短空气间隙流注放电的仿真[J]. *数学的实践与认识*, 2015, 45(7): 156-162.
PAN Mengsha, LV Yuxiang, WANG Qiyin, et al. Simulation on streamer discharge of a short air gap at low air pressure[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2015, 45(7): 156-162.
- [32] 赵一帆. GIS 中金属尖端及微水微氧对流注放电的影响研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.
ZHAO Yifan. Study on the influence of metal tip and micro-water and micro-oxygen on streamer discharge in GIS[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020.
- [33] 惠建峰, 关志成, 王黎明, 等. 正流注传播动力学特性随气压湿度的变化[J]. *高电压技术*, 2007, 33(6): 55-58.

HUI Jianfeng, GUAN Zhicheng, WANG Liming, et al. Variation of propagation dynamics of positive streamer with pressure and humidity[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(6): 55-58.

[34] 董曼玲. 直流条件下厘米级间隙流注特性数值仿真及实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.

DONG Manling. Numerical simulation and experimental study on the characteristics of centimeter-level gap streamer under DC condition[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

作者简介:



田晓云

田晓云(1979), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事高电压与绝缘技术、电气设备状态检测诊断工作(E-mail: yedallhunter@163.com);

翟春雨(1978), 男, 硕士, 高级工程师, 从事输变电设备运检管理工作;

岳永刚(1979), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事变电设备运检管理工作。

Simulation on streamer discharge process under changes in air pressure and humidity

TIAN Xiaoyun¹, DI Chunyu¹, YUE Yonggang¹, ZHANG Deqiang¹, ZHAO Qin¹, SONG Hui²

(1. Inner Mongolia Ultra High Voltage Power Supply Branch, Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010080, China; 2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201100, China)

Abstract: Partial discharge poses a serious threat to the insulation performance of electrical equipment, with streamer discharge being the main form of gas discharge in high-voltage fields and a key issue in the study of gas gap discharge. Due to the influence of external factors such as humidity and air pressure during the operation of electrical equipment, studying the effects of different external conditions on insulation defect discharge is of great significance for the design and operation of transmission lines and substations in high-altitude (low-pressure) and high-humidity areas. The current research status of the impact of external conditions on the discharge process at home and abroad is analyzed in this paper. Based on the fluid dynamics model, a simulation model of streamer discharge at sharp defects is established in the COMSOL environment. Using this model, the influence of external conditions on the streamer discharge process of sharp defects with a gap distance of 3 mm is studied. The research results indicate that a decrease in air pressure accelerates the propagation speed of the streamer, slightly reduces the maximum electric field intensity at the streamer head, and exacerbates the ionization degree of the streamer discharge. An increase in humidity accelerates the propagation speed of the streamer, with little impact on the maximum electric field intensity at the streamer head but exacerbates the ionization degree of the streamer discharge. Taking the example of a streamer head distance of 1.5 mm from the cathode, a decrease in air pressure from 101.325 kPa to 81.060 kPa results in an acceleration of streamer propagation speed by 0.56×10^6 m/s, a decrease in head electric field intensity by 0.633×10^6 V/m, and an increase in head luminosity by 1.675×10^{28} m⁻³/s. An increase in humidity from 3.04 g/m³ to 13.04 g/m³ results in an acceleration of streamer propagation speed by 0.08×10^6 m/s, a decrease in head electric field intensity by 0.015×10^6 V/m, and an increase in head luminosity by 0.865×10^{28} m⁻³/s.

Keywords: partial discharge; stream discharge; tip defects; fluid dynamics model; air pressure; humidity

(编辑 方晶)