

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.01.008

基于磁流体动力学的 35 kV 自脱离防雷装置灭弧仿真

谢从珍¹, 李彦丞¹, 杜岩¹, 谢心昊¹, 谢锡汉², 陈锡阳³

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 广东电网有限责任公司湛江供电局, 广东 湛江 524000; 3. 深圳带路科技有限公司, 广东 深圳 518027)

摘要:为研究影响基于气吹灭弧原理的自脱离防雷装置灭弧的影响因素,文中基于磁流体动力学理论建立装置灭弧过程的数值仿真模型,研究电流初始相角与装置气流速度峰值对装置熄弧性能的影响,并结合大电流燃弧试验验证模型有效性。研究表明,自脱离防雷装置灭弧时间与工频电流初始相角密切相关,在 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 电角度区间内,电弧熄灭所需时间随工频电流初始相角的增大而减小。装置气流速度峰值对电弧熄灭具有决定性作用。当灭弧气流速度峰值高于 243 m/s 时,装置可在半个工频周期内有效熄灭电弧并防止重燃;灭弧气流速度峰值低于 243 m/s 时,在装置产气灭弧筒出口处将出现“电弧堵塞”现象导致电弧重燃。研究结论可为气吹防雷装置灭弧性能优化提供理论依据。

关键词:雷电;热等离子体;磁流体动力学;电弧;灭弧装置;输电线路

中图分类号: TM85

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)01-0061-09

0 引言

雷电是造成电网跳闸的重要原因之一。据统计,我国输电线路的雷击跳闸事故次数约占跳闸事故总次数的 $70\%\sim 80\%$ ^[1-3]。近年来,为降低配电线路的雷击跳闸事故概率,加装气吹灭弧组件的并联间隙在输电线路中被投入使用^[4-6]。线路遭受雷击时,装置电极间的空气间隙被击穿,装置产生高速气流降低电弧通道温度,使电弧熄灭并防止重燃。王巨丰等开发一种固相爆炸气流灭弧装置^[7-9],该装置利用炸药在产气筒内产生高速气流使电弧熄灭,在实际工程中也取得良好的效果。Podporkin等研制一种多灭弧腔室防雷装置^[10],该装置基于多腔室吹弧原理,利用电弧自身产生的热量加热腔室气体,使管内空气温度与压强升高将电弧从腔室内吹出。上述2种装置均存在结构复杂、生产成本高的问题^[11]。

气吹式灭弧装置的灭弧性能验证通常采用大电流燃弧试验的方式,但该试验电流幅值达千安级,试验成本较高。仿真计算的方式可降低试验成本并深入解释灭弧机理。韩力等基于Mayr电弧模型与固相爆炸气流的机理对灭弧过程进行分析,得到装置电弧的黑盒模型^[9,12]。郭婷等利用Fluent对多腔室灭弧装置单腔室进行建模,模拟腔室内电弧等离子体的动态特性,得出影响电弧等离子体运动的主要因素为洛伦兹力^[13-14]。黄嘉曦等利用有限元仿真对固相爆炸气流装置灭弧筒内电弧冷却熄

灭的过程进行计算并利用试验验证模型准确性,得到电弧重燃抑制理论^[15-16]。然而以上研究未对间隙内气吹电弧的物理特性、电弧熄灭影响因素以及电弧端口电流电压的特性进行研究。

文中基于磁流体动力学理论利用有限元仿真软件建立新型35 kV自脱离防雷装置的灭弧过程仿真模型,得到不同初始条件下装置灭弧过程中电弧等离子体的温度分布与电导分布,确定工频电流初始相角、装置气流速度峰值对电弧熄灭的影响,最后利用大电流熄弧试验对有限元模型的准确性与装置灭弧能力进行验证。

1 自脱离防雷装置结构与动作原理

一种用于35 kV线路的新型自脱离防雷装置如图1所示。该装置由产气灭弧筒及空气间隙组成,并可以根据输电线路的实际情况在导线侧选择安装电极。产气灭弧筒内壁附着高分子有机材料,其受热后将燃烧产生大量气体,产气灭弧筒下端由金属端盖封闭。端盖与装置上电极之间使用熔丝连接。装置采用分体式安装,可通过安装支架控制装置与输电导线之间的空气间隙距离。

装置原理如图2所示,雷击线路时,由于装置的空气间隙较线路绝缘子的绝缘距离短,空气间隙更易被雷电过电压击穿,电弧通道将被固定至装置两端^[17]。电弧产生大量焦耳热引起装置灭弧筒内壁的产气材料剧烈燃烧,并在筒内形成高压冲破灭弧筒下方出口处的端盖。向筒外喷出的高速气流将增加电弧的对流传热功率,电弧的焦耳热功率与

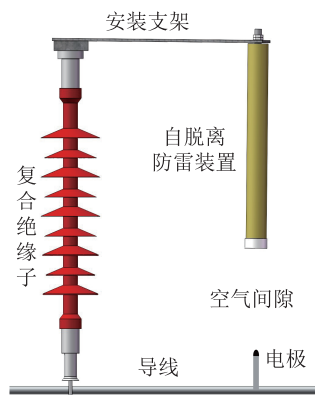


图1 自脱离防雷装置示意

Fig.1 Schematic of self-disengaging arcing lightning protection device

电弧能量耗散功率形成竞争关系^[18-19]。当焦耳热功率大于电弧耗散功率时,电弧温度逐渐升高;当焦耳热功率小于电弧耗散功率时,电弧温度下降,并最终熄灭。自脱离防雷装置设计参数如表1所示。

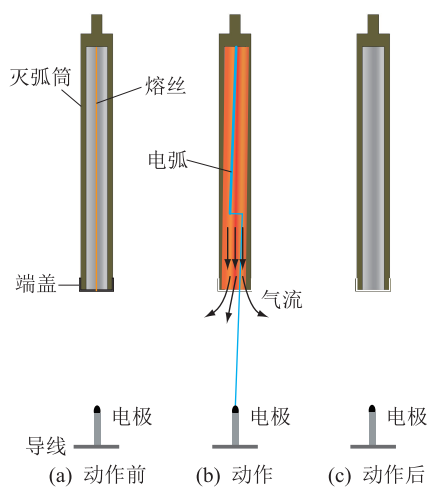


图2 自脱离防雷装置原理

Fig.2 Principle of self-disengaging arcing lightning protection device

表1 自脱离防雷装置设计参数

Table 1 Self-disengaging arcing lightning protection device design parameters

项目	参数
装置长度/mm	600
装置灭弧筒内径/mm	40
装置灭弧筒外径/mm	60
空气间隙距离/mm	400
引弧材料	铜丝
引弧材料直径/mm	0.2
产气材料	尼龙66
灭弧筒材料	玻璃钢
设计最大气流速度/(m·s ⁻¹)	400

2 模型描述

电弧燃烧是一个复杂的物理过程,该过程中电磁场、热场、流场相互耦合并影响电弧的物性参数,各物理场之间的耦合关系如图3所示。因此,文中建立磁流体动力学模型来描述电弧燃烧与熄灭过程的动态特性,并探究气流速度峰值、电流初始相位对电弧熄灭的影响。

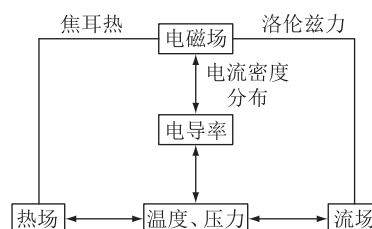


图3 电弧中多物理场耦合关系

Fig.3 Multi-physics coupling relationship of arc

由于装置灭弧筒中燃烧产气过程难以进行仿真模拟,文中对仿真模型进行合理假设及简化如下:(1)装置试验中,电弧未与高速气流混合形成湍流等离子体,假定电弧等离子体的流体特性为层流;(2)电弧等离子体处于局部热力学平衡状态(local thermodynamic equilibrium, LTE);(3)采用气流速度函数模拟装置的产气过程^[15],气流速度曲线如图4所示;(4)电弧等离子体为空气电弧,其密度、比热容、电导率、总体积净辐射系数为温度的单一变量函数,各参数来源于文献[20-21],各参数变化如图5所示;(5)不考虑重力的影响;(6)忽略电弧的初始发展阶段,设定仿真开始时电弧已稳定燃烧^[22]。

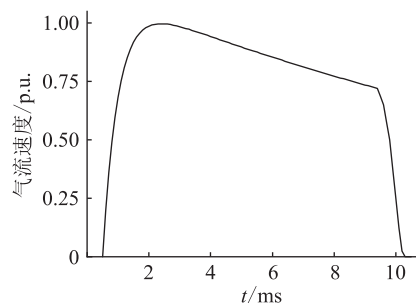


图4 装置气流速度波形

Fig.4 Device airflow velocity waveform

基于磁流体动力学理论及上述假设,文中建立如下的质量守恒方程、能量平衡方程、动量守恒方程、麦克斯韦方程方程构成二维情况下的自脱离灭弧装置灭弧过程仿真模型的控制方程组。

(1) 质量守恒方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

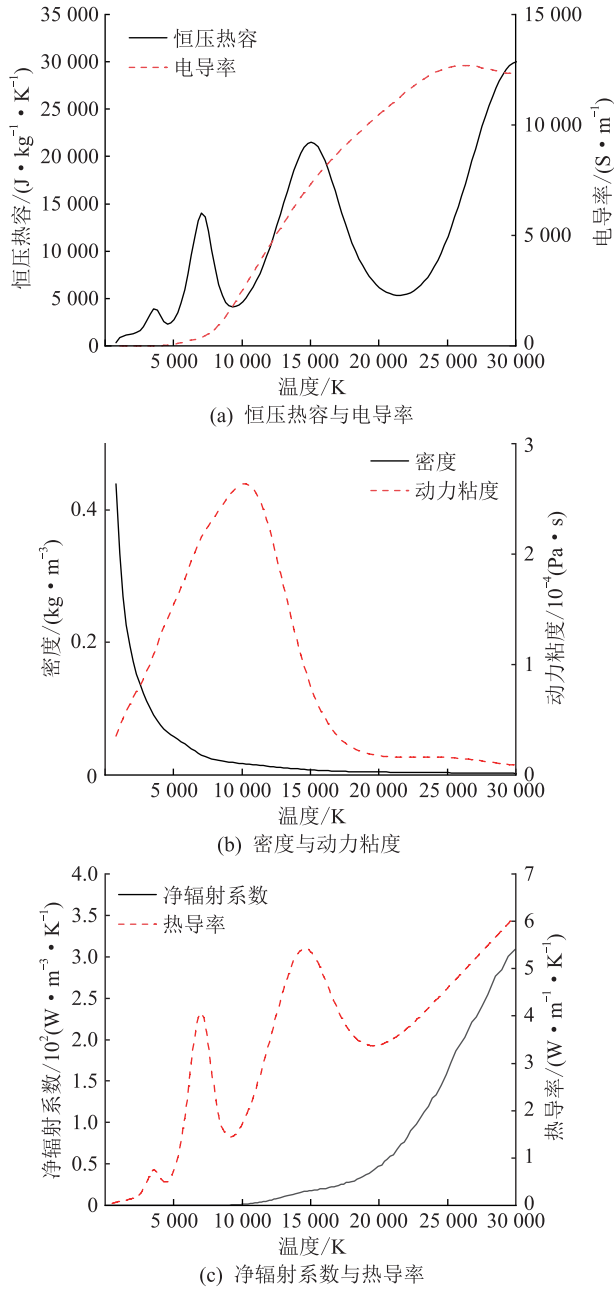


图5 物性参数随温度的变化

Fig.5 Relationship between physical parameters and temperature

式中: ρ 为密度; \mathbf{v} 为速度矢量; t 为时间。

(2) 能量守恒方程。

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (2)$$

$$Q = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{5k_B T}{2e} \right) (\nabla T \cdot \mathbf{J}) + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} - Q_{\text{rad}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{rad}} = 4\pi \varepsilon_n \quad (4)$$

式中: C_p 为常压热容; k 为材料热导率; T 为温度; Q 为热源; Q_{rad} 为总体积辐射耗散; ε_n 为净辐射系数; k_B 为玻尔兹曼常数; e 为电子电荷; \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{J} 为电流密度。

(3) 动量守恒方程。

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) \right] = -\nabla p + \nabla \cdot [\eta (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \mathbf{F} \quad (5)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (6)$$

式中: p 为压强; η 为流体动态粘度; \mathbf{F} 为洛伦兹力; \mathbf{B} 为磁通密度。

(4) 状态方程。

$$p = \rho RT \quad (7)$$

式中: R 为理想气体常数。

(5) 电磁场方程。

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (8)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (10)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (11)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (12)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (13)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (14)$$

式中: σ 为电导率; φ 为电势; \mathbf{A} 为磁矢势; μ 为磁导率。

文中建立如图6所示的气吹灭弧二维仿真模型。设定仿真域材料为空气,空气的密度、电导率、比热容、热导率、辐射传热系数等参数随温度的变化曲线由文献[20-21]提供。

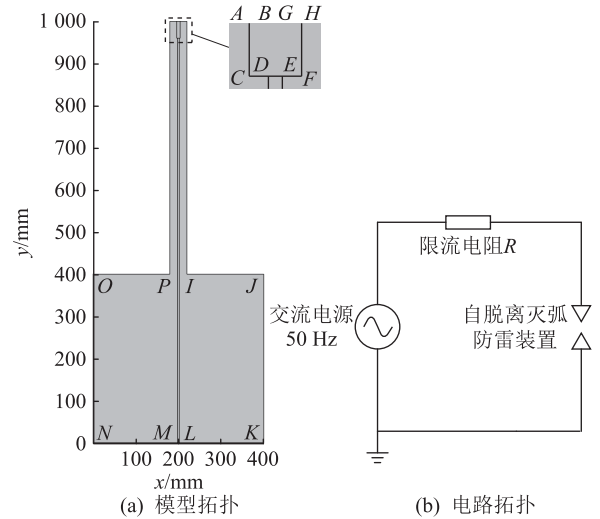


图6 模型拓扑与电路拓扑

Fig.6 Model topology and circuit topology

模型中电极半径为4 mm,灭弧筒半径为20 mm,装置上电极与下电极的距离为960 mm。对于气流传热场,AB、GH边界为气流入口边界,在仿真开始0.5 ms时,气流开始作用于电弧。IJKL、MNOP边界为气流出口边界,气压设置为1个大气压。仿真中认为电弧通道已存在,域DELM为电弧通道,其

初始温度设定为 5 000 K^[23-24],其他域的初始温度设定为 300 K。对于电磁场,边界 *CF* 为上电极,设置为电路终端,边界 *LM* 为下电极,设置为接地。工频电弧的电源由外接电路提供,外接电路由电压峰值为 28 755 V 的工频交流电源、限流电阻、电弧端子以及接地节点构成。文中针对装置熄灭全波电流峰值为 5 kA 工频电弧时的工况进行仿真研究,因此仿真中限流电阻 *R* 阻值选为 5 Ω。

3 仿真结果与分析

3.1 不同气流速度峰值下电弧熄灭情况

气吹灭弧方式中气流速度峰值大小决定电弧对流散热功率的大小,对灭弧的成功与否影响显著,气流速度峰值为图 3 中气流速度波形的最大值。为研究气流速度峰值对电弧熄灭情况的影响以及装置灭弧的临界气流速度峰值,理论电流的幅值设为 5 kA,为保证电弧可持续燃烧,在电流初始相角为 18°的条件下,分别对气流速度峰值为 200 m/s、300 m/s、400 m/s、500 m/s 时的电流熄灭情况进行仿真,电弧的电压与电流波形如图 7 所示。

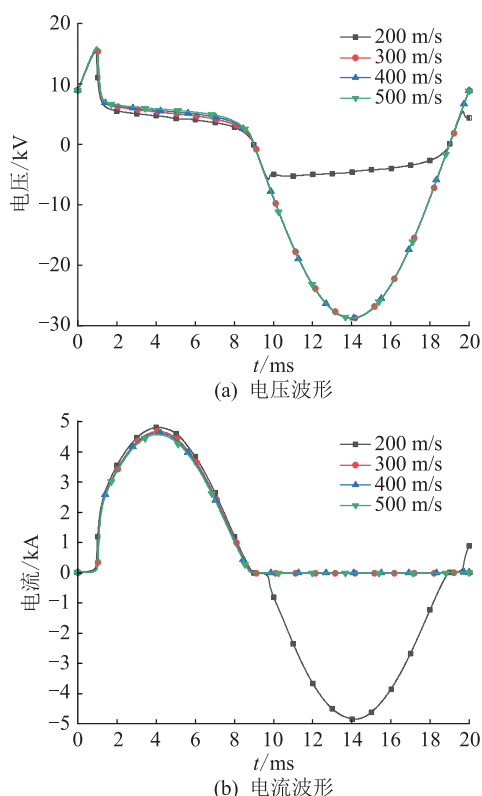


图 7 不同气流速度峰值下的电流与电压波形
Fig.7 Current and voltage waveforms at different airflow speeds

当气流速度峰值高于 300 m/s 时,随着气流速度峰值增大,电弧电压波形的鞍部逐渐升高,而电弧电流峰值逐渐降低,说明随着气流速度峰值增

大,电弧的等效电阻升高。气流速度峰值增加进一步缩短电弧熄弧时间,在电弧熄灭后将更快速冷却电弧通道,并延长电弧去游离过程时间,防止电弧发生重燃,能有效提高装置灭弧的可靠性。

当气流速度峰值为 200 m/s 时,在电流归零后约 1 ms,电弧电流上升,说明电弧发生重燃。气流速度为 200 m/s、仿真时间为 8 ms 时电弧的温度分布与电导分布如图 8 所示。气体速度较低时,气流无法较好地压缩电弧,电弧区域内的温度相较于气流速度峰值为 400 m/s 情况下要更高。同时由于气流对电弧的作用力要小于电弧洛伦兹力,电弧发生弯曲现象,加热灭弧管口附近空气,在管口形成高温区,出现“电弧堵塞”现象。气体的流动受阻,降低电弧对流散热功率,电弧温度难以下降。因此电源电压过零时,电弧通道仍然保持较高温度与良好导电性。电压过零并恢复时电弧迅速重燃。

由仿真结果可知,装置的临界熄弧气流速度峰值在 200 m/s 至 300 m/s 之间,经过参数化扫描,得到装置的临界熄弧气流速度峰值为 243 m/s。装置的气流速度峰值为 400 m/s,说明装置能够有效熄灭电弧,在文中后续的仿真中选取装置的气流速度峰值为 400 m/s。

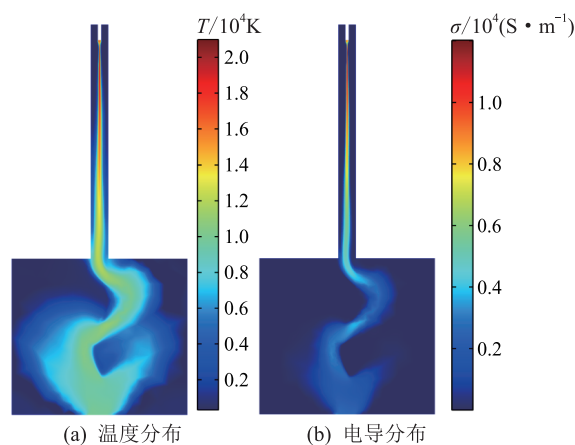


图 8 电弧堵塞现象温度分布与电导分布
Fig.8 Temperature distribution and conductance distribution of arc clogging phenomenon

3.2 工频电流初始相位对电弧熄灭的影响

为研究工频电流初始相位对电弧熄灭情况的影响,气流速度峰值为 400 m/s 条件下对工频电流初始相位为 18°、45°、90°、135°的电弧熄灭情况分别进行仿真模拟。各仿真条件下的电弧电流及电压波形如图 9 所示。

由图 9 可知,在纵向气流的作用下,电弧的电压波形呈较为典型的“马鞍”形。电弧刚形成时,由于

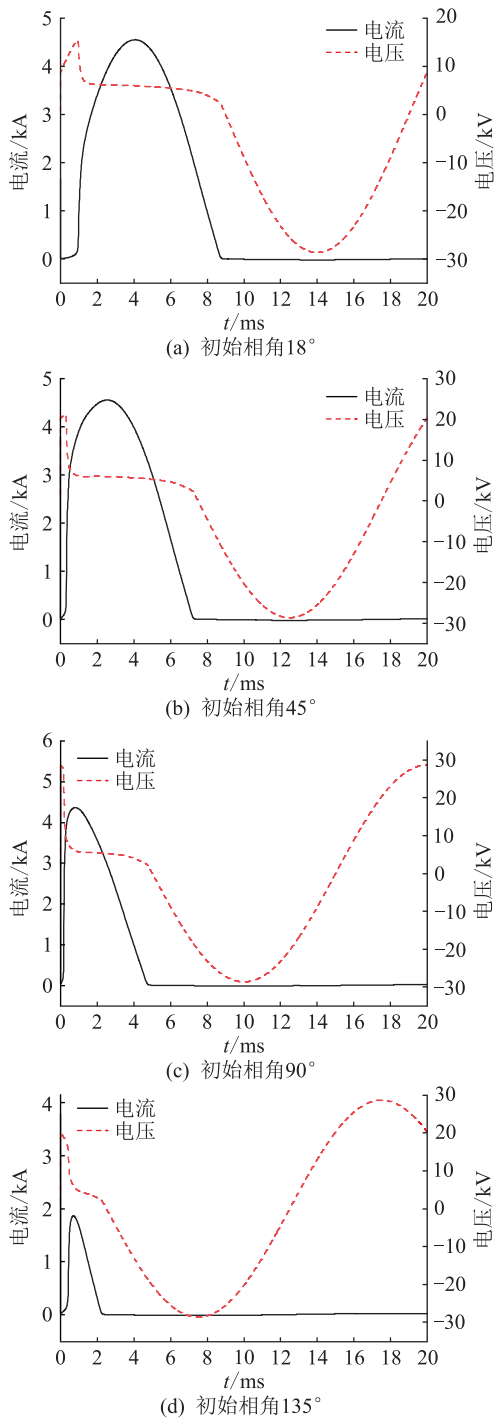


图9 不同初始相角时的电流与电压波形
Fig.9 Current and voltage waveforms at different initial phase angles

电弧通道内温度为 5 000 K, 电弧等效电阻较高, 因此在工频电流刚注入电弧通道时, 电弧两端电压较高。工频电流注入一段时间后, 电弧温度迅速升高, 电弧电导率随之增加, 电弧等效电阻迅速降低, 电弧两端电压相应降低, 电弧进入稳定燃烧阶段。由电压波形可知, 电弧稳定燃烧时, 电弧处的压降约为 5 kV。在气流的作用下, 仿真中 4 种状态下的电弧都在电弧电压过零前就已熄弧。原因是当工

频电压接近过零点时, 电弧焦耳热功率较低, 高速气流在与电弧焦耳热功率的竞争中取得优势, 电弧温度迅速降低, 空气恢复绝缘特性。由仿真中得到当电流投入相角低于 90° 时, 电弧的电流幅值最高可达到 4.5 kA; 当电流投入相角大于 90° 时, 由于此时工频电源电压瞬时值较低, 电路中无法形成较大的电流, 电弧的电流幅值仅为 1.8 kA。

电弧电导分布云图如图 10 所示, 在气流的作用下, 工频电流初始相位为 18° 、 45° 、 90° 、 135° 的电弧弧柱出现断裂的时刻分别为 8.9 ms、7.3 ms、4.8 ms 以及 2.3 ms, 装置在电压过零区间存在提前熄弧现象。电弧熄灭时间均小于半个工频周期, 且在电角度为 $180^\circ \sim 360^\circ$ 的区间内未观察到电弧复燃。

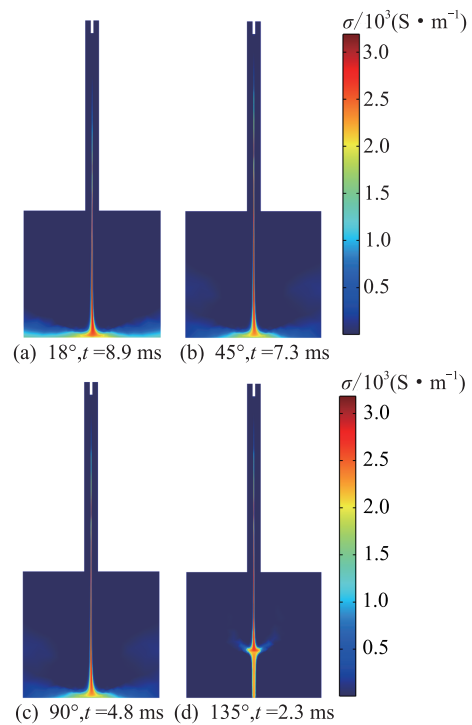


图10 不同初始相角情况下电弧熄灭时刻的电导率云图
Fig.10 The conductance distribution cloud diagram of arc extinguishment under different initial phase angles

综上, 电弧的熄灭时间主要与工频电流的初始相位有关, 且在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的电角度区间内呈现电弧熄灭时间随电流初始相角的增大而减小的趋势。因此, 为保证装置灭弧的可靠性, 可以增加装置中的产气材料, 使装置的持续产气时间大于 10 ms。

3.3 装置熄弧过程分析

文中选取在装置气流速度峰值为 400 m/s、电弧电流为 5 kA 的工况下进行仿真, 电流初始相位为 18° 。仿真得到的电弧温度分布云图与电导分布云图分别见图 11 和图 12。基于云图对电弧熄灭过程进行分析, 电弧的熄灭过程可以分为以下 5 个阶段。

(1) 0 ms—0.5 ms 阶段:产气筒内未产生气流。随着电弧电流的逐渐增加,电弧通道在焦耳热的作用下迅速升温。 $t=0.5$ ms 时电弧通道内最高温度达 6 327 K,电弧进入稳定燃烧状态。

(2) 0.5 ms—3.1 ms 阶段:气流速度于 0.5 ms—2.0 ms 内逐渐升高至 400 m/s,电弧整体被气流压缩,电弧半径减少。 $t=3.1$ ms 时气流已达电弧的下弧根处,此时电弧整体温度均高于 10 000 K。电弧温度进一步升高的原因为弧上弧根半径在气流作用下减少,导致电弧与空气接触面积减少,电弧对流散热功率降低,最终致使电弧温度升高。对于灭弧管外区域,气流的主要作用为增大电弧对流散热功率;电弧未被气流压缩,对电弧温度降低有利。

(3) 3.1 ms—5.9 ms 阶段:电弧电流呈先上升后下降趋势,电弧焦耳热功率与电弧的能量耗散功率相近,处于稳态燃烧阶段,温度变化较小。

(4) 5.9 ms—8.9 ms 阶段:电弧电流持续下降,但由于温度变化滞后于电流变化,因此气流仍然保持较高速,电弧产热功率逐渐降低至电弧能量耗散功率以下,电弧温度降低。在 8.9 ms 时,电弧上

弧根处已出现温度低于 4 000 K 的区域,由电弧熄灭物理特性^[25-26]可知,该区域中的电弧电导已低于 800 S/m,说明电弧已经断裂,该区域内空气逐渐恢复绝缘性能。

(5) 8.9 ms—9.5 ms 阶段:电弧已经断裂,灭弧管内空气温度已降低至 2 000 K 左右,管内空气绝缘性能完全恢复,电源已无法继续向电弧提供能量,电弧彻底熄灭无法重燃。

基于以上仿真结果,自脱离防雷装置产生气流的峰值速度为 400 m/s 时,装置可在半个工频周期内熄灭工频电弧,且不会发生电弧重燃。

4 试验验证

4.1 试验方案

为验证文中模型的准确性,于国家智能电网输配电设备质量监督检验中心搭建如图 13 所示的大电流燃弧试验系统。系统包括工频电源、短路实验用变压器 YDJ-12000/35、触发脉冲发生器、数字示波器、Phantom V611 高速摄像机以及自脱离防雷装置。其中,工频电源由电网 110 kV 变压后进行供

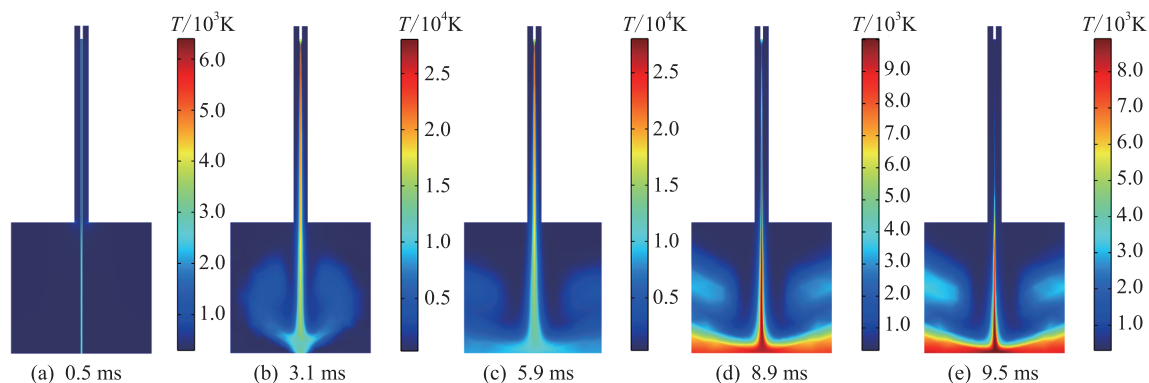


图 11 不同时间点的温度分布云图

Fig.11 Temperature distribution cloud diagram at different time points

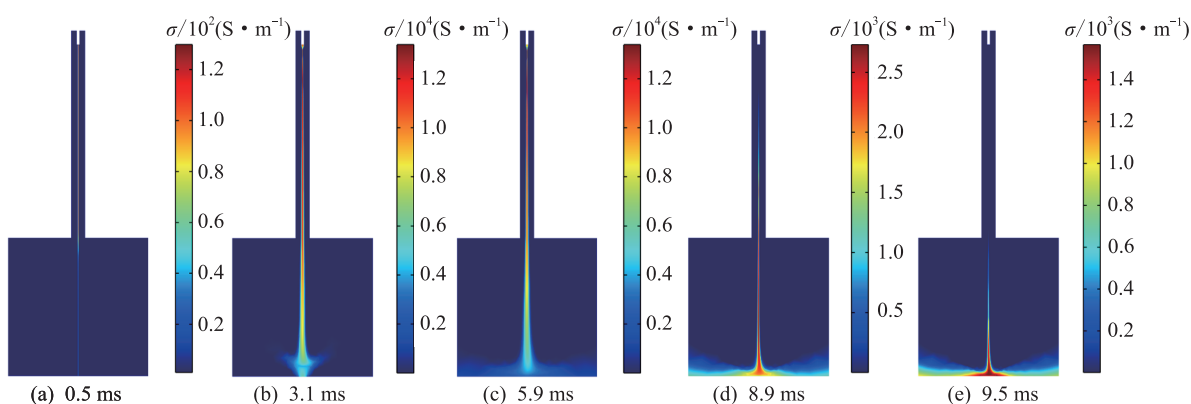


图 12 不同时间点的电导分布云图

Fig.12 Conductivity distribution cloud diagram at different time points

电。试验中采用熔丝连接自脱离防雷装置上下两端电极。在试验开始后,工频电流使熔丝熔断形成电弧。受试验条件限制,试验电压为 10.5 kV,理论试验电流峰值为 5 kA。投入电源后,熔丝由于焦耳热融化并形成工频电弧。试验中采用高速摄像机拍摄电弧产生与熄灭的全过程,并利用数字示波器记录电流与电压波形。

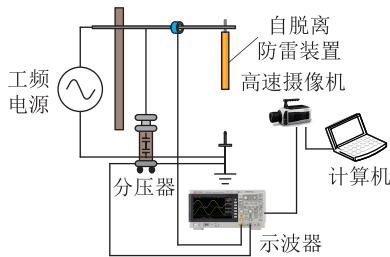


图 13 大电流燃弧试验系统示意

Fig.13 Schematic diagram of high current arcing test system

4.2 试验结果

试验过程中电弧发展过程的高速摄像图像如图 14 所示。

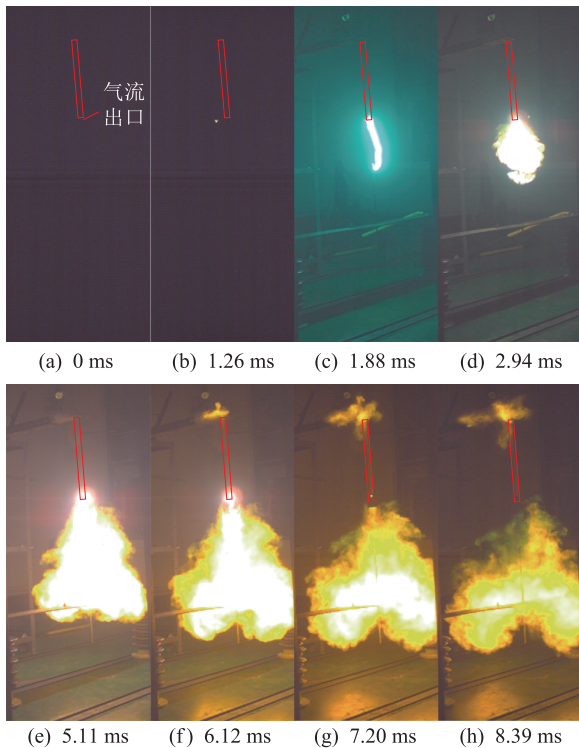


图 14 大电流燃弧试验高速摄像照片

Fig.14 Photographs of high-current arcing test

试验中电流的投入相角为 14° , 电压的幅值为 10.5 kV, 电弧电流为 3.8 kA。由图 14 可知, $t = 1.88$ ms 时金属熔丝完全熔断, 电弧形成, 装置产气筒中的材料在电弧热量作用下产生气体; 在 2.94 ms—6.12 ms 期间, 灭弧筒下方的气体亮度逐渐降低, 可

说明在装置气流的作用下电弧的温度逐渐降低; $t = 7.20$ ms 时, 在自脱离防雷装置的气流出口处可观察到断裂的电弧, 说明此时电弧已经熄灭; $t = 8.39$ ms 时, 原电弧通道内已无法观察到明亮的燃气, 此时电弧通道内温度已经较低, 空气已经恢复绝缘性能, 在电源电压的作用下电弧不再重燃。

为验证仿真模型的准确性, 以试验中的条件作为仿真模型的边界条件进行仿真, 装置气流速度峰值设定为 400 m/s。得到电流波形如图 15 所示。

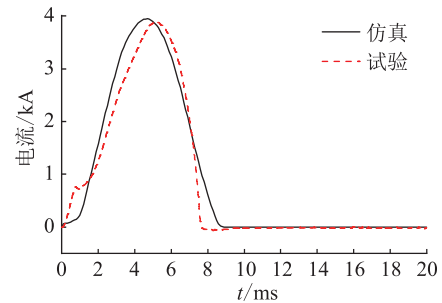


图 15 试验与仿真电流波形对比

Fig.15 Comparison of current waveforms between test and simulation

从图 15 的电流波形可知, 在电弧熄灭后, 电弧两端的电压恢复为电源电压, 但流过装置的电流维持零值, 说明电弧未发生重燃, 自脱离防雷装置能够有效熄灭电弧。同时, 仿真电流与实际电流波形较为接近, 说明文中搭建的有限元仿真模型能够准确描述电弧的熄弧特性。

其他工况下的试验结果与仿真结果对比如表 2 所示。在不同工况下, 仿真中得到的灭弧时间与试验的灭弧时间较为接近, 模型计算结果能为装置灭弧参数的设计提供参考。

表 2 大电流燃弧试验与仿真结果比较
Table 2 Comparison between high-current combustion test and simulation results

电弧电流/ kA	投入相角/ ($^\circ$)	试验灭弧 时间/ms	仿真灭弧 时间/ms
3.9	14	7.2	8.7
4.7	41	6.0	6.8
4.8	89	4.5	4.5
1.4	133	2.2	2.3

5 结论

文中基于磁流体动力学模型建立新型 35 kV 自脱离防雷装置灭弧过程的二维有限元模型, 分析电流初始相位和气流速度峰值对电弧熄灭特性的影响, 并对模型计算得到的电弧电流波形、电弧熄灭时间进行试验验证。主要研究结论如下:

(1) 建立的磁流体力学电弧模型可准确描述自脱离防雷装置灭弧过程中电弧宏观物理特性并揭示装置熄弧原理,装置能在电压过零前熄灭电弧。

(2) 自脱离防雷装置的灭弧时间主要与工频电流初始相位有关。在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的电角度区间内,工频电流初始相角越大,电弧熄灭时间越短。

(3) 气流速度峰值对电弧熄灭具有决定性作用,装置熄弧临界气流速度峰值为 243 m/s。气流速度峰值高于 243 m/s 时,气流速度峰值越高,装置熄弧时间越短。气流速度峰值低于 243 m/s 时,气流对电弧抑制效果较差,出现“电弧堵塞”现象,导致电弧无法熄灭。

(4) 通过改进装置产气材料以增加气流速度峰值,延长装置气流作用时间,能够有效提高装置灭弧与抑制重燃的性能。

致谢

本文得到广东电网有限责任公司科技项目(030800KK52180031)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 陈维江,谢施君,刘楠,等. 不同电压等级架空输电线路雷电防护特征分析[J]. 电力建设,2014,35(11):85-91.
CHEN Weijiang, XIE Shijun, LIU Nan, et al. Lightning protection characteristics of overhead transmission lines with different voltage grades[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(11): 85-91.

[2] 吴琛,苏明昕,谢云云,等. 基于 BP 神经网络的输电线路雷击故障预测[J]. 电力工程技术,2020,39(5):133-139.
WU Chen, SU Mingxin, XIE Yunyun, et al. BP neutral network based lightning fault prediction of transmission lines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 133-139.

[3] 晏威,肖纯,吴细秀,等. 基于雷电活动特征的 10 kV 配电线路雷击跳闸率计算[J]. 高电压技术,2021,47(3):1118-1127.
YAN Wei, XIAO Chun, WU Xixiu, et al. Calculation of lightning trip out rate of 10 kV distribution lines based on lightning activity characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1118-1127.

[4] OHTAKA T, KAMEDA H. Effective installation strategies of fault current interrupting arcing horns considering operational coordination with responses of line protection relays[J]. Electrical Engineering in Japan, 2018, 202(2): 3-11.

[5] 李籽剑. 多管道结构压爆气流冲击熄弧机理研究[D]. 南宁:广西大学,2020:29-38.
LI Zijian. Study on arc quenching mechanism of pressurized explosion airflow in multi-pipe structure[D]. Nanning: Guangxi University, 2020: 29-38.

[6] 王巨丰,徐宇恒. 110 kV 固态气体灭弧防雷间隙工频续流遮断试验[J]. 广西大学学报(自然科学版),2021,46(2):414-421.

WANG Jufeng, XU Yuheng. Power frequency follow current interruption test of 110 kV solid gas arc-quenching lightning protection gap[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2021, 46(2): 414-421.

[7] 彭斐,王巨丰,张奇星,等. 喷射气流灭弧防雷间隙气流通道优化[J]. 南方电网技术,2021,15(6):43-48.
PENG Fei, WANG Jufeng, ZHANG Qixing, et al. Airflow channel optimization of jet stream arc-quenching lightning protection gap[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(6): 43-48.

[8] 周鑫. 固相气流截断电弧及重燃抑制的机理[D]. 南宁:广西大学,2019:13-14.
ZHOU Xin. Mechanism of solid-phase gas flow intercepting arc and reignition suppression[D]. Nanning: Guangxi University, 2019: 13-14.

[9] 韩力,周鑫,李籽剑,等. 基于 Mayer 电弧模型固相气流对电弧熄灭的有效性分析[J]. 电瓷避雷器,2020(3):74-80.
HAN Li, ZHOU Xin, LI Zijian, et al. Analysis of the validity of solid phase airflow to arc extinction based on mayer arc model[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3): 74-80.

[10] WU D, JI Z L, WANG J F. Simulation and experimental analysis of multi-chamber arc-quenching arresters (MCAA) for 10 kV transmission lines[J]. Energies, 2021, 14(19): 6185.

[11] 王巨丰,黄上师,王熾蕾,等. 架空线路用气体灭弧防雷发展综述[J]. 高电压技术,2021,47(9):3189-3199.
WANG Jufeng, HUANG Shangshi, WANG Yanlei, et al. Development of gas arc-extinguishing lightning protection in overhead lines[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3189-3199.

[12] 韩力. 气吹冲灭电弧机理及其电弧状态的研究[D]. 南宁:广西大学,2020:10-11.
HAN Li. Study on the mechanism and arc state of gas blowing and extinguishing arc[D]. Nanning: Guangxi University, 2020: 10-11.

[13] GUO T, ZHOU W J, SU Z M, et al. A multigap structure for power frequency arc quenching in 10-kV systems[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(11): 2622-2631.

[14] 郭婷,周文俊,黄海鲲,等. 多间隙灭弧结构熄弧工频电弧的仿真与试验[J]. 中国电机工程学报,2016,36(10):2853-2861.
GUO Ting, ZHOU Wenjun, HUANG Haikun, et al. Simulation and experiment on arc quenching structure with multi-gaps to quench the power frequency arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2853-2861.

[15] 黄嘉曦,王巨丰,闫坤,等. 基于高速气流灭弧的防雷间隙的仿真分析和试验研究[J]. 电瓷避雷器,2019(5):92-98.
HUANG Jiayi, WANG Jufeng, YAN Shen, et al. Simulation analysis and experimental research on lightning-proof gap based on high speed air exhaust arc[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5): 92-98.

[16] 郑传啸,王巨丰,郭克竹,等. 基于强气吹扰动下的建弧率计算模型研究[J]. 电瓷避雷器,2018(6):122-131.

- ZHENG Chuanxiao, WANG Jufeng, GUO Kezhu, et al. Calculation model of arc establishing rate under the disturbance of strong air blowing [J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2018 (6):122-131.
- [17] 任华, 马凝芳, 赵淳, 等. 新型 500 kV 输电线路并联间隙在高海拔条件下的选型与防雷效果 [J]. *南方电网技术*, 2021, 15(3):83-91.
- REN Hua, MA Ningfang, ZHAO Chun, et al. Type-selection and lightning protection effect of new-type 500 kV transmission line parallel gaps in high altitude region [J]. *Southern Power System Technology*, 2021, 15(3):83-91.
- [18] SIMA W X, JIA W B, YUAN T, et al. Dynamic evolution of arc plasma in a semi-enclosed arc-extinguishing chamber and its influencing factors [J]. *Physics of Plasmas*, 2021, 28(6):063510.
- [19] 王巨丰, 郭伟, 郭峰, 等. 喷射气体灭弧防雷间隙的灭弧效果 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(3):751-758.
- WANG Jufeng, GUO Wei, GUO Feng, et al. Arc-extinguishing effects of jet gas arc-extinguishing lightning protection gaps [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(3):751-758.
- [20] MÜRMANN M, CHUSOV A, FUCHS R, et al. Modeling and simulation of the current quenching behavior of a line lightning protection device [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(10):105203.
- [21] NAGHIZADEH-KASHANI Y, CRESSAULT Y, GLEIZES A. Net emission coefficient of air thermal plasmas [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, 35(22):2925-2934.
- [22] LIU X J, HUANG X, CAO Q C. Simulation and experimental analysis of DC arc characteristics in different gas conditions [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, 49(3):1062-1071.
- [23] YANG Z F, XU P, WEI W F, et al. Influence of the cross wind on the pantograph arcing dynamics [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(8):2822-2830.
- [24] HUO J D, WANG Y F, CAO Y. 3D computational study of arc splitting during power interruption: the influence of metal vapor enhanced radiation on arc dynamics [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(8):085502.
- [25] 杨昆, 陈雷, 程凡翀, 等. 大气压空气滑动弧等离子体发射光谱诊断 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(10):3006-3011.
- YANG Kun, CHEN Lei, CHENG Fanchong, et al. Emission spectroscopy diagnosis of air gliding arc plasma under atmospheric pressure condition [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(10):3006-3011.
- [26] 王飞鸣, 赵义松, 史可鉴, 等. 高压 SF₆ 断路器开断零区电弧特性仿真分析 [J]. *高压技术*, 2019, 45(5):1420-1428.
- WANG Feiming, ZHAO Yisong, SHI Kejian, et al. Simulation analysis of arc characteristics on breaking zero zone in high voltage SF₆ circuit breaker [J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(5):1420-1428.

作者简介:



谢从珍

谢从珍(1973),女,博士,教授,研究方向为新型功能电介质材料研发及测试、电力大数据及输电线路防灾减灾技术(E-mail: xiecongzheng@scut.edu.com);

李彦丞(1998),男,硕士在读,研究方向为输电线路防雷;

杜岩(1997),男,硕士在读,研究方向为配电网大数据。

Simulation research on arc extinguishing characteristics of 35 kV self-detaching lightning protection device based on magnetohydrodynamics

XIE Congzhen¹, LI Yancheng¹, DU Yan¹, XIE Xinhao¹, XIE Xihan², CHEN Xiyang³

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Zhanjiang Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhanjiang 524000, China;

3. Shenzhen Dailu Technology Co., Ltd., Shenzhen 518027, China)

Abstract: To explore the factors affecting the arc extinction performance of the self-disengaging lightning protection device, a numerical simulation model of arc extinction process of the device based on magneto-hydrodynamic theory is established in this paper. The effect of the initial phase angle of the current and the peak airflow velocity of the device on the arc extinction performance of the device is investigated, and the validity of the model is verified by high-current arc-burning tests. The arc extinction time of the device is related to the initial phase of the current, and it decreases with the increase of the initial phase of the current in the interval of 0° ~ 180° electrical phase. The peak airflow velocity of the device is critical to arc extinction. When the peak airflow velocity of the arc extinction is higher than 243 m/s, the arc can be extinguished in half a period and the re-ignition is suppressed. When the peak airflow velocity of the arc extinction is lower than 243 m/s, the 'arc blockage' appears at the outlet of the gas arc extinction cylinder of the device, leading to the arc re-ignition. The findings of this paper provide a theoretical basis for optimizing the arc extinction performance of air-blown lightning protection devices.

Keywords: lightning; thermal plasma; magnetohydrodynamics; electric arc; arc extinguishing device; power transmission line

(编辑 李栋)